

Applications des sondes de diagraphies nucléaires dans le domaine du contrôle des fondations profondes et des comblements de cavités souterraines

Valéry FERBER

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Chef de la section Géologie-géophysique

Abel DELFAUT

Assistant
Chef du groupe Géotechnique
Laboratoire régional de l'Ouest Parisien

RÉSUMÉ

Les diagraphies nucléaires étaient encore récemment au Laboratoire régional de l'Ouest Parisien (LROP) un outil réservé à la reconnaissance et à l'expertise dans les matériaux naturels du sous-sol. Quelques chantiers récents ont permis d'ouvrir le champ d'application de cette méthode au domaine des contrôles. Son utilisation en contrôle extérieur de chantiers de fondations profondes (pieux, inclusions rigides, parois moulées, etc.) a montré l'intérêt de cette méthode au maître d'œuvre. Lors du contrôle mais aussi du suivi des comblements de cavités souterraines, sa précision et sa bonne répétabilité apporte des informations précieuses sur l'évolution du remblai et donc sur l'efficacité à long terme des travaux.

MOTS CLÉS : 41 - Diagraphie - Mesure - Capteur - Fondation - Profondeur - Cavité - Étalonnage.

Introduction

Les sondes de diagraphies nucléaires à radioactivité provoquée (gamma-gamma et neutron-neutron) ont été développées et rendues opérationnelles dans les années 1970 par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Rouen (Ménard et Cariou, 1978). Ces sondes et leur base d'étalonnage ont été confiées, il y a plus de quinze ans, au Laboratoire régional de l'Ouest Parisien (LROP) qui en assume la charge opérationnelle.

L'utilisation des sondes de diagraphies nucléaires a jusqu'à présent plutôt concerné les applications géologiques et la recherche de gisement de matériaux naturels. À l'occasion de quelques chantiers dont le LROP assurait le contrôle extérieur pour le compte du maître d'œuvre, les diagraphies nucléaires ont été utilisées pour contrôler la conformité de fondations profondes ou de comblements de cavités souterraines.

Après avoir rappelé les particularités techniques de la mesure et de l'exploitation des mesures de diagraphies nucléaires, nous montrerons quels résultats peuvent être obtenus avec ces sondes, d'une part, dans le contrôle des fondations profondes et, d'autre part, dans le suivi des comblements de cavités souterraines.

Rappels techniques sur les mesures de diagraphies nucléaires

Constitution des sondes et principe de la mesure

Sonde gamma-gamma

La sonde gamma-gamma comporte deux détecteurs de rayons gamma, situés à 20 et 40 cm d'une source radioactive placée en tête de sonde (fig. 1). La source émet des rayons gamma qui se propagent autour de la sonde et interagissent avec les matériaux environnants. Une partie des photons est diffusée et l'autre

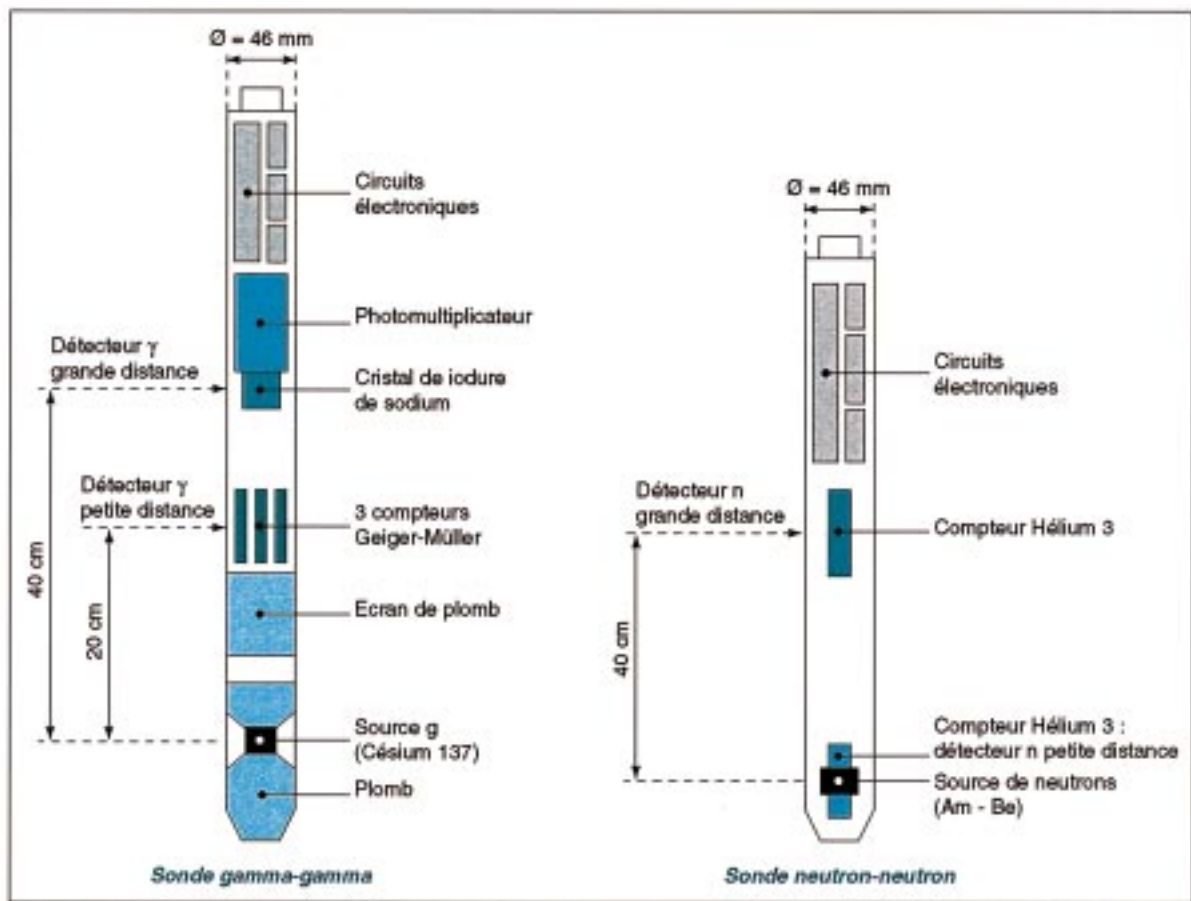


Fig. 1 - Schémas de principe des sondes gamma-gamma et neutron-neutron.

absorbée par les atomes. Seule une certaine partie des photons γ arrive jusqu'au détecteur. Cette proportion dépend de la distance source-détecteur et du diamètre du forage. Plus la masse volumique du matériau est forte, plus la quantité de rayons enregistrée par les détecteurs est faible.

Par une série de comptages effectués tous les 10 cm, la sonde gamma-gamma permet d'obtenir, après étalonnage, un log de masse volumique humide du terrain en place. Le rayon d'investigation de cette sonde varie de 15 à 20 cm selon le matériau.

L'association des deux détecteurs permet, par le biais de l'étalonnage, de s'affranchir des variations de diamètre du forage qui influent sur les mesures (Ménard et Cariou, 1978). Dans le cadre des contrôles de fondations profondes ou de comblement de cavités souterraines, les matériaux auscultés ont été mis en place après le tubage, si bien que le diamètre considéré est constant et égal au diamètre extérieur du tubage. On n'utilise donc que le détecteur le plus éloigné de la source pour l'exploitation des mesures, car c'est celui qui a le rayon d'action le plus important et qui est le plus sensible aux variations de masse volumique.

Sonde neutron-neutron

La sonde neutron-neutron est munie de deux détecteurs de neutrons thermiques situés à 0 et 40 cm d'une source de neutrons rapides, de forte énergie.

