

le soutènement liquide une recherche appliquée pour le bouclier à pression de boue du Métro de Lyon

(Conférence à l'E.N.T.P.E le 14 janvier 1984)

C. BOUYAT

Dr. Ingénieur — S.E.M.A.LY.*

M. MOHKAM

Dr. Ingénieur — Chercheur E.N.T.P.E.**

J.P. MORCRETTE

Directeur du chantier D.T.P.***

Résumé

Les auteurs présentent les études menées dans les laboratoires de l'E.N.T.P.E. sur le soutènement liquide apporté par une boue fluide. Ils présentent les matériels qu'ils ont conçus pour l'étude de la formation du cake dans les terrains sablo-graveleux de forte perméabilité. Leur analyse scientifique débouche sur l'interprétation des gradients de pression dans l'épaisseur du cake et leurs résultats sont d'ordre pratique.

La discussion qui a suivi la conférence apporte de nombreuses précisions sur le tunnelier mis en œuvre à Lyon.

Abstract

The authors present the research on liquid support of a fluid slurry, carried out at the laboratory of the National School for Public Works. The paper includes a description of the apparatus that they have designed for the study of the mud cake formation in sandy-gravel grounds with high permeability.

It results from the research that the best explanatory method of the liquid support relies in the interpretation of the pressure gradient throughout the mud cake. Results are directly applicable to the actual worksite.

The discussion following the lecture gives insights on the practical operation of the slurry shield tunneling machine in Lyon.

1. INTRODUCTION

Pour la construction des ouvrages de la ligne D du Métro de Lyon, la S.E.M.A.LY. a retenu la technique du bouclier à pression de boue pour réaliser le tronçon central qui comprend les traversées sous fluviales du

Rhône et de la Saône, et le passage en sous œuvre de la station Bellecour ligne A.

* S.E.M.A.LY.: Société d'Economie Mixte du Métropolitain de l'Agglomération Lyonnaise (69625 Villeurbanne).

** E.N.T.P.E.: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (69120 Vaulx-en-Velin).

*** Pilote Dragages & Travaux Publics (92806 Puteaux).

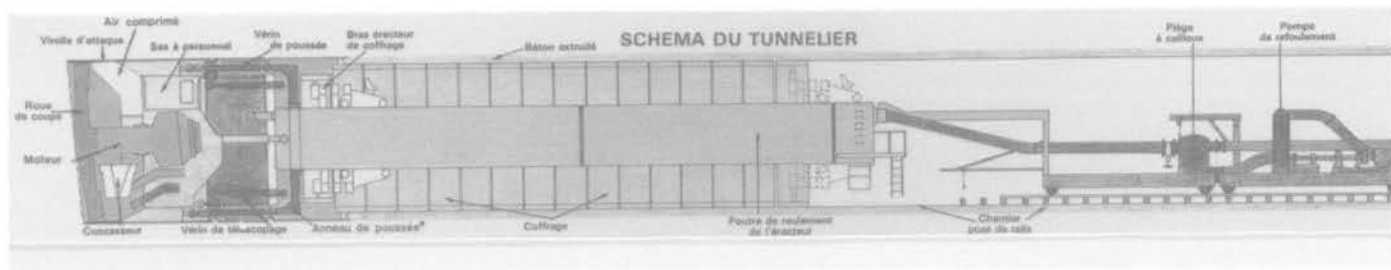


Fig. 2. — Coupe longitudinale du

De nombreuses publications ont déjà eu lieu à propos de ces travaux (en particulier: Annales I.T.B.T.P. — décembre 1983, Chantiers de France — octobre et novembre 1984) et nous n'y reviendrons que pour rappeler qu'il s'agit d'un ouvrage à deux tubes de 6,50 m de diamètre et de deux fois 1 250 m de longueur (fig. 1), excavé au moyen d'un bouclier à pression de boue (fig. 2) mis en œuvre par le Groupement d'Entreprises DRAGAGES TRAVAUX PUBLICS — CAMPENON BERNARD - HOCHTIEF - COLAS. Le revêtement du tunnel est constitué d'un anneau de béton renforcé de fibres métalliques coulé, sous pression à l'arrière du bouclier.

C'est la première fois que ce type de bouclier est mis en œuvre en France et l'on peut dire que c'est aussi la première fois au monde qu'il l'est dans des terrains aquifères aussi grossiers sur l'ensemble du tracé (fig. 3). Il était opportun de profiter de ce chantier pour mener de nombreuses investigations pour acquérir le savoir-faire et être capable d'améliorer les conditions techniques et économiques.

C'est ainsi qu'un programme en quatre thèmes a été lancé par le Groupement d'Entreprises, le C.E.T.U., le C.E.T.E., l'E.N.T.P.E. et la S.E.M.A.L.Y., avec les aides financières du Ministère de la Recherche et de la

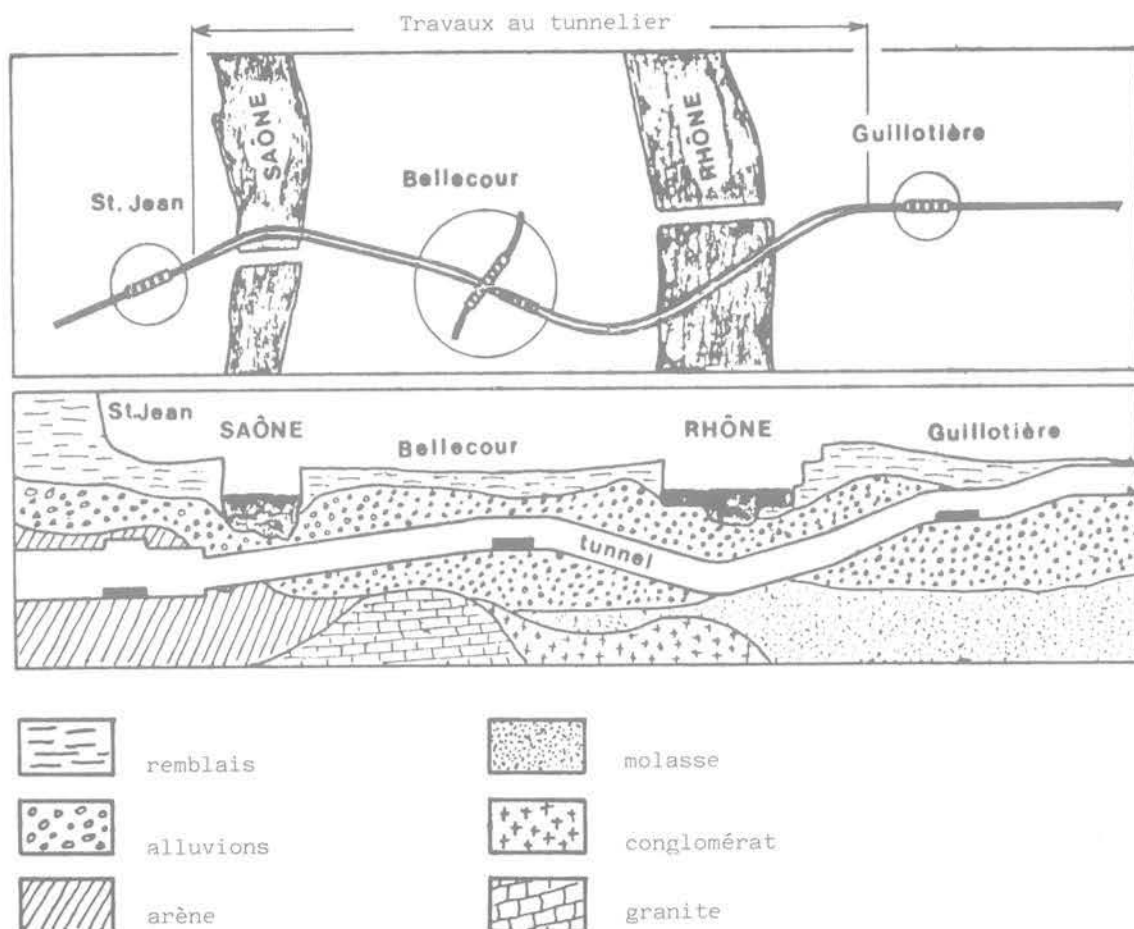
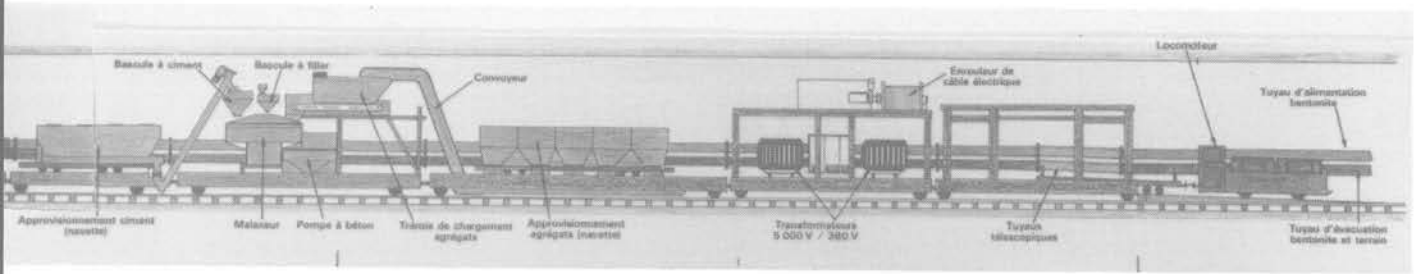


Fig. 1. — Plan et profil du tronçon central ligne D.



tunnelier et de ses accessoires.

