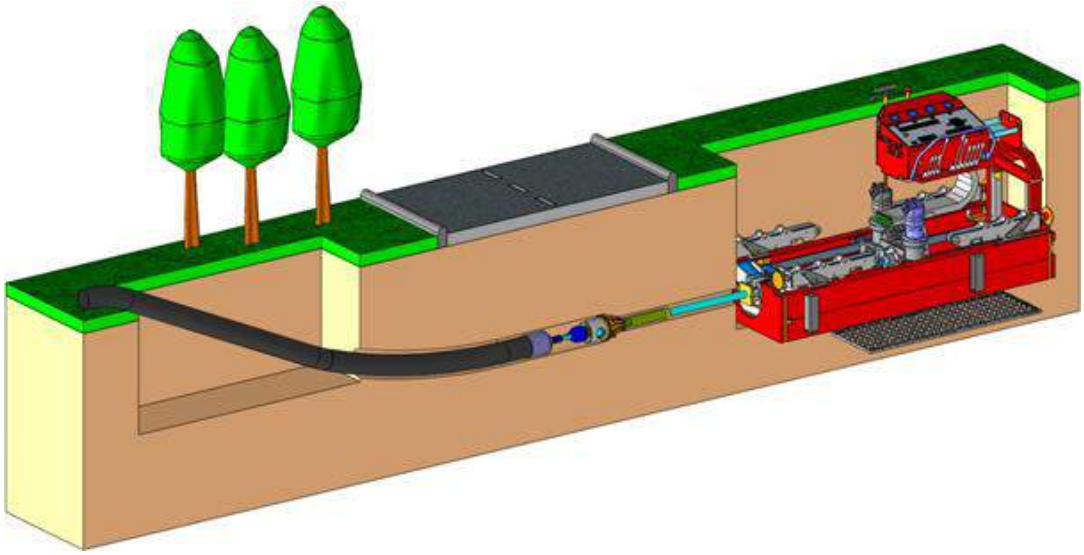
Veille technologique Mastère Spécialisé Ingénierie et Gestion du Gaz

17/03/2016

Etat de l'art des techniques de travaux sans tranchée



Une réponse durable aux chantiers urbains de demain

MINES ParisTech

ETUDIANT: HUGO KUNTZ

REFERENT : GILLES GOIFFON

Remerciement

Je tiens à remercier particulièrement les personnes suivantes pour leur implication dans mon projet :

- Mon tuteur de Mastère et référent industriel pour ma veille, **M. Gilles GOIFFON** de la société GRDF, qui m'a suivi tout au long de ce travail de recherche, et s'est rendu disponible lorsque cela était nécessaire.

- **M. Jean-Michel BALMAT** de la société Piasio en Suisses, qui a montré un intérêt certain envers mon projet et avec lequel j'ai fortement échangé. Il m'a envoyé grands nombres de documents et vidéos, et a toujours su répondre à mes questions. Il a su de plus, apporter son expertise pour m'aider à réaliser le bilan carbone d'un chantier sur CANOPEE. Je lui souhaite beaucoup de réussite dans son projet de création d'entreprise.

- **M. Sylve CASSINI** de la société SPAC qui a eu l'amabilité et la confiance de me transmettre ses identifiants personnels pour pouvoir avoir accès au logiciel CANOPEE.

- **M. Michel HARDY** travaillant au centre de recherche d'ENGIE le CRIGEN, qui m'a apporté de précieuses informations concernant la partie innovation des techniques sans tranchée, notamment sur la technique Keyhole et le programme ORFEUS.

- **Mme. Pauline VITTE, ainsi que des chargés d'affaires** de la société GRDF qui m'ont transmis des informations sur la partie comparaison économique.

- **Mme. Virginie BAFFET** et **Mme Monique LAC** de la FSTT (France Sans Tranchée Technologie) pour leurs collaborations et leurs aides dans la recherche de documents au centre de la FSTT, c'est grâce à elles que j'ai pu notamment me procurer le travail de M. AIT-AISSA, ainsi que d'autres documentations présentes uniquement à la FSTT.

- **Mr. Christian LEGAZ** gérant de la société AVR ingénierie et **Mr. Giuseppe SPINELLO** de la société Suisse SIG, pour leurs échanges.

Enfin, je remercie toutes les personnes que je n'ai pas citées mais qui ont su répondre à mes questions, ou bien me transmettre un contact et avec lesquelles j'ai pu échanger de manière ponctuelle.

Comme il est possible de le constater de nombreuses personnes se sont impliquées de près ou de loin dans ce projet, et ces collaborations furent particulièrement plaisantes et stimulantes dans l'élaboration de ce rapport et m'ont apporté un enrichissement personnel et professionnel certain.

Résumé

Chaque citoyen fait usage des réseaux enterrés, dans sa vie au quotidien, sans y penser. Les domiciles sont reliés à cette toile souterraine pour le confort de tous. Cependant, ces réseaux impliquent des travaux de renouvellement et d'extension, afin d'assurer leur bon fonctionnement au quotidien pour les utilisateurs finaux. Pourtant, les travaux d'aménagement urbains, en particulier dans les centres villes, sont de moins en moins bien accueillis par les riverains. En effet, les travaux « classiques » avec ouverture de tranchée peuvent affecter de façon non négligeable l'environnement et l'économie locale, avec des nuisances significatives. Au-delà d'une simple solution technique face à un obstacle, les technologies sans tranchée s'inscrivent dans une politique de développement durable et de diminution d'empreinte carbone sur notre environnement. L'objectif de cette étude est de montrer au travers d'une analyse technique, économique, environnementale, mais aussi des « coûts sociaux », que les techniques de travaux sans tranchée sont une solution pertinente pour répondre aux enjeux des chantiers urbains de demain.

Abstract

Every citizen makes use of underground networks, in his daily life, without thinking about it. All housing is connected to this underground canvas for everyone's comfort. However, these networks involve renewal and extension works to ensure their proper functioning in everyday life for end users. Nevertheless, urban development sites, especially in city centers, are less and less well received by residents. Indeed, "classic" work sites with trench openings can have a significant impact on the environment and the local economy, with substantial pollution. Beyond a simple technical solution to an obstacle, the trenchless technologies are part of a policy of sustainable development and reduction of carbon footprint on our environment. The objective of this study is to show through a technical, economic, environmental but also "social costs" analysis, that the techniques of trenchless works are an appropriate solution to meet the challenges of urban projects of tomorrow.

Glossaire

- ***FSTT :*** Fédération Sans Tranchée Technologie ou originellement French Society for Trenchless Technology
- ***GES :*** Gaz à effet de serre
- ***GPR :*** Ground Penetrating Radar ou en français Radar à Pénétration de Sol (RPS)
- ***GRDF :*** Gaz Réseaux Distribution France
- ***PE :*** Polyéthylène
- ***PP :*** Polypropylène
- ***PVC :*** Polychlorure de vinyle

Table des matières

Remerciement 1
Résumé 2
Abstract 2
Glossaire 3
Introduction 6
I) Travaux sans tranchée : Généralités 7
1. Définitions 7
2. Historique des travaux sans tranchée 7
3. Le marché Français des travaux sans tranchée en quelques chiffres 8
4. Les avantages des travaux sans tranchée 8
5. Contraintes des techniques sans tranchée 9
6. Opportunités en France 10
i) Nouvelle réglementation DT/DICT 10
ii) Connaissance du sous-sol 10
7. Réglementation dans la réalisation de travaux sans tranchée 10
II) Un éventail des techniques de travaux sans tranchée 12
1. Les techniques de pose de réseaux sans tranchée 12
a. Forage horizontal dirigé humide 12
b. Fusée pneumatique 14
c. Pousse tube ou fonçage 15
d. Forage tarière 17
e. Micro tunnelier 18
f. Récapitulatif des techniques sans tranchée de pose d'ouvrages neufs 20
2. Les techniques de réhabilitation de réseaux sans tranchée 21
a. Réparation ponctuelle 21
b. Réparation continue 24
c. Remplacement par méthode destructive 27
III) Approche économique, environnementale et sociétale des travaux avec ou sans tranchée .. 29
1. Les nuisances de chantiers traditionnels et leur réduction par les techniques sans tranchée. 29
2. Coûts sociaux 32
a. Les méthodes d'évaluation des coûts sociaux. 33
b. Méthodologie d'évaluation du coût social d'un chantier d'AIT-AISSA 34
c. Propositions alternatives pour prendre en compte les couts sociaux 36
3. Comparaisons environnementales et économiques entre travaux sans tranchée et travaux traditionnels 37

a. Comparatifs FSTT 37
b. Bilan carbone – logiciel CANOPEE – 40
c. ECO-CANA : logiciel d'évaluation comparative des consommations d'énergies et des émissions de gaz à effet de serre pour pose de canalisation 43
d. Comparaison économique succincte appliquée à un exemple GRDF 47
IV) Innovations et perspectives 48
1. Technique de micro-forage : Keyhole 48
2. ORFEUS 49
3. Tranchée étroite 51
4. Projet FURET 52
Conclusion 53
Bibliographie 55
Annexes 58

Introduction

Les travaux d'aménagement urbains, en particulier dans les centres villes, sont de moins en moins bien accueillis par les riverains. Les travaux « classiques » avec ouverture de tranchée peuvent affecter de façon non négligeable l'économie locale. En effet, les commerçants sont directement touchés par les rues barrées, les conducteurs et riverains sont exaspérés par les embouteillages, ainsi que par les nuisances occasionnées par les travaux (poussière, bruits, barrières, …). De plus, l'ouverture de tranchée implique des problèmes liés à la sécurité pour les travailleurs comme pour les passants (risque de chute notamment).

A l'origine conçues et utilisées uniquement pour franchir des obstacles tels que des cours d'eau, des chemins de fer ou autres, les techniques de travaux sans tranchée s'avèrent être aujourd'hui, une solution alternative efficace pour pallier à ces problématiques. En net développement depuis ces 20 dernières années, ces méthodes apportent une solution pertinente aux perturbations engendrées par les travaux urbains. Elles permettent de développer, entretenir et restaurer les réseaux souterrains (eau, gaz, électricité, assainissement, télécom), tout en préservant notre environnement et sans nuire aux usagers.

Cependant, les gênes ne sont pas les seuls enjeux des travaux urbains. Les dommages aux ouvrages sont le fléau des concessionnaires des réseaux enterrés, tant du point de vue économique que du point de vue de la sécurité et de l'impact sur l'environnement. A titre d'exemple, plus de 90 000 incidents sur des canalisations gaz sont recensés chaque année en Europe et plus de 100 000 aux États-Unis. [1] D'où la nécessité, que ce soit avec ou sans ouverture de tranchée, d'une connaissance la plus juste possible de l'état du sous-sol (nature, encombrement, localisation précise des réseaux). La sécurité et la fiabilité des techniques utilisées lors de la pose ou le renouvellement de canalisation, pour les opérateurs comme pour les utilisateurs finaux, sont également des enjeux majeurs des techniques de pose et de réhabilitation de réseaux.

Ce rapport a pour but de montrer comment les techniques sans tranchée, en perpétuelle évolution depuis plus de 30 ans, seront en mesures de répondre aux attentes des chantiers urbains de demain.

Après avoir présenté le contexte lié à ces techniques (avantages, contraintes, réglementation,…), un éventail des procédés et méthodes sans tranchée sera dressé. Par la suite, une analyse comparative sur les impacts sociétaux, économiques et environnementaux permettra de mettre en lumière les réels atouts de ces technologies. Enfin, quelques innovations dans le domaine révèleront les perspectives d'avenir de la filière.

I) Travaux sans tranchée : Généralités

1. Définitions

La FSTT énonce la définition suivante : « on appelle "sans tranchée", les techniques utilisées pour la pose, la réhabilitation, l'auscultation et le diagnostic de réseaux enterrés de toute nature, *sans ouvrir de tranchée.* » [2]

Ce sont plus d'une vingtaine de techniques différentes, qu'il est possible de classer en deux catégories distinctes de travaux :

- ✓ les techniques de pose de réseaux
- ✓ et de réhabilitation de réseaux *(définitions dans la partie « Les techniques de réhabilitation de réseaux sans tranchée » p.19)*

Les techniques sans tranchée permettent la mise en œuvre ou la réhabilitation de tous les types de réseaux enterres classiques

- ✓ électricité,
- ✓ gaz,
- ✓ téléphone et fibres optiques,
- ✓ éclairage public
- ✓ assainissement d'eau
- ✓ eau potable

En pratique, il est de coutume de considérer les travaux sans tranchée pour les réseaux d'un diamètre inférieur à ***1 200 mm.*** Un diamètre limite en dessous duquel il est très compliqué d'évoluer et de faire intervenir des hommes et des machines. [3]

2. Historique des travaux sans tranchée

« L'année 1948 marque la première étape dans l'expérimentation et l'exploitation des techniques sans tranchées. Le Japon alors pionner dans cette pratique sera rejoint par l'Allemagne dans les années 60 puis par le Royaume-Uni, et les Etats-Unis. » [4]

En Grande-Bretagne, la notion de Technologies Sans Tranchée est née en 1986 avec la création de l'I.S.T.T. (international Society for Trenchless Technology), association qui vise à promouvoir l'utilisation des travaux sans tranchée à l'échelle mondiale. L'équivalent français de cette association n'a vu le jour que quelques années plus tard en 1990 avec la création de la F.S.T.T. (French Society for Trenchless Technology), dont l'objectif est le même que celui de l'ISTT. Enfin en Allemagne, les techniques de Travaux Sans Tranchée sont employées depuis 1984 dû au fait notamment à un souci constant du respect de l'environnement. [5]

En France, les premiers chantiers de travaux sans tranchée sont apparus autour des années 1985 avec l'avènement de la technologie des microtunneliers. [3]

Il est tout de même important de noter que la France est globalement en retard dans l'utilisation des techniques sans tranchée, à l'opposé de ses pays voisins comme la Grande-Bretagne, l'Allemagne ou encore la Suisse.

3. Le marché Français des travaux sans tranchée en quelques chiffres

La FSTT précise qu'au début des années 2000, en France, 600 entreprises posent des canalisations. Elles emploient 30 000 salariés et ont un chiffre d'affaires de 4 milliards d'euros. Ces 600 entreprises posent des canalisations pour 4 grandes catégories de clients : les collectivités locales qui sont les principaux clients (communes, syndicats départements, régions, …), les « anciennes entreprises publiques historiques » (EDF, GDF, France Telecom), le secteur privé (essentiellement des industriels ou la grande distribution), l'État. [2] Le marché des travaux sans tranchée a été en faible progression jusqu'au début des années 2000, où elles représentaient environ 3 à 5% du marché français.[4]

Depuis, le marché des travaux sans tranchée est en nette évolution comme l'indique en 2012, Patrice Dupont président de la FSTT « Même s'il est difficile d'avancer un pourcentage exact, on peut estimer que vingt ans après, 20% des travaux réalisés sont effectués par le biais de solutions sans tranchée. »[3] Il ajoute que : « Dans le contexte actuel, quelque peu morose pour les travaux publics, le secteur des travaux sans tranchée résiste plutôt bien, avec un chiffre d'affaires annuel proche de 500 millions d'euros. »[6] L'avenir de la filière est prometteur puisque, cela sera prouvé dans ce rapport, la réduction significative des nuisances et des GES liée à l'utilisation de ces méthodes sera un atout de plus en plus déterminant pour la conduite des chantiers dans les années à venir. Ceci s'inscrit parfaitement dans les volontés politiques actuelles (COP 21, facteur 4, développement durable, …).

4. Les avantages des travaux sans tranchée

La FSTT annonce les avantages suivants pour les techniques sans tranchée par rapport aux techniques classiques avec ouverture de tranchée :

« <u>Les avantages environnementaux :</u>

- Préservation de l'environnement (et notamment moins d'émission de CO2)
- Préservation des milieux naturels, protection de la faune et de la flore
- Diminution considérable des nuisances : circulation perturbée, gaz d'échappement, bruit, poussière, pertes d'exploitation des commerçants, gaspillage de matériaux nobles,….

<u>Les avantages de sécurité :</u>

- Sécurité pour les riverains (absence de tranchée, durée des travaux réduite)
- Renforcement de la sécurité pour les travailleurs
- Renforcement de la sécurité des réseaux (meilleure connaissance du sous-sol, précision des techniques, technicité des entreprises)

<u>Les avantages techniques :</u>

- Possibilité de travaux inenvisageable autrement (sous voie ferrée, rivière, forêts,…)
- Travaux plus discrets et donc moins gênants
- Meilleure qualité globale à long terme

Les avantages budgétaires :

- Réduction du coût global, notamment sur le long terme
- Réduction de la consommation de pétrole
- Quasi suppression des pertes d'exploitation pour les commerçants
- Couts plus compétitif dans de nombreux cas. » [7]

Une étude plus poussée de ces avantages sera réalisée ultérieurement dans le rapport, notamment dans la partie *« Approche économique, environnementale et sociétale des travaux avec ou sans tranchée ».*

5. Contraintes des techniques sans tranchée

Les principales contraintes liées aux travaux sans tranchée résident dans le fait, qu'elle requiert d'une part une connaissance poussée, de la nature du sous-sol, mais surtout de son encombrement, notamment vis-à-vis des autres réseaux enterrés. En effet, les dommages aux ouvrages sont la principale crainte des concessionnaires, car ceux-ci peuvent avoir de lourdes conséquences économiques mais aussi et surtout sur la sécurité, notamment dans le gaz. « Il ne faut pas oublier que si un ouvrage gaz subit un endommagement suivi d'une fuite, du fait d'une technique sans tranchée, le gaz peut circuler dans le sol de manière invisible et imprévisible parfois sur des distances importantes. Ainsi, tout contact avec une canalisation de gaz doit être considéré comme un risque potentiel de fuite, et traité comme tel (cf. chapitre 9.2.1. « Disposition en cas d'endommagement d'un ouvrage gaz »).[8]

L'encombrement des réseaux souterrains en zone urbaine peut être très dense, comme cela peut être constaté sur le plan *(Annexe 1 :)*, des seuls réseaux enterrés électriques et de fibre optique d'un quartier de la ville de Genève. D'où l'importance de bien connaitre l'état du sous-sol, que ce soit en tranchée ou sans tranchée. Ainsi, les travaux sans tranchée nécessitent une vigilance particulière dans les étapes amont à savoir, les sondages et étude du sol pour en connaitre la nature et la localisation des autres réseaux. Ainsi, il est courant que les entreprises spécialisées dans les technologies sans tranchée, se couvrent financièrement contre ces risques qui sont censés être plus élevés pour les techniques sans tranchée.

De plus, l'un des inconvénients de la pose de réseau en technique sans tranchée est qu'il n'est pas possible de poser le grillage avertisseur, 30 cm au-dessus de la canalisation, cela augmente forcement la probabilité d'un dommage à l'ouvrage dans le cas d'une réouverture de tranchée pour des travaux ultérieurs. Par ailleurs, du fait de la réglementation liée aux techniques sans tranchée (cf. partie règlementation), il est souvent nécessaire d'installer les canalisations à une profondeur plus importante (<1,5m), afin de respecter les distances réglementaires avec les autres réseaux, ce qui peut poser d'éventuelles difficultés (branchement délicat par exemple).

En outre, les techniques sans tranchée requièrent un certain savoir-faire de la part des opérateurs, notamment pour les plus récentes, et étant donné que le secteur est en plein développement de nouvelles techniques, engins sont constamment mis au point.

Enfin, les investissements des engins permettant la réalisation des travaux sans tranchée peuvent, à première vue paraitre onéreux. Cependant, il sera montré ultérieurement que le retour sur

investissement peut être considérable, notamment du fait d'une efficacité remarquable dans la mise en œuvre des travaux.

6. Opportunités en France

Malgré les contraintes liées aux travaux sans tranchée, certains changements récents en France peuvent être perçus comme des opportunités pour les entreprises spécialisées dans les techniques sans tranchée.

i) Nouvelle réglementation DT/DICT

Depuis 2012, la nouvelle réglementation des DT/DICT oblige la maitrise d'ouvrage de connaitre précisément la cartographie des réseaux existants avant de lancer l'appel d'offre, et en parallèle à communiquer ces informations aux entreprises dans le cadre de la procédure. Avant cette procédure, l'entreprise qui répondait en technique sans tranchée était souvent pénalisée du fait d'une mauvaise connaissance du sous-sol, et prenait des risques financiers pour assumer cette part d'inconnue afin de rester compétitive. Depuis 2012, grâce à cette réglementation, les entreprises proposant des techniques de pose sans tranchée ne sont plus pénalisés, et peuvent proposer la solution technique la mieux adaptée au chantier, et ainsi ajuster leur prix au plus près. [3]

ii) Connaissance du sous-sol

La volonté des concessionnaires des réseaux enterrés vont fortement dans le sens d'une amélioration de la précision de leur cartographie. Par exemple, à GRDF, tous les réseaux nouvellement ajoutés dans la cartographie (renouvelés ou posés) doivent être en classe A (classe optimum), i.e. les canalisations se trouvent dans un fuseau inférieur ou égal à 50 cm (pour les conduites PE) par rapport au trait qui représente la canalisation.

