

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Le jet grouting en soutènement de fouilles

Jet grouting to support excavation

Roger Massonnet

FONDASOL, Avignon, France

RÉSUMÉ

Les parkings souterrains en milieux urbains nécessitent la réalisation de fouilles à ras des mitoyens. Les soutènements des terres et des ouvrages ne doivent pas réduire l'espace utile. Une solution est alors la création d'un "mur poids" au moyen d'injections par colonnes de jet grouting judicieusement disposées, permettant l'exécution de fouille en une seule phase dans la continuité des façades existantes. Les paramètres de sols, les charges et caractéristiques du traitement par jet grouting doivent être préalablement définis. Il faut ensuite vérifier par contrôles la bonne adéquation des hypothèses avec la réalisation.

ABSTRACT

Underground car parks in urban areas require excavation at the very edge of adjacent buildings. The support of soils and buildings must not reduce the available space. Underpinning of existing buildings and soil supports should not encroach on the available space. A smart solution consists of creating a 'gravity wall'. This is achieved by injecting grout to build columns under the existing foundations. In most cases this technique allows the excavation to be carried out in one single phase up to the edge of the existing buildings. Soil parameters and loads must be predetermined together with the characteristics of the jet grouting treatment. The success of the operation is confirmed by careful monitoring.

Mots-clés : jet grouting, instrumentation, monobarre, mur poids fictif.

1 INTRODUCTION

La réalisation de fouilles en sites urbains doit prendre en compte les différentes poussées mais aussi le soutènement des existants. Le coût d'occupation des sols incite les promoteurs à utiliser au maximum l'espace qui leur est alloué.

Une solution respectant ce souhait, consiste à "figer" le terrain sous les fondations de manière à pouvoir terrasser à l'aplomb des façades mitoyennes en une seule phase.

Pour cela on peut adopter la technique du jet grouting en créant, sous les fondations des existants, un mur poids à l'aide d'une distribution judicieuse de colonnes de jet grouting.

Rappelons que la technique jet consiste à réaliser un forage en rotation à l'aide d'un tricone. Au-dessus se trouve un ensemble "moniteur" comportant un dispositif obturateur à la base et une à plusieurs buses à axe horizontal de 2 à 5 mm de diamètre environ. En fin de forage à la profondeur fixée par le projet, le train de tiges est remonté en rotation et à vitesse constante. Pendant cette opération un coulis de ciment, sous très haute pression (en général 40 à 50 MPa), est injecté par les buses dont une est visible sur la figure 1 à droite.

On notera qu'il s'agit d'une injection à comportement dynamique dont les effets ne sont pas comparables à une injection statique. En effet, le jet de coulis de ciment sort des buses à une vitesse souvent supersonique. Il se produit alors, après destruction du sol soumis au jet, une colonne d'un mélange de sol/ciment dont le diamètre est fonction des paramètres d'injection et de la nature de chaque couche de sol. De même, la résistance de ce mélange est fonction de la nature du terrain traité. On notera que le forage se fait en petit diamètre, environ 100 mm, mais qu'il permet de réaliser une colonne d'un diamètre beaucoup plus grand sous la fondation. Cette dernière repose donc sur les colonnes ainsi constituées.



Fig. 1 détails du train de tige et de l'équipement

2 LES DIFFERENTS TYPES DE JET GROUTING

Ce procédé fait l'objet d'une Norme européenne NF EN 12716 sous l'indice de classement P 94-331.

Cette norme précise les quatre différents types de jet grouting que sont la méthode "jet simple", les méthodes "jet double à l'air" et "jet double à l'eau" et la méthode "jet triple".

Le principe prescrit pour les quatre types, est le traitement simultané de la déstructuration du sol et de la mise en place du coulis. On notera que la résistance de la colonne est fonction du volume du coulis injecté sur le volume de celle-ci.

La norme mentionne les différentes applications possibles qui vont de la réalisation de colonnes isolées aux panneaux continus et à des structures de groupes de colonnes en reprise en sous-œuvre. Les expérimentations ont surtout porté sur le comportement d'une colonne isolée.

2.1 La réalisation des colonnes

Le matériel nécessaire à la réalisation des colonnes comprend :

- une foreuse rotative avec mât orientable.
- une pompe d'injection haute pression qui permet d'atteindre les pressions nécessaires à la réalisation d'une colonne d'un diamètre donné. Cette pompe peut se trouver à une certaine distance de la foreuse reliée par un flexible haute pression.
- un silo de stockage de ciment situé à proximité de la pompe d'injection.

