Soutènement et renforcement des sols

Comment apporter

une stabilité à un massif,

devenu instable

du fait de facteurs naturels

ou artificiels défavorables ?

SOMMAIRE

I- Composition et caractéristiques des sols

I.A- Composition du sol

I.B- Granulométrie de la phase solide

I.C- Caractéristiques liées à la phase liquide

- I.C.1- L'eau et ses différentes formes
- I.C.2- Teneur en eau
- I.C.3- Degré de saturation
- I.C.4 - Les limites d'Atterberg

I.D- Caractéristiques physiques et chimiques

I.E- Caractéristiques de déformabilité

- I.E.1 – Tassement des sols grenus
- I.E.2 – Tassement des sols fins

I.F- Caractéristiques mécaniques

- I.F.1 – Cohésion des sols fins
- I.F.2 – Frottements au sein des sols grenus

II- Stabilité d'un massif de sol

II.A- Notion de contraintes

II.B- Notion de rupture

II.C- Courbe intrinsèque

- II.C.1- Cercle de Mohr
- II.C.2- Courbe enveloppe
- II.C.3- Courbe enveloppe d'un sol
- II.C.4- Résistance au cisaillement d'un sol

II.D- Géométrie d'un massif de sol pulvérulent

II.E- Retour au problème

- II.E.1- Données complémentaires

II.E.2- La problématique

II.E.3- Les solutions envisageables

III- Améliorer les caractéristiques internes des sols

III.A- Le principe
III.B- La Terre-Armée

III.C. Le freyssissol

III.D. Le texsol

III.E. Le Terratrel

III.F. Le Pneusol

III.G Renforcement par inclusions géosynthétiques

III.H- Le cloutage

III.I- Retour au problème

IV - S'opposer à la poussée des terres par un soutènement

IV.A- la fonction d'un soutènement

IV.B- Stabilité d'un mur

IV.B.1- Stabilité interne

IV.B.2-Stabilité externe

IV.C- Les différents types de soutènement

IV.C.1- Murs en gabions

IV.C.2- Les murs poids

IV.C.3- Les murs en aile

IV.C.4- Les parois berlinoises

IV.C.5- Rideaux de palplanches métalliques

IV.D- Retour au problème

Annexe 1 :*l'expérience de Vidal*

Annexe 2 : *notre projet*

Introduction

A l'état naturel, un talus est généralement stable : en effet, il s'est constitué de manière à ce que les forces auxquelles il est soumis s'équilibrent par la résistance interne mobilisée au sein de l'édifice.

Cependant, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine d'une modification de ces conditions d'équilibre telle que la stabilité du talus soit menacée. Le phénomène gel-dégel, et surtout l'eau sont des facteurs naturels dont dépend la stabilité des pentes.
L'eau demeure le facteur ayant l'impact le plus important sur les sols : en effet, elle est à l'origine de l'érosion des sols, de la formation des ravins, ainsi que des glissements de terrain.

Aux facteurs naturels s'ajoute l'action de l'homme. Celui-ci modifie continuellement les conditions qui président à la stabilité des sols : il réduit la résistance interne du sol en creusant des tunnels, des galeries souterraines et des sous sols pour ses besoins de citadin ; il effectue des déblais sur les versants naturels pour construire des routes et des voies ferrées ; il taille les talus pour pratiquer l'agriculture sur des terrains horizontaux ou pour édifier des bâtiments ; il change les conditions d'écoulement des eaux en construisant des barrages et des digues de protection des zones urbanisées ; il procède à des remblaiements pour ses besoins en aménagements urbains et en infrastructures…

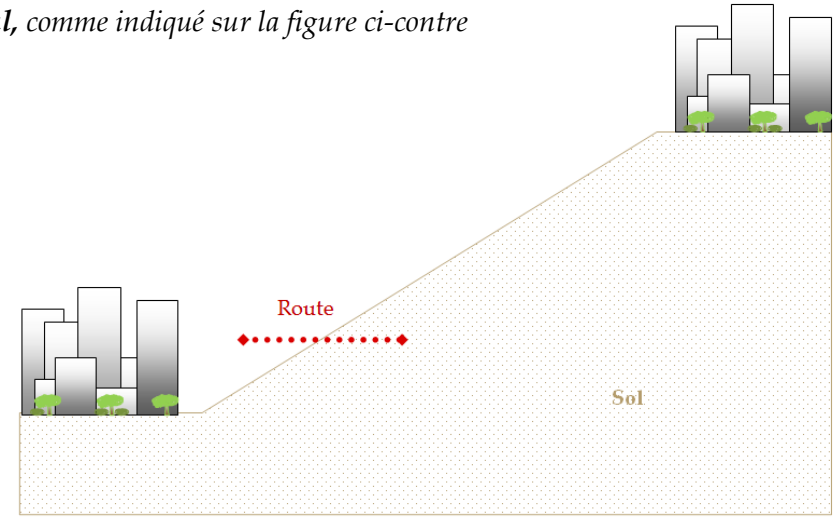
Dès qu'un facteur est modifié, la question de la stabilité du sol avoisinant se pose et en particulier en présence d'un talus. *Comment assurer la stabilité d'un massif, devenu instable du fait de facteurs naturels ou artificiels défavorables?*

Malgré ces modifications extérieures, il est en effet possible de stabiliser un massif, soit par une amélioration des caractéristiques mécaniques des sols, en augmentant sa résistance interne (c'est le renforcement des sols), soit en opposant simplement aux poussées qui menacent sa stabilité un ouvrage capable de les contenir (c'est le soutènement).

⌗

Afin de guider notre réflexion, nous nous proposons d'étudier le problème suivant :

On souhaite construire une route à flanc de coteau, séparant un quartier en amont et un quartier en aval, *comme indiqué sur la figure ci-contre*



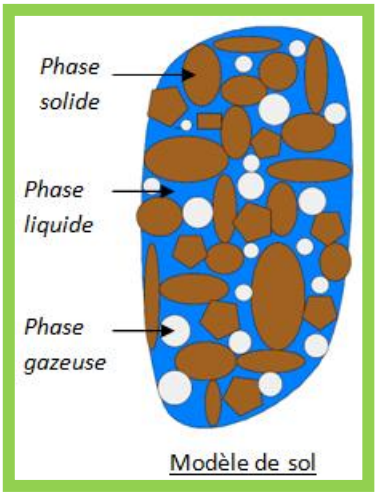
II- Composition et caractéristiques des sols

I.A- Composition du sol

Le sol est un matériau triphasique, qui comporte :

- une phase solide, composée de grains dont l'ensemble constitue le **squelette** du sol ;
- une phase liquide : l'eau remplit partiellement les vides entre les particules solides ;
- une phase gazeuse : de l'air (et, bien souvent, de la vapeur d'eau) emplit les vides restants.

Dès lors, le comportement des sols est déterminé par les interactions entre ces différentes phases.



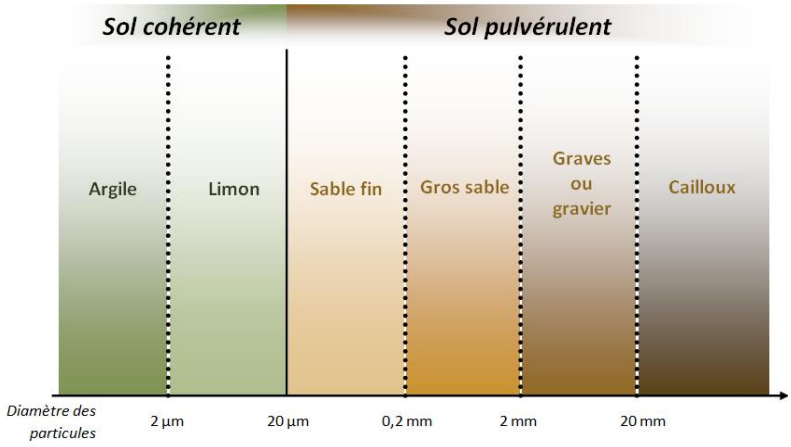
Modèle de sol

I.B- Granulométrie de la phase solide

En matière de sols, on distingue deux grandes familles qui différent par leurs comportements mécaniques :

- le **sol grenu***, ou **pulvérulent***, issu de la désagrégation* des roches ; le diamètre des grains, de forme arrondie, est généralement **supérieur à 20 µm**
- le **sol fin***, ou **cohérent***, issu de l'altération des roches ; les particules, de forme aplatie (feuilles ou paillettes) ont une taille généralement **inférieure à 20 µm.**

Une classification plus fine, en fonction de la dimension des grains constitutifs du sol, conduit au tableau suivant :

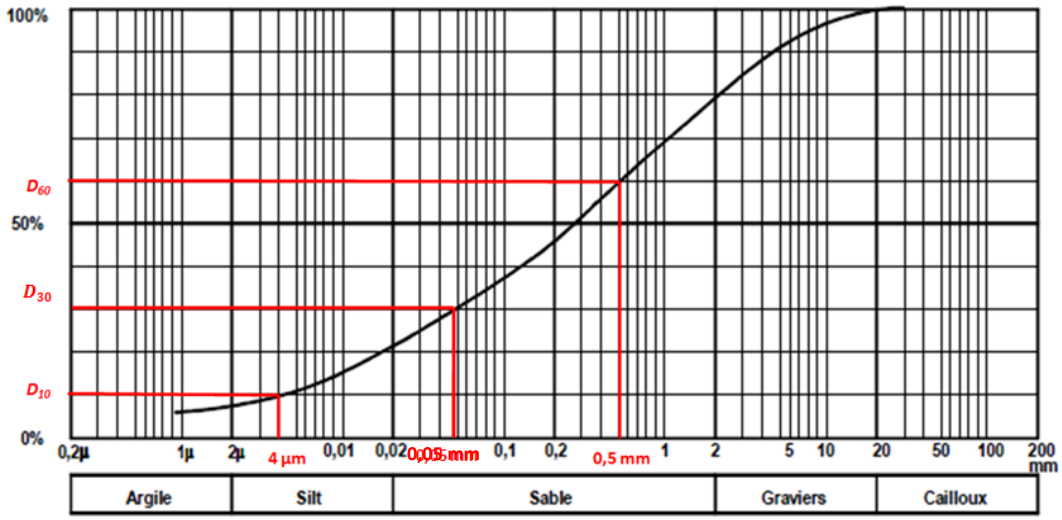


Un sol quelconque est en général constitué d'une fraction grenue et une fraction fine. C'est l'importance du pourcentage des fines qui définit le type de comportement du sol.

Pour déterminer la courbe granulométrique d'un sol, on pratique une granulométrie sur un échantillon représentatif du sol concerné. Cet essai de laboratoire consiste à faire un tri par un tamisage* avec des mailles de tailles progressives pour la fraction grenue du sol (>20 µm) et une sédimentométrie* pour la fraction fine (<20 µm).

L'essai de laboratoire donne lieu à une courbe granulométrique*, dressée à l'échelle logarithmique, avec en abscisse D le diamètre du grain et en ordonnée le pourcentage des grains de diamètre inférieur à D.

Courbe granulométrique étalée

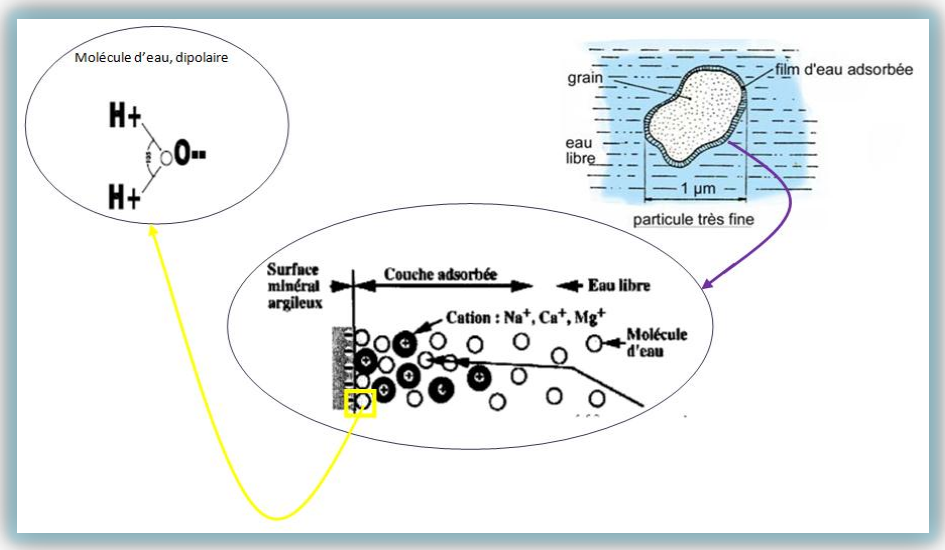


I.C- Caractéristiques liées à la phase liquide

I.C.1- L'eau et ses différentes formes

L'eau est présente dans un sol sous trois formes différentes :

- l'eau libre, qui circule librement entre les particules ou grains (c'est l'eau qui constitue la nappe phréatique). Elle s'évapore complètement lorsqu'on porte le matériau à une température supérieure à 100 °C ;
- l'eau capillaire : l'eau est retenue sous forme de ménisque au niveau des points de contact entre les grains ou particules, exerçant ainsi une force d'attraction entre ces grains, ce qui maintient une certaine cohésion du sol. L'eau capillaire s'évapore dans les mêmes conditions que l'eau libre ;
- l'eau adsorbée* : elle concerne uniquement les sols fins ($D < 20$ µm), comme l'argile. Les molécules d'eau sont attirées, par polarité, par les particules d'argiles (chargées négativement à leur surface), formant une fine pellicule à leur surface. Cette eau adsorbée, visqueuse, ne peut être éliminée qu'à très haute température (200 à 300 °C).



