

La réutilisation des fondations existantes dans les projets de réhabilitation de constructions anciennes

Reuse of existing foundations for the rehabilitation of old buildings

Guilloux A., Le Bissonnais H., Saussac L.* , Perini T.
Terrasol, Paris, France

(*à la date de publication : *Geos, Paris, France*)

RÉSUMÉ : Lors de la réhabilitation de bâtiments existants, il est bien évidemment souhaitable de conserver dans la mesure du possible les fondations existantes de l'ancienne structure, quitte à les renforcer ou à créer des fondations supplémentaires si celles qui existent ne permettent pas de garantir la bonne tenue de la structure nouvelle. L'expérience, et notamment les trois exemples décrits dans cet article, montre que cette préoccupation conduit à développer une démarche de conception géotechnique originale : il convient de bien connaître l'état des fondations existantes, de bien évaluer les variations de charges à tous les stades (depuis l'ancienne construction jusqu'à la nouvelle, en passant par les phases de chantier), de décider quelles sont les fondations à renforcer, puis d'étudier des techniques de renforcement adaptées aux conditions de chantier, dans des espaces souvent restreints et sans créer de désordres sur les parties d'ouvrages conservées, et enfin de s'assurer de la compatibilités des déformations et reports de charges.

ABSTRACT: For projects of rehabilitation of an existing building, it is obviously preferable to use as much as possible the existing foundations, including by reinforcing them or by creating additional ones when the existing ones cannot guarantee the safety of the new structure. Based on three case histories described in this paper, it is shown that a "new" geotechnical approach is required, including: deep knowledge of the state of the existing foundations, careful analysis of the load variations (from the old buildings to the new structure, together with the temporary stages), selection of the foundation to be reinforced, choice of reinforcement techniques, often to be implemented in narrow spaces and without any disorders on the structure left in place, and finally detailed analysis of load transfers and deformations compatibility.

KEYWORDS: Réhabilitation, renforcement, transferts de charges, compatibilité des déformations.
Rehabilitation, reinforcement, load transfer, deformation compatibility.

1 PRESENTATION

Les enjeux du Développement Durable sont à l'évidence très présents dans tous les projets de réhabilitation des constructions, qu'il s'agisse de bâtiments ou d'ouvrages d'art. Du point de vue du géotechnicien, il s'agit avant tout de rechercher une réutilisation maximale des parties de fondations existantes, afin de limiter les travaux souvent lourds de démolition et de reconstruction, avec consommation de matériaux « neufs ».

Ainsi, du point de vue du géotechnicien, cette préoccupation de Développement Durable conduit à se poser un certain nombre de questions, qui sortent quelque peu des problématiques géotechniques habituelles :

- pour réutiliser les fondations existantes, il est essentiel de bien les connaître : quels sont les moyens d'investigation et de contrôle utilisables pour s'assurer de la géométrie de pieux par exemple, de la qualité du béton etc. alors que les plans de construction ne sont pas toujours disponibles ?
- lorsque le projet de réhabilitation conduit à une augmentation des descentes de charges, il faut soit renforcer les fondations existantes pour en augmenter la capacité portante soit en créer de nouvelles pour reprendre les charges additionnelles : comment alors évaluer la redistribution des charges, en intégrant les phasages de construction initiale, démolition et reconstruction ?
- même lorsque le nouveau projet ne conduit pas à une réelle modification des charges, on reste parfois confronté à une question d'évolution de la réglementation, qui est souvent devenu plus contraignante : ainsi, en l'absence de charges complémentaires, faut-il renforcer des fondations d'un ouvrage qui s'est toujours bien comporté, uniquement parce qu'il n'est plus conforme à la réglementation actuelle ?

- enfin, dans le cas où des renforcements de fondations existantes ou de nouvelles fondations sont rendus nécessaires, quelles sont les techniques de réalisation permettant à la fois d'intervenir dans des espaces souvent restreints et de minimiser les démolitions mêmes partielles sur l'existant ?

