

Amélioration de sol dans la masse

3.1 Principes généraux

Les retours d'expérience ont montré que les renforcements de sol qui ont permis d'augmenter la compacité du sol ont été les plus efficaces vis-à-vis de la liquéfaction.

On entend par traitement dans la masse un procédé qui permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du sol en place sur l'ensemble de la zone traitée, de la manière la plus homogène possible.

Ce traitement aboutit à une augmentation de la densité (figure 3.1), de la raideur et des résistances du sol traité, amenant de la sorte notamment à une diminution du potentiel de liquéfaction.

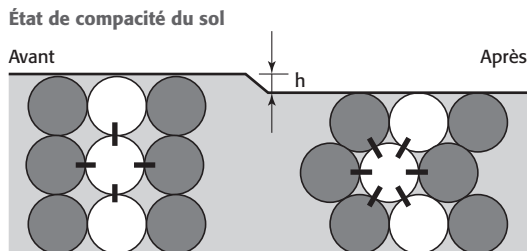


Figure 3.1 Réaménagement des grains avec diminution des vides

3.2 Choix du procédé d'amélioration des sols

La difficulté de ces solutions ne se situe pas dans le dimensionnement, puisque les règles usuelles de calcul des fondations superficielles sont utilisées, mais par contre dans le choix de la technique la plus appropriée et les moyens à mettre en œuvre pour arriver aux objectifs de compacité escomptée.

Le choix de la technique d'amélioration de sol dans la masse est étroitement lié à la granulométrie du sol à traiter et à son pourcentage de fines.

Les performances les plus élevées en termes de compacité sont atteintes dans les sols sans cohésion (sables, sables et graviers) traités par des techniques vibratoires (vibrocompactage, compactage dynamique, compactage par Induction Hydraulique®).

Leur domaine d'application (figure 3.2) correspond justement aux sols les plus susceptibles de se liquéfier lors d'un séisme.

Massarsch 1991 a proposé des critères basés sur les valeurs du pénétromètre statique pour déterminer les zones compactables et non compactables sous l'effet des vibrations.

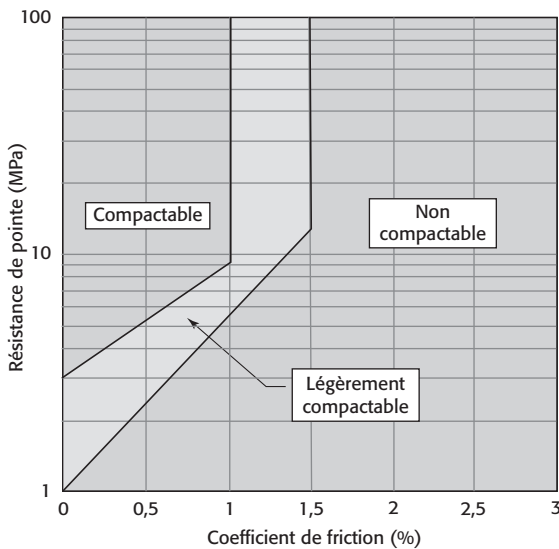


Figure 3.2 Compactage par vibration des sols basé sur le CPT (Massarsch 1991) [28]

Les techniques de vibration profonde (figure 3.3) avec un vibreur en profondeur sont largement utilisées, car elles sont souvent les plus efficaces et les plus économiques. Les équipements et les procédures sont décrits dans la norme NF EN 14731.

L'avantage de la technique de vibrocompactage réside dans le fait que l'on obtient une assise d'ouvrage d'un degré de qualité très élevé et bien maîtrisé, en ayant supprimé tout risque de déformation ultérieure lors d'un séisme. La source vibratoire étant située en pointe de l'outil, l'intensité du compactage est homogène sur toute la hauteur du traitement, pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de profondeur, à la différence du compactage dynamique où l'intensité du compactage est forcément décroissante avec la profondeur.