I.C.2- Teneur en eau

Un sol est caractérisé par sa teneur en eau (w) : elle correspond au rapport de P_w , poids de l'eau contenue dans le sol , et P_s, poids du sol sec

$$w = \frac{P_w}{P_s}$$

I.C.3- Degré de saturation

Le degré de saturation (S_r) d'un sol correspond au rapport de V_e , volume de l'eau remplissant les vides, et V_v, volume total des vides

$$S_r = \frac{V_e}{V_v}$$

Il varie entre 0 (sol totalement sec) et 1 (sol saturé).

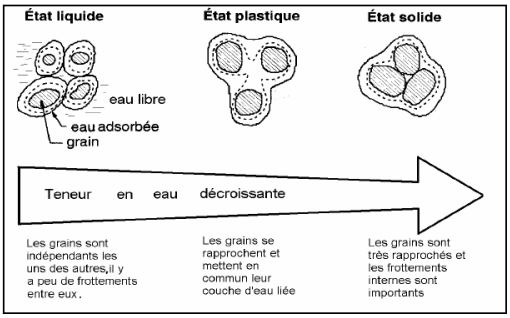
I.C.4 - Les limites d'Atterberg

En fonction de leur teneur en eau, les sols fins peuvent se présenter sous différentes formes :, liquide, plastique (les sols fins, comme l'argile, peuvent former une *pâte* avec l'eau), ou solide selon leur teneur en eau :

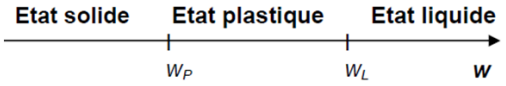
→ Un sol **liquide** a une cohésion très faible ; il a l'aspect d'un fluide, et tend ainsi à s'étaler lorsqu'il est placé sur une surface horizontale.

→ Un sol **plastique** a une cohésion nettement plus importante (il ne s'étale pas comme un fluide), sans toutefois pouvoir résister à l'action de charges, même si celles-ci sont très faibles

→ Un sol **solide** est peu déformable, et plus rigide



Atterberg, Ingénieur agronome suédois, définit des teneurs en eau qui marquent le passage d'une consistance à l'autre : ce sont les limites d'ATTERBERG*.



La limite de liquidité, w_L, est la limite liquide-plastique ; : la limite de plasticité, w_p, est la limite plastique-solide.

Il est à noter que la teneur en eau n'influe pas sur la consistance des sols pulvérulents, comme le sable.

I.D- Caractéristiques physiques et chimiques

Masse volumique des grains solides

La masse volumique ρ_s des particules solides (en g.cm^{-3}) est égale au quotient de la masse des particules solides, m_s (en g), par leur volume V_s (en cm^3) :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Masse volumique sèche

La masse volumique sèche ρ_d est égale au quotient de la masse des particules de sol sec P_s par le volume total de la même masse de sol V_t (y compris le volume des vides):

$$\rho_d = \frac{P_s}{V_t}$$

Indice des vides

L'indice des vides e est le quotient du volume des vides (volume occupé par les phases liquide et gazeuse) V_v et du volume des grains solides V_s :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

On peut aussi l'exprimer en fonction de la masse volumique des grains solides et de la masse volumique sèche :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Porosité

La porosité n est le quotient du volume des vides V_v et du volume total du sol V_t :

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

Et en fonction de l'indice des vides, on a :

$$n = \frac{e}{e+1}$$

Valeur de bleu du sol (VBS)* et propreté d'un sol

Plus un matériau contient de petites particules, telles les argiles, plus la surface spécifique* est importante. Le bleu de méthylène a la propriété de recouvrir les particules fines de sol (uniquement l'argile et le limon) de manière uniforme (par adsorption*). Or, plus un sol contient de fines particules, plus sa surface spécifique est grande, donc plus il y aura de bleu de méthylène adsorbé. Cette quantité (appelée VBS* : valeur de bleu du sol) s'exprime en grammes de bleu pour 100g de sol.

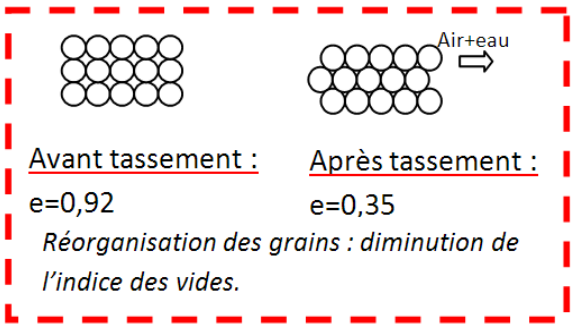
I.E- Caractéristiques de déformabilité

Du fait de la présence de vides entre les particules, le sol est un matériau compressible, qui peut se tasser et se déformer sous l'effet d'une charge.

Ce tassement* est dû à un réenchevêtrement des particules de sol, ce qui fait diminuer l'indice des vides **e** (voir première figure ci-contre) avec expulsion et/ou compression de l'air contenu dans le sol et expulsion de l'eau (qui, elle, n'est pas compressible et ne peut donc être qu'expulsée.

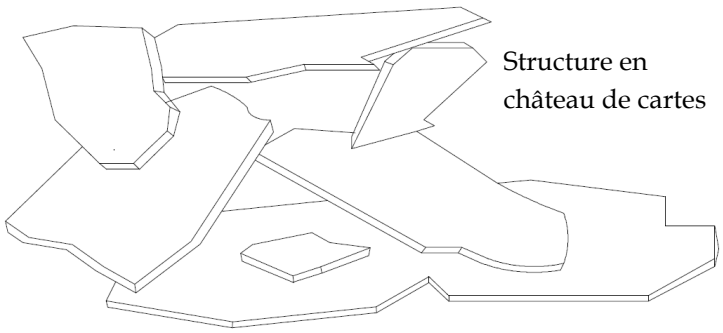
A l'instar des vases et des tourbes, un sol peut, être constitué de matière organique (débris végétaux, résidus animaux, humus…), qui intervient dans le comportement du matériau. En effet, dans le cas d'un sol contenant plus de 2% de matière organique, cette dernière peut engendrer, à long terme, des problèmes de tassement du sol.

I.E.1 – Tassement des sols grenus



Sous l'effet d'une charge, les grains composant les sols pulvérulents se réorganisent. Le tassement des sols grenus intervient d'une manière instantanée. La charge appliquée est transmise directement aux grains et le tassement ne dépend que de la phase solide (en d'autres termes, le tassement est le même que le sol soit sec, humide ou saturé).

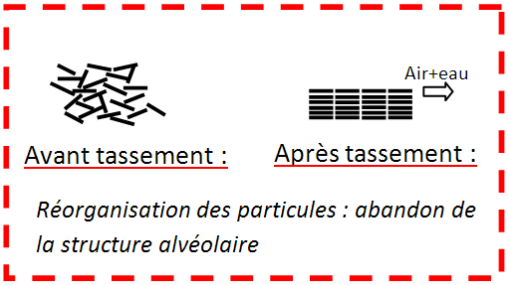
I.E.2 – Tassement des sols fins



Structure en château de cartes

Les sols fins n'ont pas la même structure que les sols grenus. Les particules constituant un sol fin ont une forme aplatie (feuilles ou paillettes) et donnent au sol une structure alvéolaire, aussi appelée « structure en château de cartes », où l'indice des vides est important.

Sous l'effet d'une charge, les paillettes se placent horizontalement de manière à occuper le moins d'espace possible et le château des cartes s'effondre.
Cependant cet effondrement intervient bien tard après l'application de la charge qui reprise en premier lieu par l'eau en se mettant en surpression.
C'est la dissipation de la surpression de l'eau qui transfère la charge de la phase liquide à la phase solide et provoque le tassement du sol. Ce tassement est appelé tassement de consolidation.



Il faut parfois des milliers d'années pour consommer la totalité du tassement d'un sol fin sous la seule charge de son propre poids, c'est le cas du sol de Mexico qui ne finit pas de s'enfoncer. Ce tassement obtenu bien plus tard est dangereux pour les constructions qui doivent s'adapter à la déformation du sol. C'est le cas de la Tour de Pise.

I.F- Caractéristiques mécaniques

I.F.1 – Cohésion des sols fins

Les interactions physico-chimiques entre les particules d'un sol fin confèrent à celui-ci une certaine cohésion qui rentre en jeu dès que le sol est sollicité en cisaillement.
Les sols fins sont dits cohérents du fait de cette cohésion c entre les particules.
Cette cohésion est déterminée soit in-situ à l'aide d'un outil appelé scissomètre ou en laboratoire dans un essai à la boite de Casagrande sur un échantillon representatif.

I.F.2 – Frottements au sein des sols grenus

Le frottement entre les grains d'un sol pulvérulent confère à celui-ci une résistance au cisaillement. Du fait de la nature de ce phénomène, nous comprenons bien que cette résistance dépend aussi bien de la géométrie et de la résistance des grains que de la contrainte de serrage qui règne entre les grains.
Le comportement des sols pulvérulents ne dépend que du squelette solide, et ainsi des frottements inter-granulaires. Cette particularité d'un sol grenu est évaluée par ce qu'on appelle « l'angle de frottement interne », qui caractérise un sol et qu'on note φ (cette notion sera abordée plus en détail dans la suite du développement).
L'angle de frottement interne est déterminé en laboratoire dans un essai triaxial sur un échantillon représentatif.

III- Stabilité d'un massif de sol

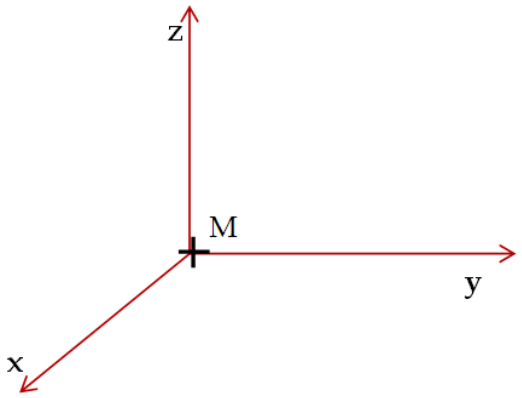
II.A- Notion de contraintes

Le sol, continu ou discontinu ?

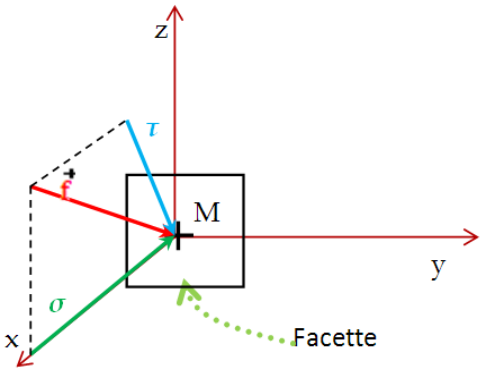
A l'échelle des grains ou des particules, le sol est un matériau discontinu. Cependant, l'Ingénieur le considère à l'échelle macroscopique : le sol est donc, pour lui, un milieu continu, pour lequel il applique des règles de comportement bien connues.

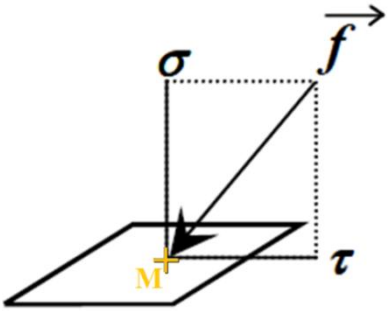
Contraintes en milieu continu

L'état des contraintes en un point M d'un milieu continu est définit par trois vecteurs selon un repère orthonormé (x, y, z) centré sur M.



