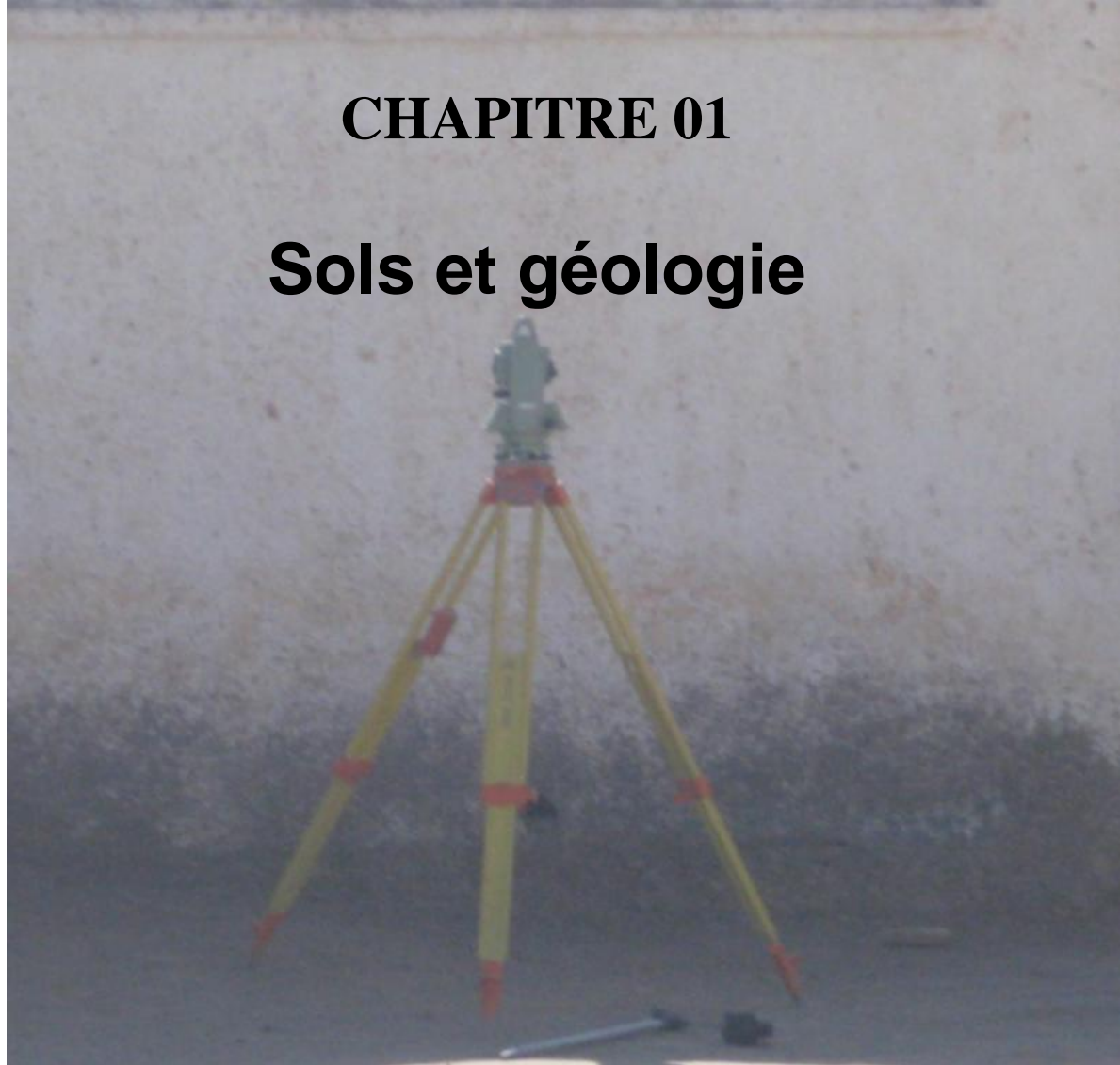


MECANIQUE DES SOLS


2^{ème} année

CHAPITRE 01

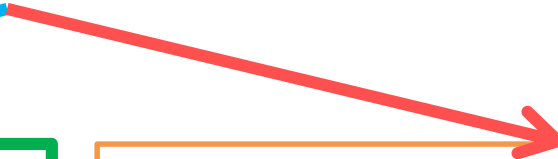
Sols et géologie



Définitions des sols : Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories:

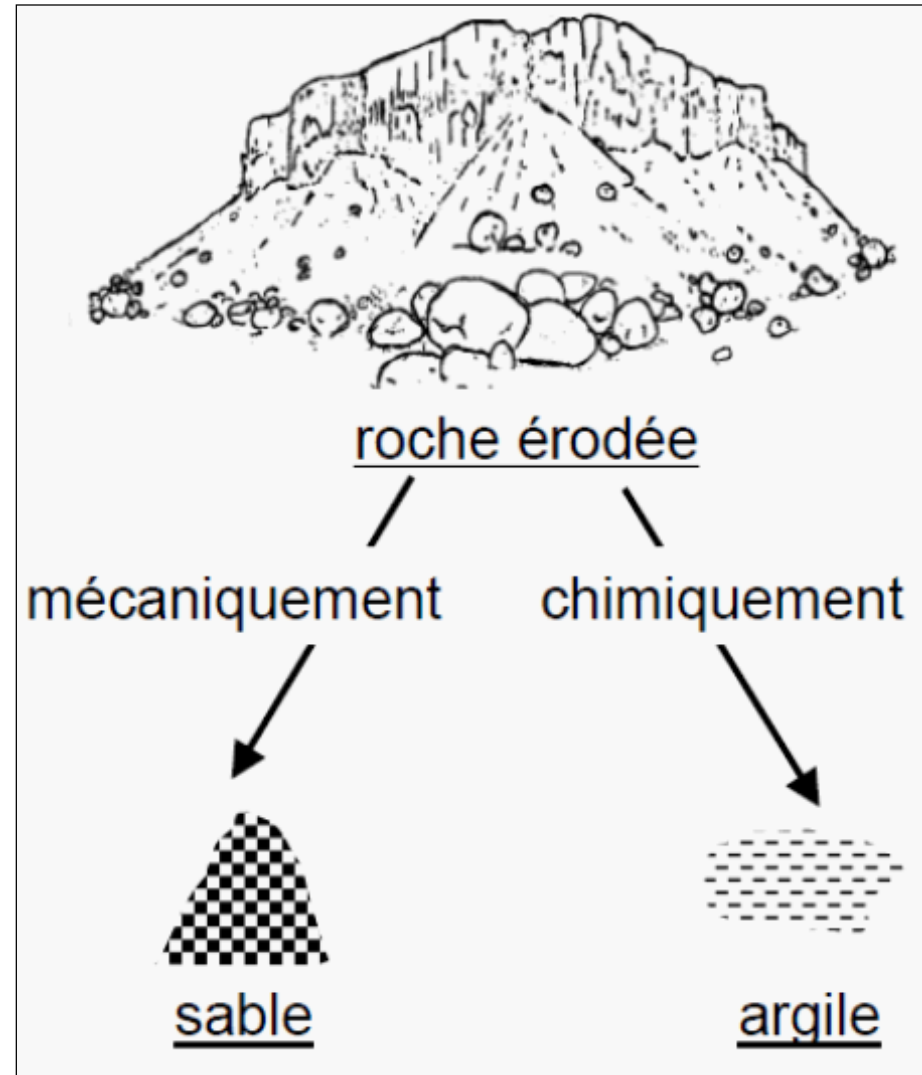


- **Les sols:** Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physicochimiques, etc..., pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles ⇒ Mécanique des sols.



- **Les roches:** agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau ⇒ Mécanique des roches.

- Produit de la décomposition des roches sous l'action d'agents atmosphériques (air, eau).
- Mélange en proportions variables de particules de toutes dimensions .
- Matériaux de comportement complexe



Éléments constitutifs d'un sol: Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases:

Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse

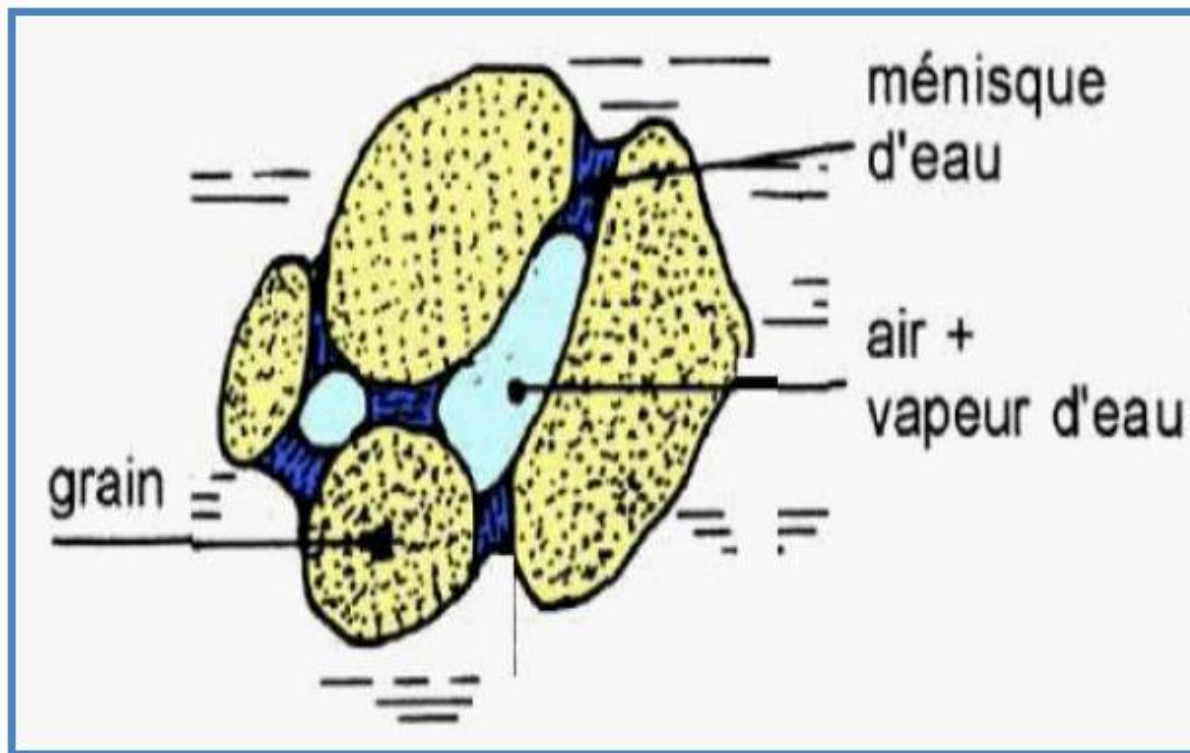
Phase gazeuse: Air + gaz de décomposition ou vapeur d'eau
Un sol est saturé lorsque les vides sont remplis.

Phase liquide:

Eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant.

Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense ($>300^\circ$).

Eau libre : s'écoule, s'élimine par étuvage vers 100° .



Sols pulvérulents ou grenus

Sols fins

Cailloux

Graves

Gros sable

Sable fin

Limon

Argile

Diamètre des grains décroissant

200mm

20mm

2mm

0,2mm

0,02mm

2μm

20μm

Sols cohérents

Les types des sols: On identifie habituellement les différents types de sols selon la dimension de leurs particules. En mécanique des sols, la division la plus simple consiste à regrouper les sols en deux grandes classes :

- **Les sols à gros grains:** Les cailloux et les blocs, ou enrochements, ont un diamètre équivalent supérieur à 80mm. Ils se caractérisent par une très grande perméabilité.

- **Les sols à grains fins:**

- **Les sols organiques:** Ils contiennent un pourcentage élevé de matières organiques.

MO < 3% : sol inorganique

3% < MO < 10% : sol faiblement organique

10% < MO < 30% : sol moyennement organique

Matériaux du sol	Grosseur des particules
Argile	Inférieure à 0,002 mm
Limon	Entre 0,002 mm et 0,05 mm
Sable	Entre 0,05 mm et 2 mm
Gravier	Supérieur à 2 mm

Sol argileux

- Sol qui contient surtout de l'argile (الطين) ; compact; laisse peu de place pour la circulation de l'air et de l'eau.



Sol limoneux

- Sol qui contient surtout du limon(الطمي); laisse circuler l'air et l'eau.



Sol sableux

- Sol qui contient surtout du sable; s'effrite facilement, laisse facilement circuler l'air et l'eau.

