

Renforcement de sol

■ Les investigations géotechniques

Ce rapport définit un programme complet d'investigations géotechniques à réaliser lors de la phase PGC. Ce programme peut dépendre des premiers choix des techniques retenues par le maître d'ouvrage.

Ces investigations géotechniques peuvent inclure des :

- investigations hydrogéologiques ;
- reconnaissances géophysiques ;
- sondages géologiques avec prélèvements d'échantillons ;
- essais d'identification au laboratoire ;
- essais de détermination des paramètres mécaniques au laboratoire ;
- essais *in situ*.

Tableau 1 – Déterminations des caractéristiques mécaniques des sols

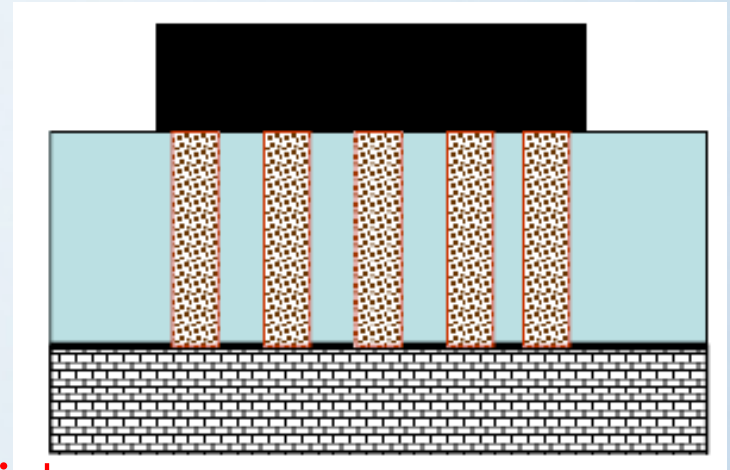
[illegible]

Sols mous: $E_s < 3 \text{ MPa}$; $C_u < 30 \text{ kPa}$

Sables lâches: $\phi < 30^\circ$;

1. Les colonnes ballastées

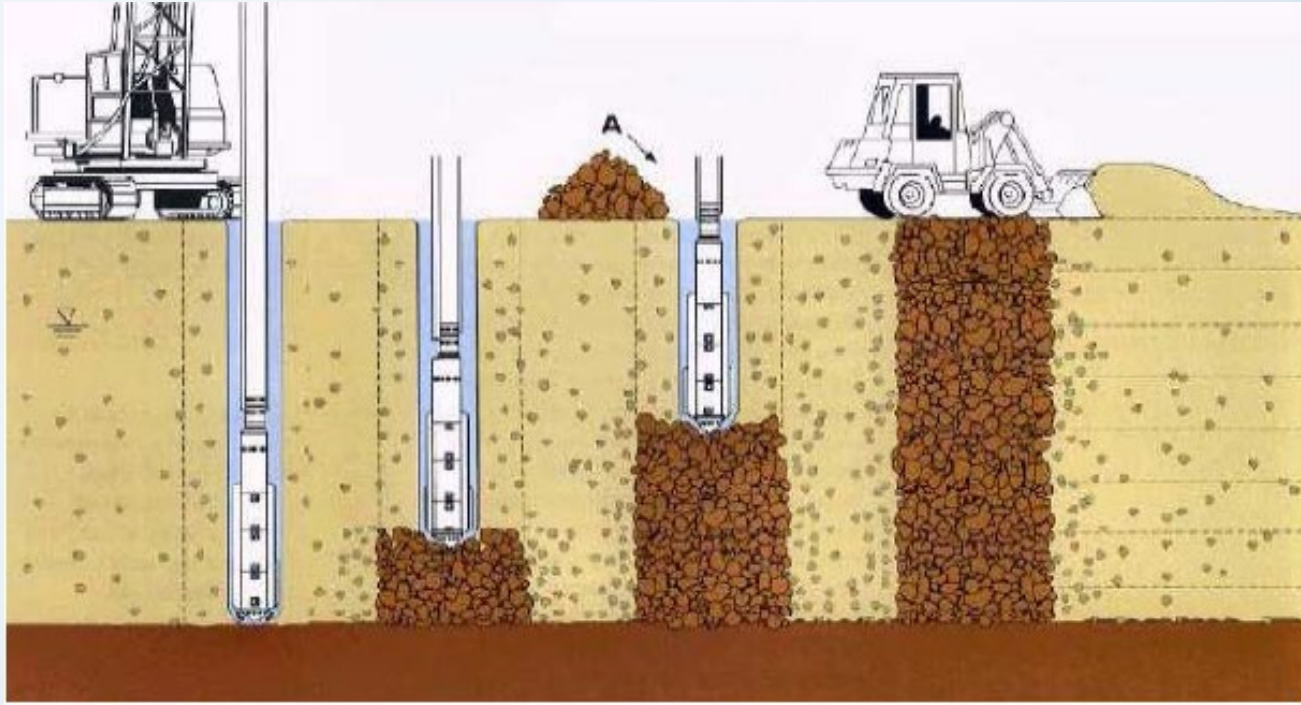
- Augmenter la capacité portante
- Réduire le tassement
- Accélérer la consolidation
- Éliminer le risque de liquéfaction



1.1 Mode de réalisation voie humide,



1.2 Mode de réalisation voie sèche,

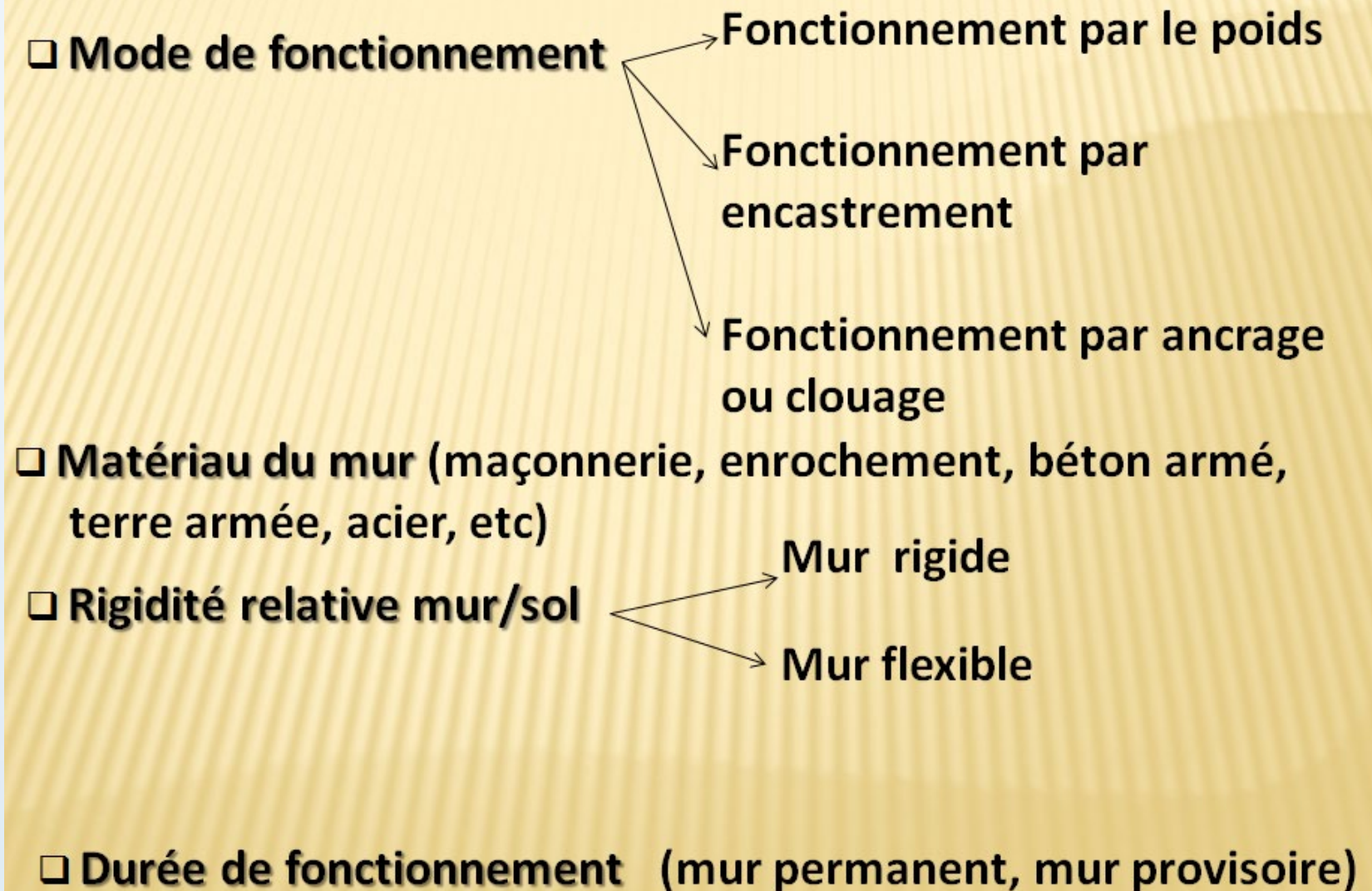


1.3 Conception et dimensionnement

- L'estimation du tassement « **s** » est faite à l'aide du module apparent du sol renforcé , dont l'expression (Bouassida et al, 2003)

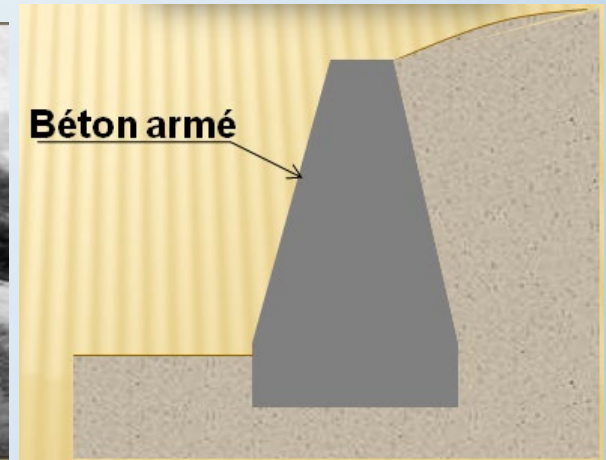
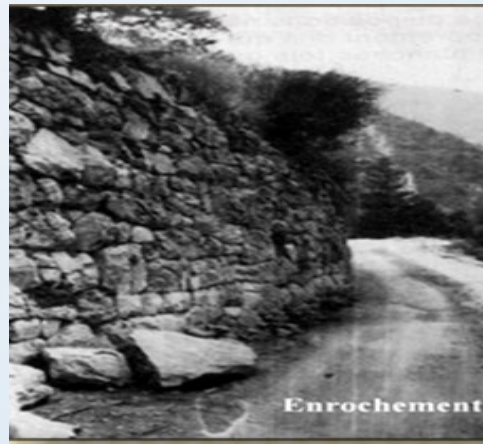
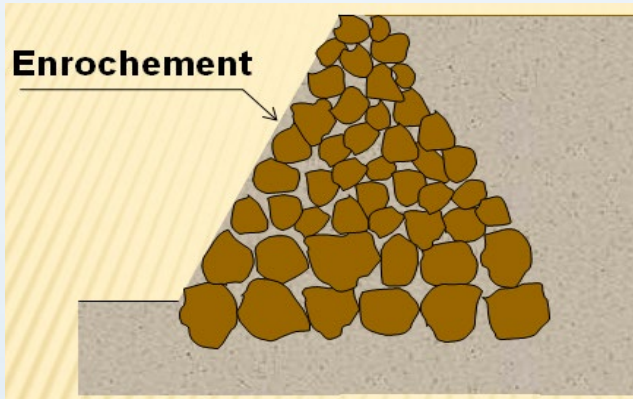
$$E_a = q \times H / s$$

2. A.D.S par les soutènements



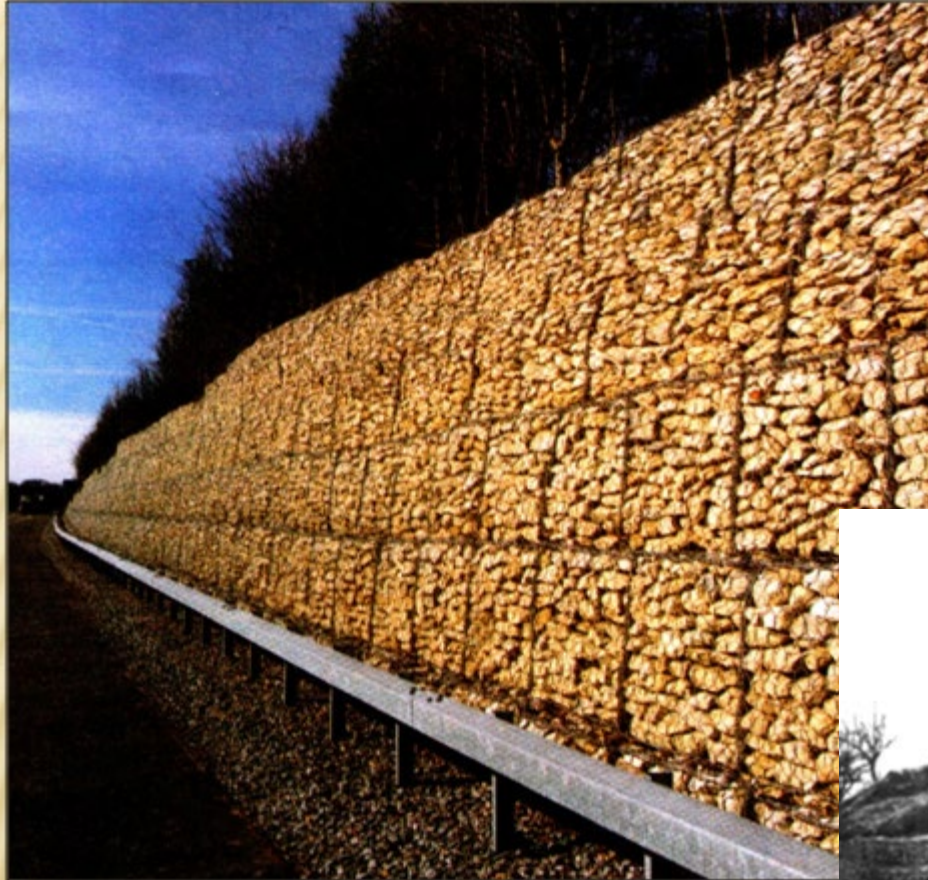
2.1 Fonctionnement par le poids:

Ce type de mur assure la stabilité du système mur/ sol par **son poids propre**. Le poids du mur peut contribuer à sa stabilité et à la reprise des poussées, sans subir des déplacements pouvant rompre le sol derrière



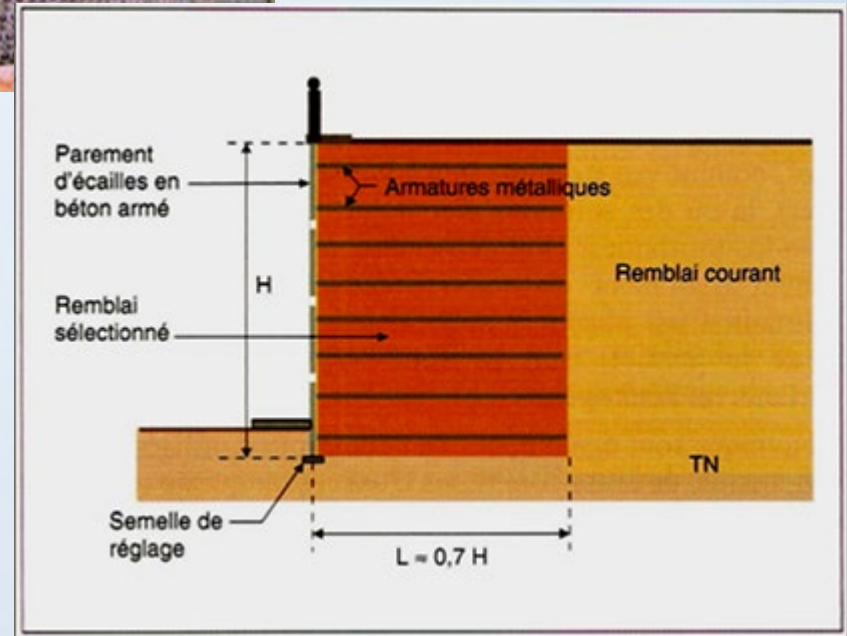
Mur-poids en BA, en maçonnerie ou à enrochement

Différents types des murs poids



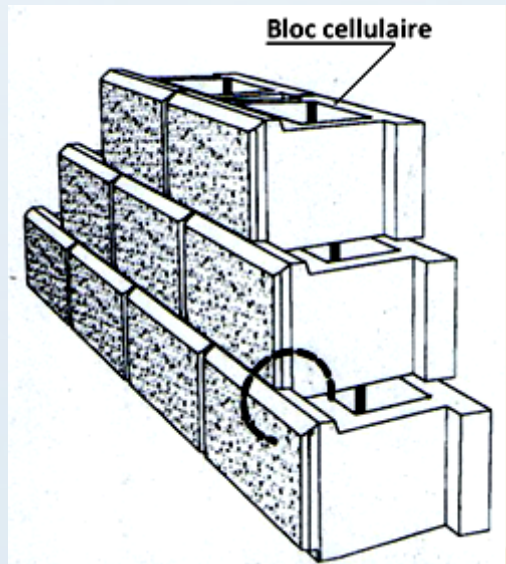
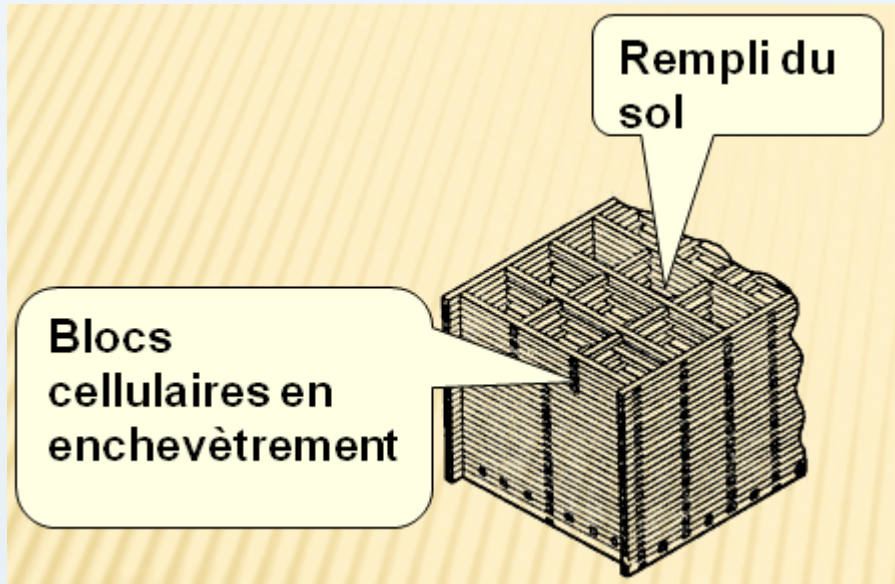
Mur poids en gabions

Différents types des murs poids



Mur poids en terre armé

Différents types des murs poids



Mur en caisson (ou murs cellulaires)

Différents types des murs poids

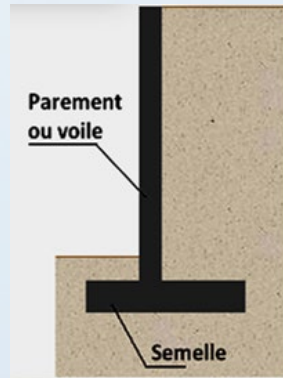


Mur en caisson (ou murs cellulaires)

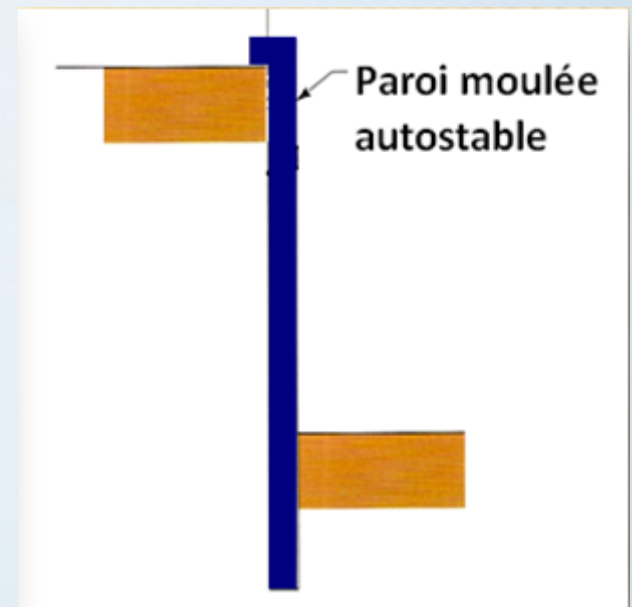
2.2 Fonctionnement par encastrement:

Ce type de mur assure la stabilité du système mur/sol par **l'encastrement de sa semelle**. La semelle du mur doit avoir une largeur suffisante pour résister aux différentes formes d'instabilité (glissement de la semelle, renversement, etc).

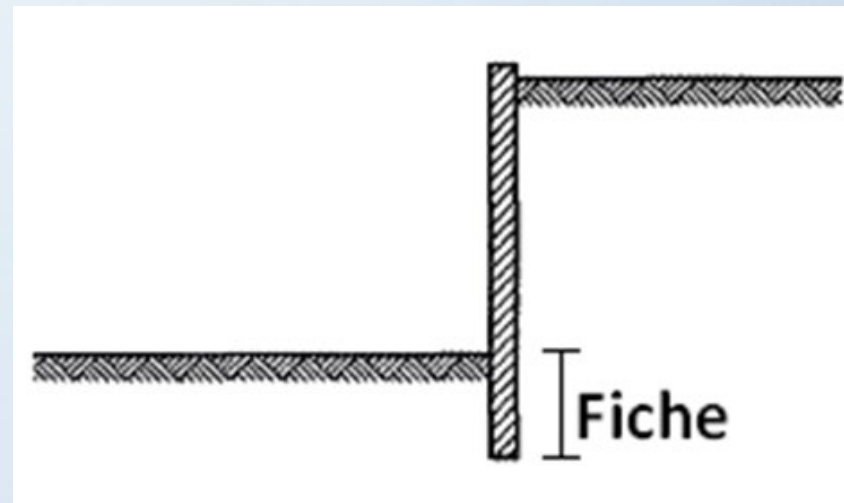
Les rideaux de palplanches, les parois moulées fonctionnent par encastrement, mais en faisant intervenir la partie fichée du mur dans le sol.



Mur en BA du type Cantilever

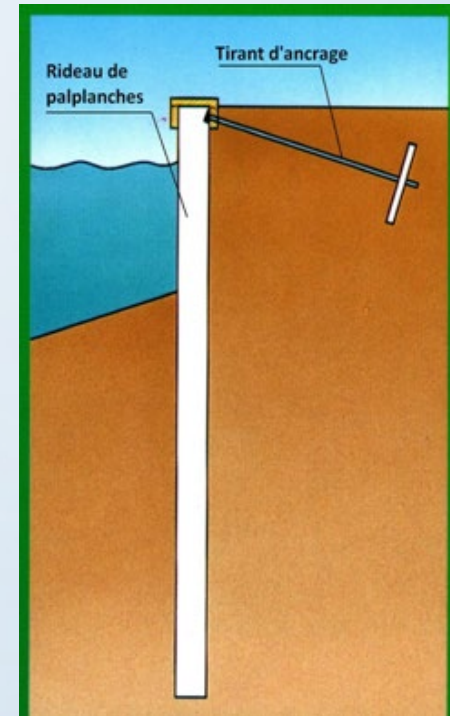


Parois moulés (pieux sécants)

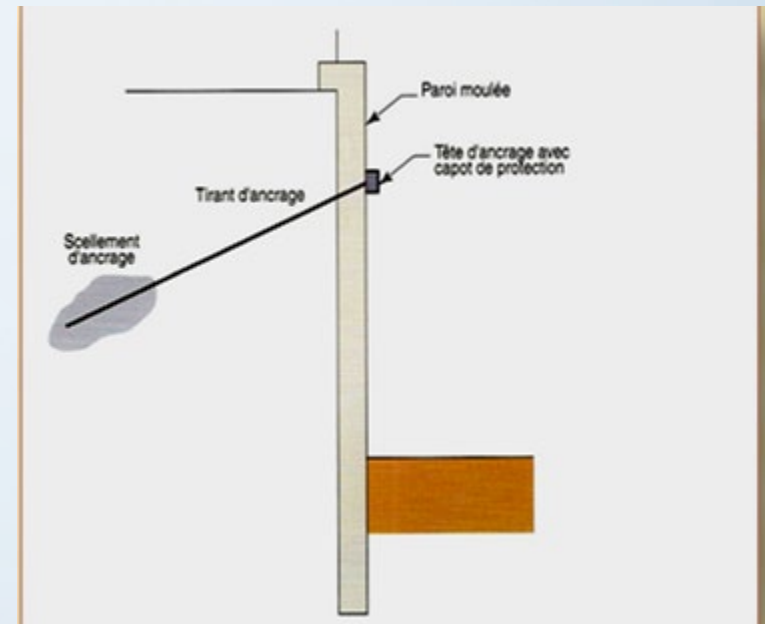


Rideaux de Palplanche en acier (non ancré)

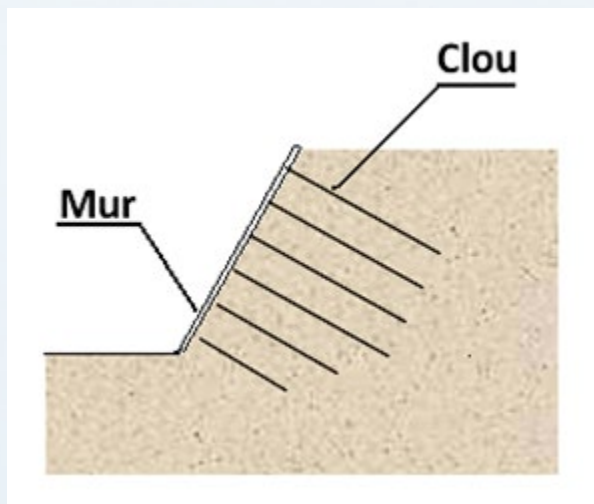
2.3 Fonctionnement par encrage ou clouage :



