

# 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.*

# Dimensionnement des colonnes de jet grouting comme élément porteur et d'ancrage

## Bearing and anchoring capacity of jet grout columns

M. Bustamante – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France*  
D. Gouvenot – *Soletanche-Bachy, France*

**RÉSUMÉ:** La technique du jet grouting a permis de résoudre différents problèmes liés à la réalisation des fondations ou de la reprise en sous-œuvre de bâtiments et ouvrages d'art, neufs ou anciens. C'est la colonne isolée, armée ou non qui a été à la base de solutions plus ou moins complexes. On propose une méthode simple pour l'estimation de sa capacité portante ou d'ancrage sous effort statique. La méthode repose sur des essais de chargement en vraie grandeur. Les abaques de calcul proposés ont été établis pour différentes catégories de sols dont la compacité peut être caractérisée par les paramètres  $N$ ,  $q_c$  ou  $pl$ . On évalue aussi l'efficacité des différentes méthodes de contrôle de la géométrie des colonnes et notamment de l'une des toutes dernières dite du 'cylindre électrique'.

**ABSTRACT:** Jet grouting has been used in a number of diverse interesting applications to install new or strengthen existants foundations. The basic structural element of the jet grouting technique is the simple column, with a steel reinforcement or not, out of which the engineer can conceive a more sophisticated foundation system. This paper proposes a simple method to predict the bearing capacity of a jet grouting column subjected to axial compressive or tensile loads with respect to the soil resistance. The method is based on the findings of full scale tests on instrumented grout columns. Design charts are given to determine the total ultimate and allowable loads in correlation with the main categories of soils (clay, silt, sand, gravel, marl, chalk and weathered rock) and with the soil parameters permitting to determine their compacity (pressuremeter  $pl$ , cone resistance  $q_c$  and SPT  $N$ -number). The authors are briefly reporting about the available methods allowing to control the geometry of the grout body.

### 1. INTRODUCTION

Le principe et les applications de l'injection par jet, désignée aussi sous l'appellation de *jet grouting*, ont fait l'objet de très nombreuses publications [1][2] et d'une norme européenne [3]. Il s'agit d'une technique qui permet de déstructurer le terrain en place, en extraire la presque totalité ou partie, pour lui substituer un mélange sol/ciment, ou *soljet*. Ces trois opérations s'effectuent *in situ* à partir d'un forage préalable permettant l'envoi d'un (ou deux) jet(s) de coulis de ciment à énergie cinétique très élevée et dont l'effet peut être amplifié en l'associant à un jet d'air et/ou d'eau. Il résulte des différentes combinaisons de ces jets, trois techniques de base:

- jet simple,
- jet double (à l'air ou à l'eau<sup>(1)</sup>),
- jet triple.

On rappellera que la mise en œuvre d'une colonne donne lieu à la remontée en surface d'un mélange liquide de sol et de ciment, appelé rejet (ou *spoil*). Dans la présente communication, on ne considérera que le problème de la colonne isolée, utilisée uniquement comme élément porteur ou comme élément d'ancrage, au même titre qu'un pieu foré, un micropieu ou un tirant d'ancrage. L'élaboration d'une méthode de prévision des charges limites ou admissibles, exigeait d'avoir une idée précise du comportement général d'une colonne isolée sous charge axiale et statique et de la distribution et des lois de mobilisation des efforts sur la hauteur de la colonne.

### 2. LE MECANISME DE REPRISE DES EFFORTS VIS-A-VIS DU SOL

Celui-ci a été étudié expérimentalement, en soumettant à des essais statiques en vraie grandeur des colonnes réelles, mises en

œuvre par des entreprises spécialisées, et instrumentées pour faire la part des différentes composantes de la portance. Les figures 1a,b,c illustrent les relations obtenues après la réalisation de l'un de ces essais par le LCPC sur une colonne isolée [4]. Il s'agissait d'une colonne installée par jet simple dans des limons argileux de la région parisienne, et instrumentée sur toute sa hauteur avec un extensomètre amovible [5]. Les relations caractéristiques obtenues ont été les suivantes :

- enfouissement de la tête et de la pointe/charge en tête, ou  $S_a-Q_a$  et  $S_p-Q_p$  (fig. 1a),
- distribution de l'effort le long de la colonne pour chaque palier de charge (fig. 1b),
- courbes de mobilisation des frottements unitaires pour différents niveaux de mesure  $i$  ou relations  $q_{si}-y_o$  (fig. 1c).