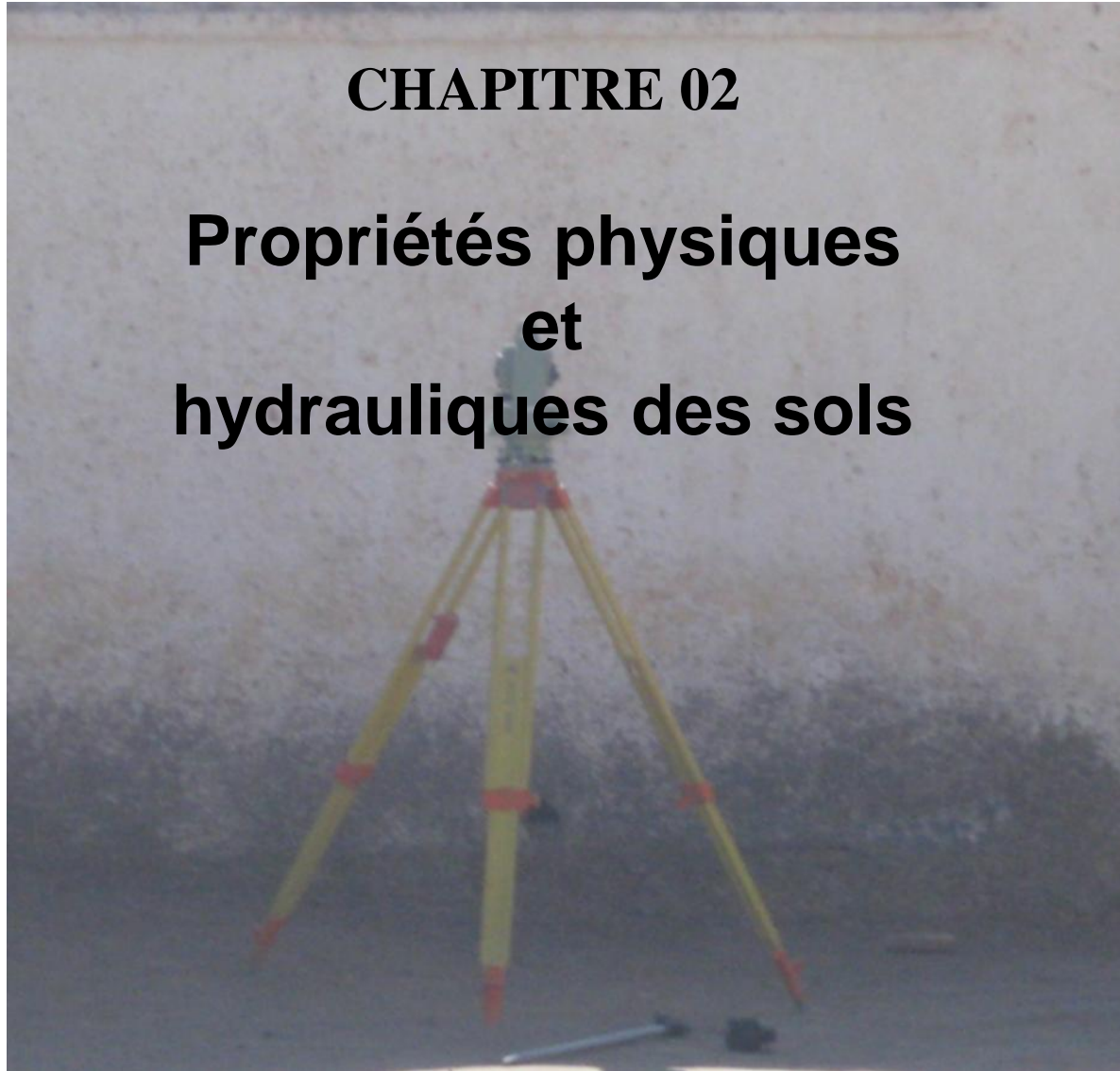


MECANIQUE DES SOLS

2^{ème} année

CHAPITRE 02

Propriétés physiques et hydrauliques des sols



Propriétés physiques des sols

1. Structure des sols : Le sol est un matériau constitué de particules. Les dimensions de ces particules peuvent être uniformes ou variées allant des cailloux de 10 cm et s'étendant jusqu'aux particules fines de moins du micron.

1.1. Principales caractéristiques physiques des particules de sol:

Les principales caractéristiques physiques des particules de sol sont

- **la dimension**
- **la forme**
- **la surface spécifique**

Ces caractéristiques influent sur les propriétés hydrauliques et mécaniques du sol.

a. La dimension des particules: La dimension des particules est mesurée selon un diamètre appelé diamètre équivalent.

Le diamètre équivalent d'une particule est égal à l'ouverture carrée minimale du tamis à travers laquelle cette particule peut passer.

b. La forme des particules: Bien qu'il existe une variété infinie de formes, on en reconnaît habituellement deux types :

- la forme volumineuse
- la forme en feuillet

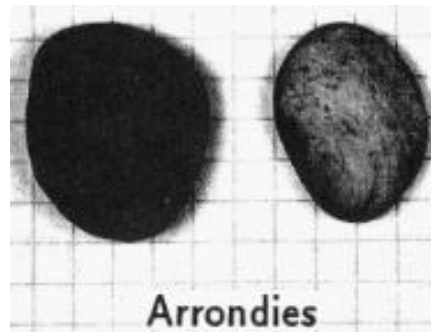
La forme volumineuse: La forme volumineuse caractérise généralement les particules de gravier, de sable. Le diamètre équivalent des particules volumineuses est généralement supérieur à 0.001mm. La plupart des particules volumineuses sont grossièrement sphériques et comportent des arêtes plus ou moins arrondies ou plus ou moins angulaires.



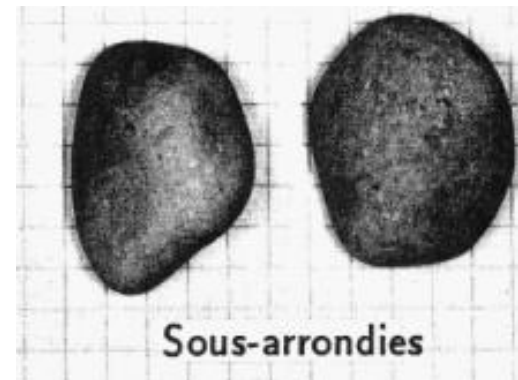
arrondie



sous-arrondie



Arrondies



Sous-arrondies

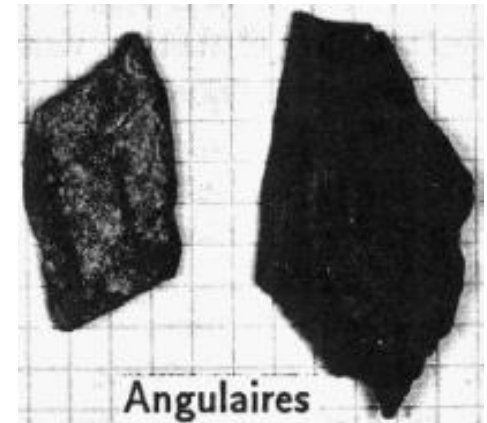
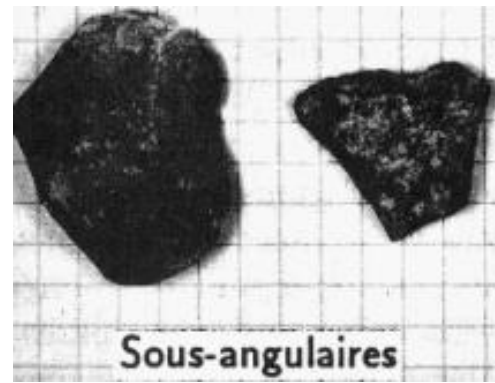
Quelques formes typiques de grains grossiers



angulaire



sous-angulaire



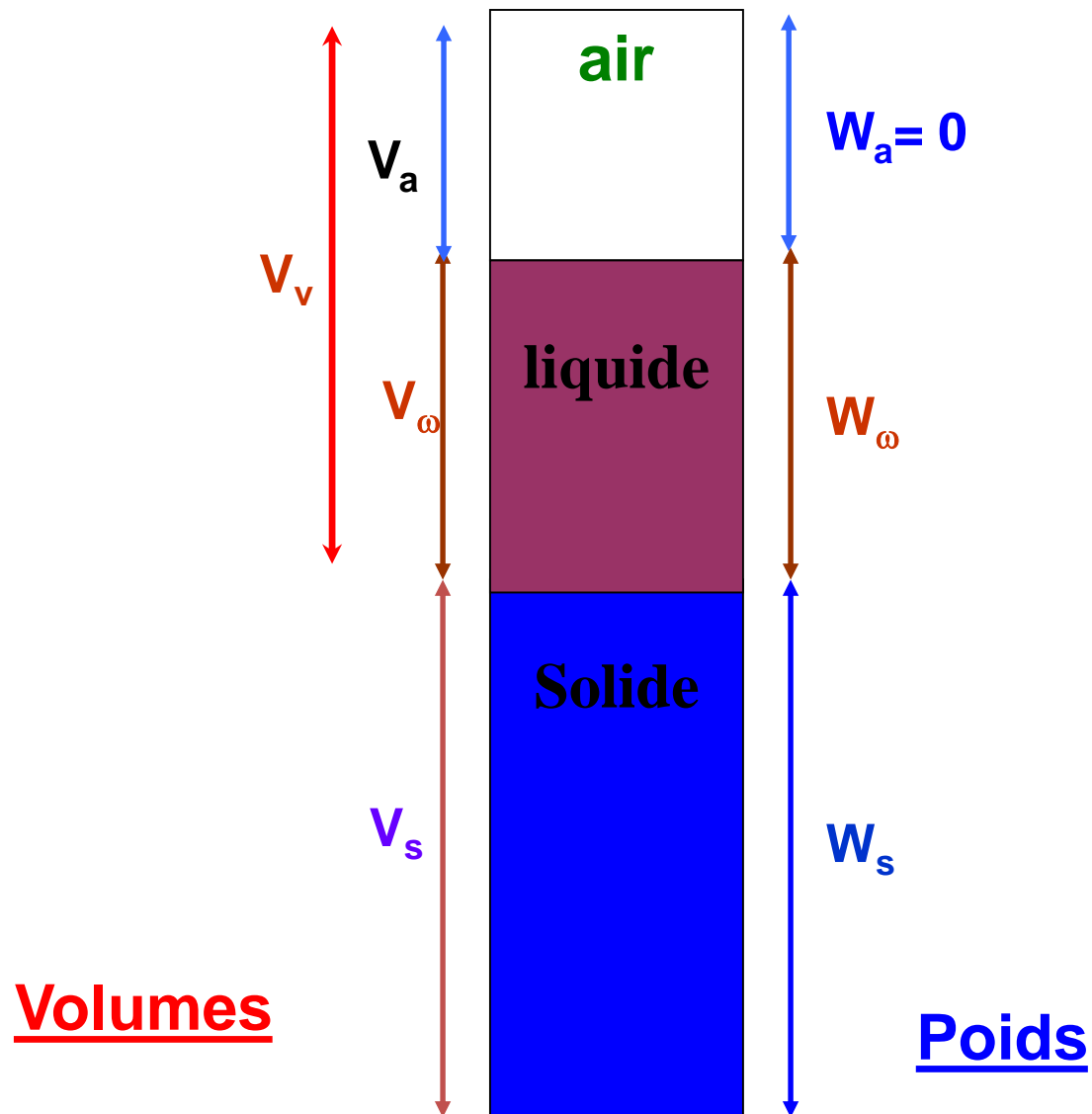
La forme en feuillet: Lorsque le rapport de sa longueur sur son épaisseur est supérieur à 10, on considère qu'une particule a une forme en feuillet. Cette forme caractérise spécialement les particules d'argile.

c. La surface spécifique: Par définition, la surface spécifique (S_p) appelée aussi « Aire massique » représente la surface totale (A_s) par unité de masse (M) et on l'exprime généralement en m^2/kg

$$S_p = \frac{\text{surface}}{\text{masse}} \left(\frac{m^2}{kg} \right)$$

2. Identification et classification des sols:

a. Les paramètres dimensionnels (Poids volumiques)



▪ **Le poids volumique des particules solides** (de la matière constituant les grains solides), noté γ_s : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$

Pour le sable et l'argile $\gamma_s = 26$ à 27 kn/m^3

▪ **Le poids volumique de l'eau**, noté γ_w : $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 9,81 \text{ kn/m}^3$

On prend souvent $\gamma_w = 10 \text{ kn/m}^3$. Ce qui entraîne d'emblée 2% d'erreur relative.

▪ **Le poids volumique du sol** (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide), noté γ . C'est le rapport du poids total (particules solides et eau) ou volume total du sol. $\gamma = \frac{W}{V}$

Pour le sable = 17 à 20 kn/m^3 , argile = 16 à 22 kn/m^3

• **Le poids volumique du sol sec**, noté γ_d : $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$

Pour sable = 14 à 18 kn/m^3 , argile = 10 à 20 kn/m^3

• **Le poids volumique du sol saturé**, noté γ_{sat} : lorsque tous les vides sont remplis d'eau. : $\gamma_{sat} = \frac{W}{V}$

Pour le sable et argile = 19 à 22 kN/m^3

b- Les paramètres sans dimensions (Paramètres d'état)

➤ **POROSITE** $n = \frac{V_v}{V} < 1$

qui permet de connaître l'importance des vides c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré.

Pour le sable : $n = 0.25$ à 0.5 , argile : $n = 0,20$ à 0.80

➤ **INDICES DES VIDES**

Un **indice des vides** calcule un rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides dans un échantillon donné de milieu poreux, perméable, semi-perméable ou hermétique

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

Pour le sable : $e = 0.5$ à 1 , argile : $e = 0,5$ à $0,9$

➤ **DEGRE DE SATURATION** $S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$

indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau.
Le degré de saturation peut varier de

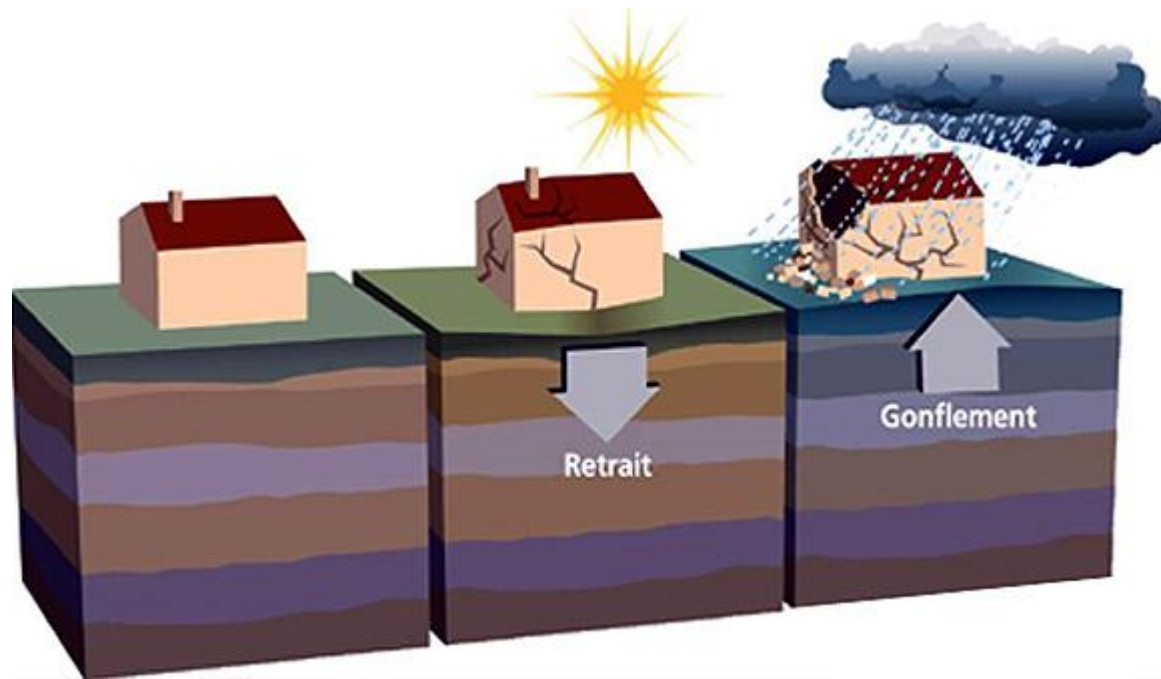
$$S_r = 0 \text{ sol sec}; \quad S_r = 100\% \text{ sol saturé}$$

➤ **TENEUR EN EAU** $w = \frac{V_w}{V_s}$

Pour le sable: $w = 1$ à 15% , argile : $w = 10$ à 20%

On désigne par teneur en eau la quantité d'eau contenue dans un échantillon de matière, par exemple un échantillon de sol, de roche, de céramique ou de bois, la quantité étant évaluée par un rapport de poids humides sur poids secs.