Le responsable de la foreuse est en liaison permanente, par radio ou signaux sonores, avec le responsable de la pompe d'injection haute pression et commande les phases de forage et les phases d'injection haute pression.

Les effets du jet sont principalement fonction de la pression et du débit. Les dimensions et la résistance de la "colonne consolidée" sont fonction des différents paramètres de traitement, tel que vitesse de remontée et de rotation, type de jet et nature du coulis injecté.

Lors de l'injection dynamique, une procédure de contrôle de la qualité doit être appliquée. Pour cela, la surveillance se fait :

- au niveau de la pression d'injection et de la remontée des résurgences (rejets)
- au niveau de la surveillance des existants au moyen d'un laser tournant, avec cibles disposées sur les ouvrages.

Lors de l'exécution de la colonne, il faut s'assurer qu'il existe en permanence des remontées de "rejets" qui prouvent une bonne continuité de cette colonne.

Le diamètre et la résistance mécanique de la colonne sont la base de tout calcul et devront être pré estimés pour l'établissement d'un projet. Il existe pour cela des méthodes semi-empiriques mises au point au fur et à mesure des expérimentations et de l'analyse des phénomènes.

2.2 Les effets de l'injection jet grouting

L'établissement d'un projet à base de colonnes de jet grouting nécessite au minimum de faire une hypothèse sur le diamètre utile de la colonne et sur sa résistance mécanique.

Des calculs donnent une première estimation dont la valeur devra être confirmée par l'exécution d'une planche d'essai au démarrage du chantier. En général cette planche d'essai comprend 2 ou 3 colonnes réalisées avec des paramètres d'injection différents.

En effet, les paramètres sont nombreux :

- pression d'injection (p) et le nombre de buses (n) et leur diamètre (d)
- débit (q) (fonction des deux paramètres précédents)
- vitesse de remontée (v_a) et la vitesse de rotation (v_r)
- diamètre de l'outil de forage et le diamètre des tiges
- type de jet (simple, double ou triple)
- dans les cas de jet double ou triple, la pression d'air et/ou d'eau et débits.
- nature du coulis
- pour les sols, les caractéristiques du sol encaissant et du sol d'assise.

Lors de l'exécution de la colonne d'essai, on peut mesurer par procédé électrique le diamètre obtenu à partir d'une différence de potentiel entre un forage équipé proche et le train de tige de la foreuse, avant et immédiatement après jetting.

Le contrôle peut se faire aussi en observant la quantité de spoils obtenus lors de l'exécution de la colonne d'essai à partir du débit injecté lié à la pression, à la masse volumique du coulis et aux nombres et diamètres des buses :

$$p_0 = \frac{8 \rho_c q^2}{n \pi^2 d^4}, \quad \text{avec } \rho_c : \text{masse volumique du coulis}$$

q : débit et p_0 pression d'injection

n : nombre de buses ; d : diamètre buse

l'énergie étant de la forme $E \text{ (MJ/ml)} = q t p_0$ (en m^3/s , s sur 1 m et MN/m^2).

On notera que la pression d'injection décroît très rapidement avec la distance à l'axe du forage et c'est pour cette raison que les méthodes bi et trijet ont été pratiquées dans le but d'obtenir des diamètres plus importants. A très faible distance, l'énergie importante décroît aussi très rapidement.

Dans ces conditions, l'influence de l'injection dynamique du jet grouting n'a pas les mêmes inconvénients qu'une injection classique statique d'un coulis de ciment dans laquelle on ne sait pas maîtriser les circulations et migrations du coulis.

Le jet dynamique de ciment découpe le sol avant de former un amalgame et produit en même temps une légère compaction des terres qui contribue au confinement de la

colonne par réduction de la perméabilité. Bien sûr l'efficacité du jet nécessite la présence d'un matériau et est inopérant dans des vides. Il convient alors, éventuellement, de procéder à un remplissage en sable.

D'une manière générale, il peut exister des hétérogénéités locales dans les sols, avec présence de blocs, ou de lentilles gréseuses par exemple qui peuvent entraîner une discontinuité dans la colonne réalisée. Pour pallier à cet effet et assurer la continuité mécanique de la colonne, il est prudent de mettre en place une barre métallique dans l'axe de la colonne immédiatement après sa réalisation. Cette barre confère à la colonne une certaine résistance au cisaillement et permet une évaluation des inerties.