Sur une portion unitaire du plan normal à l'axe des x, appelée facette, agit une contrainte f dont la composante selon l'axe des x vaut ***σ et*** la composante dans le plan yz vaut ***τ,*** qui peut être décomposée à son tour selon les axes des y et des z.





Contraintes relatives à une facette

Les trois composantes obtenues constituent les coordonnées du vecteur contrainte agissant au point M sur une facette normale à l'axe des x.

Ce raisonnement répété pour la facette normale à l'axe des y et à celle normale à l'axe des z permet de construire ce qu'on appelle un « tenseur de contraintes » qui est une matrice (tableau) de trois lignes et trois colonnes décrivant l'état des contraintes au point M.

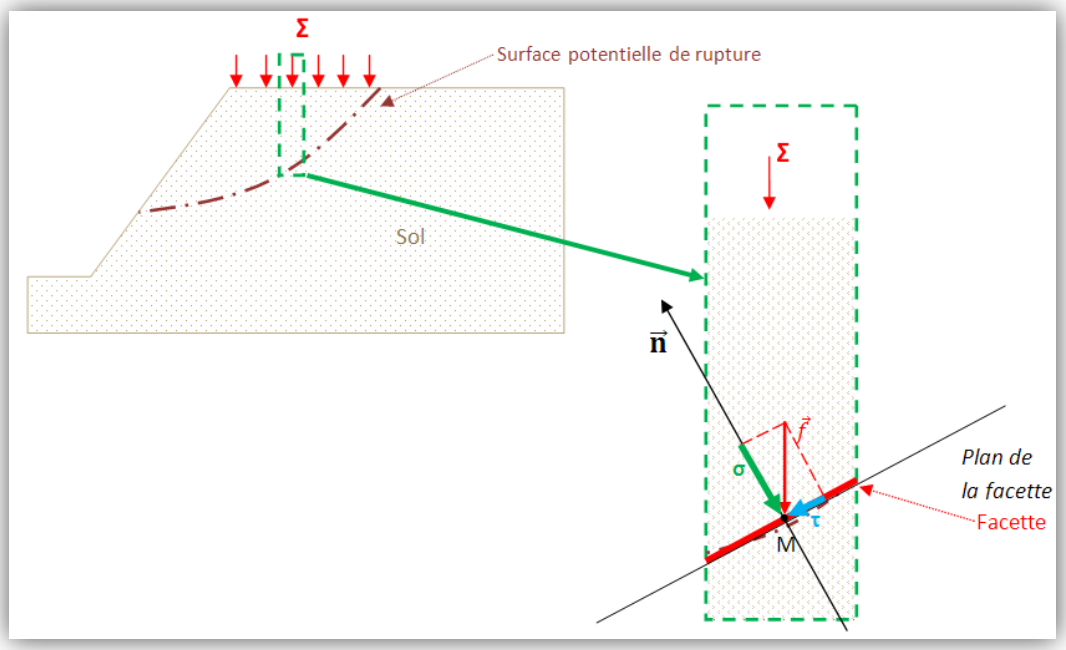
Nous retenons, d'une manière générale, qu'en un point M, une facette est soumise à une contrainte $\vec{f}$ qui a une composante normale (suivant la normale $\vec{n}$ à la facette) notée σ et une composante tangentielle située dans le plan de la facette, notée τ.

La composante σ est appelée contrainte normale et la composante tangentielle τ est appelée contrainte de cisaillement.

II.B- Notion de rupture

On considère le massif de la figure ci-dessous et on se propose d'étudier sa stabilité le long d'une surface, quelconque, de rupture potentielle.

Schéma simplifié des contraintes normale et tangentielle dans un massif



Les efforts extérieurs qui s'exercent en un point M, quelconque, de cette surface sont ceux qui agissent sur une facette parallèle à la surface potentielle de rupture et centrée sur le point M.
Ces efforts extérieurs sont le poids propre de la colonne de sol située au dessus de la facette, plus la portion des surcharges Σ appliquées à la surface du massif et peuvent être décomposés en une contrainte normale σ et une contrainte tangentielle τ.

La contrainte normale a tendance à « plaquer » le prisme du sol qui cherche à se détacher du massif, tandis que la contrainte tangentielle pousse ce prisme à glisser le long de la surface potentielle de rupture.

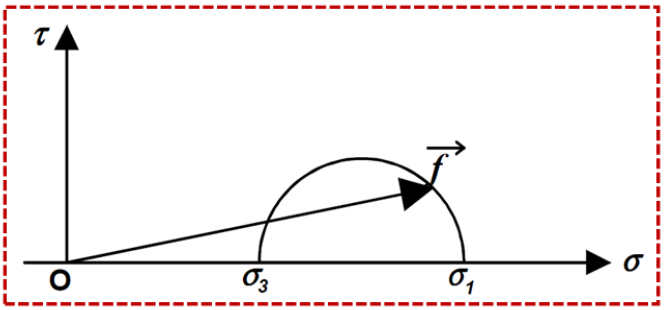
L'augmentation de la contrainte de cisaillement due aux efforts extérieurs peut être obtenue par un apport progressif des surcharges appliquées à la surface du massif. Celui-ci résiste jusqu'à une certaine limite, au-delà de laquelle le prisme situé au-dessus de la ligne de rupture se détache et glisse le long de cette ligne : il y a *rupture* dès que les déplacement du prisme devient perceptible.

Un sol résiste au cisaillement par la **cohésion** entre ses particules, par le **frottement** qui règne entre ses grains, ou encore par l'association de ces deux phénomènes.
Cette résistance au cisaillement du sol dépend de ses caractéristiques internes (la cohésion et l'angle de frottement interne), que nous abordons dans les paragraphes ci-après.

II.C- Courbe intrinsèque

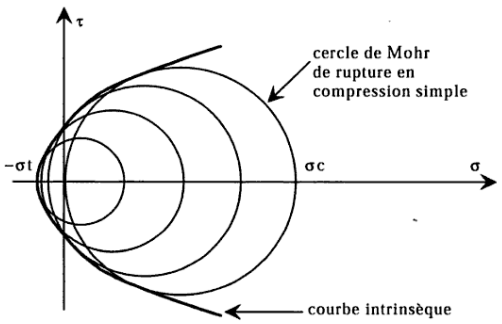
II.C.1- Cercle de Mohr

Pour étudier les contraintes en un point M, on admet une représentation du vecteur contrainte $\vec{f}$ dans un système d'axes (σ, τ) formant un repère d'origine O.
Lorsque le plan de la facette tourne autour d'une direction principale, l'extrémité du vecteur contrainte décrit un cercle appelé cercle de Mohr.



II.C.2- Courbe enveloppe

Soit un milieu continu soumis à un système de charges donné (compression simple par exemple). En faisant varier l'intensité des charges, on peut tracer pour chaque valeur de la charge le cercle de Mohr correspondant.



Dès que le niveau des contraintes en un point conduit à un cercle de Mohr tangent à la courbe intinsèque du sol, celui-ci se met en état limite de rupture : la partie instable se détache du massif.

L'enveloppe des cercles de Mohr obtenus forme une courbe, appelée **courbe intrinsèque**, propre au matériau étudié.

II.C.3- Courbe enveloppe d'un sol

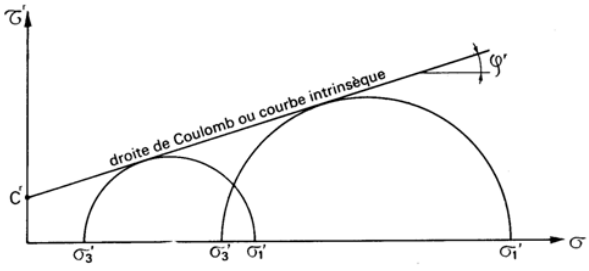
Dans le cas des sols, comme l'a montré Coulomb, la courbe intrinsèque est une droite d'équation $\boxed{\tau = \sigma \tan\varphi + c}$ appelée droite de Coulomb.

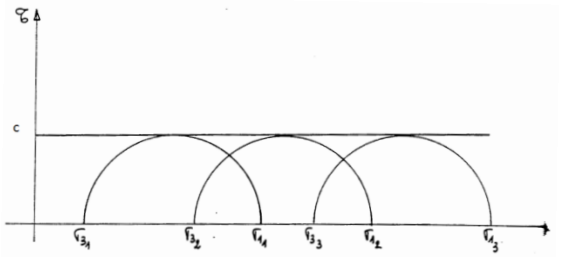
σ est la contrainte normale appliquée sur la facette (en kPa); τ est la contrainte tangentielle, ou de cisaillement (en kPa); **φ ,** l'angle formé par la droite de Coulomb et l'horizontale, est l'angle de frottement interne du sol (en degrés) ; ***c***, ordonnée à l'origine, correspond à la cohésion du sol (en kPa).

II.C.4- Résistance au cisaillement d'un sol

La résistance d'un sol au cisaillement dépend de ses caractéristiques internes C et φ. Dans cette équation de la droite de Coulomb, on voit bien l'effet favorable de la contrainte normale *σ* dans l'amélioration de la résistance du sol au cisaillement et par conséquent, à sa résistance au glissement et donc à sa stabilité.

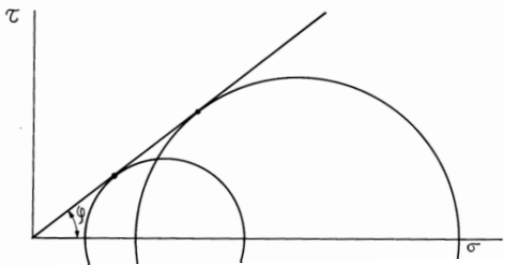
La cohésion est caractéristique des sols fins (il n'y a pas de cohésion dans les sols pulvérulents), tandis que l'angle de frottement interne est caractéristique des sols pulvérulents.





Dans le cas d'un sol constitué uniquement d'éléments fins, la droite de Coulomb est une droite parallèle à l'axe des abscisses qui a pour équation $\boxed{\tau = c}$.

Dans le cas d'un sol exclusivement grenu, la cohésion est nulle ; la droite de Coulomb est une droite passant par l'origine du système d'axes



Cependant la plupart des sols sont un mélange d'éléments fins et de sol pulvérulent.

II.D- Géométrie d'un massif de sol pulvérulent

Droite de Coulomb et pente d'un talus

Le talus naturel d'un massif se constitue de manière à former avec l'horizontale un angle inférieur ou égal à l'angle de frottement interne du sol

φ , afin d'assurer sa stabilité.

Géométrie pyramidale ou conique

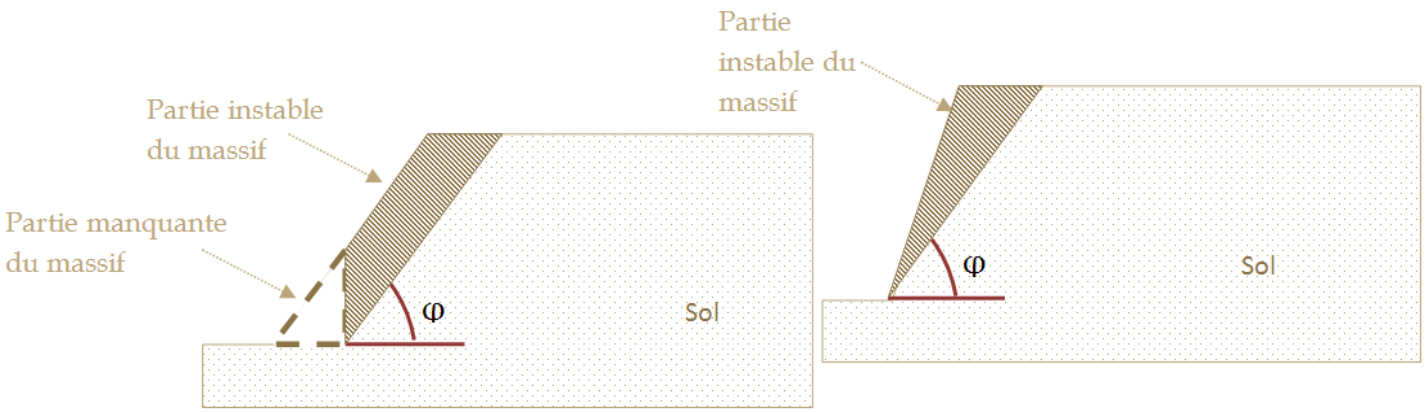
Lorsque l'on verse du sable sur une surface horizontale, le tas prend une forme conique, forme que l'on retrouve dans la nature, notamment dans les dunes. L'angle de base du cône est constant : il est appelé **angle de talus**

Instabilité d'un massif de sol pulvérulent

Un talus naturel est stable lorsqu'il forme avec l'horizontale un angle φ inférieur ou égal à l'angle de frottement interne qui caractérise le sol.

