

CONSOLIDATION DES SOLS PAR LA TECHNIQUE
DE JET GROUTIN GROTING ETAT DES
CONNAISSANCES ET EXPERIENCES

LOUIS C., Simecsol, France
LUNARDI P., Université de Florence, Italie

CONSOLIDATION DES SOLS PAR LA TECHNIQUE DE JET GROUTING
ETAT DES CONNAISSANCES ET EXPERIENCES

IMPROVEMENT OF SOILS BY JET GROUTING
STATE OF CURRENT KNOWLEDGE AND EXPERIENCE

1c

RESUME

Au cours des dix dernières années, un développement important a vu le jour, surtout en Italie dans le domaine de la consolidation des sols par la technique de jet grout. Cette technique utilise le procédé de projection à très haute pression d'un coulis de ciment en forage. Le but de la communication est de faire un historique sur le développement de cette technique et de faire le point sur l'état des connaissances et des expériences dans ce domaine. Par un tel procédé, le sol est finement fragmenté par deux jets très fins de coulis perpendiculairement à la tête de forage. Les particules argileuses et l'eau dans le sol se trouvent repoussées par le jet, les vides ainsi libérés étant ultérieurement remplis de coulis. Par traitement rotatif sur des passes successives de quelques centimètres, on réalise ainsi des colonnes de terrain consolidé constitué essentiellement d'un béton par apport de coulis avec, comme agrégats, le terrain en place en partie expurgé de sa phase argileuse. Il se crée par ailleurs une auréole périphérique de terrain ayant subi un compactage suite au passage du jet. La résistance finale des colonnes dépend de la nature des terrains en place et peut varier, à titre indicatif, entre 5 MPa pour les sols très argileux, jusqu'à 30 à 40 MPa pour les matériaux sablo-graveleux. Un tel traitement peut être réalisé aussi bien dans les sols imperméables (argiles ou limons argileux) que dans des matériaux très perméables (alluvions grossières, rochers très fracturés...) en milieux aquifères ou non. Les applications dans le domaine des travaux publics, génie civil et mines peuvent être très variées pour la consolidation des sols, l'étanchement, les soutènements en surface ou en sous-terrain et surtout pour les reprises en sous-oeuvre (renforcement de fondations, etc...).

SUMMARY

The last ten years have seen the development, particularly in Italy, of an important new technique for the improvement of soils, that of jet grouting. The basis of the technique is the injection of cement grout at very high pressures in a borehole. The purpose of this paper is to present the history of the development of jet grouting and to summarize the current state of knowledge and experience in this field. The basis of the technique is the injection of grout in two fine jets perpendicular to the axis of the borehole. The clay-size particles and water are forced outwards and the resulting voids are filled by the grout. By rotating the jets during the injection process and repeating successively at a spacing of some centimetres, a series of columns of treated soil are formed comprising a kind of concrete formed from a mixture of grout with the coarse fraction of the soil. In addition the process leads to a zone of consolidated soil around each treated column. The strength of the columns so formed depends on the type of soil treated but varies from of the order of 5 MPa for a very clayey soil to as great as 30 to 40 MPa for a sandy gravel. The technique is effective in both impermeable soils (clays or clayey silts) and highly permeable soils (coarse grained alluvium, heavily-fractured rock...), in soils that are water-bearing or not. The technique can be applied in a wide variety of situations encountered in civil engineering, foundations and mining including the strengthening of soils, impermeable cut-offs, ground support at the surface or underground and above all for different forms of underpinning (reinforcement of foundations, etc...).

1. POSITION DU PROBLEME

La consolidation des sols par réalisation de colonnes consolidées a connu, au cours de la dernière décennie, de très larges développements et ceci sous des aspects très variés selon les pays. Dans ces procédés figurent en particulier les techniques de "Compaction Grouting", "Deep Mixing Method" (DMM ou JST method), "Jet Grouting", etc... (BAKER W.H., 1981 ; ABOSHI H., 1984 ; KAWASAKI T., 1984). Ils font appel à une combinaison des phénomènes suivants dans les sols en place : déplacements, compaction, consolidation et renforcement.

Parmi les méthodes spécifiques de Jet Grouting figurent également plusieurs variantes, essentiellement selon les équipements utilisés. Il convient à ce sujet de mentionner en particulier les techniques de Jet Grouting à simple jet et les méthodes à jet multiple (double ou triple).

Dans toutes ces méthodes, un brassage est réalisé mécaniquement (DMM et JST) ou hydrauliquement (Jet Grouting) entre le terrain en place et le jet de coulis injecté dans le sol, comme le montre schématiquement la fig. 1.