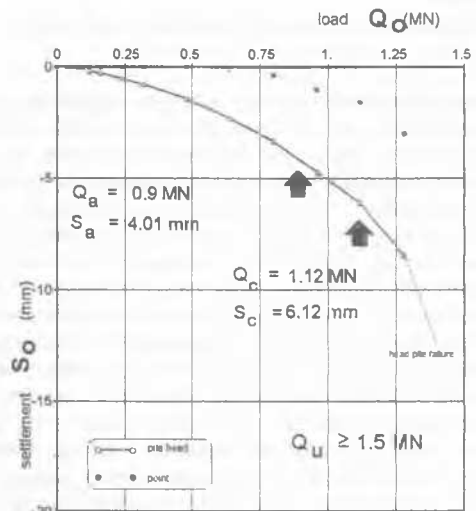


Figure 1a. Relation caractéristique  $Q_0-S_0$  obtenue pour une colonne de jet instrumentée. Viaduc de Levallois, 1992.

(1) appelé également méthode préjet

### 3. LA BASE EXPERIMENTALE ET LE CALAGE GEOTECHNIQUE

Les éléments qui ont permis d'élaborer la méthode de calcul que l'on va décrire résultent de l'examen et de l'interprétation d'un total de 17 essais de chargement en vraie grandeur, dont 2 d'arrachement. Ces essais ont été effectués entre 1980 et 2000, sur 21 colonnes, réalisées par des entreprises spécialisées, dans le cadre de projets réels. Les considérations tirées de ces essais ont été également étayées par la prise en compte de résultats obtenus sur colonnes réelles et qui ont été rapportés par la littérature spécialisée. Le Tableau 1 récapitule l'origine des données en rapport avec les 21 colonnes essayées [4][7][8][9]. La totalité des essais de chargement était de type statique, la procédure d'essai consistant en l'application de paliers croissants et d'égale intensité. Seuls 9 essais ont été conduits jusqu'à la charge limite conventionnelle vis-à-vis du sol  $Q_u$ , définie comme correspondant à un déplacement de la tête d'au moins 10% du diamètre. Sur 21 colonnes examinées, 17 ont été réalisées par jet simple et 4 par double jet.

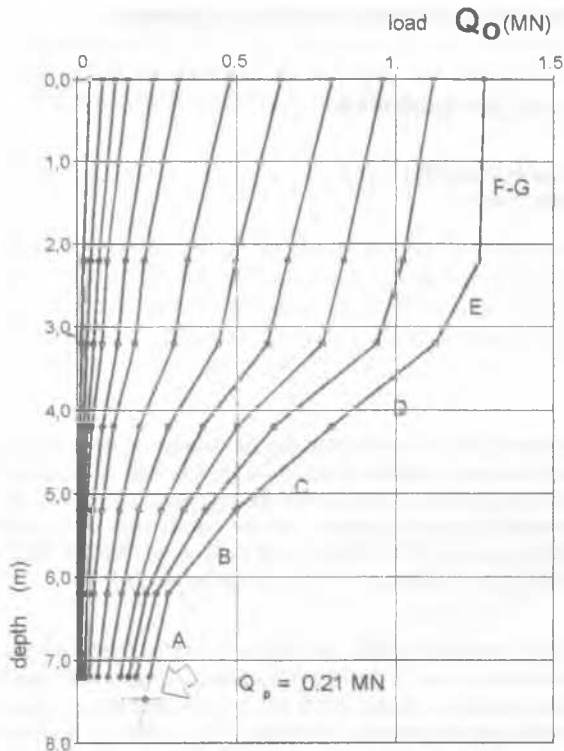


Figure 1b. Distribution de l'effort. Viaduc de Levallois, 1992.

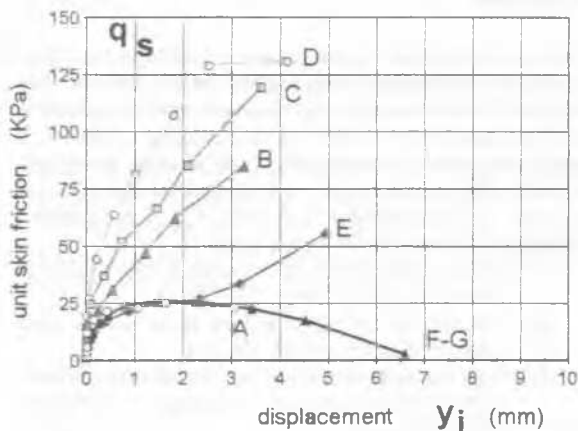


Figure 1c. Frottements unitaires. Viaduc de Levallois, 1992.