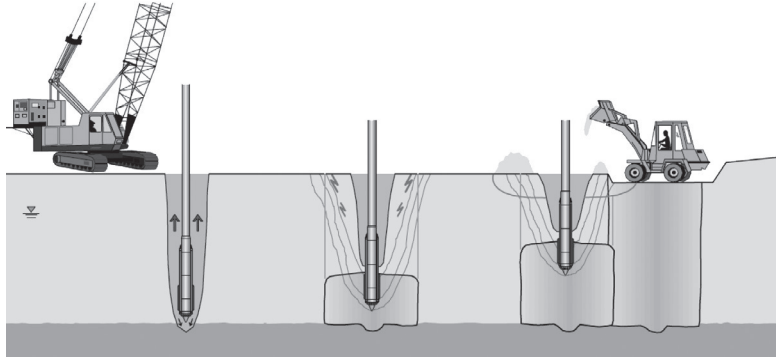


Figure 3.3 Procédure d'exécution du vibro-compactage par vibreur radial (source : Keller)

Le domaine d'application du vibro-compactage (figure 3.3) est limité aux sols granulaires comportant très peu de fines (passant à $80\ \mu\text{m}$ inférieur à 15 %), alors que le compactage dynamique (figure 3.4), du fait de l'effet de compression instantané généré par la chute de la masse, a un domaine d'utilisation qui s'étend sur les sols limoneux.

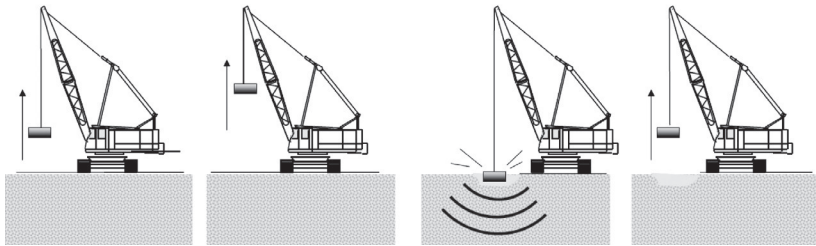


Figure 3.4 Procédure d'exécution du compactage dynamique

Dans la famille des procédés de vibration profonde, une autre méthode spécifique de compactage, appelée Induction Hydraulique® (figure 3.5), permet d'associer les vibrations (vibreux de profondeur) et la compression du sol (refoulement du gravier d'apport par la force d'activation exercée en pointe de l'outil). Les améliorations des caractéristiques mécaniques des sols frottant en place ou de substitution sont très élevées et permettent d'atteindre des portances de 0,5 à 1 MPa aux ELS.

Par contre, dans les sols cohésifs, les vibrations n'ont que très peu d'effet sur les augmentations de caractéristiques, surtout en présence d'eau. Dans ce cas, il faudra plutôt privilégier les procédés qui favorisent la compression des sols (injection solide, colonnes ballastées, préchargement avec ou sans drains). Les augmentations de caractéristiques mécaniques resteront cependant très en deçà des compacités que l'on peut atteindre avec des matériaux pulvérulents. Lorsque cette augmentation de compacité est insuffisante ou lorsque les sols sont hétérogènes (alternance de lentilles sableuses et sablo-limoneuses), il faudra s'orienter alors plutôt vers des techniques qui combinent les vibrations et le refoulement (par exemple colonnes ballastées, plots ballastés, injection solide vibrée).

En zone urbanisée, les vibrations générées par la chute de la masse du compactage dynamique et les vibreurs de vibrocompactage de forte puissance ne sont souvent pas acceptables au

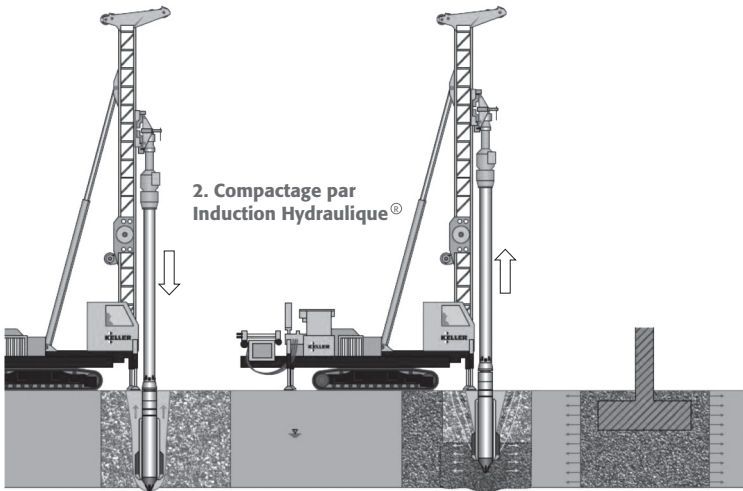


Figure 3.5 Procédure d'exécution de l'Induction Hydraulique® (source : Keller)