En se propageant dans le sol, les neutrons rapides perdent beaucoup d'énergie lors de leurs collisions élastiques avec les atomes, principalement l'hydrogène et, dans un premier temps, deviennent ainsi des neutrons thermiques, puis sont complètement absorbés. Ainsi, le détecteur situé au niveau de la source voit ses comptages en neutrons thermiques croître avec la teneur en eau du matériau, alors que les comptages du détecteur situé à 40 cm diminuent avec l'augmentation de teneur en eau (plus le parcours est long, plus la probabilité pour un neutron d'être absorbé est importante).

Cette sonde permet donc, après étalonnage, d'obtenir un log de teneur en eau volumique du terrain en place. Le rayon d'investigation de la sonde neutron-neutron est de l'ordre de 15 centimètres.

Étalonnage des sondes

Le LROP dispose d'une double base d'étalonnage pour ces deux sondes, ce qui permet de transformer les comptages des détecteurs en valeurs du paramètre (masse volumique ou teneur en eau), en s'affranchissant du diamètre du forage ainsi que de la nature et de la géométrie du tubage, qui influent (tous deux) sur les mesures.

Chaque base d'étalonnage (une pour la sonde gamma-gamma, une pour la sonde neutron-neutron) est constituée de blocs de masse volumique humide ou teneur en

eau volumique connues, forés en différents diamètres. En réalisant dans chaque bloc une mesure des comptages dans les mêmes conditions que sur le chantier, c'est-à-dire avec le même tubage, on peut obtenir les abaques de conversion des comptages en masse volumique humide ou en teneur en eau volumique pour toute valeur du diamètre de forage.

Sonde gamma-gamma

L'objectif de l'étalonnage de la sonde gamma-gamma est de déterminer une formule qui donne, pour une valeur de diamètre de forage, la correspondance entre les comptages du détecteur et la valeur de masse volumique humide ρ_h . Cette formule est une représentation particulière d'une surface d'équation générale :

$$N_{\gamma\gamma} = G(\phi, \rho_h) \quad (1)$$

où

- > $N_{\gamma\gamma}$ représente les comptages de la sonde gamma-gamma,
- > ϕ est le diamètre du forage,
- > ρ_h est la masse volumique humide.

Pour définir cette fonction, on dispose de quatre séries de dalles en matériaux naturels ayant des valeurs différentes de la masse volumique humide (fig. 2a). Ces dalles sont forées en cinq diamètres. On peut ainsi déterminer les coefficients de quatre fonctions :

$$\lg(N_{\gamma\gamma}) = a.\phi^2 + b.\phi + c \quad (2)$$

à ρ_h constant

par régression polynomiale sur les quatre séries de cinq couples $(N_{\gamma\gamma}, \phi)$ à ρ_h constant (fig. 2b). À partir de ces quatre équations, on peut déterminer, par le calcul, une série de couples $(N_{\gamma\gamma}, \rho_h)$ pour chaque valeur de ϕ que l'on désire. On peut alors déterminer, par régression polynomiale, les coefficients de l'équation (3) (fig. 2c), qui permet de transformer, pour une valeur de diamètre de forage donné, une valeur de $N_{\gamma\gamma}$ en une valeur de la masse volumique humide ρ_h :

$$\lg(\text{CPT}_{\gamma\gamma}) = a'.(\lg \rho_h)^2 + b'.\lg \rho_h + c' \quad (3)$$

à ϕ constant

Sonde neutron-neutron

De même, l'étalonnage de la sonde neutron-neutron vise à déterminer une formule qui donne, pour une valeur de diamètre de forage, la correspondance entre les comptages du détecteur et la valeur de la teneur en eau volumique θ . On recherche donc une représentation dans le plan $(\theta, \text{CPT}_{nn})$ de la surface dont l'équation générale en trois dimensions serait :

$$N_{nn} = N(\phi, \theta) \quad (4)$$

où

- > N_{nn} représente les comptages des détecteurs de la sonde neutron-neutron,
- > ϕ est le diamètre du forage,
- > et θ est la teneur en eau volumique.

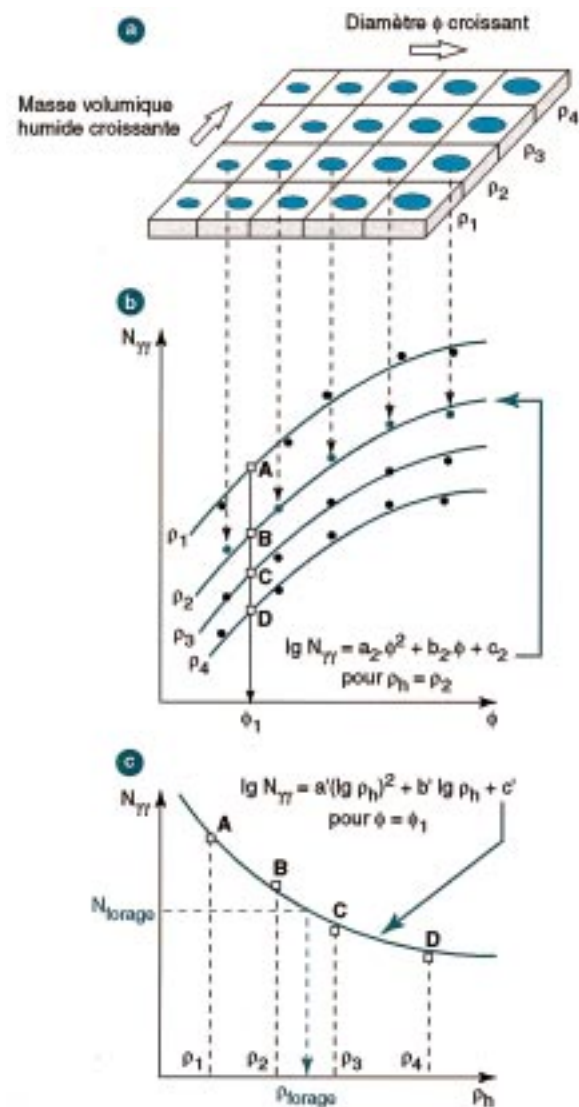


Fig. 2 - Principe de l'étalonnage de la sonde gamma-gamma.

a. Dalles d'étalonnage. - b. Abaque dans le plan $(\phi, N_{\gamma\gamma})$. - c. Abaque dans le plan $(\rho_h, N_{\gamma\gamma})$.

Pour cela, on dispose de deux séries de dalles en matériaux hydrogénés forées à deux diamètres : 75 et 90 mm (fig. 3a). Ces matériaux hydrogénés simulent une teneur en eau volumique par la présence d'hydrogène et chaque dalle a une valeur distincte de teneur en eau volumique. On peut ainsi déterminer les coefficients de deux fonctions :

$$N_{nn} = A\theta^2 + B\theta + C \quad (5)$$

à ϕ constant

par régression polynomiale sur les deux séries de quatre couples (N_{nn}, θ) à ϕ constant (fig. 3b). À partir de ces deux équations, on peut déterminer, par interpolation, toutes les séries de couples (N_{nn}, θ) à ϕ constant que l'on désire, de façon à obtenir des fonctions de type (5) pour des valeurs complémentaires de ϕ . On peut alors transformer, pour un diamètre de forage donné, une valeur de N_{nn} en une valeur de la teneur en eau