Pour ce qui concerne en particulier le Jet Grouting, il y a lieu de bien distinguer les consolidations réalisées par triple jet (fig. 2) qui reposent sur un brassage préalable du terrain à l'aide d'un jet d'eau

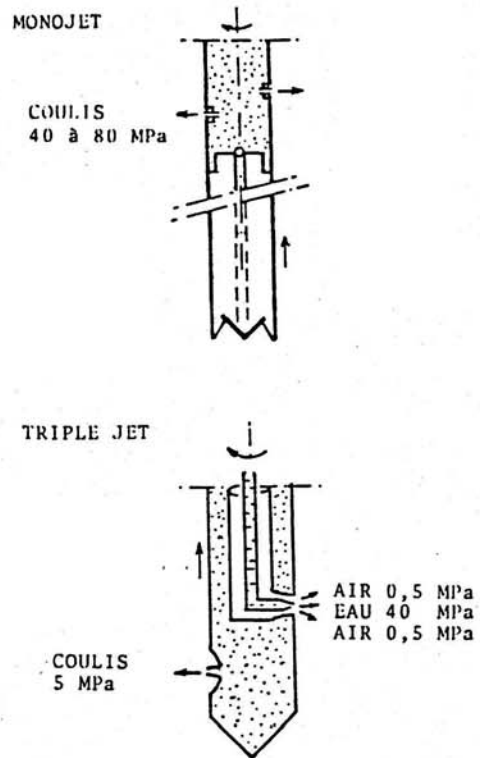
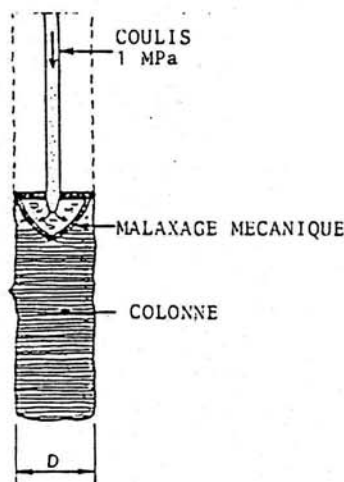


FIG. 2 - TETES D'INJECTION JET GROUTING MONOJET - TRIPLE JET

MALAXAGE MECANIQUE

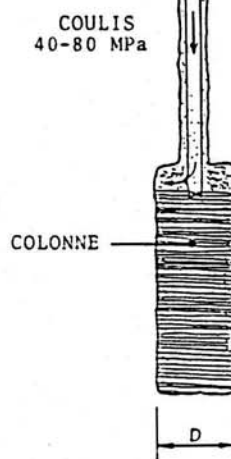
C.F.G.- DMM - JST etc.



D = 60 ÷ 100 cm

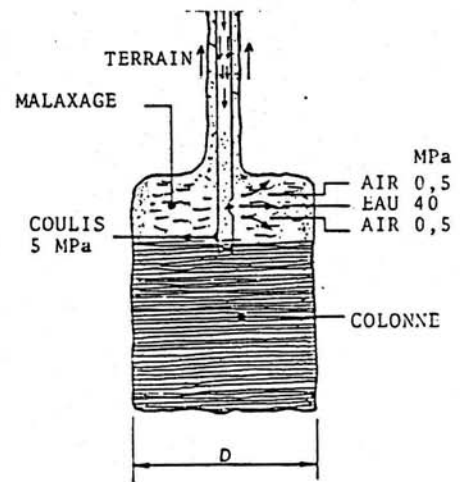
MALAXAGE HYDRAULIQUE

CCP ET AUTRES MONOJET



D = 60 ÷ 80 cm

KAJIMA TRIPLE JET



D = 150 ÷ 180 cm

FIG. 1 - COLONNES DE TERRAIN CONSOLIDÉ PAR BRASSAGE MECANIQUE OU HYDRAULIQUE DU MELANGE COULIS - TERRAIN (Schéma d'après documentation Pali Trevisani)

haute pression (40 MPa) associé à un jet latéral d'air (0,5 MPa), le volume ainsi remanié étant ultérieurement l'objet de remplissage, voire de substitution, de coulis de ciment injecté à fort débit, à une pression de l'ordre de 5 MPa.

En parallèle avec cette dernière technique nécessitant des trains de tiges à triple canalisation, un développement important a vu le jour par exécution de Jet Grouting à monojet. Dans cette dernière méthode, le jet unique de coulis à haute pression malaxe le terrain et le consolide par introduction du coulis de ciment.

Dans le présent article, il ne sera question que de cette technique spécifique faisant appel à un matériel relativement simple permettant des traitements dans toutes directions et dans des espaces exigus.