Technologie et du Ministère de l'Urbanisme du Logement et des Transports.

Thème 1: Le soutènement liquide

Il s'agit de bien comprendre le processus de formation du cake pour être capable de choisir les propriétés de la boue en fonction des terrains à traverser, avec le plus de sécurité et le moins de dépenses.

Un appareil de simulation en laboratoire a été spécialement conçu pour cette étude.

Thème 2: Le marinage hydraulique

Toutes les formules de dimensionnement des installations ayant été pratiquement établies pour des suspensions monogranulaires fines transportées dans l'eau, il y a tout lieu de penser que le marinage en suspension dans la boue, fluide binghamien, offre des possibilités d'économies sur les dépenses d'installations et de fonctionnement.

Thème 3: Les revêtements de tunnels en béton renforcé de fibres

Les études qui ont été menées jusqu'à présent sur les bétons de fibres ne couvrent pas le béton extrêmement fluidifié, que l'on met ici en œuvre par pompage sous pression en queue de bouclier.

Son utilisation pour les revêtements définitifs de tunnels est une perspective des plus intéressantes qui passe par la connaissance de son comportement mécanique à court et long termes, mais aussi par la maîtrise de ses qualités sur la chantier.

Thème 4: Mesure in situ et calculs

Le thème comprend deux volets: les répercussions sur l'environnement et le dimensionnement du revêtement.

En pressurant le front de taille par la boue et en rendant les progressions du front de taille et du bétonnage indépendantes l'une de l'autre, les deux facteurs de tassements prépondérants ont été en principe supprimés. En fait, rien n'est sûr car si le soutènement liquide est «à contrainte imposée», il ne répond pas forcément à l'anisotropie et à l'hétérogénéité des poussées du sol, et sur quelle base choisir la contrainte à imposer.

Par ailleurs, les diverses méthodes de calcul des soutènements et revêtements de tunnels reposent sur des hypothèses notablement différentes où se mêlent l'état du sol, les interactions et performances relatives sol/structure, le procédé de creusement, etc. à deux ou trois dimensions. Les observations et mesures in situ qui seront faites auront notamment pour objectif de déterminer le mode de calcul le mieux adapté à ces structures en terrain alluvionnaire.

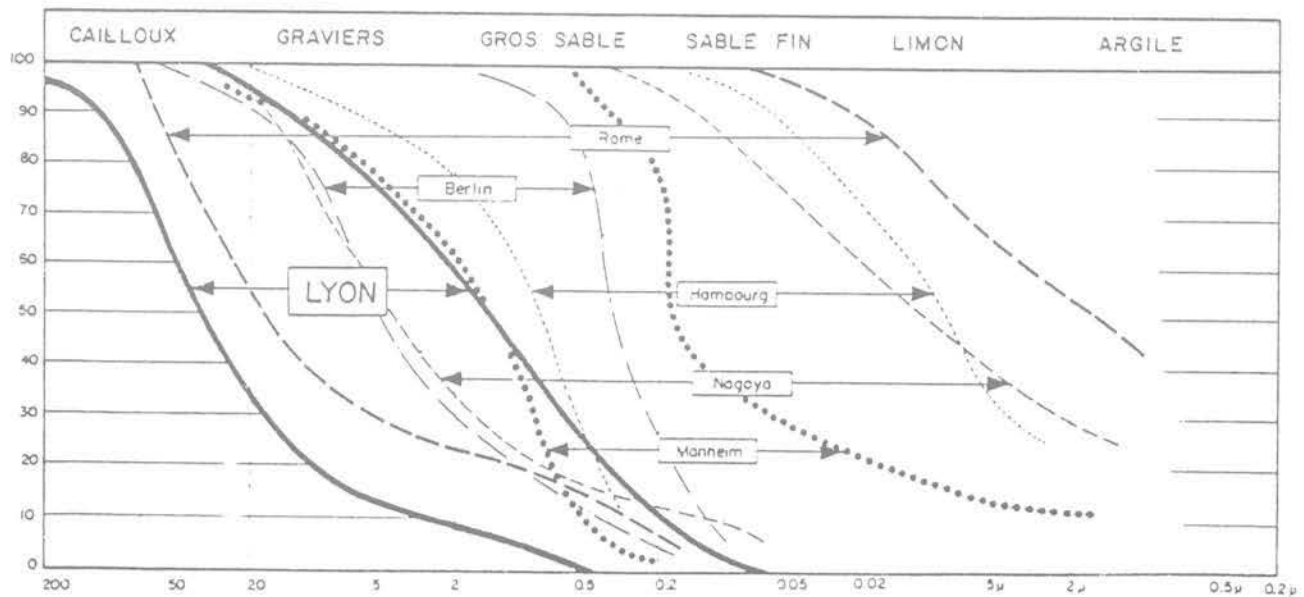


Fig. 3. — Fuseaux granulaires des terrains concernés à Lyon et sur d'autres chantiers.

L'objet du présent exposé porte essentiellement sur le premier thème c'est-à-dire sur le soutènement liquide du front de taille dans les boucliers à pression de boue. Les recherches ont été effectuées dans les laboratoires de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

2. BOUCLIER ET PAROI MOULÉE

Pour être simple et concret, on peut dire qu'un bouclier à pression de boue n'est autre — ou presque — qu'une tranche de paroi moulée que l'on fait progresser horizontalement (fig. 4).

Un des parements de la paroi peut être identifié au front de taille, l'autre parement étant constitué par la cloison étanche, ce qui délimite la chambre d'abattage. La boue qui s'y trouve est maintenue sous pression pour assurer la stabilité du front de taille et empêcher les tassements en surface.

Nous ne parlerons pas des autres modes de stabilisation du front en avant de la cloison étanche, pression d'air, pression d'eau et pression de terre.

L'assimilation du fonctionnement d'un bouclier à pression de boue à celui de la stabilisation d'une paroi moulée, est une approximation.

En effet lorsque l'on fore une paroi moulée, c'est essentiellement le fond de la tranchée qui est sollicité, là où la gravité agit favorablement (le fond ne peut pas tomber): quand une perte de boue a lieu au passage de la benne, l'ouverture à colmater n'excède pas l'attaque de la benne; quand le cake est formé, il n'est pas remis en cause à la passe suivante et l'on peut éventuellement, dans une stratification subhorizontale, changer de boue en fonction de la profondeur. La parenté entre le bouclier et les parois moulées n'est donc qu'une première approche, mais il ne faut pas dédaigner l'expérience ainsi acquise.

Pour la stabilité d'ensemble d'un talus nous sommes convaincus que le parement joue un rôle privilégié, surtout dans les sols graveleux où chaque caillou est la clé de voûte de ses voisins.

Lorsqu'on empêche la dégradation du parement, la stabilité naturelle du massif s'en trouve préservée; quand même on le renforce, elle s'en trouve augmentée. En quelque sorte, le parement lui-même participe, avec la boue, à «l'offre de soutènement» pour répondre à la «demande de soutènement» du massif, en parlant le langage du génie souterrain.

Notre recherche s'est donc d'abord tournée vers la stabilité individuelle des grains du parement, remettant à un deuxième temps les réflexions sur le choix des pressions à adopter pour la boue et sur la stabilité globale du massif soutenu.

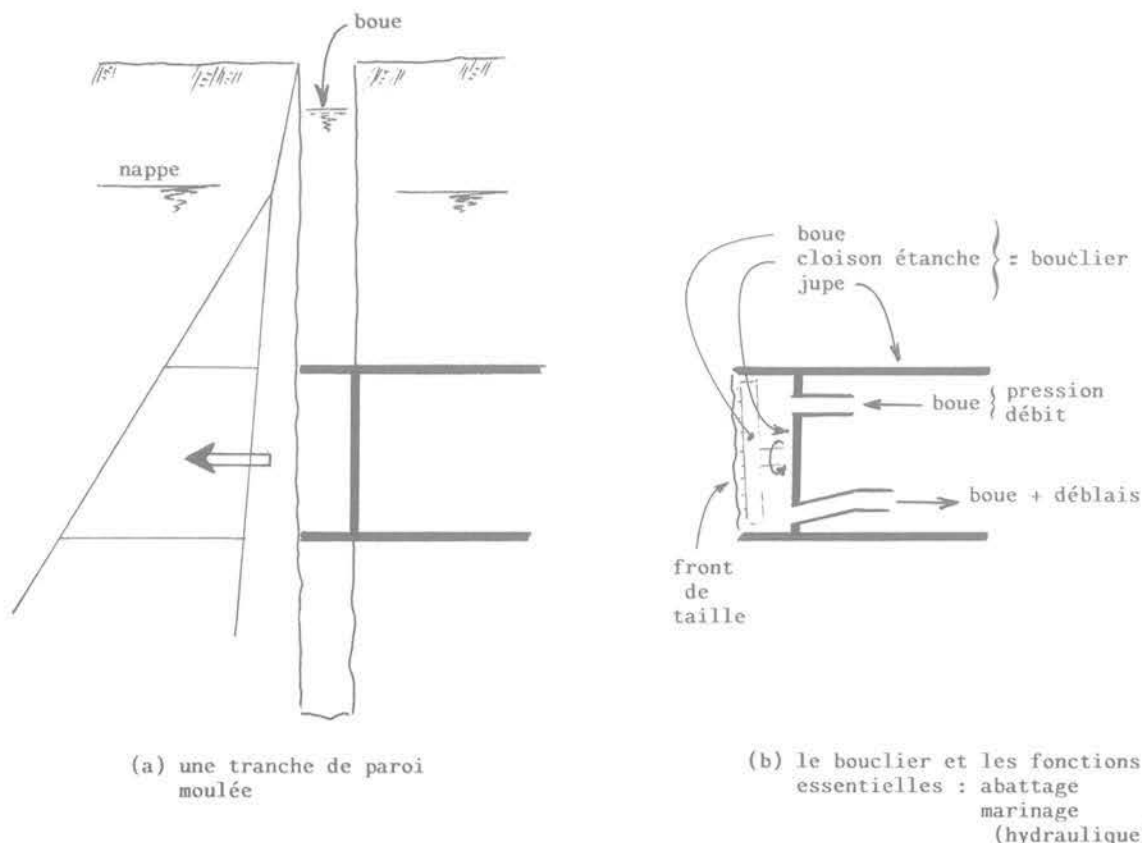


Fig. 4. — Schéma d'un bouclier à pression de boue.