L'essai de teneur en eau permet de déterminer quel est le pourcentage massique (W%) d'eau dans le sol étudié, c'est-à-dire quelle est la masse d'eau présente par rapport à 100 grammes de sol sec.



Un sol se déforme en fonction de la variation de la quantité d'eau qu'il contient.

Maîtriser la quantité d'eau; revient à maîtriser la portance du sol et donc à protéger les ouvrages qui y sont construits

Les propriétés hydrauliques

- L'eau exerce une grande influence sur le comportement des sols.
- Toujours synonyme de complications
- D'où l'importance de comprendre:
 - La provenance de l'eau souterraine
 - Les principales propriétés hydrauliques:
 - Perméabilité
 - Capillarité
 - Retrait et gonflement
 - Gélivité

Eau souterraine

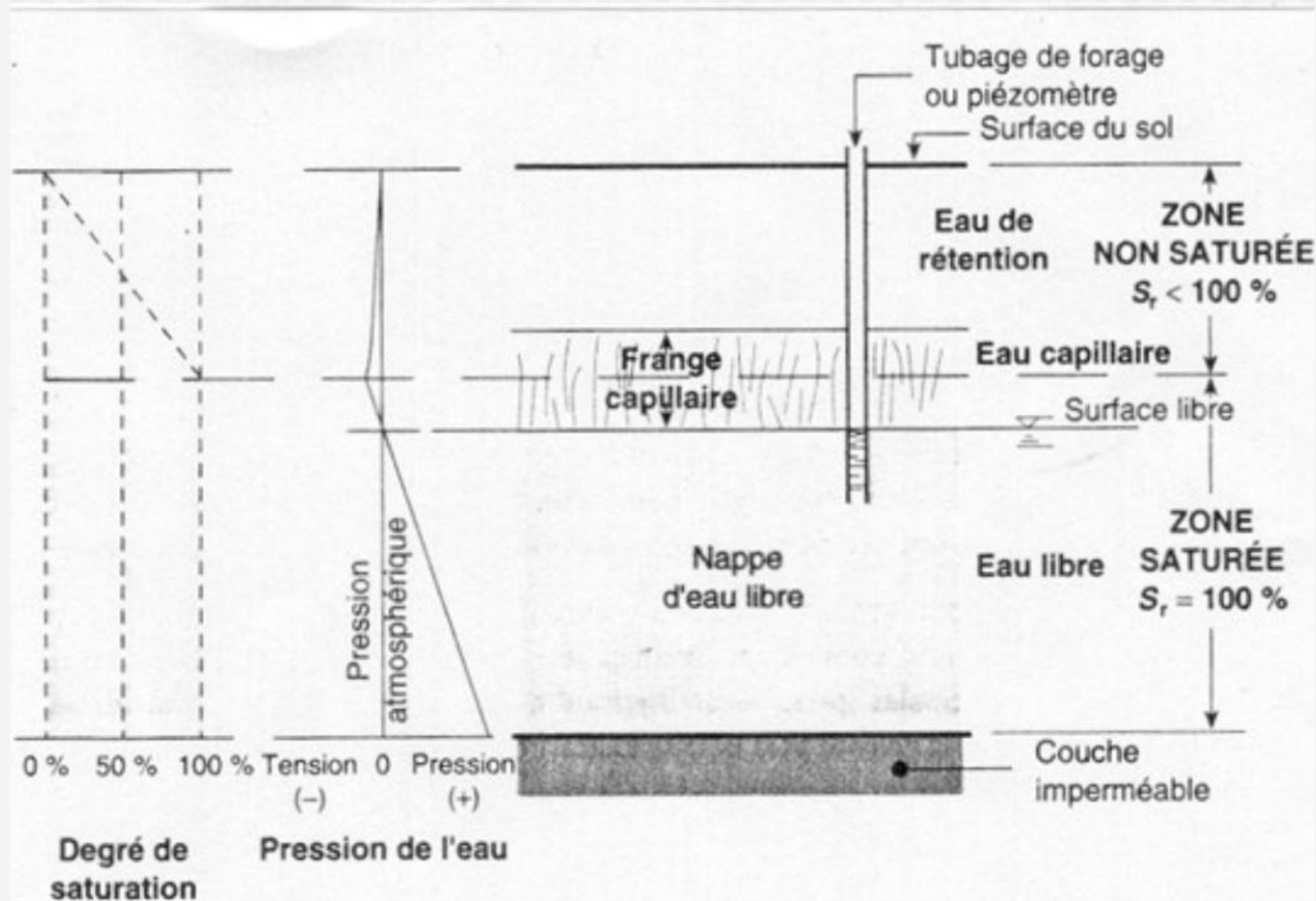
- Eau de rétention
- Eau capillaire
- Eau libre ou gravitaire

L'Eau de rétention désigne l'eau souterraine maintenue dans un sol ou un terrain et qu'il est impossible de récupérer.

Eau capillaire Eau maintenue dans un milieu poreux, généralement au-dessus d'une surface libre, sous l'effet des forces **capillaires**, et soumise à une pression inférieure à la pression atmosphérique.

Eau libre: Une **eau libre** précise qu'une **eau** peut se déplacer à travers une masse de sol sous l'influence de la gravité

Type d'eau souterraine



Type de nappes d'eau souterraine

- Nappe d'eau libre ou phréatique
- Nappe perchée
- Nappe captive

Nappes libres: Les nappes libres sont caractérisées par un niveau d'eau qui peut varier librement en fonction des apports et des prélèvements. Il s'agit souvent de nappes proches de la surface.

Nappes perchée: est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les [puits](#) et les sources en [eau potable](#). C'est la nappe la plus exposée à la [pollution](#) en provenance de la surface.

Nappe captive: Nappe d'eau souterraine qui circule entre deux couches de terrains imperméables. Elle est recouverte, totalement ou partiellement, par une couche de terrain imperméable. Ces nappes sont sous pression.

Type de nappes d'eau souterraine

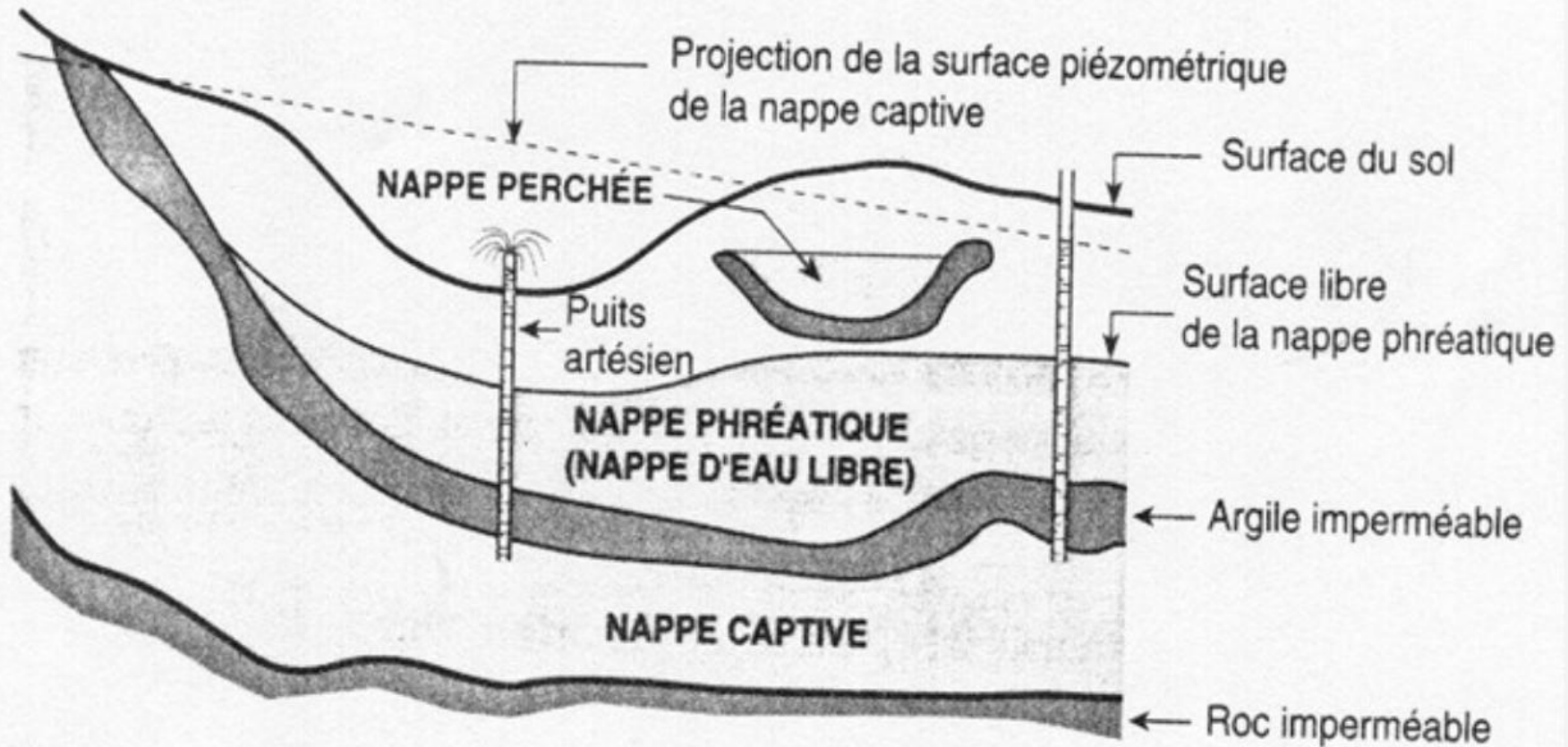
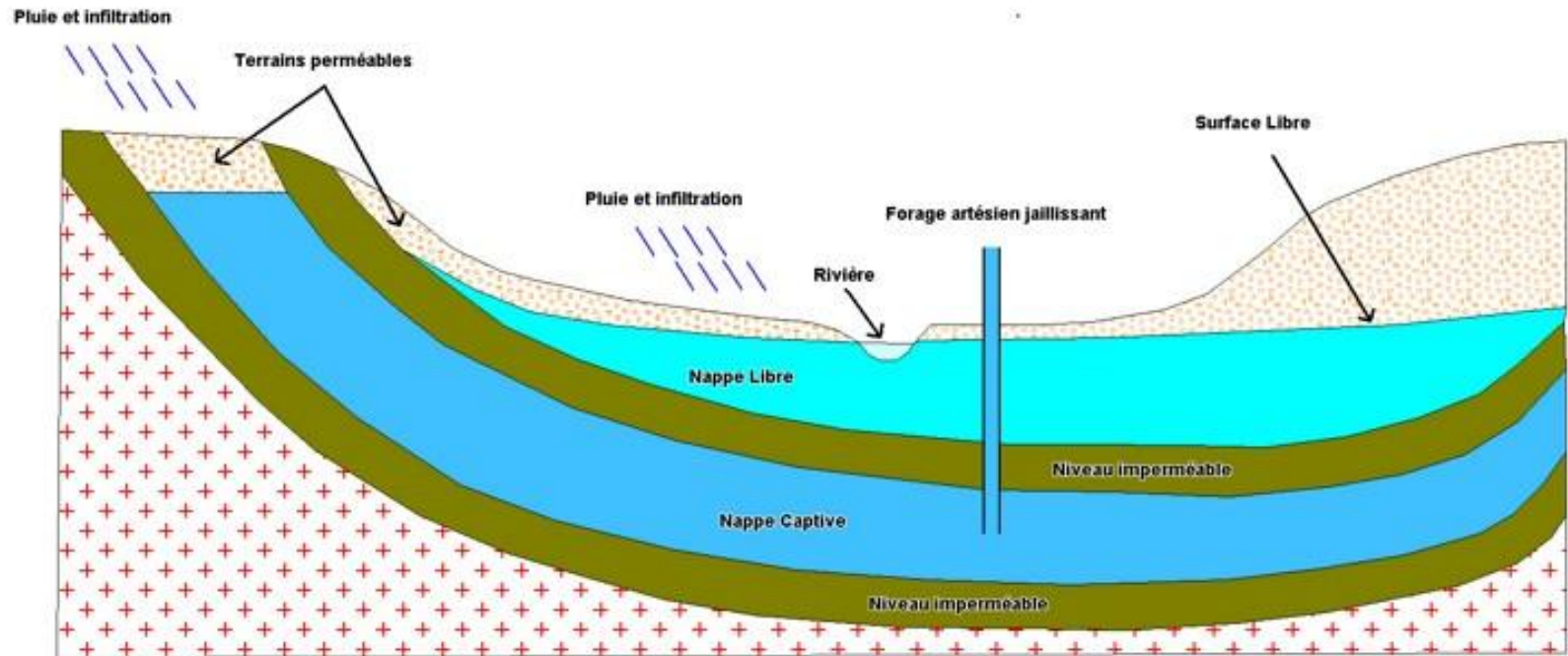


Figure 6.2 Les nappes d'eau souterraine (d'après Landry et Mercier, 1992).