L'examen de la distribution de l'effort le long de la colonne (fig.1b) montre bien que la charge appliquée en tête est reprise par la base (d'ailleurs encore très faiblement mobilisée en fin de chargement) et un frottement qui est lui prépondérant le long du fût. Cette constatation est bien la preuve que le mécanisme de reprise des efforts et de transfert au terrain encaissant est, pour une colonne de jet, parfaitement comparable à celui d'une fondation profonde 'classique'. Les conclusions tirées de l'étude expérimentale sur le comportement des colonnes semblent bien justifier, moyennant certaines adaptations techniques et considérations relatives au dimensionnement, de pouvoir utiliser celles-ci comme éléments porteurs ou d'ancrages, au même titre qu'une fondation profonde 'courante'. Sans oublier la reprise des poteaux pré-fondés pour ouvrages neufs ou le confortement des fondations existantes dont il faut améliorer la portance. La résolution de la portance de la colonne isolée permet, par extrapolation et en fonction des impératifs du projet, d'apporter une solution au problème des groupes de colonnes, mais également à celui des fondations mixtes [6].

Tableau 1. Cas des colonnes examinées.

Site	Nb. colonne	Ø (m)	L. (m)	Inst.	Jet	Auteur	sol
Einbeck 1980	3	0.8	8.5	-	S	Rizkallah	LA S & G
Lonay 1988	1	0.6	24	J	D	Morey Jaubertou	A lacustre
Paris 1991	3	3x0.4	11.6	EA	S	Bustamante Gianceselli Thiriart	G & S Ra
Levallois 1992	1 3	0.8 3x0.8	8 8	EA	S	Bustamante Gianceselli Thiriart	LA LA+S+G Ma
Anvers 1998	1	0.51	7	-	S	Maertens Maeckelberg	S glauco.
	1	0.62	9				
	1	0.54	6				
	1	0.58	4				
	1	0.62	4				
Porto 1998	1	0.6	8.5	J	S	Falcao A. Pinto F. Pinto	SA Ra
Madère 1999	1	0.65	13	J	S	Falcao A. Pinto F. Pinto	S+galets Ra
Dunkerque 1999	1	3	5	T	D	Jullian Jardine	S
Chalons 2000	1 1	1.1	12	-	D	Sten	L + S Cr

instrumentation : EA – extensomètre amovible, J – jauges, T- telltale

jet: S-simple, D-double

A – argile, LA – limons argileux, SA – sable argileux, S – sable, G– grave, Ra – rocher, Cr-craie

Les résultats obtenus correspondaient essentiellement à des matériaux, argileux, limoneux, argilo-sableux, sableux, graveleux ou avec galets. Tous les sites d'essais ont fait l'objet d'une reconnaissance pouvant comporter des essais de laboratoires mais dans tous les cas des essais *in situ* de type CPT, SPT ou PMT. Le calage géotechnique de la méthode de calcul proposée a donc été fait en s'appuyant sur ces 3 types d'essais *in situ*.

#### 4. LA METHODE DE CALCUL

Comme pour toute fondation profonde courante, le problème de la détermination de la portance (ou de la capacité d'ancrage) générale doit être abordé pour une colonne isolée sous l'angle de:

- la portance limite vis-à-vis du sol encaissant  $Q_u$ ,
- la portance limite dite 'intrinsèque' de la section même vis-à-vis de ses matériaux constitutifs  $Q_{u, int}$ .

Il faut donc s'assurer que la charge (ou traction) caractéristique du projet  $Q_0$  appliquée en tête de la colonne, satisfait bien aux conditions limites :

$$Q_0 \leq Q_u / F_s$$

$$\text{et } Q_0 \leq Q_{u, int} / F_{s, int}$$

où  $F_s$  et  $F_{s, int}$  sont des coefficients de sécurité spécifiques (voir §.4.3). On notera que la dernière condition, en raison des conditions dans lesquelles se forme le *soljet* exige d'être considérée avec une attention toute particulière.

##### 4.1 Le calcul de la portance limite vis-à-vis du sol $Q_u$

Il est proposé de calculer la charge limite  $Q_u$  ou la traction limite  $T_u$  d'une colonne isolée, en recourant à la formule bien connue :

$$Q_u = Q_{u,p} + Q_{u,s} \text{ pour une colonne chargée axialement à la compression [1]}$$

$$T_u = Q_{u,s} \text{ pour une colonne sous traction axiale [2]}$$

Les termes en [1] et [2] correspondant pour :

$Q_u$  - à la charge limite totale conventionnelle appliquée en tête de la colonne isolée (ou charge associée à un enfoncement de la tête au moins égal au 1/10<sup>e</sup> du diamètre nominal de la colonne) (MN),

$Q_{u,p}$  - à la résistance limite sous la base de la colonne isolée (MN),

$Q_{u,s}$  - au frottement limite total le long de la colonne isolée (MN),

$T_u$  - à la traction limite en tête de la colonne isolée.