Ces différentes questions sont illustrées par trois projets en région parisienne, dont on présente les résultats des reconnaissances de l'existant, les études de conception des fondations et les méthodes de réalisation :

- La réhabilitation des entrepôts Calberson, boulevard Mac-Donald à Paris : la construction de nouveaux étages de superstructures et la détection d'anomalies géologiques en base des pieux existants ont conduit à la fois à renforcer les pieux existants par un traitement en jet-grouting sous leur base et à mettre en œuvre des fondations nouvelles par micropieux ;
- La réhabilitation du secteur Est de l'Université de Jussieu (Paris Vème) : le projet de réhabilitation ne conduisait en général pas à une augmentation des charges, mais les auscultations des pieux existants ont révélé des défauts localisés, en particulier en termes de longueur, qu'il a fallu traiter soit en reprenant une partie des charges par des micropieux nouveaux, soit par injections de terrain sous les fondations existantes. Un plot d'essai de traitement de sol a été réalisé avec essais de chargement statique axial sur des pieux existants pour quantifier l'effet du traitement ;
- La réhabilitation d'un ancien centre de tri postal à Pantin : sa transformation en vue de son réaménagement en Data Center a conduit à une augmentation importante des charges sur les pieux existants. Après une redéfinition des paramètres de sol pour s'approcher au mieux des conditions

de tassement observé depuis la construction de l'immeuble (phase calage), les pieux ont été traités toute hauteur par 2 colonnes de jet-grouting.

2 ENTREPÔTS MAC-DONALD

2.1 La phase de conception

Ce projet consiste à réhabiliter d'anciens entrepôts Calberson, construits dans les années 1970 sur une emprise de 600 x 60 m² située boulevard Mac-Donald à Paris, pour les transformer en bureaux, logements et équipements sociaux, conduisant à surélever la structure existante par la construction de nouveaux étages de superstructures. Le bâtiment existant est fondé sur pieux d'environ 10 m de profondeur et 1,0 à 1,6 m de diamètre.

L'ouvrage, comporte des sous-sols sur 6 m de profondeur environ, repose sur 10 m de calcaires de Saint-Ouen surmontant les sables de Beauchamp.

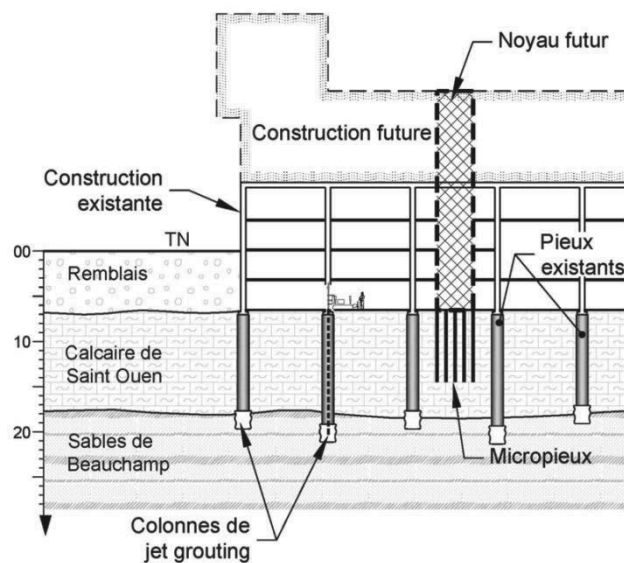


Figure 1 : coupe type du projet

Les études préalables se sont attachées à faire un diagnostic des pieux existants et à conduire des reconnaissances de terrain, qui ont révélé des anomalies géologiques en base des pieux existants.

Il était donc nécessaire :

- d'une part de renforcer les pieux existants pour optimiser leur portance, c'est-à-dire les faire travailler au maximum de la contrainte admissible dans le béton, fixée à 4,8 MPa après carottages et essais de compression sur le béton, et en respectant les tassements admissibles. Après examen de différentes solutions, la technique retenue a consisté à prolonger les pieux par des colonnes de jet-grouting sous leur pointe ;
- d'autre part de prévoir des fondations nouvelles par micropieux pour des structures nouvelles descendues en infrastructures, les noyaux.

En phase études, des essais de chargement statique des pieux existants ont également permis de définir des paramètres optimisés pour l'effort en pointe et le frottement latéral, mais également de mesurer en vraie grandeur la raideur des pieux, paramètre essentiel pour vérifier la distribution entre les pieux existants et les micropieux nouveaux des charges additionnelles, ainsi que la compatibilité des déformations.

