

INTERACTION SOL-STRUCTURE AVEC MAINTIEN DES VESTIGES DE FONDATIONS DANS LES FRICHES INDUSTRIELLES

SOIL-STRUCTURE INTERACTION WITH REMAINS OF FOUNDATIONS FOR BROWNFIELDS

Stéphane BRÛLÉ¹, Fabien CHAMPMARTIN², Rodolphe LE MEAUX²

¹ MENARD, Orsay, France

² CITINEA, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ – La réhabilitation des friches industrielles amène à composer avec les vestiges de fondations présents dans les sols. La purge de ces vestiges n'est pas systématique à condition de vérifier leur interaction mécanique avec les nouvelles fondations. Pour le cas d'une centrale biomasse située à Lyon, cet article illustre les raisons du choix du compactage dynamique des sols ainsi que l'amélioration de l'empreinte carbone du projet.

ABSTRACT – The rehabilitation of brownfield sites leads to dealing with the remains of foundations still in place in the soil. The purging of these remains is not systematic provided that their mechanical interaction with the new foundations is verified. For a biomass power plant located at Lyon, this article illustrates the reasons for the choice of dynamic soil compaction as well as the improvement of the project's carbon footprint.

1. Introduction

Dans le référentiel français de réhabilitation des friches industrielles, les techniques d'amélioration et de renforcement des sols (Ménard, 1974 ; Ménard et Broise, 1975 ; Chu et al., 2009) ont pu offrir des solutions de fondation à des projets d'aménagement (Brûlé et al., 2010a, 2010b).

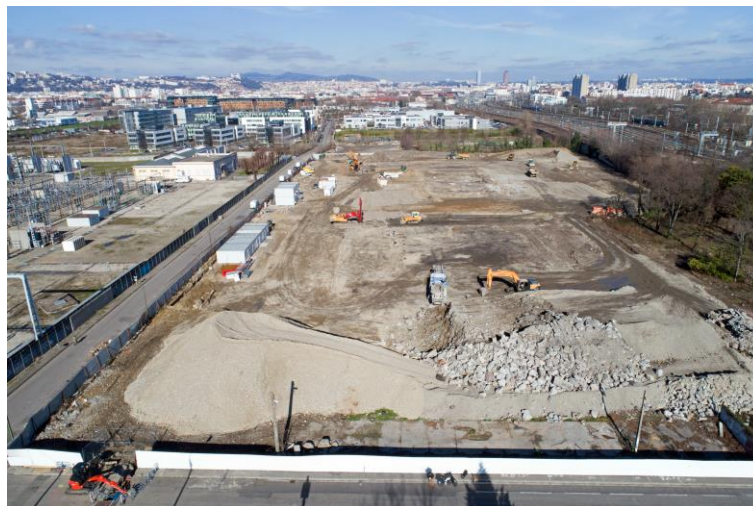


Figure 1. Vue d'ensemble du chantier de la centrale biomasse, pendant les phases de terrassement et compactage dynamique des remblais (Lyon, 8^{ème} arrondissement).

Pour l'aménageur, la faisabilité de bâtir sur des friches industrielles avec passif environnemental ou sur une zone urbaine déconstruite, nécessite de cerner les aléas du sous-sol : le degré d'hétérogénéité des sols et remblais en place en raison de différentes phases de remaniement lors de la construction et de la déconstruction, la présence partielle ou étendue d'éléments d'infrastructures dans le sol et pour finir, l'impact chimique des activités passées sur les terres et les eaux souterraines.

Dans une approche de valorisation des sols en place, il est possible de concevoir des solutions permettant de limiter les terrassements en déblais et maintenir les vestiges des infrastructures dans le sol. Cependant, cette approche nécessite de contrôler les interactions statiques (Brûlé et Cuira, 2018) entre les ouvrages neufs de surface et l'ensemble des éléments laissés en place dans le sol.

