

Chapitre 1. Pré chargement - Drains verticaux

1. Le pré-chargement
2. Les drains verticaux
 - 2.1 Les drains de sable
 - 2.2 Les drains préfabriqués
3. Méthode de calcul pratique des réseaux de drains verticaux
4. Etude d'un projet de drains verticaux en Tunisie
5. Contrôle et suivi des projets de drains verticaux
6. Annexe

Introduction : Le pré-chargement et les drains verticaux sont deux méthodes d'amélioration des sols compressibles d'usage très courant en pratique. Nous en faisons une présentation succincte en mettant l'accent sur les aspects d'ordre pratique, de la conception jusqu'au contrôle et suivi des projets.

1. Le pré chargement

Lorsqu'il s'agit de construire sur un sol saturé de faible portance et (ou) relativement compressible le pré chargement (généralement fait par un remblai) est la technique la plus simple qui permet d'assurer une amélioration de la résistance au cisaillement à court terme. En fonction du planning d'exécution du projet étudié le pré-chargement, sous une contrainte $\sigma_0 + \sigma_{préch}$ (P_1 sur la figure 1.1), dure quelques mois pendant lesquels le processus de consolidation primaire (le sol étant saturé) s'amorce mais sans atteindre un degré de consolidation relativement important, noté U (supérieur à 50%). Deux conséquences en résultent :

- a) l'augmentation de la cohésion non drainée C_u pour un état de consolidation donné. Cette augmentation est estimée à partir de la connaissance du paramètre d'augmentation de la cohésion drainée, noté $tg \lambda_{cu}$, qu'on déduit à partir des résultats d'un essai de cisaillement consolidé non drainé. Néanmoins, le prélèvement d'échantillons du sol avant et après pré chargement sur lesquels on réalise un essai de cisaillement non consolidé non drainée conduit à l'amélioration réelle de l'augmentation de la cohésion non drainée. Cette estimation est faite comme suit :

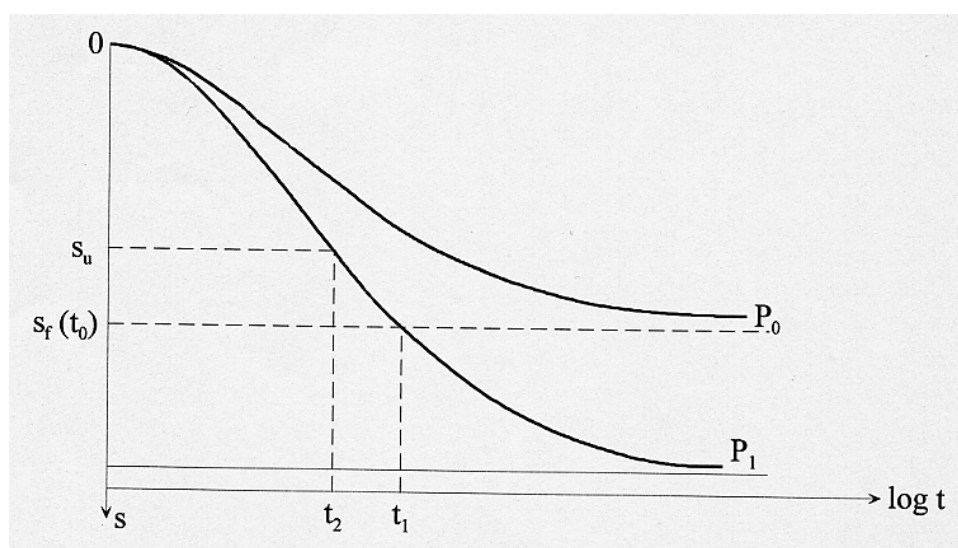


Figure 1.1 : Principe du pré-chargement

$$C_u^1 = C_u^0 + U(C_u^f - C_u^0)$$

où : C_u^f désigne la cohésion non drainée en fin de consolidation qu'on détermine à partir d'un essai consolidé non drainé (CU) sous la contrainte $\sigma_c = \sigma_0 + \sigma_{préch}$.

- b) La réduction du tassement du sol sous l'action du pré-chargement, ce qui permet d'atteindre plus facilement la valeur requise du tassement admissible de l'ouvrage ou, autrement, d'avoir un tassement résiduel plus faible lors de la mise en service de l'ouvrage.

Toutefois l'inconvénient majeur du pré-chargement, sans tenir compte du coût d'exécution, demeure la durée qu'il nécessite pour atteindre l'amélioration escomptée. Outre la durée du pré-chargement, le temps d'exécution du remblai de pré-chargement et la durée que nécessite sa suppression (à la fin de la durée fixée) ne permet d'envisager le début des travaux qu'après un temps de consolidation non négligeable (six mois au minimum) qui est parfois même comparable à celui de l'exécution de l'ouvrage. Pour cette raison l'idée d'accélérer la consolidation du sol compressible s'est avérée primordiale en vue de débiter la construction de l'ouvrage dans un délai relativement court, chose qui a contribué à l'usage des drains verticaux.

Le pré-chargement par étapes :

Lorsqu'il s'agit d'édifier des remblais de grande hauteur (> 6m) sur une argile molle très compressible le chargement doit être fait par étapes pour éviter de provoquer la rupture par poinçonnement du sol.

En vue d'accélérer la consolidation du sol on fait recours, en présence d'un chargement, davantage aux drains verticaux dont la présence, au sein des sols compressibles, permet de créer l'écoulement horizontal qui se fait sur une distance petite (par rapport à l'épaisseur de la couche à améliorer) où la perméabilité horizontale du sol est généralement supérieure à sa perméabilité verticale. La contribution simultanée de ces deux facteurs contribue, en particulier, à l'accélération de la consolidation du sol.

2. Les drains verticaux

L'ouvrage « Théorie et pratique des drains verticaux » (Magnan, 1983) constitue une bonne référence pour les ingénieurs géotechniciens soucieux d'étudier l'amélioration d'un sol relative à l'exécution d'un réseau de drains verticaux. En effet, les méthodes d'exécution des drains aussi bien de sable que préfabriqués y sont clairement détaillées. Dans le présent document on se limitera à quelques rappels sommaires sur ce point. Néanmoins, la comparaison entre les deux familles de drains verticaux des points de vue technique et économique nécessite de faire davantage de commentaires notamment quant à leur validité au cas étudié.

Les deux familles de drains présentent des avantages complémentaires (ou parfois atteints à des degrés différents) à savoir :

- Les drains préfabriqués sont d'exécution rapide et permettent d'accélérer fortement la consolidation ;
- Les drains de sable contribuent à la réduction du tassement et offrent souvent une marge de profondeur variable, qu'il n'est pas possible de réaliser avec des drains préfabriqués.

2.1 Les Drains de sable

On se limitera dans ce paragraphe au développement de deux points essentiels : le choix du matériau constitutif du drain et son mode d'exécution qui conditionnent fortement l'efficacité du drain pour les rôles auxquels il a été choisi.

2.1.1 Choix du matériau drainant :

Pour que le drain puisse jouer son rôle d'évacuateur d'eau la granulométrie de son matériau constitutif doit répondre à des spécifications relatives à la « condition de filtre » qui est directement liée à la granulométrie du sol à consolider.

Dans la suite les indices « filtre » et « sol » désigneront respectivement le matériau constitutif du drain et le sol à améliorer.