voisinage d'ouvrages existants. Dans un tel contexte, il est recommandé soit de prévoir des vibreurs de vibro-compactage moins puissants vibrant à des hautes fréquences entre 40 et 60 Hz et avec des amplitudes inférieures à 1 cm, soit d'envisager un renforcement de sol par injection solide (figure 3.6). Ce dernier consiste à injecter lentement du mortier avec une ouvrabilité très faible (slump inférieur à 10) par l'intermédiaire d'un forage de petit diamètre (10 à 15 cm), afin de comprimer le sol latéralement. Les avantages de cette technique résident dans la possibilité de travailler dans des endroits très restreints et même à l'intérieur d'ouvrages. Le forage de petit diamètre permet de traverser des horizons compacts ou des blocs, là où la technique de vibrocompactage obtient le refus.

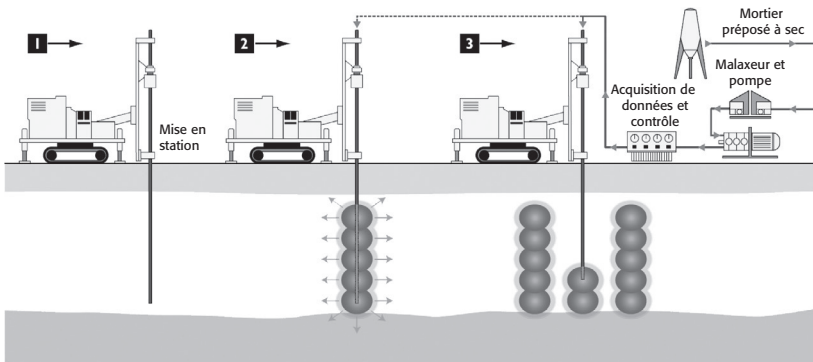


Figure 3.6 Procédure d'exécution de l'injection solide (Compactage Statique Horizontal, CHS®) (source : Keller)

3.3 Justification des améliorations de sol

3.3.1 Vérifications des modes de rupture

Les vérifications des modes de rupture des fondations superficielles sont établies à partir des paramètres du sol amélioré. Ces derniers sont déterminés à partir d'essais in situ réalisés après traitement.

Dans certains cas, si l'estimation de l'augmentation des caractéristiques de sol pour un maillage donné (figure 3.7) est difficile à appréhender (présence de fines ou d'éléments coquilliers), une planche d'essais peut être effectuée avant démarrage des travaux.

Une planche d'essais dans une zone représentative de l'ensemble du site permet non seulement au concepteur ou à l'entreprise d'identifier les difficultés potentielles dans l'exécution et dans les procédures de contrôle, mais également de vérifier les paramètres d'exécution nécessaires pour atteindre les performances du renforcement de sol recherchées.

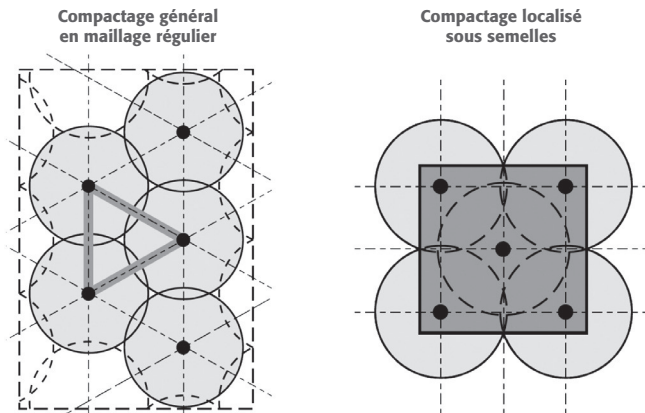


Figure 3.7 Maillage triangulaire de points de vibro-compactage avec leur zone d'influence (source : Keller)