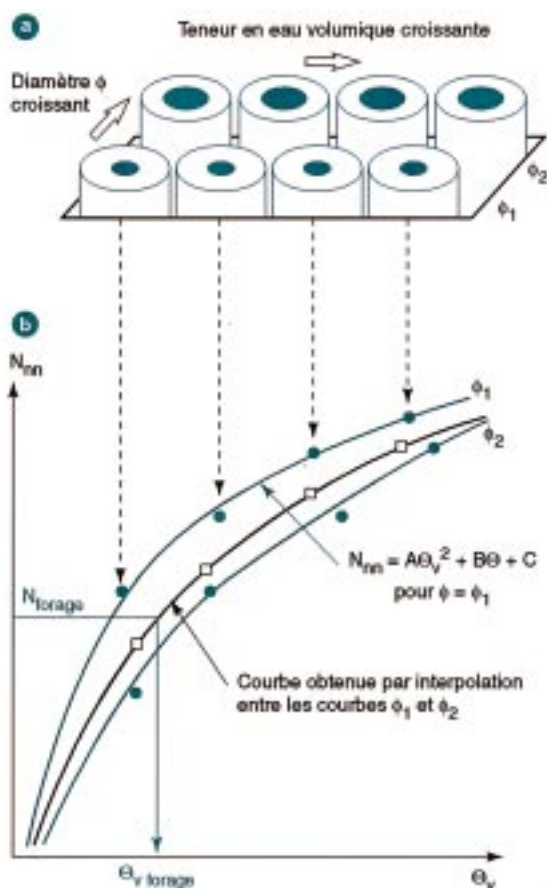


Fig. 3 - Principe de l'étalonnage de la sonde neutron-neutron.
a. Dalles d'étalonnage. - b. Abaque dans le plan (θ_v, N_n) .

volumique θ (fig. 3b). Notons que, lorsque la sonde traverse du béton, la teneur en eau mesurée inclut les ions hydrogènes Ht dans le ciment qui a fait prise.

Exploitation des mesures collectées en forage

En forage, on effectue les mesures tous les 10 cm environ. Ainsi pour un forage de 10 m, on obtient une centaine de valeurs pour chaque sonde.

Le programme d'exploitation intègre les données de l'étalonnage, les mesures en forage, et il demande la saisie d'une valeur pour le diamètre de forage. Il est alors capable de déterminer les paramètres des équations (3) et (5) qui vont lui permettre de calculer un log de masse volumique humide et un log de teneur en eau volumique.

Si l'on a fait les mesures avec les deux sondes, une option permet de calculer le log de masse volumique sèche ρ_d et le log de teneur en eau pondérale W , qui sont les paramètres courants en géotechnique. Ce calcul se fait par les formules suivantes :

$$\rho_d = \rho_h - \theta \cdot \rho_w, \quad (6)$$

$$W = \theta \cdot \rho_w / (\rho_h - \theta \cdot \rho_w) \quad (7)$$

Application au contrôle des fondations profondes

Nous évoquerons ici deux chantiers qui ont fait l'objet d'un contrôle extérieur par le LROP en 1999. Le premier concerne des parois moulées dans le cadre de la réalisation d'une tranchée couverte dans les Yvelines, le second des inclusions rigides dans le cadre de la traversée d'une vallée compressible par une route départementale dans le Val d'Oise.

Contrôle de parois moulées

Contexte du chantier

Sur le tracé d'une déviation, un projet de tranchée couverte a nécessité la réalisation de trois parois moulées sur une distance de 450 m environ, soit près de 210 panneaux de 7 m de long. La profondeur moyenne des panneaux est de l'ordre de 15 mètres.

Les clauses technique du marché de travaux (CCTP) prévoient un double contrôle des parois moulées :

- ① **contrôle externe par la méthode sonique par transparence** sur toutes les réservations d'un certain nombre de panneaux ;
- ② **contrôle extérieur par diagraphies nucléaires** dans une réservation (sur cinq) par panneau, pour partie sur les mêmes panneaux que la méthode sonique, et pour le reste sur d'autres panneaux.

Ainsi, soixante réservations ont été auscultées par diagraphies nucléaires, ce qui correspond à 29 % du nombre total de panneaux, et environ 6 % du nombre total de réservations.

Détection d'inclusions

Les auscultations par diagraphies nucléaires ont révélé dans quelques cas des anomalies, ponctuellement importantes, y compris dans des réservations qui avaient été auscultées par la méthode sonique. La figure 4 présente l'un de ces cas.

Les diagraphies nucléaires ont ausculté la réservation numérotée 330A (fig. 5), et la méthode sonique par transparence a enregistré la vitesse de l'onde mécanique entre les réservations 330A et 330B.

On note, sur le log de masse volumique humide, deux anomalies principales à 2 et 5,5 m de profondeur (fig. 4a). En particulier, l'anomalie à 2 m montre une chute de la masse volumique à une valeur de 2 t/m^3 ce qui révèle un défaut grave du béton, sur une hauteur que l'on peut estimer à environ 50 cm. La teneur en eau volumique mesurée par la sonde neutron-neutron montre un pic jusqu'à plus de 35 %. L'anomalie à 5,5 m est similaire, bien que quantitativement moins importante.

Le log sonique par transparence présente un décalage d'un mètre en profondeur avec ceux des diagraphies nucléaires. On retrouve sur ce log une seule anomalie (à 3 m) mais de manière très atténuée. L'interprétation

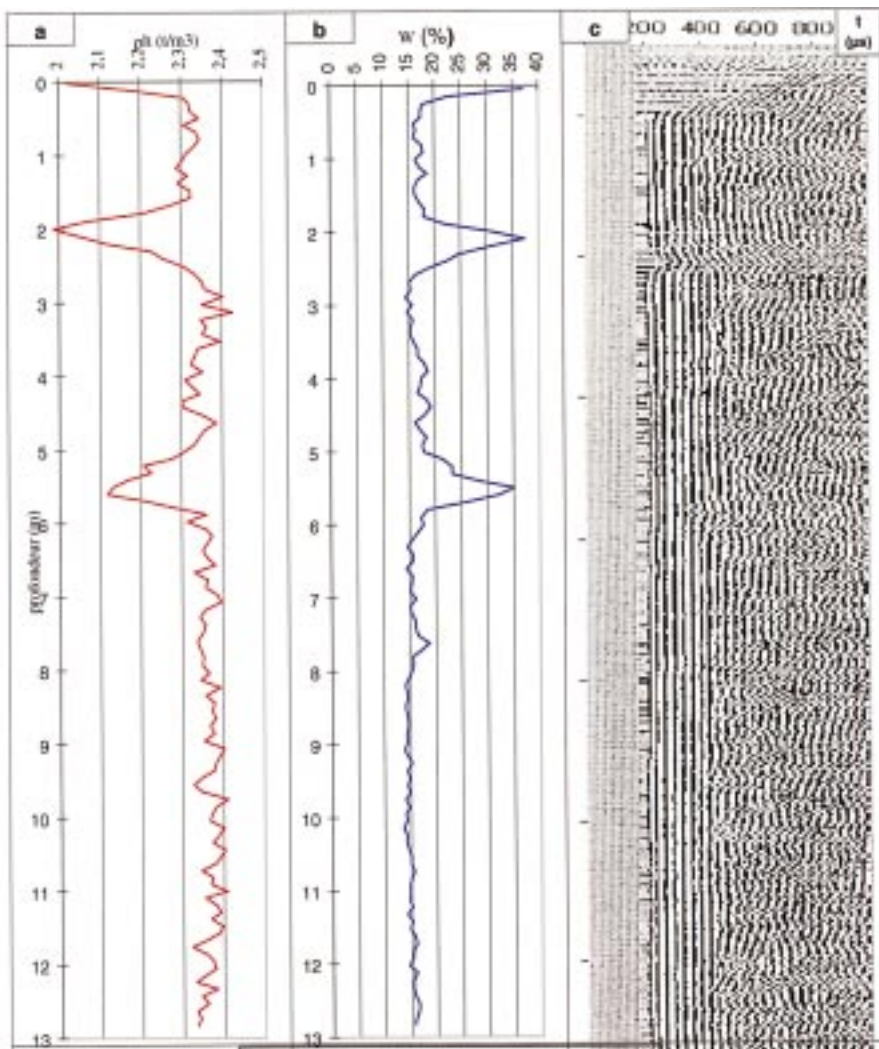


Fig. 4 - Auscultation de la réservation 330A par la sonde gamma-gamma (a) et la sonde neutron-neutron (b) et auscultation du trajet 330A-330B par la méthode sonique par transparence (c).

de l'entreprise est résumée dans la phrase suivante : « légère augmentation du temps de propagation, sans baisse d'amplitude du signal. Sans doute liée à la présence de corps gras ou d'adhésif sur le tube à ce niveau. Les diagraphies soniques sont conformes sur la profondeur auscultée ». L'entreprise qui a réalisé les mesures soniques par transparence n'a donc jamais signalé de défaut probant du béton d'après les résultats qu'elle avait obtenus.