A propos des barrages en terre, l'avis de K. Terzaghi était que :

- un matériau cohérent comprenant au moins 15 % d'argile ne peut colmater un filtre de $D_{15} \approx 0,1 \text{ mm}$;
- pour un milieu pulvérulent, il faut respecter la condition : $\frac{(D_{15})_{\text{filtre}}}{(D_{85})_{\text{sol}}} = 9$

que J. Kerisel propose de retenir en la complétant par une condition sur la forme de la courbe granulométrique : si D_{100} est la dimension des plus gros grains du filtre, les grains de diamètre D sont en pourcentage $\sqrt[3]{\frac{D}{D_{100}}}$.

Bertram (1940) a étudié en laboratoire, sous la conduite de Terzaghi et Casagrande, la validité des conditions de filtre qui avaient été suggérées par Terzaghi ; il a établi les critères suivants:

$$\frac{D_{15}(\text{filtre})}{D_{85}(\text{sol})} < 4 \text{ à } 5 < \frac{D_{15}(\text{filtre})}{D_{15}(\text{sol})}$$

Pour les filtres à granulométrie uniforme, les conditions à respecter sont encore différentes des précédentes (« Hydraulique des sols », Bulletin de liaison de LCPC, avril 1970) :

- l'U.S. « Bureau of Reclamation » recommande pour le cas des drains sous les barrages en terre l'utilisation du critère :

$$5 < \frac{(D_{50})_{\text{filtre}}}{(D_{50})_{\text{sol}}} < 10$$

- Lackner (1966) conseille, pour la protection des murs de quai, le critère :

$$\frac{(D_{50})_{\text{filtre}}}{(D_{50})_{\text{sol}}} = 3 \text{ à } 4.$$

On remarque que les conditions de filtre dépendent également du type de projet.

Pour conclure : Un drain de sable a une durée de vie limitée. C'est essentiellement le colmatage par le sol environnant qui risque de réduire notablement cette durée de vie, voire la condamner. Par conséquent, un drain sera qualifié de « bien mis en place » lorsqu'il fonctionne durant toute la phase de consolidation primaire du sol à améliorer.

2.1.2. Procédés d'exécution :

Il existe plusieurs procédés d'exécution des drains de sable. On se limitera à l'illustration de quatre méthodes d'exécution qui ont été suffisamment pratiqués dans divers projets, il s'agit des méthodes:

- du tube fermé à pointe perdu (Fig. 1.2);
- du tube fermé à pointe récupérable (Fig. 1.3);
- du tube fermé battu avec un mandrin intérieur (Fig. 1.4);
- de la tarière continue à âme pleine (Fig. 1.5).

Les détails d'exécution relatifs à ces méthodes sont présentés dans Magnan (1983).

L'exécution d'un drain de sable nécessite dans plusieurs cas à refouler le sol en place (ou l'excaver) dont la perméabilité est souvent très faible. Ensuite on procède au remplissage du forage par le sable sélectionné.

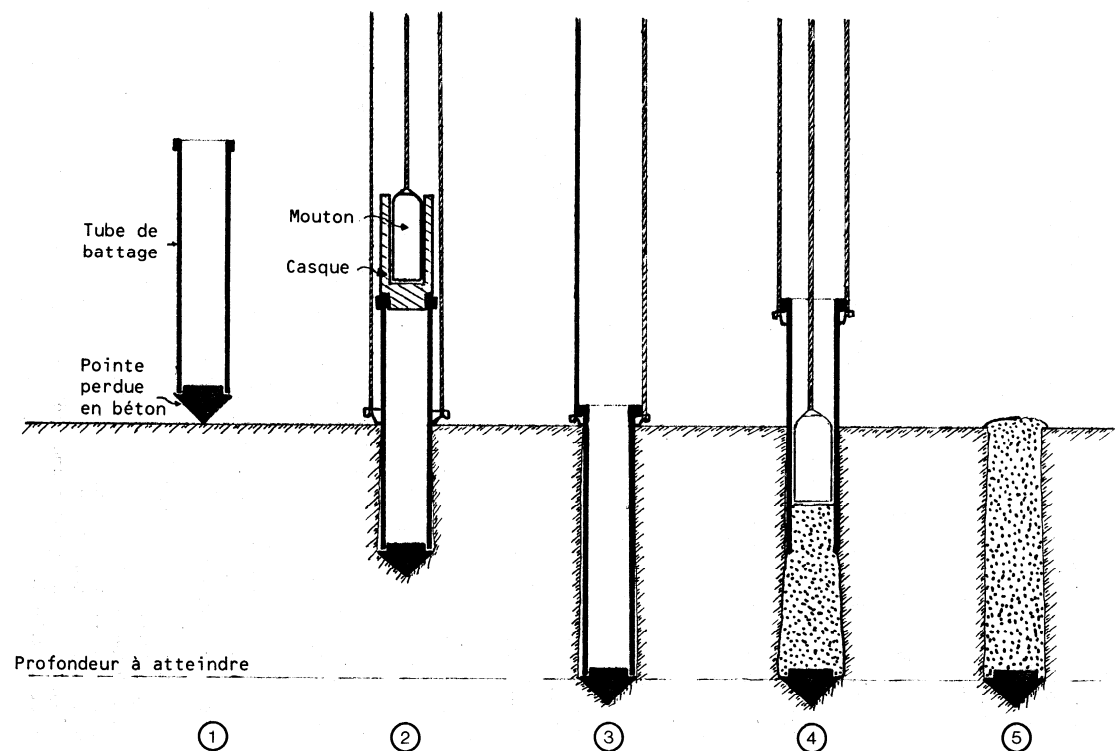


Figure 1.2 : Exécution par la méthode du tube fermé à pointe perdue, Magnan (1983).