Rideaux de Palplanche ancré par des tirants d'ancrages

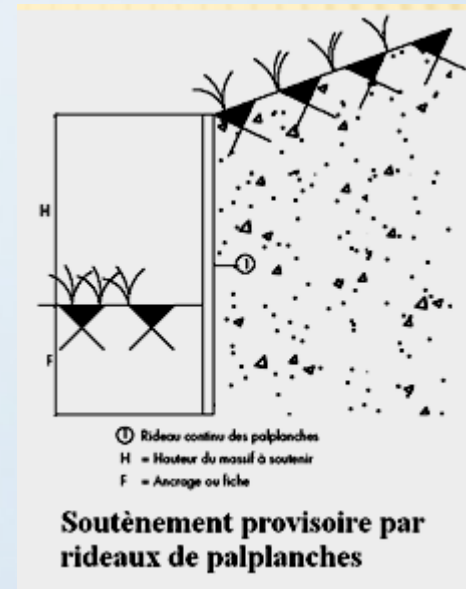
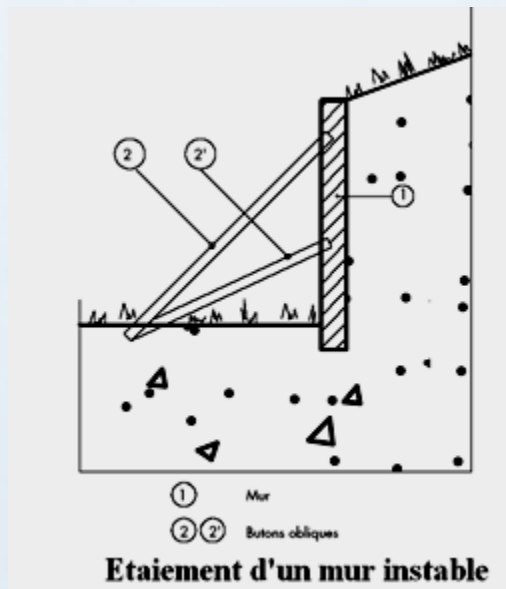
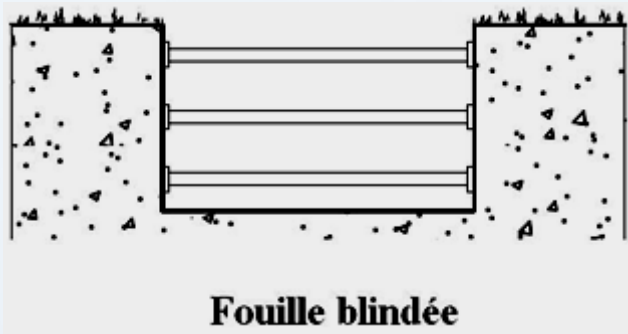


Paroi moulée en pieux sécants ancrés par des tirants d'ancrage



Mur renforcé par clouage dans le sol

3. Classification des murs selon la durée de fonctionnement



Exemple de mur de soutènement provisoire

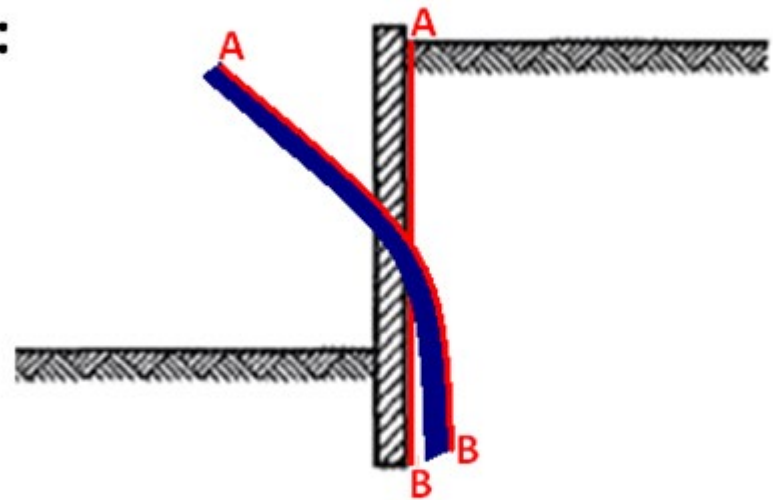
4. Classification des murs selon la rigidité relative « mur/sol »

On distingue les murs souples des murs rigides.

Un mur est **flexible** si sa surface de contact AB avec le sol est déformable.

A cette catégorie appartiennent:

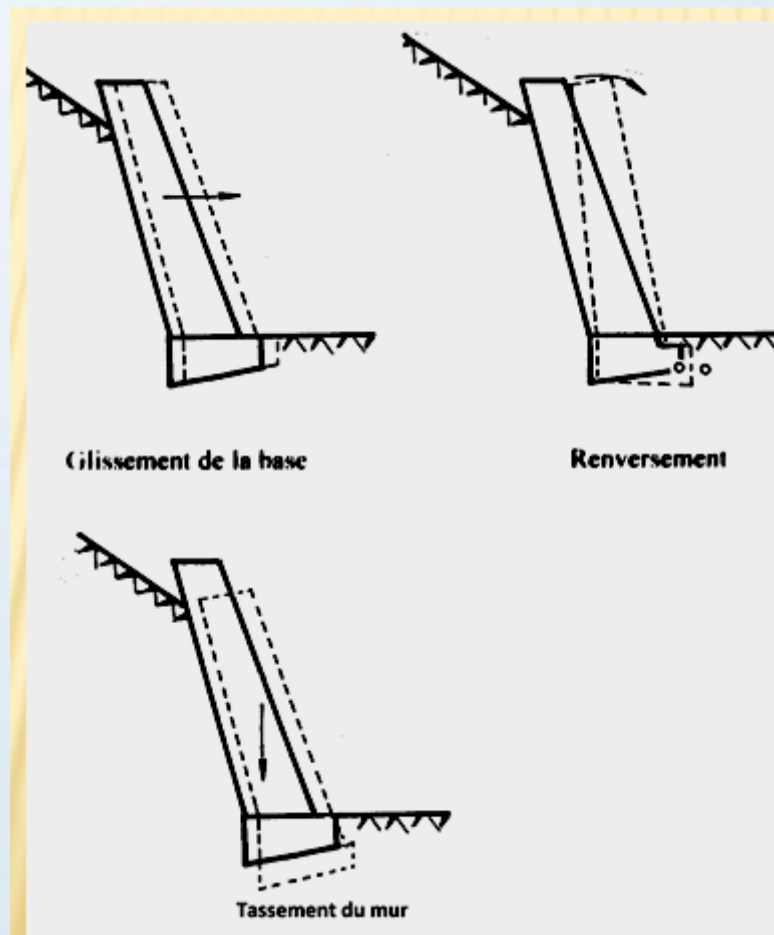
- ☐ Les parois moulées,
- ☐ Les batardeaux,
- ☐ Les rideaux de palplanches,
- ☐ Les fouilles blindées.



AB: surface de contact mur/sol
(ou interface mur/sol)

Un mur est **rigide** si sa surface de contact AB avec le sol est indéformable (reste plane après chargement).

A cette catégorie appartiennent les murs courants en béton armé (cantilever, contrefort, etc).



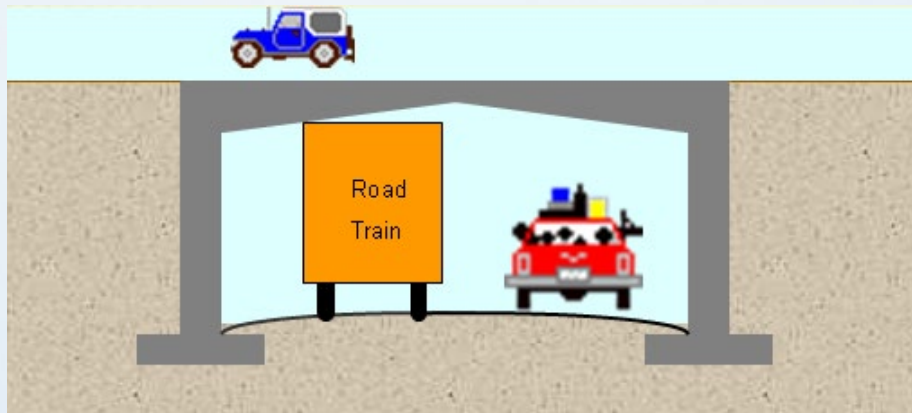
Mur rigide fixe: Il n'effectue ni translation ni rotation.

Exemple : Passage supérieur à cadre fermé (PSCF),

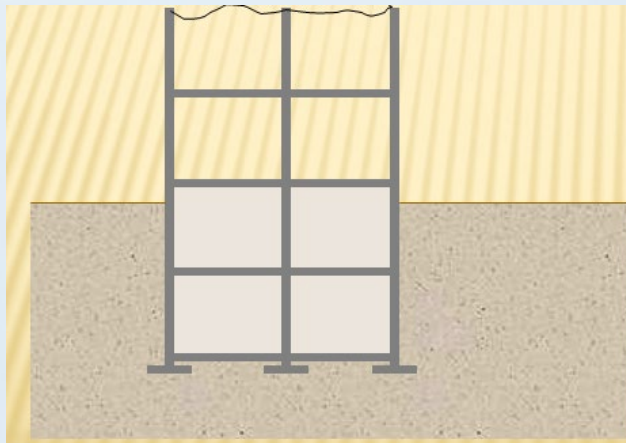
Voile du sous-sol d'un bâtiment,

Bajoyer d'une écluse (canal en U).

Le sol derrière le mur se trouve en état de repos, dit état K_0 .