Il est évident qu'un caillou aura d'autant plus tendance à se détacher du parement qu'il sera poussé vers le vide, qu'il sera lourd et moins accroché à ses voisins. L'en empêcher c'est jouer sur ces trois facteurs :

— accroché à ses voisins: c'est une cohésion, qu'elle soit vraie, naturelle ou rapportée par un cake, ou qu'elle soit précaire, par cimentation ou par enchevêtrement;

— moins lourd: c'est la poussée d'Archimède, d'autant plus forte que la densité de la boue est élevée, (et ici il ne faut pas confondre boue «lourde» et boue «épaisse» comme trop de gens le font à propos de boucliers; à la limite le mercure serait une boue lourde, offrant une poussée d'Archimède élevée, et pourtant fluide);

— poussé contre le massif: c'est la poussée hydraulique de la boue en surpression.

Les résultats des recherches qui sont ici rapportés ne concernent que ce dernier point.

Nous ne parlerons même vraiment que de poussée hydrostatique (ou quasi-statique), nous bornant seulement à évoquer, quand nous en aurons besoin, la poussée hydrodynamique de la boue qui s'écoule dans le terrain au travers du parement, poussée également stabilisatrice et qui est le principe des boucliers à pression d'eau.

Comment se présente la poussée hydrostatique de la boue sur les grains du parement?

Imaginons un cake formé sur le parement graveleux d'une paroi. Imaginons que les propriétés respectives de la boue et du terrain ont conduit, dans un cas à un cake mince et dans un autre cas, à un cake épais (fig. 5).

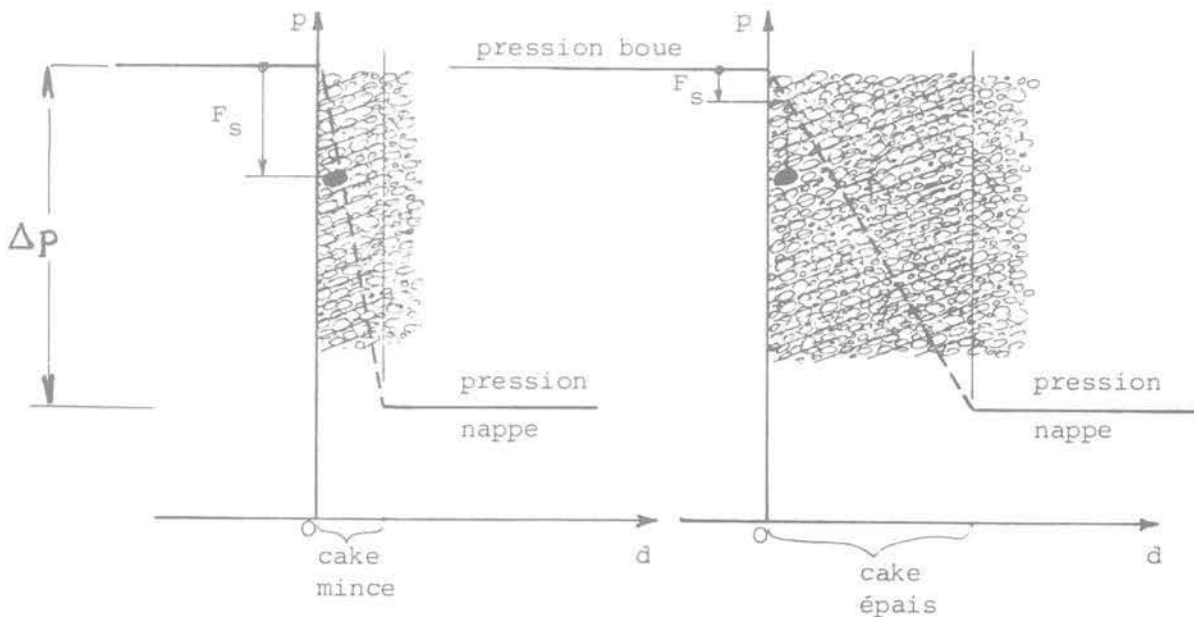


Fig. 5. — Efficacité de soutènement d'un cake mince comparée à celle d'un cake épais (stabilité individuelle des grains).

Pour une même pression différentielle Δp entre l'amont et l'aval du cake, dans les deux cas de figures, il est évident que la force stabilisatrice F_s , qui s'applique sur un gravier individualisé du parement est plus élevée dans le cas des cakes minces que dans le cas des cakes épais. Il est donc préférable de rechercher la formation d'un cake le plus mince possible. C'est du moins ce que nous recommanderions pour les parois moulées où, le cake étant formé, il n'est plus remis en cause, ou pour un bouclier à attaque ponctuelle, la surface découverte n'étant alors jamais qu'une très faible portion du front de taille.

Mais pour un bouclier à attaque pleine face, si le cake est vraiment mince, il est complètement éliminé à chaque passe de l'outil ce qui peut représenter une réduction importante du potentiel de stabilisation (à lier à la vitesse de rotation du plateau porte-outils et à la rapidité de blocage du cake).

Pour la sécurité de tels chantiers, il nous semble donc préférable de rechercher un cake dont l'épaisseur serait en relation avec la distribution granulaire totale du sol, pour qu'il existe toujours une imprégnation résiduelle après chaque passage des outils. Une épaisseur de cinq à dix fois le d_{60} de la distribution granulométrique nous paraît convenable, ce qui serait pour les travaux du métro de Lyon, de l'ordre de 25 cm.

3. PRINCIPE DE LA RECHERCHE ET MODE OPÉRATOIRE

On s'est d'abord attaché à définir la notion de rapidité de blocage du cake pour juger de l'efficacité d'une boue à soutenir le front de taille en cours d'abattage.

Nous avons engagé notre expérimentation en mesurant les débits d'eau expulsée lors de la pénétration de la boue dans des échantillons de terrain saturés.

Nous avons utilisé tout d'abord des petits appareils de type perméamètre vertical, constitués de cylindres transparents de 20 cm de diamètre et 70 cm de hauteur, fonctionnant à charge constante (fig. 6).

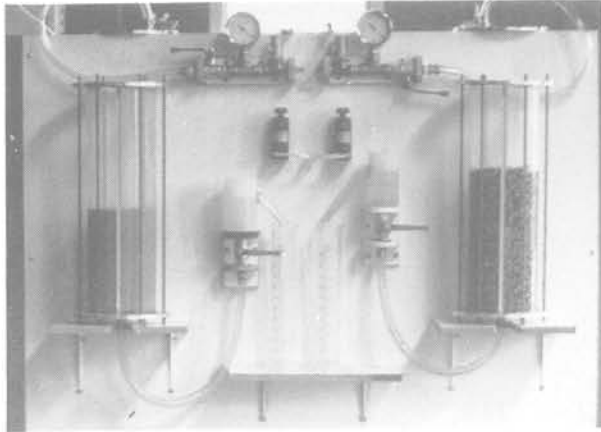


Fig. 6. — Le « petit » appareillage.

En fait, ces « petits » appareils présentent des inconvénients pour l'étude de soutènement liquide apporté par la boue à cause des dimensions des sections eu égard à la granularité des sols à tester et aussi du fait que ces essais sont représentatifs du fond des parois moulées et non des parements verticaux (gravité) et ne remettent pas en cause le cake.

Aussi nous avons construit, dans les locaux de l'Ecole des T.P.E., un véritable dispositif de simulation du soutènement liquide dans les boucliers à front pressurisé (fig. 7).



Fig. 7. — Le « gros » appareillage en cours de chargement du terrain à tester.

Cet appareil se compose essentiellement de quatre éléments (fig. 8) :

— 1 caisson parallélépipédique de dimensions intérieures 80 × 90 × 230 cm, destiné à recevoir le terrain à tester ;

— 1 cuve à coupler au caisson, destinée à recevoir la boue étudiée (1,5 m³) ;

— 2 réservoirs de 600 l susceptibles d'être mis séparément sous pression, l'un en amont faisant réserve de boue, l'autre en aval récupérant l'eau expulsée par la progression du cake dans le terrain.

Ainsi, le caisson peut être rempli en reproduisant au mieux les conditions du terrain en place : distribution granulaire, compacité, perméabilité, stratification éventuelle...

La cuve à boue simulant la chambre d'abattage du tunnelier est équipée d'un outil d'attaque ponctuelle (fig. 9) permettant, en cours d'essai, de procéder à la remise en cause du cake par l'élimination progressive du terrain testé (simulation de l'abattage). Le « front de taille » peut alors être découpé à volonté, verticalement et même en surplomb de façon à solliciter au maximum la pesanteur.