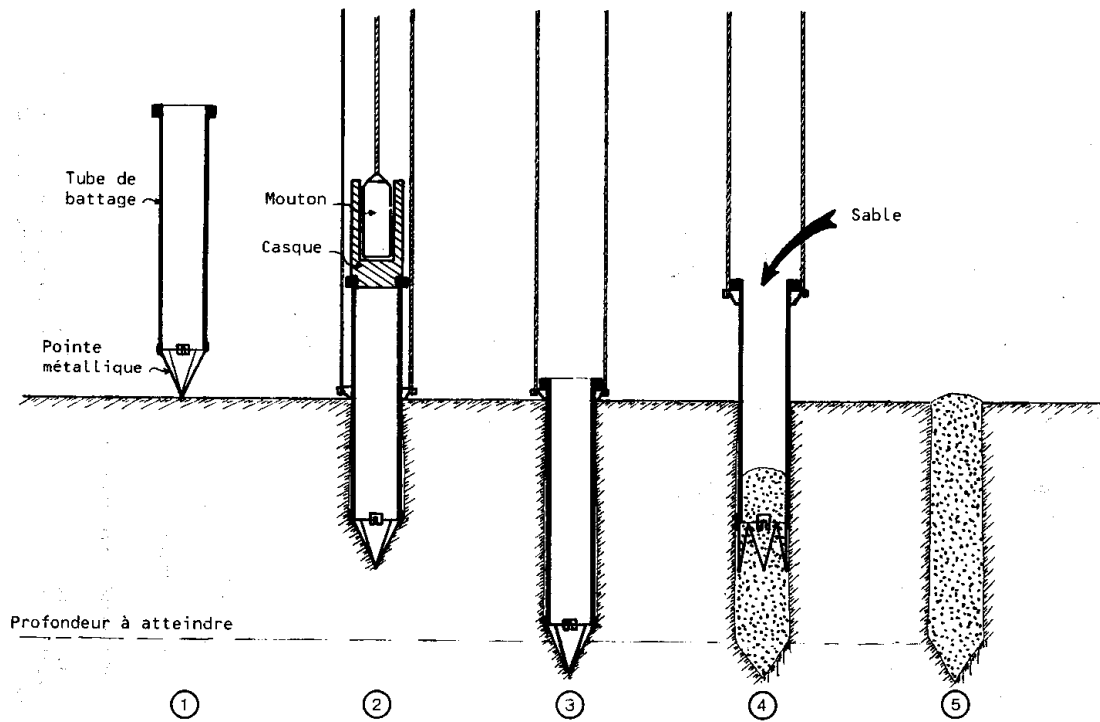


Figure 1.3 : Exécution par la méthode du tube fermé à pointe récupérable, Magnan (1983).

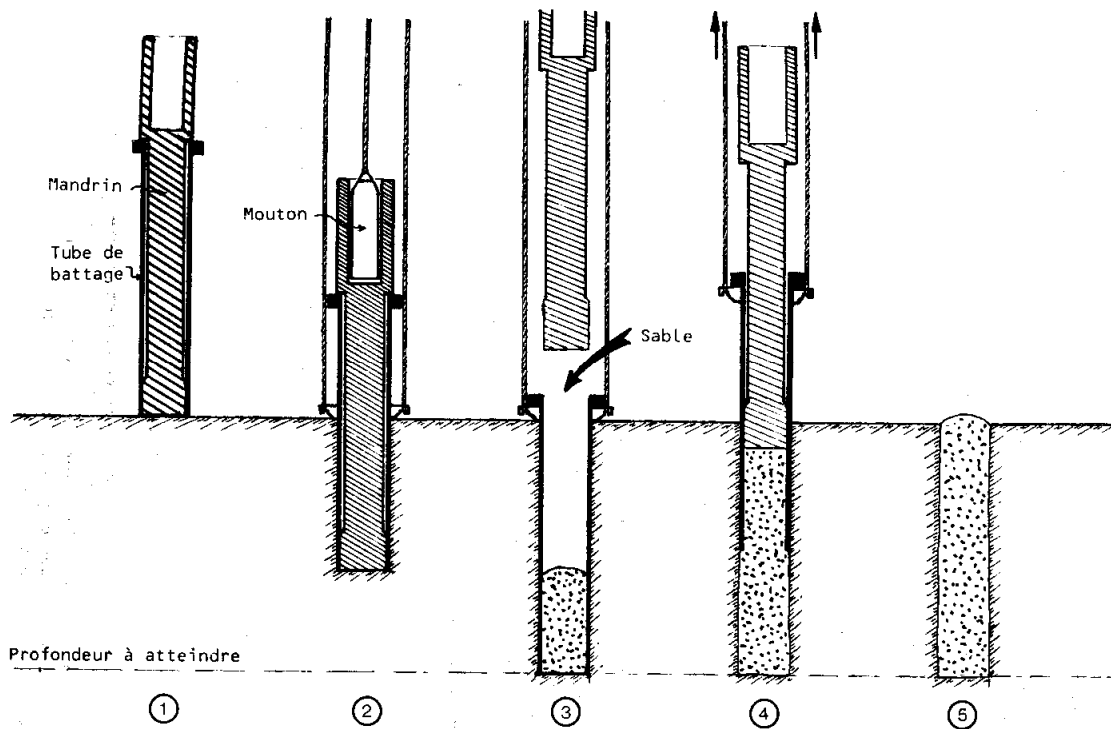


Figure 1.4 : Exécution par la méthode du tube fermé battu avec un mandrin intérieur, Magnan (1983).

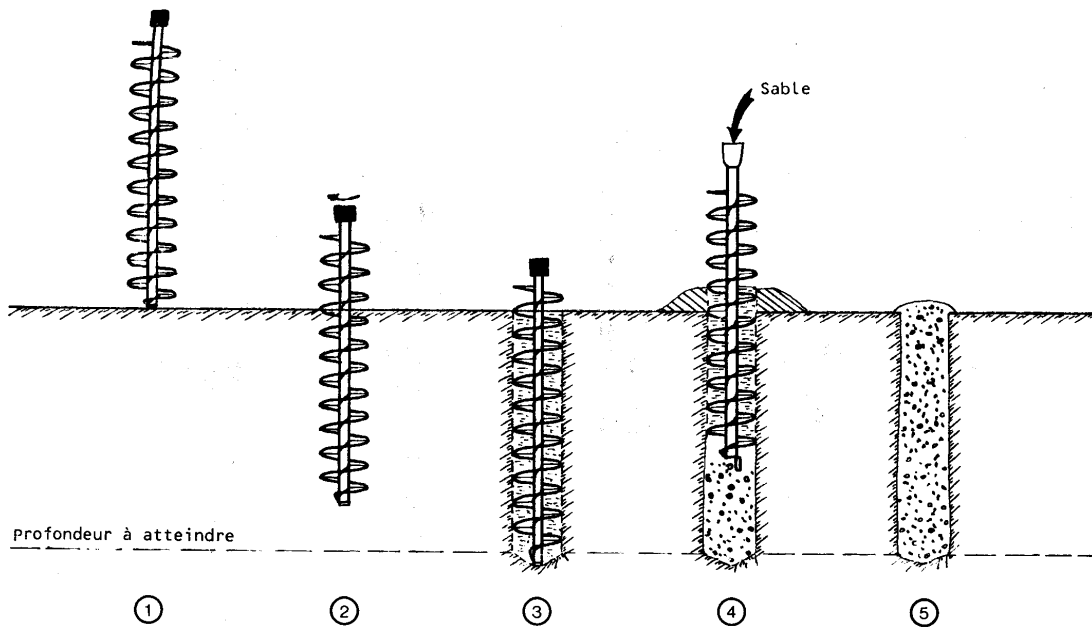


Figure 1.5 : Exécution à l'aide d'une tarière continue à âme pleine, Magnan (1983).