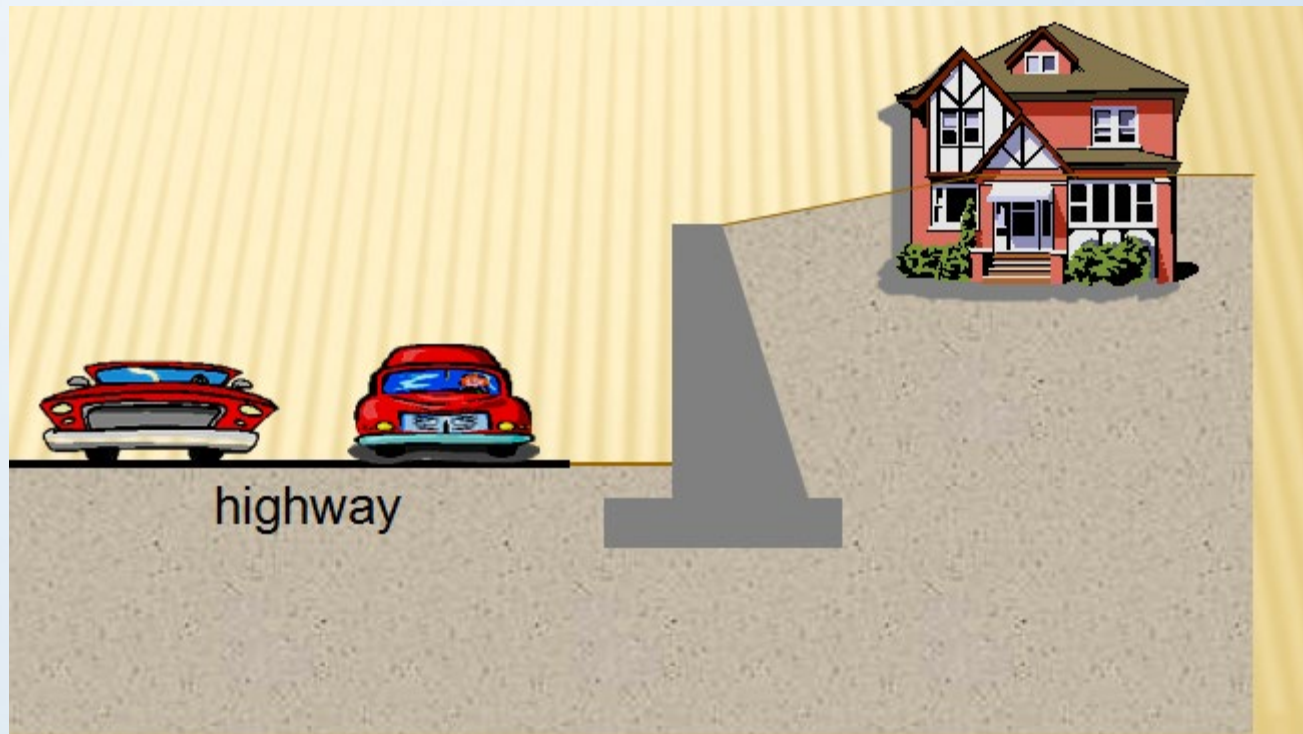
Passage Supérieur PSCF



Sous-Sol d'un batiment

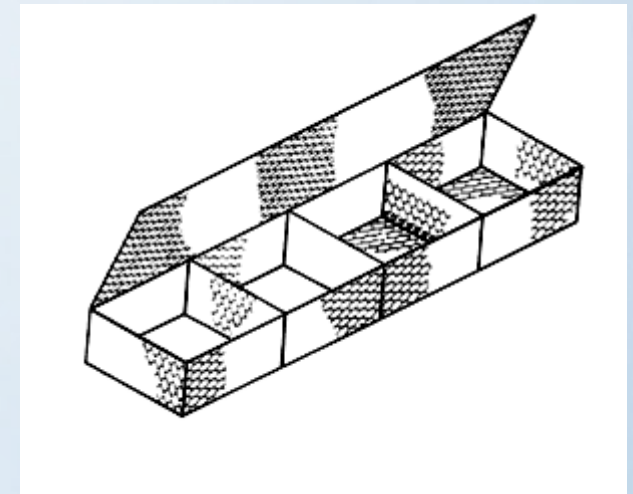
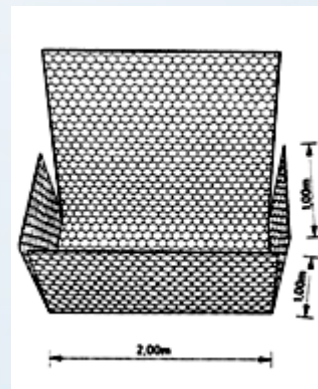
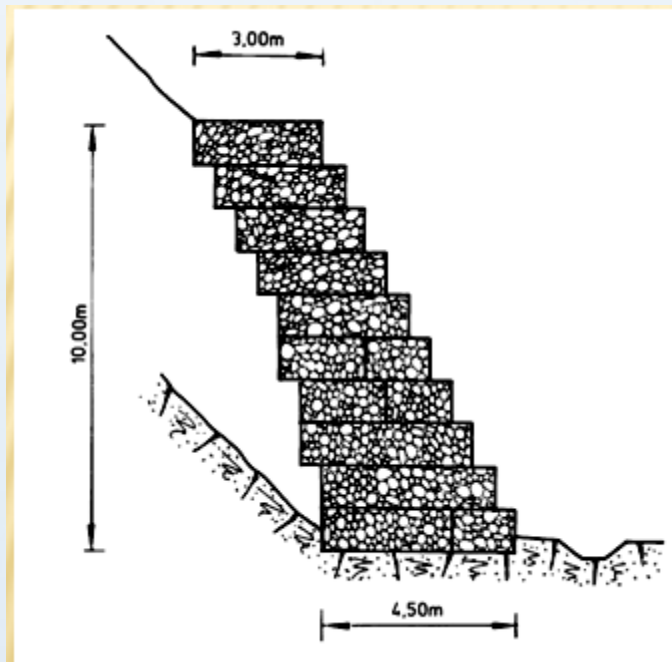
Mur rigide non fixe: La translation et /ou la rotation sont permises, sans toutefois dépasser les valeurs admissibles par l'ouvrage.

Exemple : les murs supportant les voies ferroviaires, les murs de déblais routiers, les culées de ponts...etc.



5. Conception des murs de soutènement

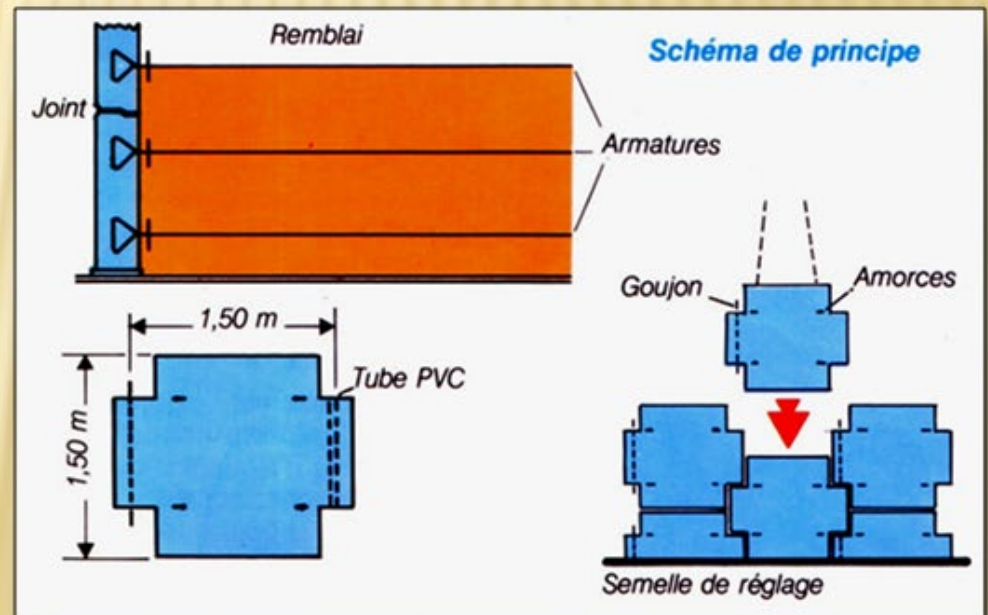
5.1. Conception des murs poids



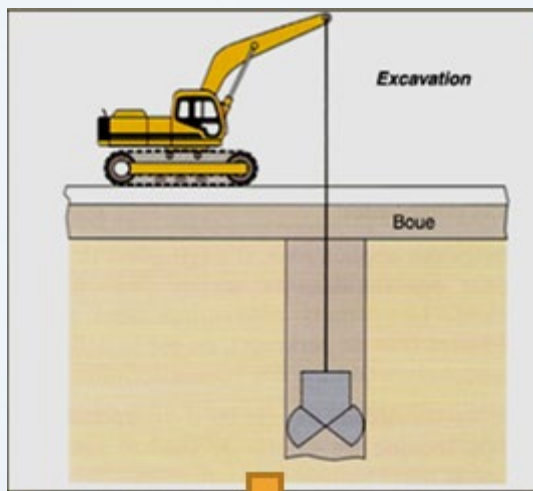
5.1. Conception des terres armées

Un mur en terre armée est réalisé par assemblage des écailles solidaires à des armatures en acier galvanisé, posées en nappes espacées de 75 cm, afin de reprendre les forces de poussée du remblai sur le mur par frottement interne sol/armature.

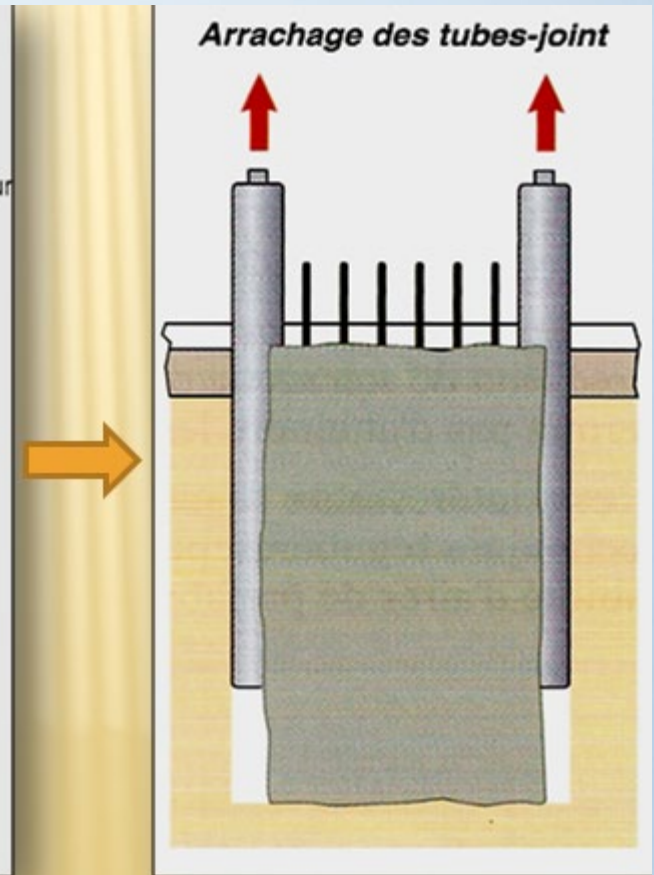
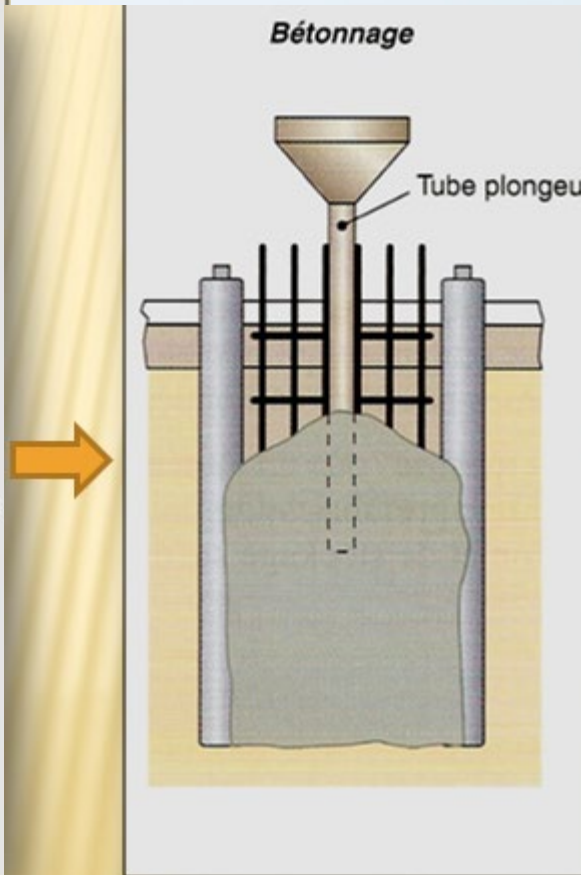
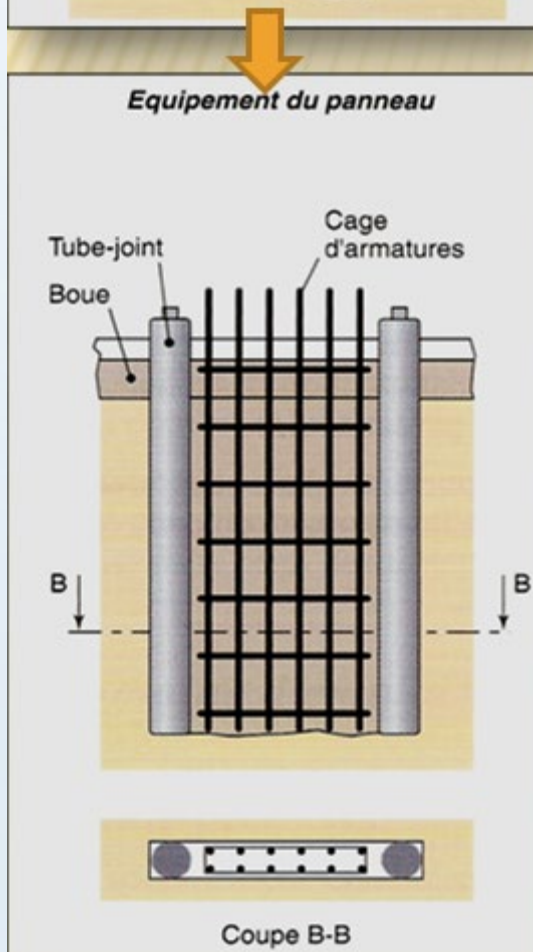
Le matériau remblai est sélectionné pour assurer un bon frottement sol/armature.