L'énergie constante appliquée permet une certaine homogénéisation mécanique du sol comme le montre la figure 3.



Fig. 3 colonne extraite - adaptation à la nature du sol

LE PRINCIPE DU "MUR POIDS FICTIF" EN COLONNES JET GROUTING

L'avantage de cette technique est le faible encombrement de la machine de forage et sa possibilité de travail en toute direction.

Nous avons donc essayé d'adapter cette technique de jet grouting à une double fonction de soutènement de terres et de reprise en sous-œuvre et ce, en permettant de "figer" les sols immédiatement sous les fondations. Les premières tentatives datent de 1992 et à ce jour de nombreux chantiers ont été réalisés tant pour le bâtiment que pour les travaux publics et les méthodes de calcul se sont affinées.

La réalisation d'une colonne se fait à partir d'un forage de petit diamètre (environ 100 mm) limitant les dégradations des fondations traversées mais permettant la réalisation, au-dessous, d'une colonne consolidée de sols/ciment d'un diamètre nettement plus important.

De nombreuses fouilles d'une hauteur inférieure à 8 ou 10 mètres ont pu être traitées sans clous ou tirants. Il suffit de créer un "mur poids" suffisamment important en colonnes de jet.

Pour cela, on réalise depuis le niveau du terrain naturel, éventuellement rehaussé, une première ligne de colonnes en jet grouting pratiquement jointives et subverticales de façon à être positionnées sous la fondation, puis une seconde ligne de colonnes plus inclinées enfin une troisième, voire une quatrième suivant la profondeur de la fouille, les charges en jeu et la nature du sol encaissant. Les espacements des colonnes sur les différentes lignes sont variables et fonction de l'équilibre général. Il s'agit de jet simple car la résistance mécanique de la colonne est plus élevée qu'en double ou triple jet.

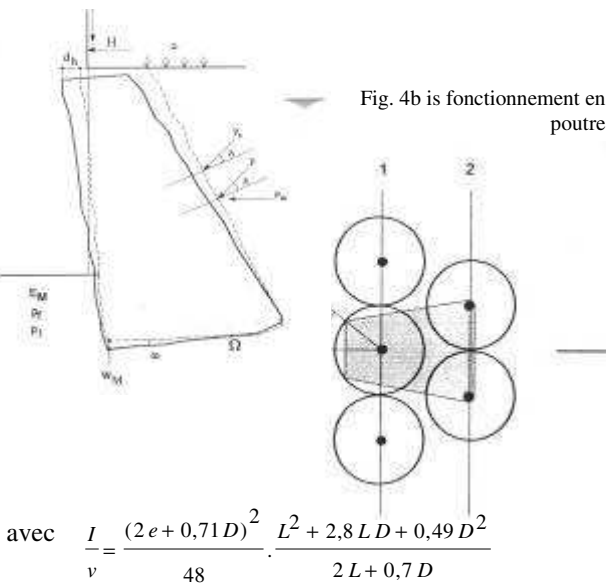
Les différents logiciels de calculs de soutènement ne répondent pas au problème posé, et nous avons donc conçu un logiciel spécifique "MURJET" qui considère les différents points suivants :

- comportement en mur poids supposé rigide et homogène de façon à considérer la stabilité d'ensemble, les contraintes transmises à la base et donc les déformations en tête du mur qui doivent être compatibles avec la tenue des existants. Il convient aussi de vérifier la stabilité au grand glissement par des méthodes classiques ou des logiciels adaptés.

- La tenue du "mur poids" dans son ensemble vis-à-vis d'un cisaillement sous la charge appliquée en prenant en compte la répartition des colonnes sur les différentes files.

- La tenue interne à l'intérieur du "mur poids" en considérant le cisaillement entre les files de colonnes consolidées. L'intersection des colonnes en tête confère une résistance au cisaillement suivant une série de demi-ellipses. Par ailleurs il est possible de réaliser deux lignes de colonnes sécantes, permettant de travailler en poutres de type trapézoïdal à partir des monobares en traction et du matériau constituant la colonne en compression. (Fig 4 bis)

Fig. 4 enveloppe des lignes de colonnes configurant le "mur poids"



3.1 Les hypothèses

Le calcul nécessite la connaissance d'un certain nombre de paramètres qui sont :

- la géométrie du projet et les charges appliquées
- les caractéristiques du sol encaissant et du sol d'assise
- Pour le sol encaissant :**
- l'angle de frottement et la cohésion
- le poids volumique
- le niveau de la nappe

- Pour le sol d'assise :**
- l'angle de frottement et la cohésion
- le coefficient de poisson
- le module de déformation pressiométrique
- la pression de fluage
- Les hypothèses sur le diamètre des colonnes consolidées et leur résistance

Ces dernières hypothèses sur le diamètre peuvent être estimées à partir de chantiers réalisés dans des terrains similaires, ou par des formules d'approches expérimentales, basées sur des statistiques.