2. PRINCIPE DE LA METHODE MONOJET

La technique de JET GROUTING (monojet) est déjà ancienne dans la production pétrolière pour assurer la consolidation des parois de forages profonds. En génie civil, l'une des premières applications est attribuée à la société anglaise CEMENTATION qui réalisa des consolidations par cette méthode pour des barrages au Pakistan (en particulier site de Niazbeg) vers la fin des années 1950 (NICHOLSON, 1963).

La même technique a été par ailleurs développée industriellement, surtout au Japon, une dizaine d'années plus tard, avec en particulier des injections de ciment mais aussi et surtout de produits chimiques. Plus récemment, en Italie, des matériels particulièrement opérationnels ont été mis au point et ce pays connaît actuellement plus d'une centaine d'applications variées, toutes menées avec succès (LUNARDI, 1982).

Cette technique de consolidation utilise un procédé de projection, à très haute vitesse, d'un coulis de ciment en forage. Ce coulis de ciment relativement fluide (rapport pondéral C ciment / E eau voisin de 1), est envoyé dans le train de tiges du forage au moyen d'une pompe très puissante à des pressions élevées (40 à 80 MPa), ce qui permet de générer à la sortie des deux buses de projection, proches de l'outil de foration, deux jets diamétralement opposés d'un diamètre initial de l'ordre de 1 à 2 mm (diamètre des gicleurs).

Les phases d'exécution pour le traitement sont représentées sur le schéma de la fig. 3. Intervient en premier lieu une foration classique (diamètre 60 à 80 mm au taillant ou au tricône) sur la hauteur totale à atteindre, en général 10 à 20 m. La limitation des profondeurs de traitement est conditionnée par des problèmes de parallélisme et de déviation de forage entre traitements suc-

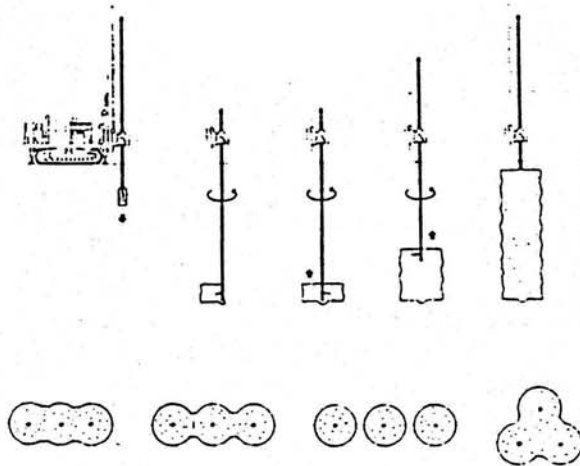


FIG. 3 - SCHEMAS D'EXECUTION DE COLONNES CONSOLIDEES PAR JET GROUTING

cessifs. Le forage réalisé, il est ensuite procédé, en retirant le train de tige, à la projection du coulis de ciment suite à la fermeture par bille d'acier du canal axial du train de tige. Le traitement à un niveau donné se poursuit pendant 8 à 15 secondes avec rotation du train de tige (10 à 15 tours/minute) et par passes successives tous les 3 à 5 cm, la longueur de la zone de traitement étant indépendante de la longueur de foration.

Par un tel traitement se trouvent ainsi réalisées des colonnes de terrain consolidées, d'un diamètre de 60 à 100 cm, fonction du rayon d'action du jet. Ce rayon d'action dépend :

- de la nature du sol (résistance et état de contrainte)
- de la vitesse de projection et donc de la pression d'injection
- du diamètre du jet et du temps de traitement

Par traitements en forages parallèles peuvent ainsi être réalisées des colonnes isolées, des colonnes jointives ou sécantes dans toutes directions.

L'ensemble du matériel intervenant sur le chantier est représenté sur la fig. 4. Il comprend en particulier :

- a) des silos de ciment sachant que dans la pratique 1 m de colonne nécessite 300 à 500 kg de ciment
- b) un dispositif de dosage malaxage
- c) une pompe haute pression d'une puis-