NOTA : On a considéré que le frottement limite total était identique pour la compression et pour la traction.

Les termes  $Q_{u,p}$  et  $Q_{u,s}$  sont calculés suivant les formules :

$$Q_{u,p} = S_p \times k_s \times C_s \quad (MN)$$

$$Q_{u,s} = \sum \pi \times D_i \times l_i \times q_{si} \quad (MN)$$

et où :

$S_p$  - l'aire de la base de la colonne (m<sup>2</sup>)

$D_i$  - le diamètre nominal de la colonne dans la couche  $i$  (m)

$l_i$  - la hauteur de la couche  $i$  (m)

$q_{si}$  - le frottement latéral limite unitaire au droit de la couche  $i$  (MPa)

$k_s$  - un facteur de portance de la base

$C_{sp}$  - la mesure de la compacité du sol sous la base (MPa) ; elle s'obtient à partir des mesures faites au pressiomètre Ménard (PMT), au pénétromètre statique CPT ou en réalisant un essai de type SPT.

Le dimensionnement dépend donc des grandeurs  $D_i$ ,  $k_s$  et  $q_{si}$  et toute la validité de la méthode réside dans l'exactitude de leur calage expérimental. La base de données expérimentales dont on dispose restant pour l'instant encore trop pauvre on a opté pour des valeurs conservatrices mais qu'il est toujours possible d'optimiser pour les projets importants, par la réalisation d'essais préalables. Alors que la valeur  $D_i$  dépend du choix délibéré du projeteur, les valeurs  $k_s$  et  $q_{si}$  sont fournies au Tableau 2 et par les abaques de la fig.2. Les valeurs sont données pour des colonnes qui, si leur portance intrinsèque  $Q_{u, int}$  le permet, devraient atteindre leur charge limite  $Q_u$  (ou traction  $T_u$ ) vis-à-

vis du sol, pour des enfoncements (ou soulèvements) de la tête  $s_0$  valant au moins 10% du diamètre moyen de la colonne.

**Choix du diamètre  $D_i$ .** Dans la pratique courante on peut choisir des diamètres de colonne allant de Ø400 mm à Ø3000 mm. La fig.3 donne une relation bien connue entre  $D_i$ , la nature du terrain et le procédé de jet utilisé.

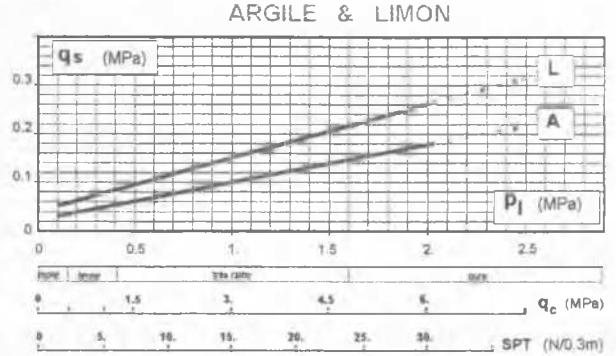


Figure 2a. Abaques pour le calcul de  $q_{si}$  pour les argiles et les limons

##### SABLE & GRAVE & ROCHER ALTERE

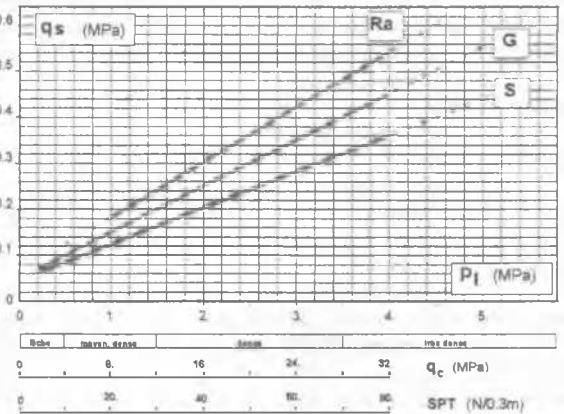


Figure 2b. Abaques pour le calcul de  $q_{si}$  pour les sables, les graves et le rocher altéré

**Valeurs du facteur  $k_s$  (Tableau 2).** Le facteur de portance  $k_s$  est empirique et adimensionnel. Il dépend du type d'essai *in situ* sur lequel repose le calcul et on le désigne par  $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_N$ , suivant que l'on s'aligne respectivement sur l'essai pressiométrique (PMT), pénétrométrique statique (CPT) ou de pénétration standard (SPT) pour mesurer la compacité du sol  $C_{sp}$ . Les valeurs  $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_N$  sont données dans le Tableau 2 pour quelques grandes catégories de sols et en relation avec les essais *in situ* associés.