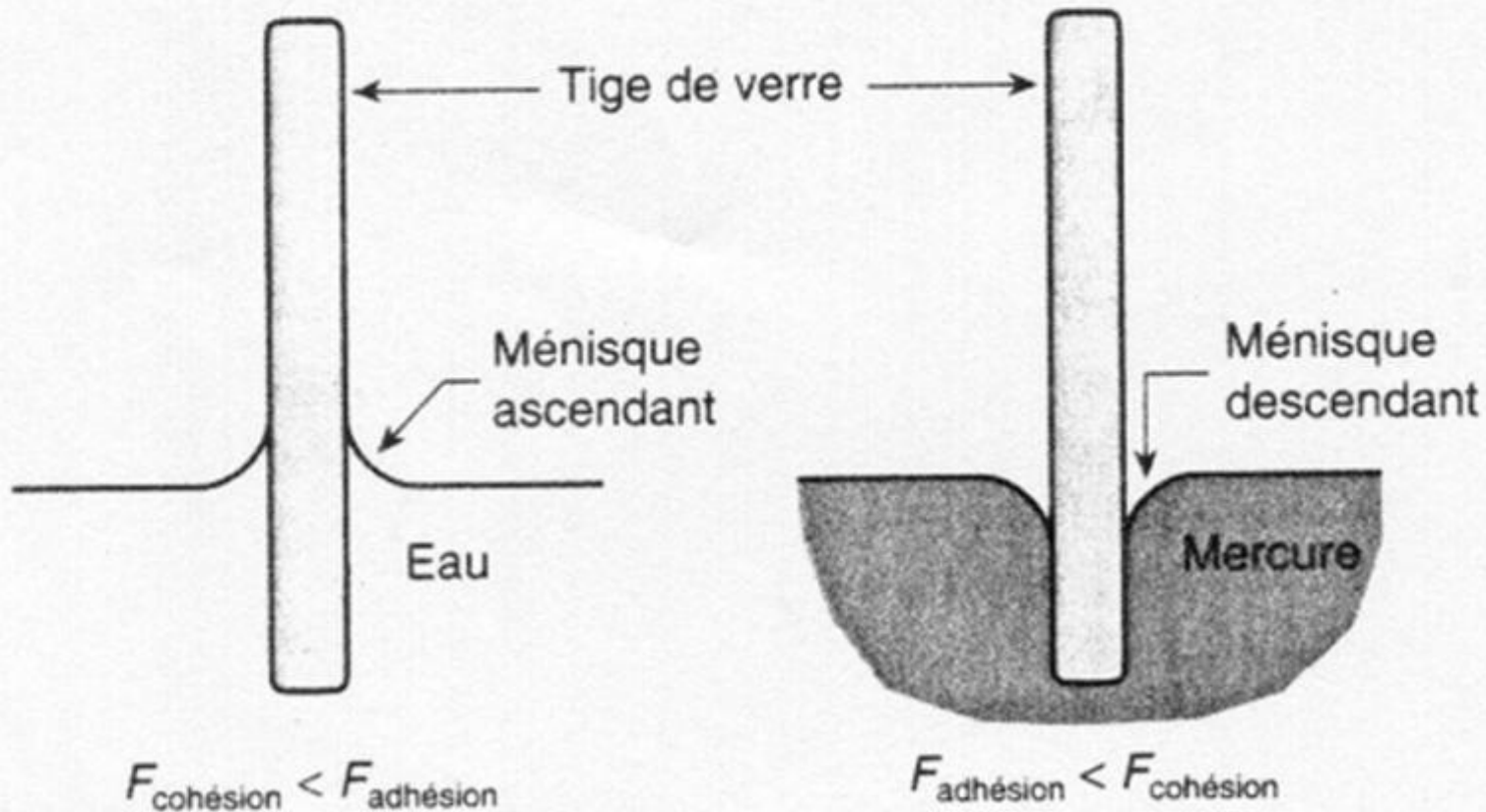
Type de nappes d'eau souterraine



Capillarité

- Désigne ordinairement la capacité de l'eau et de certains liquides à monter naturellement malgré la force de gravité le long de tubes très fins plongés dans ces liquides. La remontée est d'autant plus forte que le tube est fin.
- Dépend de 2 principes
 - Forces de cohésion internes
 - Forces d'adhésion

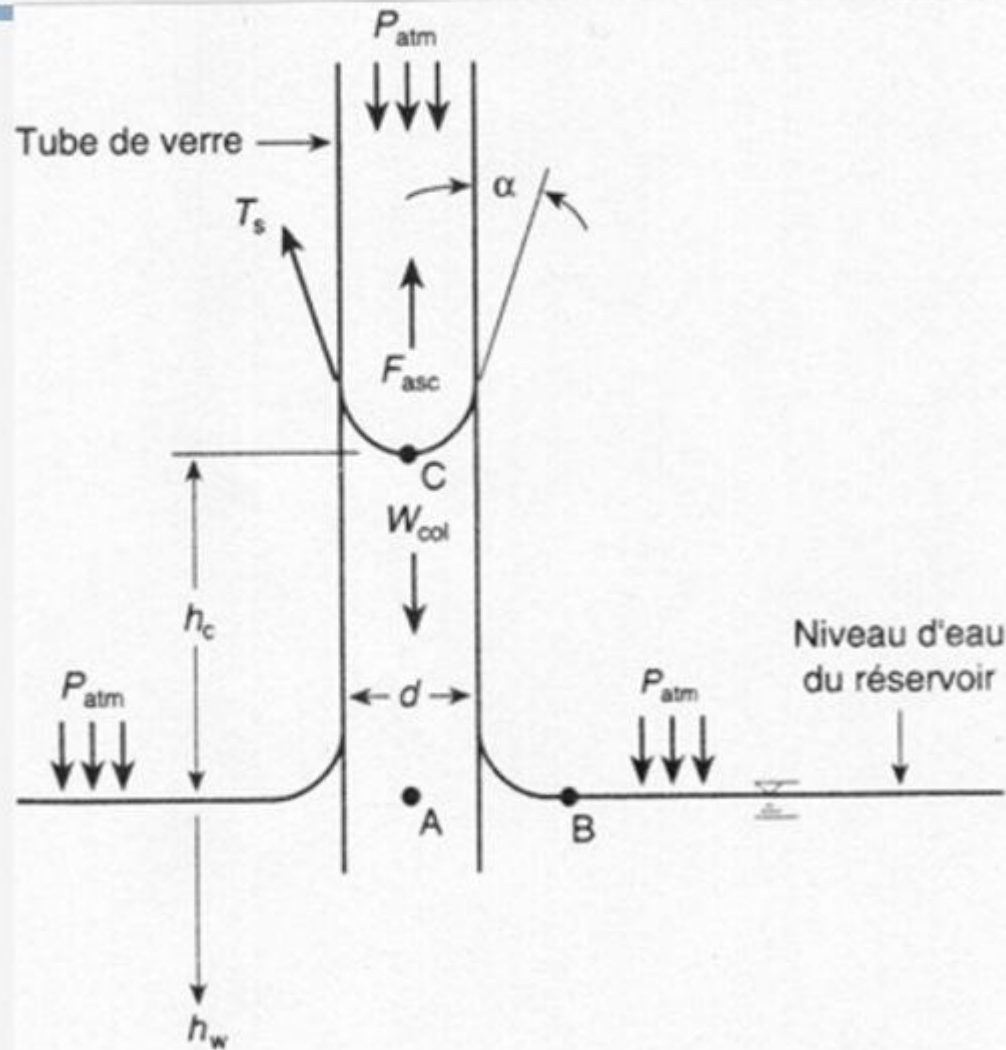
Forces d'adhésion Vs Forces de cohésion



Capillarité (suite)

- L'eau adhère à la paroi interne du tube (F adhésion), puis monte (action de T_s) jusqu'à ce que:
 - F ascension = W colonne d'eau
- Permet de déterminer la remontée capillaire h_c .

Remontées capillaires et pression d'eau



Application pour un sol

- L'eau s'élève par capillarité à travers les interstices du sol (i.e.vides) qui forment le réseau capillaire.
- La nappe phréatique s'apparente au réservoir d'eau.
- L'efficacité du réseau est fonction:
 - Granulométrie
 - Indice des vides

Remontées capillaires de différents types de sol

Types de sols	Remontées capillaires approximatives (m)	
	État lâche	État dense
Sable grossier	0,03 à 0,12	0,04 à 0,15
Sable moyen	0,12 à 0,50	0,35 à 1,10
Sable fin	0,30 à 2,0	0,40 à 3,5
Silt	1,5 à 10	2,5 à 12
Argile	≥ 10	≥ 10

Retrait et gonflement

- Changement de volume que subissent les sols à grains fins lorsque la teneur en eau varie.
- Retrait : assèchement du sol, donc réduction de volume.
- Gonflement : augmentation de volume causé par un apport en eau.

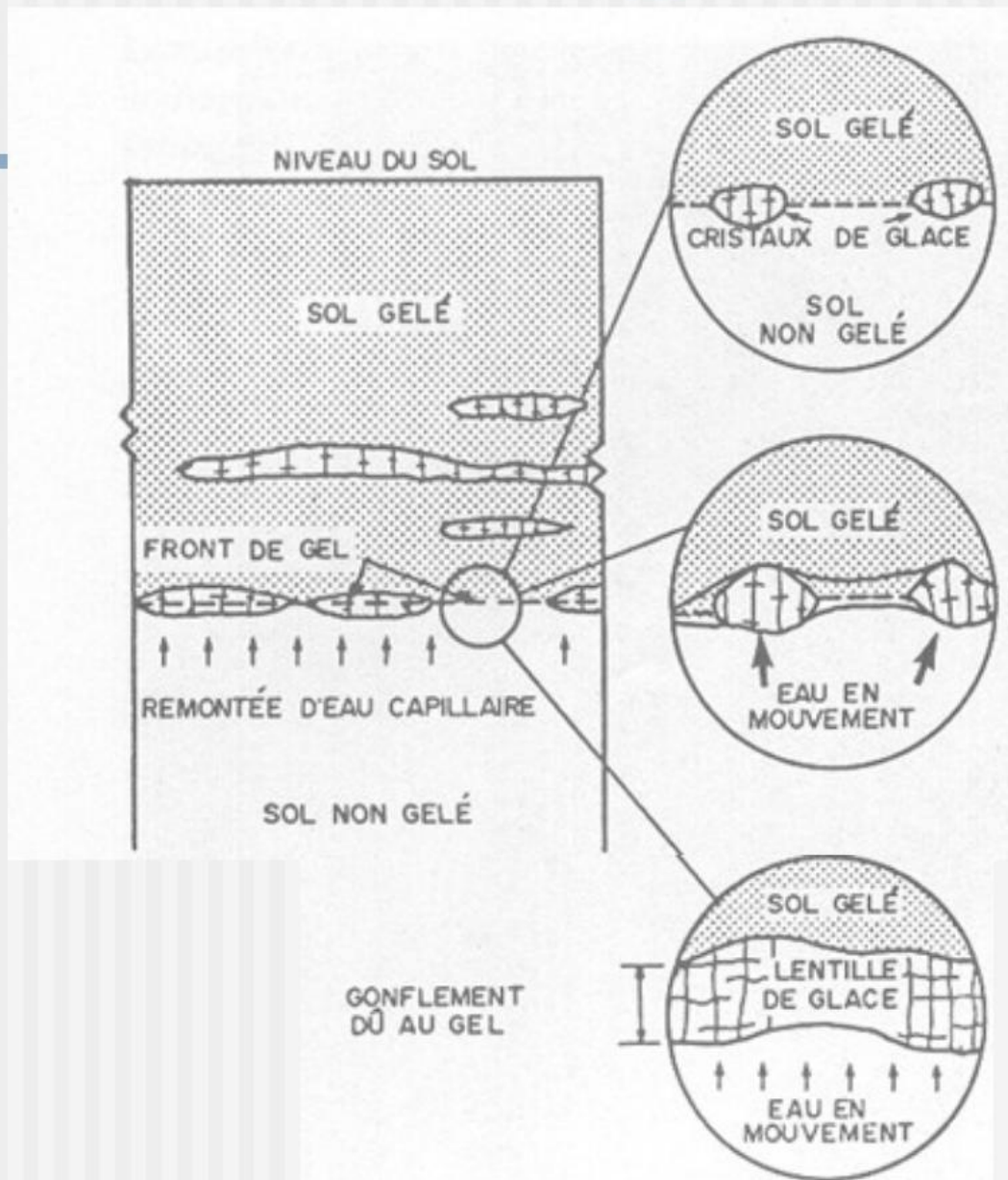
Géivité

- Propriété qu'ont les sols d'augmenter de volume sous l'action du gel.
- Gélif / Non gélif
- Effets du gel:
 - Soulèvement de la chaussée
 - Perte de capacité portante du sol

Soulèvement de la chaussée

- Pourquoi les soulèvements sont-ils plus importants que 9%?