L'amélioration de la connaissance des ouvrages souterrains, mais surtout de la précision de la cartographie des réseaux va fortement favoriser l'utilisation des techniques sans tranchée, car cela les rendra plus sûr.

7. Réglementation dans la réalisation de travaux sans tranchée

La maturité des techniques sans tranchée s'est traduite par la publication, depuis 2002, d'une série de normes européennes. [9] Un arrêté du mois de décembre 2008 relatif aux travaux sans tranchée à proximité des réseaux de distribution de gaz combustible, limite les conditions d'utilisation des techniques sans tranchée. Il impose à l'exploitant de fournir aux entreprises les références des recommandations techniques définies dans des cahiers des charges ou des normes reconnues par le ministère en charge de la sécurité du gaz. Toutefois, il est précisé que : ***« En l'absence de tels cahiers***

ou normes, cet arrêté prescrit de ne pas utiliser ce type de technique [sans tranchée] à moins de 80 cm des réseaux de gaz.[1] **»** [10]

L'article R. 554-29 du Code de l'environnement prévoit qu'un guide est élaboré par les professionnels concernés pour préciser les recommandations et prescriptions techniques à appliquer à proximité des ouvrages en service, ainsi que les modalités de leur mise en œuvre. Ces recommandations et prescriptions doivent assurer la conservation et la continuité de service des ouvrages, ainsi que la sauvegarde de la sécurité des personnes et des biens et la protection de l'environnement. A cet effet, le guide technique relatif aux travaux à proximité des réseaux[2] a été approuvé par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et le ministère du travail, de l'emploi, de la formation professionnelle et du dialogue social. Ce guide est un catalogue de recommandations et de prescriptions techniques usuelles, générales et génériques. Il notifie notamment que : « Tout responsable de projet, tout exploitant de réseau et tout exécutant de travaux doit examiner, lors de la préparation du projet, puis lors de la préparation du chantier, les modalités d'application de ce guide technique, ainsi que, le cas échéant, les informations spécifiques sur les précautions particulières à prendre jointes par les exploitants aux récépissés des déclarations DT et DICT. » [8]

Ce guide propose un ensemble de fiches pour chacune des techniques sans tranchée rassemblant le procédé, les risques potentiels, les recommandations et les prescriptions (notamment les distances minimales entre l'outil et les ouvrages existants). Toutefois, les techniques sans tranchée non-intrusives (tel que le gainage, le tubage, le chemisage, …) ne sont pas concernées par ce guide, dès lors que l'enveloppe extérieure de l'ouvrage n'est pas modifiée (cf. article R. 554-3 du code de l'environnement). Les distances recommandées dans ce guide prennent en compte les distances réglementaires entre ouvrages, augmentées de l'imprécision de localisation de la technique utilisée. Aux valeurs données dans les fiches, il faudra ajouter l'imprécision de localisation de l'ouvrage existant. Si certains ouvrages (celui qui est posé ou l'existant) nécessitent une distance de pose plus importante que la distance minimale indiquée par les fiches, il faudra tenir compte des recommandations spécifiques éventuelles des exploitants de ces ouvrages. Un exemple de fiche pour la technique sans tranchée « fusée non localisable » est présent en annexe *Annexe 2 :* .

[1] La fédération nationale des travaux publics ➔ *En ligne sur le site www.fntp.fr / extranet le 10 mars 2009 ISSN 1769 - 4000*

[2] http://www.reseaux-et-canalisations.ineris.fr/gu-presentation/userfile?path=/fichiers/textes_reglementaires/Guide_technique_V1.pdf

II) Un éventail des techniques de travaux sans tranchée

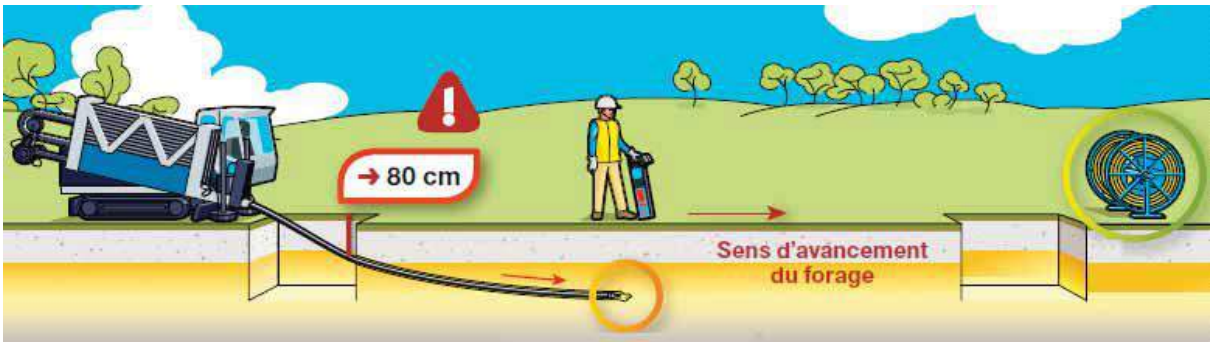
L'objectif de cette partie est de présenter un éventail technique des différents procédés utilisés pour les travaux sans tranchée, classés en deux catégories : pose et réhabilitation. Seront présentés dans chacun des cas : une image ou schéma illustrant la technique, le principe de mise en oeuvre détaillé succinctement, quelques éléments techniques et enfin les avantages et inconvénients du procédé.

1. Les techniques de pose de réseaux sans tranchée

a. Forage horizontal dirigé humide [3] [11] [12]

C'est la technique la plus plébiscitée par les entreprises spécialisées dans le domaine des travaux sans tranchée.

- ***Principe*** : Dérivée du forage vertical, cette technique de pose est réalisée en trois phases. Le forage dirigé consiste dans un premier temps à réaliser un micro tunnel pilote de diamètre 50 mm environs. La tête est, par ailleurs, équipe de buses par l'intermédiaire desquelles est injectée de la bentonite (mélange d'eau et d'argile de 100 à 300 bars), cette boue de forage servant à la lubrification et au refroidissement, mais aussi à consolider le tunnel et favoriser l'évacuation des déblais. Cette tête est constituée d'une sonde émettrice. Cette sonde permettra de déterminer en permanence la profondeur, la pente, la position, la température ainsi que la direction de la tête du forage, permettant ainsi à l'opérateur de guider le forage. Une fois parvenue dans le puit de sortie, la tête est démontée. La section du forage est ensuite agrandie, via le passage successif d'outils d'alésage intermédiaire réalisé par rotation et injection de boue (bentonite). La dernière étape consiste en un alésage final au diamètre nécessaire avec traction de la canalisation ou fourreau à poser.



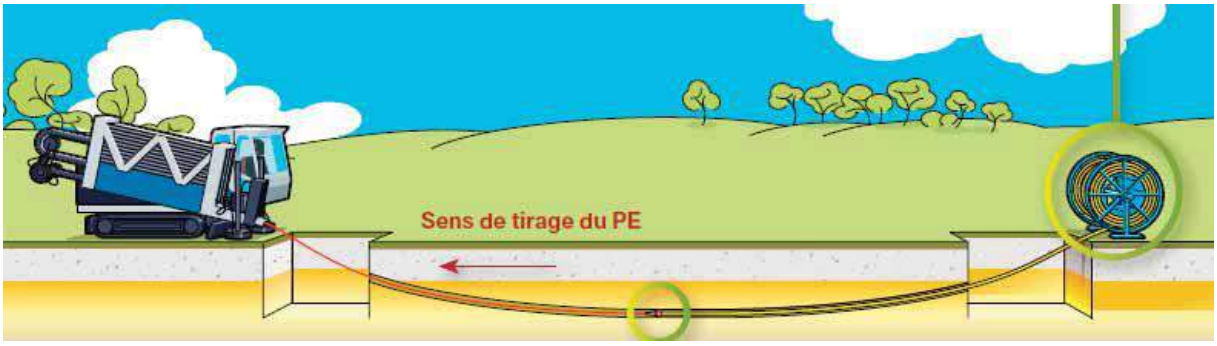


Image 1 : illustration du forage dirigé [3]

- ***Terrain :*** Homogènes, faiblement à moyennement compacts : limon, argile, sable, mais avec un minimum de portance.

- ***Diamètre :*** de 60 mm jusqu'à 1 200 mm, mais le plus couramment inférieur à 500 mm

- ***Distance :*** Couramment une centaine de mètres, mais pouvant aller de 15 jusqu'à plus de 3 900m. [13]

- ***Encombrement en surface :***
  - ✓ Dimension des puits, de départ et de réception qui dépend de l'outil en général de l'ordre de 1m x 3m. Il n'est pas obligatoire d'exécuter des fouilles de départ, l'opération peut débuter de la surface du sol, néanmoins, elles sont nécessaires pour les opérations de raccordement des tuyaux.
  - ✓ Aire de préparation : canalisations, plus recul de 6 à 8 m pour le dispositif
  - ✓ En général un total d'environ 150 m² mais pouvant aller jusqu'à 2 500m² en fonction de l'ampleur des travaux [13]

- ***Cadence :*** Maximum 150 m/j, 50 m/j en moyenne pour un diamètre 100 mm.

- ***Avantages :***
  - ✓ Respect de l'environnement extérieur
  - ✓ Mise en œuvre aisée
  - ✓ Précision remarquable (1 à 2 cm)

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Nécessité d'une connaissance approfondie de l'encombrement du sous-sol
  - ✓ Pas valable en terrains caillouteux ou rocheux
  - ✓ Encombrement du dispositif (recul de 6 à 8 mètres nécessaire)
  - ✓ Limitation du diamètre et de la longueur. La longueur diminue si le diamètre augmente (efforts plus importants). [5]

[3] Guide des bonnes pratiques GRDF

b. Fusée pneumatique [12] [14]

Cette méthode est fréquemment utilisée par les entreprises de travaux traditionnels pour réaliser des traversées de points particuliers comme des allées de faibles largeurs ou des passages sous bordures en béton. Les fusées sont notamment utilisées pour la pose souterraine de conduites ou de fourreaux en polyéthylène.

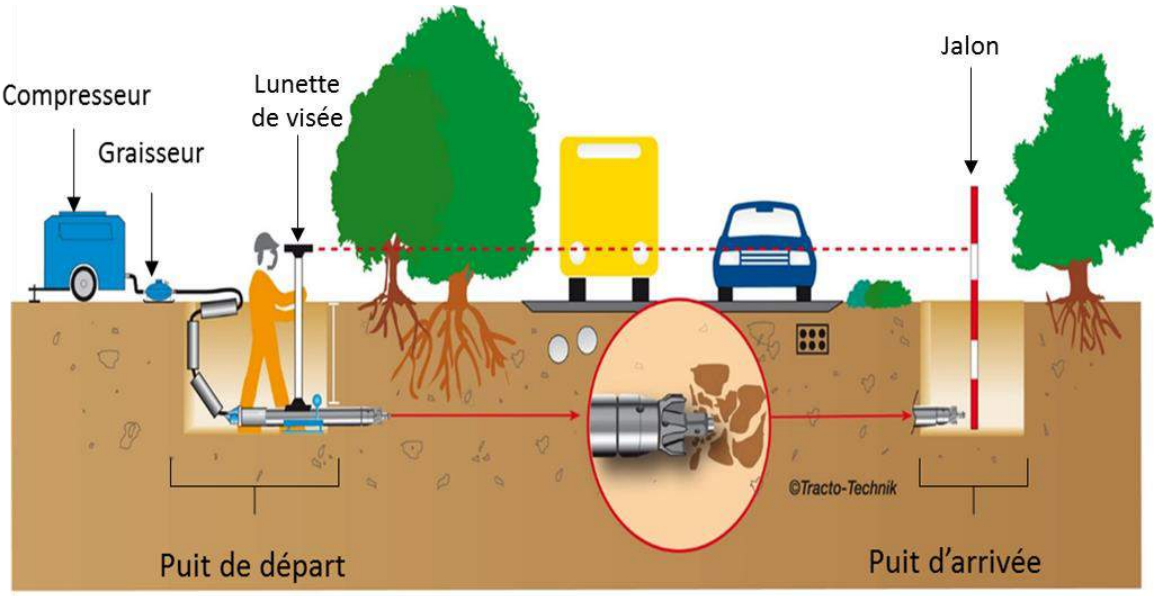


Image 2 : Méthode de forage par fusée pneumatique

- ***Principe :*** Les fusées permettent de créer des tunnels en ligne droite. Ces derniers se forment par compression du terrain en place, i.e. par compactage du terrain (pas de déblais) autour de la fusée lorsqu'elle avance dans le sol. L'air comprimé met en mouvement le piston (marteau) qui vient frapper la tête et donc faire avancer la fusée dans le sol. Les fusées fonctionnent aussi en marche arrière. Le changement de direction s'opère soit via une action sur le flexible d'alimentation (rotation) soit depuis le graisseur de ligne (pneumatique). L'alignement de la fusée se fait grâce à une lunette de visée et à un jalon lui-même placé dans la fouille de réception. Cette technique est généralement non-dirigeable, la trajectoire est donnée au moment du lancement en alignant correctement la machine, sans possibilité de modifier la direction pendant le fonçage. Cependant les têtes des fusées peuvent être équipées d'une sonde émettrice de localisation en tête afin de valider leurs bonnes trajectoires, afin d'éviter le risque d'endommagement d'autres réseaux existants à proximité. Il est ainsi possible de localiser simplement à tout instant la fusée.

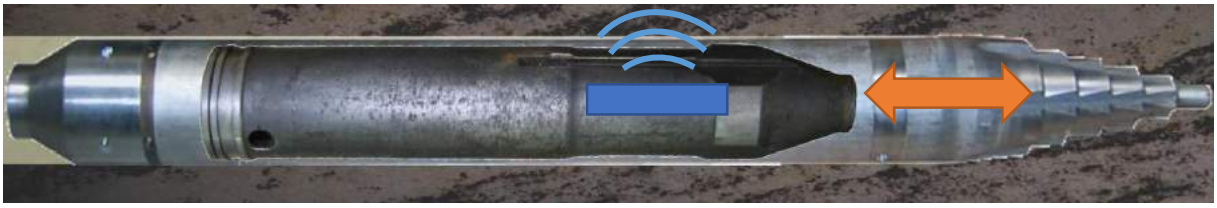


Image 3 : têtes de fusée pneumatique [14]

- ***Terrain :*** Dans la plupart des terrains dit « compactables », i.e. des sols fissibles et compressibles, limon, argiles et marnes.

- ***Diamètre :*** Mini 30 mm, jusqu'à 180 mm voire plus.

- ***Distance :*** de 5 à 25 m.

- ***Encombrement en surface :***
  - ✓ Dimension des puits, fouilles de départ et de réception : Les fusées sont lancées à partir de puits ou tranchées de faibles dimensions. Ceci est environ équivalent à une longueur de 20cm de plus que l'outil lui-même, soit 1 à 2m.
  - ✓ Installation du chantier : Compresseur d'air 6 à 7 bars maximum. La constance de la pression a une influence directe sur la force du coup. Le meilleur résultat est obtenu si la pression reste entre 6-7 bars, avec un compresseur en bon état.

- ***Cadence :*** En fonction du terrain : 5 à 20 m/heure.

- ***Avantages :***
  - ✓ Mise en œuvre aisée
  - ✓ Entretien relativement limité
  - ✓ Investissement faible

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Nécessité d'une connaissance détaillée et précise de l'encombrement du sous-sol
  - ✓ Nécessité d'une bonne connaissance géologique du sous-sol
  - ✓ La fusée peut avoir tendance à remonter à la surface dans certains cas si la charge de terre n'est pas suffisante [5]

c. Pousse tube ou fonçage [15]

Il y a deux grands types de pousse-tube très utilisés aujourd'hui. On trouve le système de pousse-tube par battage et le système de pousse-tube vériné, aussi appelé forage horizontal. Pour ces deux types de pousse-tube, il est indispensable d'aménager à l'avance une fosse de départ ainsi qu'une fosse d'arrivée afin de pouvoir installer le système à la profondeur requise, de chaque côté de l'obstacle à éviter.

i. Pousse tube par battage

- ***Principe :*** Cette technique consiste simplement à enfoncer un tube en acier dans le terrain par battage pneumatique. A la fin du fonçage du premier élément, le suivant est aligné et soudé au précédent. Les opérations de mise en place, de soudures et de fonçage des tubes sont répétées jusqu'à la fouille d'arrivée. Lors du fonçage, les matériaux restent dans le tube. Le nettoyage total du tube s'effectue tout à la fin du fonçage par hydrocurage ou par tarière (cf. forage tarière). Parfois lors de gros diamètre, il est même possible extraire les matériaux manuellement ou mécaniquement. Cette technique est surtout employée pour des terrains très instables ou en présence importante d'eau (passage sous rivière par exemple). Elle apporte une sécurité

supplémentaire car les matériaux sont évacués dans un second temps ce qui peut éviter la création d'éboulis. [16]

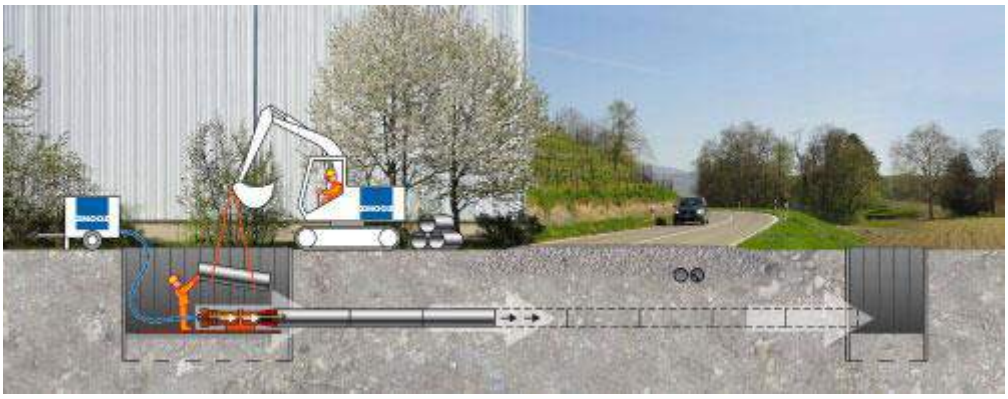


Image 4 : Pousse tube par battage[4]

ii. Pousse tube vériné [17]

- ***Principe :*** Cette technique permet de mettre en place un tube par poussée hydraulique. Il est possible de pousser des tubes en PP (Polypropylène) ou en béton mais ils sont généralement en acier. Chaque tube est précisément positionné et avance grâce à la poussée d'un vérin hydraulique, qui prend appui sur le châssis de l'installation. Ensuite, on aligne le tube suivant, avec les tarières à l'intérieur, et on le soude au précédent (acier). Une fois la cellule d'arrivée atteinte, les éléments de la tarière sont retirés de l'intérieur du fourreau vers l'installation de forage pour être démontés. Le fourreau est alors en place pour l'usage prévu. Le châssis de ce système nécessite une buttée arrière pour être bloqué et stable, ce qui implique une certaine installation. Ce système convient à tous les types de sol en général.