Tableau 2. Choix du coefficient de portance  $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_N$

nature de sol	$k_p$	$k_c$	$k_N$
argile A	1.6	0.4 à 0.6	0.1
limon L	1.4	0.3 à 0.5	0.1
sable S	1.2	0.15 à 0.3	0.06
grave G	1.2	0.25	0.06
craie Cr	1.3	0.3 à 0.4	0.1 à 0.2
marne Ma	1.6	0.5	0.08
marno-calcaire MaCl	1.3	-	-
rocher altéré Ra	1.5	-	-

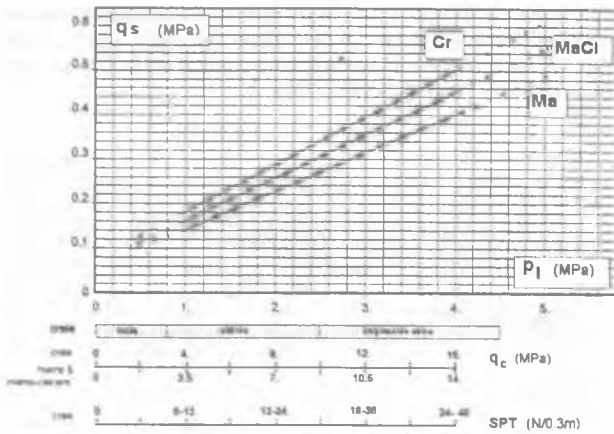


Figure 2c. Abaqués pour le calcul de  $q_{st}$  pour les marnes, les marno-calcaires et les craies

**Abaques  $q_{st}$  (figs. 2a, b, c).** Les abaques proposés pour le choix de  $q_{st}$  ont été établis à partir des valeurs directement mesurées sur les colonnes instrumentées du Tableau 1, mais aussi en faisant appel pour certaines extrapolations, aux mesures obtenues pour des fondations injectées [10]. Ces abaques sont regroupés en 3 grandes catégories de sols :

a) *sols fins cohérents*

- abaque **A** : argile  
argile ± limoneuse
- abaque **L** : limon  
limon ± sableux

b) *sols grenus*

- abaque **S** : sable fin à grossier
- abaque **G** : grave sableuse  
grave grossière
- abaque **Ra** : rocher altéré ou fragmenté (\*)

c) *sols intermédiaires*

- abaque **Ma** : marne
- abaque **MaCl** : marno-calcaire
- abaque **Cr** : craie altérée

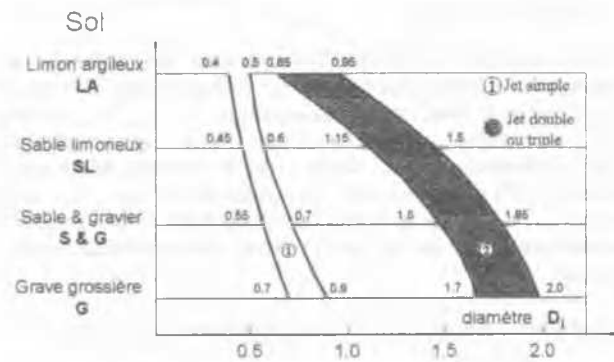


Figure 3. Relation  $D_j$  en fonction de la nature du terrain et du type de jet

Comme indiqué précédemment, les mesures de  $q_{st}$  correspondent à un nombre d'essais sur colonnes limité et installées dans une gamme de sols essentiellement alluvionnaires allant des argiles aux graves. Par contre, les sols rencontrés quotidiennement par le géotechnicien, tels que les craies et les marnes ou la frange 'meuble' de rochers altérés, sont peu ou pas du tout représentés. Des valeurs de  $q_{st}$  ont été néanmoins proposées pour ces terrains sous toute réserve, et à condition d'être validées par des essais de chargements préalables. On aura

(\*) de nature pulvérulente

toutefois constaté que les abaques de la fig.2 conduisent à retenir des frottements unitaires limites élevés et assez proches dans l'ensemble, de ceux que l'on a pu associer à des fondations forcées injectées. L'observation visuelle des colonnes déterrées et de leur pourtour immédiat expliquant d'ailleurs ce choix sur le plan pratique.