2.2 Drains verticaux préfabriqués

La commercialisation des géo-composites a permis notamment de mettre au point des produits, d'une part, dont le pouvoir drainant est élevé et, d'autre part, qui assurent le rôle de filtre en empêchant le transport des fines du sol à améliorer. Ce sont les deux performances à garantir lors de l'exécution d'un chantier de drains verticaux. Il s'agit bien sur des drains verticaux préfabriqués (DVP). Sur la figure 1.6 on présente les phases d'exécution d'un drain de carton. A la profondeur fixée le drain est foncé à l'aide d'un sabot qui peut avoir différentes formes (Fig. 1.7)

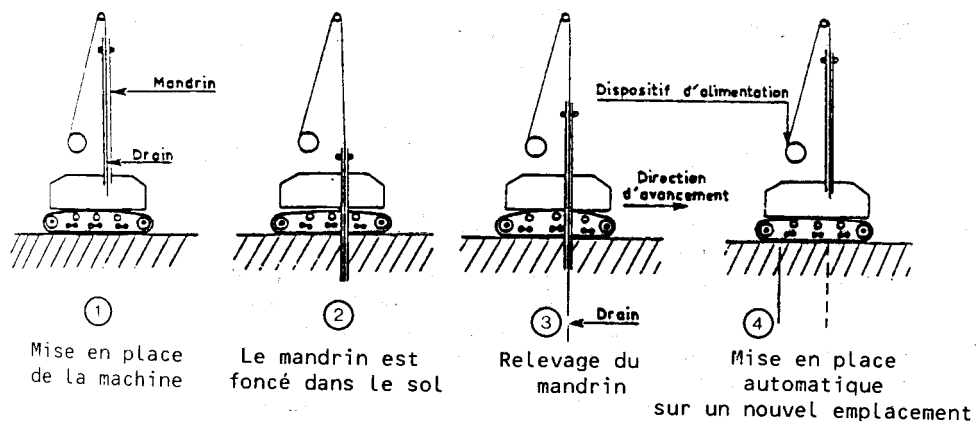


Figure 1.6 : Phases de mise en place des drains de carton, Magnan (1983).

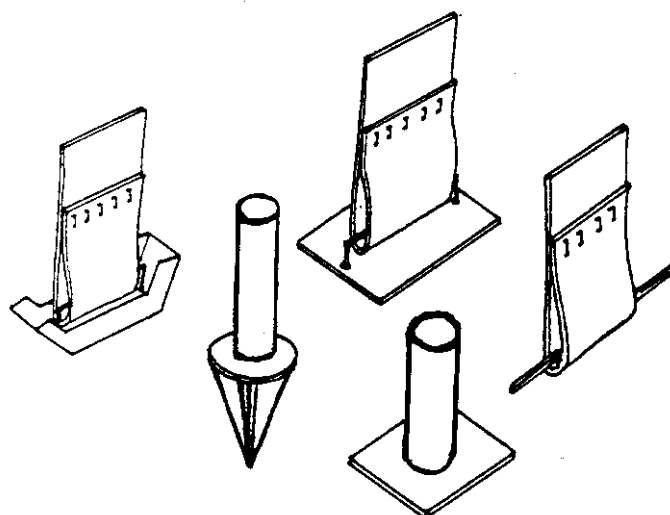


Figure 1.7. Quelques formes de sabots utilisés pour le fonçage des drains préfabriqués, Magnan (1983).

Pour assurer l'efficacité des drains préfabriqués en terme de drainage au sein du maillage retenu (triangulaire, carré), pour l'exécution des drains, la distance entre les DVP ne doit pas excéder les deux mètres.

3. Méthode de calcul pratique des réseaux de drains verticaux

Longueur des drains : La discussion de son choix n'est pas souvent évoquée dans la littérature. D'ores et déjà on peut avancer qu'elle dépend de l'épaisseur de la couche molle et du niveau de contrainte à transmettre par l'ouvrage. Mais on doit toujours garder à l'esprit que le choix d'un type de drains reste dicté par le matériel qu'on peut acquérir pour l'exécution. Cependant dans le cas d'une couche très épaisse, on optimisera la longueur des drains en fonction des tassements estimés pour les différentes couches (ou sous-couches) du sol. En quelque sorte la longueur est fixée de façon à ce que le tassement des couches sous-jacentes demeure acceptable après l'accélération de la consolidation dans les couches traversées par les drains.

Efficacité des drains verticaux : Elle dépend de la méthode d'exécution retenue et du type de sol où le drain sera mis en place. Dans tous les cas de traitement, les spécialistes sont unanimes sur le fait que le sol environnant subit une perturbation suite à l'exécution du drain. Selon le cas, cette perturbation peut avoir une influence sur le coefficient de consolidation et par suite l'efficacité du rôle du drain peut être mise en cause.

Deux facteurs permettent de qualifier l'efficacité d'un système drainant :

- l'efficacité est d'autant plus grande que le rapport de la charge atteinte par addition de la surcharge à la pression de pré-consolidation est plus élevé.
- L'efficacité est d'autant meilleure que le rapport du tassement de consolidation primaire au tassement total est proche de 1.

3.1 Méthodes de calcul

Barron (1948) a donné la solution du problème de la consolidation radiale seule dans une cellule élémentaire (de forme cylindrique) sous un chargement instantané. Tous les paramètres physiques et mécaniques du sol sont supposés constants. Des théories plus récentes Hansbo (1979), Chaput et col (1975) permettent de prendre en compte: un

chargement linéaire en fonction du temps Chaput et Thomann (1975), l'effet du remaniement périphérique autour de drain, etc .

Toutes ces méthodes d'étude utilisent le coefficient de consolidation radiale noté C_r , qui régit l'écoulement radial dans le volume d'efficacité du drain. La mesure de C_r soit en laboratoire soit in situ est très importante, puisqu'elle conditionne très largement les résultats des calculs.

3.1.1 Calcul du degré de consolidation :

Pour les DVP, Hansbo (1979) a proposé pour le calcul du degré de consolidation radiale l'expression suivante :

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8T_r}{F}\right)$$

avec :

Le facteur temps T_r :

$$T_r = \frac{4C_r t}{D_e^2}$$

et $F = F(n) + F_s + F_r$

$$n = \frac{D_e}{d_w}$$

D_e est le diamètre équivalent de la zone d'influence du drain dont le diamètre est d_w .

Si on désigne par L l'espacement entre les drains on aura, par exemple,

$D_d = 1,05L$ pour un maillage triangulaire des drains ;

$D_d = 1,13L$ pour un maillage carré des drains ;

où :

$F(n)$ est le facteur correspondant à la théorie de Barron (1948) dont l'expression est :

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \text{Log}n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

F_s est un facteur qui tient compte de l'espacement entre les drains ;

F_r est le facteur qui tient compte de « well resistance ».

Carillo (1942) a montré que le degré de consolidation tridimensionnelle (Fig. A1.3) s'obtient facilement à partir des solutions de Terzaghi (1935) et celle de Barron (1947) ou Hansbo (1979), comme suit :

$$1 - U = [1 - U_r][1 - U_v]$$

Où U est le degré de consolidation globale.

En pratique, le dimensionnement des réseaux de drains verticaux est généralement effectué à l'aide des abaques de Barron (Fig. A1.1).

4. Etude d'un projet de drains verticaux en Tunisie : Echangeur de La Charguia

L'ouvrage est situé sur la voie express « Tunis-Bizerte », et assure la liaison entre la cité olympique et celle de la charguia. Une vue en plan de l'échangeur est présentée sur la figure

1.8. Les remblais d'accès ont une épaisseur H_r , variable entre 3,5 et 7,5 m. Ils sont à édifier sur une succession de couches de sable fin à moyen (faiblement à moyennement compressibles) alternées avec des couches de vase et d'argile très compressibles. L'exécution de ce projet s'est déroulée entre 1996 et 1999.