Lentille de glace



Soulèvement de la chaussée (suite)

- Conditions favorisant l'apparition de lentille de glace:
 - Sol capillaire
 - Sol peu perméable
 - Abaissement du front de gel lent
 - Niveau de la nappe phréatique pas trop éloigné du front de gel

Soulèvement de la chaussée (suite)

- Méthodes pour réduire l'effet du gel:
 - Arrêter la pénétration du front de gel
 - Abaisser la nappe phréatique
 - Remplacer le matériau gélif par un sol non gélif

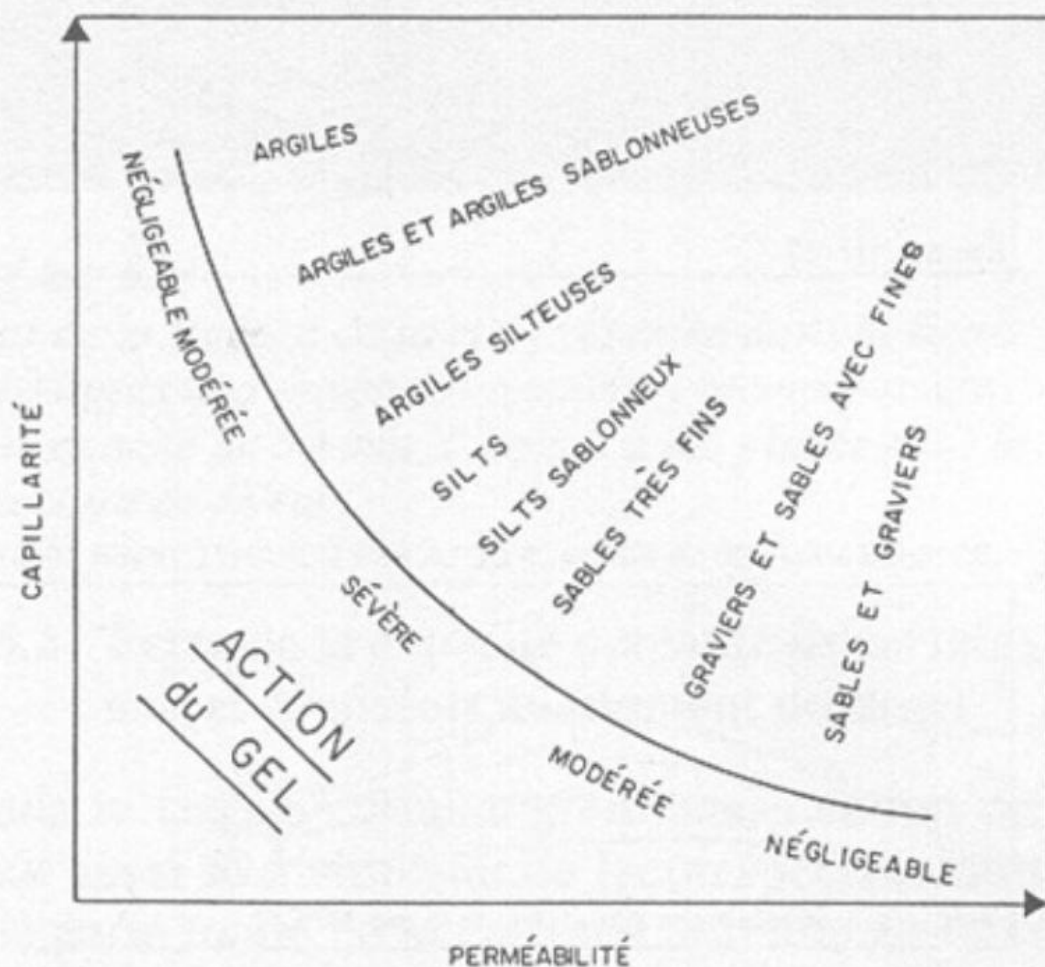
Perte de capacité portante du sol

- Phénomène causé par la fonte des lentilles de glace qui laissent des vides importants se remplir d'eau.
- Cause : Mauvais drainage latéral et sous-fondation inexistante ou inefficace

Perte de capacité portante du sol (suite)

- Méthode pour éviter l'effet baignoire:
 - En évitant le gel d'eau dans la fondation.
 - En éliminant le plus rapidement possible les eaux superficielles résultant de la fonte des neiges.

Graphique caractérisant les sols à risque pour le gel



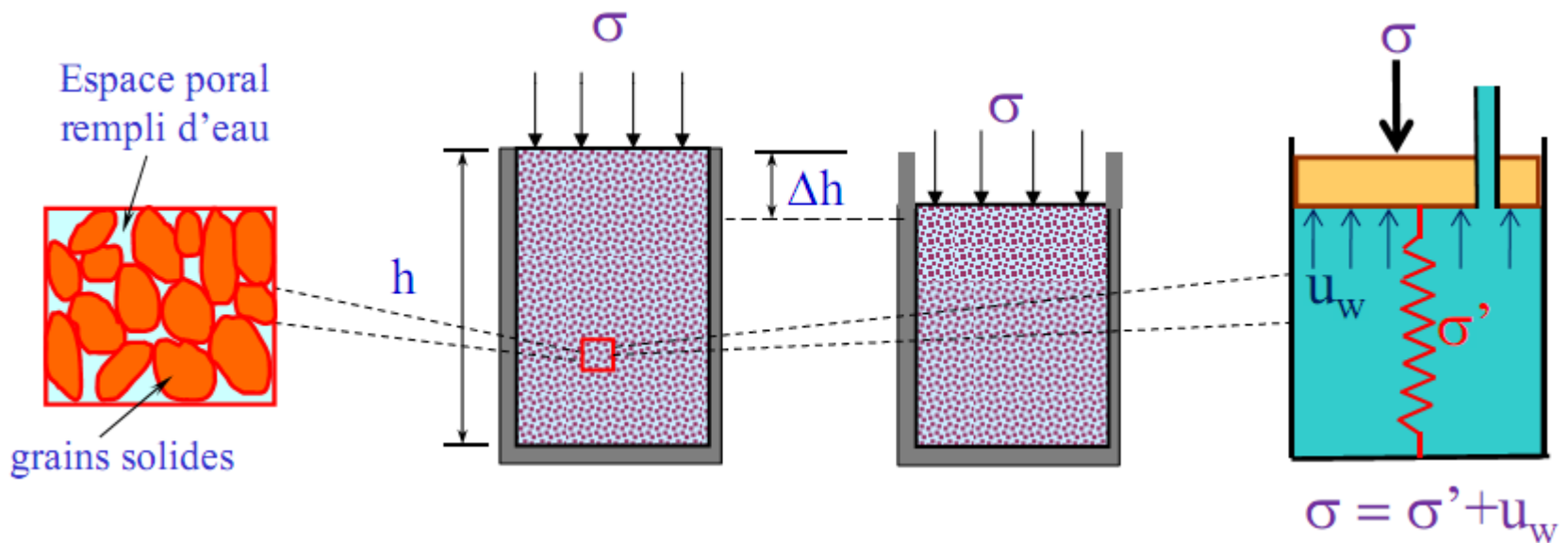
MECANIQUE DES SOLS

2^{ème} année

CHAPITRE 03

Théorie de la consolidation

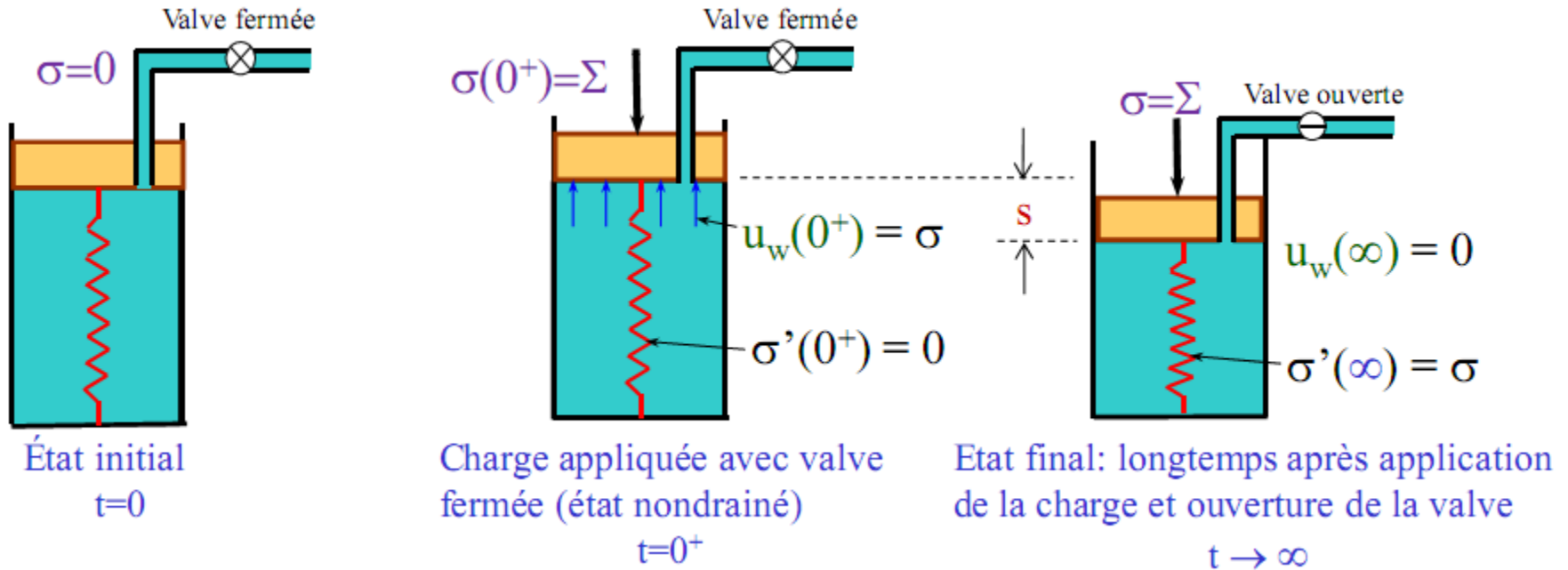




La réduction du volume de l'échantillon de sol peut venir :

- (1) de la compressibilité des particules solides,
- (2) de la compressibilité de l'eau dans les pores
- (3) de l'expulsion de l'eau des pores
- (3) du ré-arrangement du squelette granulaire

En mécanique des sols, le niveau des contraintes est faible, de sorte que (1) et (2) sont négligeables, la contraction volumique vient toujours de (3) et (4).



Principe de Terzaghi

A tout instant: $\sigma = \sigma' + u_w$

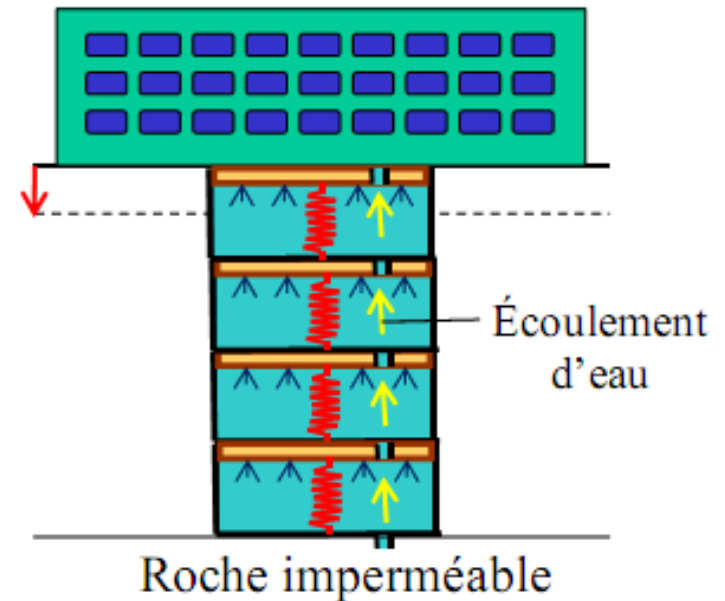
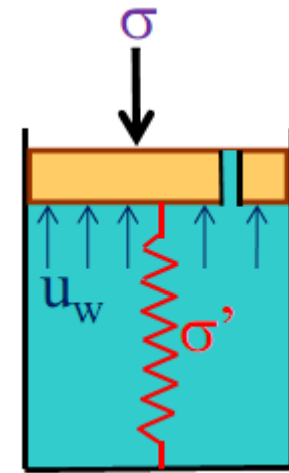
Au bout d'un temps infini, toute surpression d'eau est dissipée, la charge mécanique extérieure est intégralement portée par le squelette solide

A tout instant:

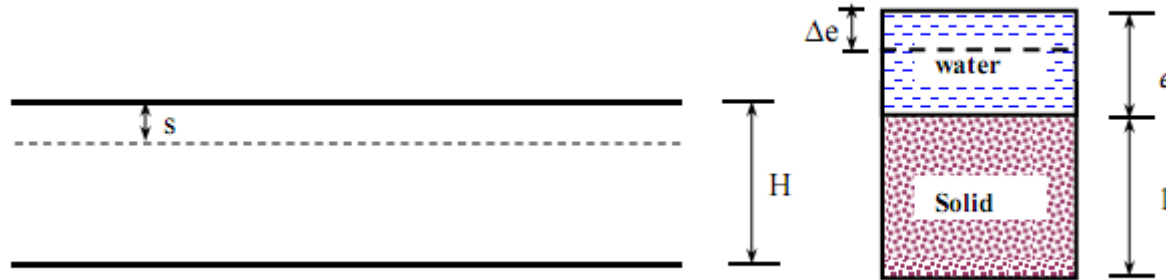
$$\sigma = \sigma' + u_w$$

Consolidation d'un élément de sol

- La charge appliquée est transférée progressivement de l'eau (u_w) au squelette des grains (σ').
- L'eau est expulsée de l'élément du sol et son volume diminue.
- Ceci induit un tassement du sol et de l'ouvrage fondé sur lui.
- La vitesse du tassement dépend de la perméabilité du sol et de la longueur du trajet d'écoulement (i.e. son épaisseur..)
- La résistance du sol augmente (surtout sa cohésion).