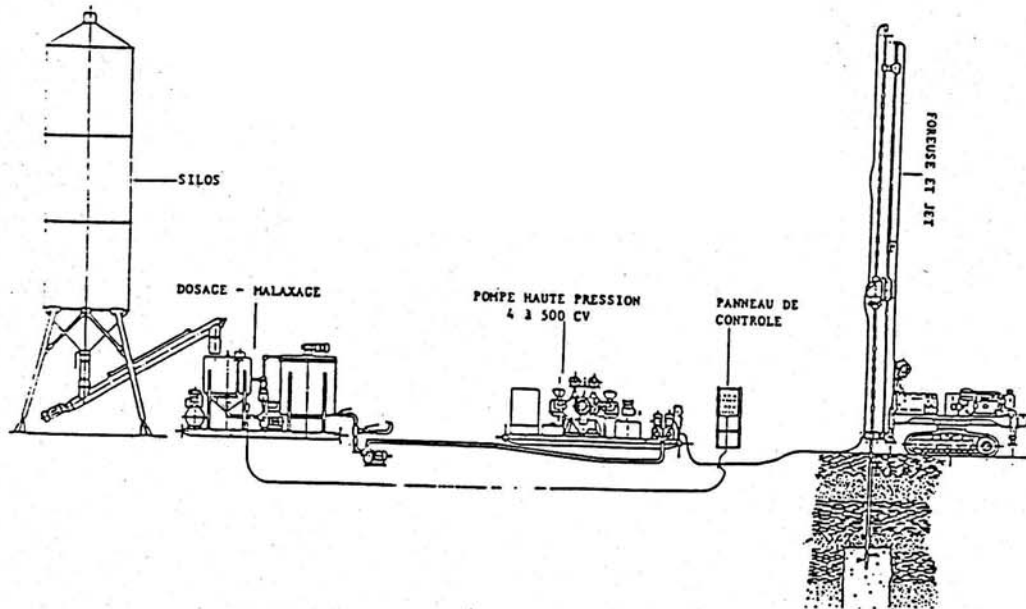


FIG. 4 - MATERIELS POUR EXECUTION DE COLONNES JET GROUTING

sance de 400 à 500 CV

d) un panneau de contrôle automatique et de commande

e) une foreuse pour l'exécution des colonnes.

Les éléments a à d sont généralement groupés dans une centrale, sachant que la foreuse, pour la réalisation des colonnes peut travailler à distance jusqu'à 200/300 m de la centrale, ce qui est intéressant pour limiter le coût des installations de chantier et également réduire les nuisances.

L'innovation technique réside dans l'application du jet de coulis à très haute vitesse. Ce jet permet :

- d'une part, de réaliser le JET CUTTING dans le terrain à une profondeur variable selon la compacité de ce dernier (rayon d'action compris entre 30 et 50 cm). C'est la très haute énergie cinétique du coulis à la sortie des gicleurs et sa finesse (ϕ 1 à 2 mm) qui explique cette pénétration du terrain (bombardement par particules lancées à vitesses supersoniques), Fig. 5.

- d'autre part, d'imprégner, voire malaxer, le terrain le long des zones de pénétration du jet pour réaliser ainsi un béton en utilisant le terrain en place comme agrégats.

Le sol se trouve ainsi finement fragmenté sachant que les particules argileuses et l'eau

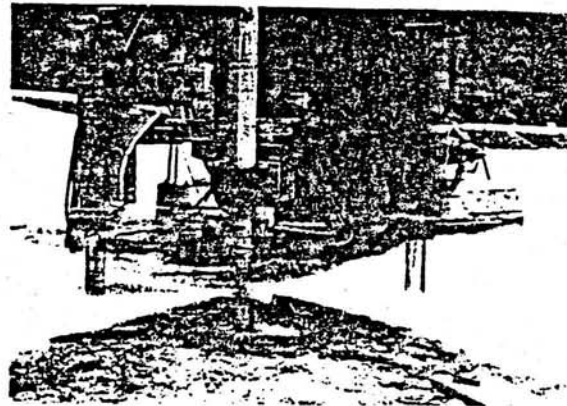


FIG. 5 - JET A L'AIR LIBRE - TECHNIQUE MONO-JET AVEC TETE A QUATRE GICLEURS (Chantier RODIO - projet de chemin de fer à CARNIA, Italie)

dans le sol se trouvent repoussées par le jet, les vides ainsi libérés étant ainsi remplis de coulis. A distance, au delà du rayon d'action du coulis, le terrain se trouve par ailleurs compacté par suite du transport de matières. La résistance finale des colonnes dépend de la nature des terrains en place. Elle peut varier, à titre indicatif, entre 5 MPa pour les sols très argileux jusqu'à 30/40 MPa pour les matériaux sableux-graveleux.

dans les terrains fins homogènes (sable fin, limon, argile) les colonnes sont de géométrie régulière avec une transition nette entre le terrain imprégné de ciment donc beaucoup plus résistant, et le terrain seulement consolidé par le compactage latéral.

En milieux plus grossiers (sables et graviers, galets...), cette zone de transition est très diffuse avec parfois pénétration profonde du coulis dans les horizons ouverts.

Il convient de distinguer dans ce processus deux zones cylindriques bien distinctes (Fig. 6) autour du forage de traitement :

. le noyau A de terrain fragmenté, malaxé avec une forte concentration de coulis - Le rayon de ce noyau A dépend de la résistance au cisaillement du terrain τ_0 , de la vitesse du jet et donc de la pression du coulis dans le train de tige et du temps de traitement.