Le concept est illustré par le retour d'expérience acquis en la faveur d'un chantier réalisé en 2018 pour la construction d'une centrale biomasse dans le 8^{ème} arrondissement de Lyon (Figure 1). Pour ce projet les remblais ont été homogénéisés à l'aide d'une solution de compactage dynamique avec maintien en place dans le sol de certaines structures massives en béton armé, localisées à différentes profondeurs. Après une campagne de reconnaissance avec des méthodes géophysiques et mécaniques, l'équipe projet et travaux a opté pour un mode de fondation sur radier.

2. Le projet

Le projet de la centrale biomasse (Figure 2) représente une emprise au sol d'environ 6 000 m². Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur. À la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage (la cogénération). Le reste de la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et recircule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle.

L'ensemble a nécessité une amélioration des sols par compactage dynamique hormis une surface de 400 m² traitée en renforcement de sol et non développée dans cet article. Environ 9000 m² de voirie ont également traitées par densification avec un atelier de compactage dynamique à impacts rapides.



Figure 2. Inauguration de la centrale biomasse (Crédits : Dalkia).

3. Reconnaissances géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des vestiges en place

Les reconnaissances géotechniques ont mis en évidence des remblais hétérogènes issus majoritairement de remblais de démolition (tuiles, briques, mâchefers, etc.) et dont

l'épaisseur peut excéder les 3 m. Sous ces remblais, des argiles sableuses verdâtres ont été identifiées sur une épaisseur métrique et reposant sur des sables et graviers compacts. Quant à la nappe du Rhône, elle se situe vers -5 m par rapport à la surface de la parcelle.

Les valeurs des paramètres mécaniques du sol dans son état initial peuvent se résumer ainsi dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1. Paramètres de sol dans son état initial

Formations	Epaisseur	Pression limite nette p_i^*	Module Ménard E_M
	m	MPa	MPa
Remblais	0.5 à 4.5	0.3 à plus de 3	3 à plus de 30
Argiles sableuses vertes	2.0	<0.6	<10
Sables et graviers	>10	>1.3	>>10 sauf passages argileux à 6

L'un des enjeux concernait la juste évaluation du volume de vestiges d'infrastructure encore en place dans le sol, indépendamment des caractéristiques mécaniques variables des remblais de comblement (Figure 3).



Figure 3. Illustration de la diversité et de la densité de vestiges présents dans le sol.

Ainsi, le choix a été fait d'évaluer le « gisement » au moyen de prospection géophysique de surface avec un radar géologique Stream X 200 (8 antennes de 200Mhz) dont le principe est basé sur la réflexion des ondes électromagnétiques. Cette prestation a été confiée à l'entreprise INNOGEO.

Le contraste entre deux matériaux différents se traduit par une réflexion différenciée des ondes au niveau de leur interface. Dans notre cas d'étude, il s'agit de l'interface entre l'encaissant, soit le sol en place, et l'encaissé, c'est-à-dire les anciennes fondations et autre éléments indurés.

Des profils espacés de 2 m, restituant une image de 0.8 m de large ont été implantés sur l'ensemble de la zone en fonction des encombrements du site (Figure 4).

Les images sont capturées à différentes profondeurs, tous les 10 cm jusqu'à 2 m de profondeur, profondeur à partir de laquelle le signal n'est plus exploitable avec le dispositif retenu.