Ainsi, lorsque l'angle de talus est supérieur à l'angle de frottement interne du sol, le talus va chercher à prendre une forme stable de lui même. Dès, lors, les prismes de sol non stables vont se déplacer : ce sont des glissements de terrain.

Les glissements de terrain peuvent être dus à un angle de talus trop élevé, ou encore lorsque le pied du massif est entamé comme dans le cas d'un ravinement par un cours d'eau.



La présence d'eau dans un sol est toujours défavorable à sa stabilité. En effet, en présence de nappe, le poids du sol est déjaugé, ce qui réduit la contrainte normale de serrage des grains qui rentre dans le calcul de la résistance au cisaillement du sol en réduit en conséquence la résistance du sol au cisaillement.

D'où le caractère indispensable du drainage dans les ouvrages de soutènement ou de renforcement des sols pour éviter la mise en charge de l'eau à l'intérieur du massif.

II.E- Retour au problème

II.E.1- Données complémentaires

Sachant que les talus qui permettent d'éviter l'empiétement sur les quartiers situés en amont et en aval du versant sont instables, comment faut-il s'y prendre pour construire la route en respectant ces contraintes du site ?
Face aux instabilités pouvant affectées les talus, la connaissance des caractéristiques internes du sol en place ainsi que celles du sol d'apport est nécessaire.

II.E.2- La problématique

Nous savons que le talus naturel (avant la construction de la route) est stable. Nous savons aussi qu'il n'est pas possible de se contenter de faire un remblai en aval et un déblai en amont pour aménager la route, les talus ainsi réalisés ne sont pas stables lorsqu'ils sont circonscrits en dehors des zones construites.
En effet, du côté aval, le choix d'un matériau naturel, aussi performant qu'il soit, pour réaliser le remblai, ne permet pas de préserver les emprises des immeubles en bas de la pente et du côté amont le raidissage du talus existant est de nature à remettre en cause la stabilité du massif naturel initialement stable et provoquer la destruction des immeubles situés en haut du versant.

II.E.3- Les solutions envisageables

Pour préserver les espaces sur lesquels sont édifiés les bâtiments et limiter les volumes de remblai et de déblai, il faut recourir à des ouvrages particuliers, autres que les remblais et les déblais.
Dans la zone déblayée : Il est nécessaire de construire un ouvrage de soutènement sans réaliser préalablement le déblai ou de renforcer le sol en place ;
Dans la zone de remblai : Il est possible de construire, préalable au remblaiement, un ouvrage de soutènement ou d'améliorer les caractéristiques du sol utilisé pour le remblai.

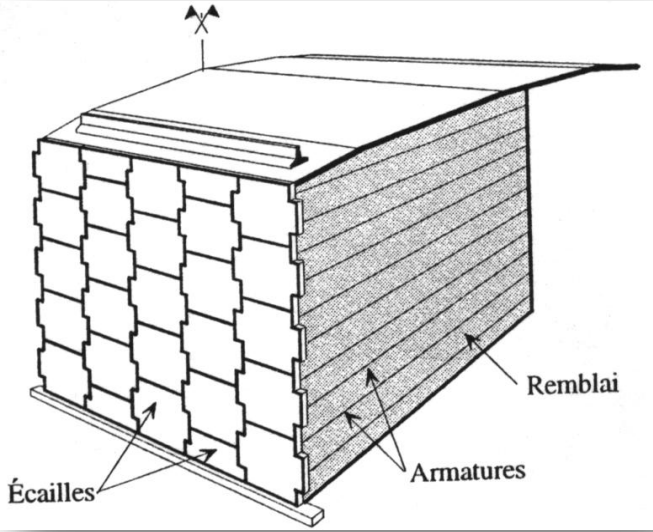
Nous étudions dans la suite ces deux solutions permettant d'assurer la stabilité des talus tout en respectant les zones construites de part et d'autre du versant.

III- Améliorer les caractéristiques internes des sols

III.A- Le principe

Il est possible d'apporter une stabilité à un massif en améliorant ses caractéristiques mécaniques. Cette amélioration est obtenue, en général, par une incrustation dans le massif, d'éléments mécaniquement plus performants que le sol lui-même, donnant à celui-ci une meilleure résistance au cisaillement.
La recherche appliquée et l'apport individuel de quelques Ingénieurs hors norme ont permis de mettre au point des principes constructifs permettant d'apporter des idées nouvelles et des innovations dans l'amélioration des caractéristiques des sols.
Nous présentons ci-après les principales solutions utilisées en la matière.

III.B- La Terre-Armée



Dans les années 60, Henri Vidal dépose le brevet de la «Terre-Armée». C'est un principe de renforcement des sols par l'association d'armatures métalliques et de remblai grenu, type sable, qui permet la formation d'un massif mécaniquement plus performant.
Le parement* de ce type de massif est constitué d'un parement béton modulaire dont l'élément de base est appelé écaille. Les écailles sont reliées aux armatures constituées, elles, en lanières métalliques.

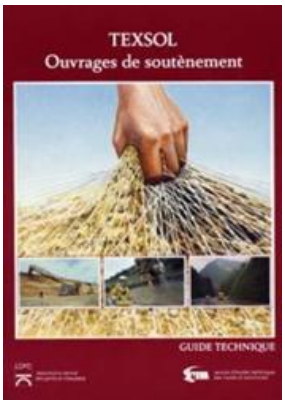
III.C. Le freyssissol

Devant le problème de corrosion des armatures métalliques et le développement des produits synthétiques, mécaniquement performants et chimiquement stables, la société Freyssinet a mis au point un procédé de terre armée à base d'une armature synthétique faite à partir de polyester, le Freyssissol est alors né !

Il est apparu dès que le brevet de monsieur Vidal est tombé dans le domaine public.
D'ailleurs c'est la société Freyssinet, filiale du groupe Vinci qui racheté la société Terre armée dans les années 90.

III.D. Le texsol

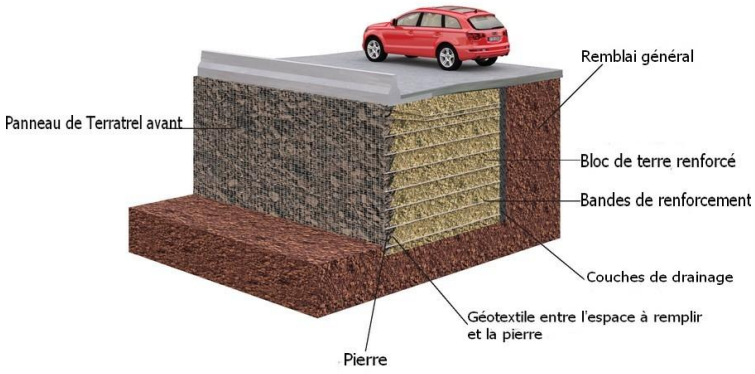
Le Texsol est un **matériau composite*** obtenu par un mélange de sol (sable) et de fils textiles tridimensionnel. Il peut être engazonné pour un effet esthétique.



Il est utilisé dans les travaux d'élargissement de plates-formes routières ou ferroviaires ou dans les ouvrages de soutènement.

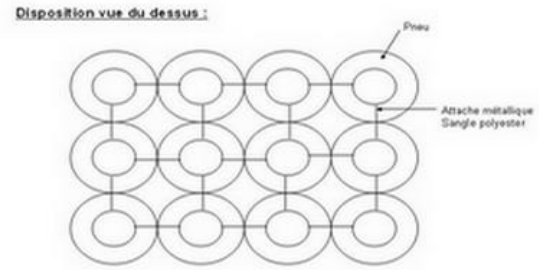
III.E. Le Terratrel

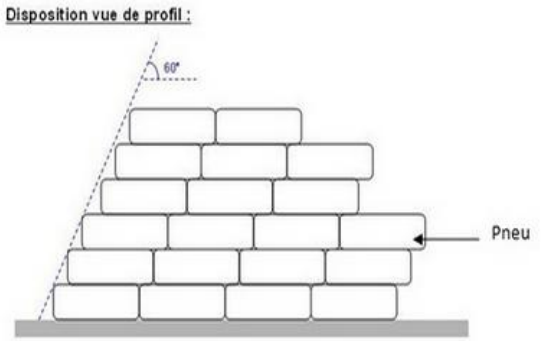
Le TerraTrel est un parement* léger constitué d'un treillis métallique relié à des armatures en acier. Également appliqué aux ouvrages provisoires, son intégration à l'environnement se fait par végétalisation ou par minéralisation.



III.F. Le Pneusol

Le Pneusol est un mélange de pneus et de sol, dans lequel les pneus sont utilisés comme renforts du sol. Ils sont capables de supporter des efforts de traction importants et sont soit entièrement soit partiellement découpés afin



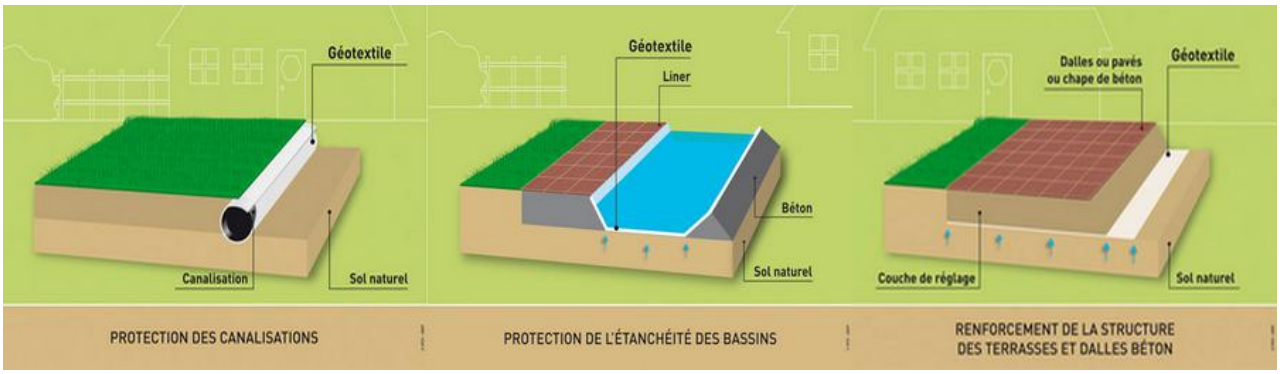


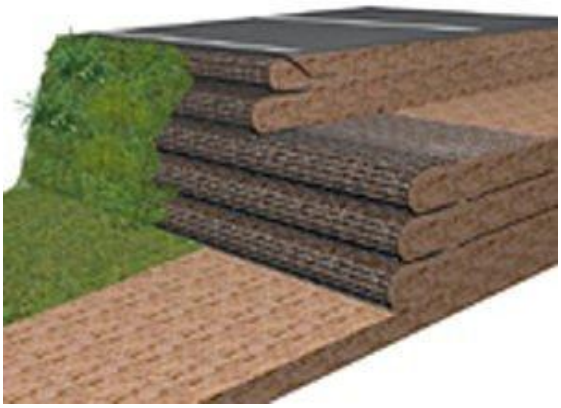
d'être associés en nappes, en couches superposées, grâce à des attaches métalliques.

III.G Renforcement par inclusions géosynthétiques

Les géotextiles sont des tissus dont au moins l'un des constituants est à base de **polymère synthétique**
Le renforcement par inclusions géosynthétiques est un procédé utilisé pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols.