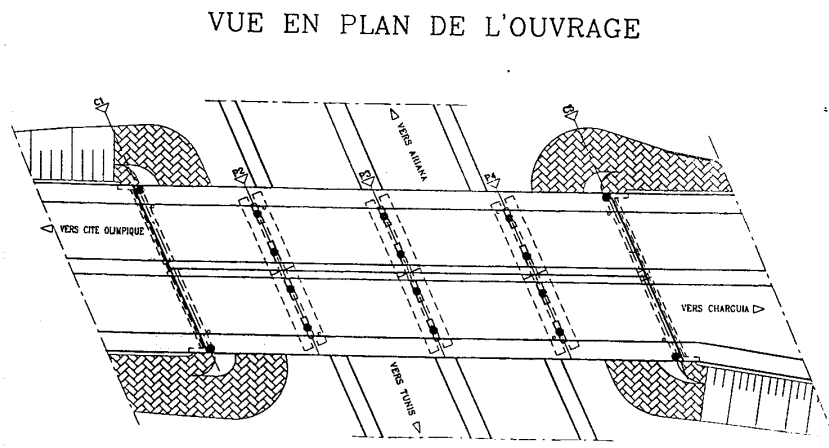


Figure 1.8 : Echangeur de La Chargaia

Le problème : Les tassements estimés par les méthodes pressiométrique et oedométrique pour les deux culées sont inadmissibles. Les temps nécessaires pour atteindre 50% et 90% de consolidation des couches compressibles sont respectivement de 200 ans et 750 ans environ, Hamdi et Hedhli (2002).

La solution « drains verticaux de sable » a été retenue pour accélérer la consolidation des couches compressibles. Le sable constitutif des drains est issu de la carrière de Borj Hfaiedh dont la courbe granulométrique s'insère bien dans le fuseau des matériaux filtrants (Fig. 1.9). Les paramètres du sable en question sont les suivants :

$$D_{15} = 0,22mm ; D_{40} = 0,4mm ; D_{60} = 0,48mm ; D_{85} = 0,06mm .$$

Equivalent de sable : 50% ; Angle de frottement interne : 38° (essai à la boîte de cisaillement) et 36° (essai triaxial). Module de Young (estimé à partir des courbes « effort-déformation » des essais triaxiaux): 300 bars. Les paramètres de ce sable retenu vérifient les conditions d'adaptation au terrain à améliorer, de perméabilité et de granulométrie.

Les drains ont un diamètre de 30 cm, ils sont répartis selon un maillage triangulaire, équidistants de 3m. La longueur des drains est de 32 m qui correspond à la profondeur suivant laquelle se produirait environ 70% du tassement total. Une couche de 50 cm d'épaisseur constituée par le sable des drains a été exécutée pour jouer le rôle de tapis drainant. La méthode d'exécution des drains est du type « forage rotatif par circulation directe d'eau pour évacuation des débris ». Les phases d'exécution sont représentées sur la figure 1.10 .

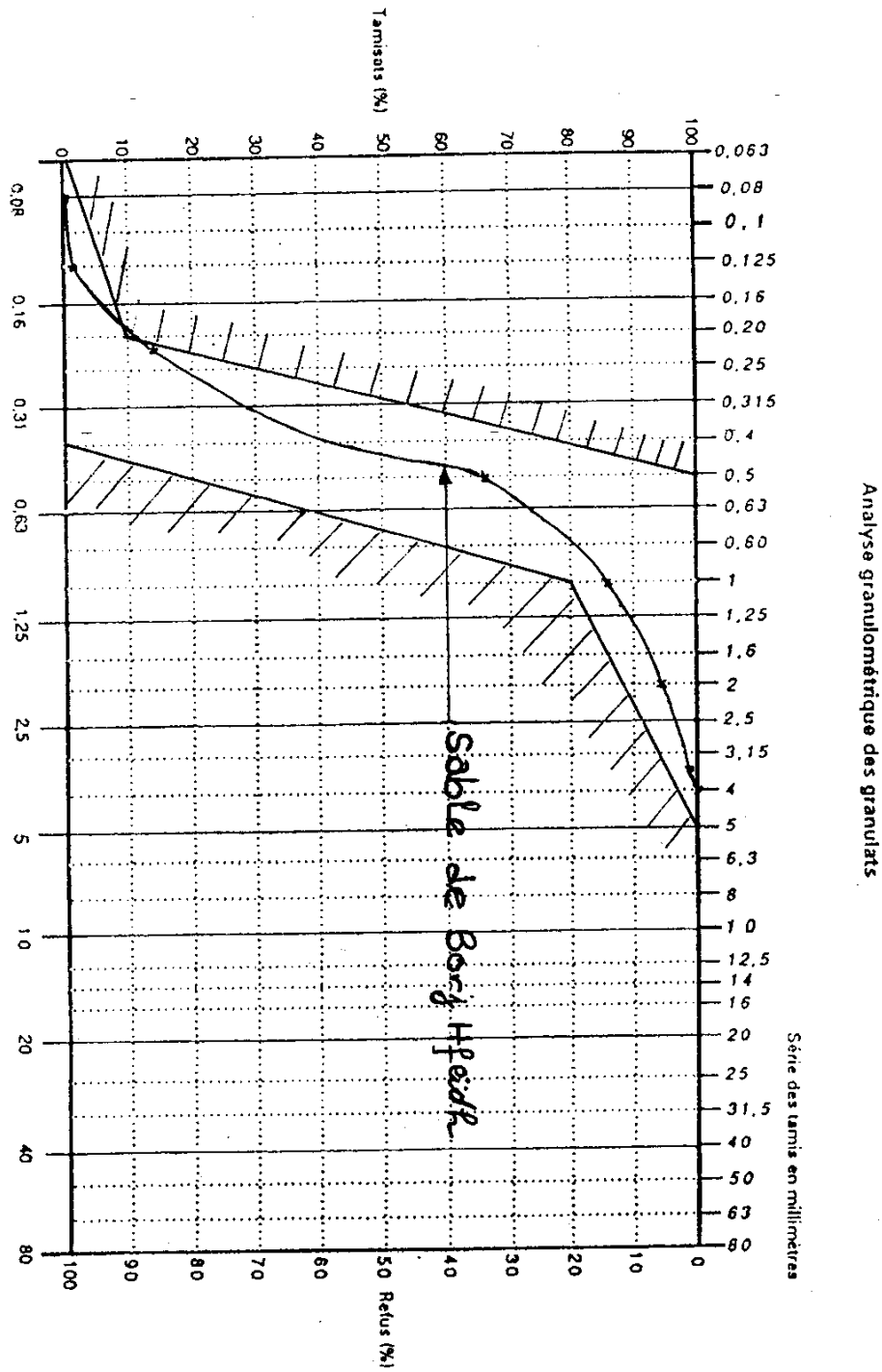


Figure 1.9 Fuseau granulométrique des matériaux filtrants où s'insère la courbe du sable de la carrière Borj Hhaiedh