Avec une masse volumique humide de 2 t/m^3 , une teneur en eau pondérale de près de 35 % et une masse volumique sèche d'environ $1,5 \text{ t/m}^3$, il est exclu que l'anomalie située à 2 m de profondeur soit liée à la présence de corps gras ou d'adhésif sur le tubage. Ces valeurs correspondent plutôt à celles qui seraient mesurées dans une inclusion de sol ou de boue, ce qui signifie que le panneau ausculté présente un défaut important de bétonnage sur une hauteur de 50 cm environ.

Pour apprécier l'extension de cette inclusion, nous avons aussi ausculté la réservation 330B. On y a retrouvé des anomalies aux mêmes profondeurs, mais avec une beaucoup plus faible amplitude. Le défaut de

bétonnage n'affecte donc qu'une partie limitée du panneau.

La figure 5 montre la géométrie du panneau et de ses réservations et permet de visualiser les volumes auscultés par les deux méthodes. On peut en tirer deux remarques :

- ① le volume ausculté par la méthode sonique concerne exclusivement le cœur du panneau ;
- ② le volume ausculté par les diagraphies nucléaires est plus limité (30-35 cm de diamètre) mais il permet d'ausculter le béton dans sa zone de contact avec le sol. Or, ce contact peut jouer un rôle important dans le comportement géotechnique de l'ouvrage.

La différence entre ces deux volumes explique pourquoi les deux méthodes n'ont pas obtenu les mêmes résultats. En d'autres termes, si ce panneau avait été ausculté seulement par la méthode sonique, il aurait été considéré comme conforme, alors qu'il présente un défaut que l'on doit prendre en considération même s'il n'affecte pas la totalité du panneau.

Détection de zones de ségrégation

Sur le même chantier, mais dans un autre panneau de paroi moulée, les mesures présentées sur la figure 6 montrent bien, en particulier sur le log de masse volumique sèche, un gradient positif entre 0 et 4 m de profondeur. Sur cette hauteur, la masse volumique sèche

voit sa valeur augmenter presque linéairement de $1,95 \text{ t/m}^3$ à plus de $2,15 \text{ t/m}^3$. Corrélativement, la teneur en eau volumique présente un gradient négatif conduisant à une diminution de près de dix points de teneur en eau sur 4 m. Il est important de signaler qu'avec la sonde neutron-neutron la valeur de teneur en eau volumique prend en compte tous les hydrogènes, y

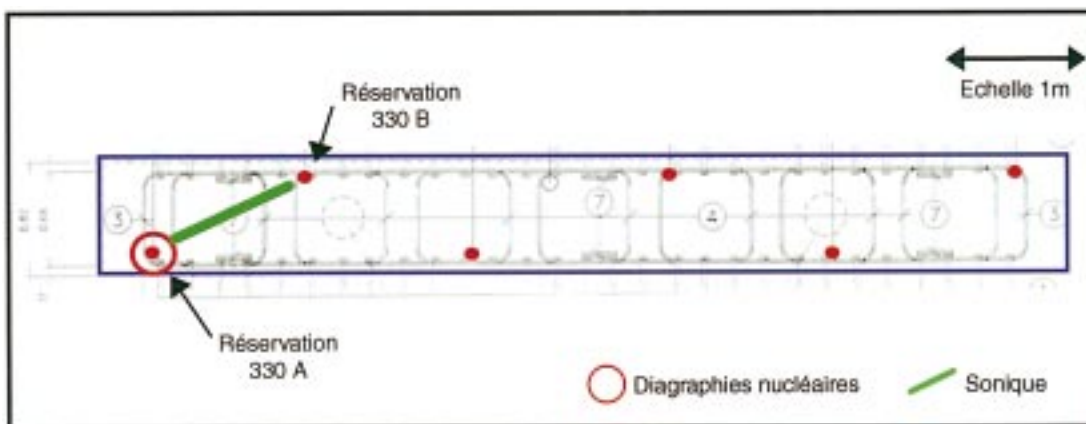


Fig. 5 - Disposition des réservations dans le panneau 330 et volumes d'auscultations des différentes méthodes.

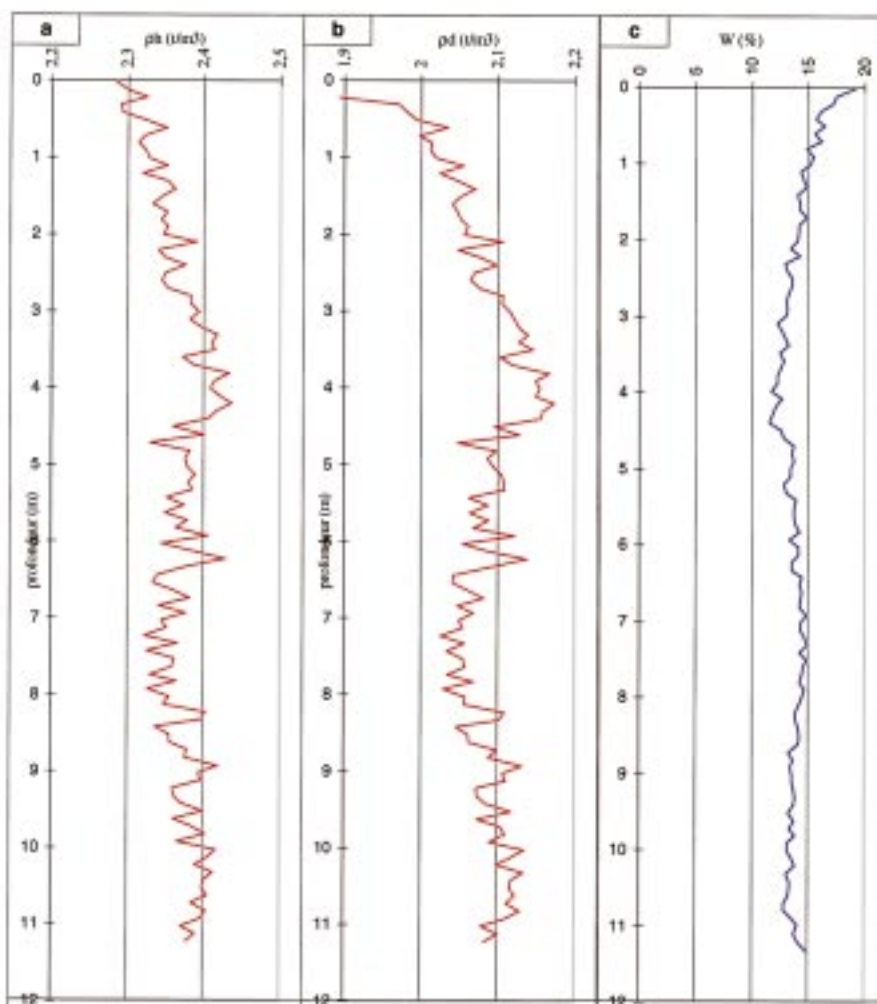


Fig. 6 - Auscultation de la réservation 137D.

a. Masse volumique humide. - b. Masse volumique sèche. - c. Teneur en eau pondérale.

compris ceux de l'eau ayant contribué à la prise du ciment. La valeur fournie par la sonde est donc toujours supérieure à la valeur de teneur en eau qui aurait pu être mesurée en laboratoire sur le même béton.