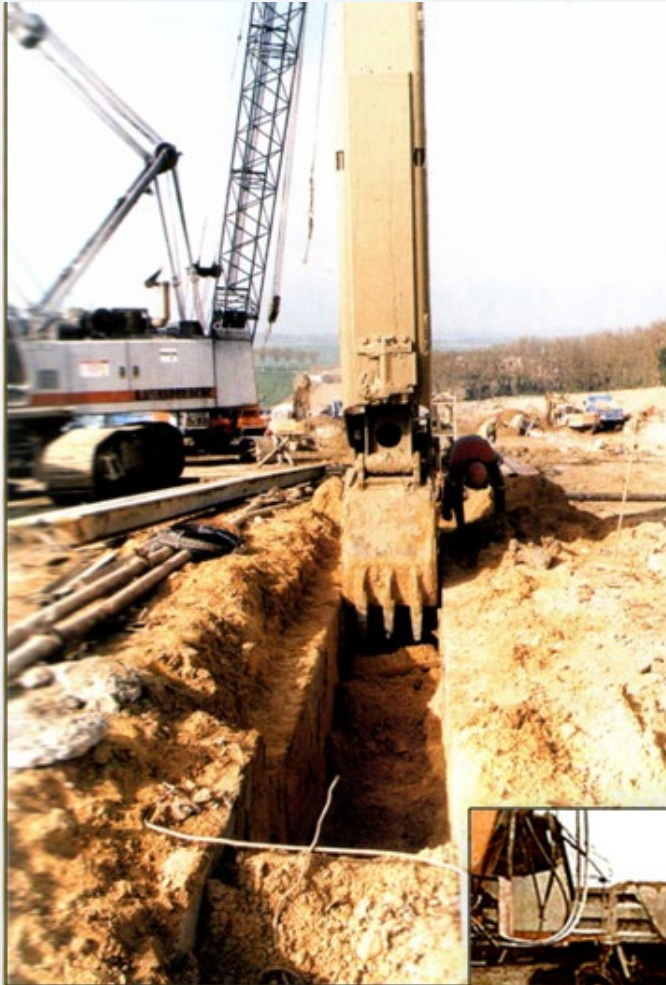




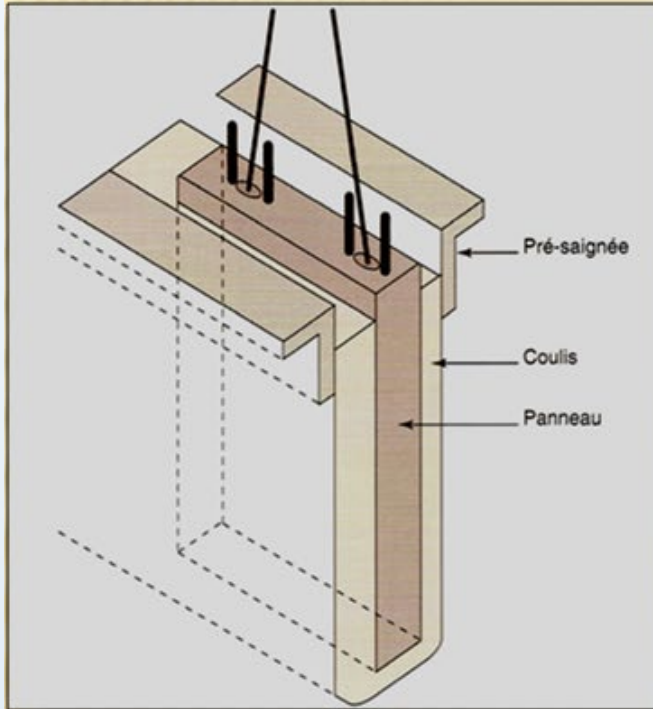


5.3 Paroi coulée en place

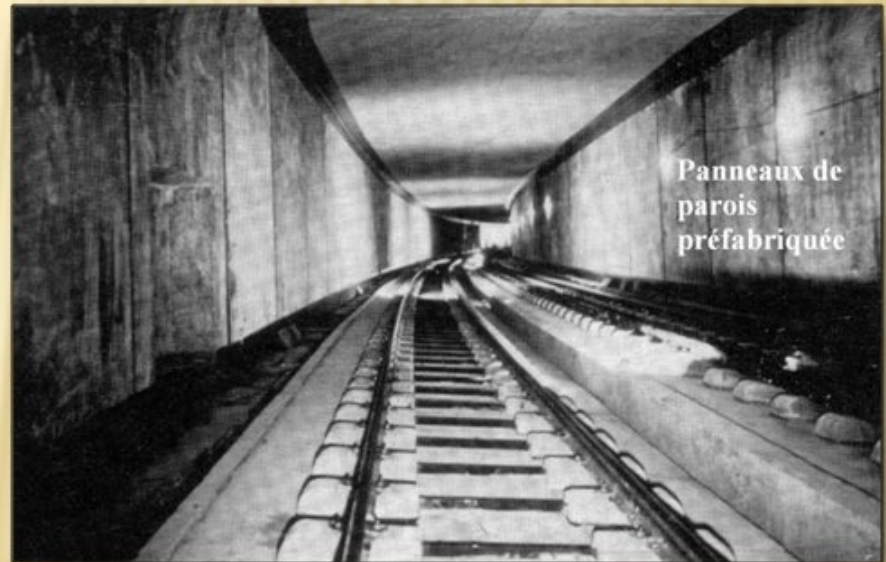




PAROI EN PANNEAUX PREFABRIQUES



Avec le même matériel utilisé pour les panneaux moulés, on réalise une tranchée, on insère la paroi préfabriquée, on la maintient en suspension jusqu'à la prise du coulis remplissant le vide entre la paroi et l'élément préfabriqué.



Panneaux de parois préfabriquée

Vue des piédroits formés des parois préfabriquées dans le tunnel SNCF gare du Nord-Roissy (France)

PAROI EN PIEUX SECANTS

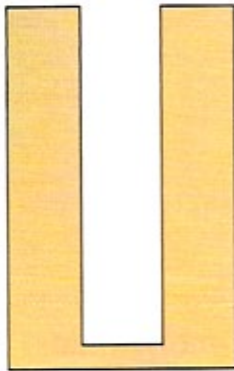
Dans ce type de soutènement, la paroi est constituée d'une série de pieux forés conjointement, avant les travaux d'excavation de la fouille.



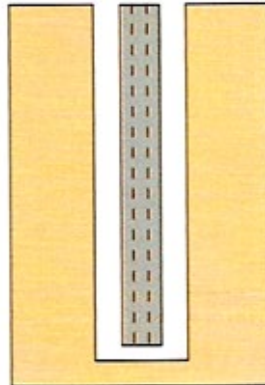
PAROI BERLINOISE

Le principe de réalisation consiste à installer par forage ou battage des profilés métalliques verticaux, généralement en forme de H, fichés à la profondeur requise, et espacés de 4 à 6 m, et faire glisser entre eux des panneaux en bois, en acier ou en béton préfabriqué, au fur et à mesure qu'on descend dans l'excavation. Ce type de mur est définitif.

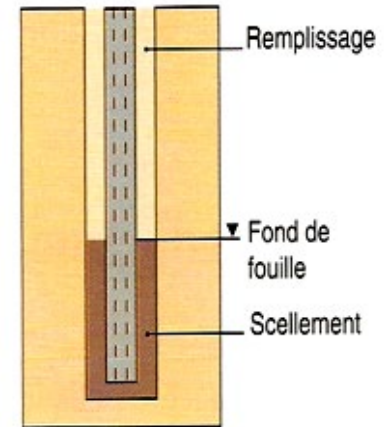
Exécution d'un forage



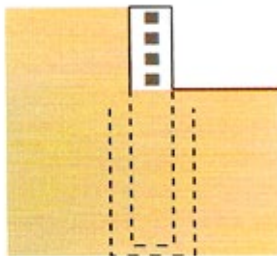
Mise en place et réglage du profilé



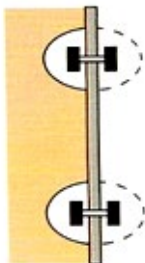
Scellement du profilé



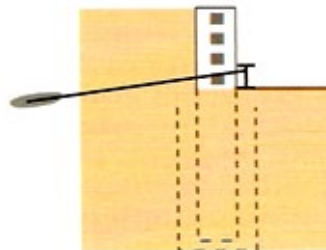
Terrassement sur un niveau Blindage entre profilés



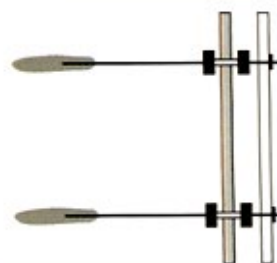
Vue de dessus



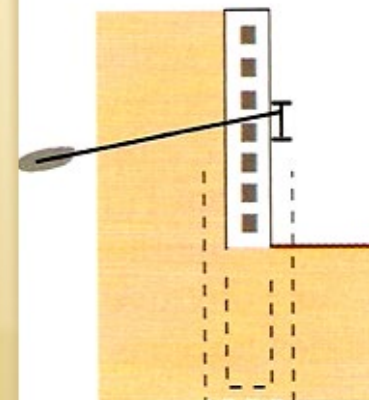
Mise en place des tirants



Vue de dessus



Poursuite du terrassement

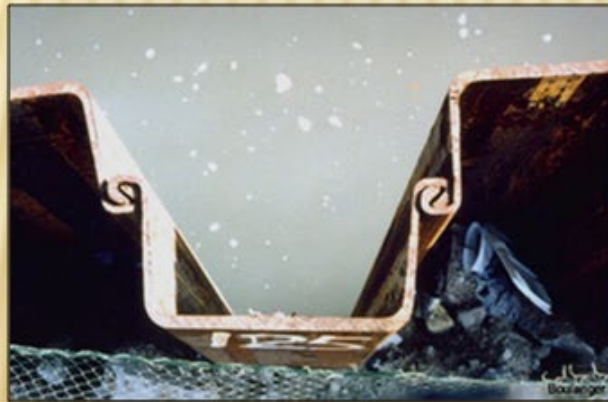




Vue générale des parois Berlinoises à Saint-Ouen (France)

5. MUR EN RIDEAUX DE PALPLANCHES

Les rideaux de palplanches sont des soutènements plans souples installés dans le sol par battage ou fonçage. Ils sont largement utilisés dans les travaux de génie maritime et génie civil, tels que dans les quais portuaires, les bajoyers d'écluse, ainsi que dans le Soutènement des fouilles et remblais.





Profilé en U



Profilé en Z



Profilé en Caisson

Exemples de rideaux de palplanches



**Projet d'hôtel à Suresnes
(France)
Profilé large de 0.4 m
et long de 9 m.**



**Réalisation d'un mur de quai composé de rideaux
de palplanches et de pieux tubulaires en
béton armé (Guadeloupe).**



Différents modes d'installation des rideaux

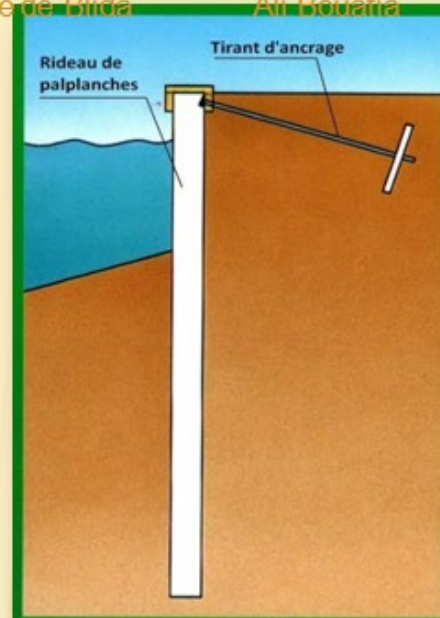
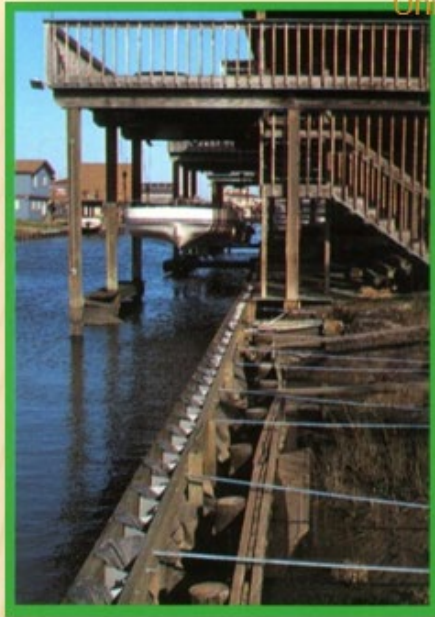


Battage

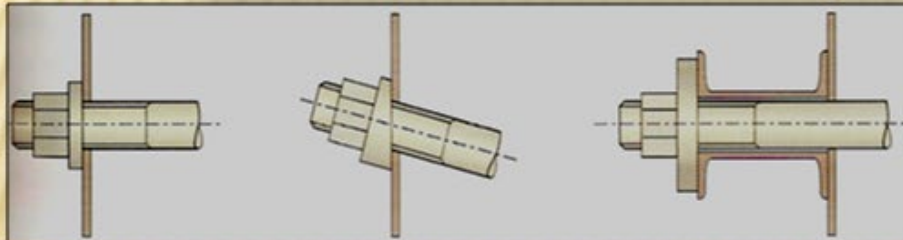
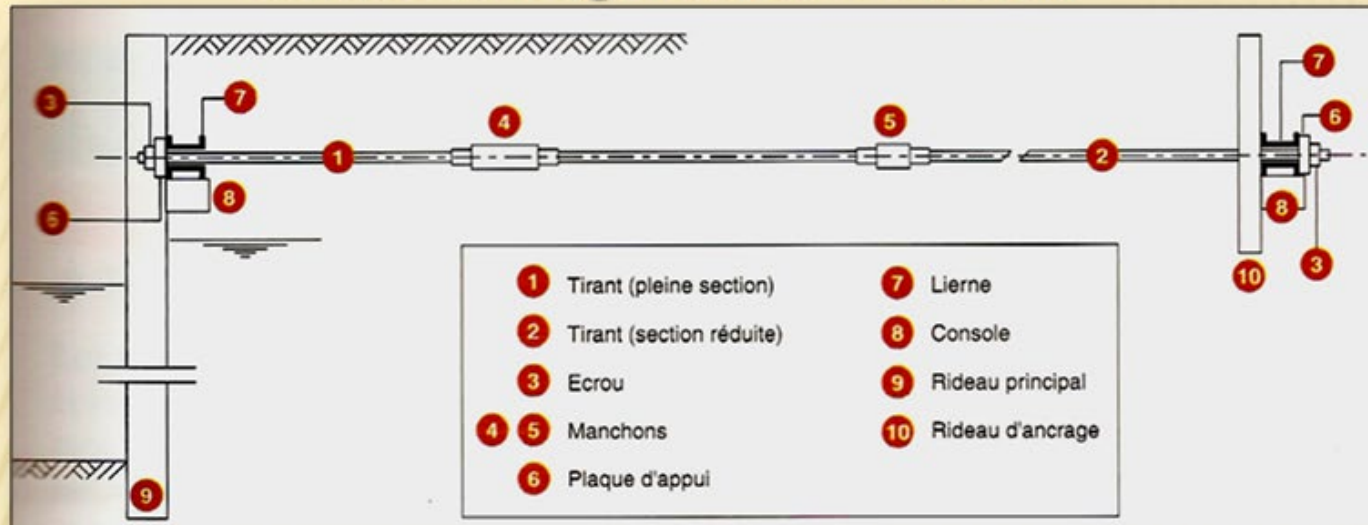


Fonçage





Tirant d'ancrage dans les rideaux



Tête d'un tirant d'ancrage précontraint en post-tension

6. FOUILLES BLINDEES

Une fouille blindée est une excavation comportant sur ses deux Parois deux soutènements opposés butés l'un contre l'autre par des butons ou des étais pratiquement indéformables.