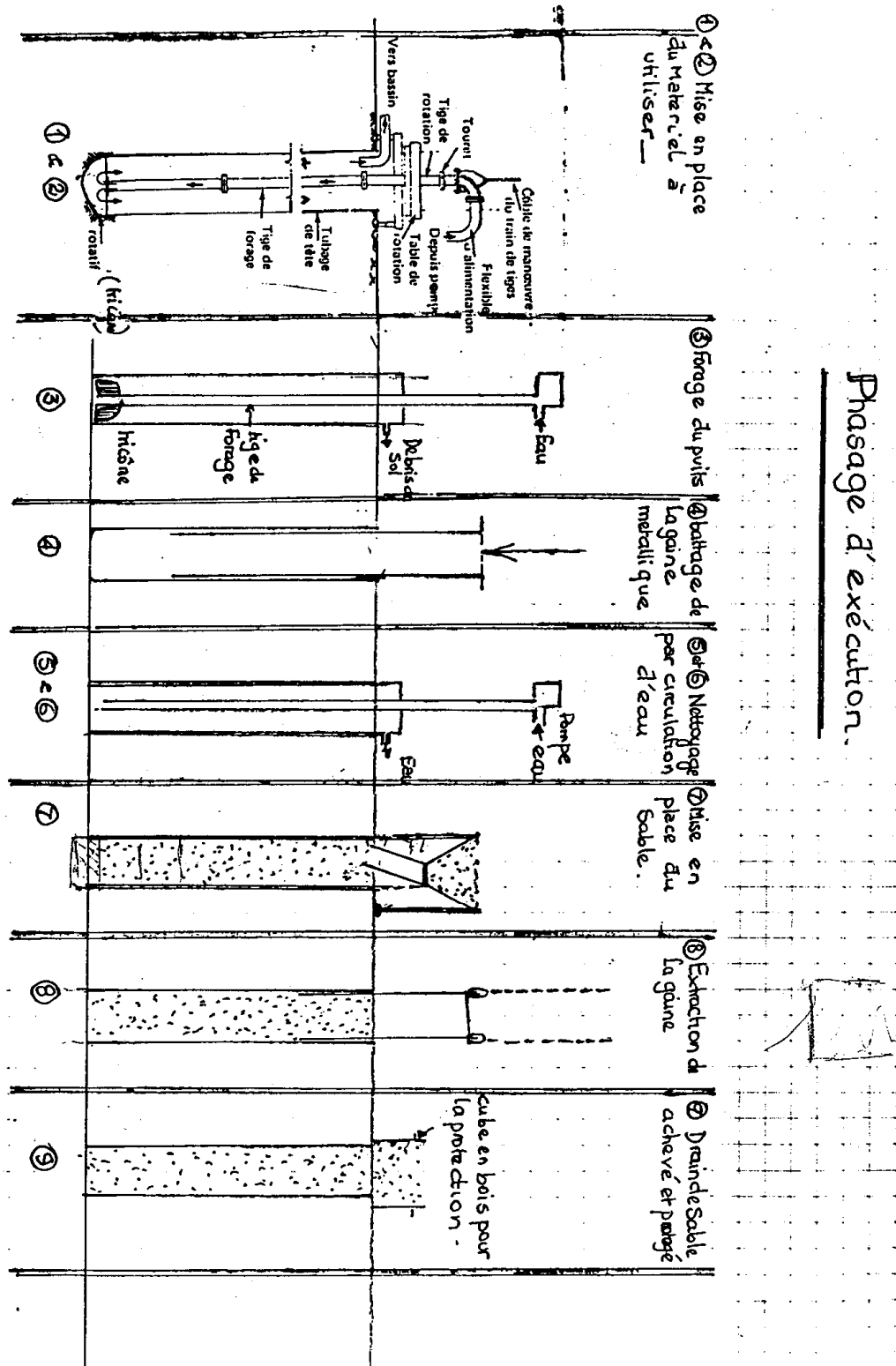


Figure 1.10 Phases d'exécution des drains de sable lors du projet de l'échangeur La Charguia (Tunisie).

Dans le tableau 1 on présente, pour les deux rampes d'accès, les données relatives au projet d'amélioration du sol par drains verticaux de sable. Les objectifs atteints étaient une réduction faible du tassement, mais qui n'a pas été ciblée au départ, et une accélération significative du

temps de consolidation : on a enregistré 80% de consolidation primaire au bout de huit mois. L'instrumentation de l'ouvrage par l'emplacement des tassomètres sous les deux culées, sur une année environ, a permis de vérifier que les tassements résiduels en cours d'exploitation étaient admissibles pour cet ouvrage.

Rampe d'accès	Superficie traitée (m ²)	Nombre de drains verticaux	Tassement du sol non amélioré (cm)	Tassement du sol amélioré (cm)
Coté cité olympique	1779572	82	42,6	22
Coté chargaia	1490804	91	49	25,6

Tableau 1. Données du projet « échangeur de la Chargaia (Tunis). Les tassements de consolidation primaire estimés dans l'axe d'un remblai de 5,5 m de hauteur).

Sur la vue d'ensemble de la rampe d'accès du coté de la cité olympique (Fig. 1.11) on note l'exécution d'un maillage triangulaire pour les drains de sable.

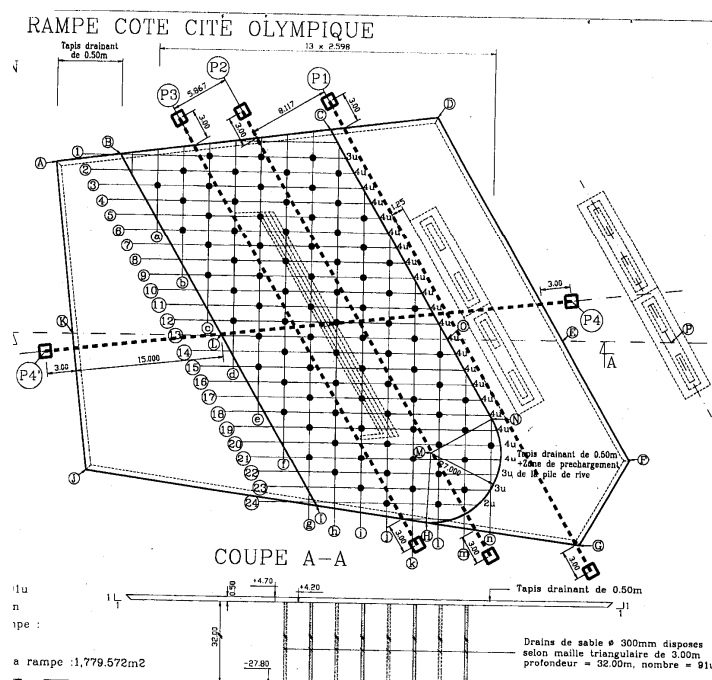


Figure 1.11 : Disposition des drains sous la rampe d'accès de l'Echangeur de cité olympique

5. Contrôle et suivi des projets de drains verticaux

Le suivi de cette amélioration nécessite la mise en place d'appareils de mesure (piézomètres, plaques de tassement, et des inclinomètres) dont la mise en place doit être bien étudiée au préalable.

En cours de réalisation du réseau drainant, il faut s'assurer que le maillage est bien respecté et noter la longueur de chaque drain. Dans le cas de drains forcés, en terrains hétérogènes, il arrive que le refus de fonçage se produise avant le niveau d'arrêt théorique.

Pour les drains de sable, le diamètre de quelques forages peut être vérifié à l'aide d'une « tropille » calibrée, ainsi que la profondeur, pour s'assurer qu'il ne s'est pas produit de rupture. La vérification doit également porter sur le volume du matériau drainant incorporé.

Pour juger l'amélioration apportée par le traitement, il est toujours nécessaire de prévoir un programme de mesures en place des paramètres suivants :

- les tassements de surfaces et des couches les plus compressibles,
- les pressions interstitielles,
- la résistance au cisaillement non drainée, en vue de calcul de stabilité complémentaire.

Ces constatations peuvent amener à compléter le système de drainage par adjonction de drains verticaux intercalés dans le maillage initial.