Ces résultats sont probablement liés à un phénomène de ségrégation du béton, traduisant une sédimentation rapide des éléments les plus grossiers des granulats qui conduit, du haut vers le bas, à une augmentation de la masse volumique sèche et une diminution relative de teneur en eau.

Ce phénomène n'a pas de conséquences majeures sur la stabilité de l'ouvrage mais il a été observé assez souvent lors de ce chantier. De telles observations peuvent conduire à modifier la composition du béton ou sa mise en œuvre afin d'assurer une plus grande homogénéité sur toute la hauteur de l'ouvrage.

Remarque sur la précision des mesures

Le groupe Béton du LROP a effectué des mesures de densité sur des prélèvements du béton mis en œuvre dans ces parois moulées. La valeur moyenne obtenue est de $2,33 \text{ t/m}^3$. On peut comparer cette valeur avec les mesures de masse volumique humide de la sonde gamma-gamma (cf. fig. 4a) qui varient entre $2,3\text{-}2,4 \text{ t/m}^3$ avec une moyenne de $2,37 \text{ t/m}^3$ dans les zones sans inclusions.

En l'absence de variation de ce diamètre (ce qui est le cas dans une réservation en paroi moulée), l'imprécision des mesures de la sonde gamma-gamma provient essentiellement des fluctuations statistiques de la source radioactive. On peut apprécier en laboratoire ces fluctuations en effectuant des séries de comptages dans chaque dalle d'étalonnage ce qui permet de calculer un écart-type qui, selon nos observations, dépend essentiellement du diamètre de forage. Pour une valeur de diamètre de 60 mm (diamètre extérieur du tubage utilisé dans ces parois moulées), on obtient un écart-type en comptages de l'ordre de six à sept coups par seconde, ce qui correspond à une erreur de l'ordre de $0,01 \text{ t/m}^3$ pour des valeurs de masse volumique humide de $2,3\text{-}2,4 \text{ t/m}^3$. En fait, dans le cas présenté ici, les variations des mesures entre $2,3$ et $2,4 \text{ t/m}^3$ sont plus représentatives d'hétérogénéités dans le béton que de l'imprécision de la mesure.

Conclusion

Dans ce cas de chantier qui concerne des centaines de panneaux qui vont former un ouvrage, on comprend bien que la détection de défauts affectant partiellement quelques panneaux ne va pas forcément conduire à remettre en question la stabilité d'ensemble de la paroi ou à refaire le panneau.

La réponse aux principaux défauts détectés par les diagraphies nucléaires (essentiellement les inclusions) a été ici possible dans le cas où les défauts étaient mis à nu lors des terrassements dans la tranchée couverte. Le rabotage des inclusions conduisant à la formation de vides superficiels, la méthode a été de colmater les

zones incriminées à l'aide d'un coulis spécial à prise rapide et à haute performance constitué de ciment et de résine.

L'intérêt de l'utilisation d'une méthode complémentaire en contrôle extérieur, comme les diagraphies nucléaires, est d'offrir au maître d'œuvre un moyen de vérifier que les résultats d'auscultation de l'entreprise sont vraiment représentatifs de la qualité de son travail. En cas de détection de défauts par cette méthode complémentaire, le maître d'œuvre montre qu'il a les moyens d'exercer pleinement son rôle de contrôle de la réalisation des travaux.

Techniquement, l'intérêt particulier de l'utilisation des diagraphies nucléaires est double dans ce cas et permet :

- ❶ d'ausculter un volume complémentaire qui permet notamment de contrôler le contact béton-sol, qui conditionne en partie le comportement de l'ouvrage ;
- ❷ de déterminer des paramètres physiques simples du béton (masse volumique et teneur en eau) qui sont très explicites et très bien compris par le maître d'œuvre, qui peut s'impliquer dans le contrôle.

Contrôle d'inclusions rigides

Contexte du chantier

Une déviation en construction dans le Val d'Oise traverse une petite zone compressible d'une centaine de mètres de largeur et il a été décidé de renforcer le sol support par des inclusions rigides. La figure 7 montre la disposition des inclusions sur le profil en long du projet de déviation. On voit que les inclusions rigides supportent, d'une part, un dalot voué à l'assainissement et, d'autre part, le remblai de la déviation qui permet de traverser le talweg (la figure ne représente pas le profil de la chaussée).

Les inclusions rigides ont un diamètre de 60 cm et une profondeur de 12 m pour les deux bandes extérieures et 9 m pour la bande intérieure (fig. 7). Elles ont été réalisées au moyen d'un procédé dont la principale caractéristique est l'utilisation d'une tarière creuse qui permet de couler ou d'injecter le béton à la remontée de la tarière. Elles ne possèdent pas d'armature et vingt d'entre elles (soit 4,5 %) ont été équipées d'une réservation, centrée au moyen d'un dispositif ad hoc dans le trou de forage et permettant le passage des sondes de diagraphies nucléaires.

Résultats

La figure 8 montre le résultat de l'auscultation de la seule inclusion qui ait présenté un défaut.

On notera tout d'abord la bonne correspondance entre les valeurs de masse volumique humide mesurées par la sonde gamma-gamma (entre $2,3$ et $2,4 \text{ t/m}^3$ dans les zones conformes) et les valeurs théoriques tirées de la formulation du béton (environ $2,34 \text{ t/m}^3$), contrôlées aussi par des prélèvements.

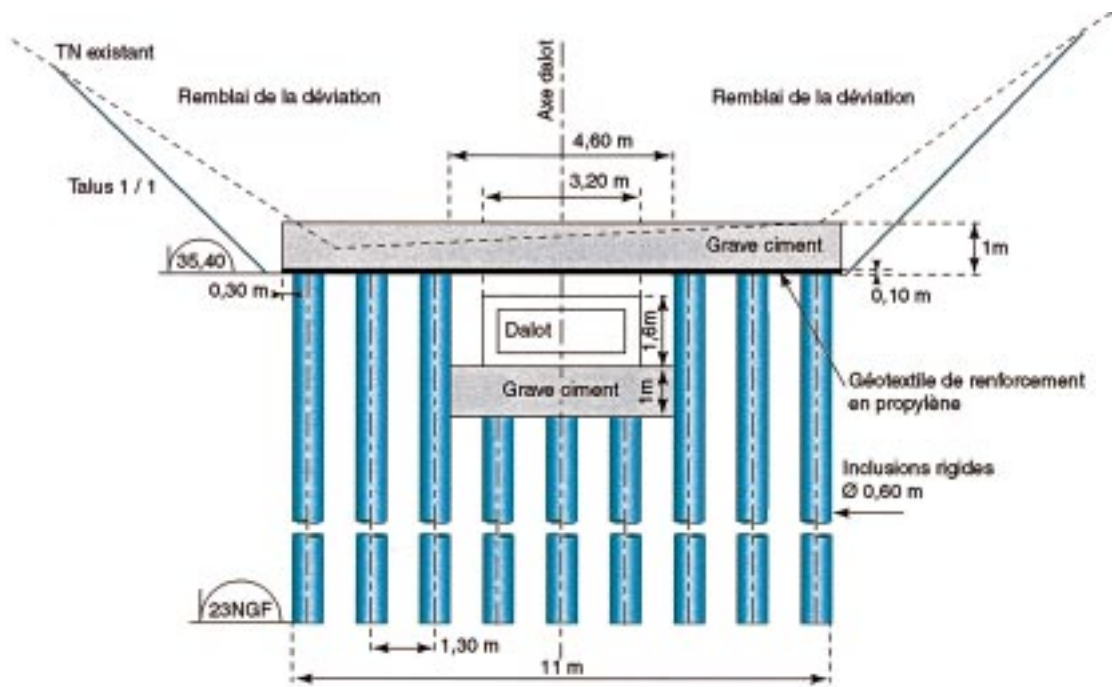


Fig. 7 - Disposition des inclusions rigides sur le profil en long du projet de déviation. Profil en long remplaçant la mise en plan.