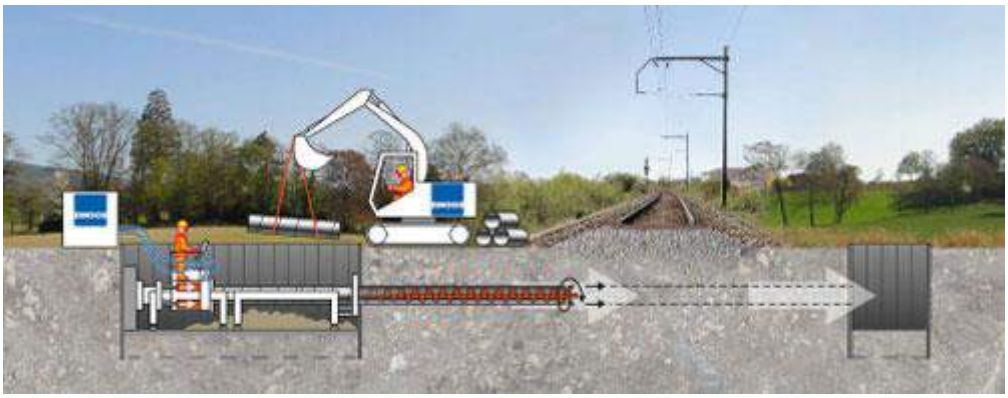


Image 5 : Pousse tube vériné (ou forage horizontal)[4]

[4] http://www.zmoos.com/

Type de système	Pousse tube vériné		Pousse-tube battu	
	Avantages	**Inconvénients**	**Avantages**	**Inconvénients**
Sol	Tout type de sol		Terrain normalement exploitable et idéal dans nappe phréatique	Ne convient pas dans la tourbe
Mise en place		Installation conséquente, beaucoup de manutention,	Faible installation Dimension des puits environs 2,5 x 1,5m	
Performances	Diam. Jusqu'à 1000mm Longueur jusqu'à 100m		Diam. Jusqu'à 3000mm Longueur jusqu'à 70m	
Caractéristiques	Pas ou peu de nuisances sonores, peu de vibrations, possibilité de guidage			Vibrations importantes, système bruyant, faibles possibilités de guidage

Tableau 1 : récapitulatif des avantages et inconvénients des techniques pousse tube [15]

d. Forage tarière

Cette technique a été employée par le passé. De nos jours son utilisation n'est pas exclue mais semble limité à des traversées de chaussées de faibles longueurs et à un encombrement du sous-sol nul. [5]

- ***Principe :*** Cette technique permet de mettre en place par poussée hydraulique un tube généralement en acier. L'outil de forage est entrainé par un arbre autour duquel s'enroule une tôle soudée en spirale dite tarière. Les déblais sont alors refoulés par cette tarière, qui repose sur un système de vis sans fin. L'orientation est réalisée au lancement sans possibilité de correction ultérieure. Cependant, la technique peut être complétée par un système de pré guidage, qui s'apparente à un forage pilote avec contrôle de trajectoire. [12]

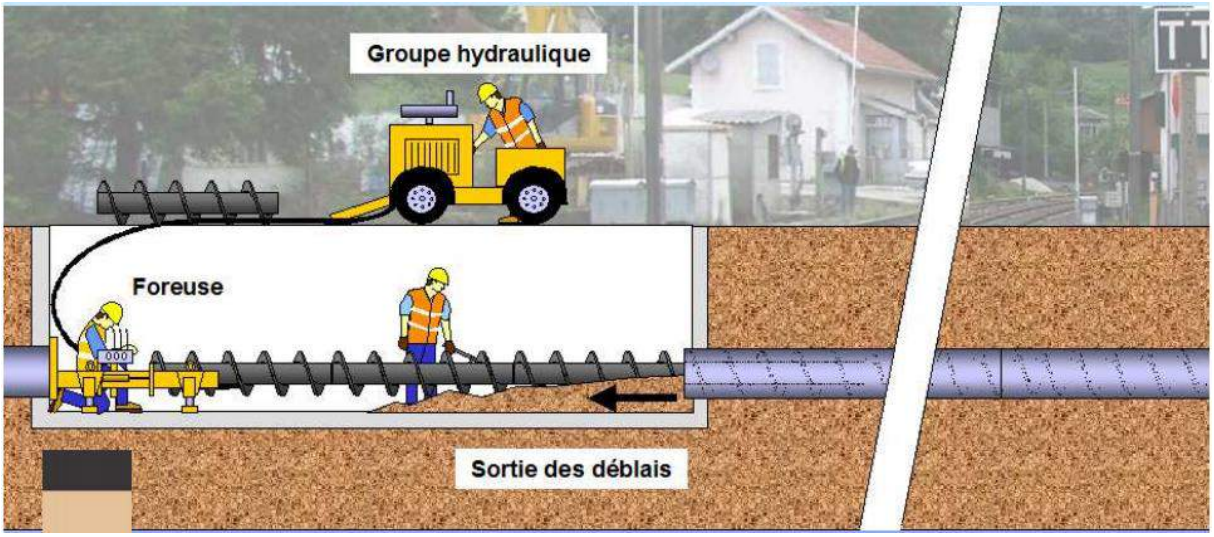


Image 6 : Forage à la tarière [14]

- ***Terrain :*** Le procédé est peu indiqué pour des terrains instables.

- ***Diamètre :*** Mini 50, maxi 1500 mm

- ***Distance :*** 80m en DN 900

- ***Encombrement en surface :***
  - ✓ Dimension des puits de départ et de réception : Environs 25m² en ligne et environs 5m² pour branchement particuliers. [12]
  - ✓ Installation du chantier : Groupe hydraulique autonome ou branchement sur engin de terrassement.

- ***Avantages :***
  - ✓ Principe de fonctionnement simple
  - ✓ Impact sur l'environnement limité aux seules fouilles d'entrée et de sortie

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Nécessité d'une connaissance détaillée de l'encombrement du sous-sol
  - ✓ Nécessité d'une bonne connaissance géologique du sous-sol
  - ✓ Nécessité d'une fouille de départ d'une longueur supérieure à la longueur de la machine et à la profondeur adéquate au passage de l'ouvrage. [5]

e. Micro tunnelier [18]

Cette technique s'applique plutôt à des diamètres importants (supérieur ou égal à 500 mm) et pour des chantiers de grandes ampleurs.

- ***Principe :*** Le microtunnelier et la canalisation avancent sous la poussé appliquée par le bâti de poussée installé dans le puits de travail. Les éléments de canalisation ont en général une longueur unitaire de 2 à 3m. La roue de coupe, (ou roue excavatrice) du microtunnelier est équipée d'outils qui permettent l'abattage du front de taille *Annexe 3 :* . Le design de la roue de coupe est adapté au cas par cas selon les terrains (roue de coupe équipé de couteau pour les terrains meubles ou bien molette pour les terrains rocheux). Pour les diamètres inférieurs à 1 000mm les trajectoires

sont généralement rectilignes. A partir de 1 200mm les trajectoires peuvent présenter des courbes. Il n'y a pas de limite réelle pour la distance car il y a la possibilité de créer des stations de poussé intermédiaire qui permettent de répartir la poussée. Les déblais sont évacués et transportés entre le microtunnelier et la surface par marinage hydraulique, i.e. par circulation d'une boue de forage dans des conduites en circuit fermé.

Pour les trajectoires rectilignes, le guidage du microtunnelier est réalisé à partir d'un laser situé dans la tête de la machine. Pour les trajectoires courbes, le guidage est assuré grâce à un gyroscope embarqué. La trajectoire peut être modifiée, en agissant sur les vérins directionnels permettant d'orienter la tête du microtunnelier.

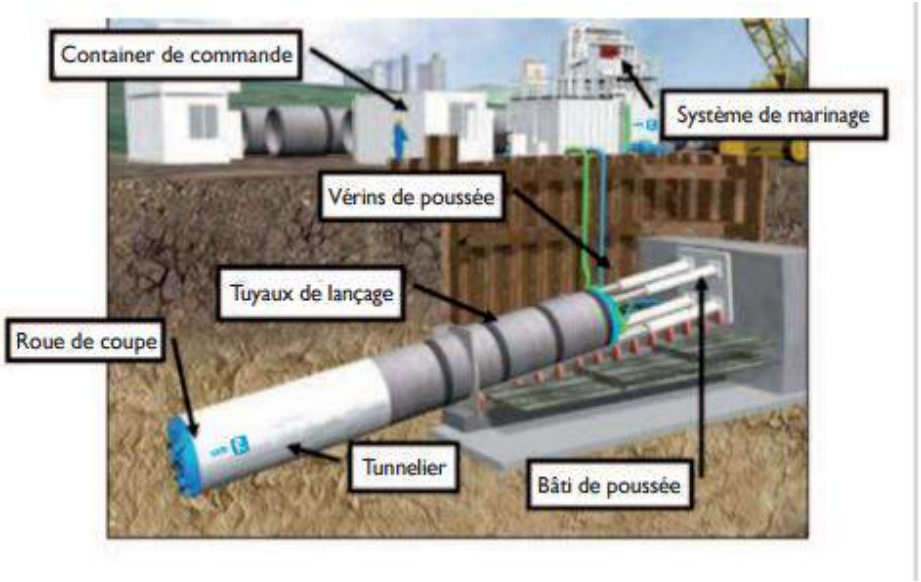


Image 7 : schéma de microtunnelier[5]

- ***Terrain :*** les microtunneliers sont adaptés à des terrains très variés : argiles, graviers, sable, galets, rocher, marnes, limons, y compris sous la nappe phréatique [12]

- ***Diamètre :*** de 250 mm à 2 500mm

- ***Distance :*** Les distances maximales réalisées en un seul tronçon sont de plusieurs centaines de mètres pour une machine de 2 000mm de diamètre ou plus.

- ***Préparation :*** La connaissance du sous-sol (géologique et encombrement) est primordiale. Elle permet de choisir un procédé de forage/marinage adapté au terrain et de définir la meilleure trajectoire.

- ***Encombrement en surface :***
  - ✓ Puits de départ de 20 à 25m² et puits de sortie de 15m² environs.
  - ✓ Emprise du chantier de 150m² à 500m² voire plus [13]

- ***Cadence :*** De 10 à 30 m/j en fonction des terrains et des équipements utilisés.

[5] http://www.sade-cgth.fr/fileadmin/user_upload/03_nos_solutions/pdf/FR_Microtunnelier_Acheres.pdf

- ***Avantages :***
  - ✓ Utilisation sur de grandes distances et pour des grands diamètres
  - ✓ Guidage et correction de trajectoire possible

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Emprise au sol importante
  - ✓ Nécessité d'une bonne connaissance du sous-sol [5]

f. Récapitulatif des techniques sans tranchée de pose d'ouvrages neufs

Classification	Particularité	Familles de techniques	Domaines d'application	Sections	Longueurs d'application	Emprises en surface
Méthodes non dirigées	**Déplacement du sol**	Fusée	Traversées et branchements	De 30 à 180 mm	De 5 à 25m	Puits de 1 à 20m² + compresseur
		Pousse tube par battage	Traversées	De 50 à 3 000 mm	Jusqu'à 70m	Puits environs 5m²
	Excavation du sol	Pousse tube vériné	Traversées	De 50 à 1 000 mm	Jusqu'à 100 m	Puits de grandes dimensions (jusqu'à 50m²)
		Fonçage à la tarière	Traversées et branchement	De 50 à 1 500 mm	Jusqu'à 80 m	Environs 25m² en ligne et environs 5m² en traversée
Méthodes dirigées	**Par découpe et excavation**	Forage dirigé	Traversées et poses en ligne	De 60 à 1 200 mm	Jusqu'à 3 900 m	De 150 à 2 500 m² (en fonction de l'ampleur du projet)
		Microtunnelier à marinage hydraulique	Traversées et pose en ligne	De 250 à 2 500 mm	Jusqu'à 1 000m en un seul tronçon	Puits de départs de 20 à 25m², puits de sortie de 15m², emprise de 150 à 500m² voir plus

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des procédés de pose d'ouvrages neufs [13]

Il est également présenté en annexe, un tableau récapitulatif des procédés adaptés par type de sol *Annexe 4 :* , et les caractéristiques des différentes techniques de pose utilisables pour la pose de réseaux gaz *Annexe 5 :* .

2. Les techniques de réhabilitation de réseaux sans tranchée

Par techniques de réhabilitation on entend *« toutes mesures entreprises pour restaurer ou améliorer les performances d'un réseau existant ».* [19]

Les techniques de réhabilitation peuvent être classées selon divers critères et être dites structurantes ou non structurantes, continues ou ponctuelles, destructives ou non destructives. Il est important de noter que certaines techniques peuvent satisfaire à plusieurs objectifs ou que des techniques différentes peuvent être associées sur le même chantier.

La réhabilitation des ouvrages se justifie lorsque leur état n'est pas suffisamment grave pour conduire à un remplacement « à ciel ouvert », et que les conditions d'écoulement (dans le cas de l'eau) demeurent satisfaisantes. Cependant, la technique utilisée doit garantir une qualité de réalisation telle que la durée de vie de l'ouvrage ainsi réhabilité doit pouvoir être comparée, toutes choses égales par ailleurs, avec l'ouvrage neuf.

Les techniques **ponctuelles** réparent l'ouvrage localement, alors que les techniques **continues** permettent une réhabilitation complète du tronçon.

Les techniques **structurantes** reprennent les charges dynamiques et statiques appliquées sur le tuyau enterré (différentes pressions qui s'exercent, poids propres du tuyau, réaction du sol,…).

Les techniques **non structurantes** ont essentiellement pour but l'élimination des obstacles empêchant ou réduisant l'écoulement normal du réseau, mais aussi l'étanchéité de la canalisation. [19]

a. Réparation ponctuelle

1. *Robot multifonction* [19]

Les robots multifonctions ou automates permettent le rétablissement hydraulique, le colmatage des fissures, la consolidation de la canalisation ainsi que la mise en œuvre des diverses autres techniques de réhabilitation.

Cette technique de réhabilitation ponctuelle peut être structurante ou non structurante selon les cas et permet :

- ✓ la suppression de tous les obstacles qui gênent l'écoulement dans les canalisations pour les réseaux d'eau (dépôts solides, concrétions diverses, …)
- ✓ la préparation de l'état d'accueil de la canalisation avant réhabilitation,
- ✓ le colmatage par injection des perforations, fissures, joints défectueux,
- ✓ la pose de manchettes,
- ✓ la réouverture des branchements après chemisage ou tubage (robots découpeurs),
- ✓ la consolidation mécanique de la canalisation par la pose de tôles d'acier inoxydables destinées à assurer la restructuration des parties les plus endommagées.

L'intervention de ces robots s'effectue à l'aide d'une inspection et d'un contrôle vidéo. Le robot s'adapte au diamètre de la canalisation et peut opérer à partir d'un diamètre de 150 mm. Il est possible de traiter 3 à 8 points par jour.

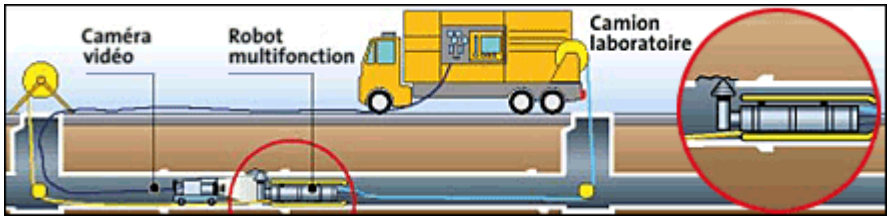


Image 8 : Schéma d'un robot multifonction[6]

- ***Avantages :***
  - ✓ Traitement des liaisons canalisation/branchements
  - ✓ Outils polyvalents (collage de tôle en acier inoxydable possible)
  - ✓ Précision

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Coût du matériel conséquent
  - ✓ Efficacité très dépendante de la compétence des opérateurs [20]

2. Le chemisage partiel ou manchette

Cette technique également appelée manchette, consiste à introduire un tuyau neuf plaqué à l'intérieur de la canalisation dégradée, entre deux regards.

La manchette de longueur variable, permet de corriger localement les faiblesses de la structure et d'étanchéité, telles que les fissures multiples, les perforations, les casses, la condamnation des branchements hors services, …. . La manchette peut être structurante, consolidante ou non structurante selon les objectifs de la réhabilitation. Outre cette fonction mécanique, elle permet de rétablir l'hydraulicité (dans le cas de l'eau) et l'étanchéité de la canalisation, de même que lutter contre la corrosion et l'abrasion. [19]

Après un curage soigné et une inspection télévisuelle, une gaine souple composée de tissu de verre ou de feutre et imprégnée de liants durcissant (résines époxydiques, polyester ou venylester) - appelée manchette - est introduite dans la canalisation à l'aide d'un manchon (gonflable ou non) sous contrôle vidéo. Une fois la gaine plaquée contre la paroi, la résine est polymérisée par chauffage grâce à des résistances électrique placée dans le manchon. L'opération doit être réalisée avec beaucoup de soin afin d'éviter tout décollement ultérieur. Selon les diamètres et l'implantation des défauts à traiter, il est possible de mettre en place de 4 à 6 unités par jour.

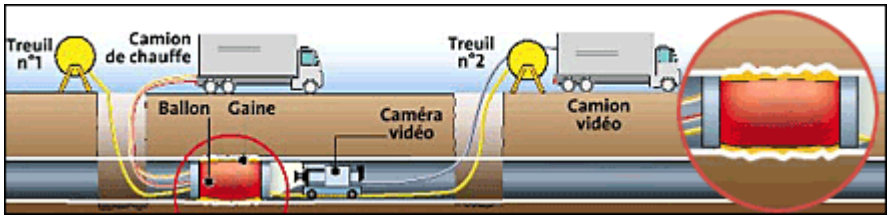


Image 9 : schéma du procédé de chemisage partiel [7]

[6] http://www.jfm-conseils.fr/technique3.htm#
[7] http://www.jfm-conseils.fr/technique3.htm#

- ***Domaine d'utilisation :*** C'est un traitement ponctuel des réseaux circulaires ou ovoïdes, de diamètre allant de 150 à 600 mm, et de tous types de matériaux.

- ***Avantages :***
  - ✓ Pas d'espace annulaire (pas d'espace entre les tuyaux).
  - ✓ Grande rapidité de mise en œuvre.
  - ✓ Dans le cas des réseaux d'eau, sous réserve que le niveau d'eau ne soit pas très important, il est possible de procéder au chemisage ponctuel sans interruption du réseau.

- ***Inconvénients :***
  - Implique un stockage ou une dérivation des effluents
  - Manipulation délicate
  - Ovalisation maximale de 8% [20]

3. Etanchement par injection

Cette technique non structurante consiste à injecter de la résine depuis l'intérieur des ouvrages afin de rétablir l'étanchéité de la canalisation. Ainsi, sont traitées localement la défaillance des joints, les fissures circulaires et les perforations de la canalisation.[19]

Après un curage de la canalisation, un manchon est tracté puis gonflé au niveau de la chambre à injecter pour isoler la zone à traiter. De l'air comprimé est alors envoyé dans la chambre d'injection. La résine et son catalyseur sont injectés sous forme liquide à une pression de l'ordre de 1 bar. Avant séchage du produit, un lissage doit être réalisé pour qu'aucune rugosité ne subsiste à l'intérieur de la section d'écoulement. La résine se polymérise au bout de 20 à 60 secondes et assure l'étanchéité du matériau. Une fois la parfaite étanchéité vérifiée, le dispositif est déplacé vers le défaut suivant. Il est possible d'étancher, selon les cas, de 10 à 40 défauts par jour. [20]

Image 10 : Schéma d'étanchement de canalisation par injection[8]

- ***Domaine d'utilisation :*** Cette technique peut être utilisée dans les réseaux circulaires de 150 à 900 mm de diamètre et est adaptée à la majorité des matériaux existants.

- ***Avantages :***
  - ✓ Technique peu onéreuse
  - ✓ La résine d'étanchéité est élastique et adhérente, ce qui garantit une qualité de réalisation telle que la durée de vie de l'ouvrage réhabilité soit comparable à l'ouvrage neuf.

[8] http://www.jfm-conseils.fr/technique3.htm#

- ***Inconvénients***
  - ✓ Non adapté aux détériorations importantes du réseau
  - ✓ Non adapté aux coudes et aux rétrécissements trop importants (problèmes d'accessibilité)
  - ✓ C'est un procédé non structurant [20]

b. Réparation continue

1. *Le chemisage continu*

De nature généralement structurante, le chemisage continu peut être employé en non structurant pour remédier aux problèmes d'étanchement, de corrosion ou d'abrasion.