4.2 *Le calcul de la portance intrinsèque  $Q_{u, int}$*

Synonyme de justification du dimensionnement de la colonne vis-à-vis de ses matériaux constitutifs, on calculera  $Q_{u, int}$  pour une colonne non armée à partir de la formule :

$$Q_{u, int} = S_p \times R_{cj} \quad (MN)$$

sachant que :

$S_p$  - l'aire de la section nominale de la colonne ( $m^2$ )

$R_{cj}$  - la résistance nominale moyenne à la compression du soljet de la colonne (MPa)

Si l'estimation de la section  $S_p$  ne pose pas de problème particulier outre que celui d'être garanti après la mise en œuvre de la colonne, le choix de  $R_{cj}$  est bien évidemment l'un des points les plus délicats du projet. Et cela parce que s'il dépend de l'expérience de l'entreprise mais aussi et tout autant de facteurs complexes (nature du sol et hétérogénéité naturelle, rapports C/E avant et après la prise, type de ciment et mouture, temps de durcissement, phénomènes d'essorage et de décantation, apport d'eau en provenance du terrain, aération du coulis, etc). Dans la pratique donc et lors du calcul de  $Q_{u, int}$ , il appartiendra à l'ingénieur de s'en remettre à sa propre expérience dans le domaine ou de recourir aux nombreuses références de la littérature spécialisée. C'est ainsi que ces dernières conduisent à retenir pour des colonnes exécutées par simple jet et à partir d'un coulis de  $C/W \geq 1$  :

- a) argile  $1 < R_{cj} < 4$  MPa, moyenne 3 MPa,
- b) limon argileux  $4 < R_{cj} < 7$  MPa, moyenne 5 MPa,
- c) sable fin limoneux  $7 < R_{cj} < 11$  MPa, moyenne 8 MPa,
- d) sable  $11 < R_{cj} < 20$  MPa, moyenne 15 MPa,
- e) grave  $11 < R_{cj} < 40$  MPa, moyenne 25 MPa,
- f) craie  $7 < R_{cj} < 17$  MPa, moyenne 12 MPa,

Lorsqu'on souhaitera approcher au mieux les valeurs réelles  $R_{cj}$ , on pourra s'en remettre aux mesures effectuées sur plots d'essais préalables ou de convenance. Sans oublier qu'il est toujours possible d'obtenir des résistances plus importantes moyennant l'utilisation de coulis fortement dosés en ciment. Toujours à ce propos et si le soljet est un matériau notablement moins résistant que le béton d'une fondation 'classique', le recours à des armatures judicieusement conçues et disposées le long de la colonne permettra de faire travailler efficacement les colonnes à la traction. Mais aussi d'améliorer la portance à la compression. L'insertion d'une armature métallique au sein de la colonne peut être effectuée avant la prise du soljet ou par scellement postérieur, dans des forages de réservations. Enfin, la reprise d'effort en tête de colonne (cas de l'enrobage d'une fondation existante en partie haute ou du poteau pré-fondé), doit faire l'objet d'une étude particulière des différents mécanismes de rupture par poinçonnement.

Pour le calcul de la déformation, demandée pour des problèmes particuliers, on utilisera les valeurs de modules  $E_{cj}$  proposées par les nombreux articles de la littérature sur le sujet.

4.3 *Le choix des coefficients de sécurité et le calcul des charges et tractions admissibles*

On proposera d'adopter pour le calcul des charges  $Q_{adm}$  et des tractions  $T_{adm}$  admissibles vis-à-vis du sol (\*\*), les valeurs de coefficients de sécurité  $F_j$  suivantes :

(\*\*) équivalent de la charge aux états limites de service ELS

$$Q_{adm} = Q_{u,p}/F_{j,p} + Q_{u,s}/F_{j,s} \quad (MN)$$

a) Cas d'une colonne travaillant à la compression

$F_{j,p}$  - pour la résistance de base = 2

$F_{j,s}$  - pour le frottement = 2.5 pour les 3 premiers mètres de colonne

= 2 pour les mètres suivants

b) Cas d'une colonne travaillant à la traction

$F_{j,T}$  - pour le frottement = 3 pour les 3 premiers mètres de colonne

= 2.75 pour les mètres suivants

La justification de la colonne vis-à-vis de la charge intrinsèque admissible sera faite en vérifiant que l'on satisfait bien à :

$$Q_{int, adm} \leq S_p \times R_{cj} / F_{j, int} \quad (MN)$$

avec :  $F_{j, int} = 3$ , que l'on pourra ramener à 2.5 ou même 2, si cela est justifié par des essais appropriés.

## 5. RAPPEL ET REMARQUES SUR LES CONTROLES EN RELATION AVEC LA PORTANCE

Comme pour toutes les techniques traditionnelles de l'injection, le plot d'essais est tout particulièrement recommandé pour un chantier de jet. Réalisé avant le démarrage des travaux définitifs c'est la meilleure façon, pour un contexte géotechnique donné, d'évaluer et d'optimiser la mise en œuvre et le dimensionnement. Il permettra aussi de déterminer l'état de serrage du sol avant et après l'installation des colonnes. Le pressiomètre étant bien adapté à cette opération de contrôle.