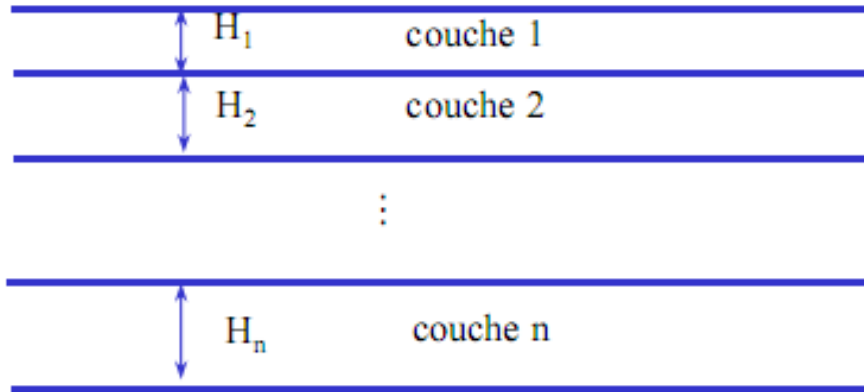
Calcul de tassement de consolidation



Pour une couche fine de sol où la variation de l'indice des vides (Δe) est homogène:

$$s = -\frac{\Delta e}{1+e} H$$

Si le sol se présente en plusieurs couches hétérogènes, ou si la variation des contraintes ($\Delta\sigma'$), donc des indices des vides Δe sont hétérogènes, il faut procéder à un calcul par couche puis additionner les résultats.



$$s_i = -\frac{\Delta e_i H_i}{1 + e_i}$$



$$s = \sum_{i=1}^n s_i = -\sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i H_i}{1 + e_i}$$

Chapitre 04 :

STABILITE DES PENTES ET DES TALUS

Faculté des sciences de la terre, de la Géographie et de l'Aménagement du territoire

Département des Sciences Géographique et Topographie



4.1. Introduction Générale :

Le problème de la stabilité des talus et la stabilité des terrains en général constitue l'une des préoccupations majeures des géotechniciens et des gestionnaires d'ouvrages d'art et miniers. Dans le cas des carrières, ce problème est d'une importance capitale pour :

- assurer la continuité de la production.
- sauvegarder les vies humaines et les engins de production.

4.2. Classification des mouvements de terrains :

De nombreuses classifications ont été proposées pour rendre compte de la diversité des mouvements de terrain. Les principaux critères de classification retenus sont (Tableau 4.1) :

- Types de terrain affectés.
- Types de mouvements.
- Vitesse des processus.
- Taux de remaniement des matériaux après le mouvement.

Les mouvements de terrain les plus fréquents sont classés en :

- Glissements.
- Coulées.
- Eroulement.
- Fluages.

4.2.1. Les glissements :

Ils se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles..). Les glissements sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil et génie minier.

Selon la forme de la surface de rupture, on distingue trois types de glissements :

- Glissement plan.
- Glissement rotationnels simples.
- Glissement rotationnels complexes (composés).

a. Glissement plan :

Il se produit suivant un plan, au niveau d'une surface de discontinuité géologique : zone entre deux matériaux de nature différente, failles, plans de stratification... (Figure 4.01). La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon ».

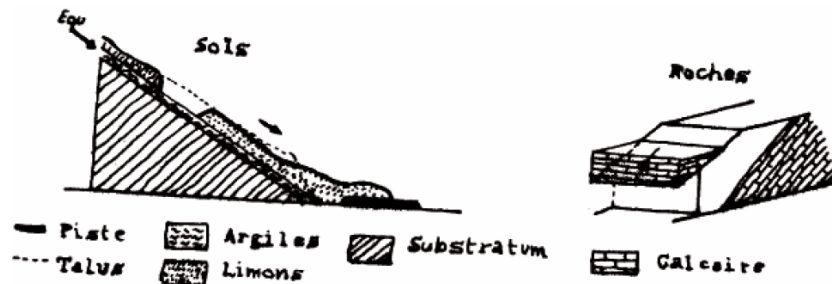


Figure 4.01. Glissement plan

b. Glissements rotationnels ou circulaires :

Le terrain glisse le long d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère. On distingue le glissement rotationnel simple et complexe (composé).

Elle se produit la plupart du temps dans des débris rocheux, dans de la roche hautement fracturés ou fortement altérée sans famille de discontinuité apparente.

Glissement rotationnel simple :

Ce type de glissement est très fréquent. La surface de rupture à une forme simple et peut être assimilée à un cylindre. Dans un tel glissement, on distingue (Figure 4.02) : au sommet des fissures de traction et un escarpement, correspondant au départ de la surface de glissement, et à la base un bourrelet formé par des matières glissées. Dans certains cas, la surface de rupture peut être assimilée à un cercle, d'où le nom de glissement circulaire.

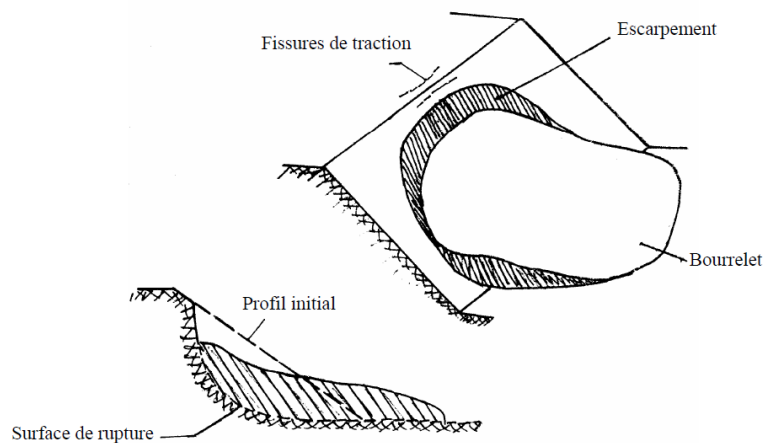
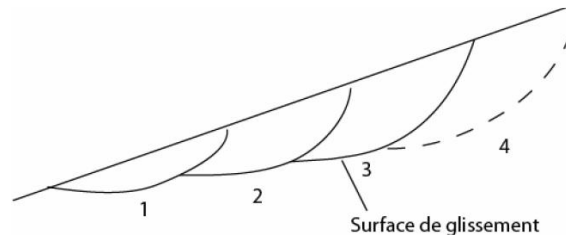


Figure 4.02. Glissement rotationnel simple

Glissement rotationnel complexe :

Ce type de glissement est rare. Il s'agit de glissements multiples emboîtés les uns dans les autres, dus souvent à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, ce qui entraîne des glissements successifs remontant vers l'amont.



Principales causes des glissements :

Plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants étant :

- La nature des terrains : les terrains argileux sont prédisposés aux glissements.
- L'action de l'eau : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.
- les causes mécaniques externes : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les talus stables, toute surcharge naturelle ou artificielle déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines ...).

4.2.3 Les coulées :

Elles se produisent à partir de matériel meuble, momentanément saturé en eau, prenant alors une consistance plus ou moins visqueuse, parfois proche de la fluidité. On distingue plusieurs types de coulées telle que : **coulées boueuses** (incluant coulée de blocs, de terre, de boue, lave torrentielle, avalanche de débris et se produisant surtout en montagne) (Figure 4.03), **coulées de solifluxion** (déplacement lent des sols en milieu périglaciaire, résultant de l'instabilité de la partie dégelée du sol, en surface, au cours de l'été).

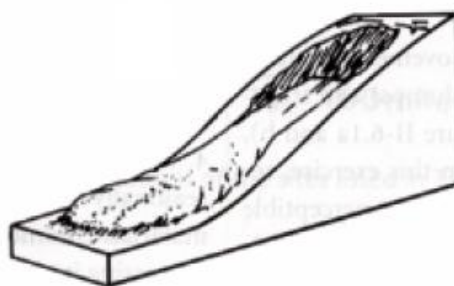


Figure 4.03. Coulée de boue

4.2.4. Les écroulements :

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses (Figure 4.04). On utilise le terme de chute de pierres pour le détachement de quelques unités de volume inférieur à 1 dm^2 , ou chute de blocs pour un volume supérieur. Le terme écroulement est utilisé quand il s'agit de la chute soudaine d'une masse rocheuse qui se détache d'une paroi en se désorganisant.

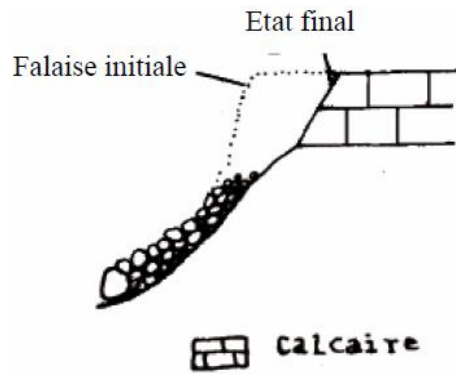


Figure 4.04. Eroulement

4.2.5. Le fluage :

Il correspond à des mouvements lents, dus à des sollicitations proches de la rupture (domaine plastique). Dans l'exemple de la figure 4.05, le banc de marne flue sous le poids de la falaise calcaire. Ceci peut provoquer une fissuration du banc calcaire peu déformable et un risque d'éroulement de la falaise.

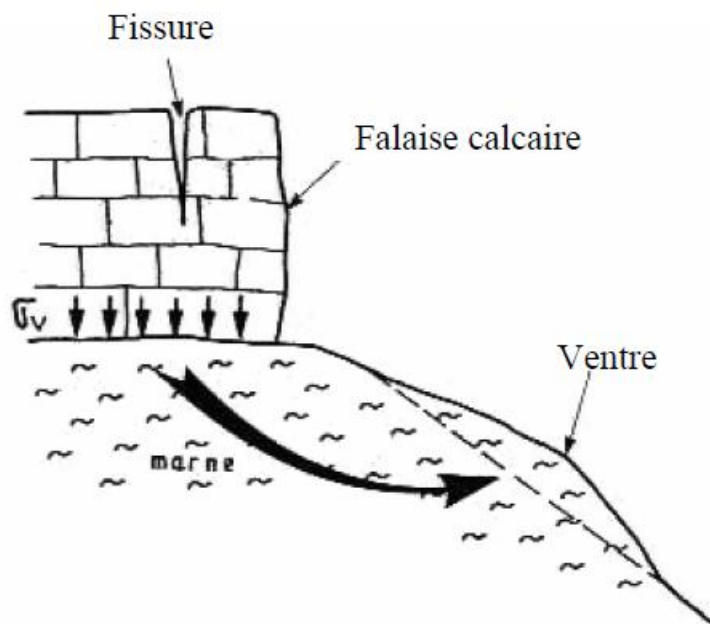


Figure 4.05. Exemple de fluage

Une compilation des différents types de mouvements de terrain est donnée dans le tableau 4.01.

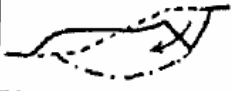
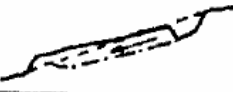




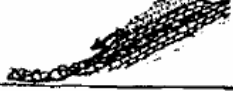

Classes	Types	Schéma	Terrains concernés	Remaniement interne	Vitesse moyenne
GLISSEMENTS DE TERRAIN <i>(sens strict)</i>	GLISSEMENT CIRCULAIRE (loupe)		roches peu cohérentes	plutôt faible	quelques cm à quelques m par jour discontinu (saisons)
	GLISSEMENT PLAN		- marnes - alluvions - moraines		
	GLISSEMENT DE NIVEAU D'ALTÉRATION		altérites		quelques m par jour
COULÉES	COULÉE DE SOLIFLUXION		roches meubles	plutôt fort	discontinu (saisons)
	COULÉE DE BOUE				plusieurs m par seconde variable (selon fluidité)
ÉCROULEMENTS	ÉCROULEMENT DE SURPLOMB		roches cohérentes		déclenchement très rapide
	ÉCROULEMENT D'AVAL PENDAGE		stratifiées ou non		chute en quelques secondes
FAUCHAGE				variable selon le stade	très lent quelques cm par an

Tableau 4.1. Principales classes et types de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés (d'après Campy M., Macaire J.J., 2003)

4.3. Méthodes de calcul de la stabilité des talus :

Les méthodes de calcul de stabilité des terrains sont basées sur la constatation suivante : lorsqu'il y a glissement de terrain, il y a séparation d'une masse du sol du reste du massif et son glissement se fait suivant une surface de rupture. Ayant défini une surface de rupture «S», on étudie la stabilité de la masse (1) mobile par rapport au massif (2) qui est fixe (Figure 4.06).

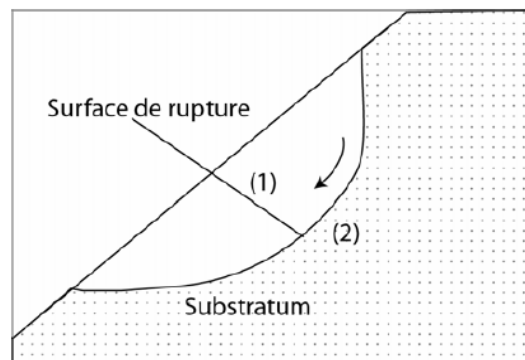


Figure 4.06. Surface de rupture

4.3.1. Définition du coefficient de sécurité :

Le calcul de la stabilité des talus est généralement estimé à l'aide d'un coefficient appelé : coefficient de sécurité F_s . Ce coefficient est défini comme étant le rapport du moment par rapport à un point fixe de la résultante des forces résistantes au glissement aux forces provoquant le glissement.

$$F_s = \frac{\sum \text{Moments des forces résistant au mouvement}}{\sum \text{Moments des forces provoquant le mouvement}} \quad 01$$

Théoriquement, le talus est dit stable si $F_s > 1$. L'état d'équilibre limite (rupture) est obtenu lorsque $F_s = 1$. Mais dans la pratique, le coefficient F_s est compris entre 1,15 et 1,30 en tenant compte des facteurs suivants :

- Les erreurs dues à l'exactitude des méthodes de calcul de la stabilité du bord.
- Les incertitudes expérimentales de la détermination des propriétés physico-mécaniques des sols, comme par exemple la valeur moyenne du poids volumique des sols composant le massif.
- Les incertitudes de la détermination de l'influence de la fissurité.
- L'influence des charges dynamiques provoquées par le tir, par le mouvement des moyens de transport et par les séismes.