La mise en œuvre du chemisage se fait le plus souvent par réversion ("chaussette"), en faisant avancer une gaine souple imprégnée de résine dans l'ancienne canalisation par air comprimé en la plaquant contre la paroi. La gaine est retournée au moment de l'introduction et avance à partir d'un regard de visite, grâce à de l'air comprimé ou de l'eau qui plaque la gaine contre la paroi de la canalisation. Le durcissement est obtenu par chauffage avec de la vapeur sous pression ou de l'eau chaude, qui va entrainer la polymérisation de la gaine. [19]

Une autre méthode consiste à tirer à l'aide d'un treuil, d'un regard au regard suivant, la gaine dans la canalisation. Celle-ci est alors gonflée et mise en pression avec de l'air. Le durcissement par polymérisation peut alors être obtenu grâce à un robot émettant des UV. Cette technique est communément appelée le chemisage continu par traction. [21]

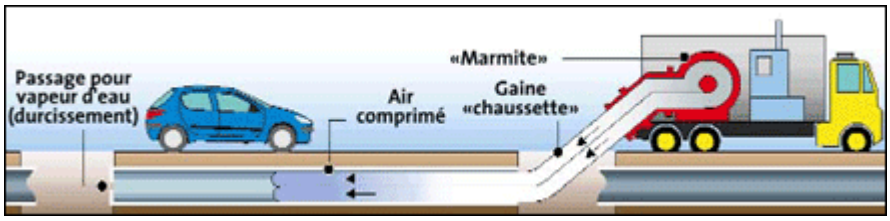


Image 11 : Schéma du procédé de chemisage continu[9]

- ***Domaine d'utilisation :*** Ce traitement est applicable pour les réseaux de diamètre allant de 100 à 2000 mm, pour tous types de matériaux.

- ***Avantages :***
  - ✓ Pas d'espace annulaire
  - ✓ Application sur de très grandes longueurs, en présence de coudes, de rétrécissement,…
  - ✓ Mise en œuvre rapide
  - ✓ Emprise réduite à un semi-remorque

[9] http://www.jfm-conseils.fr/technique3.htm#

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Stockage ou dérivation des effluents nécessaires
  - ✓ Manipulation délicate
  - ✓ Risque de brûlure ou d'absence de polymérisation avec un durcissement aux UV [20]

2. *Le tubage*

Le tubage consiste à mettre en place, par tractage ou poussage, dans la canalisation à réhabiliter une nouvelle conduite d'un diamètre inférieur. Cette réhabilitation permet de maintenir, d'améliorer ou de rétablir les performances de l'ouvrage existant qui joue alors le rôle de fourreau.

Il existe deux types de tubage :

- Le tubage **avec espace annulaire**, lorsque le diamètre extérieur du tube est inférieur au diamètre intérieur de la conduite à tuber.

- Le tubage **sans espace annulaire**, lorsque le diamètre extérieur du tube est égal au diamètre intérieur de la conduite à tuber. [22]

Les matériaux utilisés sont des plastiques rigides ou flexibles pré-fabriqués :

- ✓ polychlorure de vinyle (PVC) ;
- ✓ plastique renforcé fibres de verre (PRV) ;
- ✓ polyéthylène (PE).

L'ouverture d'une fouille servant de fosse d'introduction est nécessaire pour les cas suivants :

- ✓ tubage par éléments longs ; la taille de la fouille est alors 2 fois supérieure aux longueurs unitaires d'éléments ;
- ✓ tubage par éléments longs en continu ; la taille de la fouille est, dans ce cas, fonction du rayon de courbure [23]

Il existe une grande variété de techniques de tubage.

i) Le tubage simple

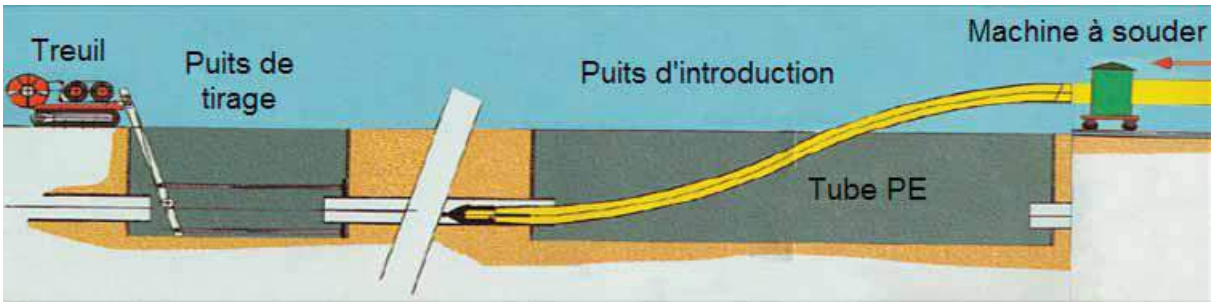


Image 12 : schéma du procédé de tubage simple [22]

Le tube est inséré dans la canalisation par traction grâce à un treuil depuis un puit de tirage. La technique a pour avantages une faible emprise de chantier, une rapidité d'exécution, une étanchéité du réseau, une solution auto-structurante utilisable pour tous les diamètres. Les inconvénients sont liés à une réduction de diamètre intérieur du réseau à cet endroit. Par conséquent, elle n'est utilisée que dans le cas de réseaux surdimensionnés. Le cas des coudes crée également une difficulté, et enfin il y a création d'un espace annulaire.

ii) Tubage par enroulement hélicoïdal

Cette technique s'emploie couramment sur des diamètres de 150 à 2 500 mm. Elle consiste en la fabrication in situ d'un tuyau par enroulement hélicoïdal d'un profilé spécial assemblé par « clipsage ». L'espace entre la canalisation existante et le tube est rempli par injection de coulis. L'épaisseur du coulis est ajustée en fonction de la résistance mécanique à obtenir et de la section finale désirée. Un robot multifonction peut assurer le perçage, et l'étanchement des branchements.

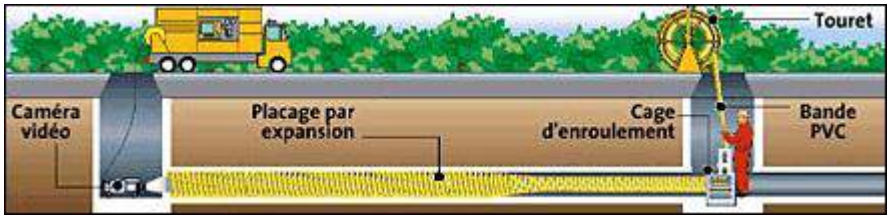


Image 13 : Schéma du procédé de tubage par enroulement hélicoïdal [10]

- ***Avantages :***
  - ✓ Coût économique dans le cas de l'emploi de PVC
  - ✓ Réparation structurante

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Il peut y voir un espace annulaire à remplir
  - ✓ Les branchements sont difficiles à réaliser [20]

iii) Tubage par tubes pré-déformés [20]

Cette technique s'applique principalement pour les diamètres de 100 à 1 600 mm. Il s'agit d'un tubage par tuyau continu sans espace annulaire. Cette technique est destinée à la réhabilitation de tronçons de réseaux droits, légèrement courbés ou désaxés, pouvant atteindre de grandes longueurs. Elle consiste en l'insertion par traction :

- ✓ d'un profil au diamètre réduit dans un gabarit conique,
- ✓ ou bien d'une section déformée à chaud en usine, sous la forme d'un U si bien que le diamètre extérieur est réduit d'environ 30 % (aussi connu sous le nom de technique « subline »)

[10] http://www.jfm-conseils.fr/technique3.htm#

Le tube est introduit à l'aide d'un treuil. Il reprend ensuite sa forme initiale et se plaque contre la paroi interne de la canalisation existante, soit de manière spontanée, soit par mise sous pression.

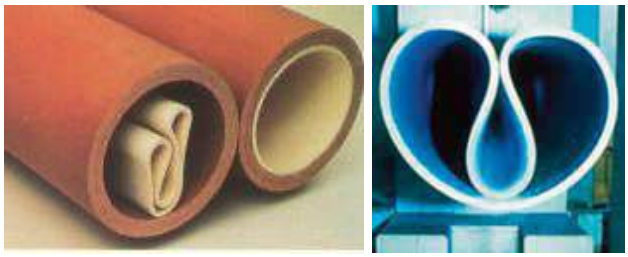


Image 14 : Procédé de tubage par tubes pré-déformés – technique « subline » [11]

- ***Avantages :***
  - ✓ Applicable sur de très grandes longueurs
  - ✓ Pas d'espace annulaire à remplir
  - ✓ Réparation structurante en fonction des diamètres

- ***Inconvénients :***
  - ✓ Accès aux deux extrémités nécessaire
  - ✓ Mise en œuvre en tronçon droit [20]

c. Remplacement par méthode destructive

1. *L'éclatement ou « cracking »*

« Avec une distance totale de 50 000 km, « le cracking » est actuellement le **procédé de renouvellemen**t sans tranchée le plus répandu dans le monde entier. Le système d'éclatement permet de renouveler des conduites de gaz, d'eau ou des canalisations d'eaux usées. » [24] Cette méthode est utilisée depuis environ 20 ans. Au fil des années, les engins et outils ont évolué pour permettre d'utiliser ce système dans plusieurs cas de figures. Cette méthode « sans tranchée » est encore plutôt méconnue mais satisfait de plus en plus de monde par son efficacité, sa rapidité d'exécution et son respect de l'environnement. Le produit final correspond à celui d'un tube neuf posé avec une durée de vie de plus de 100 ans (par ex. fourreaux en PE-HD). [25]

- ***Types de conduites à éclater :***
  - ✓ Grès
  - ✓ Fonte grise
  - ✓ Fonte ductile
  - ✓ Béton
  - ✓ Plastique – PVC
  - ✓ Eternit

- ***Remplacées par :***
  - ✓ Tube PE-HD (fourreaux)
  - ✓ Tube PP-HM
  - ✓ Tuyau fonte ductile
  - ✓ Tuyau en grès

[11] Installation canalisation.org

- ***Mise en œuvre :*** Une fois les tiges poussées dans le tube à remplacer, les accessoires d'éclatement y sont fixés. L'éclate tuyau peut être soit poussé, soit tiré à l'intérieur de la canalisation. L'ensemble des tuyaux neufs est mis en place dans la continuité de l'éclate tuyau qui détruit l'ancienne conduite à l'avancement et repousse les débris dans le terrain environnant. Il est donc possible de mettre en place des tubes de sections nominales identiques voire même supérieurs. « Un doublement de la section pouvant être envisagé sous certaines conditions », précise Jean-Michel Balmat de la société helvétique Piasio.[3] L'éclatement de l'ancienne canalisation est réalisé à partir d'un éclateur hydraulique (écartement de pétales à pression hydraulique, sans vibration), d'un cône d'éclatement (simple, muni d'une lame coupante ou de galets coupants) ou d'une fusée d'éclatement (éclatement par percussion). Ces derniers sont tirés dans la conduite à éclater à l'aide d'un treuil ou de vérins. Les fragments de la canalisation sont compactés radialement dans le sol environnant à l'aide d'un « obus d'éclatement », créant ainsi un « tunnel » dans lequel la nouvelle conduite est tirée. L'assemblage se fait ensuite de façon mécanique ou par soudage.

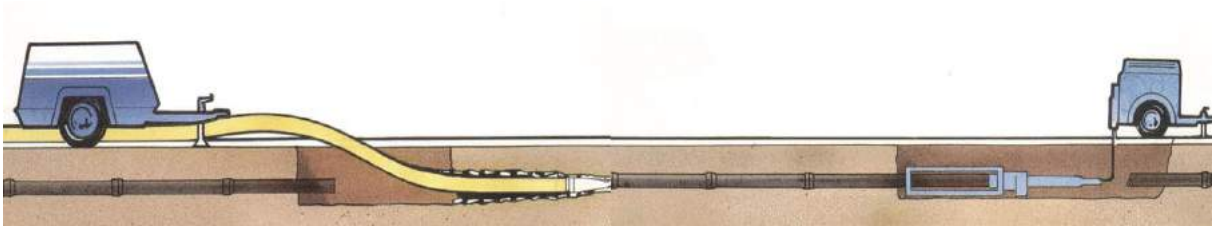


Image 15 : schéma du procédé de renouvellement de canalisation par éclatement [19]

Il faut savoir que lors de tels travaux, l'utilisation de canalisations spéciales est obligatoire à cause des grands efforts présents durant l'éclatement et le passage sous terre. Les efforts sont d'autant plus grands lorsque le diamètre de la nouvelle canalisation est supérieur à l'existant et selon le type de terrain rencontré. «Les éléments de la conduite brisée étant susceptibles de venir blesser la nouvelle structure mise en place», explique Jean-Michel Balmat. C'est pourquoi on utilise des tuyaux équipés d'une membrane de protection extérieure, empêchant les blessures sur l'enveloppe originale des tuyaux (protégés par une enveloppe en polypropylène pour le PE par exemple).[3]

Image 16 : Soudage d'une canalisation PE équipée d'une membrane de protection extérieure en PP pour le remplacement d'une canalisation par cracking [25]

- ***Avantages :***
  - ✓ Production journalière pouvant aller jusqu'à 200 m.
  - ✓ Maintien ou augmentation du diamètre
  - ✓ Rapidité du chantier
  - ✓ Adapté aux canalisations très endommagées

- ***Inconvénients :***
  - ✓ L'ancienne canalisation reste dans le sol
  - ✓ Interférence possible avec d'autres réseaux (par rapport aux techniques de réhabilitation vues précédemment)
  - ✓ Possibilité de soulèvement du sol après réalisation, et de fissuration de la chaussée
  - ✓ Demande une étude complexe du sol et des réseaux.

III) Approche économique, environnementale et sociétale des travaux avec ou sans tranchée

L'objectif de ce chapitre est de recenser l'ensemble des facteurs qui devraient être pris en compte pour évaluer de façon la plus juste possible le coût réel de construction d'un ouvrage. En effet, la plupart du temps, le coût de revient d'un mètre linéaire de réseau posé ne prend en compte que les coûts de réalisation de l'ouvrage et aucune distinction n'est faite pour dissocier les coûts directs et coûts globaux. De plus, dans les contextes politiques et de prises de conscience commune vis-à-vis de notre impact sur l'environnement, les empreintes carbones des techniques employées peuvent jouer un véritable rôle dans leur choix d'utilisation, par rapport au simple coût économique.

Le coût global d'un chantier n'est pas suffisamment pris en compte. Quand bien même les coûts directs et indirects sont intégrés dans l'étude, les coûts sociaux qui sont engendrés par les travaux de construction ou de réhabilitation des ouvrages sont quasiment systématiquement oubliés.

$$Coûts\ globaux = coûts\ directs + coûts\ indirects + coûts\ sociaux$$

Avant de regarder de plus près les coûts sociaux, une analyse des gênes engendrées par un chantier de pose de canalisation doit être réalisée.

1. Les nuisances de chantiers traditionnels et leur réduction par les techniques sans tranchée [26] [5]

Il s'agit dans cette partie d'introduire les coûts sociaux liés à un chantier de pose de canalisation en tranchée ouverte, en analysant les nuisances qui pourrait être évitées ou du moins réduites par l'utilisation d'une technique sans tranchée. Cette analyse sera divisée en quatre catégories : les gênes pour la circulation, les risques d'accidents, la dégradation de l'environnement et enfin les conséquences économiques.

i) La gêne de la circulation

L'implantation d'un chantier sur la voie publique est susceptible d'impacter l'ensemble des déplacements aux alentours du site :

- La circulation des engins de chantier perturbe le trafic.
- Les transports publics (bus, tram,…) peuvent être détournés ou interrompus.
- Des déviations et retards sont imposés par les travaux (voies de circulation totalement ou partiellement barrées)
- L'accessibilité des lieux privés ou publics est altérée (gêne pour les piétons, le courrier, les livraisons, la collecte des ordures,…).

ii) Les risques d'accidents

Un chantier en tranchée ouverte présente de multiples risques d'accidents, aussi bien pour les ouvriers du chantier que pour les personnes ou véhicules passant aux alentours :

- Les ouvriers du chantier sont exposés aux chutes, aux écroulements de tranchées, et aux dangers de manutention des tuyaux,…
- Pour les automobilistes, les risques d'accidents sont plus élevés, notamment en cas de barrage partiel des voies de circulations (circulation alternée, régulation par des feux tricolores ou par un opérateur).
- Réalisé dans de mauvaise conditions de sécurité (mauvaise ou absence de signalisation de travaux, des manœuvres d'engins,…), et même lorsque les conditions de sécurité sont respectées, un chantier en site urbain peut directement atteindre la sécurité du public.
- Outre le risque sur l'emplacement même du chantier, lorsque le trafic est dévié, le danger est indirectement augmenté pour les riverains de l'itinéraire de déviation. En effet, un surplus brusque de circulation présente un danger supplémentaire pour les enfants et personnes âgées notamment. De plus, les automobilistes circulent sur une route mal adaptée à un trafic plus dense que celui pour lequel elle a été conçue.

iii) La dégradation de l'environnement

Un chantier en tranchée ouverte impacte considérablement le voisinage du site :

- Le bruit généré par les travaux est souvent très désagréable (marteaux piqueurs, groupes, électrogènes, pelles mécaniques,…). Il a d'ailleurs été prouvé que les vibrations provoquées par les engins de chantier peuvent avoir un impact psychologique néfaste sur les individus. [27]

- Les poussières et saleté apparaissent à la suite de l'excavation des déblais. En plus des gênes respiratoire, cela peut obliger les riverains à effectuer des lavages supplémentaires de leurs biens (voitures, vitres, etc,..). Dans des endroits plus sensibles tels que les hôpitaux ou les laboratoires les particules transportées par le vent peuvent avoir des conséquences beaucoup plus graves.

- La pollution de l'air par les gaz d'échappement est susceptible de s'accroitre du fait du ralentissement et de la densification du trafic provoqué par le chantier. Des odeurs désagréables peuvent potentiellement s'échapper de la tranchée lors de travaux dans les égouts, et viennent s'ajouter au gaz d'échappement des engins de chantier.

- Le désordre et l'impact visuel du chantier sont désagréables, notamment dans des rues piétonnes, à proximité des sites touristiques et historiques.

- Les espaces verts peuvent potentiellement être endommagés, et il est parfois inévitable d'abattre des arbres.

Certaines nuisances sont mêmes transférables à un périmètre plus grand :

- Les camions qui transportent les remblais et déblais, encombrent les routes, génèrent du bruit et polluent l'air tout au long de leur chemin. Les poids lourds sont responsables à près de 50% des émissions polluantes de la circulation automobile.[28]

- Les décharges où l'on dépose les déblais issus des tranchées, ainsi que les carrières où l'on puise les sols nobles pour les remblais, sont de mêmes des nuisances pour l'environnement des riverains.

Enfin, de façon générale l'impact environnemental des chantiers à tranchée ouverte est nettement plus important que les chantiers avec techniques sans tranchée, notamment pour les GES liés aux transports des remblais, déblais. (Cf. analyse environnemental, ci- après)

iv) Les conséquences économiques

Un chantier en tranchée ouverte peut avoir un fort impact économique sur les environs en fonction du contexte urbain :

- Le chantier peut potentiellement être responsable d'une baisse de l'activité commerciale. En effet, si les clients sont gênés ou ne peuvent accéder aux magasins, ou encore si ceux-ci sont moins visibles à cause de l'emprise du chantier, les commerçants voient leurs chiffre d'affaire diminuer. De même, dans les mêmes proportions, les recettes publiques (taxes, impôts,..) sont réduites localement.

- Les éventuels dommages causés aux constructions voisines et autres ouvrages souterrains impliquent des réparations et des contraintes supplémentaires pour le public.

- Les travaux longs ou fréquents peuvent altérer la confiance dans la vitalité économique du quartier, et décourager d'éventuels investisseurs.

- En hiver, ou lors de mauvaises conditions climatiques, les travaux doivent être interrompus. Sur une longue période, les pertes de temps, d'argent et la gêne prolongée sont non négligeables.

- La surface de la chaussée est détériorée, ce qui réduit sa durée de vie (environs divisée par 3). A long terme le remblai qui rebouche la tranchée après les travaux est susceptible de s'affaisser. La route présente alors des creux et des bosses qui affectent son apparence, le confort et la sécurité des usagers. Il faut donc parfois engager des dépenses de réfection supplémentaires.

De plus, des conséquences macro-économiques sont également à soulever :

- L'utilisation de carrières pour y extraire des sols qui sont enfouis contribue à leur raréfaction et à l'augmentation des prix qui en dépendent.

- Le transport de milliers de tonnes de terre (de l'ordre de quelques tonnes par mètre linéaire de tranchée) contribue à l'usure du patrimoine routier : par exemple un camion de 38 tonnes use une autoroute 400 000 fois plus qu'une voiture.[29]

- L'espace des décharges, de plus en plus rare et cher, devrait plutôt être utilisé pour y enfouir d'autres matériaux que des déblais.