2.2 Suivi du chantier de renforcement

Pour cet ouvrage, dont les pieux existants présentaient des défauts de portance vis-à-vis des futures charges, plus importantes que celles connues antérieurement, la solution

retenue de renforcement des fondations consistait à prolonger la base des pieux par une colonne de jet-grouting de 1,3 m de diamètre et 3 m de longueur en général (deux colonnes pour les pieux de 1,6 m).

Sur la base de reconnaissances géotechniques approfondies, des essais de chargement des pieux existants et des nouvelles descentes de charges, nous avons pu déterminer les pieux nécessitant un renforcement et dimensionner ce dernier. C'est au total environ les $\frac{3}{4}$ des 500 pieux qui ont dû être renforcés.

Le chantier de jet-grouting a fait l'objet d'un suivi avec contrôle renforcé, pour la réalisation des forages inclinés traversant les pieux existants et permettant de réaliser les colonnes de jet-grouting sous leur base. En outre, s'agissant de travaux de reprise en sous-œuvre d'un ouvrage existant, il a fallu s'assurer que les travaux de jet ne conduisaient pas à des désordres sur les structures conservées, notamment vérification des soulèvements lors des phases d'injection (35 à 40 MPa) puis des tassements avant que la colonne ne fasse prise. De ce point de vue le chantier s'est déroulé sans désordres majeurs, avec des mouvements des poteaux ne dépassant pas quelques millimètres, ce qui a confirmé que la technique du jet-grouting, bien contrôlée et avec un phasage adapté, permettait d'intervenir en sous-œuvre sans créer de mouvements significatifs.

2.3 Dimensionnement des fondations nouvelles

Pour les parties de structures nouvelles (noyaux), nécessitant leurs propres fondations, compte tenu du contexte et de l'espace de travail contraint, c'est une solution sur micropieux qui a été retenue.

Le dimensionnement en termes de capacité portante de ces micropieux a conduit à prévoir des micropieux de longueur réduite, à 8 m en général après essais de chargement. Mais plus que la capacité portante, c'est en fait sur les redistributions des charges entre les pieux existants, de grande section, et les micropieux nouveaux, a priori plus souples, que l'attention a été portée. Cette problématique a nécessité une approche en déformations, pour s'assurer de la compatibilité des tassements sous charges entre les anciennes et nouvelles fondations.

Ainsi, après les essais de chargement des pieux existants qui avaient permis de définir les paramètres de raideur, des essais de chargement de micropieux ont été également réalisés, et il a même été réalisé un essai de chargement en vraie grandeur sur un groupe de 4 micropieux, pour mesurer l'incidence des effets de groupe sur la raideur. Un dispositif de chargement a été mis en place sur le site, dans l'intention d'évaluer un potentiel effet de groupe comportant quatre vérins, montés en parallèle et permettant d'appliquer un effort de 1000 kN sur chaque micropieux. L'essai a été concluant et n'a pas mis en évidence d'interaction significative entre les micropieux.

Puis les calculs ont été conduits avec une approche de plaque sur appuis élastiques, pour chacun des noyaux, les raideurs des appuis ayant été définies sur la base des essais de chargement. La Figure 2 montre un exemple de résultat pour l'un des noyaux avec charges concentrées, avec des tassements compris entre 1 et 4.5 mm, tout à fait compatibles avec ceux des pieux voisins.

C'est au total plus de 2700 micropieux qui ont été réalisés en complément du renforcement des pieux par Jet Grouting, et qui ont fait l'objet d'un suivi dans le cadre d'une mission géotechnique G4 selon la norme NF P94-500.

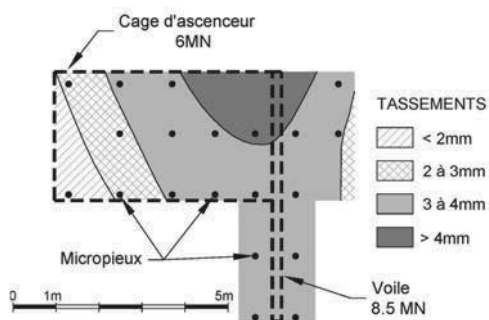


Figure 2 : Carte de tassements calculés

3 RÉHABILITATION DU SECTEUR EST DU CAMPUS DE JUSSIEU

Pour ce projet, la problématique était assez différente, dans la mesure où la construction nouvelle n'apportait pas de suppléments de charges sur les fondations par rapport à la construction ancienne. Les bâtiments datant des années 1970 se sont avérés fondés sur des pieux de 0.5 à 0.8 m de diamètre et d'environ 8 à 9 m de profondeur.