Pour des sols pulvérulents (sables, sables et graviers), la compacité maximale obtenue peut être très élevée (q_c de 10 à plus de 30 MPa), indépendamment de la valeur de compacité initiale et de la teneur en eau. Cela n'est pas le cas pour des sols cohérents, pour lesquels une estimation des caractéristiques mécaniques après compactage est très difficile à appréhender. En plus du pourcentage de fines, le taux d'humidité du sol influe sur la possibilité de le compacter. Et, en général, pour les sols argileux très plastiques et saturés, une amélioration faible voire nulle n'est pas constatée, car l'effet de compression ne se produit pas (déformation à volume constant avec remontée de la plateforme). Dans certains cas, il est recommandé d'associer à ces procédés un réseau de drains, pour accélérer l'évacuation des surpressions interstitielles et réduire ainsi les délais pour la réception des travaux.

Quel que soit le procédé employé, l'augmentation des caractéristiques du sol amélioré n'est mesurable qu'après une période de repos d'une durée variable de plusieurs semaines, en fonction de la nature du sol. L'évaluation de « l'effet temps » peut demander la réalisation d'essais in situ à plusieurs reprises pour suivre l'évolution des caractéristiques à long terme.

Le succès de l'exécution d'une technique de renforcement de sol dépend étroitement de l'élaboration de spécifications claires, faisables et raisonnables et dans l'établissement de procédures de contrôle de la qualité.

Il est important de se familiariser avec les limites qui peuvent être raisonnablement atteintes avec des technologies courantes et de dimensionner ainsi le projet, en conformité avec ces limites.

L'estimation des augmentations de caractéristiques de sol se base sur les principaux paramètres suivants :

- la nature des sols ;
- le taux d'humidité des sols ;
- la stratigraphie ;
- le type de procédé (vibration ou compression du sol ou les deux à la fois) ;
- le maillage ;
- le volume de matériaux refoulés dans le sol pour le comprimer ;
- la perméabilité horizontale et verticale.

3.3.2 Réduction du potentiel de liquéfaction

Afin de vérifier que l'objectif fixé vis-à-vis du risque de liquéfaction a été atteint, on réévalue ce risque en utilisant les paramètres du sol amélioré. Ces derniers seront déduits des essais de contrôle. On associe parfois l'amélioration de sol à des drains, qui peuvent permettre également de réduire le risque potentiel de liquéfaction si on s'assure de leur pérennité au cours de la vie de l'ouvrage. C'est pourquoi seuls les drains de sables ou de graviers, ou des drains tubulaires spécifiquement conçus pour cette application, peuvent être envisagés, en excluant les drains plats préfabriqués.

3.4 Dispositions constructives

Le débord de traitement doit permettre d'assurer une homogénéité des caractéristiques mécaniques et du comportement du sol en limite d'ouvrage, ainsi que la stabilité de l'ouvrage.

Sans étude particulière, les débords suivants sont préconisés :

- sol ne présentant pas de risque de liquéfaction :
 - a priori une maille élémentaire,
 - une étude particulière peut dans certains cas permettre de justifier l'absence de débord ;
- sol présentant un risque de liquéfaction :
 - largeur du débord = moitié de la profondeur de la base de la couche liquéfiable,
 - une étude particulière peut, dans certains cas, permettre d'ajuster cette largeur de débord avec un minimum d'une maille.

Commentaire : Dans certains cas, la limite de propriété ou la présence d'existants ne permet pas ou que partiellement la réalisation d'un débord. Une étude détaillée devra alors vérifier la stabilité et estimer les déformations liées à cette liquéfaction, pour définir ensuite les dispositions constructives à envisager. Si les tassements en périphérie de l'ouvrage risquent d'être préjudiciables pour celui-ci, des injections par imprégnation peuvent être envisagées dans les sables, des injections de type Compactage Statique Horizontal ou une paroi imperméable.