- De façon générale, le bilan énergétique national s'alourdit.

Suite à l'analyse de l'ensemble de ces gênes provoquées par un chantier urbain, il apparait de façon intuitive que les techniques sans tranchée suppriment ou du moins réduisent fortement la plupart de ces nuisances. Nous verrons au travers de quelques comparaisons simples, entre techniques avec ou sans tranchée les réductions significatives de certaines de ces nuisances. Ceci est notamment lié à la réduction considérable des emprises de chantier et surtout à la rapidité de réalisation.

2. Coûts sociaux

Après cette analyse il est évident qu'un chantier urbain impacte lourdement son environnement et provoque des nuisances non négligeables aux riverains. Il est alors clair que le simple coût direct d'un chantier n'est pas suffisant pour évaluer de façon « convenable » son coût global. Pour s'approcher au maximum du coût global d'un chantier, il est nécessaire de prendre un compte ses coûts sociaux.

Cette notion de coûts sociaux est de plus en plus prise en compte et a fait l'objet de plusieurs études en France et dans le monde. La théorie économique définit le concept « d'effet externe » comme un avantage ou un coût social pour la collectivité. Ce dernier est défini de la façon suivante : « Nous appelons coût social d'une activité l'ensemble des inconvénients que représente cette activité pour la société ». [5]

Une enquête a été réalisée sur Paris en 1991 sur 6 chantiers, auprès de 328 personnes (riverains, commerçants) afin d'obtenir une évaluation des nuisances et la perception du coût social par le public. Une très large proportion des interviewés (87%) a fait part d'au moins une nuisance liée aux chantiers. Parmi les personnes directement exposées (magasins, bureaux, appartements), la proportion atteint 95%. Les gênes les plus souvent citées sont :

- ✓ Le bruit (90%)
- ✓ La saleté et la poussière (58%)
- ✓ La perturbation des communications (55%)
- ✓ La gêne pour accéder aux bâtiments (50%)

Les quartiers d'affaires et commerciaux sont beaucoup plus sensibles à ces nuisances que les quartiers résidentiels. En effet ceux-ci sont beaucoup plus fréquentés dans la journée. Les nuisances ressenties par les interviewés peuvent être très variables et dépendent souvent de l'âge et de la catégorie sociaux professionnelles des enquêtés. [26] Bien entendu, cette étude est ancienne et l'échantillon interrogé est plutôt faible, toutefois cela donne une indication de la perception des nuisances par le public et il est fort à parier que si l'enquête était renouvelée aujourd'hui et sur un nombre plus important de personnes, les résultats seraient sensiblement les mêmes.

a. Les méthodes d'évaluation des coûts sociaux.

S'il est facile d'évaluer la perception des nuisances d'un chantier par les riverains, la mesure du coût social d'un chantier n'est pas chose aisée. En effet, comment évaluer en termes monétaires des « biens » qui par définition ne sont pas sanctionnés par le marché et échappent au système des prix ?[26]

Cependant, depuis les années 1970 le domaine des transports a largement pris en compte les couts sociaux dans ses calculs économiques, notamment pour démontrer l'efficacité des transports en commun dans les aires urbaines. Deux méthodes sont fréquemment utilisées pour l'évaluation des coûts sociaux dans le domaine des transports : *la méthode des prix hédonistes* et *l'évaluation contingente.* Ces deux démarches reposent sur le concept du consentement à payer – c'est-à-dire respectivement, la somme que les individus sont prêts à payer pour empêcher l'apparition d'une nuisance ou la somme qu'ils seraient prêts d'accepter à titre compensatoire.

Ainsi il ressort de l'étude précédente que le niveau de gêne ressentie par les interrogés influence directement leur consentement à payer. Plus ce niveau est important, mieux il évaluera ses pertes, et plus il sera enclin à payer pour l'utilisation de techniques alternatives. De même, plus la surface exposée aux nuisances du chantier est vaste, et plus le consentement à payer est grand. Finalement, la quasi-totalité des interrogés est favorable au développement de techniques alternatives permettant la diminution des nuisances (tels que les techniques sans tranchée par exemple), et plus de 75% des sondés seraient prêts à accepter une hausse des prix pour aider à leur développement. Cette acceptation révèle une réelle volonté de la part du public de voir disparaitre les gênes liés aux chantiers urbains. [30]

S'il apparait de façon évidente que la population est prête à payer pour réduire les gênes liées à un chantier, cela ne permet pas d'estimer de façon précise ses coûts sociaux. En effet, l'utilisation des méthodes des prix hédonistes et l'évaluation contingente dans le domaine des transports dévoile des difficultés ainsi qu'une certaine ambigüité dans le calcul des coûts sociaux. La notion de consentement

à payer suscite de nombreuses polémiques, notamment liées à la monétarisation des effets externes. Pour certains, la valeur d'une externalité doit représenter des dommages matériels que l'on peut objectivement mesurer au travers des dépenses qu'ils induisent et pour d'autres, cette valeur doit refléter une forme d'évaluation qu'une personne accorde à un effet donné, ce qui renvoie par nature à une mesure relative. De plus, le niveau de revenu de la personne interrogée impactera forcément la réponse de l'intéressé et encore une fois la notion d'objectivité et d'exactitude peuvent être débattues. [30]

b. Méthodologie d'évaluation du coût social d'un chantier d'AIT-AISSA [30]

Les méthodes d'évaluation des coûts sociaux des transports ne sont pas directement transposables au domaine des chantiers urbains. Cependant ils ont largement inspiré des modèles d'évaluations des coûts sociaux liés aux chantiers. Tous ces modèles, comme énoncé précédemment, sont très discutables, et reposent sur des hypothèses peu fiables. De plus, elles sont pour la plupart anciennes et donc plus adaptables aujourd'hui (formules en francs,…).

Toutefois, une méthode pour évaluer les couts sociaux liés à un chantier souterrain urbain revient de façon récurrente, comme étant la plus adaptée et s'approchant de la réalité. C'est celle de l'ingénieur Djamel Aït-AISSA. Il propose dans ses travaux : « Evaluation des coûts sociaux des travaux : une méthode de comparaison des techniques au service des élus », un outil d'aide à la décision dans le choix de la technique utilisée pour un chantier urbain. Dans un premier temps, comme énoncé précédemment, l'auteur arrive à la conclusion qu'une transposition des méthodes d'évaluation des coûts sociaux utilisées dans les transports pour les chantiers souterrains urbains, s'avère extrêmement délicate. Cependant et à défaut de pouvoir proposé une estimation fiable des coûts sociaux, il propose un outil d'aide à la décision simple et facile de compréhension permettant de comparer une technique avec ou sans tranchée en prenant en compte les coûts sociaux. Cet outil est présent en intégralité en annexe afin d'alléger le contenu du rapport *Annexe 6 :* .

Pour évaluer le coût social, AIT-AISSA propose de remplir des fiches multicritères intégrant des données statistiques pour comparer diverses situations et conditions de chantiers. En associant plusieurs composantes techniques, environnementales et urbanistiques, l'utilisateur doit pouvoir effectuer des choix pour des solutions moins gênantes adaptées aux situations locales et obtenir une estimation de coût global de travaux en affectant un coefficient au coût direct du chantier. Cet outil commence à dater (2001) et il se calcule en franc, il n'est donc plus utilisable de nos jours. Toutefois, la démarche entreprise pour évaluer les coûts sociaux est intéressante.

L'outil peut se résumer de la façon suivante : la première partie consiste à analyser l'environnement et les caractéristiques liées au chantier (caractéristiques de la voie, type de travaux à réaliser, durée, densité du sous-sol,…). Ensuite il s'agit de définir l'activité urbaine (type et densité). AIT-AISSA propose alors un tableau détaillant les différentes nuisances. Il est possible d'attribuer 3 niveaux de sensibilité de gêne (peu sensible, sensible, très sensible) à chaque nuisance pour une technique avec ou sans tranchée. Découlant de cette analyse de sensibilité de gêne par rapport à la technique employée, l'auteur propose d'affecter un coefficient multiplicateur au prix direct du chantier dépendant de la sensibilité de la gêne et du coût direct du chantier.

8. POURCENTAGE DE LA GÊNE			
Milieu	Peu sensible = %	Sensible = %	Très Sensible = %
Si TST	Peu sensible = %	Sensible = %	Très Sensible = %
Si ET	Peu sensible = %	Sensible = %	Très Sensible = %

TST = Techniques Sans Tranchée
ET = Techniques en Tranchée

Image 17 : Pourcentage de la gêne pour une technique avec ou sans tranchée – outil AIT AISSA [30]

Par exemple, si la technique en tranchée enregistre son plus haut pourcentage dans la cellule très sensible, les coûts directs des travaux liés à cette technique seront multipliés par 0,03 (pour un coût de travaux inférieur à 1 million de francs).

10. COÛT DE L'OPERATION INDEXEE		
	Technique Sans Tranchée	Technique En Tranchée
Coûts directs		
Coefficients		
Totaux	Coûts directs X Coefficient	Coûts directs X Coefficient

Image 18 : Calcul d'affectation des coûts sociaux aux coûts directs pour une technique avec ou sans tranchée –outil AIT AISSA [30]

Il est de ce fait possible de comparer le coût global d'un même chantier avec deux techniques différentes (avec ou sans tranchée). De cette façon, un même chantier qui était a priori plus couteux en méthode sans tranchée peut s'avérer être moins cher en coût global par rapport à l'utilisation d'une technique avec ouverture de tranchée, en fonction des nuisances qu'elle engendre (cela dépend donc de l'appréciation de l'utilisateur de l'outil).

Cette méthode se distingue des autres méthodes qui ont pu être expérimentées, et d'après plusieurs experts, c'est celle qui s'approche, encore aujourd'hui, le plus de la « réalité ». En effet, la plupart des autres méthodes reposent sur des formules complexes permettant d'évaluer de façon précise chaque coût social, à partir d'hypothèses souvent douteuses. Ici l'approche est différente, il s'agit à partir de l'observation et de l'analyse de l'environnement d'affecter un coefficient global au cout direct du chantier et de comparer ainsi le coût entre une méthode classique et sans tranchée.

Cependant cette démarche présente également ses limites, comme le mentionne l'auteur : « L'utilisation des coefficients par défaut est proposé dans le but de mesurer indirectement et à titre indicatif une valeur de projet qui soit globale. Il est donc courtois d'observer les résultats de la ligne des totaux avec beaucoup de souplesse ». En effet, les coefficients sont fixés de manière empirique et

ainsi les résultats sont plus une indication ou une estimation qu'un prix exact. De plus, les évaluations des sensibilités des gênes induites dépendent de l'appréciation de l'utilisateur de l'outil et sont donc plutôt subjectives.

c. Propositions alternatives pour prendre en compte les couts sociaux [30]

Comme cela vient d'être démontré, il est extrêmement délicat d'évaluer de façon précise les coûts sociaux. Pourtant, il apparait de façon intuitive et évidente que les nuisances et donc a fortiori les coûts sociaux des méthodes sans tranchée sont bien plus faibles qu'avec les techniques classiques. De plus, il est clair, et l'analyse environnementale le prouvera, que les techniques sans tranchée sont plus respectueuses vis-à-vis de l'environnement. Ainsi, plutôt que de vouloir démontrer de façon « douteuse » en tentant d'évaluer de façon précise les coûts sociaux d'un chantier, dans le but de prouver que les coûts des techniques sans tranchée concurrencent ceux des techniques avec ouverture de tranchée, il est possible de considérer des solutions alternatives qui facilitent le développement de l'utilisation des méthodes sans tranchée. :

- Il est par exemple possible d'envisager ***une « taxation environnementale ».*** Le Japon (avec la « road occupancy charge » 1991) ainsi que d'autres pays tels que le Royaume-Uni ou le Pays-Bas, pratique déjà ce principe d'incitation financière pour favoriser l'utilisation de techniques sans tranchée ou du moins inciter les entreprises à optimiser leur durée de travaux sur la voie publique. En effet, l'utilisation des voies publiques pour l'installation ou la réparation de canalisations urbaines seraient soumises à des payements proportionnels à l'emprise occupée et à la durée des opérations. La sensibilité du lieu pourrait également être prise en compte. En Grande-Bretagne par exemple, les concessionnaires sont taxés s'ils ne terminent pas leurs travaux sur la voie publique dans un délai « raisonnable ».

- Un système ***d'allègement fiscaux*** pourrait être mis en place pour tous les opérateurs qui démontreraient leur volonté d'utiliser des techniques participant à une réduction significative des nuisances et des émissions de GES (techniques sans tranchée, insonorisation des engins de chantier,…).

- Faire connaitre auprès des élus locaux les bénéfices des technologies sans tranchée, capable de réduire considérablement la gêne et la pollution, aux travers ***de campagnes de sensibilisation et d'informations.***

De façon générale, dans les cas des chantiers urbains il a été prouvé que les nuisances sont les principales sources de coûts sociaux.

Une analyse sociologique dans le cadre du projet FURET (Cf. partie innovations et perspectives) énonce que :

« L'acceptabilité de la nuisance est liée à :

- la compréhension de sa nécessité
- le constat de son optimisation,
- la vision de l'évolution de la construction,
- la compensation attendue par l'amélioration

- objet des travaux. » [31]
- et bien sûr le degré de gêne ressenti (durée, ampleur)

Cela montre qu'une communication accrue envers le public sur les points énoncés ci-dessus permettrait d'aider à l'acceptabilité des travaux urbains auprès du public. Cela impacterait alors indirectement le ressenti de la gêne de façon positive.

Enfin, n'oublions pas que l'utilisation des technologies sans tranchée par les entreprises et concessionnaires, en réduisant fortement les nuisances et l'empreinte carbone des chantiers urbains, participe au développement d'une bonne image de l'entreprise. Une fois encore ce paramètre est très difficilement estimable financièrement, mais sous réserve d'une bonne communication de la part des entreprises, il est certain que les gains sont loin d'être négligeables : attractivité de l'entreprise, meilleure compréhension des clients pour d'éventuelles augmentations des prix, image d'une entreprise innovante prenant en compte son impact sur l'environnement et le confort des riverains,… .

3. Comparaisons environnementales et économiques entre travaux sans tranchée et travaux traditionnels

a. Comparatifs FSTT

Dans cette partie, il sera présenté trois tableaux issus de la documentation de la FSTT permettant d'élaborer des comparatifs de temps, d'engins mobilisés, de volume de déblais à déplacer, et du bilan carbone entre des méthodes « traditionnelles » en tranchée ouverte, et des techniques de travaux sans tranchée appliquées à des exemples concrets :[12]

[12] http://www.fstt.org/pages/sans-tranchee-en-1-clic/elus-decideurs/comparatif-entre-travaux-sans-tranchee-et-travaux-traditionnels.html

i) Temps de mise en œuvre et engins mobilisés – forage dirigé -

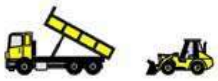
Pose en ville de 100 m de canalisation de diamètre 63mm					
Avec ouverture de tranchée			Sans ouverture de tranchée, par forage dirigé		
	Matériel	Durée		Matériel	Durée
Installation du chantier de signalisation Découpe des enrobés		*1 jour*	Repérage des réseaux Préparation du profil de forage Réalisation des fouilles d'entrée et de sortie		*1 jour*
Ouverture de la tranchée Evacuation des déblais en décharge		*2 jours*	Forage pilote, alésage et tirage de la canalisation		*1 jour*
Pose d'un lit de sablon Pose de la canalisation Remblai de la tranchée		*1 jour*			
Compactage de la tranchée Réfection des enrobés Démontage du chantier		*1 jour*			
Total		**5 jours**	**Total**		**2 jours**

Tableau 3 : Comparaison de temps de mise en œuvre pour un chantier avec ou sans tranchée (source FSTT)

Ce tableau permet de mettre en lumière, l'avantage considérable du temps économisé pour un même chantier, avec une technique sans tranchée, ici le forage dirigé. Il faut pour une pose de 100 mètres de canalisation PE de diamètre 63mm environs cinq jours en méthode traditionnelle, contre seulement deux (voir même une seule journée dans de bonnes conditions) en forage dirigé (descriptif dans tableau 3).

Le fait que la durée du chantier soit quasiment divisé par 3 affecte directement les durées des gênes subites par les riverains et donc réduit leurs pénibilités. A cela s'ajoute : la réduction considérable de l'emprise du chantier, le nombre d'engin de chantier est moindre et ainsi l'impact sur le trafic réduite, les risques liés à l'ouverture de tranchée sont également drastiquement diminués,….. . L'ensemble de ces paramètres favorise l'acceptation du public pour un même chantier, et intuitivement réduit l'impact environnemental.

ii) Volume de déblais à déplacer – forage dirigé-

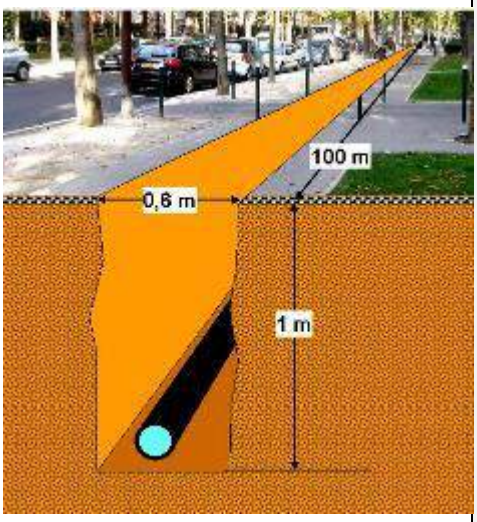
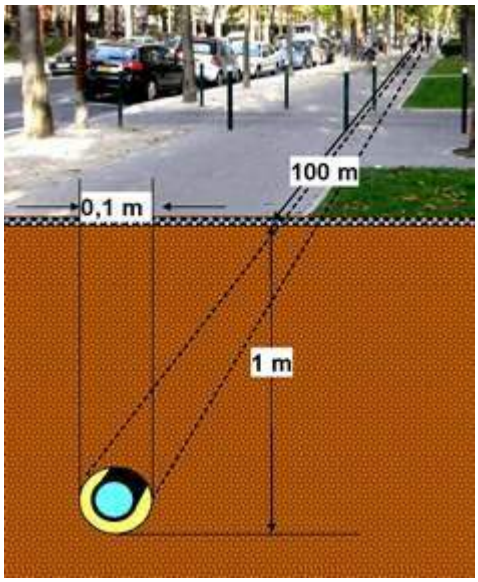
Pose en ville de 100m de canalisation de diamètre 63mm			
Avec ouverture de tranchée		Sans ouverture de tranchée, par Forage Dirigé	
Volume de déblais à déplacer	Schéma	Volume de déblais à déplacer	Schéma
120 m3		**0,8 m3**	

Tableau 4 : Comparaison de volume de déblais à déplacer pour un chantier avec ou sans tranchée (source FSTT)

Ce tableau reprend les mêmes caractéristiques que le chantier précédent et permet de montrer de façon imagée, la réduction considérable de volume de déblais à déplacer. Le volume de

déblais à déplacer est divisé par 150. Cela aura un impact considérable sur le bilan carbone du chantier. *(Cependant, il semblerait que les puits de départ et d'arrivé n'ait pas été pris en compte ici, cela donne tout de même un ordre de grandeur de la réduction de volume déplacé).*

iii) Bilan carbone – microtunnelier

Pose de 100 m de canalisation de diamètre 500 mm à 2,5 m de profondeur avec une décharge à 20 km		
	Avec tranchée	**Sans tranchée, par Microtunnelier**
Déblais	*420 m3*	*42 m3 avec les puits*
Remblais	*400 m3*	*22,4 m3*
Rotation de camions 5 tonnes	*100*	*5*
Bilan carbonne (Eq CO2)	*4,49*	*0,22*

Tableau 5 : comparatif chantier avec tranchée et avec microtunnelier

Cet exemple, est appliqué à un chantier de pose de canalisation de diamètre 500 mm sur 100 m à une profondeur de 2,5m, par microtunnelier et avec tranchée. Cette fois-ci les puits sont pris en compte, et les volumes de déblais sont tout de même divisés par 10, et remblais par 17. Le nombre de rotation de camion 5 tonnes est divisé par 20 (compte tenue de la réduction des volumes et des jours de chantier). L'ensemble de ces réductions impacte forcément directement le bilan carbone « du chantier », puisque celui-ci est divisé par 20 également.