Après la prise du *soljet*, on pourra procéder au déterrement de la colonne, à son inspection visuelle et au prélèvement d'échantillons au sein du fût pour déterminer les caractéristiques mécaniques du *soljet*. Cette procédure, si elle est la méthode de contrôle la plus satisfaisante est toutefois onéreuse, et limitée à un nombre très restreint de colonnes, ou carrément irréalisable à grande profondeur.

Les entreprises ont donc cherché à s'orienter vers des techniques 'indirectes' et non destructives, mises en œuvre lors de la réalisation de la colonne ou après que celle-ci ait été achevée. Et, dans ce dernier cas, après durcissement du *soljet* ou, pour l'une des toutes dernières méthodes, avant durcissement du mélange. Ces méthodes 'indirectes' reposent sur :

- 1) l'étude des propriétés du rejet (ou *spoil*) ;
- 2) l'utilisation de calibres déployables (*diamètreur*) ;
- 3) la pose d'événements à distance variable du forage ;
- 4) l'analyse de la propagation et de la réflexion d'ondes mécaniques (écho, transparence sonique, impédance) ou électromagnétiques (géoradar), du contraste de la résistivité entre le sol et le *soljet* (méthode électrique), l'exploration radiologique (tomographie) ou la mesure de l'absorption d'un faisceau de rayonnement (gammamétrie), ou le couplage de plusieurs méthodes (électrique et tomographie) ;
- 5) les essais in situ (CPT, SPT ou plus rarement PMT) pour l'appréciation de la continuité, de la longueur et de la résistance mécanique de la colonne lorsque cette dernière est relativement faible et ne comporte pas d'éléments indurés ;
- 6) le carottage dans l'axe de la colonne ou incliné ou traversant, pour les soljets de résistance suffisamment élevée ;
- 7) le chargement (statique ou dynamique du type CAPWAP ou CASE) ou d'arrachement direct, sur colonne instrumentée ou non .

L'ensemble des méthodes indiquées en 4), 6) et 7) sont les méthodes recommandées pour le contrôle des pieux. Tout

comme pour ces derniers, elles seront appliquées avec plus ou moins de succès.

Le contrôle du rejet qui a fait l'objet de nombreuses publications mérite quelques remarques. Il est pratiqué dans le but de pouvoir en tirer des conclusions quant à la résistance  $R_{cj}$  et au diamètre  $D_j$  de la colonne achevée. La méthode consiste à observer les rejets arrivant à la surface et effectuer des prélèvements pour en mesurer la densité  $\gamma_R$  et les caractéristiques mécaniques  $R_{cj}$  et  $E_{cj}$  après la prise, ou la teneur en ciment [11]. En combinant les caractéristiques du traitement et du rejet différents auteurs proposent également des méthodes pour la prévision du diamètre final de la colonne  $D_j$ . La méthode du contrôle des rejets doit être appliquée avec beaucoup de circonspection pour différentes raisons et entre autres parce qu'elle est difficilement rattachable à une cote déterminée du forage en cours, et lorsque les prélèvements sont impossibles.

La méthode dite du 'cylindre électrique' mérite quelques commentaires parce qu'elle présente l'avantage de pouvoir estimer le diamètre de la colonne peu après la fin de sa réalisation. Elle consiste à mesurer et analyser les différences de potentiel qui s'établissent autour du forage lorsqu'on envoie un courant électrique par l'intérieur du forage à partir d'un tube non métallique introduit dans le mélange encore frais (Fig.4). On estime que cette méthode dans des conditions favorables est en mesure de fournir des résultats avec une précision de l'ordre de 10%.

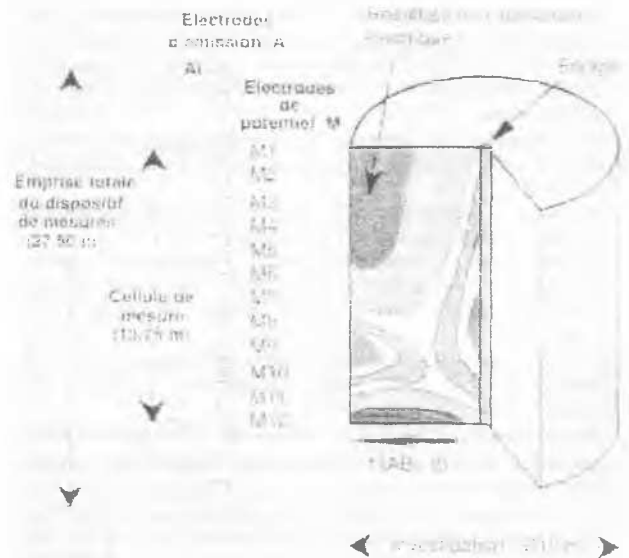


Figure 4. Schéma de principe de la méthode du cylindre électrique [12]

## 6. CONCLUSIONS

L'étude expérimentale sur le comportement de colonnes de jet instrumentées et sous charge axiale statique justifie leur utilisation comme élément porteur ou comme élément d'ancrage, et cela pour des ouvrages neufs ou existants.