L'ensemble opère sous des pressions amont et aval qui peuvent atteindre 0,4 MPa, régulées par des détendeurs et des soupapes fonctionnant « à fuite ».

Des capteurs de pressions interstitielles ont été installés pour suivre l'évolution des pressions à l'intérieur même du cake.

Des hublots d'observation visuelle et de nombreux appareils de mesures complètent ce dispositif expérimental de simulation.

Mesures préalables

Avant de commencer les essais de simulation proprement dits, différentes mesures sont effectuées pour définir précisément les conditions d'essais :

— Sur la boue :

- établissement du rhéogramme au rhéomètre rotatif coaxial Rheomat piloté par microprocesseur (plongeur type Fann) ;
- temps d'écoulement au cône Marsh (1 dm³) pour s'exprimer aussi en terme de chantier ;
- densité à la balance Baroid ;
- filtrat corrigé sous 0,7 MPa à l'appareil Baroid ;
- photographies occasionnelles au microscope pour l'analyse dimensionnelle des floes de bentonite.

— Sur le terrain :

- distribution granulaire ;
- densité en place par pesée du terrain introduit dans le caisson, d'où la porosité et la compacité ;
- perméabilité en grand par utilisation directe de l'appareil de simulation en perméamètre vertical (circulation d'eau sous charge constante, à volonté vers le haut ou vers le bas) ;
- vérifications visuelles par les hublots du caisson ;
- vérification du bon fonctionnement des prises de pressions interstitielles.

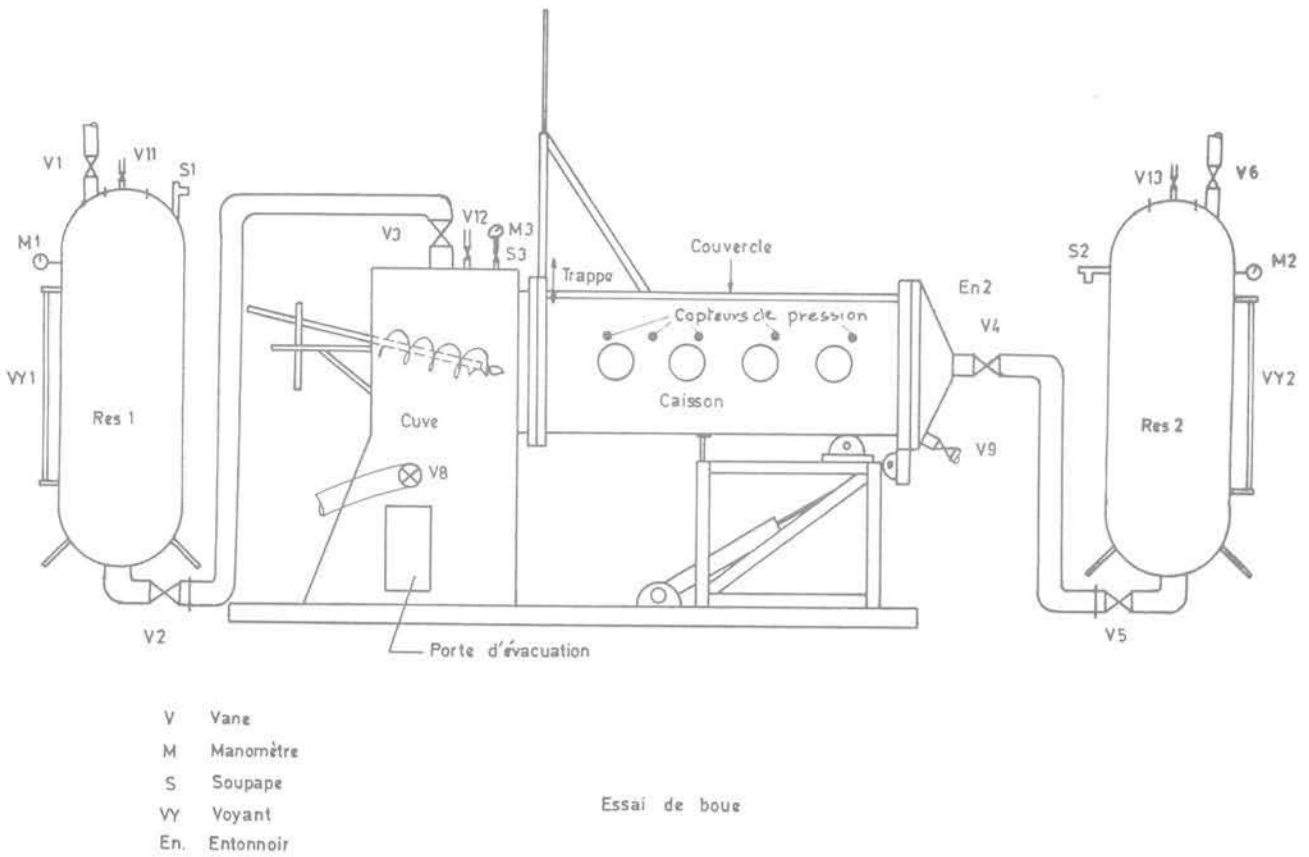


Fig. 8. — Un matériel d'essai adapté.



Fig. 9. — L'outil d'abattage du front de taille dans l'appareil de simulation.

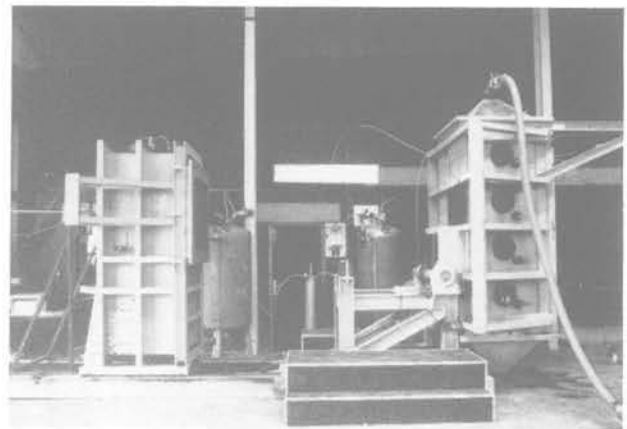


Fig. 10. — Appareillage en position de mesure de la perméabilité du terrain testé.

Après l'essai de perméabilité en position verticale (fig. 10), la face supérieure libre du sol à tester est enduite d'un mortier bentonite-ciment et la cloison coulissante remise en place avant de redescendre le caisson en position horizontale, pour l'accoupler à la cuve de bentonite (fig. 11).

Déroulement de l'essai

Les pressions amont et aval étant réglées aux valeurs choisies, l'abattage du front de taille commence,

l'élimination du cake artificiel de bentonite-ciment constituant un essai en terrain vierge comparable à celui pratiqué dans les petits appareils classiques.

L'abattage progressif du front de taille s'opère en 25 à 30 tranches verticales successives de 4 cm d'épaisseur.

Un dispositif de guidage permet d'assurer la régularité des passes de l'outil ponctuel rotatif d'abattage.

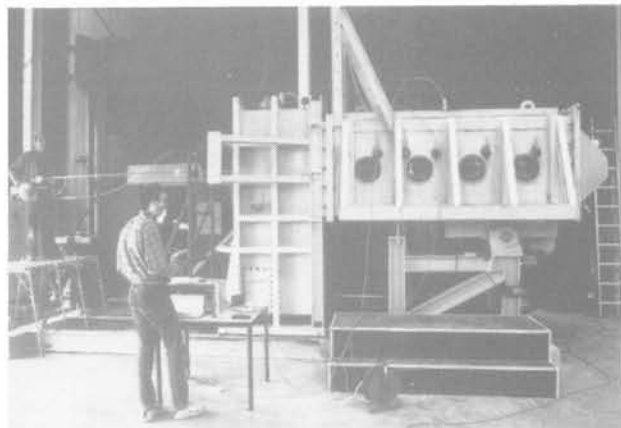


Fig. 11. — Le dispositif expérimental en cours de manipulation.

Pour chaque tranche de terrain, on vérifie la constance des pressions amont et aval (simulant la boue et la nappe phréatique) et on enregistre continuellement, en fonction du temps :

- l'évolution des pressions interstitielles des 4 capteurs répartis le long du caisson ;
- la quantité de boue introduite ;
- la quantité d'eau expulsée ;
- la profondeur de pénétration de la boue par observation visuelle à travers les hublots.

Du fait des positions des capteurs de pressions interstitielles, le front de taille et le cake se trouvent plusieurs fois de suite en situations amont puis aval de chaque capteur, permettant ainsi un nombre élevé de mesures comparables par essai (fig. 11).

Fin de l'essai

Avant de vidanger l'appareil pour faire des prélèvements de terrain (plus ou moins pollué par la boue), de cake, de surcake (voir définition plus loin) et de boue usagée, l'air comprimé est substitué à la boue pour observer le comportement du cake et la stabilité du front au cours de la vidange et pendant plusieurs heures sous air comprimé (12 à 72 heures).

4. Résultats des essais

Les résultats que nous présentons aujourd'hui sont partiels et d'ordre pratique.

Observations visuelles

Dans les terrains sablo-graveleux, on a pu observer au travers des sept hublots du caisson, l'épaisseur du cake et son processus de formation dans les pores du terrain testé.

Dans les conditions de nos essais, nous avons observé des cakes de 10 à 15 cm d'épaisseur, plus souvent de 30 à 50 cm et dans des cas particuliers de 1,20 m et plus.