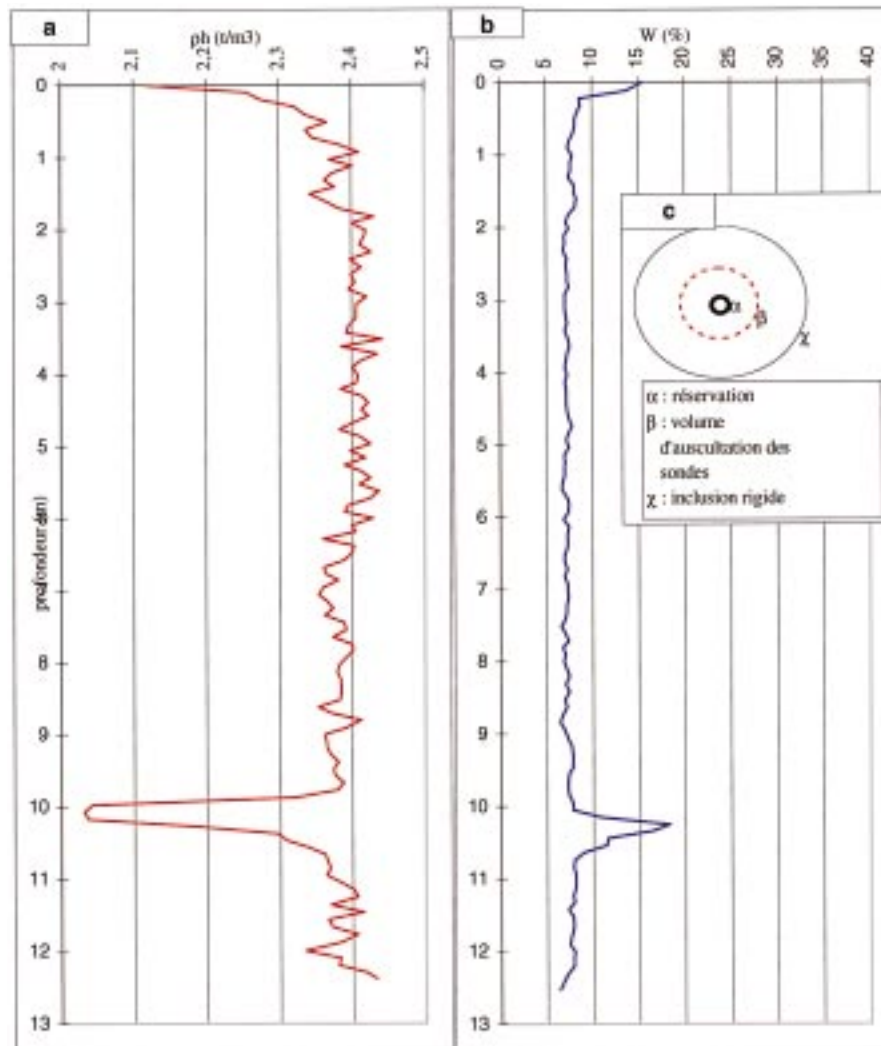


Fig. 8 - Auscultation de l'inclusion 50 par la sonde gamma-gamma (a) et la sonde neutron-neutron (b). Géométrie en plan (c).

L'information essentielle apportée par cette auscultation est la présence d'une chute très nette de la masse volumique humide jusqu'à une valeur de $2,03 \text{ t/m}^3$, et un pic de teneur en eau (pondérale) jusqu'à 17 %.

Interprétation et conclusion

Comme le montre la figure 8c, le diamètre du volume d'auscultation des sondes de diagraphies nucléaires (30-35 cm) vaut ici à peine plus de la moitié du diamètre de l'inclusion rigide (~ 60 cm). La détection d'une anomalie signifie donc que le défaut affecte véritablement le cœur de l'inclusion. Ce type de défaut est symptomatique d'un pieu sectionné à la mise en œuvre, par exemple, à la suite d'une remontée trop rapide de la tarière vis-à-vis de celle du béton coulé ou injecté dans le trou de forage. Certains procédés pallient cet inconvénient par une méthode et/ou un dispositif mécanique spécifique à l'outil de forage.

Ces mesures révèlent ainsi un défaut grave de bétonnage remettant en cause la capacité de l'inclusion rigide à jouer pleinement son rôle de support du remblai. Dans le cas particulier de ce chantier, le nombre d'inclusions était tel qu'il n'a pas été nécessaire, après examen des efforts figurant sur la note initiale de calcul, de doubler l'inclusion défectueuse. L'influence du défaut a en effet été jugée négligeable sur la tenue de l'ensemble de l'ouvrage.

Conclusions sur les contrôles de fondations profondes

Il est toujours nécessaire d'avoir à l'esprit les limites du volume d'auscultation, ce qui conduit à déterminer le nombre de réservations optimal à prévoir dans chaque élément de fondation (pieu, inclusion, panneau, etc.).

Dans le cas des inclusions ou des pieux de diamètre inférieur à 60 cm, les méthodes de diagraphies par transparence ne peuvent pas être utilisées alors que les sondes de diagraphies nucléaires peuvent être employées seules dans une réservation unique par pieu.

Pour des diamètres de pieux supérieurs ou pour les panneaux de paroi moulée, il y a lieu de prévoir plusieurs réservations. Il est alors intéressant que leur disposition dans l'ouvrage offre la possibilité d'un contrôle complémentaire sonique par transparence/diagraphies nucléaires.

Dans tous les cas de figure, tout défaut décelé après auscultation à l'aide de moyens non destructifs doit conduire à vérifier son incidence sur la tenue de la structure. La réflexion peut, dans certains cas, conduire à des actions complémentaires comme le carottage qui permettra de préciser la géométrie du défaut et d'évaluer, par des essais de laboratoire, les performances mécaniques des zones faibles afin de les comparer aux données prises en compte dans les notes de calcul.

Application au contrôle et au suivi des comblements de cavités souterraines

Rares sont les régions en France où il n'existe pas de cavités souterraines pouvant générer un risque pour les activités humaines en surface. Au fil du temps, les décideurs cherchent à minimiser ce risque en comblant les cavités découvertes ou déjà connues sous les zones à fortes activités, comme les routes ou les zones d'habitation.

Le niveau de qualité visé pour le comblement des cavités dépend principalement de l'activité existant en surface et il correspond à des règles variables selon les décideurs. Elles vont concerner, d'une part, le vide résiduel que l'on est prêt à laisser, une fois la cavité comblée et, d'autre part, la résistance des matériaux qui assureront le comblement.

Ainsi, sous une zone à forte circulation ou sous des bâtiments, l'objectif sera d'éliminer tout vide résiduel et de remplir toute la cavité avec des matériaux mécaniquement résistants, en général des coulis sable-ciment. À l'inverse, sous un parc de loisirs, un vide résiduel peut être toléré et on peut remplacer le coulis, qui est coûteux, par un matériau naturel de remblai plus classique, moyennant certaines conditions techniques à la mise en œuvre.