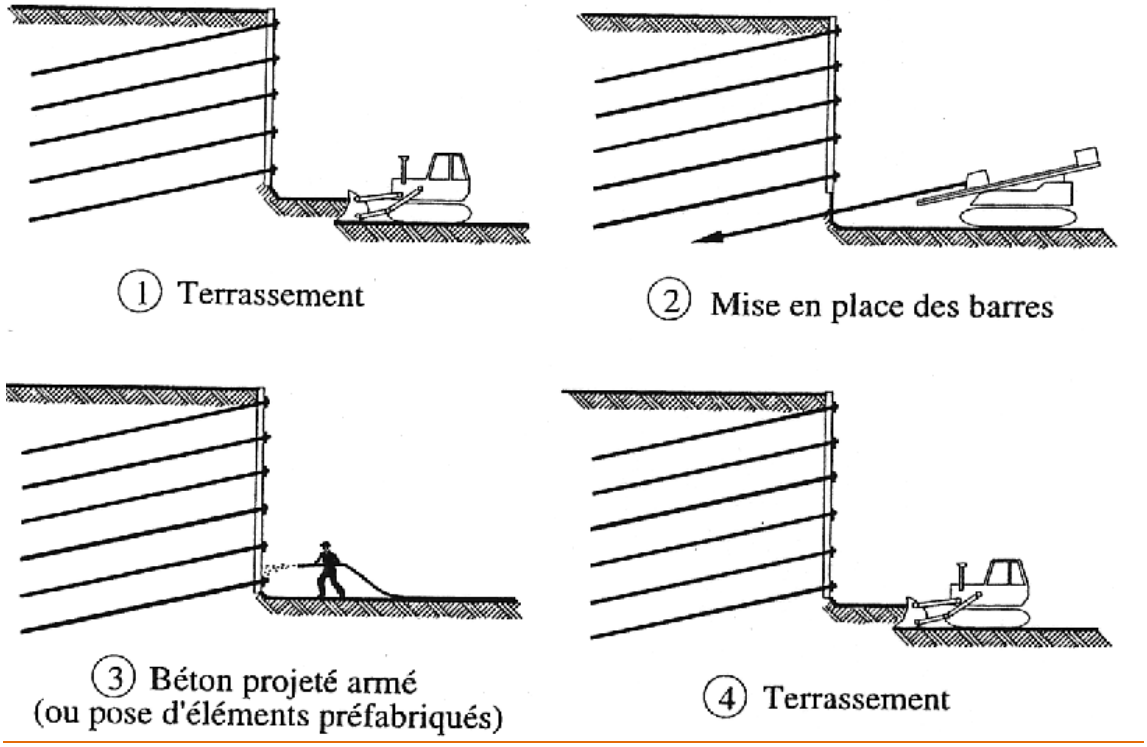
Lorsqu'il s'agit de constructions de talus, de berges ou de soutènements dont la pente doit être supérieur au talus naturel c'est-à-dire supérieur à l'angle de frottement interne φ, l'inclusion de nappes géosynthétiques permet de raidir les pentes pour obtenir l'angle voulu. Le géosynthétique peut également servir d'armatures horizontales.





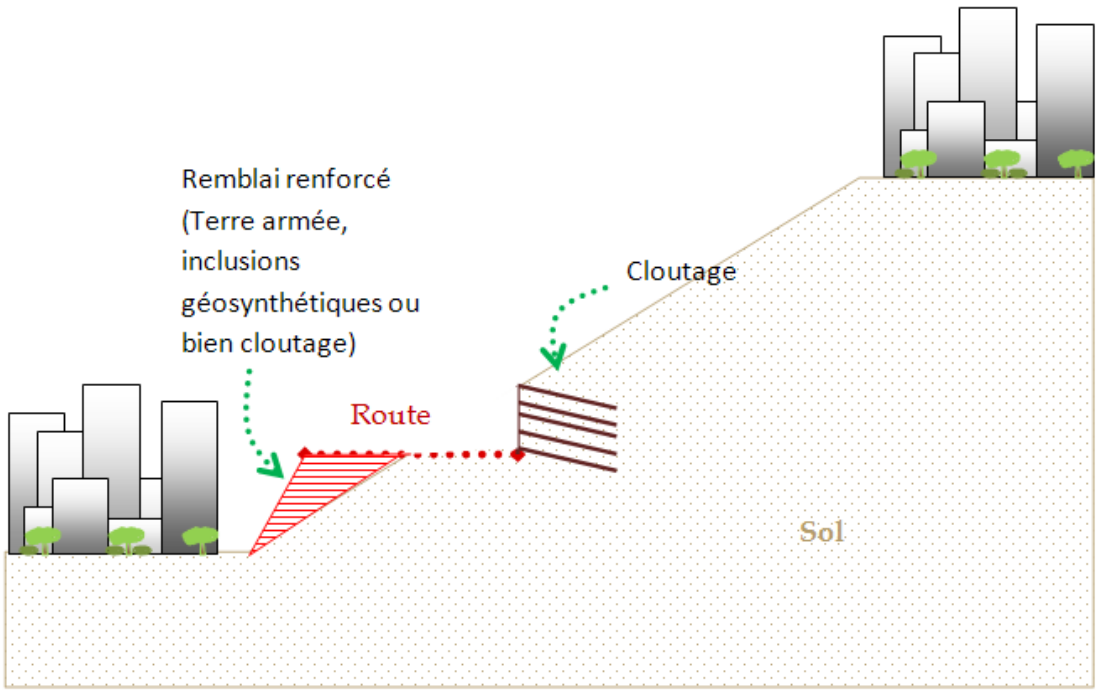
III.H- Le cloutage

Le cloutage de sol est un principe d'amélioration du sol à l'aide d'armatures métalliques mises en place à l'intérieur de forages réalisé dans le massif à stabiliser.
L'intérêt d'un tel procédé est de réaliser le raidissage des pentes de talus avant de procéder au déblai.
Le parement est réalisé à l'aide d'un béton projeté et les armatures sont courantes car il s'agit d'armatures de béton armé sans autre prescription complémentaire.



III.I- Retour au problème

Parmi les solutions techniques passées en revue dans les paragraphes précédents, il convient de noter qu'une seule solution d'amélioration de sol est adaptée du côté déblai. Il s'agit, évidemment de la solution « cloutage ».
Par contre du côté remblai, toutes les autres solutions sont adaptées. En fait l'amélioration des caractéristiques du remblai à mettre en place permettra de raidir le talus, voire d'obtenir un talus vertical (Terre armée ou équivalent, renforcement par un géotextile,…) à la verticale de la limite extérieure de la route à construire.



IV - S'opposer à la poussée des terres par un soutènement

IV.A- la fonction d'un soutènement

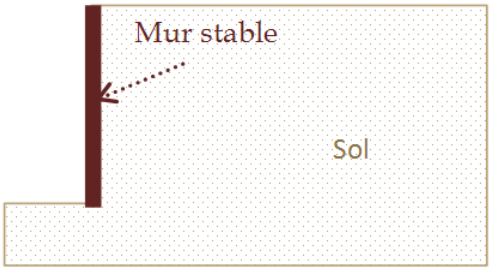
Pour stabiliser un massif de sol, on peut aussi s'opposer à la poussée des terres, par la construction d'une paroi ou d'un mur. Dans un massif de sol, le mur permet de réduire l'emprise du talus pour laisser place au passage d'une route ou préserver un bâtiment déjà présent.

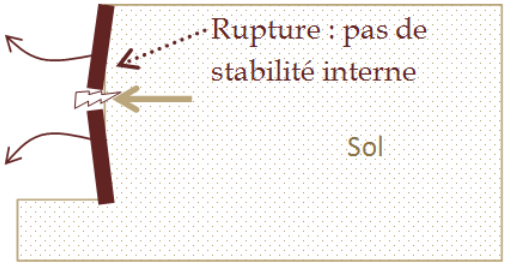
IV.B- Stabilité d'un mur

Les ouvrages de soutènements sont soumis à des risques de rupture, sous l'effet des forces exercées par le massif. Il existe différents types de rupture, et donc différents types de stabilité, qui doivent toujours être pris en compte lors de l'élaboration de l'ouvrage. On distingue donc **stabilité interne** et **stabilité externe**.

IV.B.1- Stabilité interne

Un mur doit avoir une **stabilité interne**, qui passe par la résistance à la **rupture** des constituants du mur sous l'action des forces exercées par le massif.



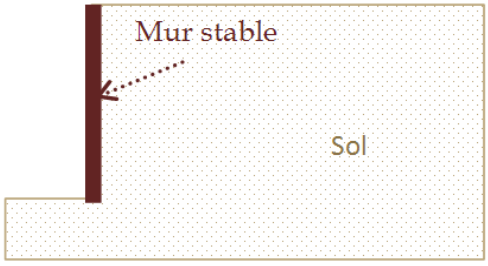


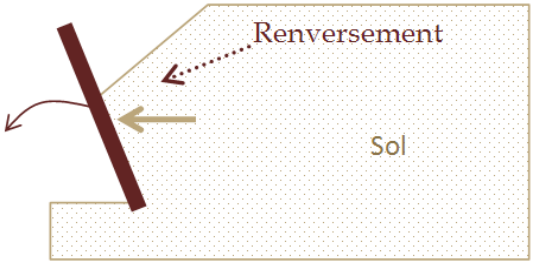
IV.B.2-Stabilité externe

Il existe trois types de stabilité externe : la stabilité au renversement, la stabilité au glissement, la stabilité au poinçonnement.

Stabilité au renversement

Un mur de soutènement est soumis à des moments qui sont de nature à le faire tourner par rapport à sa base et le faire renverser. La conception du soutènement doit tenir compte de la valeur du moment moteur produit par les poussées des terres et des surcharges pour l'équilibrer à l'aide d'un moment résistant apporté par le poids du soutènement et celui des terres qu'il déplacerait dès qu'il se met à tourner.

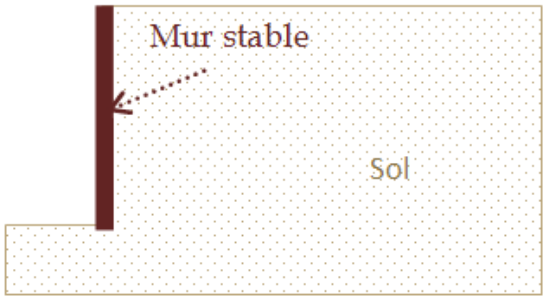


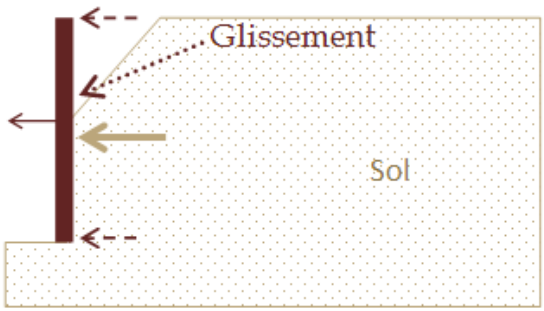


Stabilité au glissement

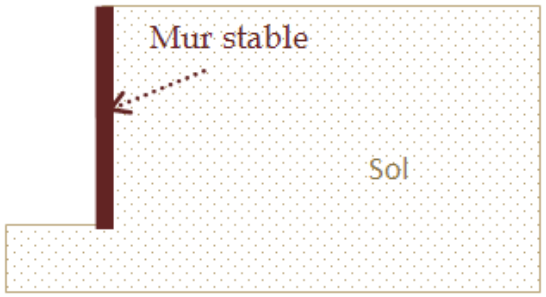
Le mur peut glisser sur sa base. La poussée des terres et celles des surcharges doit être reprise par le frottement mobilisé à la sous-face de la semelle du mur. A défaut la semelle st

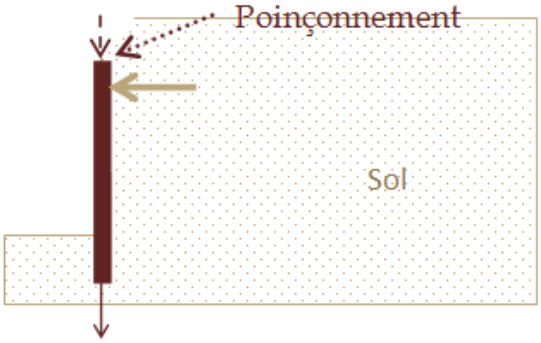
munie d'une bêche permettant d'améliorer la résistance au glissement.





Stabilité au poinçonnement
Le mur peut poinçonner par un excès de charges verticales. La conception de la semelle du mur doit tenir compte de ce risque d'instabilité.



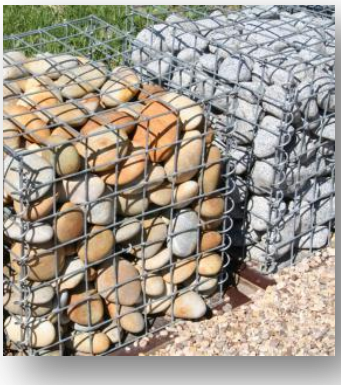


IV.C- Les différents types de soutènement

Il existe différents de soutènement, chacun présentant certaines spécificités.

IV.C.1- Murs en gabions

Le mot gabion provient de l'italien « gabbione » qui signifie « grosse cage ». A l'origine, le gabion est un système défensif utilisé pour protéger une position des tires d'artillerie ou des balles, au XVIIème siècle.