Le résultat du bilan carbone ne semble s'appliquer uniquement qu'aux paramètres indiqués dans le tableau, car nous verrons par la suite que le bilan carbone de l'ensemble d'un chantier est fortement réduit avec une méthode sans tranchée, toutefois, un facteur 20 semble peu probable et un peu trop important pour être le bilan carbone de l'ensemble du chantier.

b. Bilan carbone – logiciel CANOPEE –

CANOPEE, est un logiciel en ligne, permettant de réaliser des études environnementales de chantiers. Ce logiciel est proposé par les canalisateurs de France, qui est une organisation professionnelle membre de la Fédération Nationale des Travaux Publics. Elle fédère 350 entreprises de toutes tailles spécialisées dans la pose et la réhabilitation de canalisations d'eau potable, d'eaux usées, d'irrigation et de gaz. M. CASSINI de la société SPAC a eu l'amabilité et la confiance de me transmettre ses identifiants pour pouvoir utiliser le logiciel CANOPEE en ligne et ainsi réaliser des simulations.

Grâce à la collaboration de M. BALMAT de la société suisse Piasio, il a été possible de réaliser une étude de l'empreinte carbone sur CANOPEE d'un chantier ayant été effectué à Lausanne par la technique de « cracking ». Le chantier consiste à renouveler une canalisation PE de diamètre 125 mm sur 115 mètres le long d'un carrefour autoroutier à Lausanne en Suisse. Une deuxième étude sera

ensuite réalisée en prenant les mêmes caractéristiques de chantier mais ce coup-ci en tranchée ouverte. Il sera alors possible de comparer l'empreinte carbone des deux techniques pour un même chantier.

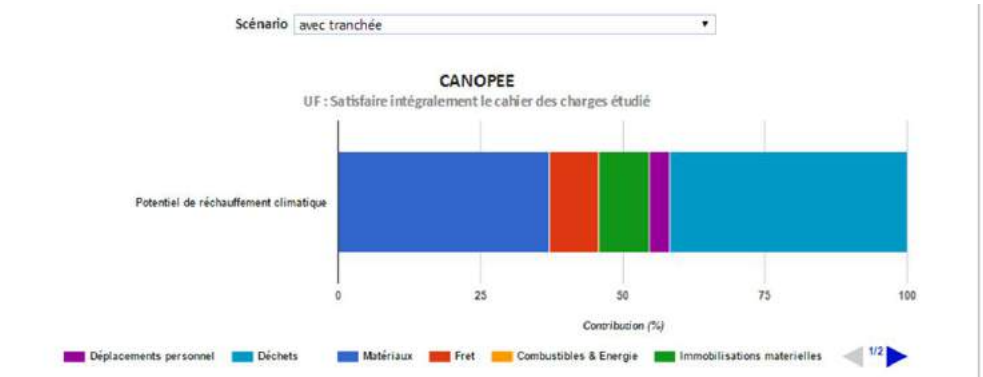
- ***Caractéristiques communes du chantier pour les deux différentes techniques :***
  - ✓ Tranchée de 115m de long
  - ✓ Employés à 20km du chantier
  - ✓ Site de production de PE à 200km
  - ✓ Semi-remorque simple fret de 19 t parcourant 20km pour se rendre sur le site
  - ✓ Les matériaux extrait de la fouille seront considérés comme « déchets » et déposé à un site spécialisé à 20 km du chantier par semi-remorque simple fret de 19 t
  - ✓ La partie énergie est combustible ne sera pas pris en compte pour les deux techniques à cause d'un manque d'information pour les données d'entrée.

- ***Caractéristiques du chantier en tranchée :***
  - ✓ Dimension de la tranchée : 60 cm de large pour 1 mètre de profondeur.
  - ✓ 50 cm de sable pour un volume total de 35m3
  - ✓ 35 cm de grave naturelle concassée pour un volume total de 24m3
  - ✓ 15 cm d'enrobé chaux non recyclé pour un volume total de 8,5m3
  - ✓ On ne prendra pas en compte de recoupe d'enrobé de part et d'autre de la tranchée.
  - ✓ 6 jours de chantier (moyenne 20m/j).

- ***Caractéristiques du chantier par cracking :***
  - ✓ Une fouille de départ de 2,5 mètres de long pour 1,5 mètre de large pour 1 mètre de profondeur
  - ✓ Une fouille d'arrivée de 1,5 mètre de large pour 1 mètre de large et 1mètre de profondeur, prolongé d'une deuxième fouille pour l'appareillage de 5mx0,5x0,5
  - ✓ Les fouilles seront remblayées de la même façon que la tranchée de 115m.

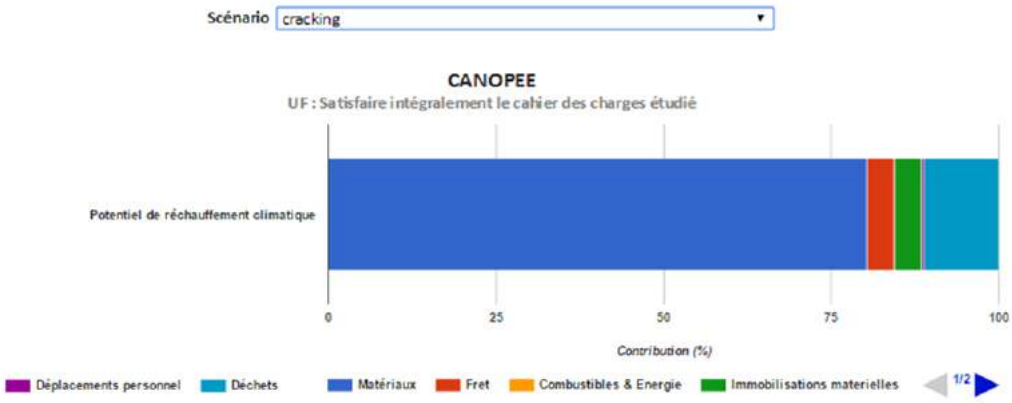
- ***Résultats :***

A partir des hypothèses prises pour le chantier de Lausanne, CANOPEE fournit les résultats suivants :



Indicateurs	Matériaux	Fret	Combustibles & Energie	Immobilisations materielles	Déplacements personnel	Déchets	TOTAL
Potentiel de réchauffement climatique (kg CO2 eq)	2010	465	0	489	186	2260	5410

Image 19 : Emission de GES (en kg eq CO2) du chantier avec ouverture de tranchée en proportion



Indicateurs	Matériaux	Fret	Combustibles & Energie	Immobilisations materielles	Déplacements personnel	Déchets	TOTAL
Potentiel de réchauffement climatique (kg CO2 eq)	1350	69.7	0	68.8	5.17	188	1680

Image 20 : Emission de GES(en kg eq CO2) du chantier par cracking en proportion

Postes	Avec tranchée	Cracking
Matériaux	2010	1350
Fret	465	69,7
Immobilisation matérielles	489	68,8
Déplacements personnel	186	5,17
Déchets	2260	188
Total	**5410**	**1682**

Tableau 6 : Emission de GES (en kg CO2 éq.) par poste, des deux techniques pour le chantier de Lausanne

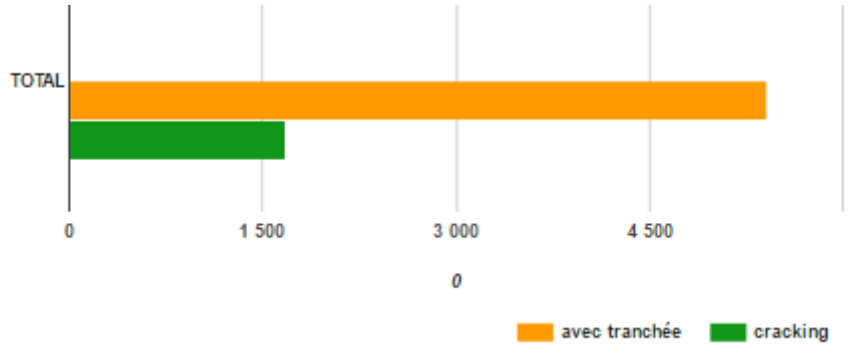


Image 21 : Graphe comparatif des émissions de GES (en kg CO2 eq.) des deux techniques pour le chantier de Lausanne

Les émissions de GES du chantier sont **réduites de quasiment 70%** entre une technique classique et la technique de cracking. Il est possible de constater que tous les postes sont fortement diminués avec la technique de cracking (cf. tableau 6). Il est intéressant de noter que malgré le fait que l'empreinte carbone du poste « matériaux » soit divisé par deux avec la technique de cracking, cela représente plus de 80% du bilan carbone total de la technique de cracking. Alors que pour la méthode avec tranchée ouverte le poste « matériaux » ne représente qu'environ 38%. Cela montre à quel point les autres postes du bilan carbone sont réduits.

c. ECO-CANA : logiciel d'évaluation comparative des consommations d'énergies et des émissions de gaz à effet de serre pour pose de canalisation

Afin de vérifier l'ordre de grandeur des résultats obtenus pour la réduction du bilan carbone par méthode de « cracking » sur CANOPEE, les résultats d'un deuxième chantier vont être exploités à partir d'un autre logiciel ECO-CANA. ECO-CANA est un logiciel d'évaluation comparative des consommations d'énergies et des émissions de gaz à effet de serre pour pose de canalisation, développé et utilisé par le groupe français COLAS. Il est important ici de préciser que je n'ai pas réalisé le bilan carbone en rentrant les données d'entrées, car je n'ai pas eu accès au logiciel. Seulement l'analyse des résultats

d'un chantier transmis par un industriel seront analysés. De plus, ECO-CANA a l'avantage de proposer une comparaison des consommations énergétiques d'un même chantier entre une technique sans tranchée et avec tranchée ouverte.

❖ ***Données d'entrées : profil du chantier :***

Le chantier consiste en un remplacement de canalisation par tranchée ouverte ou par technique de *cracking* avec les caractéristiques suivantes :

Longueur de canalisation (m)	730,77
Diamètre canalisation (mm)	250

Tableau 7 : Caractéristiques de la canalisation

D'autres données complémentaires sont rentrées dans le logiciel telles que les masses volumiques des matériaux, les cadences de chantiers (en h/j),…. .

Avec tranchée :

Les caractéristiques de la tranchée sont indiquées sur le schéma ci-dessous :

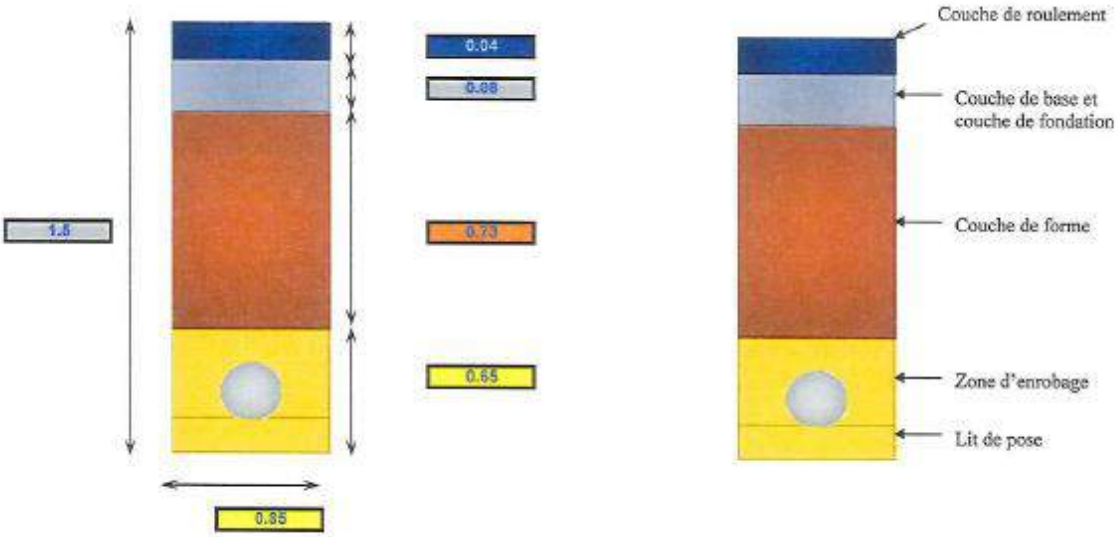


Image 22 : Schéma représentant les caractéristiques de la tranchée

Sans tranchée :

Les caractéristiques des fouilles d'entrée et de sorties sont indiquées sur le schéma ci-dessous :

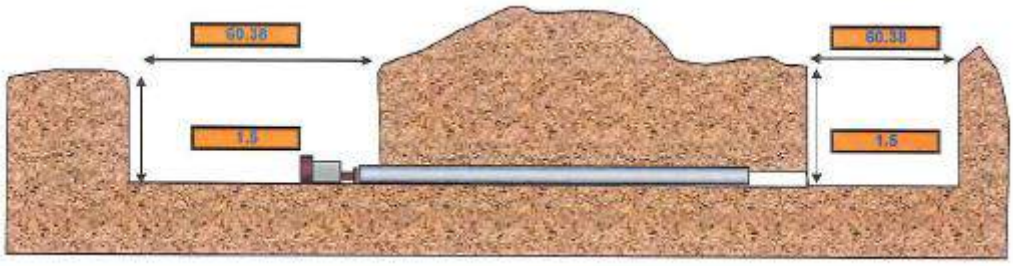


Image 23 : Schéma représentant les caractéristiques des fouilles d'entrée et de sortie pour le cracking

Résultats :

Il est à noter que les postes de comparaisons ne sont pas exactement les mêmes que pour le logiciel CANOPEE. Nous nous attacherons donc ici surtout à comparer les résultats totaux et à analyser les ordres de grandeurs. Les consommations énergétiques pour ce chantier **sont réduites de plus de 50%,** comme il est possible de le constater dans le graphe et tableau ci-dessous :

Technique	Transport	Matériaux	Ouverture	Mise en œuvre	Total	Economie
Tranchée	72 136	325 986	163 924	284 853	**847 899**	
Cracking	40 555	252 035	28 581	58 886	**388 057**	**-54%**

Tableau 8 : Consommations énergétiques du chantier en (MJ)

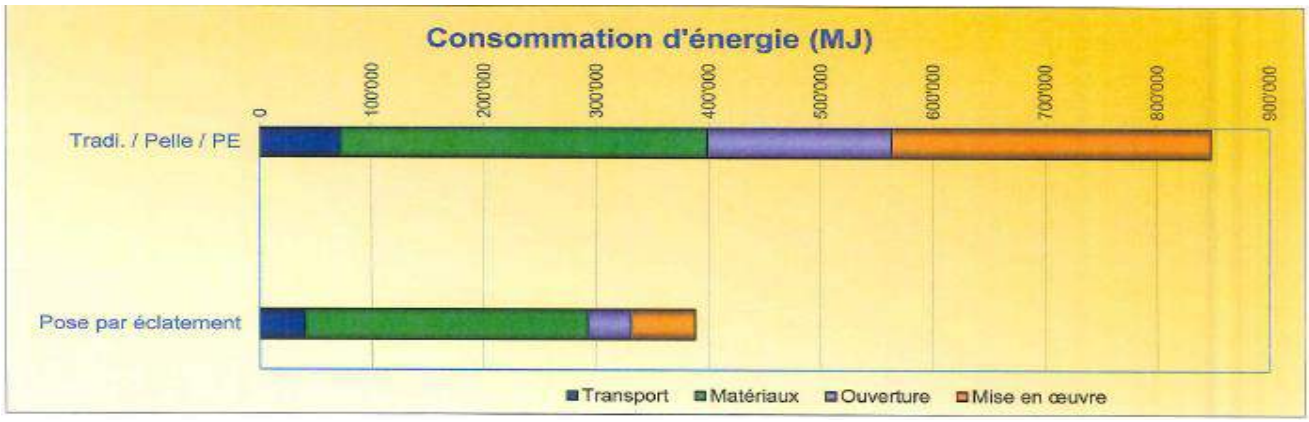


Image 24 : Graphique des consommations énergétiques du chantier en MJ

Le bilan carbone lié aux émissions de GES du chantier est cette fois-ci **réduit de 56%,** entre une technique conventionnelle et une technique par cracking. Que ce soit pour les consommations énergétiques ou pour le bilan carbone, les deux postes qui sont drastiquement réduits par la méthode de cracking sont liés à l'ouverture et à la mise en œuvre du chantier. Les postes transports et matériaux sont également réduits mais dans une moindre mesure (cela avait pu être observé pour le poste matériaux sur CANOPEE également).

Technique	Transport	Matériaux	Ouverture	Mise en œuvre	Total	Economie
Tranchée	5 544	28 253	12 599	21 588	**68 554**	
Cracking	3 117	19 694	2 965	4 372	**30 138**	**-56%**

Tableau 9: Emission de GES du chantier en kg eq. CO2

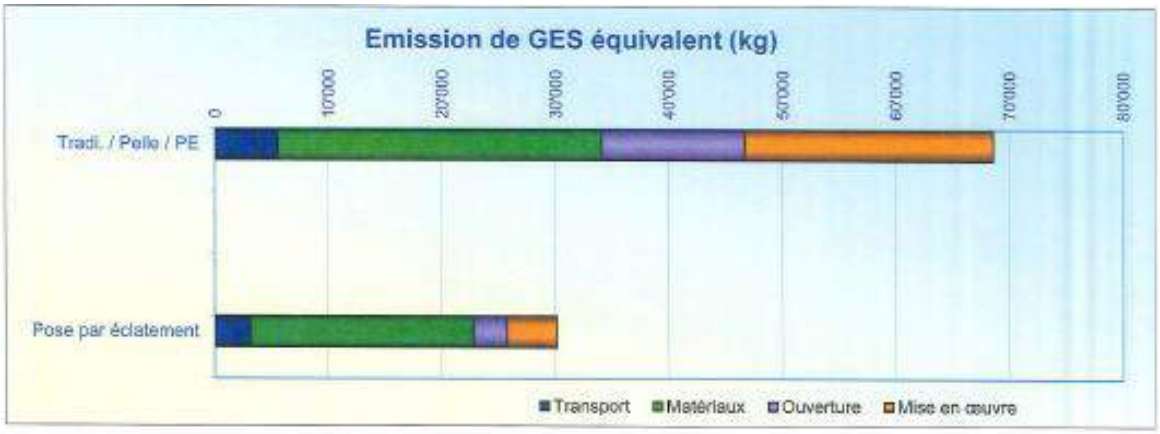


Image 25 : Graphique des émissions de GES du chantier en kg eq. CO2

Les réductions des émissions de GES affichées par ECO-CANA sont légèrement plus faibles que celles de CANOPEE (56% contre 69%), cependant il faut rappeler que les deux chantiers sont différents, et que les logiciels reposent certainement sur des hypothèses sensiblement différentes. Par exemple, ECO-CANA est plus intuitif et il est possible de rentrer directement la méthode de pose ou de renouvellement retenue alors que pour CANOPEE il revient à l'utilisateur de rentrer toutes les données du chantier par rapport à la technologie retenue. Toutefois il est important de remarquer que les résultats obtenus sont globalement du même ordre de grandeur.

De façon générale, les spécialistes du domaine affirment qu'il est courant de **retrouver des bilans carbones réduits de 50% à 80%.** En effet, cela dépend de nombreux facteurs : tels que la technologie retenue, les caractéristiques du chantier, … . Patrice Dupont Président de la FSTT annonce par exemple que : « Elles [les techniques sans tranchée] permettent de raccourcir la durée des travaux et divisent par dix le volume des déblais et donc leur transport. Le bilan carbone d'un chantier est ainsi réduit de 80 %. »[13]

[13] http://www.lesechos.fr/pme-regions/actualite-des-marches-publics/02195634220-le-sans-tranchee-pour-une-ville-durable-1124812.php#

Il est donc raisonnable d'affirmer, et cela a été montré au travers de deux études, dont une que j'ai réalisé avec l'aide de M BALMAT, que l'utilisation des techniques sans tranchée réduits considérablement l'empreinte carbone des chantiers et donc leurs impacts sur l'environnement.

d. Comparaison économique succincte appliquée à un exemple GRDF

Dans cette partie une comparaison simple des coûts entre deux techniques avec et sans tranchée sera réalisée. Cette partie est très succincte car le sujet est volontairement orienté sur les impacts environnementaux et sociétaux, pour justement être en mesure de contraster les prix. Toutefois, il est intéressant d'avoir un exemple des coûts de ces méthodes.