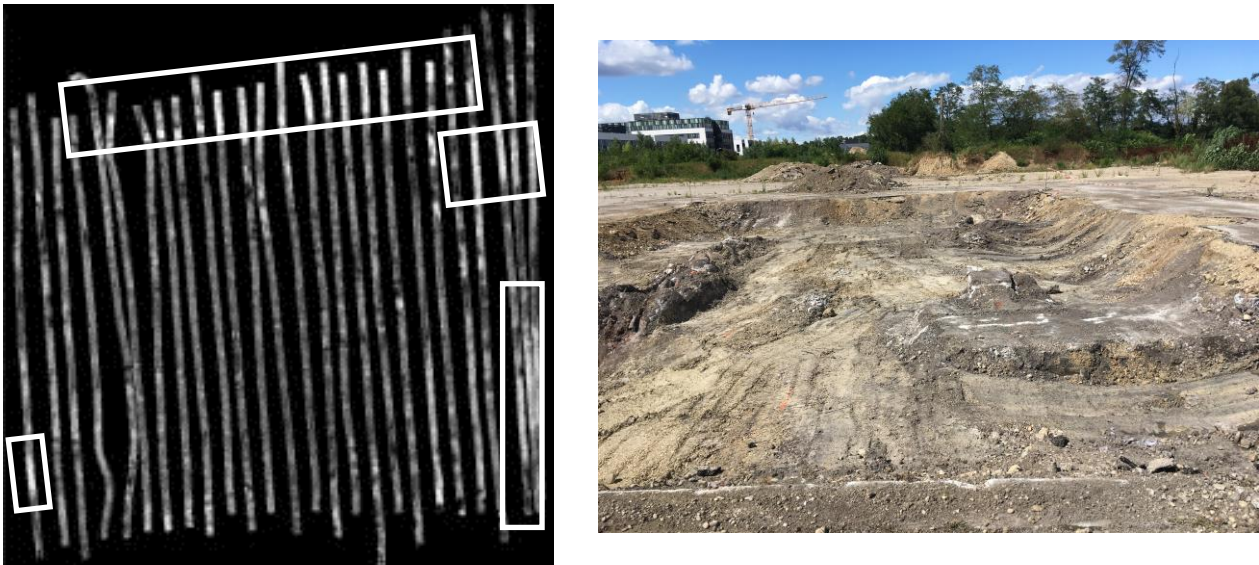


Figure 4. À gauche : image de radar géologique (INNOGEO) à une profondeur donnée. En encadré sur l'image sont localisées les zones suspectes de receler des vestiges de fondations en béton armé. À droite : reconnaissance visuelle des anomalies avec fouilles de dégagement.

Ces investigations géophysiques ont été complétées par des reconnaissances visuelles à l'aide de fouilles à la pelle mécanique (Figure 4).

Comme précisé dans la Table 1, les remblais peuvent atteindre 4.5 m sur ce site alors que la profondeur d'investigation du radar se limite ici à 2 m. Des vestiges « massifs » de type radier, enfouis à plus de 2 m de profondeur sont aussi réputés exister d'après l'étude historique. Au regard des résultats de la campagne de radar, même si celle-ci ne couvre pas la totalité de la surface (Figure 4, à gauche), il est apparu que les voiles enterrés pouvaient représenter une majorité de points résistants pouvant interférer avec des fondations superficielles. Les masses situées au-delà de 2 m, ont été considérées, dans ce cas particulier, comme moins « agissantes » mécaniquement sur les fondations neuves. Cette hypothèse a été confortée par les fouilles de reconnaissance (Figure 4, à droite).

En conclusion de cette phase de reconnaissance, il a été retenu que le volume de vestiges enfouis était très important et que la superposition des plans du projet avec les plans des ouvrages anciens, complétés par les reconnaissances complémentaires, conduisait à un aléa pour le projet. Soit il s'agissait d'un aléa sur le budget avec des travaux de purges, d'évacuation et de substitution par des remblais d'apport, soit d'un aléa technique avec des interactions de la structure du projet avec des « points durs » occasionnés par les éléments en béton proches de la sous-face des fondations.

4. Choix d'un mode de fondation adapté

Pour le mode de fondation, il a été retenu une solution de fondations superficielles pour l'ouvrage principal, accompagnée d'une réhausse du niveau du projet afin de bénéficier d'un niveau d'assise dans un remblai technique maîtrisé et un éloignement vertical vis-à-vis des « points durs » (Figures 5 et 6).

En complément de ce choix, il a été décidé d'homogénéiser les caractéristiques des remblais au moyen d'une technique de densification avec un compacteur à impacts rapides. Il s'agit d'un porteur disposant d'un mât sur lequel une masse d'environ 10 t coulisse sur une hauteur de 1 à 1.5 m pour frapper plusieurs dizaines de fois par minute, une enclume appliquée au sol.