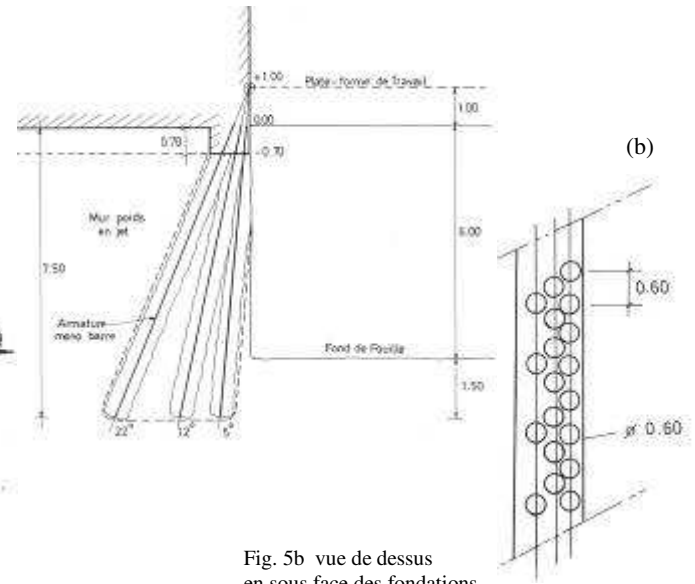
De toute façon les hypothèses prises pour le calcul devront être vérifiées à partir d'une planche d'essai comportant l'exécution, (en début de chantier car le déplacement de l'équipement est relativement lourd), d'une série de 2 ou 3 colonnes d'essai avec des paramètres d'injection différents.

Le contrôle se fait en dégaugeant les colonnes sur une certaine hauteur afin de vérifier les diamètres et en procédant à un carottage de la colonne retenue pour déterminer en laboratoire, le poids volumique et, au moins à 7 et 14 jours, les résistances à la compression et à la pseudo traction (essai de fendage brésilien).

A partir des données précédentes, on peut définir les dispositions des colonnes de façon à étudier un "mur poids" qui permette de reprendre les poussées et les charges des ouvrages existants. Un impératif supplémentaire dont il faut obligatoirement tenir compte est le déplacement admissible horizontal des ouvrages lors de la réalisation du terrassement.

Le mur poids, sous l'influence des efforts maxima, ne doit subir qu'une rotation la plus faible possible et compatible avec bonne tenue des existants.

Fig. 5a coupe schématique aérée du mur poids en colonnes



En mono-jet, les caractéristiques obtenues sont fonction de la nature du sol encaissant, mais au moins de :

- Résistance à la compression $R_c = 5 \text{ MPa}$
- Résistance au cisaillement $= 1 \text{ MPa}$
- Module de déformation $= 3000 \text{ MPa}$

A partir d'essai de compression R_c et de pseudo-traction (brésilien) R_{tb} sur carottage dans la colonne, on peut définir suivant Mohr, à partir de la droite tangente, les valeurs ϕ et c suivant les formules :

$$c = \frac{R_c R_{tb}}{2\sqrt{R_c R_{tb} - 3 R_{tb}^2}} \quad \text{et} \quad \text{tg } \phi = \frac{R_c - 4R_{tb}}{2\sqrt{R_c R_{tb} - 3 R_{tb}^2}}$$

3.2 Les contrôles

Pendant l'exécution des colonnes, les contrôles doivent porter :

- d'une part sur la qualité du coulis injecté, et le respect des paramètres choisis à partir des colonnes d'essai, ainsi que sur les qualités et quantités des résurgences (spoils). En effet une absence de résurgence laisse un doute sur la géométrie de la colonne obtenue.

- d'autre part, sur les éventuels mouvements que pourrait subir l'environnement immédiat du travail d'injection dynamique.

Nota : on appliquera la méthode observationnelle avec définition des seuils tolérables de déformation. Des soulèvements peuvent se produire dans le cas de mise en charge du coulis par obturation des buses ou espace annulaire insuffisant entre l'outil de forage et les tiges. Les tassements sont très rares et sont en général dus à un mauvais phasage d'intervention.