. la zone consolidée externe B compactée par le transport solide et le bombardement de matières (coulis) avec, dans certains terrains, présence de "racines" ou intrusions localisées de coulis dans les surfaces de faiblesse du terrain (niveaux de faible résistance, de forte perméabilité, etc...). L'étendue de la zone B dépend de la nature du terrain (squelette solide) et de sa compacité. Dans la zone B les caractéristiques mécaniques du terrain sont nettement améliorées (le diamètre de la zone d'influence B peut, dans la pratique, atteindre plusieurs mètres). La Fig. 7 présente quelques résultats quantifiés à ce sujet.

5. CHAMP D'APPLICATION

Un tel procédé de consolidation s'avère applicable, quelle que soit la nature du sol (contrairement à ce qu'il en est pour les traitements classiques par injection repo-

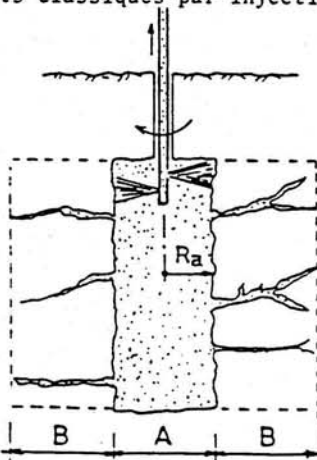


FIG. 6 - ZONES DE TRAITEMENT DU TERRAIN PAR JET GROUTING

sant sur une pénétration souvent hétérogène du coulis par filtration) aussi bien pour les sols imperméables (argiles ou limons argileux) que pour les matériaux très perméables (alluvions grossières, rocher très fragmenté caverneux... en milieux aquifères ou non). Le jet, en repoussant les parties fines du terrain, argiles ou limons, crée à la périphérie une sorte de "cake" protégeant les colonnes ainsi réalisées dès la fin du traitement. Ainsi l'eau souterraine ne peut pas diluer ou désagréger les colonnes fraîchement réalisées (avant la prise du ciment).

Les applications dans le domaine des travaux publics, génie civil et mines, peuvent être très variées pour la consolidation des sols, les fondations, l'étanchement, les soutènements en surface et en souterrain et surtout pour les reprises en sous-oeuvre comme illustré sur la Fig. 8.

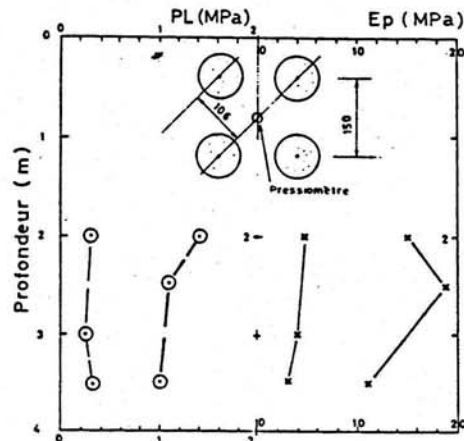


FIG. 7 - CONTRÔLE DE JET GROUTING PAR MESURES PRESSIOMETRIQUES (ALLUVIONS SABLO-GRAVELEUSES METRO DE MILAN)

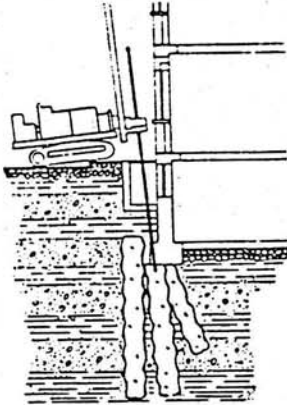
Cette technique de traitement est très souple d'utilisation, compte tenu du fait que l'on peut travailler dans toutes les directions en donnant une géométrie quelconque à la structure souterraine ainsi réalisée, avec, si souhaité, régénération d'ouvrages anciens (maçonneries ou autres).