La Figure 3 montre que les pieux traversent 4 à 7 m de remblais et alluvions récentes limoneuses, puis 3 à 4 m d'alluvions anciennes sablo-graveleuses, de façon à venir « s'ancreur » sur l'horizon sous-jacent de calcaire grossier. Mais en pratique cet ancrage n'est pas toujours assuré, et la portance des pieux est donc variable.

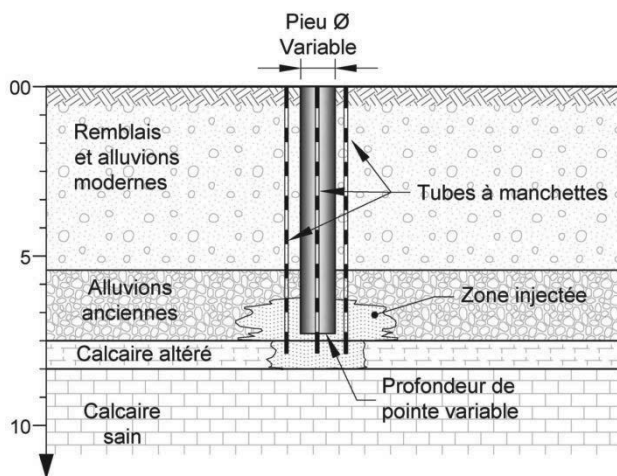


Figure 3 : coupe type des terrains et des principes de confortement

Ainsi dans le cadre de la réhabilitation de ce bâtiment, il a fallu « remettre à niveau » les niveaux de sécurité des fondations des différents appuis, ce qui a conduit à développer une méthodologie de projet suivant les différentes phases suivantes :

1. Des investigations des pieux existants, par exploitation des données d'archives et des puits de reconnaissance pour en déterminer le diamètre, complétées par méthodes géophysiques (impédance mécanique et sismique parallèle) pour en déterminer la longueur. Ces investigations ont montré que les pieux descendaient « plus ou moins » jusqu'au calcaire grossier, mais pas toujours avec un ancrage suffisant.

2. Des reconnaissances géotechniques et une réévaluation de la portance des pieux, avec les méthodes et moyens « modernes », afin de déterminer quels étaient les pieux à renforcer : essais pressiométriques de qualité, plots d'essais de traitement de terrain par injection sous la pointe, essais de chargements statiques de pieux avant et après injection, puis enfin calculs de pieux avec une approche en déformations et pas

seulement en capacité portante, et enfin comparaison entre les résultats des modélisations et ceux des essais en vraie grandeur.

Ces premières comparaisons montraient en général que le comportement réel des pieux avant injection était beaucoup plus favorable que prévu, ce qui a conduit à faire de nombreuses retro-analyses pour finalement conclure à la nécessité de majorer les hypothèses géotechniques de frottement latéral par rapport aux règles usuelles.

Par ailleurs lors des essais de chargement après injection en pointe de pieu, l'un des pieux d'essai s'est rompu, correspondant à un dépassement de la contrainte admissible du béton du pieu, tandis que l'autre a montré un comportement largement amélioré par rapport à celui avant injection.

Cet ensemble d'essais et modélisations a permis de préciser quels étaient les pieux à renforcer, à valider la méthode de renforcement par injection sous la pointe, et à définir des hypothèses de calculs réalistes pour le projet final.

3. une revue des différentes méthodes de renforcement des pieux existants, micropieux, jet-grouting, injection en masse. Une analyse des avantages et inconvénients de chaque procédé a été conduite selon une approche multicritère, intégrant les conditions de mise œuvre, les risques de désordres sur la structure existante lors de leur mise en œuvre, la fiabilité du résultat, et bien sûr les coûts et délais

Ces approches ont conduit à retenir finalement la solution de traitement par injection en masse (Figure 3), validée par des plots d'essai qui ont été rigoureusement suivis, et complétée par des essais de chargement des pieux avant et après injection.

L'ensemble de la démarche, avec notamment des approches du comportement des pieux en déformations, a permis de réduire au stade projet d'environ 30 % le nombre total de pieux à traiter (environ 480). Les études détaillées d'exécution devraient encore conduire à une réduction très importante de fondations traitées.