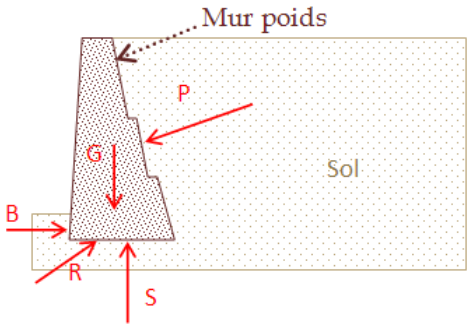
Aujourd'hui, un gabion désigne une carcasse métallique (ou casier) contenant du sable ou des cailloux. Ce casier est fait de solides fils de fer tressés, de forme parallélépipédique.
Le gabion est un produit qui a permis d'améliorer les techniques de construction. En effet, il permet de fabriquer très rapidement des renforcements de berge, des murs…

Le procédé du gabion consiste en l'enfermement de pierres compactées dans un casier métallique disposé en épi ou parallèlement aux rives pour lutter contre l'érosion (fluviale ou territoriale).

Cependant, le gabion est essentiellement utilisé pour la construction de murs de soutènements, pour consolider une berge ou des massifs de terre.
Il présente en effet de nombreux avantages : il est robuste, durable, modulable, simple à installer, esthétique (peut être végétalisé ou rempli de galets homogènes), résistant et s'adapte à son lieu d'implantation et aux variations du sol ; il a donc une bonne intégration paysagère. Il assure de plus le drainage, indispensable à l'élaboration de tout ouvrage.

IV.C.2- Les murs poids

Le principe du mur poids est d'opposer le poids de la maçonnerie du soutènement à la poussée des terres qui tendent à le renverser. La poussée des terres est minimale au sommet du mur et croît avec la profondeur à l'arrière du mur, d'où le fait qu'ils s'épaississent avec à la base. Ils peuvent être constitués d'un assemblage de pierres sèches, de gabions, en béton armé, en moellons ou en brique.



P : poussée des terres

B : butée

R : réaction du terrain

S : éventuelles sous-pression

Par son poids, le mur poids a pour but de compenser les différentes forces s'exerçant sur lui :

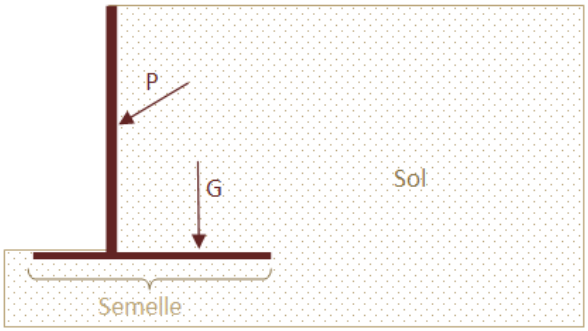
- celle exercée par la terre avec laquelle il est en contact
- la réaction du terrain, à savoir l'interaction entre le mur et le sol
- force horizontale qui s'oppose à la poussée
- pression exercée par l'eau en sous-sol

Le mur poids est un des premiers murs de soutènement, mais, car il occupe un espace important, il a été progressivement abandonné pour d'autres murs plus performants.

IV.C.3- Les murs en aile

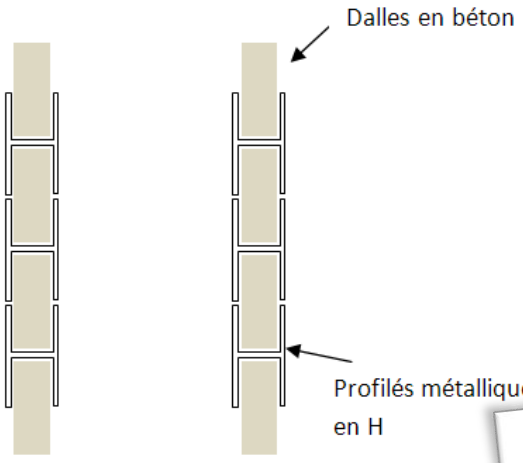
Ce type de mur est fait d'un seul matériau, généralement du béton.
Un mur à semelle est composé d'une paroi verticale perpendiculaire à une semelle. A la différence du mur poids, il ne s'agit pas ici de compenser les forces exercées par les terres mais plutôt de s'opposer au renversement du mur par le poids du terrain. Ainsi, les terres

exercent une force à la fois sur la paroi et sur la semelle par leur poids permettant de s'opposer au renversement du mur.



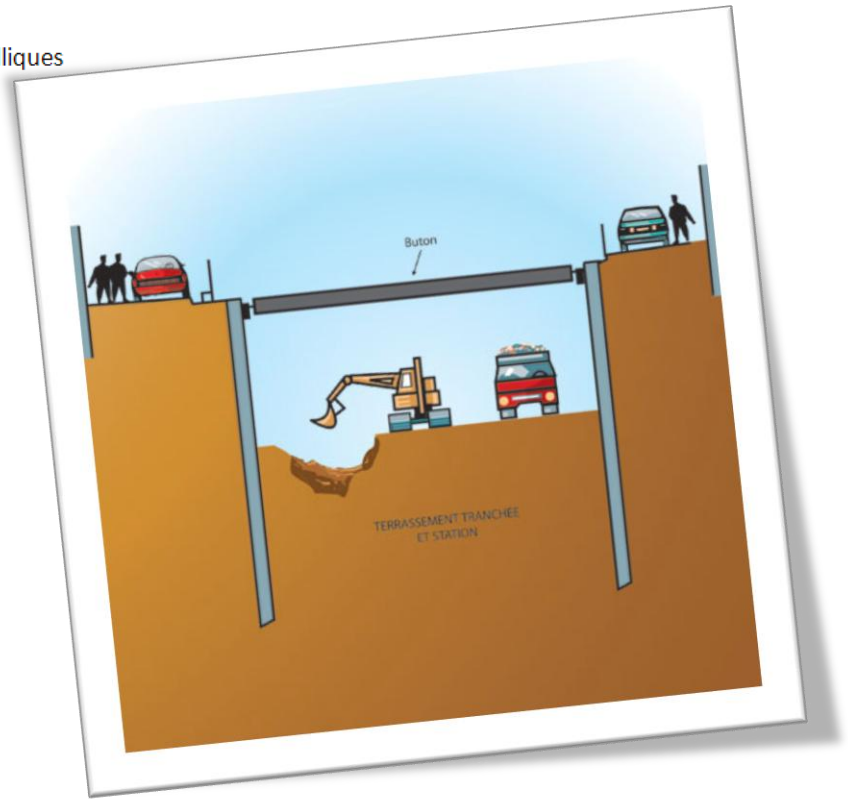
IV.C.4- Les parois berlinoises

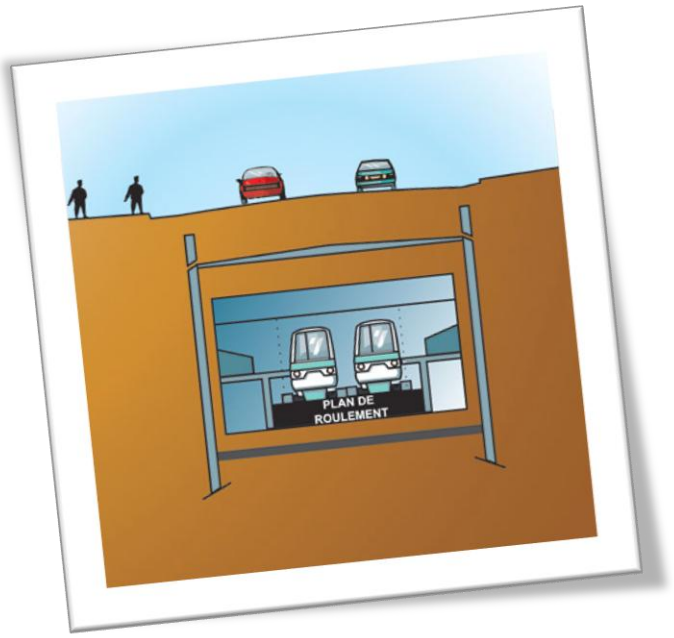
Cette méthode de soutènement souterrain a été utilisée pour la construction du métro à Berlin. Elle consiste à effectuer les travaux de terrassement nécessaires sans immobiliser totalement la circulation routière.



On bloque la circulation sur la moitié de la route, puis on réalise un trou où l'on insère des profilés* métalliques en H. On y coule ensuite des dalles en béton.

On procède de même pour l'autre côté de la route. Il est ensuite possible de réaliser les travaux de terrassement sans avoir un impact sur la stabilité des constructions environnantes. Au cours du terrassement, on place des poutres horizontales (butons) entre les deux parois, butons qui seront ensuite enlevés au cours de la réalisation de l'ouvrage.





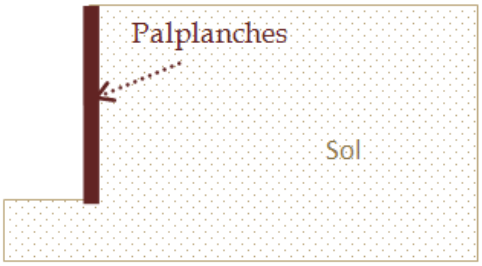
La circulation est rétablie pendant que les travaux se terminent dans le sous-sol.

IV.C.5- Rideaux de palplanches métalliques

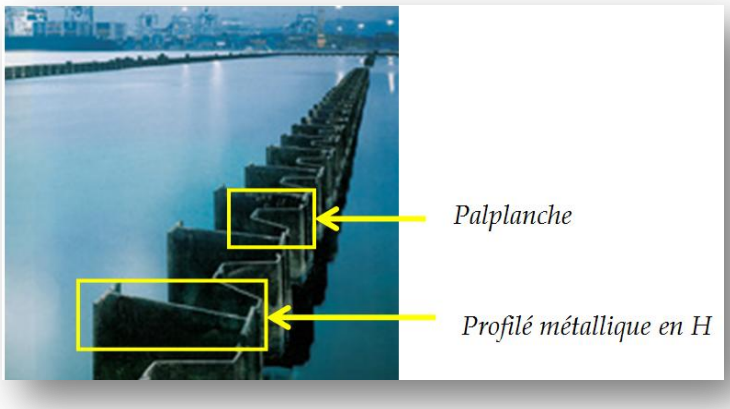
Les rideaux de palplanches sont en métal.

Nervures latérales ou « serrures » reliant et enclenchant les palplanches métalliques.

A l'origine, une palplanche était une planche servant à consolider une galerie de mine afin d'éviter les éboulements. Aujourd'hui, une palplanche correspondrait plutôt à un pieu* profilé*, relié aux pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales (en métal) appelées serrures. Ainsi, l'enclenchement de ces différentes palplanches permet de constituer un mur de soutènement qui a pour but de retenir toute construction.



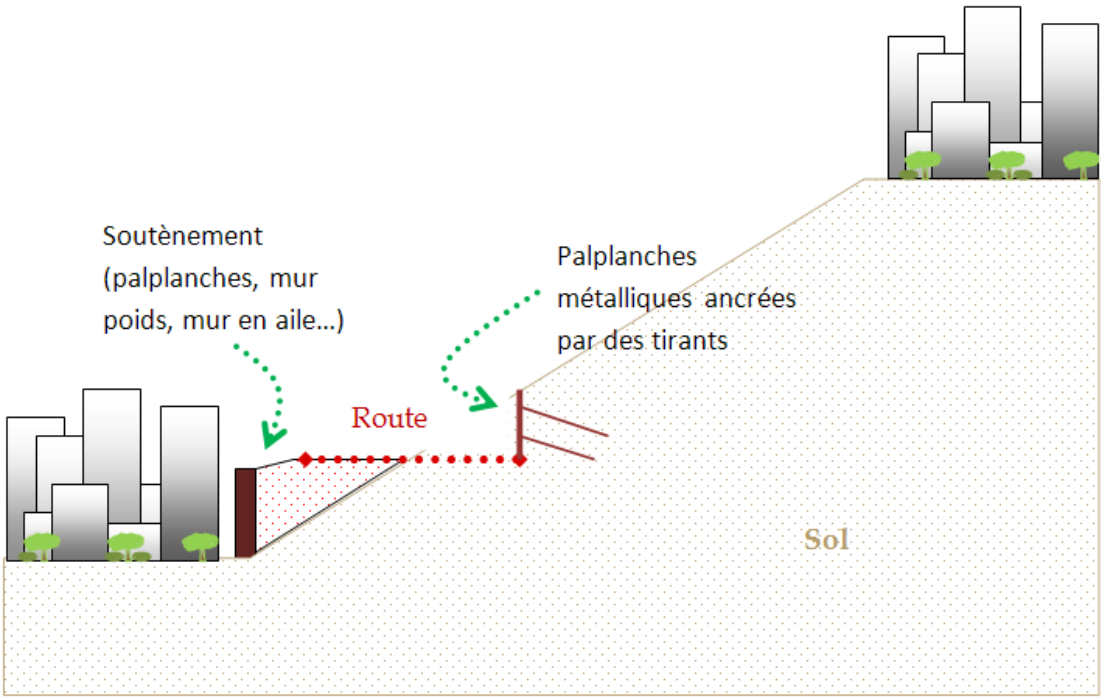
Les palplanches métalliques sont utilisées dans différents domaines mais principalement pour consolider les fondations de ponts (d'anciens ponts) en milieu aquatique, tout en garantissant une certaine étanchéité. Elles sont souvent associées à d'autres éléments de construction, comme des profilés métalliques



IV.D- Retour au problème

Parmi les solutions techniques de soutènement, passées en revue dans les paragraphes précédents, il convient de noter que pour le côté déblai les solutions adaptées sont les berlinoises et les rideaux en palplanches métalliques.