4. EXPERIENCES FRANCAISES

Cette méthode de consolidation a connu quelques applications en France au cours des deux dernières années, en particulier :

- exécution de puits dans les alluvions de la Seine, au voisinage du Pont de Sèvres
- réalisation d'un chantier expérimental dans le cadre des travaux de préparation

a) CONSOLIDATION DE FONDATION



b) PRESOUTÈNEMENT EN TUNNEL

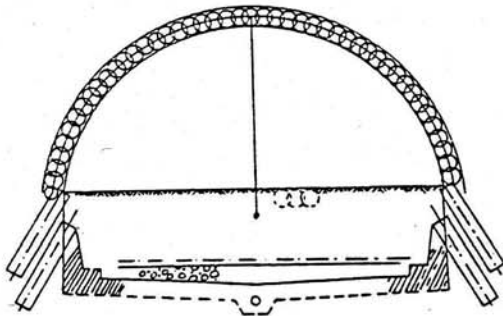


FIG. 8 - DEUX EXEMPLES, PARMIS D'AUTRES, D'UTILISATION DE CONSOLIDATION PAR JET GROUTING - PLUSIEURS DIZAINES D'APPLICATIONS EN ITALIE

pour la liaison St Michel des RER lignes B et C et d'une fouille de 18 m x 6 m profonde de 10 m dans le Calcaire de Brie pour le prolongement de la ligne 7 à Villejuif.

- réalisation d'un chantier expérimental puis de travaux importants pour le soutènement de la fouille de la station de métro "Sans souci" et du lot 3 de la ligne D du métro de Lyon dans les alluvions grossières du Rhône.

- exécution des fondations de l'Îlot Michelet dans les alluvions anciennes de la Seine (sables limoneux sous 20 m de structures existantes le long de l'esplanade de la Défense) - longueur perforée 35 à 40 m, structures béton armé existantes de 0 à 20 m, traitement de 20 à 35/40 m - Les colonnes consolidées sont utilisées par groupement de 8 à 12 colonnes pour la réalisation de massifs de fondation d'un diamètre de 2,50 m à 3,00 m reprenant 900 à 1200 tonnes de surcharges verticales.

Les expériences françaises ont donné lieu à des mesures diverses et variées pour caractériser la consolidation (mesures pressiométriques, inclinométriques, piézométriques,

enregistrement de paramètres, mesure de résistance, transparence sonique, etc...) Les résultats obtenus peuvent se résumer comme suit :

. La consolidation par JET GROUTING est possible dans tous les sols, voire même la roche très fracturée sous réserve que leur résistance ne soit pas trop élevée (SPT inférieur à 60 - 80, pression limite P_1 inférieure à 3 - 4 MPa). Au-delà de ces limites la méthode reste applicable mais les diamètres des colonnes risquent d'être limités à quelques décimètres.

. Le traitement peut se faire en milieu aquifère quelle que soit la perméabilité (sols argileux imperméables ou milieux à très forte perméabilité). Le jet repousse l'eau même en écoulement et réalise à la périphérie une zone étanche par accumulation des particules fines du sol, avec ou sans ciment, (cake extérieur). L'ajout d'accélérateur de prise permet d'éliminer toute action de l'eau souterraine immédiatement à la fin du traitement (Fig. 9)

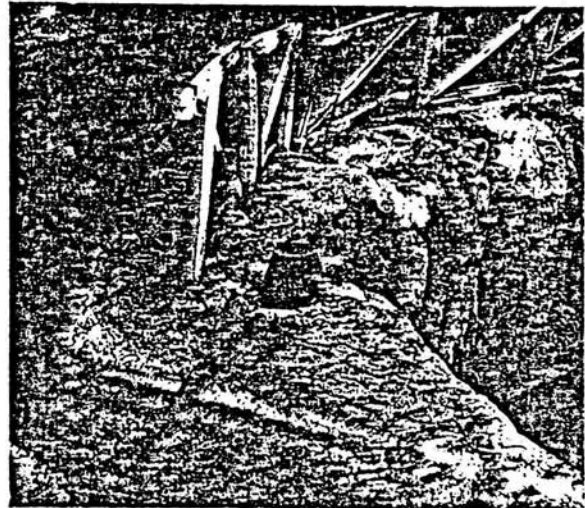


FIG. 9 - PAROI D'UN Puits PAR COLONNES CONSOLIDÉES DANS DES ALLUVIONS GROSSIÈRES EN BORDURE D'UN TORRENT (Frioul, Italie)

. Le JET GROUTING peut poser des problèmes dans les terrains à cavités, avec remplissage de ces dernières par du coulis dont la charge statique peut être égale, voire supérieure, à la hauteur totale du forage. Dans ce cas, par effet de vases communicants des pressions peuvent s'exercer à distance, en particulier au droit de parois étanches.

. Dans les sols à squelette solide homogène sans cavité, l'accroissement de la pression interstitielle instantané reste limité, même à faible distance de l'axe du traitement, comme le montre la fig. 10 : quelques mètres de surpressions à un mètre de distance, uniquement pendant le passage du jet. Toute l'énergie potentielle initiale se transforme en énergie cinétique qui est consommée pour pénétrer, malaxer et impré-

gnier le sol à traiter.