Comme CAMBEFORT et BELL le mentionnent dans leurs ouvrages sur l'injection des sols, nous avons observé un processus de blocage «à rebours» du cake: l'écoulement de la boue dans le terrain en obstrue les pores de façon d'abord sensiblement homogène jusqu'à créer une perte de charge telle qu'en aval les micelles de bentonite hydratés finissent par se déposer dans les canalicules. La migration de la boue n'en étant pas pour autant stoppée, il en résulte une accumulation de dépôts qui croît en remontant vers l'amont.

Toutefois le blocage n'est que relatif car nous avons observé un débit d'eau résiduel faible mais persistant à l'exutoire de l'appareil, débit que l'on visualise d'ailleurs parfaitement en aval dans la partie supérieure des canalicules (fig. 12). Il est lié au filtrat de la boue.

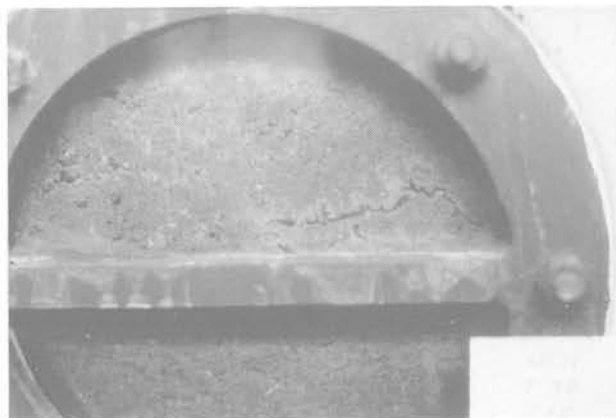


Fig. 12. — Observation visuelle de la formation du cake.

D'autres observations visuelles ont été des plus instructives, en particulier le passage sous air comprimé.

Dans le déroulement du chantier, il est parfois nécessaire d'accéder à la chambre d'abattage du tunnelier pour y changer un outil, éliminer des gros blocs ou simplement pour examiner le front de taille. Pour cela on substitue de l'air comprimé à la boue par vidange sous pression, le cake formé au préalable assurant le maintien de la pression d'air.

Il est donc des plus intéressant d'observer les phénomènes liés à cette substitution et la tenue du front de taille en fonction du temps.

Nous avons mis en évidence à cette occasion la formation de ce que nous avons appelé le «surcake».

Lorsqu'une certaine condition-filtre se trouve obtenue sur la face amont du cake, l'écoulement d'eau qui persiste conduit à la constitution plus ou moins rapide d'une couche de boue plus ou moins consolidée.

Cette couche peut avoir l'apparence d'une membrane dans les premiers millimètres du terrain ou, au contraire, d'une couche dont l'épaisseur croît, avec le temps et située en amont du parement: nous avons appelé surcake cette couche qui peut atteindre quelques centimètres d'épaisseur, parce qu'elle se forme après la constitution du cake.

Il est important à noter, lors de la vidange, que la résistance géomécanique de ce surcake ne lui permet généralement pas de supporter son propre poids lorsqu'il n'est plus déjaugé par la boue. Le surcake se déchire ou s'affaisse alors par lambeaux, au fur et à mesure que le niveau baisse (fig. 13).



Fig. 13. — Le surcake s'affaisse sous son propre poids lorsqu'il n'est plus déjaugé par la boue. (Photographie prise à l'intérieur du caisson après vidange de la boue).

On note alors une progression rapide des pertes d'air comprimé au travers du cake, chassant graduellement la boue imprégnée dans le terrain. La stabilité individuelle des grains du parement n'est plus assurée.

Les critères d'efficacité d'une boue

Pour juger de l'efficacité d'une boue destinée à soutenir le front de taille, nous avons d'abord étudié la rapidité du blocage et le débit d'eau expulsé. Il s'agissait là de mesures indirectes des vrais phénomènes générateurs de la stabilisation: les pertes de charge entre l'amont et l'aval du cake. Mais ne disposant pas, à l'époque, de mesures des pressions interstitielles en bonnes places, c'est ainsi que nous caractérisions l'efficacité des boues. Par exemple sur la figure 14, la boue dont le constituant solide, repéré par la lettre «J», apparaissait plus apte que la boue «C» à soutenir le front de taille pour une même concentration et un même terrain: la boue J offre un blocage plus rapide et expulse une quantité d'eau moindre que la boue C.

Pourtant si l'on s'en remet à la mesure des différences de pressions interstitielles, c'est-à-dire à la source du phénomène de stabilisation, les diagrammes des gradients de pression montrent le contraire (fig. 15): le diagramme de la boue C indique une mobilisation de la surpression Δp supérieure à la boue J dans les 10 premiers centimètres de l'épaisseur du cake. Donc, la boue C a une meilleure aptitude à la stabilisation individuelle des grains du parement, tout en offrant une imprégnation appréciable.

Sans que l'on puisse dire que ce constat soit systématique, le critère de débit d'eau expulsé n'est donc pas valable pour juger de l'efficacité du soutènement liquide d'une boue, mais il est souhaitable de conserver ces mesures, car elles renseignent sur l'évolution de l'essorage de la boue soumise à Δp et permettent d'estimer les consommations de boue sur chantier.

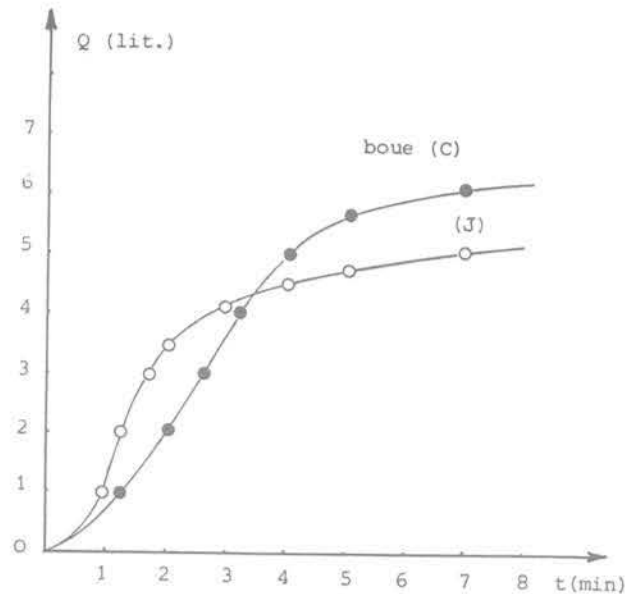


Fig. 14. — Quantité d'eau expulsée pour les boues J et C.

Passons donc à l'analyse des gradients de pression dans différents cakes.

Nous avons expliqué plus haut que la succession des tranches d'abattage de 4 cm permettait d'observer plusieurs fois les mêmes phénomènes au cours d'un seul essai. En fonction de la progression du terrassement, chaque capteur est successivement: en aval du cake, sur sa face aval, dans le cake, sur sa face amont et finalement dans la boue de la chambre d'abattage.

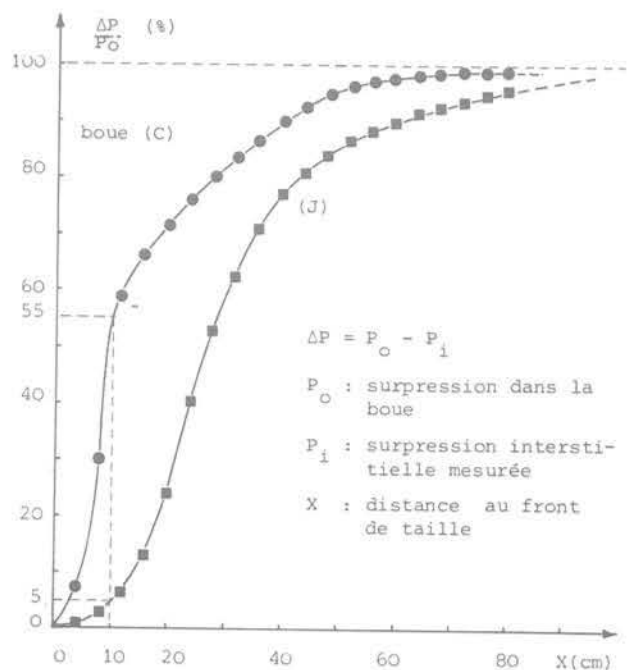


Fig. 15. — Gradients de pression pour les boues J et C (Pic).

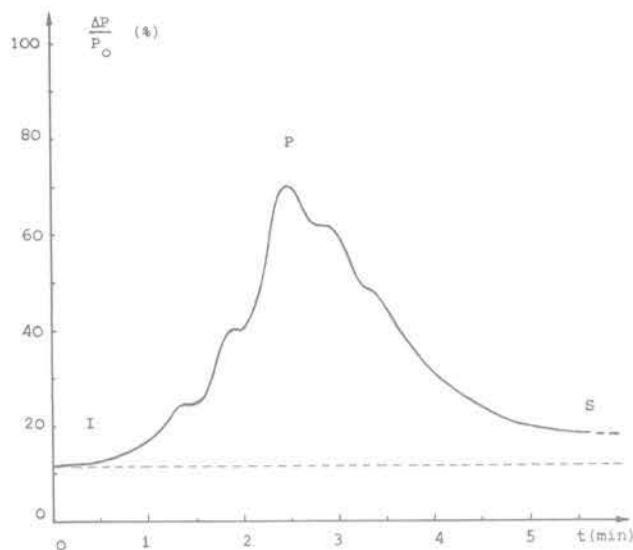


Fig. 16. — Evolution de la pression enregistrée par un capteur au cours de l'abattage d'une tranche verticale proche de lui.