Après densification, le module pressiométrique du remblai hétérogène a été porté à 20 MPa et le module des argiles a été limité à 6 MPa.

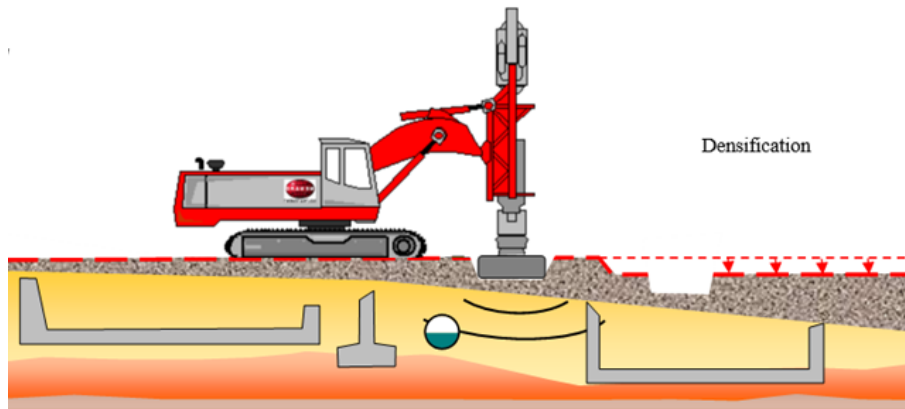


Figure 5. Principe de densification des sols par compactage à impacts rapides (C.I.R.).

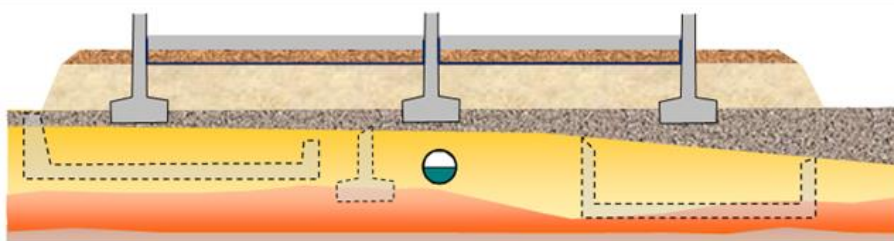


Figure 6. Réhausse du niveau fini du projet.

5. Principes d'interaction sol-structure dans le cas de vestiges enterrés

A l'issue du choix du mode de fondation, demeurait la question de l'interaction des fondations avec les éléments rigides présents dans le sol. Il a été décidé d'utiliser une démarche simplifiée, basée sur des outils analytiques existants pour apprécier l'influence des vestiges sur la raideur verticale du sol. Après densification, les problématiques de capacité portante des semelles, ont été résolus.

5.1. Volume d'influence d'une charge appliquée en surface

Sur le principe de la distribution de la contrainte verticale additionnelle $\Delta\sigma_v$ appliquée en surface sur un élément de fondation, il est aisé de définir les cas sensibles d'interaction (Figure 6). On utilise par exemple le cas théorique d'une semelle de fondation, considérée comme souple, sur un milieu élastique semi-infini, homogène et isotrope (Boussinesq, 1883) pour apprécier la profondeur à partir de laquelle, la charge de surface apporte moins de 10% de contrainte verticale supplémentaire sur le sol en place.

Dans le cas d'une fondation de type radier (Figure 6), on pourra retenir une largeur effective de l'application de la charge au sol à l'aide de l'expression suivante (Brûlé et Cuira, 2018) :

$$B_{eff} \approx 3 \sqrt[4]{\frac{EI_{radier}}{E_{sol}}} \approx 6 \text{ à } 9 H_{radier} \quad (1)$$

Avec I_{radier} qui est le moment quadratique à la flexion I_{Gy} , $E_{béton}$ le module d'Young du béton, E_{sol} celui du sol et H_{radier} l'épaisseur du radier.