4 RÉHABILITATION EN DATA CENTER D'UN ANCIEN CENTRE DE TRI POSTAL À PANTIN

Il s'agit toujours de la même problématique que pour les projets précédents : réhabiliter un bâtiment existant R + 5 avec un niveau de sous-sol, construit en 1973 et d'une emprise de 160 x 50 m, fondé sur 250 pieux environ, et qui devait être transformé en Data Center, avec une forte augmentation des descentes de charges.

Le contexte géologique comporte environ 6 m de remblais et limons, surmontant 3 à 4 m de marnes infra-gypseuses puis le calcaire de Saint-Ouen, les pieux étant ancrés dans l'un ou l'autre de ces deux derniers horizons,

Comme pour les cas précédents, la démarche suivie a conduit à identifier la géométrie des pieux existants et leur capacité portante. En l'absence de données d'archives, il a été procédé à des investigations des pieux existants par forages et méthodes géophysiques, qui ont permis d'établir la base de toute l'approche de conception de réutilisation des pieux existants, à savoir leur géométrie : il s'avère que leur diamètre est de 1.2 m et que leur profondeur est variable entre 9 et 11 m environ, c'est-à-dire que leur pointe se situe au voisinage de l'interface Calcaire de Saint-Ouen / sables de Beauchamp.

La vérification de la résistance à la compression simple R_c du béton des pieux a été faite par prélèvement de carottes de béton et essais sur échantillons. On a ainsi pu vérifier que le béton des pieux était de très bonne qualité avec des valeurs moyennes de R_c de l'ordre de 40 MPa.

Enfin les analyses de la capacité portante des pieux existants ont été faites à partir de nouvelles reconnaissances géotechniques : il s'est avéré qu'une proportion importante des pieux ne présentait pas la sécurité réglementaire. En effet les premiers calculs montraient que, selon les normes actuelles, et avec les hypothèses géotechniques déduites des essais, le

bâtiment existant n'aurait pas du tenir pendant 40 ans sans déformations significatives, ce qui n'était à l'évidence pas le cas.

Nous avons donc été conduits à développer plusieurs approches en rétro-analyse (comparaisons entre les charges appliquées au cours de la vie de l'ouvrage et les capacités portantes théoriques, estimation du tassement réel subi par la construction...). Ces approches ont permis de réévaluer les propriétés géotechniques des terrains, et en pratique de les majorer par rapport aux résultats déduits des essais, ce qui a conduit à limiter le nombre de pieux existants à renforcer de façon lourde : la proportion de pieux qu'il a ainsi été décidé de renforcer est passée de 90% à 40 % environ.

Enfin nous avons examiné différentes conceptions de fondations pour la nouvelle structure, incluant soit des renforcements de pieux existants soit des fondations nouvelles, lorsqu'on avait un déficit de portance. Toutes ces solutions ont été étudiées en s'assurant de la compatibilité des déformations entre les différents types de fondations, et de l'incidence des phases provisoires (notamment la perte de portance provisoire lors de réalisation de jet-grouting, avant prise du coulis).

Le projet de base prévoyait de réaliser 4 à 6 micropieux autour de chacun des pieux présentant une portance insuffisante, avec une semelle de répartition liaisonnée aux pieux. Ces micropieux étaient destinés à reprendre tout ou partie de la différence de charge ramenée par la superstructure aux poteaux supportés par la fondation profonde. Cette solution bien que classique présentait néanmoins le désavantage :

- de multiplier les forages ;
- de nécessiter une semelle de forte épaisseur avec un ferrailage lourd afin de répartir correctement les charges et pouvoir ainsi solliciter les micropieux de rigidité bien moindre que celle des pieux.

Par ailleurs, elle ne permettait pas de tenir le planning imposé et dépassait le budget prévu initialement.

Ainsi, forts de l'expérience du chantier des entrepôts Calberson, Boulevard Mac-Donald à Paris, il a été décidé d'examiner une solution de confortement des pieux par jet-grouting. Après analyse de diverses solutions (solution mixte « micropieux + traitement de la pointe des pieux » - et solution de simple traitement en pointe), l'entreprise générale en charge de l'opération a opté pour la réalisation de deux colonnes de jet de renforcement de part et d'autres des fondations et de diamètre variable (entre 80 cm et 120 cm selon la profondeur) en prenant soin de rester au-dessus de la pointe des pieux existants selon le schéma de la Figure 4.