Toutefois, l'analyse des enregistrements bruts des pressions réclame une certaine interprétation. La figure 16 représente l'allure d'un enregistrement au cours de l'abattage d'une tranche complète de 4 cm d'épaisseur.

On note trois pressions :

- la pression initiale I en début du terrassement de la tranche ;
- la pression maximale P ;
- la pression stabilisée S en fin de terrassement de la tranche.

L'allure de ce diagramme est liée au fait que l'abattage du terrain se fait par un cheminement systématique en zig-zag de l'outil, qui s'approche de plus en plus du capteur de pression puis s'en éloigne, le cake se reconstituant petit à petit (fig. 17).

C'est au moment où l'outil attaque le cake au plus près du capteur que l'on enregistre un pic de pression : il représente la durée pendant laquelle la stabilisation (locale) des grains du parement fonctionne sur le principe du bouclier à pression d'eau : c'est la force d'écoulement qui assure la stabilité des grains découpés (hormis l'éventuelle cohésion du massif).

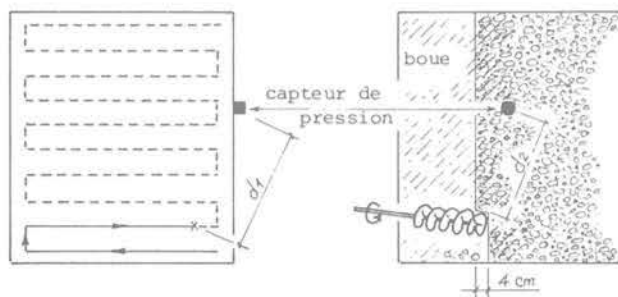


Fig. 17. — Cheminement de l'outil d'abattage ponctuel sur le front de taille.

En fin d'abattage, le niveau moyen de pression S est plus élevé qu'au début puisque la distance du front de taille au capteur a diminué.

A tout instant la pression stabilisatrice qui s'exerce sur le front de taille, au cours de l'abattage est comprise entre ces deux limites P et S.

Les figures qui vont suivre présentent les résultats des pressions maximales (P) et stabilisées (S) pour les essais n°s 11 à 13 du tableau I.

Les figures 18 et 19 présentent les résultats des essais 11 et 12 obtenus pour une même boue dans deux terrains différents.

Le terrain de la figure 18 est légèrement plus sableux que le terrain de la figure 19. Les perméabilités des terrains diffèrent légèrement, mais l'on constate que la répartition des pressions interstitielles, lorsque le cake est remis en cause (valeurs « pic »), est à peu près la même dans les deux cas : durant cette période d'attaque et de reformation du cake, ce sont principalement les propriétés rhéologiques de la boue qui commandent la répartition des pressions et la durée de blocage du cake.

Par contre, la stabilisation des pressions étant atteinte, on observe logiquement que le gradient de pression est d'autant plus prononcé (pour une même boue) que le terrain est sableux. Sur les 10 premiers centimètres de terrain, le cake reprend déjà 90 % de la différence de pression entre la chambre d'abattage et la nappe phréatique, alors qu'il n'en reprend que 75 % pour le terrain ne contenant que 25 % d'éléments inférieurs à 5 mm.

Les figures 19 et 20 présentent les résultats pour deux boues différentes dans un même terrain (essais n° 12 et 13).

Dans un même terrain, si les gradients stabilisés (S) sont voisins en fin de blocage du cake (fig. 19 et 20), les résultats diffèrent nettement en régime transitoire (P).

La différence est nette entre les figures 19 et 20 : pour la première, le seuil de cisaillement de la boue C est relativement élevé, 14 Pa avec une viscosité plastique de 4cp, alors que ces valeurs sont respectivement de 7 Pa et 6cp pour la boue J également dosée à 60 kg de matières sèches par m³ d'eau (fig. 20).

Comme on le constate, la boue J n'apporte pratiquement aucune perte de charge sur les 10 premiers centimètres du terrain à soutenir, ce qui n'apporte pas de stabilisation individuelle des grains, mais qui plus est, introduit des pressions interstitielles réduisant les contraintes intergranulaires en arrière du parement (facteur de déstabilisation du massif).

Quoi qu'il en soit nous ne saurions conclure aujourd'hui que la boue C60 doit être préférée à la boue J60, car si les stabilités globale et individuelle des grains sont encore suffisantes durant la courte durée de régime transitoire, l'abattage du front de taille s'en trouve facilité (économie d'énergie). Il existe donc un compromis qui reste à déterminer.

Tableau I. — Récapitulation des essais effectués avec le grand appareillage.

| N° Essai | Terrain | | | | Boue | | | | | Mesures | |
|----------|-------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------|------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | Désignation | 0 - 5 mm (%) | Perméabilité k (m/s) | Porosité calculée (%) | Code matière sèche | Concentration nominale (g/l) | Cône MARSH | Seuil de cisaillement (Pa) | Viscosité plastique CP | Épaisseur cake visualisée (cm) | Eau expulsée par tranche (lit.) |
| 1 | T45 | 45 | 10^{-3} | 28 | C | 60 | 40 | 17 | 4,8 | 35 - 40 | 8 |
| 2 | T45 | 45 | 5×10^{-4} | 25 | C | 45 | 35 | 9 | 4,7 | 45 - 50 | 7 |
| 3 | T40 | 40 | $1,8 \times 10^{-3}$ | 24 | C | 75 | 57 | 24 | 5 | 10 - 15 | 4 |
| 4 | T40 | 40 | $4,1 \times 10^{-4}$ | 23 | C | 60 | 40 | 17 | 4,7 | 30 - 60 | 6 |
| 5 | T40 | 40 | $4,1 \times 10^{-4}$ | 23 | C | 45 | 35 | 9 | 4,7 | 60 - 120 | 6 |
| 6 | R | 24 | $3,7 \times 10^{-3}$ | 21 | C | 60 | 37 | 14 | 4,8 | 70 - 180 | 7,5 |
| 7 | R | 24 | $3,2 \times 10^{-3}$ | 21 | C | 75 | 55 | 22 | 5 | 50 - 80 | 6 |
| 8 | R | 24 | $1,5 \times 10^{-3}$ | 21 | C | 60 | 39 | 14 | 4,8 | 70 - 120 | 7 |
| 9 | T35 | 35 | $5,4 \times 10^{-4}$ | 23 | C | 60 | 39 | 14 | 4,7 | 40 - 60 | 6 |
| 10 | T100 | 100 | $7,1 \times 10^{-4}$ | 35 | C | 45 | 36 | 8 | 4,7 | 20 | 9,5 |
| 11 | T30 | 30 | $4,6 \times 10^{-4}$ | 21 | C | 60 | 39 | 14 | 4,8 | 45 - 60 | 5,5 |
| 12 | T25 | 25 | 2×10^{-3} | 21 | C | 60 | 39 | 14 | 4,8 | 50 - 65 | 6,5 |
| 13 | T25 | 25 | 3×10^{-3} | 21 | J | 60 | 34 | 7 | 6 | 65 - 80 | 5 |

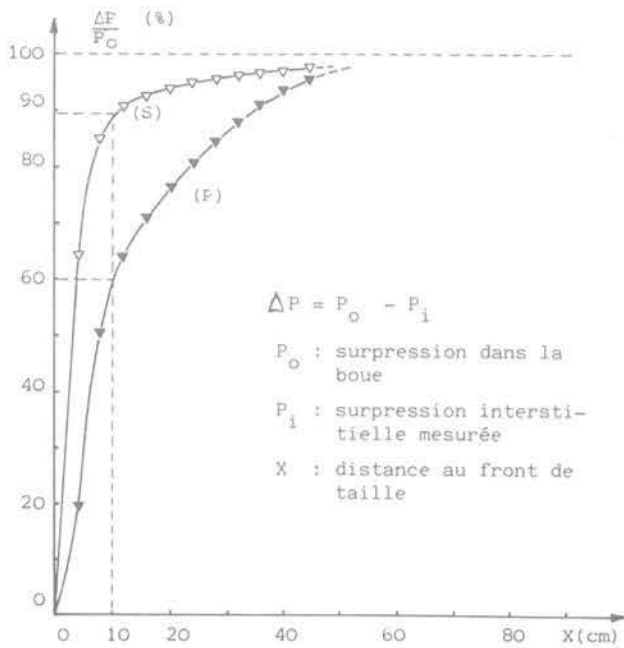


Fig. 18. — Gradients de pressions P_{ic} (P) et Stabilisé (S) pour l'essai n° 11; boue C60, terrain T30.