Le contrôle de ces travaux peut être effectué au moyen de diagraphies nucléaires, mises en œuvre dans des tubages disposés à l'avance jusque sous le fond de la cavité souterraine. Ainsi, une fois réalisé, le remplissage peut être contrôlé et suivi dans le temps s'il est suspecté d'être évolutif (cas des matériaux naturels).

Nous présenterons ici un cas de contrôle piloté par le Laboratoire régional de l'Est Parisien (LREP) dans une commune de Seine-Saint-Denis.

Contexte du chantier

Le chantier contrôlé par le LREP est le comblement de carrières souterraines abandonnées où a été exploitée la première masse du gypse (étage du Ludien, Eocène Supérieur) sur une hauteur de 12 m environ. Le recouvrement a une épaisseur de plus de 30 m et est constitué principalement de formations marneuses et argileuses (marnes supragypseuses, argile verte de Romainville).

Le rapport recouvrement/hauteur des vides, d'une valeur de 3 environ, indique qu'il y a un risque d'effondrement en surface à plus ou moins long terme (les conséquences sont majeures jusqu'à ce que ce rapport atteigne la valeur 5). Cependant, ces carrières se situent au droit d'un parc départemental (fig. 9) et l'intensité de l'activité en surface ne justifiait donc pas forcément un comblement jusqu'à élimination totale du vide résiduel.

Dans ce contexte, le LREP avait proposé de mettre en œuvre un matériau naturel, marneux à la base et dans la masse, et sableux au sommet, par voie humide, avec un vide résiduel inférieur à 1 m. Le risque d'effondrement se réduit ainsi à un risque d'affaissement limité, qui

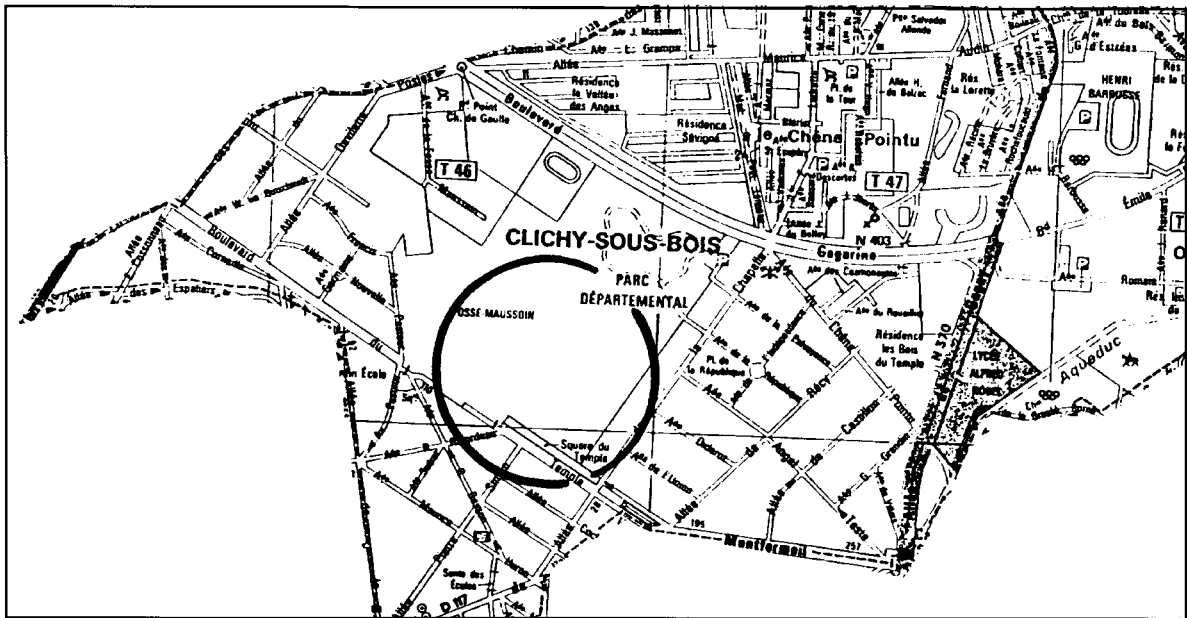


Fig. 9 - Situation du parc départemental.

aura peu de conséquences en surface du fait du type d'activité.

Malgré tout, le matériau mis en œuvre pour ce comblement étant particulièrement susceptible d'évoluer, en particulier de tasser, il était nécessaire de vérifier que les tassements n'engendreraient pas une augmentation trop importante du vide résiduel. Pour suivre cette évolution, un forage avait été équipé d'une réservation descendant jusque sous le niveau du sol de la carrière.

Résultats

La figure 10 présente l'évolution des valeurs de masse volumique sèche et de teneur en eau pondérale de deux mesures réalisées à un an et demi d'intervalle. Nous n'avons représenté les résultats que sur la hauteur de la carrière remblayée, soit entre 32 et 43 m de profondeur.

La première observation est le décalage des mesures d'environ 20 cm vers le bas, sur les deux logs, entre la première et la seconde date.

Les variations les plus visibles concernent l'évolution de la teneur en eau pondérale qui chute localement de plus de vingt points. Cet assèchement concerne trois zones (32,5 m-34 m ; 34,5 m-36 m ; 37 m-38 m), soit sur une épaisseur cumulée de 4 m. On observe aussi un léger décalage des mesures vers le bas.

Les logs de masse volumique sèche montrent un gradient positif, caractérisé par de très faibles valeurs dans les premiers mètres, voisines de 1 t/m^3 , et une augmentation progressive jusqu'à une valeur presque constante au-delà de 39 m à 1,75 tonne par mètre cube.

Par ailleurs, on remarque localement des diminutions de masse volumique sèche, en particulier dans les premiers décimètres supérieurs du remblai.

Interprétation et conclusion

Les variations des mesures nous apportent principalement deux renseignements sur le comportement du matériau qui a servi à combler cette carrière :

- ① le remblai a tassé en un an et demi d'environ 20 cm, d'après le décalage des mesures qui est facilement observable. La valeur exacte est peut-être plutôt de l'ordre de 15 cm dans la mesure où l'on fait une mesure tous les 10 cm, ce qui induit une incertitude sur la hauteur totale du vide d'environ 5 centimètres ;
- ② ce tassement s'est accompagné d'un assèchement sur une hauteur totale d'environ 4 m, avec des diminutions de l'ordre de vingt points de teneur en eau pondérale en certaines zones.

Les diminutions de masse volumique sèche en certains points, qui correspondraient à un gonflement, s'expliquent difficilement dans ce contexte puisqu'il y a perte d'eau et, que de plus, certaines de ces variations concernent les derniers décimètres supérieurs du remblai, principalement constitué de sables. Il est probable que ces variations inverses, principalement localisées à proximité du vide résiduel, soient la conséquence d'une augmentation de l'imprécision de la mesure due à l'influence du vide sur les comptages du détecteur de la sonde gamma-gamma. Elles ne correspondent donc pas à un phénomène se déroulant au sein du remblai.

En conclusion, ces mesures ont permis de vérifier que le remblai évoluait peu en termes de tassement (ce qui a été confirmé par une mesure ultérieure), malgré la présence localisée de zones d'assèchement. Ainsi, on peut constater que la hauteur du vide résiduel a augmenté au maximum de 10 à 20 cm ce qui reste limité, et ces résultats ont permis de montrer au maître d'œuvre que la méthode qui avait été choisie pour combler la carrière souterraine permettait d'assurer à long terme la sécurité du site vis-à-vis des effondrements.