Illustration des avantages de l'amélioration par drains verticaux

L'illustration ci-après est relative à un projet exécuté aux USA. Sur la figure 1.12 on présente l'évolution de la construction d'un remblai en fonction du temps, les courbes donnant les évolutions du tassement, de la surpression interstitielle et le déplacement latéral (valeurs estimées et observées).

L'amélioration avec drains verticaux de sable précédé d'un chargement, outre l'accélération de la consolidation du sol traité, conduit à l'augmentation de sa résistance à la compression simple (q_u) et de sa résistance à la pénétration dynamique (SPT, N), [5]. La résistance au cisaillement augmente de deux à cinq fois ce qui permet de construire le remblai de pré-chargement en une seule étape. Cependant on a noté, en plus, une diminution de la teneur en eau (Fig. 1.13).

Remarque : L'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol encaissant n'est pas prise en compte par les méthodes de dimensionnement en vigueur. Les spécialistes ne sont pas unanimes sur ce point malgré les résultats enregistrés suite aux essais de contrôle in situ. Sur ce point un travail de recherche-développement a été récemment entamé par lequel on montre l'intérêt de prise en compte de cette amélioration, Debats et col (2003).

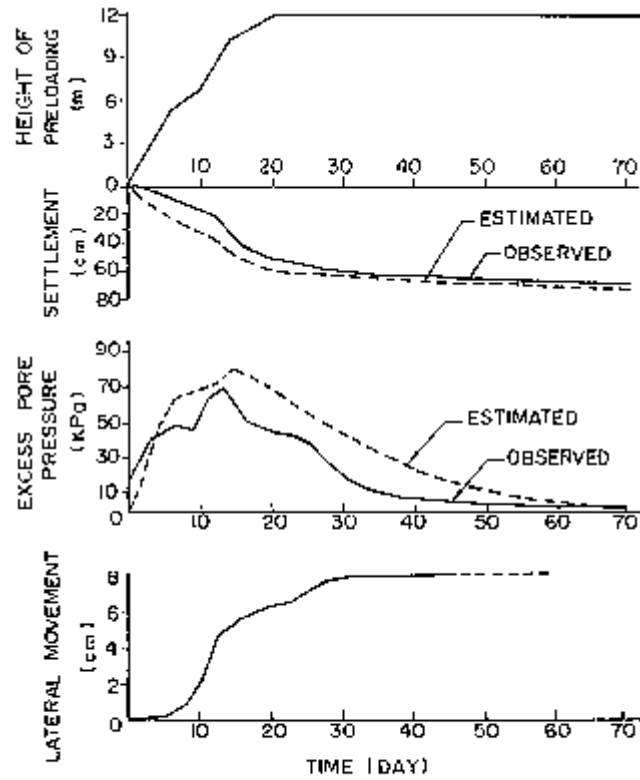


Figure 1.12 : Comparaison entre les prédictions et les mesures in situ dans la zone pré-chargée

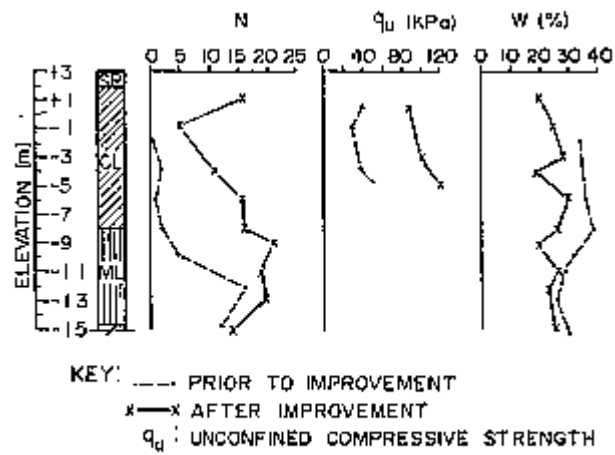
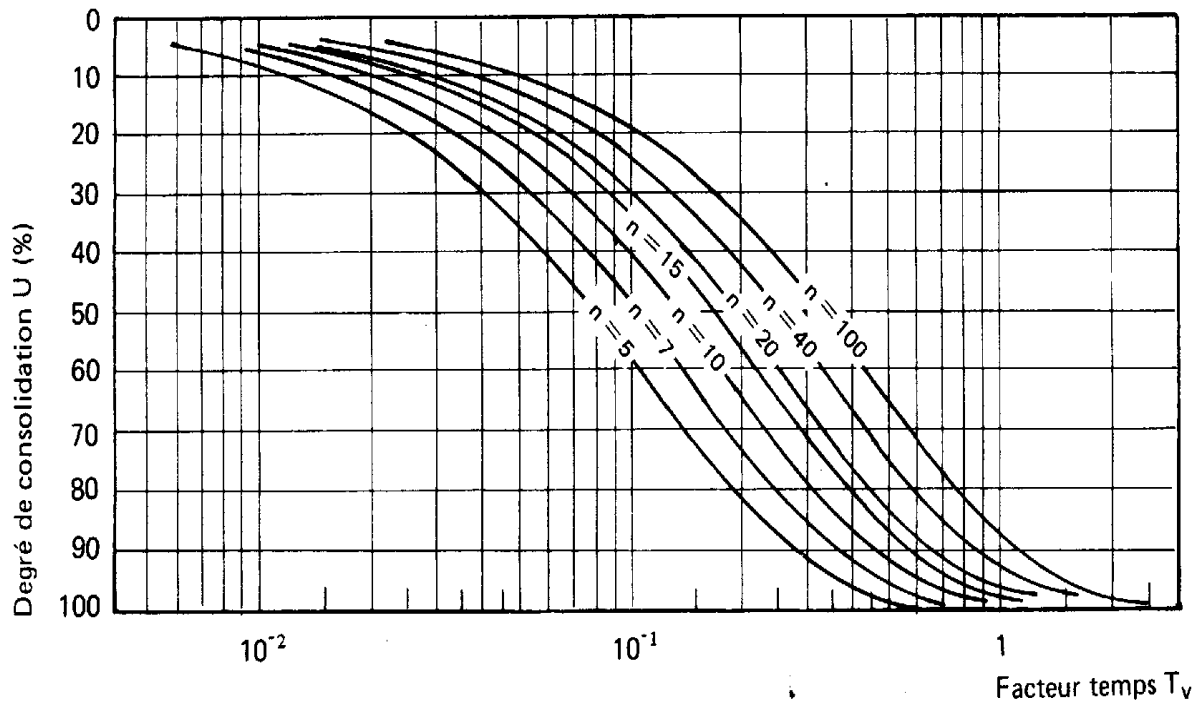


Figure 1.13 : Les paramètres du sol avant et après son amélioration par drains de sable.