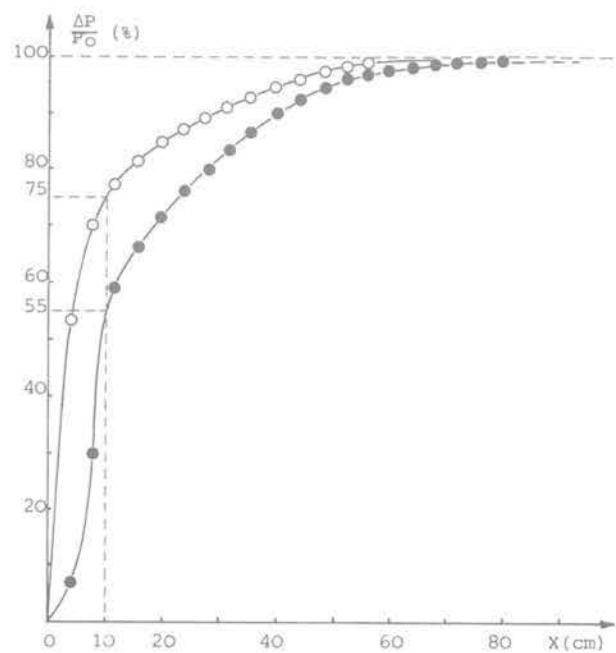


Fig. 19. — Gradients de pressions P_{ic} (P) et Stabilisé (S) pour l'essai n° 12; boue C60, terrain T25.

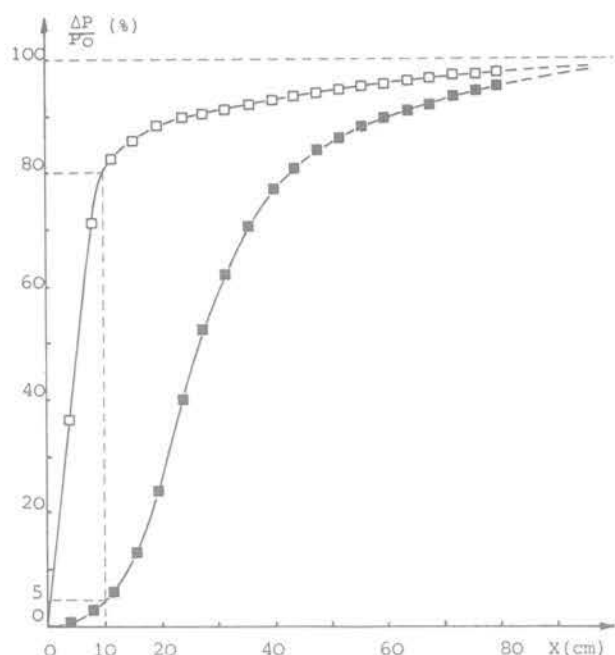


Fig. 20. — Gradients de pressions P_{ic} (P) et Stabilisé (S) pour l'essai n° 13; boue J60, terrain T25.

CONCLUSION

Nous ne sommes pas encore en mesure de conclure cette recherche, mais nous sommes persuadés qu'il faut poursuivre l'analyse des gradients de pression dans l'épaisseur du cake; le travail qui reste à faire vise à déterminer:

- quelles propriétés de la boue sont en jeu et comment obtenir ces propriétés;
- quelles expressions donner à la stabilité globale du massif et à celle des grains individuels du parement pour extrapoler à d'autres chantiers, en particulier dans le cas des terrains non saturés soumis à des contraintes intergranulaires.

DISCUSSION

Q — En adoptant l'outil que vous nous avez montré pour simuler les terrassements, n'avez vous pas craint de vous trouver dans des conditions très différentes de la réalité?

R — On n'a pas cherché à se mettre en parfaite similitude ou à une certaine échelle avec la réalité, mais surtout à faire que les effets de masse ne soient pas entravés par des effets d'arc-boutement. Et on l'a confirmé par l'expérience.

Quant au diamètre de la tarière il nous fallait faire un outil facile à manipuler; il fallait que l'outil permette de bien dégager l'ensemble du front de taille, notamment au voisinage des hublots et des capteurs de pression.

Quant à la similitude de l'abattage, c'est plutôt la similitude de la reconstitution du cake qui compte, c'est-à-dire notamment le temps qui s'écoule entre deux passages de l'outil et on peut en effet discuter ce point. Notre similitude représente ce qu'on peut appeler les boucliers à « attaque ponctuelle » ou à « attaques ponctuelles multiples ».

On peut distinguer trois types d'attaques:

- l'attaque ponctuelle: l'outil ne fait qu'un trou dans le cake, tout le reste du front reste soutenu;
- l'attaque ponctuelle multiple: le plateau porte-outils tourne et fait simultanément plusieurs trous dans le cake, mais ces trous demeurent isolés, le cake ayant le temps de se reconstituer tout autour avant le passage de l'outil suivant;
- l'attaque pleine face: c'est le cas où le plateau porte-outils est relativement fermé et où les matériaux détachés du front s'accumulent devant les outils pour former un bourrelet qui arrache en permanence tout le cake sur une surface importante du front de taille.

Pour le métro de Lyon, le plateau porte-outils tourne à une vitesse qui peut être comprise entre 0 et 2 tours/mn, pour une avance moyenne de l'ordre de 2 cm par tour.

Q — Les essais que vous avez présenté ont été fait avec une pression différentielle de 30 kPa. En avez-vous fait avec des pressions différentielles moindre?

R — Oui mais les capteurs de pressions interstitielles n'étaient pas encore installés sur l'appareillage. On a observé une stabilité apparente en descendant jusqu'à 5 kPa de surpression. Il serait opportun de refaire ces essais avec les mesures des gradients de pressions.

Q — Avez-vous pu vous affranchir des chemine-ments préférentiels de boue dans votre appareillage?

R — Oui et nous prenons soin d'apporter un peu de sable supplémentaire au contact des parois de l'appareil pour compenser le demi caillou d'enchevêtrement qui manque.

On vérifie d'ailleurs à chaque fin d'essai que la pénétration de boue observée au contact des hublots correspond effectivement à celle qui se produit dans le corps de l'échantillon.

Q — Comment simulez-vous les contraintes intergranulaires dans le massif?

R — Les essais sont faits actuellement avec un front de taille de 90 cm de hauteur mais nous cherchons à réaliser, dès cette année, un dispositif de restitution des contraintes intergranulaires pour aborder l'étude de la stabilité globale du massif et surtout celle des terrains hors d'eau.

Q — Avez-vous étudié ce qui se passe quand on arrache un gros caillou du front de taille sous air comprimé?

R — Nous avons un tel essai dans notre programme mais il y a déjà eu tellement de blocs à éliminer sur le

chantier, où tout s'est toujours bien passé, qu'on l'a supprimé. Sur le site, si le caillou ne tombe pas sous l'action du plateau porte-outils, on vidange la boue et on le fait tomber sous pression d'air comprimé; s'il n'y a pas de cake autour de ce caillou, il suffit d'envoyer dans la cavité de la boue qu'on ramasse par terre pour bloquer très rapidement la perte de stabilisation. Quoi qu'il en soit, avec le dispositif d'alimentation en air comprimé, la perte de pression n'excède pas 10 kPa.

Q — Y a-t-il eu des réflexions particulières sur le choix des outils de votre tunnelier ?

R — Ce sont les outils employés à Francfort et à Berlin qui ont été adoptés et on n'a peut-être pas assez réfléchi à leur choix car les alluvions du Rhône sont très abrasives. En 35 m de creusement on a déjà usé un jeu d'outils.

Ce sont des fers carrés de 7 cm de côté, de 10 à 15 cm de longueur, en acier à rechargement dur. On cherche de nouveaux aciers.

Les alluvions du Rhône sont très compactes et le gradient de pression qui s'applique sur les 10 premiers centimètres renforce leur tenue en place. Leur abattage par simple déstabilisation du parement n'est pas aussi facile qu'on l'aurait pensé.

Cette observation nous ramène d'ailleurs au choix des boues (J ou C par exemple) et à la forme du gradient de pression à rechercher dans l'épaisseur du cake: pour autant que la stabilisation soit encore suffisante, ne pourrait-on pas conclure qu'une boue qui ne pressurise pas trop les 5 premiers centimètres du parement pourrait être économiquement plus intéressante qu'une autre, car réclamant moins d'énergie à l'abattage ?

Q — Avez-vous pu mesurer les consommations de boue ?

R — On n'a pas pu tirer jusqu'à présent de valeurs significatives de la consommation de boue.

Dans le cadre du marché, elle a été estimée en moyenne à 35 kg de matière sèche par m³ de terrain excavé.

Cette consommation résulte de l'addition :

- des pertes latérales dans le terrain car ce qui part vers l'avant est récupéré à l'avancement;
- des pertes dans les sables à la centrale de traitement des déblais;
- des quantités de boue progressivement polluée qu'il faut éliminer.

Q — Quels obstacles avez-vous rencontré avec le tunnelier ?

R — Bien qu'on ait cherché à placer le puits d'attaque de façon à s'affranchir des fondations de l'ancien Pont de la Guillotière, d'entrée de jeu, nous avons rencontré des pieux en bois. Le tunnelier était alors si peu engagé dans le terrain que les pieux l'ont dévié au point de rompre l'étanchéité des joints de la traversée

du mur d'attaque, entraînant des pertes de boue et des chutes de pression.

La position relative du tunnelier par rapport aux pieux a également produit des désordres alors que plus loin, le tunnelier étant plus profond, les pieux ont été passés sans aucune difficulté. On a retrouvé des morceaux de bois et des sabots ferrés sur le tapis des déblais.

Nous avons également rencontré des blocs de pierre de plus de 1 mètre de longueur.

Q — Qu'est ce qui a fait choisir le bouclier à pression de boue par rapport aux autres types de boucliers ?

R — Pour les solutions souterraines, deux types de solutions ont été présentés :

- pression de boue;
- pression de terre.