Par contre du côté remblai, toutes les solutions peuvent convenir (sauf les parois berlinoises, qui sont une méthode de soutènement souterrain).



Conclusion

Le problème qui a jalonné notre démarche de découverte de quelques notions de mécanique des sols tourne autour de la question de la tenue d'un massif de sol se trouvant instable du fait de facteurs naturels et artificiels ou d'une contrainte liée au site lorsqu'il s'agit d'un projet à réaliser.

Cette question nous a permis de se plonger dans un domaine nouveau dont les bases font appel à un développement théorique et dont les applications sont riches et variées.

Les massifs dans l'état naturel ou dans les projets conçus par les hommes sont constamment soumis à des facteurs qui influent sur leur stabilité. Ces facteurs sont naturels (gel-dégel, érosion, ravinement…) ou artificiels (construction d'habitations, de villes, de routes, de voies ferrées, de tunnels , de barrages, de ponts, de digues qui en modifiant les contraintes qui s'exercent sur un massif le déstabilisent.)

Pour apporter une stabilité à un massif, on peut alors soit améliorer les caractéristiques internes du sol qui le constitue par un apport de matériau que joue le rôle d'une armature, soit opposer aux poussées des terres un ouvrage de soutènement que permet de rétablir la stabilité de lu massif.

.Nous avons présenté quelques procédés qui permettent de stabiliser un massif, notamment le renforcement avec des armatures métalliques comme dans la terre armée ou les murs cloutés, les inclusions géosynthétiques sous toutes leurs forms, et les ouvrages de soutènement avec la construction de parois ou de murs ancrés ou non dans le massif conçus pour résister aux poussées des terres.

Cependant, avant la construction de chaque ouvrage, la reconnaissance géotechnique s'impose. En effet, le calcul des poussées qui naissent au sein du massif est indissociable de l'étude du sol et de son comportement.

La maquette construite à l'aide d'un sable soutenu par un mur en sac de sable d'un côté, renforcé par un géotextile de l'autre et laissé s'étaler avec un talus naturel sur le côté montre bien l'intérêt de chaque technique de stabilisation.

Nous retenons la différence entre les sols et leurs comportements et la variété des procédés mis au point et appliqués par les Ingénieur dans ce vaste domaine qui est le soutènement et la stabilisation des massifs de sol.

Les sols qui paraissent échappés à la maîtrise de la science répondent à des règles et à des lois bien précises. Celles-ci constituent des bases pour réaliser des grands projets tels que les gratte-ciels, les ponts, les tunnels,……

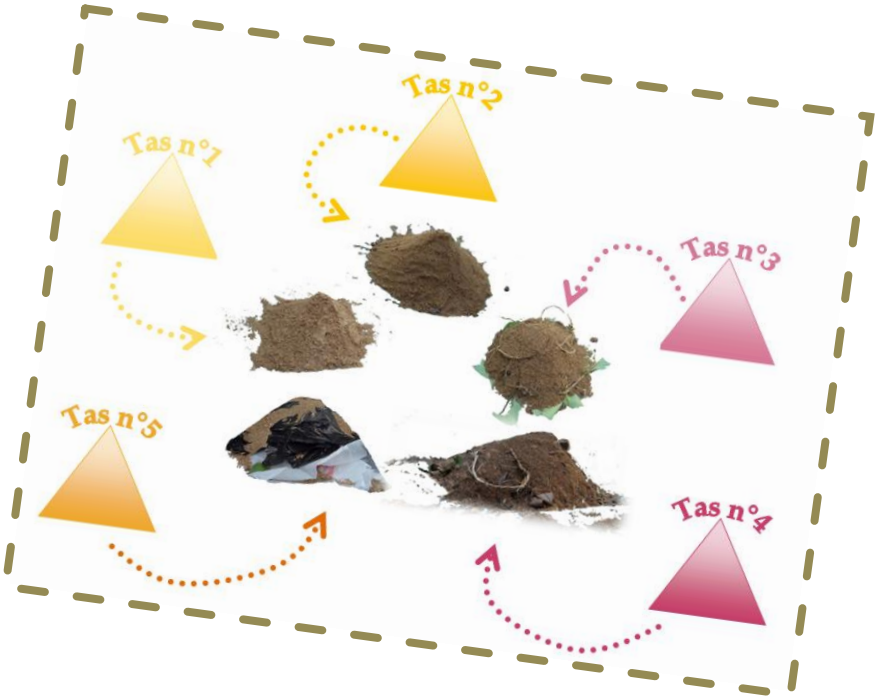
Annexe 1 : *l'expérience de Vidal*

Henri Vidal (1924-2007) remarqua que lorsqu'il rajoutait des feuilles d'arbre dans un tas de sable, il devenait moins facilement compressible. Il réalise alors une série d'essais en modèle réduit de murs en Terre Armée avec du sable et des armatures en papier, afin d'étudier le mécanisme et de mettre au point ses premiers calculs. En 1963, en France, il dépose le brevet pour la Terre Armée et publie le résultat de ses recherches.

Nous avons reproduit l'expérience d'Henri Vidal en soumettant différents tas de sable à une charge de 8 kg. Nous avons utilisé pour cela un gros sable.

Nous avons étudié le cas du sable naturel sans aucune armature. Le sable est simplement versé sur une surface plane (tas n°1) et un autre où il était tassé avec les mains (tas n°2), ce qui permet de réduire l'indice des vides, et ainsi de réduire les déformation du sable lors de l'application de la charge de 8 kg.

Nous avons également étudié le cas du sable armé, avec des feuilles d'arbre et des racines (tas n°3), le même tas compacté (tas n°4), et enfin un tas de sable compacté et renforcé par couches successives de sacs en plastiques (tas n°5)



La hauteur de chaque tas a été mesurée avant et après compactage.

On obtient ainsi le tableau suivant :

	Tas n°1	Tas n°2	Tas n°3	Tas n°4	Tas n°5
Hauteur initiale h_i (en cm)	12	7,3	12,8	7,5	7,4
Hauteur après compression par une masse de 8 kg h_c (en cm)	4,7	4,4	6	5,4	6,2
Diminution $h_i - h_c$ (en cm)	7,3	2,9	6,8	2,1	1,2
Taux de diminution $\frac{h_i - h_c}{h_i} \times 100$ (en %)	60,83	39,73	53,12	28	16,22
Pourcentage de la hauteur après compression par rapport à la hauteur finale $\frac{h_c}{h_i} \times 100$ (en %)	39,17	60,27	46,88	72	83,78

Observations et interprétation des résultats

- On remarque que le tassement sous une charge est fonction de la compacité initiale du sol.
  En effet, la diminution de hauteur est plus importante pour le tas n°1 que pour le tas n°2, et plus importante pour le tas n°3 que pour le tas n°4.
  On peut en conclure que plus l'indice des vides est faible, moins le tassement est important.

- On remarque que la diminution de hauteur est plus importante pour le tas n°1 que pour le tas n°3, plus importante pour le tas n°2 que pour le tas n°4 ou encore n°5.
  On peut en conclure que la présence d'éléments de renforcement (racines et feuilles pour les tas n°3 et 4, couches de sacs en plastique pour le tas n°5) réduit le tassement de manière significative.

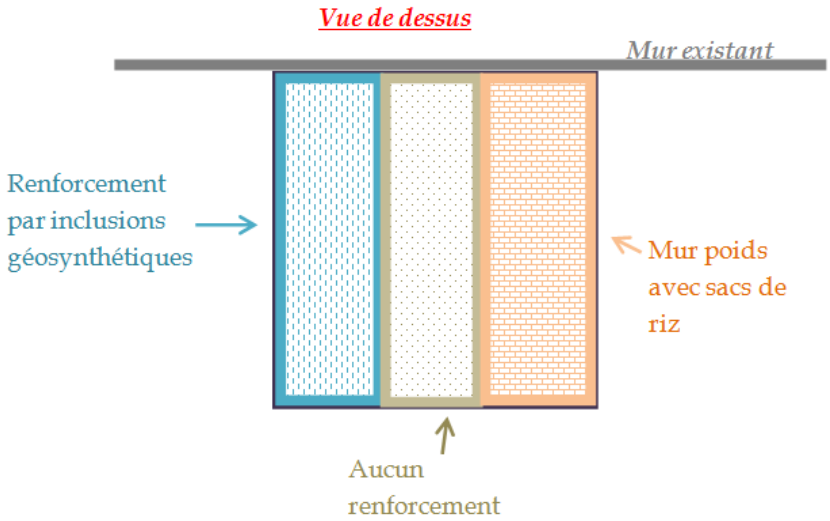
- On remarque que la diminution de hauteur est plus importante pour le tas n°4 que pour le tas n°5.

On peut en conclure que le tassement est fonction du type de renforcement utilisé : ici, les sacs en plastique semblent plus « efficaces » que les feuilles et racines.

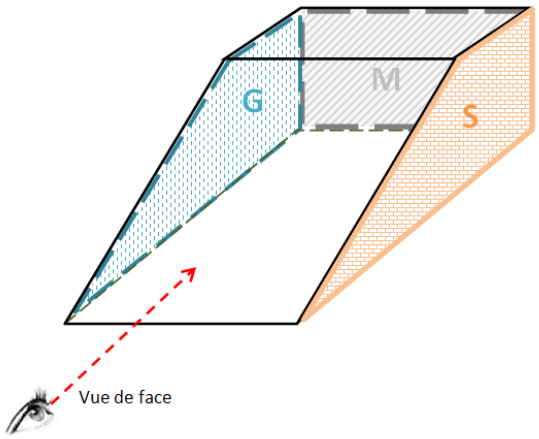
- On remarque également que le diamètre du tas augmente lors du tassement, ce qui est du au coefficient de Poisson dit effet chaussette.*

Annexe 2 : *notre projet*

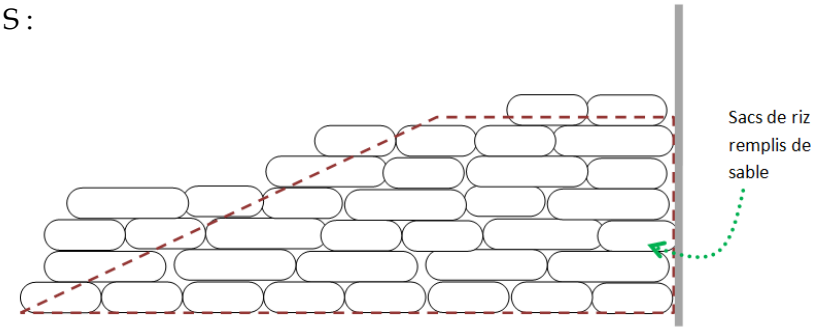
Afin de montrer quels peuvent être les avantages du soutènement et du renforcement des sols, nous avons réalisé un modèle réduit combinant ces deux techniques.