Le chantier en question consiste à mettre en place une canalisation gaz PE de diamètre 160 mm sur 100m, en méthode classique et en forage dirigé. Les données proviennent directement des chargés d'affaires GRDF et d'une entreprise spécialisée dans le forage dirigé STT, et permettent d'avoir un ordre de grandeur des coûts.

<u>En tranchée ouverte :</u>

- Terrassement et pose de la canalisation 130€/ml : 13 k€

Coût total = 13 k€

<u>En forage dirigé :</u>

- indemnité chantier : 3 k€
- Prix au mètre linéaire (terrassement des fouilles d'entrée et sortie compris) 150€/ml : 15 k€
- pompage boue : 1.5 k€
- étude sol : 6 k€

Coût total = 25,5 k€

Il est possible de constater que du fait des « coûts annexes » à la pose de la canalisation (étude de sol notamment), le forage dirigé dans cet exemple s'avère être fortement plus onéreux.

Il est important de contraster ces résultats. En effet, ceci n'est qu'un exemple proposant un ordre de grandeur. Les prix de GRDF pour la pose de la canalisation en technique conventionnelle sont fixés par une offre de marché alors que les prix en forage dirigé sont encore, pour l'instant, réalisés via des devis. Ainsi, les prix au mètre linéaire en méthode classique sont forcément plus compétitifs. De nombreux paramètres spécifiques liés au chantier vont impacter ces prix : la longueur, les caractéristiques du sol, mise en place d'un fourreau, environnement du chantier…. .

Ainsi, il est vraiment délicat de réaliser une étude comparative économique entre les techniques avec et sans tranchée, car cela dépend réellement au cas par cas, et les variations de prix peuvent être très significatives d'un chantier à l'autre. Dans cet exemple, la technique conventionnelle

s'avère être plus compétitive d'un point de vue purement économique, cependant cela pourrait être complètement différent pour un autre chantier. Il revient donc au concessionnaire, ou à l'entreprise de choisir la méthode la mieux adaptée en prenant en compte l'environnement du chantier et l'ensemble des paramètres qui ont été abordés précédemment (impact environnemental, nuisances, possibilité technique, coûts,…).

IV) Innovations et perspectives

1. Technique de micro-forage : Keyhole [32] [34] [33]

Grâce à son centre de recherche le « CRIGEN », ENGIE a mis au point, en partenariat avec E.ON Technology et Trackto-Technik, une technique de micro-forage très efficace pour les branchements gaz, nommée « KEYHOLE ». Son principal objectif est d'améliorer la rentabilité économique des branchements gaz, mais également d'assurer une excellente sécurité, notamment vis-à-vis des autres réseaux souterrains, tout en étant dans une démarche de développement durable avec un impact environnemental fortement réduit.

- ***Mise en œuvre :***

La technique est basée sur le carottage d'une pastille de 600 mm de diamètre qui sera recollée à l'issue de l'intervention.[33] Deux fouilles doivent être réalisées, une d'entrée et une de sortie. Tout d'abord, l'enrobé est découpée puis extrait. Les déblais sont alors aspirés, par un camion aspirateur, jusqu'à la profondeur souhaitée. La micromachine de forage est mise en place, c'est l'opération la plus délicate car il faut caler la machine dans un trou cylindrique de seulement 60cm de diamètre. Cette opération requiert deux personnes. Le forage du branchement est ensuite réalisé grâce à la technique de forage dirigé, afin de contourner si nécessaire d'autres réseaux sous-terrain. Le PE est tiré en retour par alésage. L'opération du branchement est alors réalisée. Enfin, les fouilles sont remblayées et l'enrobage remis en place sur une couche de gravier.

Image 26 : engin tracto-tecnik permettant de réaliser la technique de micro-forage : Keyhole [34]

Temps de l'opération d'un branchement de 8 mètres et deux fouilles (entrée/sortie) :

1. Découpe de l'enrobé : 5 à 10'
2. Aspiration des déblais : 10 à 15'
3. Mise en place de la machine : 10'
4. Forage du branchement : 25 à 40'
5. Tirage du PE en retour : 25 à 35'
6. Réalisation du branchement : 30 à 45'
7. Remblayage des fouilles : 30 à 45'
8. Remise en place de l'enrobé : 20 à 30'

Soit un temps total de **2h30** dans les meilleures conditions à un peu moins de 4h dans des conditions moins favorables.

Il est donc possible grâce à la technique du Keyhole de réaliser 2 à 3 branchements complets en une journée.

Résultats obtenus :

Après 18 mois d'essais par GRDF, ce sont plus de 300 branchements qui ont été réalisés, des branchements longs d'une dizaine de mètres, mais également des branchements courts de l'ordre de 4 mètres. Des extensions de réseaux allant jusqu'à 25 m de longueur ont également été réalisées.

Les retours économiques liés à cette technique sont très prometteurs, puisque on arrive à un prix de l'ordre de 57% du prix d'une méthode « classique » avec ouverture de tranchée. Ainsi cela permet un retour sur investissement plus rapide pour les entreprises qui investissent dans cette technologie.

Les tests pour les réseaux d'eau sont également très concluants, et des tests sont en cours pour les réseaux d'électricités. C'est donc potentiellement 3 marchés qui s'offrent à cette nouvelle technique. D'autres pays ont également manifesté un fort intérêt pour cette technique tels que l'Espagne, l'Italie, ou encore les Pays-Bas. [34]

Inconvénients et difficultés éventuelles :

- ✓ Nécessité de réaliser un bon repérage et une géo-détection des canalisations
- ✓ La nature du sol n'est pas toujours favorable au micro-forage
- ✓ Risque d'effondrement de la fouille d'accès
- ✓ Nécessité, en cas de doute, de réaliser un carottage pour connaître la texture du terrain

2. ORFEUS [35]

Orfeus ("Operational Radar For Every drill string Under the Street") est un projet mené par un consortium de 11 partenaires industriels (dont ENGIE) issus de 7 pays européens (U.K., Italie, France, Allemagne, Slovénie, Grèce et Irlande). Ce programme comporte deux objectifs principaux :

- Améliorer le « GPR », radar à pénétration de sol (ou géoradar). Le GPR est un appareil géophysique utilisant le principe d'un radar que l'on pointe vers le sol pour en étudier la composition et la structure. La qualité des cartes « géologiques » est donc considérablement améliorer, et cela facilite fortement leur lecture par les opérateurs.
- Développer un radar incorporé dans la tête de forage (pour le forage horizontal dirigé), permettant de détecter en temps réels les canalisations et obstacles dans le sol.[36] Après près

de 10 années de développement et d'expérimentations, le programme Orfeus est arrivé à son terme et est opérationnel. Il est aujourd'hui en phase de commercialisation.

La principale limite dans l'utilisation du forage horizontal dirigé réside dans la nécessité d'une connaissance du sous-sol très poussée. De plus, malgré une bonne connaissance du sous-sol, les risques de dommages aux ouvrages enterrés ne sont pas négligeables. Cela peut représenter des dangers importants et des pertes financières pour les entreprises, notamment pour les réseaux énergétiques.

Grâce aux travaux réalisés dans le cadre du programme Orféus, il est aujourd'hui possible d'avoir une « carte géologique » précise de la composition du sous-sol, et surtout de détecter avec précisions les ouvrages enterrés métalliques ou non. Enfin, cette technologie a également la capacité de détecter en temps réels les obstacles (métallique et non-métallique) dans un rayon de 50 cm autour de la tête de forage. Les données obtenues sont converties en images 3-D et sont directement transmises à l'opérateur. Celles-ci sont facilement interprétables et peuvent l'alerter en cas d'obstacle, de canalisation ou de tout objet suffisamment près de la tête de forage pouvant présenter un danger de collision. L'opérateur peut ensuite modifier la trajectoire de la tête de forage afin d'éviter les obstacles.

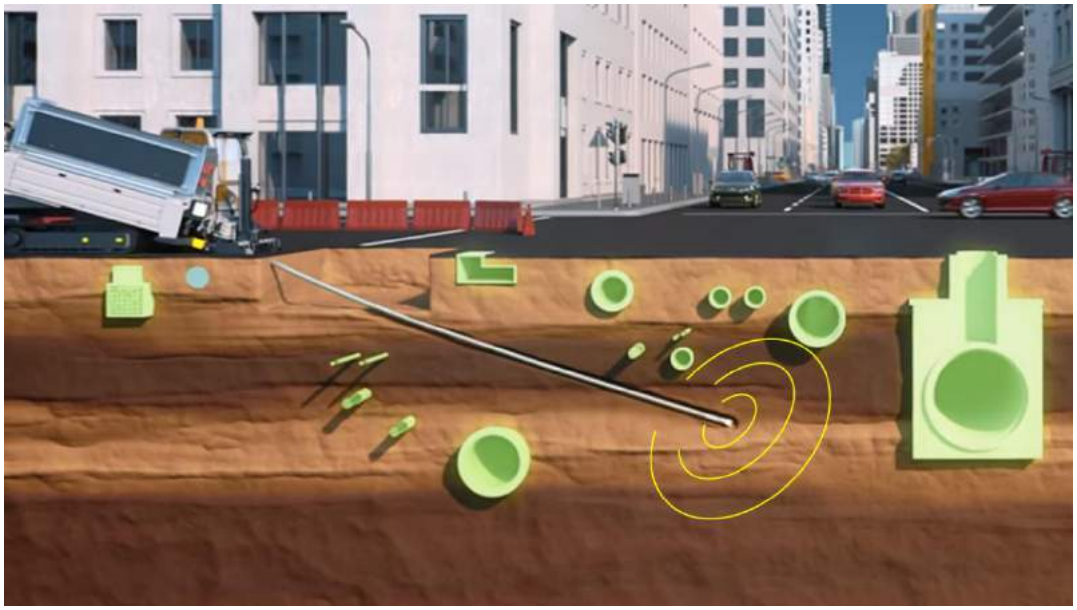


Image 27 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement de la technologie ORFEUS[14]

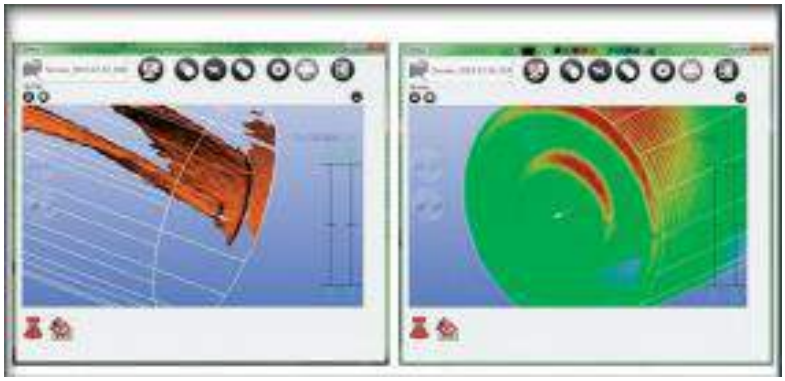


Image 28 : Cartes 3D obtenues par la tête de sondage grâce à la technologie ORFEUS[37]

[14] Vidéo youtube orfeus http://orfeus.org/.

Cette innovation technologique ouvre des perspectives considérables pour les techniques de travaux sans tranchée. En effet, en plus de présenter les avantages des techniques sans tranchée (réduction des nuisances, des couts indirects,…) et une réduction considérable de l'impact environnemental, cette technique permet de réduire largement les risques de dommages aux ouvrages. Cette technologie très prometteuse, présage un développement important dans les années avenir, et une augmentation de la proportion de chantier de pose de canalisation sans tranchée via la technique de forage dirigé.

3. Tranchée étroite [33]

La technique de tranchée étroite n'a pas été détaillée ici, car elle ne rentre pas directement dans le périmètre du sujet. Toutefois, il est intéressant de savoir que de telles techniques existent. Elles aussi permettent une bonne rapidité d'exécution et une diminution des gênes par rapport aux techniques classiques d'ouverture de tranchée. Les méthodes de pose de canalisations par tranchées étroites présentent les avantages et inconvénients suivants :

Avantages	Inconvénients
✓ **Rapidité d'exécution (jusqu'à 700 ml/j)** ✓ **Impact moindre sur le trafic et les** ✓ **riverains** ✓ **Coût global de main d'œuvre diminué** ✓ **Technique peu dangereuse pour** ✓ **l'opérateur**	✓ **Préparation et repérage des chantiers** ✓ **primordiaux** ✓ **Nécessité de personnels qualifiés** ✓ **Nécessité de matériels spécifiques** ✓ **Mise en œuvre délicate en sous-sol** ✓ **encombré** ✓ **Irréalisable sur les structures pavées**

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des techniques de tranchée étroite

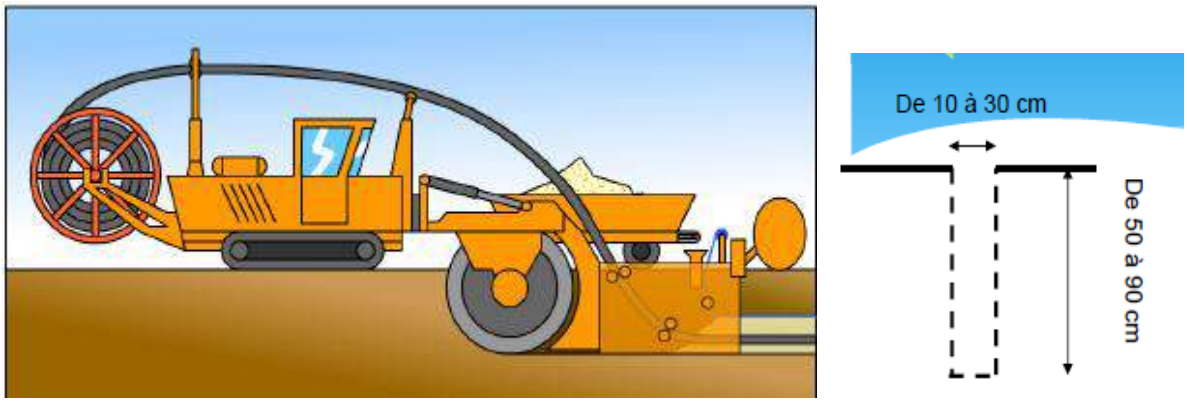


Image 29 : Schéma simplifié de réalisation d'une pose de canalisation par tranchée étroite avec les dimensions associées [33]

Ces méthodes peuvent dans certains cas s'avérer être un bon compromis entre tranchée ouverte et technique sans tranchée.

4. Projet FURET [31] [38]

Le projet FURET, « Furtivité Urbaine Réseaux et Travaux », est un programme soutenu par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) et de nombreux partenaires publics et privés (sociétés d'ingénierie, collectivités locales, entreprises de travaux publics, écoles d'ingénieurs et universités,…). Ce programme a été initié en 2009, et a pour objectif principal de lever la contradiction entre :

- ✓ la demande sociétale pour les aménagements et services d'une ville durable
- ✓ et l'acceptabilité des chantiers nécessaires à ces transformations [38]

Ce programme vise à identifier les leviers d'actions pour augmenter la furtivité et diminuer les gênes des chantiers urbains telles que l'aide à la décision prédictive, une forte amélioration de la sûreté et des connaissances du sous-sol, organisation industrielle, innovations technologiques, benchmark, améliorer le rapport au public,… . Des actions concrètes ont été retenues en juin 2014 à l'issue de 5 années d'études.[39]

Ce projet ne sera pas d'avantage détaillé dans ce rapport. Cependant, il démontre une réelle volonté de la part des acteurs publics et privés d'améliorer les conditions de travaux urbains en diminuant les gênes et nuisances, tout en gardant une sécurité optimum pour les travailleurs comme pour le public. Cela démontre une fois de plus que les techniques sans tranchée sont une solution aux enjeux des chantiers urbains de demain et présage un développement certain dans l'avenir.

Conclusion

Il est clair à l'issue de ce rapport que les techniques de travaux sans tranchée, s'inscrivent dans la conception du développement durable. En effet, par rapport aux techniques conventionnelles leurs impacts sur l'environnement, notamment liées aux consommations énergétiques et donc aux émissions de GES, sont fortement diminués. De plus, les nuisances envers les riverains sont considérablement réduites et de ce fait les impacts néfastes sur la société sont amoindris. Enfin, en réduisant l'emprise des chantiers et leur durée, l'économie locale est moins affectée. Par ailleurs, ce secteur en pleine évolution est porteur de dynamisme. En effet, de nombreuses entreprises se créent dans le domaine, et de nombreux projets en Recherche et Développement liés aux techniques sans tranchée sont perpétuellement réalisée, afin d'améliorer ces techniques et de les rendre plus performantes.

Image 30 : Schéma de la conception du développement durable

Les avantages nombreux des techniques sans tranchée ont été démontrés et prônés tout au long de ce rapport, afin de prouver qu'au-delà d'être une simple solution technique pour franchir un obstacle, elles peuvent, dans certains cas, être une alternative pertinente aux techniques classiques, même en milieu urbain. Cependant, les limites de ces techniques ont également été abordées. A mon sens les limites sont de trois niveaux :

- Dans certains cas, il est possible que l'utilisation d'une technologie sans tranchée soit techniquement non réalisable.
- Même si de nombreux industriels du domaine et défenseurs des techniques sans tranchée affirment que leurs prix sont compétitifs par rapport aux techniques traditionnelles, cela peut s'avérer être, dans certaines conditions, discutables et dépendent fortement du type de chantier.
- Des contraintes liées à la sécurité peuvent être, encore une fois en fonction des conditions spécifiques d'un chantier, rédhibitoires dans leur utilisation.

Je souhaiterais conclure ce rapport, en indiquant que malgré les avantages évidents des techniques sans tranchée, il serait utopique de penser qu'elles peuvent se substituer intégralement aux techniques classiques avec ouverture de tranchée. Par contre, elles peuvent les compléter et ajouter des options supplémentaires pertinentes dans le choix des techniques pour la réalisation des travaux de pose ou de réhabilitation de canalisations. Même si de plus en plus d'entreprise commencent à les prendre en compte dans leurs études, un effort nécessaire de la part des entreprises et des concessionnaires dans leur utilisation doit être réalisé. Il revient alors aux entreprises, en prenant en compte l'ensemble des paramètres techniques, économiques, environnementales, nuisances, durée, … et les conditions propre du chantier de choisir la technique avec ou sans tranchée la plus appropriée et pertinente pour un chantier donné. Suite à l'ensemble des échanges et recherches que j'ai pu réaliser dans le cadre de ce projet, il est clair qu'une prise de conscience globale des avantages liés aux techniques sans tranchée se développent et celles-ci prennent une part de plus en plus importante dans la réalisation des chantiers et cela devrait sans aucun doute se poursuivre dans un avenir proche.

Bibliographie

[1] Howard Scott. « Orfeus-Optimised Radar ». *Orfeus Project*. Consulté le 14 mars 2016. http://www.orfeus-project.eu/objectives/approach.html.

[2] FSTT. « Qu'est-ce que les travaux sans tranchée ? » *Qu'est-ce que les travaux sans tranchée ?* Consulté le 14 mars 2016. http://www.fstt.org/pages/sans-tranchee-en-1-clic/elus-decideurs/qu-est-ce-que-les-travaux-sans-tranchee.html.

[3] DUPONT Patrice, BALMAT Jean-Michel « Dossier travaux sans tranchée, un éventail de technique pour la pose ou la réhabilit;ation sans gêne des réseaux enterrés », Les cahiers techniques du bâtiment, Juin 2012, Page 1,2, 11.

[4] « Aménagement, infrastructures, urbanisme et construction :15 retours d'expériences pour le développement durable », Dossiers et Débats pour le développement durable, écoeff, édition 2003, Page 10.

[5] Sébastien MAZENS. Mémoire ingénieur :« Recours accru aux techniques de Travaux Sans Tranchée (dont le forage dirigé) », septembre 2008.

[6] « Le marché des travaux sans tranchée résiste plutôt bien » - Événement », extrait du Moniteur, 2 juin 2015. http://www.lemoniteur.fr/articles/le-marche-des-travaux-sans-tranchee-resiste-plutot-bien-28677966.

[7] FSTT. « Les travaux sans tranchée : une réponse aux attentes citoyennes en matière de préservation de l'environnement et pour la sécurité des réseaux enterrés », Février 2012.

[8] « GUIDE TECHNIQUE relatif aux travaux à proximité des réseaux », Juin 2012. http://www.reseaux-et-canalisations.ineris.fr/gu-presentation/userfile?path=/fichiers/textes_reglementaires/Guide_technique_V1.pdf

[9] FSTT. « Les Travaux Sans Tranchée : Réhabilitation de réseaux d'assainissement gravitaires et sous pression - Foire aux questions », octobre 2013.