4.3.2. Méthodes de calcul de la stabilité : Les principales méthodes de calcul de la stabilité des talus sont :

- Les méthodes basées sur l'équilibre limite.
- Les méthodes des éléments finis.
- Les méthodes des abaques.

Les méthodes basées sur l'équilibre limite : La mise en équation du problème de l'équilibre d'une masse de sol peut se faire de deux manières :

- Ou bien on étudie l'équilibre de l'ensemble de la zone de glissement. La ligne de rupture est ; la plupart du temps supposé circulaire. C'est la « **méthode globale** » (méthode de TAYLOR ; de CAQUOT ; de BIAREZ.....).
- Ou bien on décompose le talus en tranches dont on étudie d'abord l'équilibre individuel, avant de globaliser le résultat en faisant intervenir certaines hypothèses simplificatrices ; c'est la « **méthode des tranches** » (méthode de FELLENIUS, méthode de BISHOP...).

Méthode des tranches :

Cette méthode consiste à considérer les forces qui tendent à retenir un certain volume de terrain, délimité par les forces libres du talus et une surface de rupture potentielle, et celles qui tendent à la mettre en mouvement (Figure 4.07).

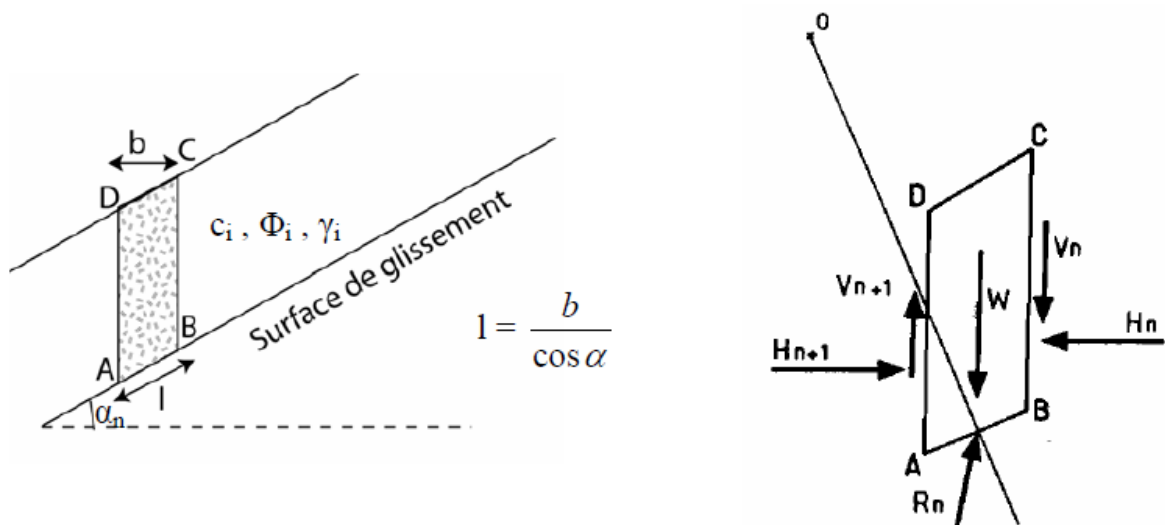
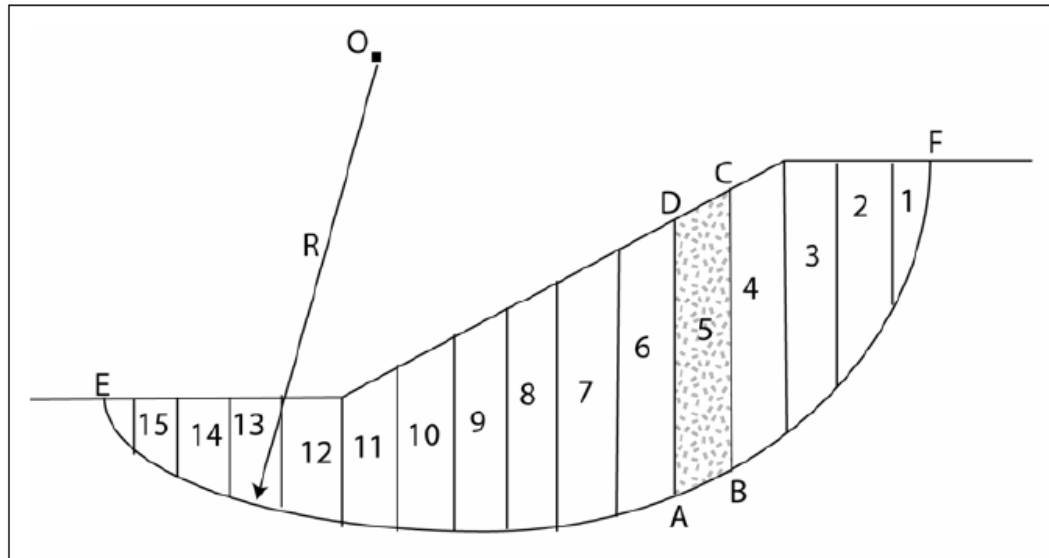


Figure 4.07. Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement. La méthode des tranches consiste à découper le volume de sol (compris dans l'arc EF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux.

En l'absence d'eau, une tranche (n) est soumise à :

- Son poids $W = \gamma_n \cdot h_n \cdot b_n$
- Les efforts inter-tranches décomposés en efforts horizontaux H_n et H_{n+1} et en efforts verticaux V_n et V_{n+1} .

- La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB (Résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle.

a. Dans la **méthode de FELLENIUS** (1936), appelée aussi méthode suédoise, on considère que :

- La ligne de glissement est de forme circulaire
- On néglige totalement les efforts inter-tranches
- La seule force agissant sur l'arc AB est le poids W .

Par rapport au centre O , on peut définir :

- Le moment moteur comme celui du poids des terrains W tendant à provoquer le glissement.
- Le moment résistant maximal fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de R_n .

D'après la loi de Coulomb :

$$R_n = C_n \cdot AB + N_n \cdot \tan \Phi_n$$

Par ailleurs : $N_n = W_n \cos \alpha_n$

Donc : $R_n = C_n \cdot AB + W_n \cos \alpha_n \tan \Phi_n$

D'autre part : $AB = l_n = b_n / \cos \alpha_n$

La somme des moments résistants maximaux s'écrit donc :

$$\sum_1^m R_n \cdot \left(c_i \cdot \frac{b_n}{\cos \alpha_n} + W_n \cos \alpha_n \tan \Phi_i \right) \quad 02$$

Où : m = nombre total de tranches.

C_i, Φ_i = caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est situé l'arc AB.

- Le moment moteur est dû à T_n et égal à $T_n \cdot R$

Par ailleurs : $T_n = W_n \sin \alpha_n \quad 03$

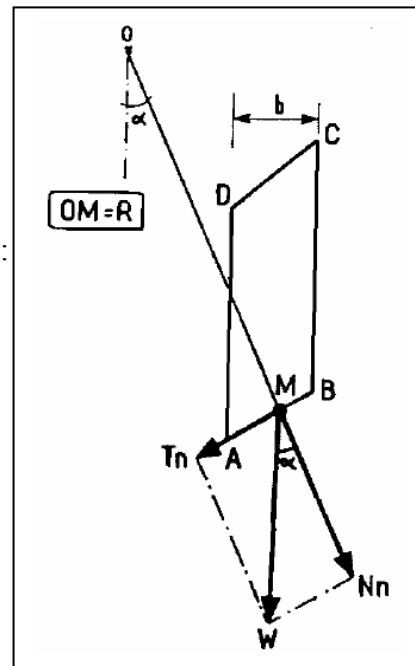


Figure 4.08. Forces agissantes sur une tranche d'après l'hypothèse de FELLENIUS

En remplaçant (02) et (03) dans l'équation (01), on obtient l'expression du facteur de sécurité

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^m \left(c_i \frac{b_n}{\cos \alpha_n} + W_n \cos \alpha_n \tan \phi_i \right)}{\sum_{n=1}^m W_n \sin \alpha_n}$$

Les paramètres intervenant dans le calcul de F_s sont donc :

- b , la largeur des tranches ;
- α , l'angle orienté que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale ;
- la hauteur de la tranche pour le calcul du poids W .

b. Méthode de BISHOP simplifiée (1954) :

Dans cette méthode on considère que :

- La ligne de glissement est toujours de forme circulaire.
- Les efforts verticaux inter-tranches sont nuls ($V_n - V_{n+1} = 0$).

Le facteur de sécurité est donné par la formule suivante :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^m (c_i b_i + W_n \operatorname{tg} \phi_i)}{m_\alpha \sum_{n=1}^m W_n \sin \alpha_n}$$

$$\text{avec } m_\alpha = \cos \alpha_i \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i}{F_s} \right]$$

Pour déterminer F_s il faut procéder par itérations successives. La première itération est faite en adoptant, comme valeur F_{s0} le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius.

La méthode de Fellenius donne des résultats pessimistes par rapport à la méthode de Bishop. Les écarts sur F_s peuvent atteindre 10 %. La méthode de Fellenius a l'avantage de simplicité et donc peut être utilisée dans tous les cas courants.

4.3.3. Principaux facteurs influençant la stabilité des talus :

L'angle de pente maximal que peut admettre un talus dépend d'un certain nombre de facteurs dont les principaux sont :

- La hauteur du gradin
- La nature des terrains
- L'eau souterraine
- La méthode et les phases d'exploitation
- Les facteurs d'ordre géométrique (concavité ou convexité du bord du talus)

a. La hauteur du gradin :

La hauteur du gradin influence considérablement sur la valeur du coefficient de sécurité et donc sur la stabilité des talus. Plus la hauteur du gradin est grande, plus son angle de pente sera faible.

b. La nature des terrains :

La nature des terrains est un paramètre très important dont il faut tenir compte dans une étude de stabilité. Il s'agit principalement d'étudier la structure du massif et des caractéristiques physiques et mécaniques du terrain.

En ce qui concerne la structure du massif, l'étude des discontinuités du massif (fractures, plans de stratification, failles, fissuration) a une influence primordiale sur le calcul du coefficient de sécurité.

En ce qui concerne les caractéristiques physiques et mécaniques, le paramètre physique pris en compte lors du calcul de la stabilité des talus est le poids volumique des terrains en place. Les caractéristiques mécaniques du terrain les plus importantes sont sa résistance au cisaillement qui nous permet de mesurer les caractéristiques de cisaillement (cohésion et angle de frottement interne).

c. L'eau souterraine :

L'eau joue un rôle très important dans la stabilité des talus. D'une manière générale, la présence d'eau dans un terrain abaisse le coefficient de sécurité.

d. Les phases et les méthodes d'exploitation :

La modification de l'état des contraintes dans un sol suite aux travaux d'exploitation peut entraîner une diminution de la résistance au cisaillement qui peut conduire à des ruptures. Les calculs de stabilité des gradins doivent aussi tenir compte des surcharges ponctuelles dues aux engins d'exploitation.

e. La géométrie :

La concavité ou la convexité des bords de talus a une influence sur la valeur réelle du coefficient de sécurité. Dans le cas où le bord de fosse est concave, la valeur de F_s est sous-estimée. Dans le cas contraire (bord convexe), elle est surestimée par rapport à la réalité.

4.3.4. Stabilisation des talus rocheux :

Pour augmenter la stabilité des talus, on utilise différentes techniques, parmi lesquelles, on citera :

- **L'aplatissement du talus :** cette technique consiste à diminuer le poids du sol qui a tendance à glisser (Figure 4.09).

- **Le drainage** : les pressions peuvent être responsables de la diminution de F_s , le drainage peut dans ce cas être utilisé, surtout si la perméabilité des discontinuités est suffisante. Les drains peuvent être mis en place à partir du talus ou à partir d'une galerie de drainage (Figure 4.10).
- **Le boulonnage** : cette technique a pour objet de retenir en place des blocs rocheux. L'influence de celle-ci ne s'étend que sur quelques mètres (Figure 4.11).
- **Les ancrages** : ces techniques peuvent retenir des sols beaucoup plus importants, vue la profondeur du scellement et les efforts qui peuvent être mobilisés (Figure 4.12).
- **L'injection** : elle consiste à augmenter les caractéristiques de cisaillement par introduction dans les joints d'un coulis d'injection.