Le mur de soutènement blindé est souvent en rideaux de palplanches ou en paroi (moulée, préfabriquée, en pieux sécants, etc).

Exemples de fouilles blindées





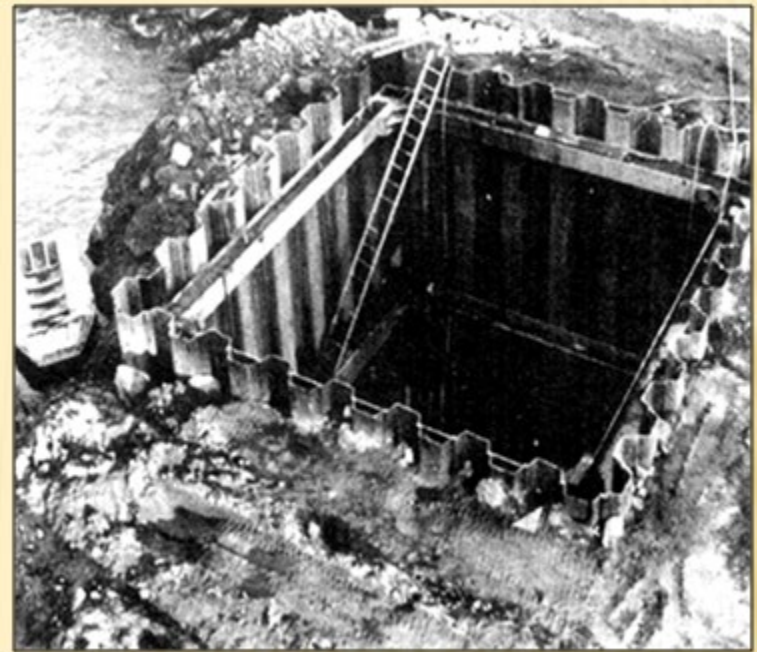
Fouille blindée au sein d'un soutènement par paroi moulée (en pieux jointifs) dans le cadre du projet du métro d'Alger (Station 1^{er} Mai).

Le principe est de réaliser des forages jointifs de 50 à 80 cm de diamètre. Des profilés métalliques ou des armatures sont mis en place dans le forage, et le béton y est coulé. Au fur et à mesure de l'avancement des travaux de creusement, des liernes sont mis en place contre les pieux et sont maintenues par des butons métalliques.

7. MURS EN BATARDEAUX

Les murs en batardeaux sont des enceintes étanches réalisées le plus souvent en rideaux de palplanches dont la fonction principale est d'interdire l'intrusion de l'eau dans une fouille.

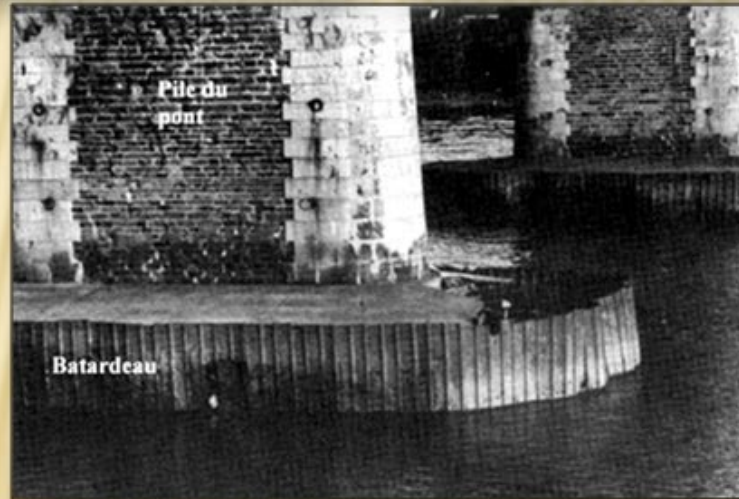
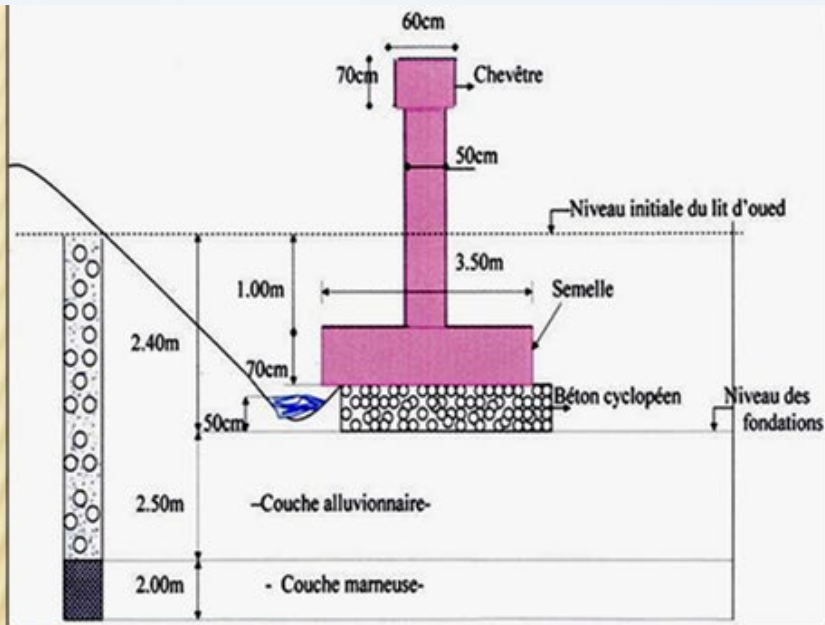
Ces murs sont réalisés soit à titre provisoire pour assurer des travaux de fondations en site aquatique, soit en tant qu'ouvrage durable assurant la protection contre le risque d'affouillement.



Batardeaux en site aquatique



A l'intérieur du batardeau battu en rivière, un groupe de pieux forés tubés de 2 m de diamètre et de 18 à 25 m de longueur, ont été réalisés dans le cadre du projet de viaduc de l'autoroute A-10 sur la Dordogne (France).

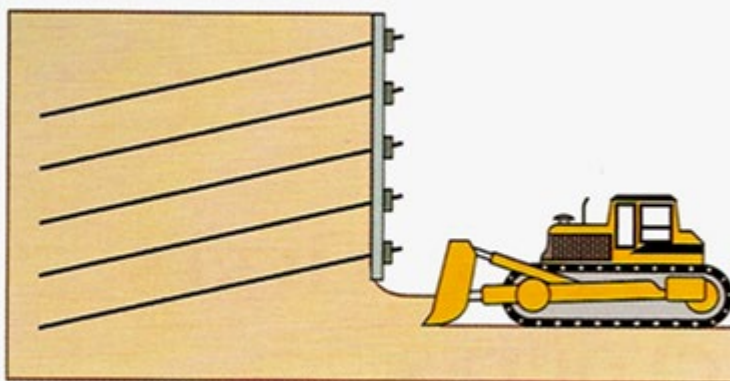


Utilisation du batardeau pour la lutte contre l'affouillement du sol autour des fondations dans un cours d'eau

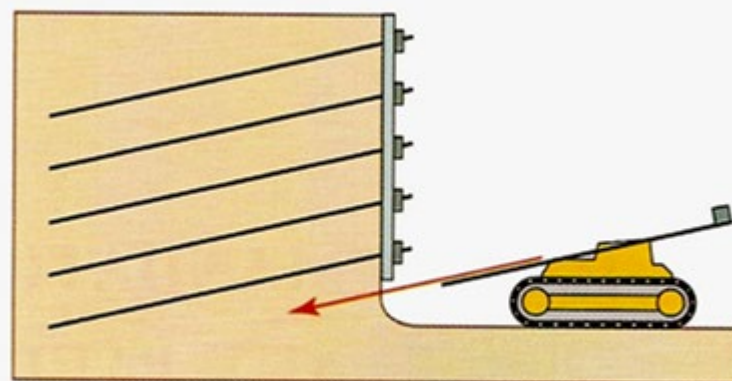
8. MUR CLOUÉ

Un mur cloué est un soutènement d'un sol en déblai, au fur et à mesure de son excavation, par incorporation des barres rigides appelées CLOUS, généralement placées parallèles les unes par rapport aux autres.

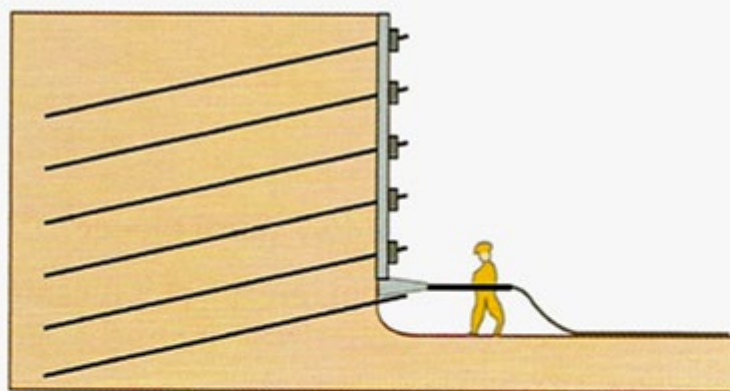
On réalise ainsi progressivement, de haut en bas, un massif de sol renforcé.



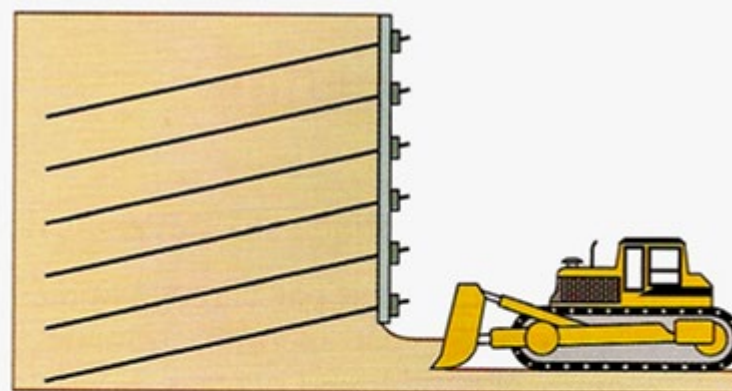
1 - Terrassement



2 - Mise en place des clous



3 - Béton projeté armé (ou pose d'éléments préfabriqués)



4 - Terrassement

Phases de réalisation d'un mur cloué (ou paroi clouée) d'après les recommandations du règlement CLOUTERRE-91

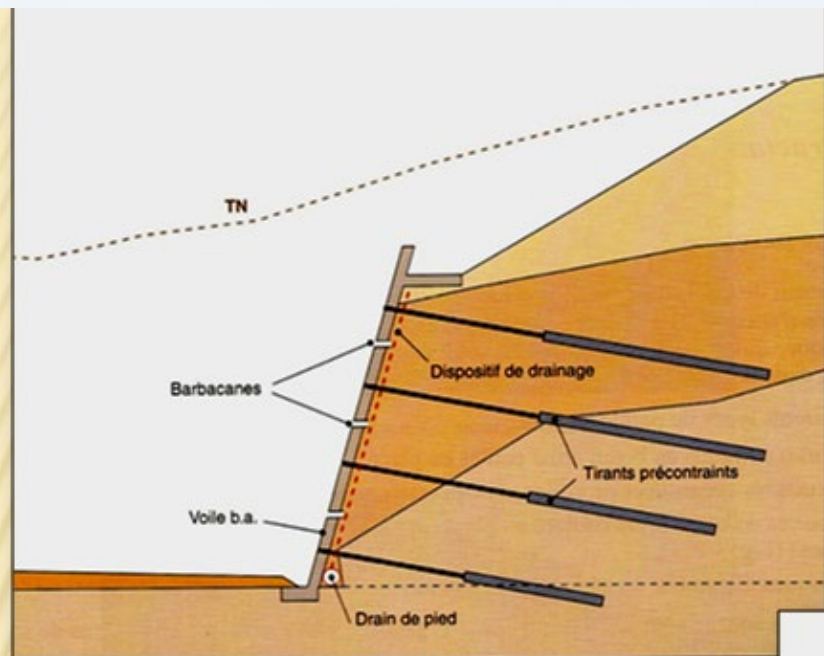


Clouage du mur

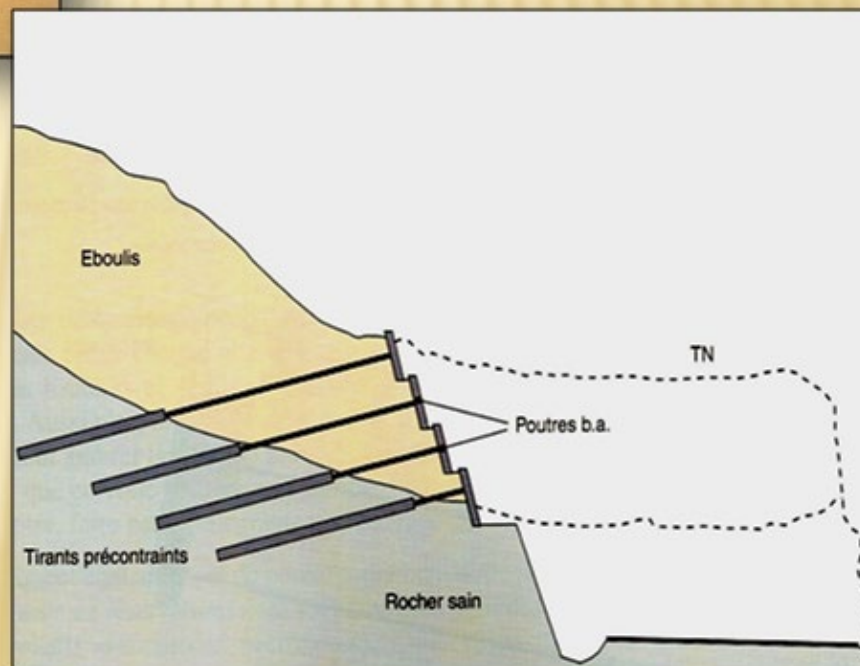
9. MUR ANCRÉ PAR DES TIRANTS PRÉCONTRAINTS

Un mur ancré est le soutènement d'un sol en déblai, au fur et à mesure de son terrassement, du haut en bas, par ancrage des tirants précontraints, généralement placés parallèles les uns par rapport aux autres.