3.3 Les mesures éventuelles

Après réalisation du traitement "mur poids" par colonnes de jet grouting, il est parfois intéressant de suivre précisément les déformations du mur poids en cours d'excavation.

Pour cela, une instrumentation peut être mise en œuvre au moyen de jauges de contraintes collées (voir fig. 6) et régulièrement espacées sur des monobares métalliques (voir fig.6bis) que l'on place en armature d'une colonne et suivant un tirant subhorizontal. Il est en effet souhaitable, comme nous l'avons précédemment indiqué, de prévoir dans les colonnes de jet une armature centrale que l'on place au centre de la colonne dans le mélange coulis/ciment encore frais afin d'assurer sa continuité mécanique.

L'analyse des contraintes et des déformations permet de vérifier la validité des résultats donnés préalablement par le logiciel.



Fig.6 mise en place d'une jauge de contrainte sur une barre

3.4 Quelques exemples

De nombreux chantiers ont été réalisés selon ce principe. Nous faisons figurer ci-dessous quelques exemples de fouilles en cours d'exécution après traitement par jet grouting de type "mur poids".

Ainsi, pour la création d'un parking souterrain pour l'hôtel Normandie à Deauville, un mur poids a été réalisé et on voit sur la figure F7b le début des terrassements généraux et sur la figure F7a la première ligne de colonnes retaillées de façon à ce que le mur poids soit à l'aplomb de la façade du bâtiment. Les armatures centrales sont visibles. Les colonnes de la première ligne sont légèrement inclinées de façon à ce que les fondations puissent reposer sur au moins la moitié de leur section.



Fig. 7a Hôtel Normandie à Deauville (première ligne)



Fig. 7b en cours de terrassement

Sur la figure 8, on voit la première rangée de colonnes destinées à la création du parking Balzac à Valence (Drôme). L'espacement des colonnes sur la première ligne est fonction des efforts en jeu mais aussi des éventuelles conditions hydrauliques pouvant nécessiter une certaine réduction de perméabilité.



Fig. 8 Parking Balzac (Valence)

Les nombreux chantiers ainsi contrôlés ont permis de s'assurer de la validité du calcul dans la limite des géométries et nature de sol retenues. Ces mesures ne doivent évidemment pas supprimer les contrôles permanents de déformations lors de l'exécution des colonnes ainsi que lors des terrassements de masse, dans le respect de la méthode observationnelle.

En ce qui concerne la vérification du résultat des caractéristiques de la colonne, si elles ne sont pas accessibles par visualisation, il est possible de contrôler leur diamètre en cours d'exécution par champs électriques à partir d'un forage parallèle équipé de capteurs, et leur résistance mécanique, après forage dans une colonne par mesures de vitesses de propagation corrélées avec la résistance à la compression R_c . Suivant différents auteurs, on a une relation qui semble se vérifier de la forme :

$$\log R_c = 720 \cdot 10^{-6} V_L - 1,6 \quad \text{en MPa et m/s}$$

CONCLUSION

Cette technique jet grouting et son utilisation en **murjet**, offre de nombreuses possibilités d'application notamment de travailler en espaces réduits avec éventuellement de petites sondeuses dont le mât peut s'orienter dans différentes directions.

Une des applications présentées est la réalisation d'un "mur poids" fictif qui peut se construire sous les fondations en "figeant" le terrain par incorporation d'un coulis de ciment lui conférant une bonne cohésion. On peut dire que ce principe s'apparente à la congélation ou à l'injection classique, mais sans l'inconvénient des phénomènes parasites de dilatation et d'absence de maîtrise de la zone de traitement.

En effet, une colonne de jet grouting correctement réalisée intéresse un volume bien défini avec une auto protection contre la déperdition du coulis du fait d'un resserrement par compactage des grains de sols à la périphérie de l'action du jet dynamique, d'où une diminution de la perméabilité. Dans l'hypothèse d'absence de vides, les quantités de coulis sont bien définies ce qui permet d'établir un projet suivant un bordereau au mètre linéaire de colonne réalisée, indépendamment du volume de coulis de ciment incorporé qui, par définition, est constant dès que les paramètres d'injection ont été fixés.

Les nombreux ouvrages réalisés attestent de la bonne adaptation de cette technique qui a permis de réaliser des fouilles dans des conditions d'accès très difficiles et à la plus grande satisfaction des donneurs d'ordres.