Le problème de la détermination de la portance (ou de la capacité d'ancrage) doit être abordé sous l'angle de la portance vis-à-vis du sol encaissant  $Q_u$  et de la portance limite vis-à-vis des matériaux constitutifs de la colonne  $Q_{u, int}$ . On propose pour la colonne isolée une méthode de prévision de la charge limite  $Q_u$  reposant sur l'association des 2 termes caractéristiques que sont la résistance limite sous la base  $Q_{u,p}$ , et le frottement limite total le long de la colonne  $Q_{u,s}$ . Le calcul de chacun de ces

termes dépend des grandeurs  $D_i$ ,  $k_s$  et  $q_{si}$ , soit respectivement : du diamètre moyen de la colonne, et de 2 paramètres déterminés expérimentalement et qui sont le facteur de résistance sous la base et le frottement unitaire agissant le long du fût. Les valeurs  $k_s$  et  $q_{si}$  sont données sous forme du Tableau 2 et d'abaques (voir figs.2a, b, c). La base de données expérimentales sur laquelle repose la méthode étant encore limitée, on a opté pour des valeurs de paramètres  $k_s$  et  $q_{si}$  conservatrices. La collecte de valeurs plus nombreuses devrait constituer un axe de recherche utile dans les années à venir.

La résolution de la portance de la colonne isolée permet d'apporter une solution au problème des groupes de colonnes mais également à celui des fondations mixtes.

Enfin et comme pour toutes les techniques traditionnelles de l'injection, le plot d'essais préalables est tout particulièrement recommandé pour un chantier de jet. Il est irremplaçable pour les projets techniquement difficiles et 'exigeants' et on ne saurait trop insister sur la nécessité d'instrumenter les colonnes essayées.

## 7. REFERENCES

- [1] Tornaghi R. Controlli e Bilanci Analitici dei Trattamenti Colonnari Mediante Jet Grouting. *Revista Italiana di geotecnica*, Vol.3, pp.217-234, 1993.
- [2] Gallabresi F. Grouting improvement of foundation Soils. Vol.1, New Orleans, Louisiana, february 25-28, 1992, pp.169-181.
- [3] Comité Européen de Normalisation CEN TC 288, Projet de norme européenne prEN 12716 en cours de validation. Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Colonnes, panneaux et structures de sol-ciment réalisés par jet, novembre 2000
- [4] Bustamante M, Gianceselli L, Thiriat D, " Strengthening of a viaduct built at the beginning of the 20th century, by jet-grouting ", Proc. ARRIGO CROCE Memorial Symp. on Geotech. Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Naples, Italy, 3-4 october
- [5] Bustamante M., Gianceselli L. La mesure des déformations à l'aide des extensomètres amovibles LPC. Méthode d'essai n°34, janvier 2001, pp.16.
- [6] Borel S. Comportement et dimensionnement des fondations mixtes. Thèse de docteur de l'ENPC. Paris 4 juillet 2001.
- [7] Bustamante M, Gianceselli L, Thiriat D. Portance d'un groupe de colonnes de sol traité par 'jet-grouting' sous charge verticale axiale. *Bull. liaison Labo. P. & Ch.* 189, janv.-février, pp.47-57, 1994.
- [8] J.F. Falcao, A.L. Pinto, F.D. Pinto. Case histories of ground improvement solutions using jet-grouting. *Congrès de Géotechnique 2000*, Porto.
- [9] Maertens J., Maekelberg W. Interpretatie van de proeven op de groupalen gelegen aan de Cuperiusstraat te Antwerpen. *Compte-Rendu d'essai*. Janvier 1999
- [10] – Bustamante M., Doix B. Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. *Bull. liaison Labo. P. & Ch.* 140, nov.-déc., pp.75-91, 1985.1996, pp.543-550, Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- [11] Kauschinger J.L., Joseph L., Perry E.B., Hankour R. J. Methods to estimate Composition of jet grout bodies, Vol.1, Proc. Conf. New Orleans, Louisiana, february 25-28, 1992 .
- [12] – Frappin P., Morey J. Mesure du diamètre des colonnes de jet grouting par la méthode du cylindre électrique. pp. 1-7