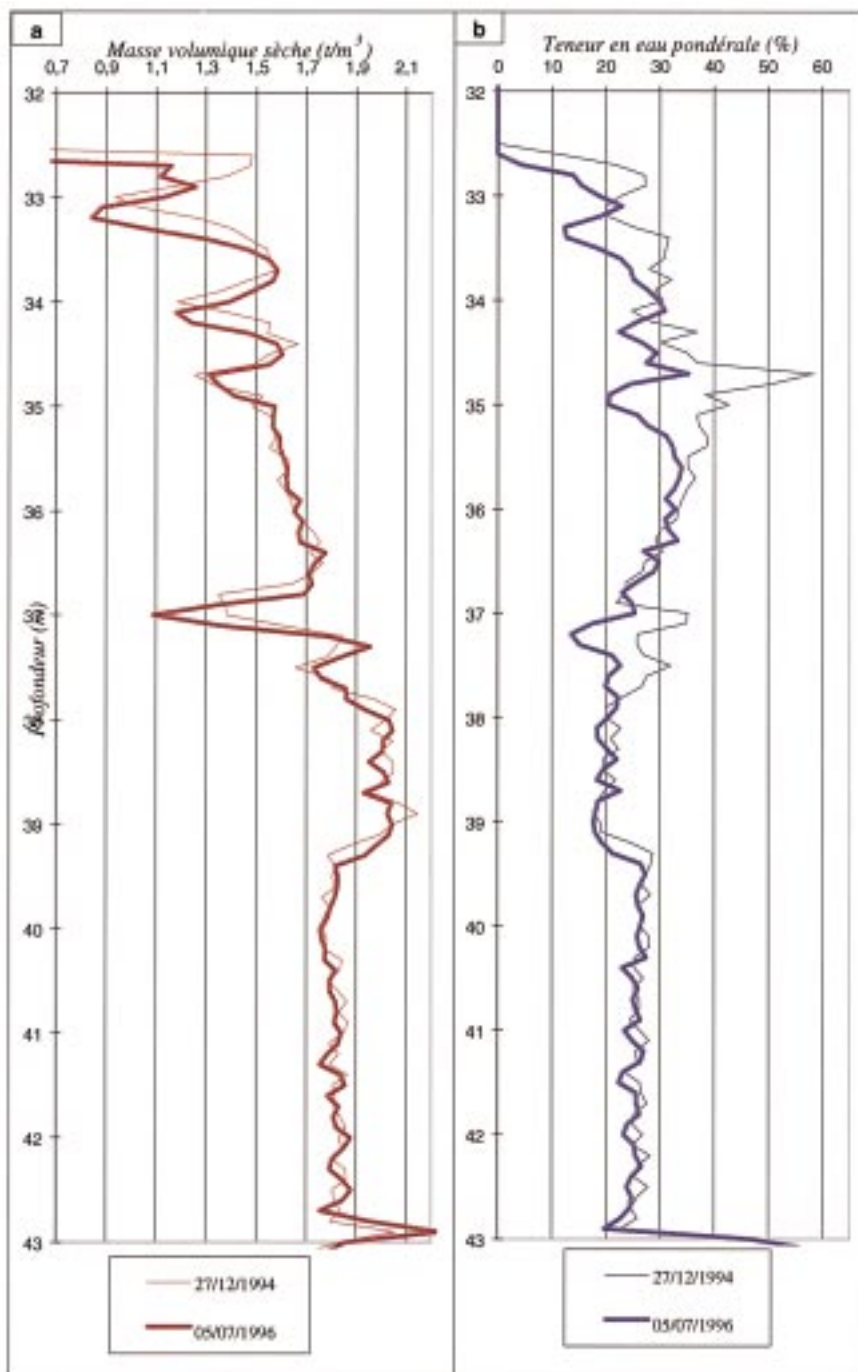


Fig. 10 - Variations des logs de masse volumique sèche (a) et de teneur en eau pondérée (b) entre décembre 1994 et juillet 1996.

Conclusions : avantages et limites de la méthode

Bien que les diagraphies nucléaires soient principalement considérées comme un moyen de reconnaissance, les exemples présentés ici montrent qu'elles peuvent constituer aussi un outil efficace pour le contrôle de travaux dans différents domaines.

Bien entendu, il est impératif d'avoir une idée précise des avantages et des limites de cet outil avant de l'intégrer à un programme de contrôle. Nous présentons

dans le tableau I les principales caractéristiques techniques à retenir pour cette méthode.

La méthode présente les qualités complémentaires de ses défauts, comme par exemple le rayon d'investigation, qui est limité à 30-35 cm mais qui permet de se limiter à un volume relativement bien connu et qui va être ausculté dans le détail. On a vu, dans l'auscultation des parois moulées, l'intérêt de ce volume d'auscultation limité qui complète bien le volume ausculté par la méthode sonique en examinant, en particulier, la zone de contact sol-béton.

TABLEAU I
Caractéristiques techniques des mesures
de diagraphies nucléaires

Rayon d'auscultation	15-20 cm
Hauteur du volume de mesure	40 cm
Intervalle de mesure	5 ou 10 cm
Vitesse de remontée	0,5 ou 1 m/mn
Rendement des mesures	~ 120 m/j
Durée d'étalonnage	~ 2 h
Exploitation des mesures	au LROP, résultats immédiats après étalonnage
Accès au point de mesure	camionnette non tout-terrain

De même, la vitesse de remontée de la sonde limite le rendement en mètres linéaires par rapport à la sonique par transparence, mais cette vitesse limitée permet d'obtenir une grande précision, par exemple en masse volumique humide, pour apprécier quantitativement la qualité du béton.

En ce qui concerne le délai d'exploitation des mesures, les moyens informatiques actuels permettent, une fois l'étalonnage effectué, de fournir les résultats d'auscultation dès le retour au laboratoire.

L'intérêt de cette méthode pour le contrôle d'un chantier peut être jugé par rapport à quatre questions :

- ① un volume d'auscultation de 30-35 cm de diamètre permet-il de détecter les anomalies éventuelles ?
- ② les anomalies éventuelles auront-elles une hauteur d'au moins 10 centimètres ?
- ③ une autre méthode d'auscultation, complémentaire aux diagraphies nucléaires, est-elle envisagée ?
- ④ le nombre d'ouvrages à ausculter sur le chantier est-il compatible avec le rendement de cette méthode ?

Rappelons aussi que l'équipe qui met en œuvre les diagraphies nucléaires au LROP a vocation à fournir tous les conseils nécessaires à l'emploi de cette méthode.

Enfin, la méthode d'auscultation des ouvrages enterrés par diagraphies nucléaires fait depuis peu l'objet d'une norme qui peut servir de référence (norme XP P 94-160-5).

Remerciements. Les auteurs remercient P. Laine (LROP) et J.-B. Cailleux (LREP) pour leur contribution à la préparation de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GRISONI J.-C., MINO T., THORIN R., UNVOIS J.-P. (1990), Les diagraphies nucléaires développées par les LPC, Applications aux études de sites et au suivi d'ouvrages difficiles, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **168**, pp. 5-13.

MENARD J., CARIOU J. (1978), *Diagraphies de densité et de teneur en eau. Sondes nucléaires de première génération*, Rapport de recherche LPC, **82**, 45 pages.

Norme **XP P 94-160-5**, *Auscultation d'un élément de fondation*, partie 5.

UFG, *Code de bonne pratique de géophysique appliquée*, Maison de la géologie, Paris.

ABSTRACT

Applications of nuclear logging probes for testing deep foundations and the filling of underground cavities

V. FERBER, A. DELFAUT

Until recently, the Laboratoire régional de l'Ouest Parisien (LROP) only used nuclear logging to survey and investigate natural subsurface materials. Some recent worksites have provided an opportunity to use this technique for monitoring purposes too. Its use in order to conduct external checking of deep foundations (piles, rigid inserts, diaphragm walls, etc.) has demonstrated its value for project managers. With regard to checking and monitoring the filling of underground cavities, the accuracy and good repeatability of the technique means that it provides valuable information on the changes taking place in the fill and therefore the long-term effectiveness of works.