[10] Fédération Nationale des Travaux Publics. « TRAVAUX SANS TRANCHÉE A PROXIMITÉ DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DE GAZ : DE NOUVELLES DISPOSITIONS RÈGLEMENTAIRES ». *Marchée n°49*, 10 mars 2009, Page 1.

[11] « Forages du nord ouest - Forages dirigés ». http://www.forages-du-nord-ouest.fr/forage-diriges.html.

[12] FSTT. « Guide technique 1 : Microtunnels »,

[13] FSTT. *Forages dirigés : Recommandation*, 2015.

[14] RAYNAUD, Jacques. « Creusez l'idée du sans tranchée ». 2015.

[15] CHEVRIER, Laurent. « Rapport technique : Système pousse-tube », 8 janvier 2013.

[16] « Forages du nord ouest - Pousse tube ».. http://www.forages-du-nord-ouest.fr/pousse-tube.html.

[17] PASQUIER, Roland. « Zmoos SA - Travaux sans tranchée - Forage horizontal ou pousse-tube vériné ». Consulté le 14 mars 2016. http://www.zmoos.com/fr/forage_horizontal.php.

[18] « Microtunelier ». *CSM BESSAC*. http://csmbessac.com/.

[19] YAHIAOUI, Fadila. « REHABILITATION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT VISITABLES ET NON VISITABLES ». Conservatoire Nationale des Arts et Métiers École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2000.

[20] HERVE, Jerome. « 8 techniques sans tranchée pour réhabiliter vos réseaux », 15 février 2002, Moniteur n°5125 édition, sect. Technique et chantier.

[21] TERRAM, Valérie, Amélie ANDRAL, Valérie LEO, et Christelle NOUVEL. « Réseaux d'assainissement : les progrés de la réhabilitation sans tranchée ». Polytech'Montpellier & Office International de l'Eau, 2 mars 2004.

[22] « Types d'installation ». *Canalisation.org*. http://www.canalisation.org/sommaire/particularites/types-dinstallation?showall=1.

[23] « FNDAE ». http://www.fndae.fr/documentation/PDF/fndae32_b.pdf.

[24] « Eclatement de conduite No-dig - Moutier ». *Dell'Anna Enzo*. http://www.dellanna.ch/fr/travaux-speciaux-eclatement-de-conduite-no-dig.

[25] JAKUPI, Vedat. « Rapport technique : Remplacement de conduite par éclatement (Cracking) ». TECHNI, Février 2010.

[26] FSTT. « Cahier technique : Marché de microtunnelage - Dossier Pilote », janvier 1995.

[27] MOCH, A. *Les effets psychologiques du bruit*. La Recherche, 1988.

[28] « Polution atmosphérique, trafic routier et environnement : Acquis et lacunes -Chapitre 1 ». https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/45506/filename/these_deletraz_p1.pdf.

[29] Lenglet F, *L'Europe doit repenser ses transports*, l'Expansion, n°427, 1992

[30] AÏT-AÏSSA, Djamel. « Evaluation des coûts sociaux des travaux : "Une méthode de comparaison des techniques au service des élus" ». Rosny-sous-Bois: SIARCE, 2 octobre 2001.

[31] « CHANTIERS FURTIFS URBAINS – FURET » Faire mieux accepter les chantiers en site urbain ». présenté à Journée d'information et d'échange, 4 novembre 2011.

[32] Centre de Recherche et Innovation sur le Gaz et les Energies Nouvelles. « Courtry : le micro-forage, seule option pour raccorder une crèche au gaz ». présenté à Journée technique FSTT, Lille, Avril 2014.

[33] HARDY, Michel. « Techniques de terrassement Remblayage et compactage ». présenté à AFG21, s. d.

[34] HARDY, Michel, et Pascal AUSSANT. « poster : KEYHOLE CONCEPT A NEW APPROACH FOR CUSTOMER CONNECTIONS ». GDF SUEZ, 2014.

[35] « Home - Orfeus ». *Orfeus*. http://orfeus.org/.

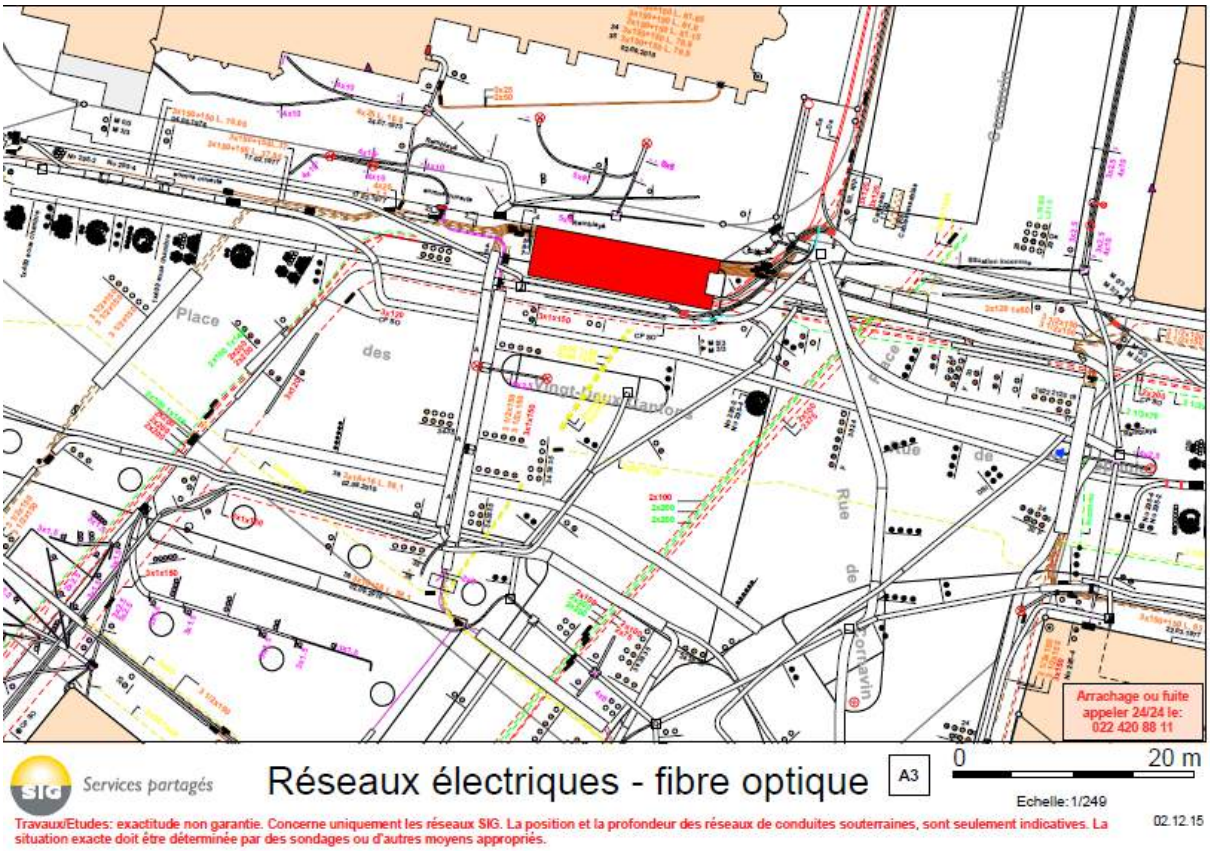
[36] SCOTT, Howard. « Orfeus-optimised radar ». *Orfeus project*. http://www.orfeus-project.eu/about.html.

[37] « Orfeus : radar in the underworld ». *Orfeus.org*. http://orfeus.org/wp-content/uploads/2012/12/ORFEUS-drill-tip-radar.pdf.

[38] TOUATI, Anastasia. « FURET : Furtivité Urbaine Réseaux Et Travaux ». 2 juillet 2012.

[39] « Les orientations du groupe d'échange et de réflexion sur l'acceptabilité des chantiers urbains ». *IDRIM*, 2014. http://www.idrrim.com/actualites-presse/2014-06-26,2399.htm.

Annexes



Annexe 1 : Plan des réseaux enterrés électriques – fibre optique, place des 22 cantons à Genève

Fiche n° TST3	FUSEE NON LOCALISABLE

Objet

Une fusée réalise un tunnel par refoulement et compression du sol dans lequel sera ensuite posé une canalisation ou un fourreau. L'outil est constitué d'un cylindre à l'intérieur duquel un marteau pneumatique se déplace et frappe une tête-enclume tronconique.

Des diamètres de 45 à 300 mm sont possibles en plusieurs passes dans des terrains très variés sous réserve qu'ils soient compressibles. Selon les conditions géologiques, les distances pratiquées varient de 5 à 25 m.

La précision du tir dépend de la position et du calage lors du départ, ainsi que des caractéristiques du sol.

Non-dirigeable, il est impossible de rectifier la trajectoire, à moins de réaliser préalablement des fouilles intermédiaires.

Risques potentiels

Le mode de fonctionnement des fusées nécessite un sol avec des caractéristiques de frottement suffisantes, c'est à dire compressible et fissible, sans être mou ou sableux, afin d'éviter toute déviation. Très sensibles à la consistance du sol, les fusées privilégient le passage dans les couches les plus meubles et peuvent être déviées par des obstacles ou des interfaces de couches de sol de compressibilité différentes *(c'est notamment le cas avec des parois d'anciennes tranchées).*

Les risques résultent donc :

- des déviations de la trajectoire de la fusée, qui peuvent être plus ou moins importantes ;
- des contraintes sur le terrain et notamment de la présence d'ouvrages à proximité ;
- des vibrations dues à la percussion.

Recommandations et prescriptions

Prescription

- **proscrire les fusées de gros diamètres *(>120 mm)* sans dispositif de localisation *(sonde)* ;**
- **pour ces fusées non localisables, ouvrir une fouille afin de dégager les ouvrages sensibles pour la sécurité[41] qui sont croisés à partir d'une distance parcourue supérieure à 2 fois la longueur de la fusée ;**
- ne pas utiliser cette technique sur des terrains trop hétérogènes,
- si possible, lancer la fusée du côté le plus proche de la canalisation à croiser. Quand il y en a plusieurs, choisir le côté le plus proche de celle qui présente le plus de risques ;
- **utiliser cette technique à une profondeur ≥ 10 fois le diamètre de la fusée ;**

[41] à l'exception des réseaux d'éclairage public.

- positionner avec soin la fusée en utilisant un affût de départ, installé sur un plancher ou un radier stable préalablement nivelé et compacté ;
- **régler l'orientation avec un niveau et un système de visée ;**
- **surveiller en permanence la fusée et sa trajectoire selon le bruit et la vitesse d'avancement ;**
- **Dimension du fuseau de la technique :**

Cas	Distance entre ouvrage et trajectoire prévue	
Visualisation des ouvrages sensibles croisés dans des fouilles ouvertes	20 cm	Ajouter la précision de localisation de l'ouvrage existant
Ouvrages gaz	80 cm	

Il est à noter que ces distances restent valables en cas de tracé parallèle.

Certains ouvrages *(compte tenu de leur pression, diamètre, tension…)* justifient des prescriptions particulières qui seront données par l'exploitant. Elles peuvent aller jusqu'à la réalisation de sondages intrusifs au droit des croisements ou fixer des distances entre la trajectoire prévue et l'ouvrage existant plus importantes.

A l'exception des prescriptions en rouge, il s'agit de recommandations génériques non exhaustives, qu'il appartient à l'entreprise d'adapter, le cas échéant, pour tenir compte de son analyse technique complémentaire préalable au chantier.

Annexe 2 : fiche technique, précisant les prescriptions à respecter pour l'usage de la technique sans tranchée « fusée non localisable » issue du « GUIDE TECHNIQUE relatif aux travaux à proximité des réseaux », Juin 2012.

Annexe 3 : roue de coupe d'un microtunnelier équipée de molettes

(Tableau indicatif Source FOREXI)

Procédés / Nature des sols	Battage de tube	Forage à la tarière	Fusée	Forage horizontal dirigé humide	Micro tunnelier
Limons	◻	OUI	OUI	OUI	OUI
Argile	◻	OUI	OUI	OUI	OUI
Marne	NON	OUI	NON	OUI	OUI
Sable fin argileux	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
En dessous niveau nappe	NON	NON	NON	OUI	OUI
Sable fin peu argileux	OUI	◻	NON	OUI	OUI
Sable-Silt	OUI	◻	NON	OUI	OUI
Grave	OUI	◻	NON	◻	OUI
Grave argileuse	OUI	OUI	◻	◻	OUI
Argile à silex Meulière	OUI	◻	NON	◻	OUI
Alluvions grossières Eboulis , Moraines	OUI	◻	NON	Non*	OUI
Sable alluvionnaire	OUI	◻	NON	OUI	OUI
Grave alluvionnaire	OUI	◻	NON	NON	OUI
Calcaire-Granit Pophyre-Grès, Basalte	NON	OUI	NON	OUI	OUI
Grès Schiste	NON	OUI	NON	OUI	OUI
Terre végétale Humus, Tourbes	◻	◻	NON	OUI	◻

◻ : envisageable mais difficultés possibles

* : Les matériels de forage dirigé récents peuvent être utilisés. Cependant, compte tenu de leur coût de mise en œuvre élevé, leur utilisation est limitée aux cas où l'utilisation d'une technique sans tranchée est obligatoire sur des longueurs importantes.

Annexe 4 : tableau récapitulatif des procédés adaptés par type de sol, issu des prescriptions internes de GRDF

Techniques	Domaine d'application	Précision	Distances / puits	Type d'objet tiré	Diamètre
Fusées détectables	Traversées et branchement	Non dirigeable	De 5 à 25 ml	Fourreau PE	Mini 30mm Maxi 180mm
Forages à la tarière	Traversées et branchement	Non dirigeable Guidable*	Jusqu'à 50 ml	Fourreau acier	Mini 200mm Maxi 1000mm
Battages de tube	Traversées et branchement	Non dirigeable	Jusqu'à 50 ml	Fourreau acier	Mini 200mm Maxi 1500mm
Forages Dirigés mini à maxi	Traversées, branchement et pose en ligne	Dirigeable < 1% de la longueur	Jusqu'à 300 ml	Acier revêtu Fourreau acier ou PE PE	Tous diamètres
Forage dirigés Méga	Traversées, branchement et pose en ligne	Dirigeable < 3% de la longueur	Jusqu'à 1700 ml	Acier revêtu Fourreau acier ou PE PE	Tous diamètres

* Il est possible de rajouter une trousse orientable, contrôlable avec un système hydraulique, soit de réaliser un tir pilote avant d'introduire la tarière.

Annexe 5 : Caractéristiques des différentes techniques de pose utilisables pour la pose de réseaux gaz, issus des prescriptions internes de GRDF

1. CARACTERISTIQUE DE LA VOIE					
Nom de la rue					
Largeur		Longueur			
Pietonnier		Automobile		Les deux	
Circulation journalière			PD	D	TD
Circulation en heures de pointes			PD	D	TD
Voie principale		Voie secondaire			

PD = Peu dense. D = Dense. TD = Très dense

2. TYPE DE TRAVAUX A REALISER					
Pose de conduite		Réhabilitation			
Nombre de mètres linéaires					
Diamètre des canalisations					
Assainissement		Gaz		Electricité	
Télécom		Chauffage		Autre	
Possibilités de techniques			ET-O/N	TST-O/N	

ET= Technique en tranchée.
TST= Technique Sans Tranchée
O= Oui. N= Non

3. DUREE DES TRAVAUX	
Avec la Technique Sans Tranchée	
Avec la Technique en Tranchée	

4. DENSITE DU SOUS-SOL URBAIN					
Peu dense		Dense		Très dense	
Type de réseaux existant					

5. PERIMETRE URBAIN CONSIDERE					
Peu dense		Dense		Très dense	
Surface totale					

6. ACTIVITES URBAINE EXISTANTES				
Commerces	0	1	2	2
Habitat	0	1	2	3
Bureaux	0	1	2	3
Services	0	1	2	3
NOTE TOTALE =			/12	

0= Inexistante. 1= Faible. 2= Moyenne. 3= Forte.
Si la note totale = 3/12 l'activité urbaine est faible.
Si la note totale = 6/12 l'activité urbaine est moyenne.
Si la note totale = 12/12 l'activité Urbaine est forte.

7. SENSIBILITE DE LA GENE	Peu Sensible	Sensible	Très Sensible			
Nuisances				Nuisances		
Détérioration des réseaux existants				Perturbation du trafic automobile		
Déviations et retards				Suppression de stations de bus		
Suppression de stations de taxis				Accessibilité des secours		
Accessibilité des véhicules de services				Accessibilité des deux roues		
Accessibilité des piétons et handicapés				Accessibilité des livreurs		
Réduction du stationnement				Déviation ou interruption des bus		
Diminution des emprises				Trafic des poids lourds		

Circulation des engins de chantiers				Baisse de l'activité commerciale			
Dommages causés aux constructions				Détérioration de la chaussée			
Durée des travaux				Arrêt momentané des travaux			
Sécurité des personnes âgées				Sécurité des enfants			
Sécurité du public				Ouvriers exposés aux chutes			
Risques d'accidents de voitures				Pollution de l'air			
Bruits et vibrations				Poussières et saletés			
Prise avec la boue				Installation du chantier			
Détérioration du paysage urbain				Balisage			
Finitions après les travaux – remblais				Désordres visuels			
Endommagement des espaces verts				Stockage des matériaux			
Pollution de l'eau				Mouvement de terrains			
Ramassage des ordures ménagères				Mauvaise information			
Rejets dans le réseau d'assainissement							

6. POURCENTAGE DE LA GÊNE			
Milieu	Peu sensible = %	Sensible = %	Très Sensible = %
Si TST	Peu sensible = %	Sensible = %	Très Sensible = %
Si ET	Peu sensible = %	Sensible = %	Très Sensible = %

TST = Techniques Sans Tranchée
ET = Techniques en Tranchée

9. COEFFICIENTS (en pourcentage)					
Masse des travaux comprise entre 0 et 1MF					
Peu sensible	0.01	Sensible	0.02	Très sensible	0.03
Masse des travaux comprise entre 1MF et 4MF					
Peu sensible	0.02	Sensible	0.04	Très sensible	0.07
Masse des travaux comprise entre 4MF et 8MF					
Peu sensible	0.03	Sensible	0.05	Très sensible	0.08
Masse des travaux comprise entre 8MF et 12 MF					
Peu sensible	0.04	Sensible	0.06	Très sensible	0.09
Masse des travaux comprise entre 12 MF et 16 MF					
Peu sensible	0.05	Sensible	0.07	Très sensible	0.10
Masse des travaux comprise entre 16 MF et 20 MF					
Peu sensible	0.06	Sensible	0.08	Très sensible	0.11

Les coefficients sont multiplicateurs. Ils sont proposés « par défaut » et on les appliquera au pourcentage le plus élevé de chacune des catégories représentées dans l'encadré 8 (pourcentage de la gêne).
Par exemple, si la technique en tranchée enregistre son plus haut pourcentage dans la cellule très sensible on multipliera par 0.03 les coûts directs des travaux liés à cette technique – pour un coût de travaux entre 0MF et 1 MF –.

10. COÛT DE L'OPERATION INDEXEE		
	Technique Sans Tranchée	Technique En Tranchée
Coûts directs		
Coefficients		
Totaux	Coûts directs X Coefficient	Coûts directs X Coefficient

Remarque :
L'utilisation des coefficients « par défaut » est proposée dans le but de mesurer indirectement et à titre indicatif une valeur de projet qui soit globale. Il est donc courtois d'observer les résultats de la ligne des totaux avec beaucoup de souplesse.

11. BILAN ET CHOIX OPERATIONNEL	
Les techniques Sans Tranchée coûtent-elles plus cher ?	
Oui ☐	Non ☐
Les résultats des caractéristiques du milieu – *densité du sous-sol, activités urbaines, pourcentage de sensibilité du milieu à la gêne,....* – sont t ils déterminants pour une ublisation des Techniques Sans Tranchée ?	
Oui ☐	Non ☐

Annexe 6 : Outil d'aide à la décision d'AIT AISSA entre une technique avec ou sans tranchée prenant en compte les coûts sociaux engendrés

Annexe 7 : Engin développé par Tracto-Technik possédant la technologie ORFEUS