Considérons que la maquette a la forme du solide ci-dessous

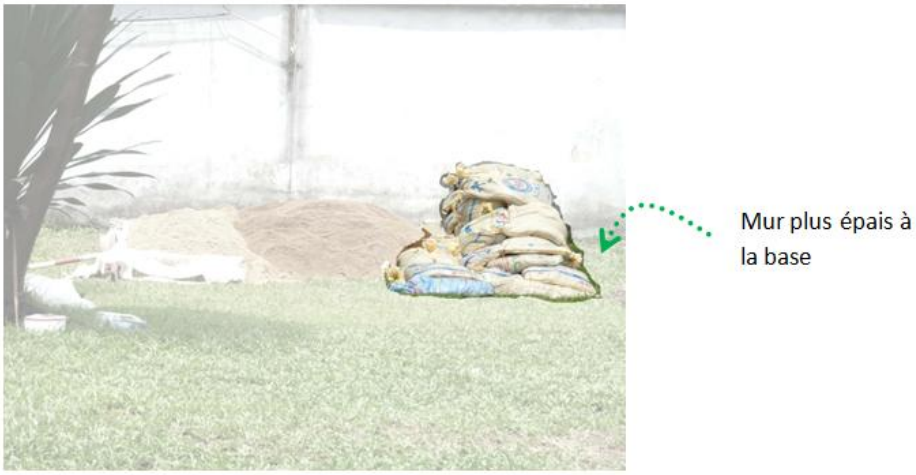


Détail de la face S :

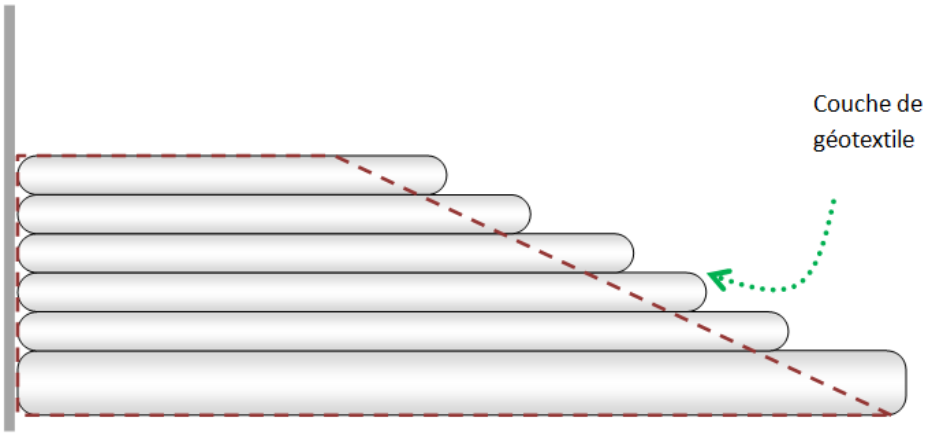


Les sacs de riz sont en fait empilés pour former une espèce de pyramide à base rectangulaire (elle n'est pas entièrement visible : en effet, une partie du « mur » est couverte par le sable, le mur étant plus épais à la base).

Les sacs sont placés en quinconce, de manière à ce qu'il n'y ait jamais deux sacs superposés qui soient dans le même sens, afin d'assurer la stabilité du mur

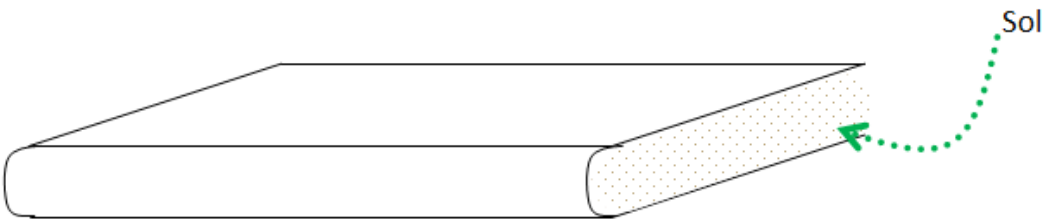


Détail de la face G

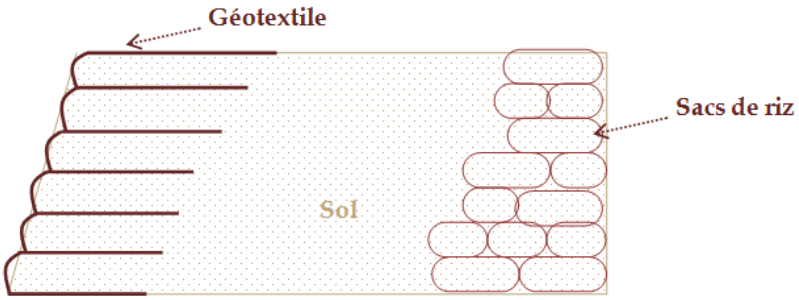


Compte tenu de l'irrégularité du terrain, la couche inférieure sert de support horizontal

Schéma en perspective d'une couche de géotextile



Détail de la face M



Ce modèle montre comment le soutènement et le renforcement permettent de gagner de l'espace et de profiter de la zone sur laquelle s'étend le talus naturel d'un massif de sol.

Lexique

Adsorption *Dans le cas des sols fins, les particules attirent les molécules dipolaires d'eau ; l'eau forme alors une couche dite adsorbée à la surface des particules : c'est l'adsorption*

Cercle de Mohr *Cercle décrit par l'extrémité du vecteur contrainte lorsque le plan d'une facette de sol tourne autour du point considéré*

Cohésion *Aptitude que possède un sol à maintenir les particules qui le composent reliés les uns aux autres par des interactions*

Courbe granulométrique d'un sol *C'est la courbe des fréquences cumulées croissantes (en pourcentage) des différents diamètres de particules constituant le sol (cf.I.A.1-)*

Courbe intrinsèque d'un sol *Courbe enveloppe des cercles de Mohr*

Désagrégation des roches *Sous l'effet de facteurs climatiques (température, eau…) une roche se désagrège pour former du sol de la même composition que la roche-mère ; c'est le cas des sols pulvérulents*

Granulométrie *Mesure de la dimension des particules de matières constituant un sol*

Limites d'Atterberg *Teneurs en eau marquant le passage de l'état solide à l'état plastique et de l'état plastique à l'état liquide*

Limon (ou silt) *Sol cohérent dont le diamètre des particules est compris entre 2 et 20 µm*

Matériau composite *Mélange de matériaux qui n'ont pas les mêmes propriétés (par exemple, l'association de fibres et de sol.*

Matériau profilé *Matériau auquel on a donné un profil, une forme déterminée*

Milieu continu ou discontinu *Un milieu continu est un milieu tel que pour tout point M' au voisinage d'un point M de ce milieu, la déformation subie par le point M est au voisinage de celle subie par le point M' ; la matière étant principalement constituée de vide (à l'échelle microscopique), les milieux sont généralement considérés à l'échelle macroscopique*

Mur poids *Mur qui s'oppose à la poussée des sols par son poids*

Pieu *Elément de construction servant dans le cas où le terrain ne peut pas supporter les contraintes superficielles dues à la masse de l'ouvrage*

Rupture d'un sol (par cisaillement) *Dans le cas d'un matériau chargé, une rupture se produit lorsque la contrainte est trop importante ; l'élasticité du matériau ne peut empêcher la rupture ; c'est une déformation irréversible*

Sédimentométrie *Processus consistant à calculer le diamètre des particules de sol en mesurant leur vitesse de sédimentation (décantation) dans un liquide au repos (généralement de l'eau)*

Sol fin ou cohérent *Sol dont les grains ont un diamètre inférieur à 20 µm*

Sol grenu ou pulvérulent *Sol dont les grains ont un diamètre supérieur à 20 µm*

Surface spécifique d'un sol *La surface spécifique d'un sol est la surface par unité de volume. En effet, si l'on prend un caillou et qu'on le casse en deux, les deux morceaux auront le même volume que le caillou d'origine, mais la surface totale des deux morceaux sera plus importante que celle du caillou. De même, dans un sol, plus il y a d'éléments fins, plus la somme des surfaces de chaque grains est grande, pour un même volume de sol (on*

considère ici le volume des particules solides V_s). Ainsi un sol très argileux, par exemple, aura une surface spécifique plus importantes qu'un sol grenu ou qui contient peu d'argile (cf. I.A.3-)

Tamisage *Processus consistant à faire passer successivement du sol dans des tamis de taille différente afin de réaliser l'analyse granulométrique de ce sol*

Tassement d'un matériau *Déformation du matériau sous l'effet d'une charge*

Bibliographie

Sites Internet

http://graduateschool.agroparistech.fr/site.php?id=44&fileid=88

http://lmswww.epfl.ch/commun/pdf_doc_sols/Complements_cours_mec._sols.pdf

http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/Expose-Etudiant_Amelioration_des_sols.pdf

http://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/processus-naturels/up3/web/geotechnique-2004-2005.htm

http://www.estigc.fr/site%20etc/rdm/materiaux/resistancelimite.html

http://www.fichier-pdf.fr/2011/01/15/21189625-cours-mecanique-sols-1/21189625-cours-mecanique-sols-1.pdf

http://www.fichier-pdf.fr/2011/02/07/chapitre-20002-20-20les-20granulats-1/chapitre-20002-20-20les-20granulats-1.pdf

http://www.fichier-pdf.fr/2011/06/28/gen-29-sols-essais-de-labo-01/gen-29-sols-essais-de-labo-01.pdf

http://www.fichier-pdf.fr/2011/09/22/tp-oedometrie/tp-oedometrie.pdf

http://www.geotech.sn/MoodleCours/CONTRAINTES%20DANS%20LES%20SOLS.htm

http://www.ista.ma/remos_downloads/BATIMENT_ET_TRAVAUX_PUBLICS/TS_CONDUCTEUR_DE_TRAVAUX/M16-Connaissance_de_la_mecanique_des_sols_BTP-TSCT.1787.pdf

http://www.pmmh.espci.fr/fr/Enseignement/Archives/MecaSol/Enonce_Tut_3.pdf

http://www.pmmh.espci.fr/fr/Enseignement/Archives/MecaSol/Enonce_Tut_3.pdf

http://www.ummto.dz/IMG/pdf/memoire_cle037cfc.pdf

http://www.u-picardie.fr/~beaucham/eadaa/mecasol.htm

https://intranet.insa-toulouse.fr/view/551/content/chapitre_4.pdf

https://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/mcyr/chapitre_1-proprietes_physiques_des_sols.pdf

https://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/mcyr/chapitre_4-resistance_au_cisaillement_des_sols.pdf

http://graduateschool.agroparistech.fr/site.php?id=44&fileid=88

http://lms.epfl.ch/files/content/sites/lms/files/shared/Publications/Soil%20and%20Rock/Mecanique_des_sols_GAIE.pdf
http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/terre_armee_cle6322b1.pdf
http://www.mtpnet.gov.ma/NR/rdonlyres/17F48F90-02BB-4DA2-B42A-2213394AF72B/905/504Pr%C3%A9alablesdutilisationdelatechniquedelaterrear.pdf
http://cataloguesetra.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Dtrf-0000427&qid=sdx_q0&n=31&q=
http://www.archiexpo.fr/prod/terre-armee/murs-de-soutenement-modulaires-en-sol-renforce-61496-276161.html
http://www.archiexpo.fr/prod/terre-armee/murs-de-soutenement-entterre-armee-61496-276160.html
http://www.terre-armee.fr/appli/internet/TerreArmee/WebTerreArmeeFrance.nsf/ag_Creation_Page?OpenAgent&UNID=8821DA727AAC14D4C12574E800462E42&contexte=41&rubrique=Technologies&lang=fr&font=great
http://www.aliapur.fr/modules/movie/scenes/home/index.php?fuseAction=page&rubric=valorisation&article=tp
http://www.pneusol.eu.org/perso/3insa1C.pdf
http://www.geotextiles-geogrilles.fr/renforcement.html
http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/16/04/47/PDF/these.pdf
http://www.novintiss.com/textile-geotextile.html
http://www.novintiss.com/geotextile-mise-oeuvre.html
http://www.cultisol.com/batiments/geotextilia.php?id=travaux-exterieurs
http://www.soletanche-bachy.com/SBF/referencesb.nsf/Tech/tirants.fores.de.longue.duree
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mur_de_soutènement
http://www.tensarcorp.com/uploadedFiles/IFRN_MESA_IG_SpecCons_6.04.pdf
http://lyc-du-batiment-saint-lambert.scola.ac-paris.fr/simon/soutenement1_texte.htm
http://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/reglements_permis/docs/mur_soutenement_60.pdf
http://www.solem.ch/pentes/ouvrages/mur/murs_poids.htm
http://fr.wikipedia.org/wiki/Palplanche
http://www.soletanche-bachy.com/sbf/referencesb.nsf/tech/parois.berlinoises
http://www.techni.ch/technifin/haupt/travaux/sujet_0020/0020.html
http://fr.wikipedia.org/wiki/Gabion
http://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_sèche
http://fr.wikipedia.org/wiki/Moellon
http://www.pays-thouarsais.com/IMG/pdf/fiche6_050608.pdf
http://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_de_taille
http://fr.wikipedia.org/wiki/Béton
http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4545