Les mesures par transparence sonore entre sondages permettent de contrôler la qualité du traitement (Fig. 11). Dans des terrains granulaires, même peu consolidés, des vitesses soniques dépassant 5000 m/s peuvent être obtenus après traitement. Les mesures de résistance sur carottes confirment ces résultats ($R_c > 10$ MPa). La figure 11 donne un exemple de log sonique pour les formations hétérogènes de l'île de la Cité à Paris.

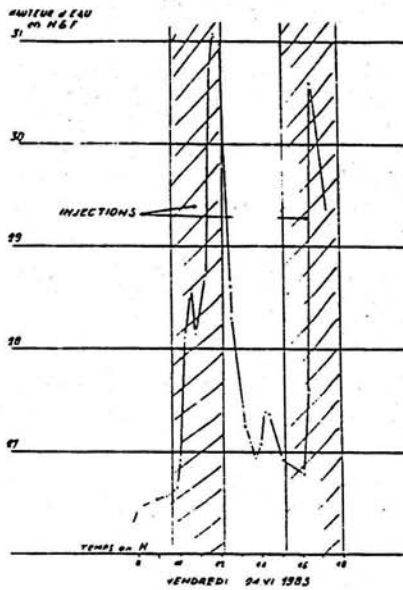


FIG. 10 - MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE A 1 m DE L'AXE D'UNE COLONNE CONSOLIDEE PENDANT L'INJECTION (ESSAI RATP A ST MICHEL)

Les déplacements horizontaux latéraux à l'extérieur des colonnes sont insignifiants, à peine mesurables à l'inclinomètre (maximum mesuré pour l'Îlot Michelet : 18 mm à 50 cm de la colonne expérimentale à 7 m de profondeur, à un niveau moins résistant).

La capacité portante de colonnes consolidées est très élevée du fait du confinement latéral et de la forte résistance au cisaillement en résultant. Cette capacité portante est nettement supérieure à celle d'un pieu foré moulé de diamètre identique. Un chargement statique de 1050 KN à la Défense a donné un tassement de 0,9 mm pour trois colonnes jointives de 40 cm de diamètre et de 9 m de longueur dans les alluvions limoneuses de la Seine.

L'enregistrement de paramètres (avancement, pression, débit, densité du coulis, etc...) en continu au cours de travaux (méthode LUTZ ou similaires...) fait partie intégrante des

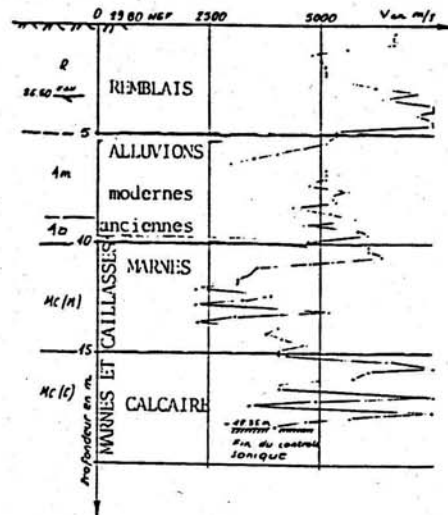


FIG. 11 - VITESSE SONIQUE DANS LES COLONNES CHANTIER R.A.T.P. A SAINT-MICHEL

matériels modernes, les conditions de traitement sont par ailleurs affinées par l'interprétation in situ des enregistrements des paramètres classiques obtenus lors du forage des trous.

Chaque projet important nécessite la réalisation préalable d'un chantier expérimental avec en particulier mise à jour des colonnes en vue d'optimiser les paramètres de traitement (hauteurs de passes, diamètre des gicleurs, pression et durée du jet etc...) comme le montre la figure 12.



FIG. 12 - MISE A JOUR D'UNE COLONNE CONSOLIDEE DANS LES ALLUVIONS LIMONEUSES DE LA DEFENSE A PARIS (COTES 24 A 30 m NGF)

Des matériels modernes très variés sont actuellement disponibles en particulier pour permettre le travail dans des espaces réduits (2 à 3 m) ou l'exécution à haute cadence de traitements spécifiques, par exemple pour la réalisation de colonnes horizontales de présoutènement en tunnels (Fig. 13)

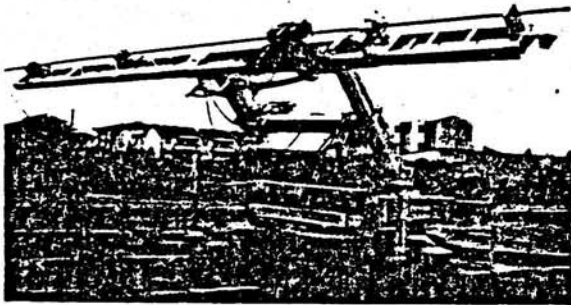


FIG. 13 - MACHINE SPECIALE POUR EXECUTION DE PRESOUTÈNEMENT HORIZONTAL PAR JET GROUTING EN TUNNEL (Mat. PACCHIOSI)

5. CONCLUSION

La consolidation des terrains par la technique de JET GROUTING "monojet" présente de nombreux avantages en comparaison avec les méthodes similaires, par exemple les méthodes avec malaxage mécanique (nécessitant une énergie mécanique importante) et les méthodes à multiples jets (eau-air-coulis) de technologie complexe et pouvant se traduire par des perturbations importantes dans le sol du fait de la substitution par transfert solides.