Ce type de mur est constitué de voiles ou de poutres, en béton armé, ancrés par des tirants précontraints.



Voile ancré



Poutres ancrées

10. MUR EN REMBLAI RENFORCÉ PAR GÉOTEXTILES

Il s'agit du soutènement d'un sol en remblai mis en place par couches successives compactées, entre lesquelles sont disposées des éléments de renforcement telles que les nappes de géotextiles.

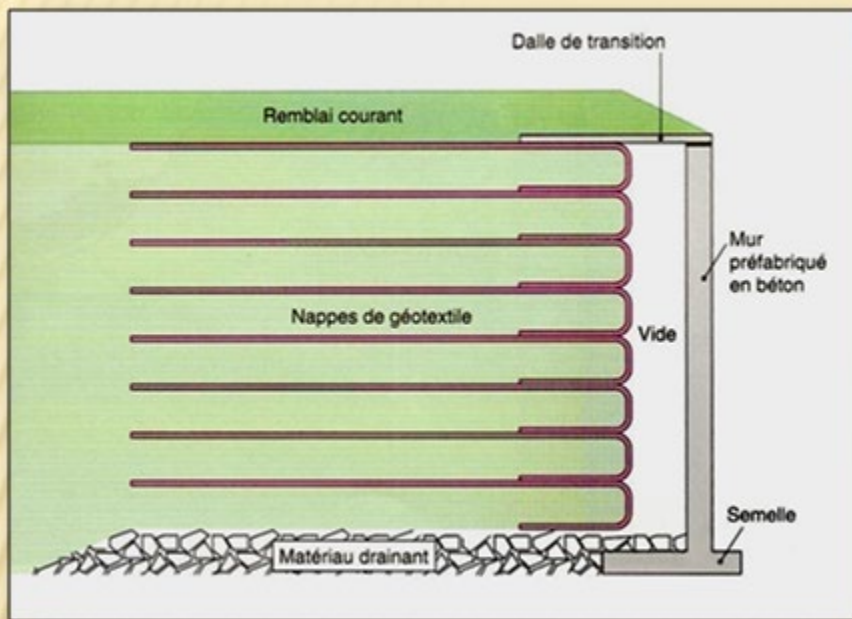
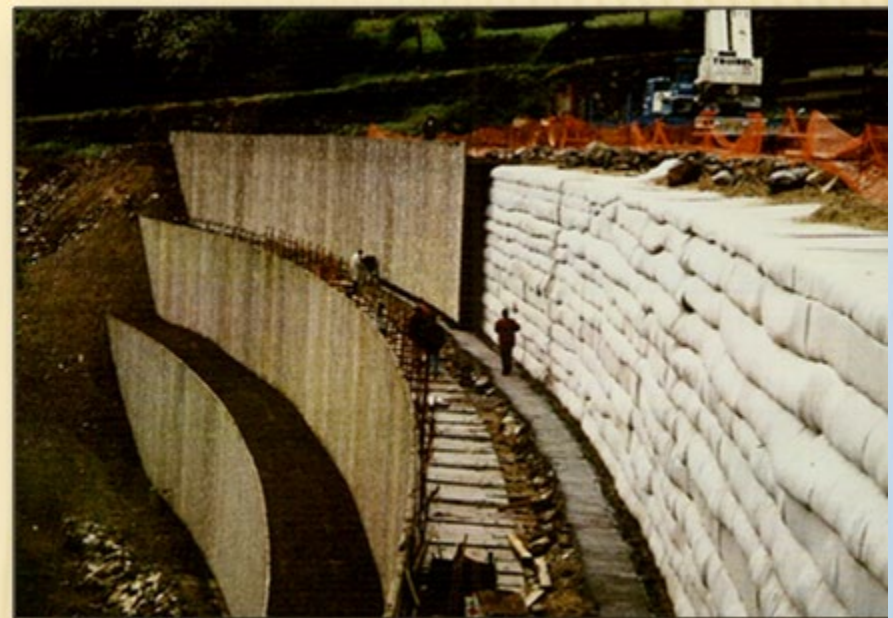


Schéma du principe du mur EBAL-LCPC

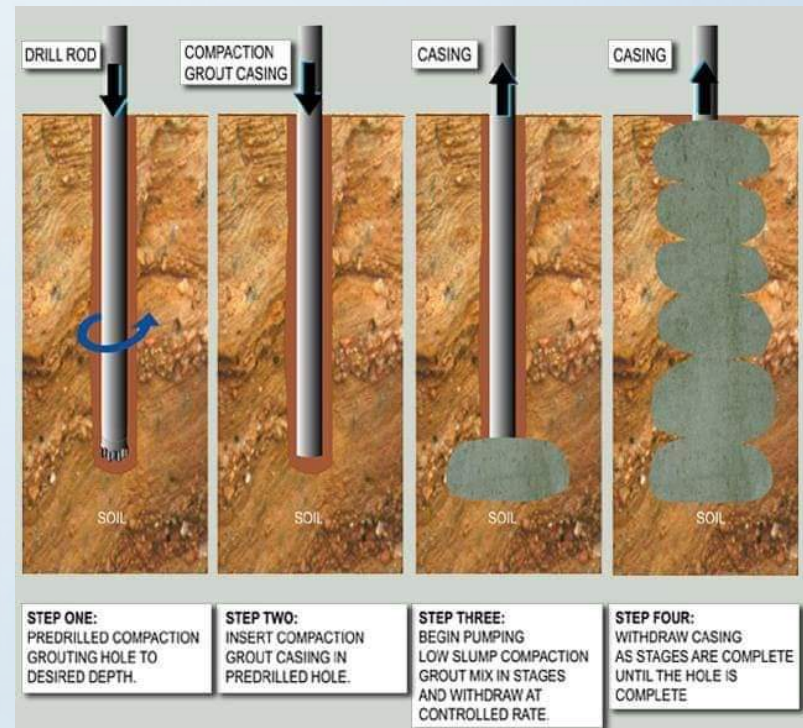
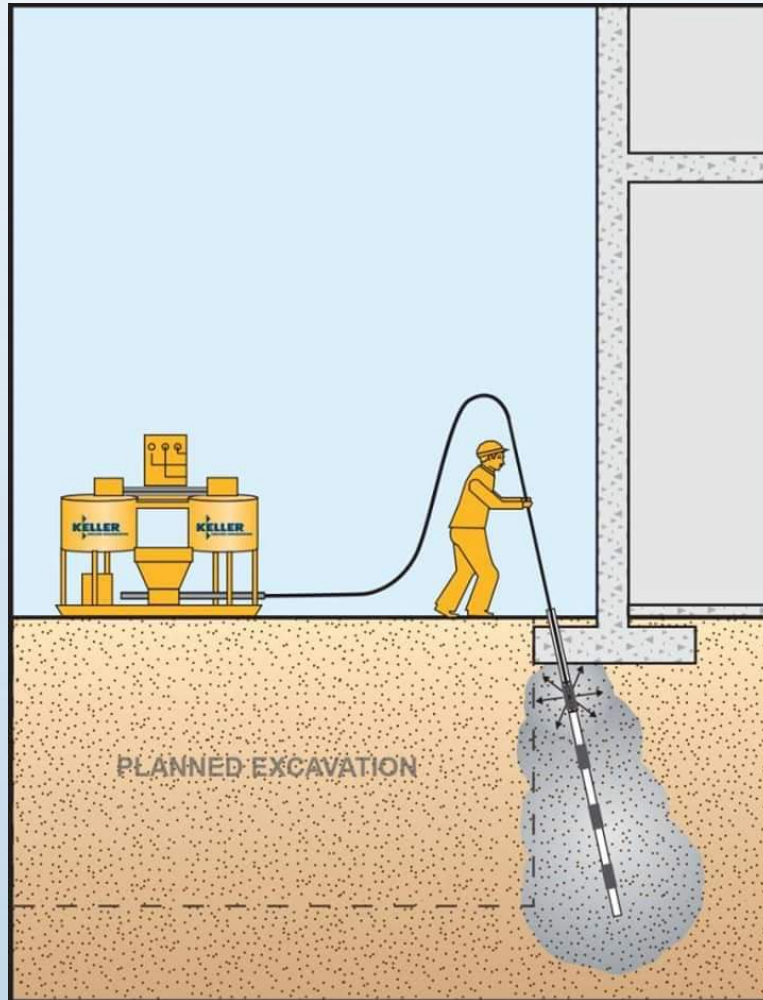


Chantier du mur EBAL-LCPC

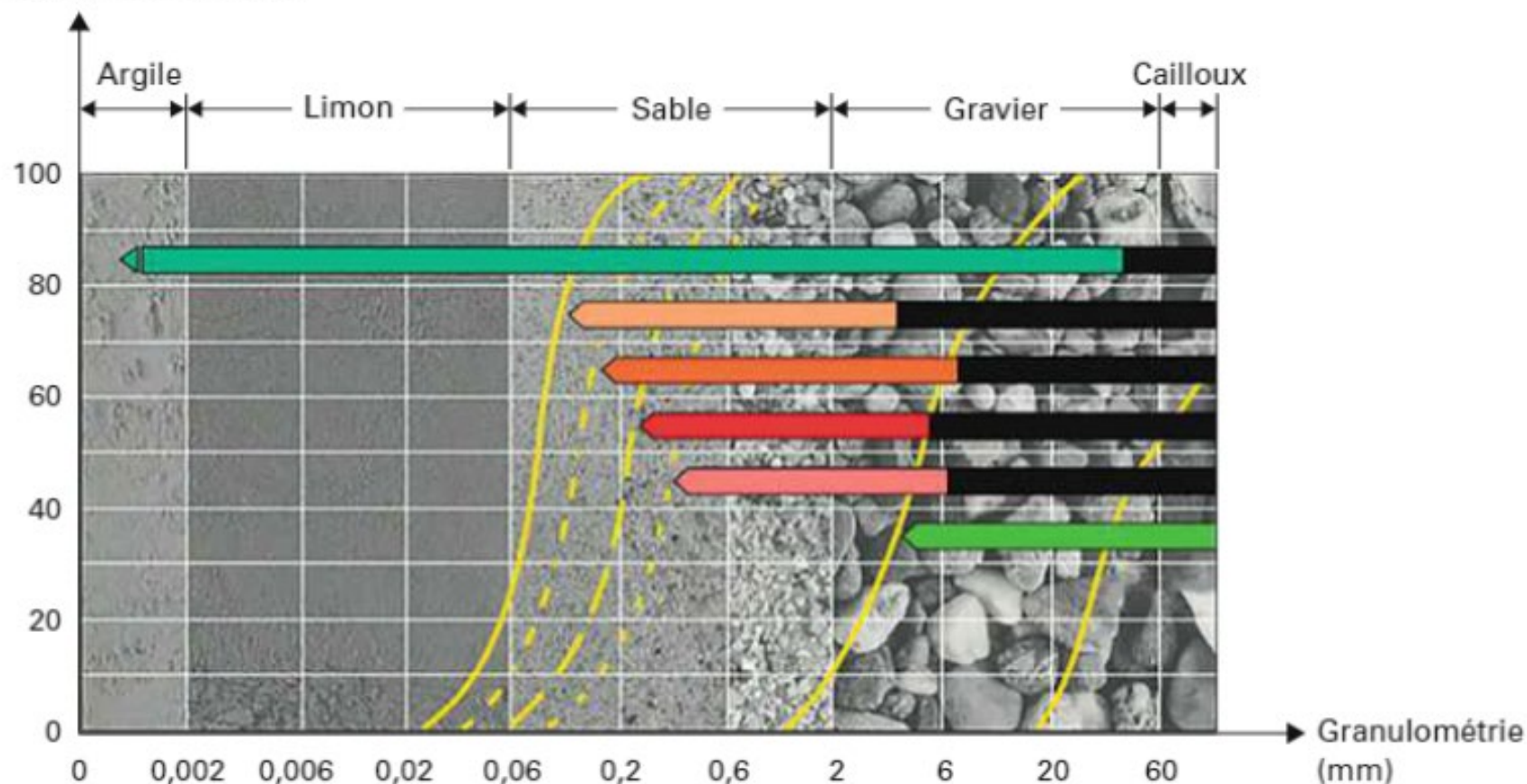
Mur EBAL-LCPC fini



Les injections



Passant (% du poids)