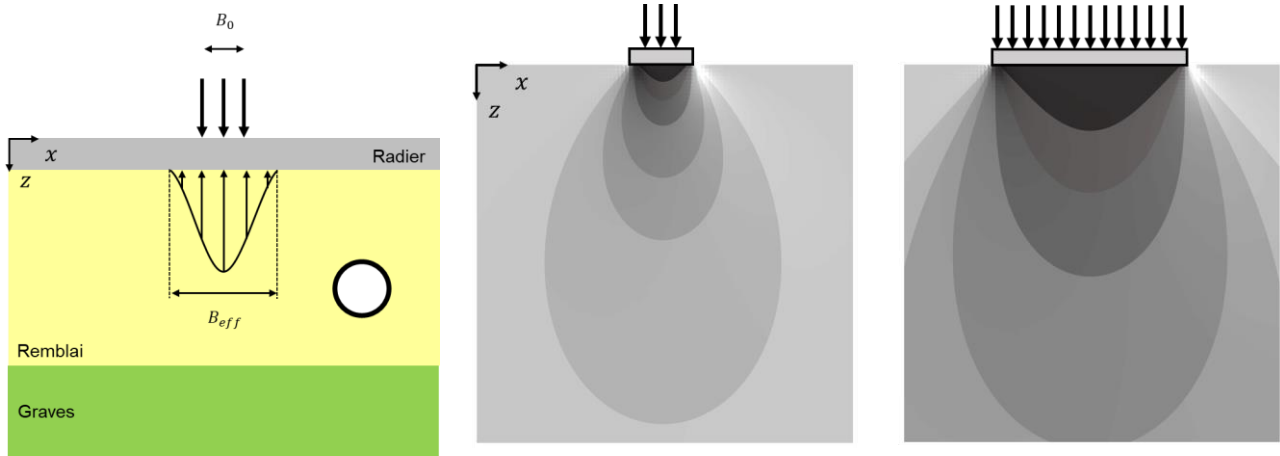


Figure 6. À gauche : influence d'un objet rigide enfoui sur la raideur verticale pour un radier infini. B_0 est la largeur d'application de la charge en surface de radier et B_{eff} est la largeur effective d'application de cette charge. À droite : variation de la contrainte verticale dans un massif élastique semi-infini sous l'influence d'un chargement linéaire de longueur finie et appliqué en surface.

Connaissant la valeur de B_{eff} , on recherche l'influence de la contrainte verticale en profondeur. La simplification consiste à considérer les charges localisées comme représentative d'un chargement sur une semelle fictive de largeur B indépendante de l'effet réelle d'une plaque appliquée au sol. Ainsi, on peut retenir une influence maximale en profondeur de l'ordre de $6B$ (Figure 6).

5.2. Choix d'un mode de représentation pour l'analyse interaction sol-structure (ISS) « points durs »

Avec un doublet de paramètres d'influence en profondeur et en largeur, on peut représenter l'ensemble des semelles fictives et des objets enfouis dans le sol en coordonnée (x, y) sur un même graphe adimensionnel avec x/H_{radier} en abscisse et z/B en ordonnée (Figure 7). Le centre du repère (O, x, y) est localisé au centre de la charge. On définit ainsi un volume de sol pour lequel l'interaction avec les points durs est à prendre en compte.