La méthode monojet fait appel à des matériels simples, légers, peu encombrants, et de faible nuisance en particulier si l'on sépare la centrale à coulis de la machine d'injection. Elle est d'une grande souplesse d'utilisation et elle apporte en particulier des solutions élégantes pour les reprises en sous-oeuvre ou le renforcement d'ouvrages existants avec, par exemple, foration seule à travers les structures existantes (\varnothing 60 mm) et consolidation à des niveaux quelconques, ceci dans toutes les directions. Des possibilités remarquables sont de plus offertes pour toute consolidation ou présoutènement horizontal, avec ou sans inclusion, en particulier pour la construction des tunnels en terrains instables.

Le recours à cette technique requiert cependant une bonne connaissance de ses limites et en particulier des problèmes liés à certaines circonstances, par exemple traitement de terrains avec cavités ou traitement de zones hétérogènes avec structures enterrées. Les échecs ou contre-performances s'expliquent par le manque d'expérience lors de la définition des phases d'exécution dans le détail (drainage, trous de décompression, séquence de travail, contrôle, artifices éliminant tous soulèvements.. Les méthodes de dimensionnement demandent de plus à être affinées avec surtout calage des modèles utilisés sur de nombreux cas vécus.

REFERENCES

- ABOSHI H. (1984) : Soil improvement techniques in Japan, Seminar Soil Improvement 10-11 Janv. 1984, Singapore, Japanese Soc. SMFE, Nat. Univ. Singapore, A.I.T. (pp 5-16)
- ASCHIERI F., JAMIOLKOWSKI M., TORNAGHI R. (1983) : Case history of a cutt-off wall executed by jet grouting - Proc. 8th European CSMFE Helsinki, Vol. 1 (pp. 121 - 126)
- BAKER W.H., MAC PHERSON H.H. and CORDING E.J. (1981) : Compaction Grouting to limit ground movements. Instrumented case history evaluation of the Bolton Hill Tunnels - Report n° PB 82-126525. Ed. Nat. Techn. Information Service US Depart. of Commerce, Springfield, VA 22161 (79 p)
- BAUMANN V., SAMOL H. (1980) : Soilcrete - Verfahren - Hochdruck-injektionen zur Lastübertragung und Abdichtung in fein- und grobkörnigen Bodenschichten - DBT Mainz (437-463)
- COOMBER D.B., WRIGHT P.W. (1984) : Jet grouting at Felix stowe Docks, Ground Engineering July 1984 (pp. 19 -24)
- DEBAUGE J.L. (1984) : Le Terrajet - Technique du Métro Lyonnais - Ed. Semaly Lyon (pp 49-52)
- KAWASAKI T., SAITOH S., SUZUKI Y., BABASAKI R. (1984) : Deep mixing method using cement slurry as hardening agent. Sem. Soil Improvement 10-11 Janv. 1984, Singapore, Jap. Soc. SMFE, Univ. Singapore AIT (pp. 17 - 38)
- LOUIS C., LUNARDI P. (1984) : Consolidation des sols par la technique de JET GROUTING (projection de coulis de ciment à très haute pression en forage). Etat des connaissances et expériences - Conf. ITBTP Paris 15 mai 1984 (à paraître Annales ITBTP)
- LUNARDI P. (1982) : Nouvelle méthode de construction des écrans d'étanchéité dans les barrages en remblai. 14 CIGB Rio de Janeiro - Disc. Q 55
- NICHOLSON A.J. (1963) : Discussion Symp. on "Grouting and drilling muds" ICE London May 1963 (pp. 108 - 109)
- PERELLI CIPPO A., TORNAGHI R. (1984) : Soil Improvement by jet grouting. Rapid Transportation Janv. 1984 (pp. 8 - 13)
- RODIO (undated) : RODINJET - Internal Report Rodio
- SANWA KIZAI Co (undated) : JST method - Technical Data - Internal Report Tokyo
- WORLD CONSTRUCTION (1965) : JET GROUTING - New Technique Holds Back underground water World Construction Febr. 1965 (pp. 61-62)