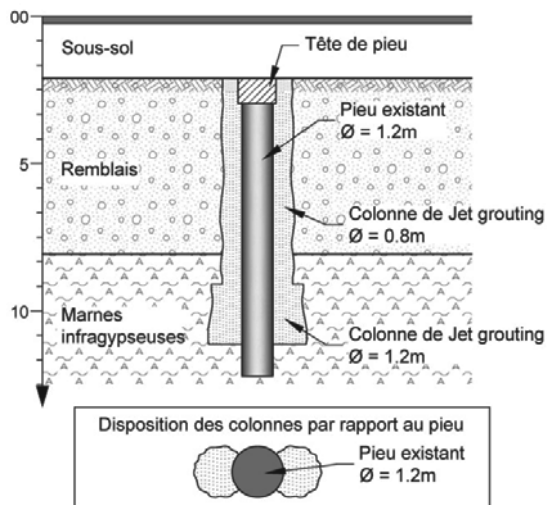


Figure 4 : principe du confortement par jet-grouting

Cette solution permettait de conserver la résistance en pointe pendant les travaux. Seule une perte de frottement a été

prise en compte dans les calculs pendant la phase de jet-grouting proprement dite.

Le calcul de la fondation définitive a été mené en considérant que l'ensemble « pieu + jet » formait un monolithe permettant de recalculer ainsi le pieu renforcé avec une surface en pointe et un périmètre frottant majoré tout en vérifiant la part de charge passant dans le jet et la part de charge passant dans le pieux pour chaque section, à partir des raideurs relatives de chacun des matériaux.

La réussite de cette solution tenait principalement dans le bon accrochage entre pieux et colonnes de jet. Le planning ne permettant pas de mettre en œuvre un essai de chargement préalable, des colonnes d'essais de jet ont été néanmoins réalisées sur des pieux abandonnés puis dégagées sur 3,00 m de hauteur pour un constat visuel du contact pieu-jet et du diamètre des colonnes, qui s'est avéré tout à fait satisfaisant. Le frottement pieu-jet adopté était au final de $q_s = 500$ kPa.

Cette solution novatrice a permis de réutiliser les fondations existantes après traitement en vérifiant à la fois la portance et la compatibilité des tassements avec les impératifs de déplacement imposés par la structure.

5 SYNTHÈSE ET MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

Le retour d'expérience de ces trois projets met en évidence une approche géotechnique spécifique, qui doit impérativement passer par les différents stades suivants :

- Etat des lieux et diagnostic des fondations existantes : type, géométrie, résistance intrinsèque, à partir de l'exploitation de données d'archives, d'investigations géophysiques (non destructives) et de reconnaissances destructives. Cette analyse doit intégrer également un diagnostic de l'état de l'ouvrage pour apprécier s'il a subi des dommages passés ;
- Analyse des descentes de charges sur les fondations, depuis l'état ancien jusqu'à la construction future, sans oublier les phases provisoires de chantier de réhabilitation ;
- Analyses géotechniques de la portance admissible des fondations existantes (intégrant les réglementations en vigueur), et donc des éventuels déficits de charge à reprendre pour l'état futur, ainsi que des déformations qu'elles ont pu subir par le passé ;
- Étude de différents scénarios pour la reprise de ces déficits, en envisageant plusieurs solutions combinant les fondations existantes, éventuellement à renforcer, et des fondations nouvelles à créer (pieux, micropieux) ; des plots d'essais en vraie grandeur sont souvent nécessaires à ce stade pour valider le choix des solutions et préciser le comportement en terme de raideur notamment ;
- Choix final des solutions, avec dimensionnement détaillé des différents systèmes : fondations anciennes conservées, renforcements et fondations nouvelles. Ce choix doit impérativement prendre en considération les conditions pratiques de mise en œuvre (travail en sous sols notamment), les compatibilités de déformations entre ces différents systèmes et l'histoire du chargement, y compris les phases intermédiaires de chantier.
- Et enfin un suivi géotechnique rigoureux du chantier, avec en particulier une attention toute particulière apportée aux mesures de déplacements de la structure conservée pendant l'exécution des fondations nouvelles et les traitements de terrain, afin de s'assurer que les travaux de fondations n'engendrent pas de désordres sur la structure existante.