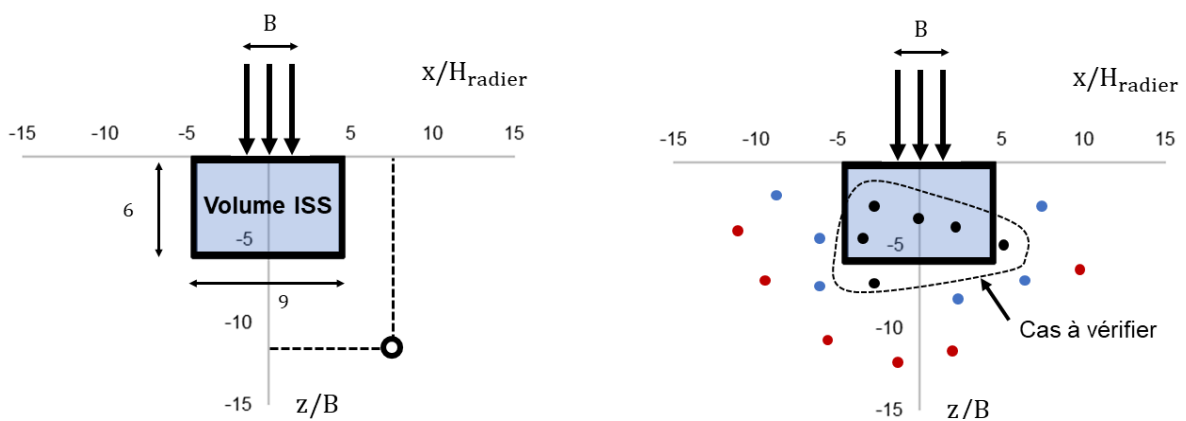


Figure 7. À gauche : diagramme simplifié pour représenter le volume d'influence en interaction sol-structure (volume ISS) des points durs sur la semelle fictive (rectangle bleu). À droite : distribution de l'ensemble des points durs pouvant interagir avec les fondations.

5.3. Points à vérifier

Il convient de vérifier si les éléments rigides présents dans le sol agissent sur la raideur verticale locale du sol, suite à une diminution des tassements des semelles fictives, ou bien induisent des moments additionnels sur les fondations du projet.

6. Bilan carbone

On se propose de comparer un bilan carbone simplifié pour une solution purge/démolition/évacuation des remblais versus une solution valorisation des remblais en place avec compactage dynamique. Il ne s'agit pas de l'évaluation pour l'efficacité du projet construit en activité mais uniquement de la phase préparation du sol aux fondations.

Nous considérons un cas théorique avec une excavation de 6 000 m² sur 1.5 m d'épaisseur en moyenne, une valorisation de 70% sur site, transport des 30% pour stockage à 30 km de distance et apport d'un volume équivalent de matériaux depuis un site localisé à 30 km également du chantier. Cette solution est environ 8 à 10 fois plus couteuse en émission de CO₂ comparativement à l'approche densification en surface.

7. Conclusions

La réalisation de projet sur d'anciens sites industriels contenant un volume important de vestiges d'infrastructures peut s'envisager en laissant ces derniers dans le sol, dans certains cas de figure et si le diagnostic environnemental l'autorise.

Pour les situations nécessitant une évacuation totale ou partielle des remblais et des volumes de matériaux issus de la démolition, la solution de densification des sols et des remblais depuis la surface libre est avantageuse en limitation des émissions en CO₂. En revanche, il est indispensable de vérifier les interactions mécaniques des vestiges laissés sur site, avec les fondations du projet.

8. Références bibliographiques

- Antoinet E., Brûlé S. (2009) Compactage dynamique de la plate-forme de maintenance des yachts de haute plaisance à La Ciotat. Revue mensuelle Travaux. N°863, 44-48.
- Boussinesq J. (1883). Comment se répartit, entre les divers points de sa petite base d'appui, le poids d'un corps dur, à surface polie et convexe, posé sur un sol horizontal élastique. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences. Paris, 96, 245-248.
- Brûlé S., Cuira F. (2018). Pratique de l'interaction sol-structure. Applications aux fondations et aux soutènements. AFNOR.
- Brûlé S., Javelaud E., Erbeja G. (2010a). Friches industrielles et amélioration des sols. Environnement et Techniques, 296, pp. 44-48.
- Brûlé S., Javelaud E., Meneveaux P (2010b). Réhabilitation des friches industrielles par les techniques Ménard d'amélioration des sols, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010, 7-9 juillet 2010, Grenoble, France, pp. 933-940.
- Chu J., Varaksin S., Ulrich K., Mengé P. (2009). Construction Processes, State of the Art Report. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, TC17 meeting ground improvement, Alexandria, Egypt.
- Ménard L. (1974). La Consolidation dynamique des sols de fondation. Annales de l'ITBTP, 320, pp.194-222.
- Ménard L., Broise Y. (1975). Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation. Geotechnique, Vol.25, pp.3-18.