On a parlé de la pression de boue, que l'on peut qualifier de stabilisation du front par contrainte imposée (la pression hydrostatique de la boue en tous points du front). A l'opposé on pourrait qualifier la pression de terre par une notion de stabilisation par non-déformation imposée: le terrain remplit la chambre d'abattage et s'arcboute contre la cloison étanche arrière. Le marinage des déblais ne peut alors se faire de façon hydraulique et c'est une vis d'Archimède qui extrait les matériaux de la chambre d'abattage. Il faut alors que la quantité de terrain extraite corresponde à tout moment à l'avancée de la cloison du bouclier.

Pourquoi avons nous rejeté les boucliers à pression de terre? En raison de doutes majeurs sur leur fonctionnement dans les terrains aussi frottants et perméables que les nôtres où, de plus, nous nous attendions à rencontrer des cailloux d'au moins 60 cm de diamètre et des pieux. Pour extraire de tels obstacles il faut aller les chercher dans la chambre d'abattage, ce qui veut dire, d'abord stabiliser un front en avant de la machine par injection notamment, vider la chambre, pratiquement à la pelle, etc. Dans les boucliers à pression de boue fluide, on ouvre le robinet et la chambre se vide toute seule (durée: 1/2 heure).

Ce sont des aléas qui coûtent. Pour espérer lubrifier les cailloux dans le bouclier à pression de terre et réduire leur perméabilité, au moins dans la vis d'Archimède, on peut prévoir des injections de boue épaisse coûteuse, mais les offres n'en prévoyait que des quantités dérisoires.

Le bouclier à pression de terre nous paraît plus adapté aux terrains non-frottants.

Q — De quelle couverture de terrain disposez-vous au-dessus du tunnel, notamment sous le Rhône et sous la Saône ?

R — Nous passons à environ 5 m sous le fond du Rhône ce qui nous donne une couverture à peu près sûre de l'ordre de 4,5 m. Nous avons en effet étudié avec la S.O.G.R.E.A.H. la mobilité des fonds du Rhône en crue et nous avons conclu que la couche plus ou moins mobile ne devait pas excéder le demi-mètre d'épaisseur dans ce secteur.

Pour la Saône, le point est plus délicat. Ce n'est qu'après la remise des offres que la traversée en amont du Pont Bonaparte a été réellement envisagée, mais les crues successives de la Saône à l'époque et les contraintes de la navigation nous ont empêchés de procéder aux vérifications géologiques nécessaires dans les meilleurs délais. Néanmoins, nous avons des sondages sur le Pont Bonaparte (trottoir aval), en rive droite et rive gauche, qui confirmeraient les cotes du granite vers 136 N.G.F. Quand au 15 août 1983, nous avons enfin pu faire les sondages en rivière, nous avons découvert une double faille orthogonale relevant une pointe de granite qui nous a obligés à rehausser le profil en long de près de 10 m. Résultat: la couverture n'était plus que de l'ordre de 50 cm dans la zone d'affouillement.

Aussi nous avons dû procéder au remblaiement localisé et temporaire de la Saône, d'abord avec du sable 0 - 10 mm pour qu'on ait partout une «couverture naturelle + sable» au moins égale à 2,5 m et, au-dessus, du tout venant mis en place par clapage. Le tout est protégé par des enrochements.

L'étude de ce remblaiement a été confiée à la C.N.R.

Q — Passez-vous sous des immeubles?

R — Le profil initial de l'Entreprise prévoyait le passage sous plusieurs blocs d'immeubles qui entourent la place Bellecour, mais nous avons préféré les éviter le plus possible. Il n'y a plus qu'à l'arrivée sous la Saône qu'un tube passe sous les immeubles (vraisemblablement aussi fondés sur pieux comme pratiquement tous les anciens immeubles de la bordure de Saône) mais nous passons à près de 8 m sous les fondations.

Q — Quel est l'effort de poussée nécessaire sur le plateau porte-outils pour abattre le terrain?

R — La mécanisation est de 3 600 kN pour la poussée du plateau porte-outils, mais jusqu'à présent on n'a mobilisé que la moitié environ de cette poussée (pour une section de 32,2 m environ).

Le couple de rotation peut monter à 1 800 m_A kN ce qui est déjà élevé, mais la rotation du plateau porte-outils a déjà été bloquée par la présence de gros blocs.

De même l'avancement du tunnelier s'est déjà trouvé bloqué par la présence d'un gros bloc à cheval sur la trousse coupante malgré les 30 000 kN de poussée générale (environ 10 000 kN disponibles sur la trousse coupante).

Q — N'y aurait-il pas des améliorations à trouver dans la forme des outils et dans la manière dont on les fait travailler?

R — Oui probablement. D'autres propositions de matériels comportaient des molettes notamment vers la périphérie, avec un plateau porte-outils en forme de dôme pour tendre à chasser ces blocs vers l'extérieur du bouclier.

Il est difficile de dire si des molettes auraient cassé les gros cailloux se présentant au front, mais il n'est pas interdit de le penser du fait de l'amélioration de l'enclassement des cailloux dans le front de taille, apportée par le gradient de pression de stabilisation.

Q — Pouvez-vous nous parler du revêtement en béton de fibres?

R — Dans la technique retenue, le revêtement du tunnel est directement mis en œuvre à l'arrière du tunnelier, par pompage de béton sous pression (0,3 à 0,5 MPa) entre le terrain et des anneaux de coffrage. C'est le brevet HOCHTIEF.

L'avancement du tunnelier est à peu près continu, mais quand tous les 1,2 m on ramène un coffrage de l'arrière (où le béton a durci) vers l'avant, il existe tout de même des arrêts de bétonnage qui peuvent atteindre une à deux heures en cas d'incident. Comme il ne peut être question d'avoir une reprise de bétonnage tous les 1,2 m (plus pour le fonctionnement du tunnelier que pour le revêtement lui-même), la prise du béton doit être nettement retardée (début de prise vers 6 h d'âge).

Par ailleurs, c'est un béton pompé qui doit présenter des performances rhéologiques exceptionnelles pendant au moins 2 heures pour circuler dans un réseau de canalisations très compliqué et se répartir tout seul, sous pression, dans le coffrage au fur et à mesure que le bouclier avance. Ce béton n'est pas vibré.

Enfin, on demande des performances mécaniques à court terme très élevées pour suivre la cadence d'avancement du tunnelier. En principe le décoffrage se fait à 24 heures. Sur une partie du tracé le béton devra alors avoir atteint près de 20 MPa en compression et, si on doit mettre le tunnel sous air comprimé, 2 à 3 MPa en traction au moment du décoffrage.

On demande donc à ce béton des propriétés non-ordinaires: résistance mécanique à très court terme et maintien de la fluidité pendant plusieurs heures. Pour atteindre ces performances, le béton est dosé à 400 kg de C.P.A. 55 H.P.R., sable roulé, gravier, cendres volantes, retardateur de prise, fluidifiant, eau et fibres métalliques à raison de 45 kg par m³ de béton.

Qu'apportent ces fibres métalliques? Ce sont des fibres droites de 0,6 mm de diamètre et de 40 mm de longueur. Bien que les recherches en cours au C.E.T.E. de Lyon soient à peine entamées, il semble que ces fibres qui répartissent la microfissuration, n'apportent de résistance supplémentaire qu'à court terme, mais c'est bien ce que l'on cherche. Comme le dosage est faible en fibres, au-delà de 48 heures d'âge, il semble que la résistance propre du béton masque l'influence des fibres.

Q — Quelle est la composition de la boue?

R — La boue est un mélange d'eau et de bentonite à raison de 60 kg de matière sèche par m³ d'eau. C'est du moins son dosage normal, mais on peut avoir des boues plus dosées, à 70 ou 80 kg, pour des problèmes

de colmatage. C'est un maximum car il ne faut pas oublier que cette même boue sert au marinage hydraulique des déblais et au-delà de 60 secondes de « viscosité Marsh » les pompes de marinage décrochent.

En ce qui concerne la nature de la bentonite, la notion de « rendement » propre aux constructeurs de parois moulées ne nous convient pas. Nous recherchons des boues à haut seuil de cisaillement et faible viscosité

plastique pour assurer une bonne tenue du front de taille et de bonnes performances du marinage hydraulique.

Nous remercions les élèves ingénieurs DELESALLE - FOSCHIA - GRIVET - NITSCHÉ - NOE - PIERIDOU qui ont contribué à cette étude. Nous remercions également la Direction de l'Ecole Nationale des T.P.E. d'avoir accueilli cette recherche dans ses locaux.

ERRATAS R.F.G. n° 28

P. 19, ligne 5

$G \times z$ (module de cisaillement vertical)

$$= \frac{E}{(1 + n + 2\mu)}$$

au lieu de $\frac{E}{(1 + n + 2\mu)}$

P. 21, ligne sous l'équation (66):

$$\omega^2 = \alpha^2 + \beta^2 - 2\alpha\beta \cos \phi$$

au lieu de:

$$\omega^2 = z^2 + \alpha^2 + \beta^2 - 2\alpha\beta \cos \phi$$

Page 22 équation (67):

$$\sigma_2 = \frac{P}{\pi^3} \frac{k_1 z}{(k_1 - 1)} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi \left[\frac{1}{(z^2 + \omega^2)^{3/2}} - \frac{1}{(k_1 z^2 + \omega_1^2)^{3/2}} \right] d\phi d\theta$$

au lieu de:

$$\sigma_2 = \frac{P}{\pi^3} \frac{k_1 z}{(k_1 - 1)} \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi \left[\frac{1}{(z^2 + \omega^2)^{3/2}} - \frac{1}{(k_1 z^2 + \omega^2)^{3/2}} \right] d\phi d\theta$$