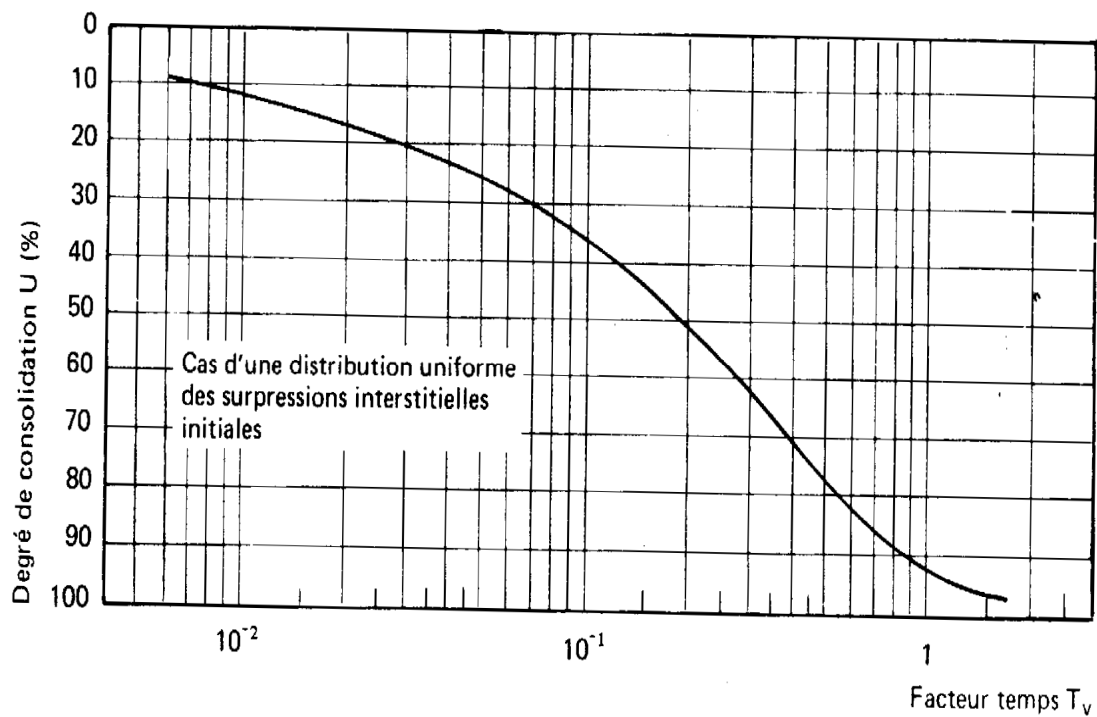
Références bibliographiques :

- [1] Debats J.M., Guetif Z., Bouassida M. (2003). Soft soil improvement due to vibrocompacted columns installation. Proc. International Workshop on Geotechnics of soft soils – Theory and practice 17-19 September, Noordwijkerhout (Netherlands), pp 551-556 .
- [2] Hamdi H., Hedhli A. (2002). Accélération de consolidation des sols compressibles. Cas de l'échangeur de la Charguia. Mémoire de projet de fin d'études (formation continue). Département de génie civil, ENIT.
- [3] Hansbo S. (1979a). Geodrains in theory and practice. Terrafigo AB, Stockholm, Geotechnical report, n°5.
- [4] Hansbo S. (1979b). Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. Ground Engineering, July.
- [5] Magnan J. P. (1983). Théorie et pratique des drains verticaux. Edition Technique et Documentation – Lavoisier. Paris.
- [6] Tsai K. W., Lee C. C., Chao C. S. (1983). Site Improvement by Preloading with Sand Drains. Proc. 9th I.C.S. Soil Improvement, Helsinki. pp 781-783.

6. Annexes. Abaques de dimensionnement pour les drains verticaux.



A1.1 : Abaque de consolidation radiale, Barron (1947).



A1.2 : Abaque de consolidation verticale, Terzaghi (1935).

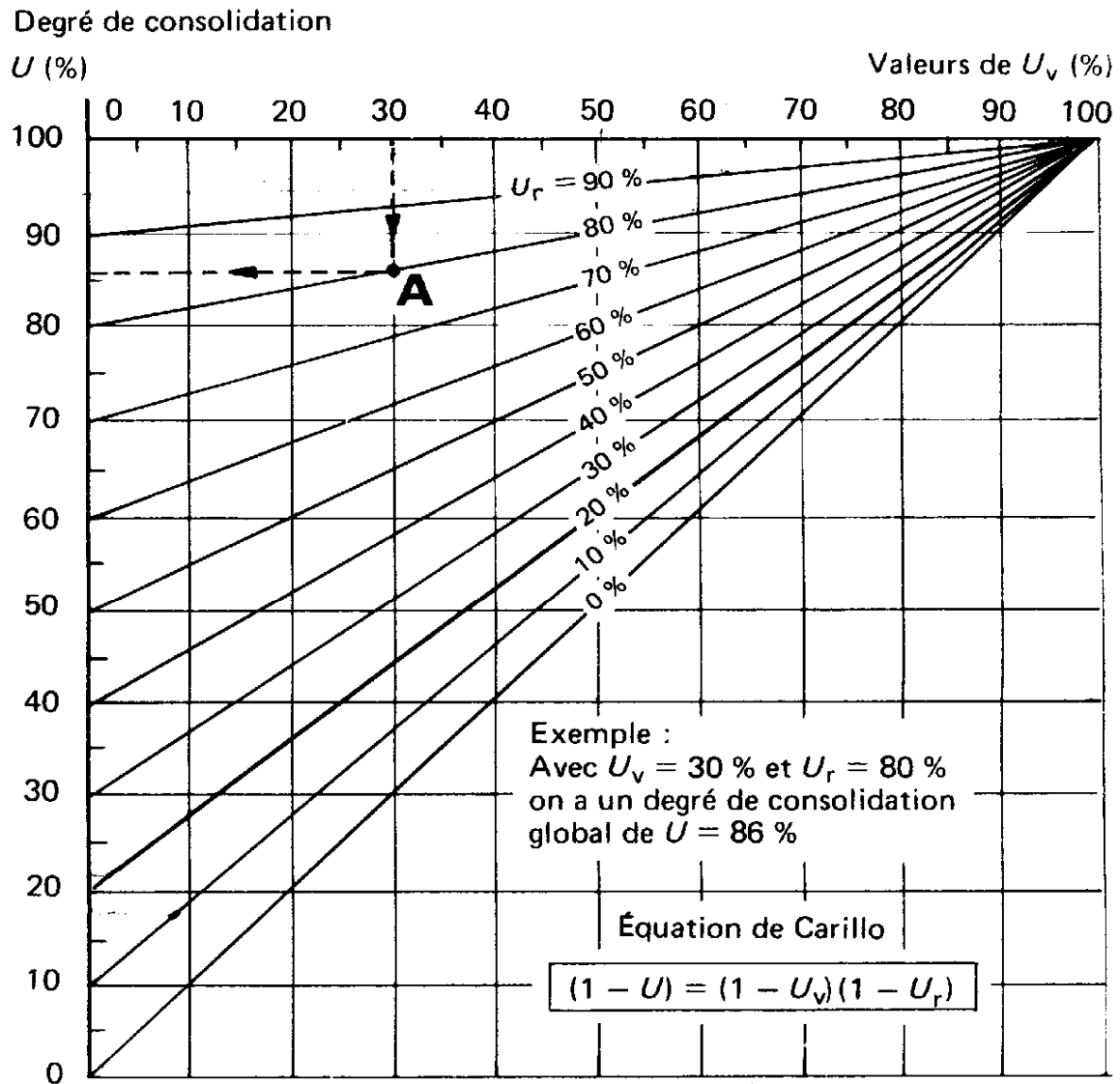


Figure A1.3 : Degré de consolidation tridimensionnelle, Carillo (1942).