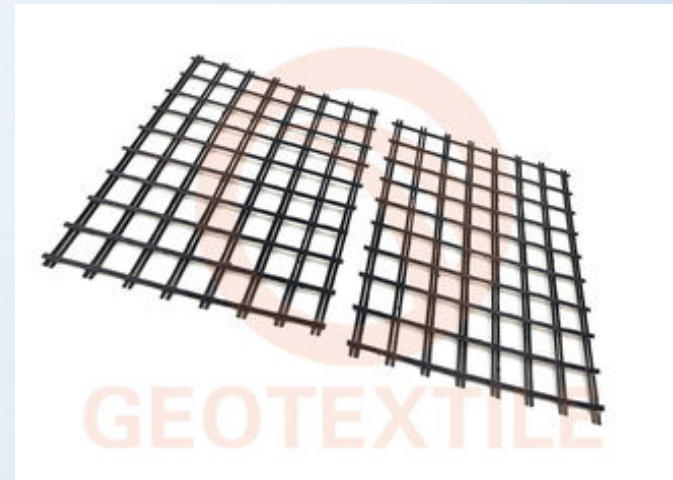
Congélations



Les géosynthétiques



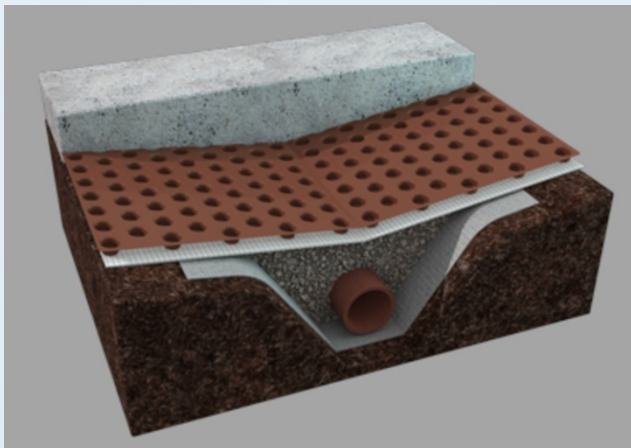
géomembrane



géogride



Géotextile sans drainage

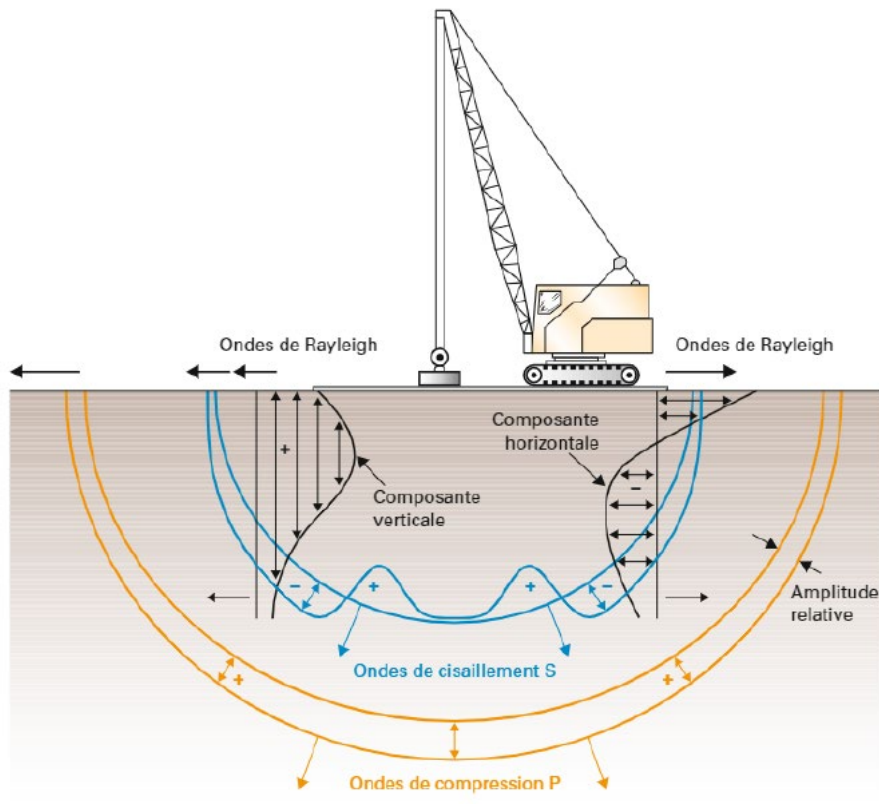


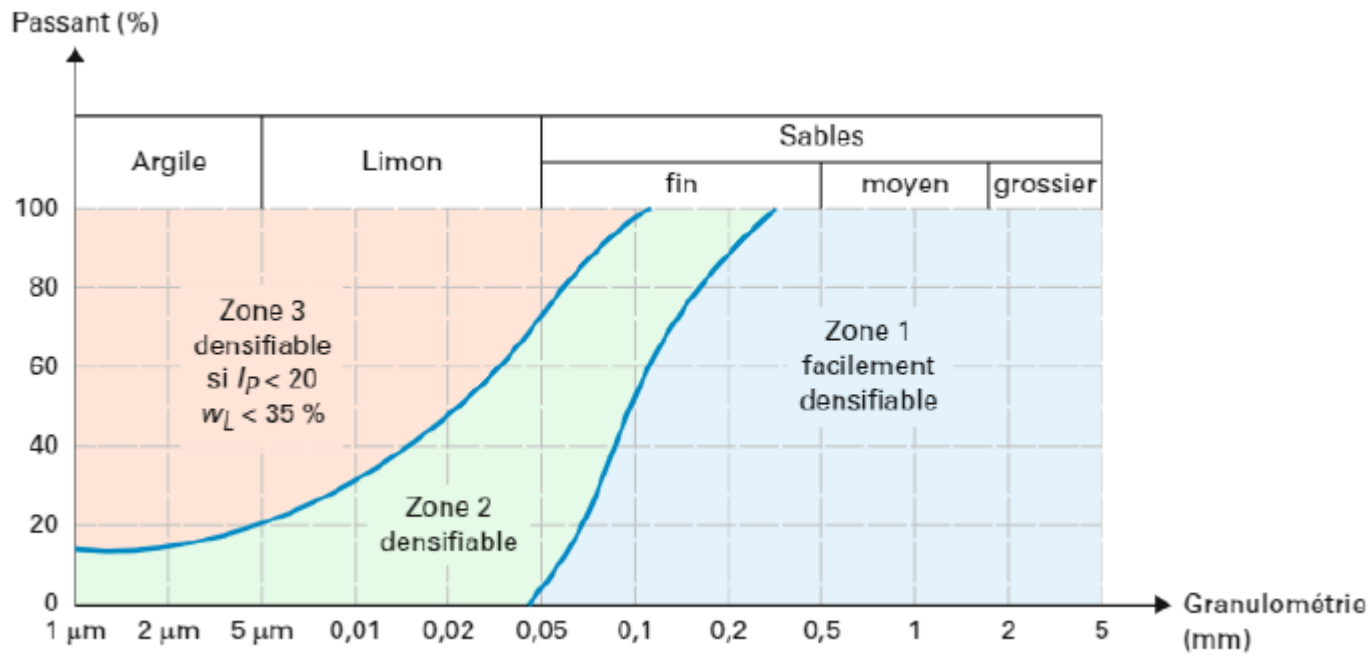
Géotextile avec drainage

ADS des sols pulvérulents

- Compactage et substitution dynamique
- Vibro-compactage
- Compactage à l'explosif

Compactage et substitution dynamique



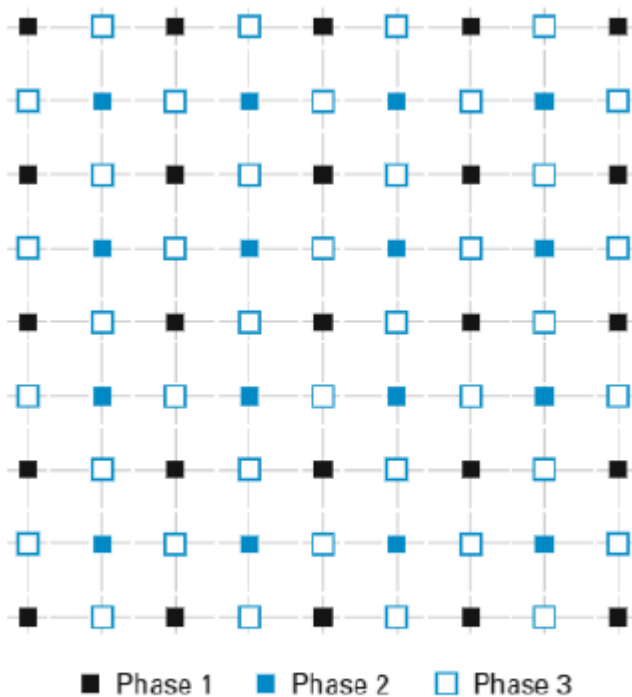


Tableau; Profondeur pratique de traitement

Énergie unitaire (t.m)	Profondeur d'influence (m)
200	5/6
300	7/8
400	9/10
600	11/12

$$D = c \sqrt{W H}$$

Avec c: coef, entre 0,5 et 0,9
suivant les conditions de sol et
l'équipement utilisé
W la masse de pilon utilisé
H hauteur de chute



Phase 1: est réalisé avec une grille plus large ayant un espacement entre impacts de l'ordre de 4 à 8 m et en donnant le maximum énergie

Phase 2 : seront appliquée avec des grilles intercalées pour homogénéiser autant que possible l'amélioration (énergie moyenne)

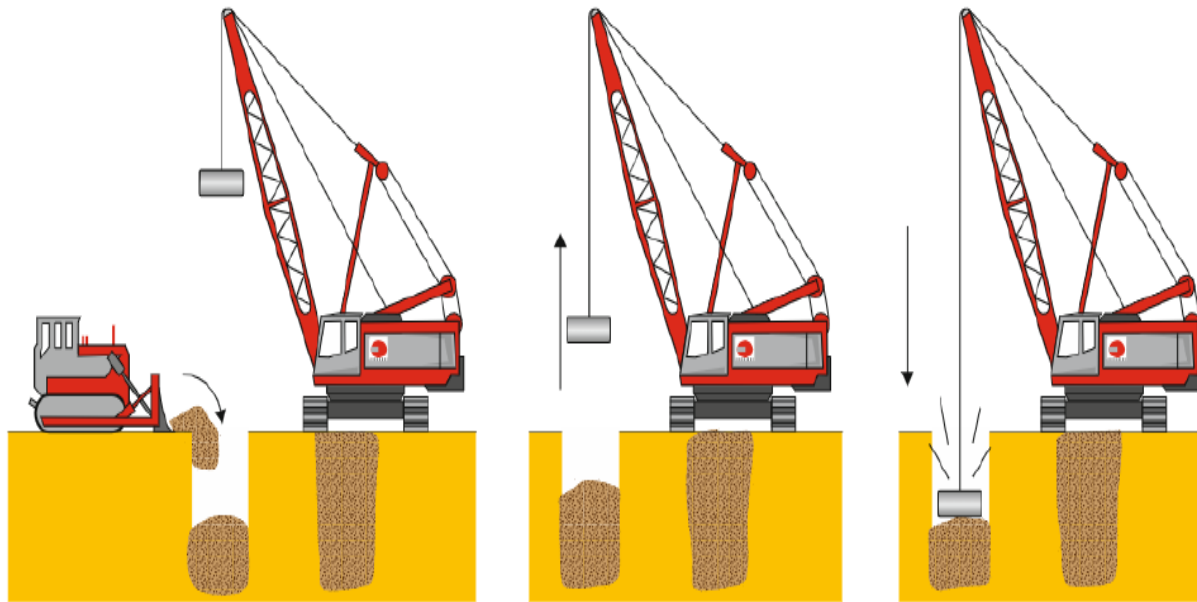
Phase 3 plus faible d'énergie faire si nécessaire le compactage traditionnel

- Exemple de maillage de traitement

Paramètres à surveiller	Techniques de mesure
Dosage de l'énergie de pilonnage par impact	Essai d'enfoncement/soulèvement
Contrôle de la réaction du sol	Mesures de tassement
Éviter la liquéfaction totale du sol (saturé)	Mesures de surpression interstitielle
Contrôle de l'amélioration des caractéristiques mécaniques	Essais <i>in situ</i> (pressiomètre, pénétromètre) Essai de chargement
Dommages à l'environnement	Mesures de vibrations

Essai de contrôle de compactage dynamique

Substitution dynamique



Processus de
réalisation des plots
ballastés

