

— Chapitre III : Amélioration des caractéristiques des sols —

1.1 Introduction

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de génie civil n'a fait que croître au cours de ces dernières décennies. D'une part le développement impose de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construite, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels...etc. D'autre part le sol est devenu de plus en plus un matériau de construction que l'on cherche, où les raisons souvent économiques nous conduisent à utiliser des sols de qualité médiocre dont il faudra les améliorer.

Il en résulte le développement d'un très grand nombre de techniques destinées à améliorer les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou apportés d'ailleurs. Nous pouvons donc distinguer deux grandes catégories de techniques à savoir: celles où la structure du sol est améliorée par un additif, un liant, ou modifiée par réduction des vides entre les grains. Il y a aussi celles où l'on place dans le sol des éléments structuraux pour augmenter principalement la résistance mécanique: ce sont des techniques de renforcement des sols.

1.2 Les mauvais sols

Le sol supporte les fondations d'ouvrages, sert comme matériaux de construction (barrages, remblai), peut comporter des ouvrages souterrains (tunnels), reçoit des matériaux à stocker (déchets industriels et nucléaires) et sert à extraire des minéraux et autres ressources de production de l'énergie et des matériaux. Il est donc très important de se renseigner des caractéristiques des mauvais sols (principalement les sols argileux et organiques qui sont la cause d'instabilité des structures projetées) pour qu'on puisse les améliorer.

1.2.1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à $5\mu\text{m}$, composées pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à $0,2\text{ mm/h}$), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert. Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent de l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.

Les argiles constituent en général une assise acceptable lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

1.2.2 Les limons

Les limons (constitués principalement de silt) possèdent un squelette siliceux à silico-calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles; mais sa teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables.

1.2.3 Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon le taux de CaCO_3 , trois grandes catégories:

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35% de carbonate de calcium (CaCO_3) ;
- les marnes proprement dites contenant 35 à 65% de CaCO_3 ;
- les calcaires marneux qui possèdent 65 à 95% de CaCO_3 .

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de se fissurer sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert où en souterrain pour donner respectivement :

- de la chaux avec les marnes argileuses ;
- de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ;
- du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux.

D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations très bonne en l'absence du gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de Karsts.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature.

Nous pouvons conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles...etc., qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sols) et une forte affinité à l'adsorption de l'eau (gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques).

1.3 Techniques d'amélioration des sols

Lorsque les sols posent des problèmes de tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et les renforcements du sol sont en général la première option à étudier, car ils peuvent permettre de préserver le mode de fondation le plus économique et le plus simple à mettre en œuvre, à savoir les fondations superficielles.

Il existe plusieurs techniques servant de valoriser les sols présentant des mauvaises caractéristiques géotechniques. Ces différentes techniques d'amélioration permettent d'augmenter la densité du sol, de diminuer ou augmenter la perméabilité, de réduire la compressibilité, de minimiser la sensibilité à l'eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement. Il s'agit de la stabilisation:

- par le **remplacement** du sol (remplacement du mauvais sol par le bon) ;
- mécanique (compactage de surface, compactage dynamique, vibrocompactage...etc.) ;
- **hydrodynamique** (préchargement ou précompression, accélération de la consolidation par les drains verticaux...etc.) ;
- **thermique** (congélation, cuisson...etc.) ;

- **chimique** (ajouts de produits minéraux: chaux, ciment, pouzzolane naturelle, fumé de silice, cendres volantes, laitier...etc.) ;
- par **renforcement** du sol (terre renforcé, matériaux synthétiques...etc.) ;
- par **substitution** ou inclusion souples constituées de gravier (colonnes ballastées, inclusion solide...etc.) ;
- **hydraulique** (drainage, rabattement de la nappe...etc.) ;
- **électrique** (électro-osmose, électrochimie...etc.) ;

La résistance au cisaillement des sols compressibles est augmentée pour assurer une meilleure portance. La compressibilité est réduite du fait que la consolidation des sols est accélérée dans le cas d'inclusions du gravier ou du sable et une augmentation du coefficient de sécurité à la liquéfaction.

1.3.1 Amélioration par remplacement du sol

D'après [Gaafer et al. \(2015\)](#), le remplacement du sol est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus simples qui améliorent les conditions du sol support. Le sol support peut être amélioré par le remplacement des sols médiocres (les sols organiques et argiles molles) avec des matériaux de capacité portante élevée tels que les sables, les graviers ou de pierres concassées. Cependant, certains sols sont plus difficiles à compacter que d'autres, lorsqu'ils sont utilisés en tant qu'une couche de remplacement. Le tassement vertical diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de remplacement. D'ailleurs, [Gabr \(2012\)](#) avait observé que l'utilisation du sol de remplacement peut réduire considérablement les tassements ainsi que les coûts de construction. Pratiquement, l'utilisation du sol de remplacement sous une fondation superficielle est facile et peut être aussi une solution moins chère par rapport à son utilisation sous une fondation profonde.

1.3.2 Compactage de surface

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols ([Figs. III.1 et III.2](#)). La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Donc il est important de déterminer cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses.



Fig. III.1 — Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza en 2009, Algérie).

La technique du compactage est fonction de quatre paramètres essentiels : (l'énergie et le mode de compactage, la masse volumique du sol sec, la teneur en eau et le type du sol), elle sert à :

- augmenter la densité jusqu'à l'optimum ;
- améliorer la résistance donc la capacité portante du sol ;
- diminuer la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité ;
- réduire ou éliminer les risques de tassement ;
- augmenter la stabilité des talus ;
- prévenir la liquéfaction des sols ;
- limiter les variations de volumes indésirables causées, plus souvent, par le phénomène retrait-gonflement.



Fig. III.2 — Compactage de surface aux références de compactages d'une chaussée routière.

La **quantification de la masse de l'eau et du sol** à utiliser dans un **ouvrage de remblai** (digue de barrage, voies routières ou ferroviaires, etc.) peut se faire par rapport aux **références de compactage** [densité sèche maximale (équation 1) et Teneur en eau optimale (équation 2)] déterminées au niveau du laboratoire par **l'essai de Proctor modifier** (PM) à savoir :

$$\gamma_{dmax} = \frac{P_s}{V} \dots \dots \dots (1)$$

$$W_{opt} = \frac{P_w}{P_s} \dots \dots \dots (2)$$

Où :

Wopt : Teneur en eau optimale (%)

γdmax : Densité sèche maximale (kN/m³)

Ps : Poids des grains solides du matériau à utiliser comme remblai (kN puis doit être converti en Kg ou en tonne)

Pw : Poids de l'eau à utiliser dans le chantier pour l'arrosage du remblai (kN puis doit être converti en mètre cube d'eau)

V : Volume du sol dont on a besoin sur le chantier (m³)

Remarque :

- Les paramètres **V**, **Wopt**, et **γdmax** sont connus, donc on pourra calculer la masse du sol (Ps) et la quantité de l'eau (Pw) qui correspondent aux références de compactage.
- La vérification des quantités du sol (Ps) et de l'eau (Pw) peut se faire par l'utilisation des équations suivantes (équations 4, 5 et 6):

$$Ph = Ps + Pw \dots \dots \dots (4)$$

$$\gamma h = \frac{Ph}{V} \dots \dots \dots (5)$$

$$\gamma dmax = \frac{\gamma h}{1 + Wopt} \dots \dots \dots (6)$$

Où :

Ph : Poids humide du matériau à utiliser comme remblai (kN)

γdmax: Poids volumique humide du matériau à utiliser comme remblai (kN/m³)