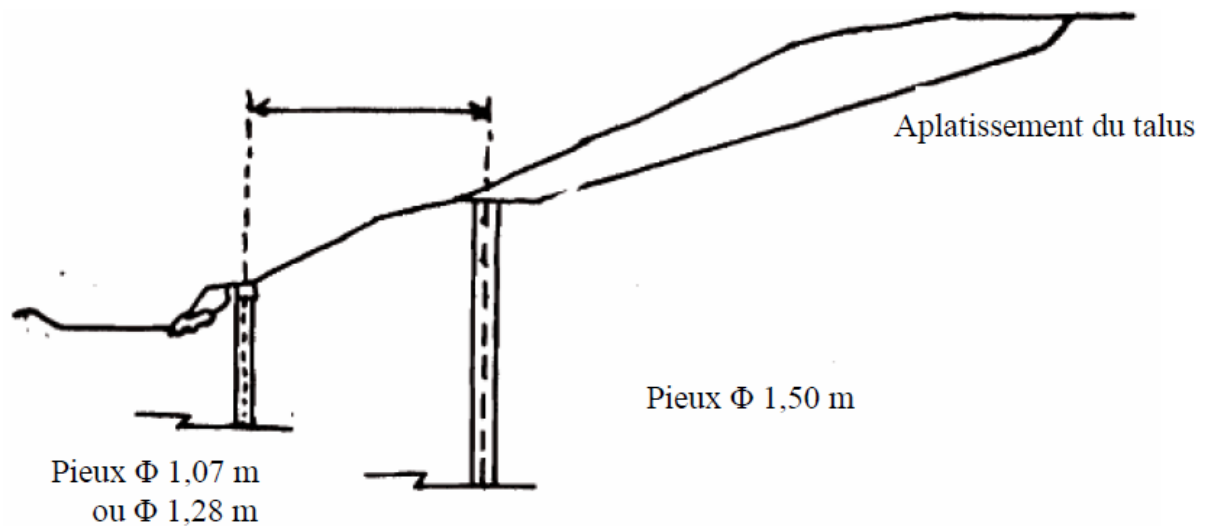


Figure 4.09. Aplatissement d'un talus

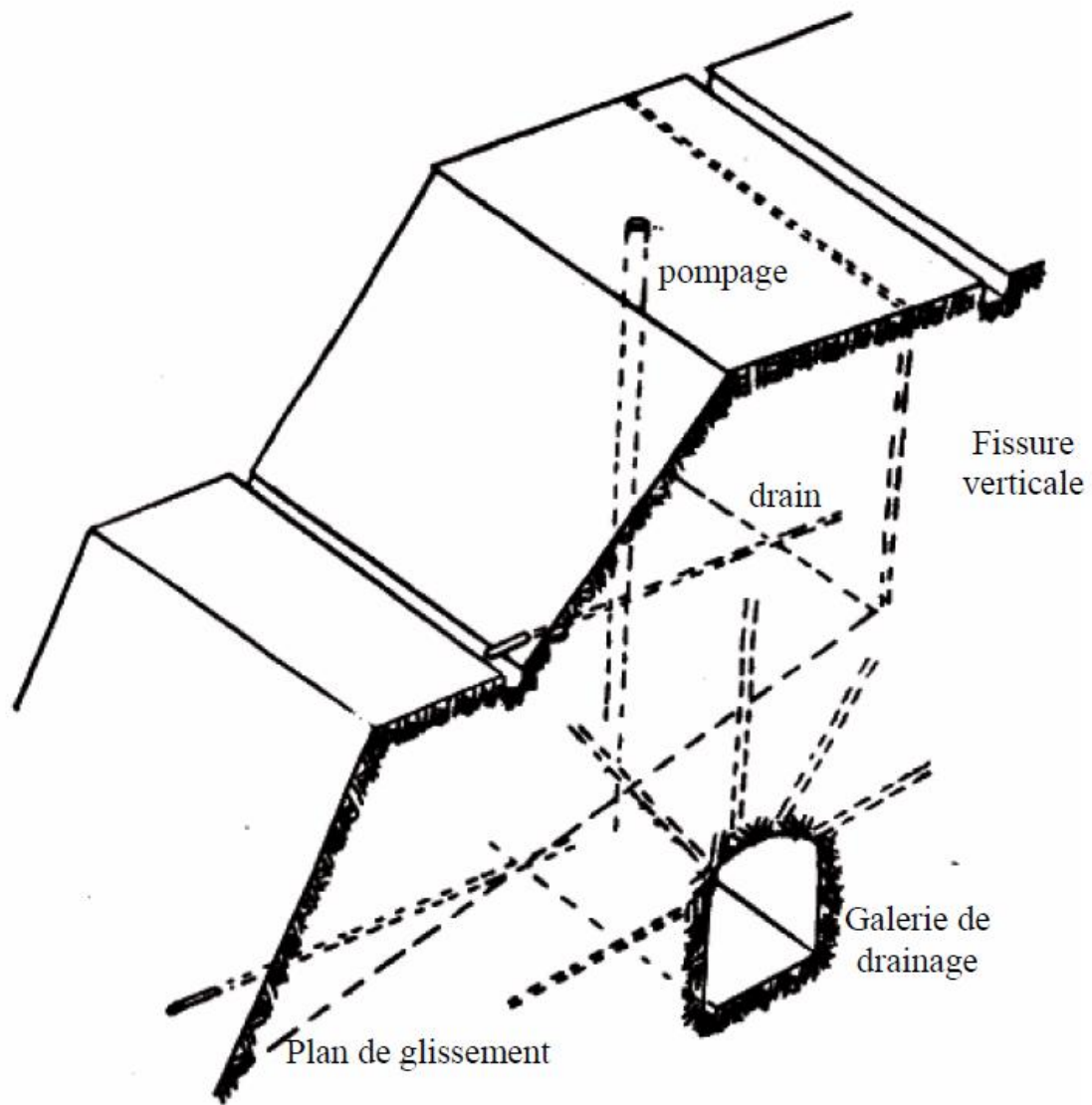


Figure 4.10. Stabilisation des talus par le drainage

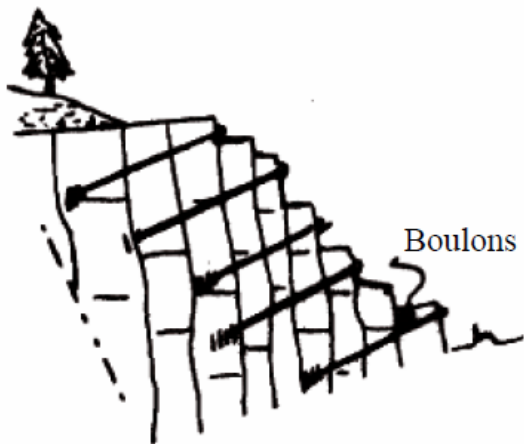


Figure 4.11. Stabilisation des talus ancrages par boulonnage

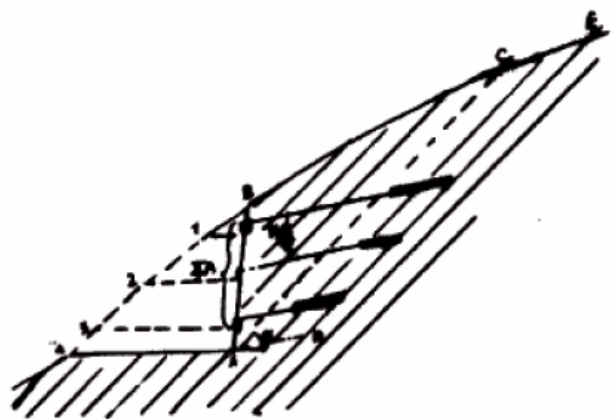


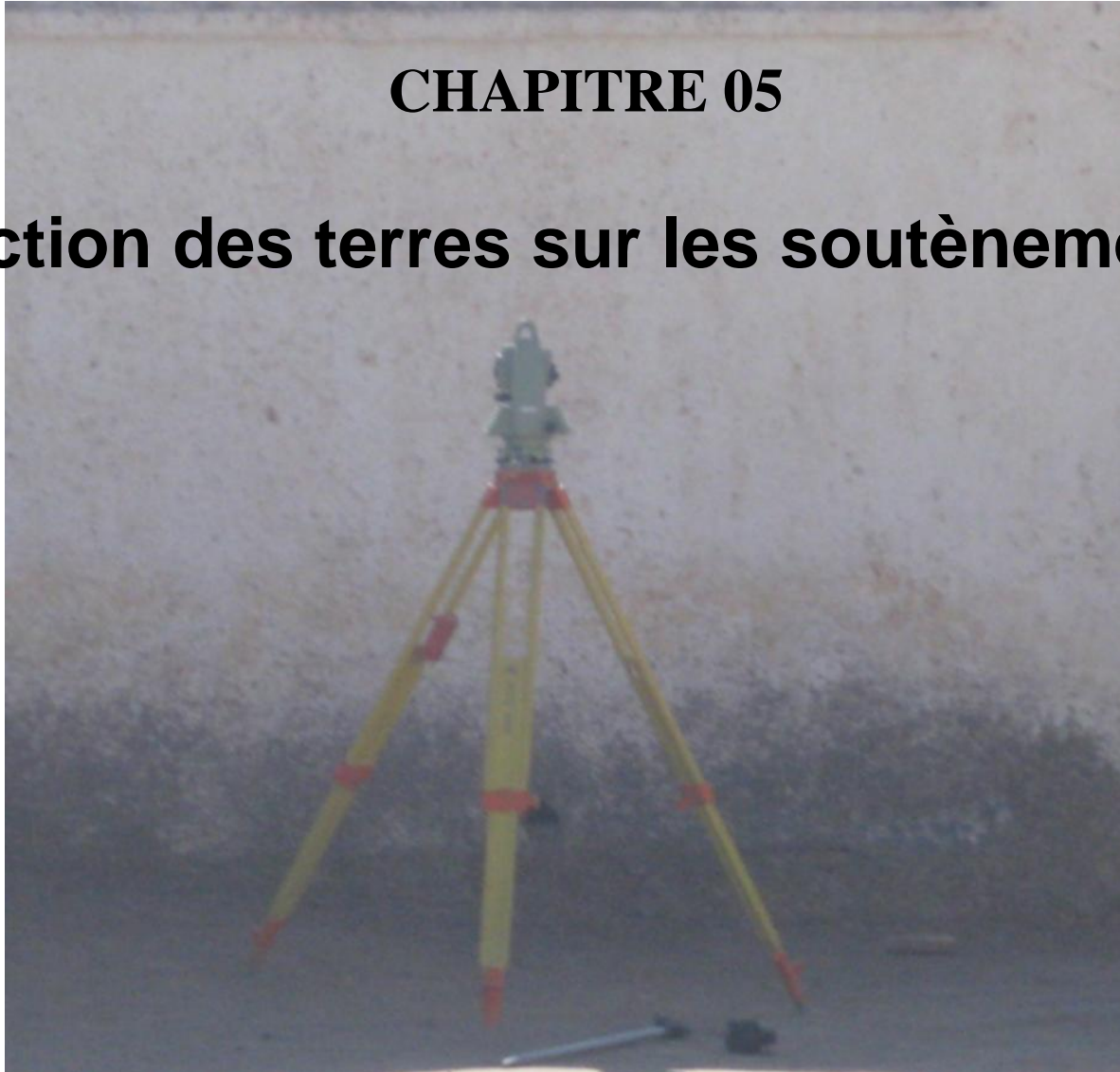
Figure 4.12. Stabilisation des talus par des ancrages

MECANIQUE DES SOLS

2^{ème} année

CHAPITRE 05

Action des terres sur les soutènements



1) Introduction

Fonction d'un mur de soutènement

Un mur de soutènement est chargé de retenir des terres meubles qui ne tiennent pas en place pour une pente donnée.

On a donc apparition de deux niveaux distincts de part et d'autre du mur.

On parle aussi de mur de retenue.

Les équilibres limites (E.L.) permettent de déterminer les efforts qui agissent sur des écrans réels ou fictifs.

Le calcul des soutènements est donc une application directe de ces théories,

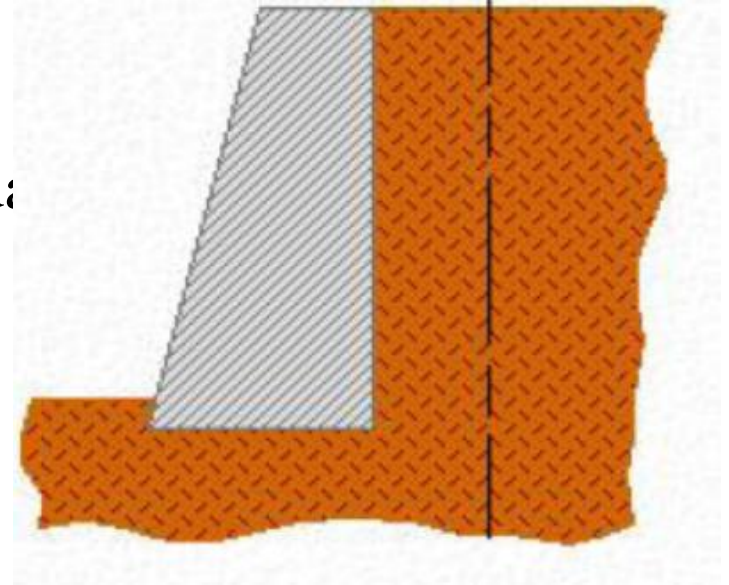






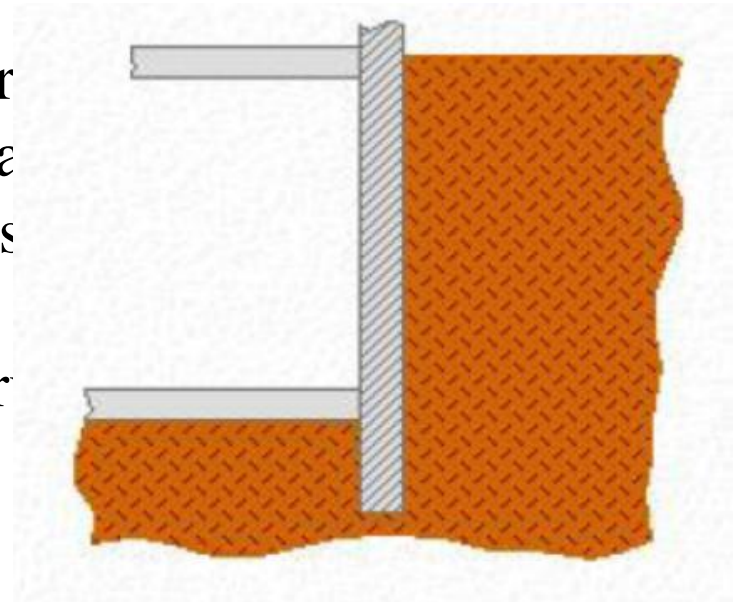
Deux grands types de mur de retenue

Murs libres : Ce sont des murs indépendants

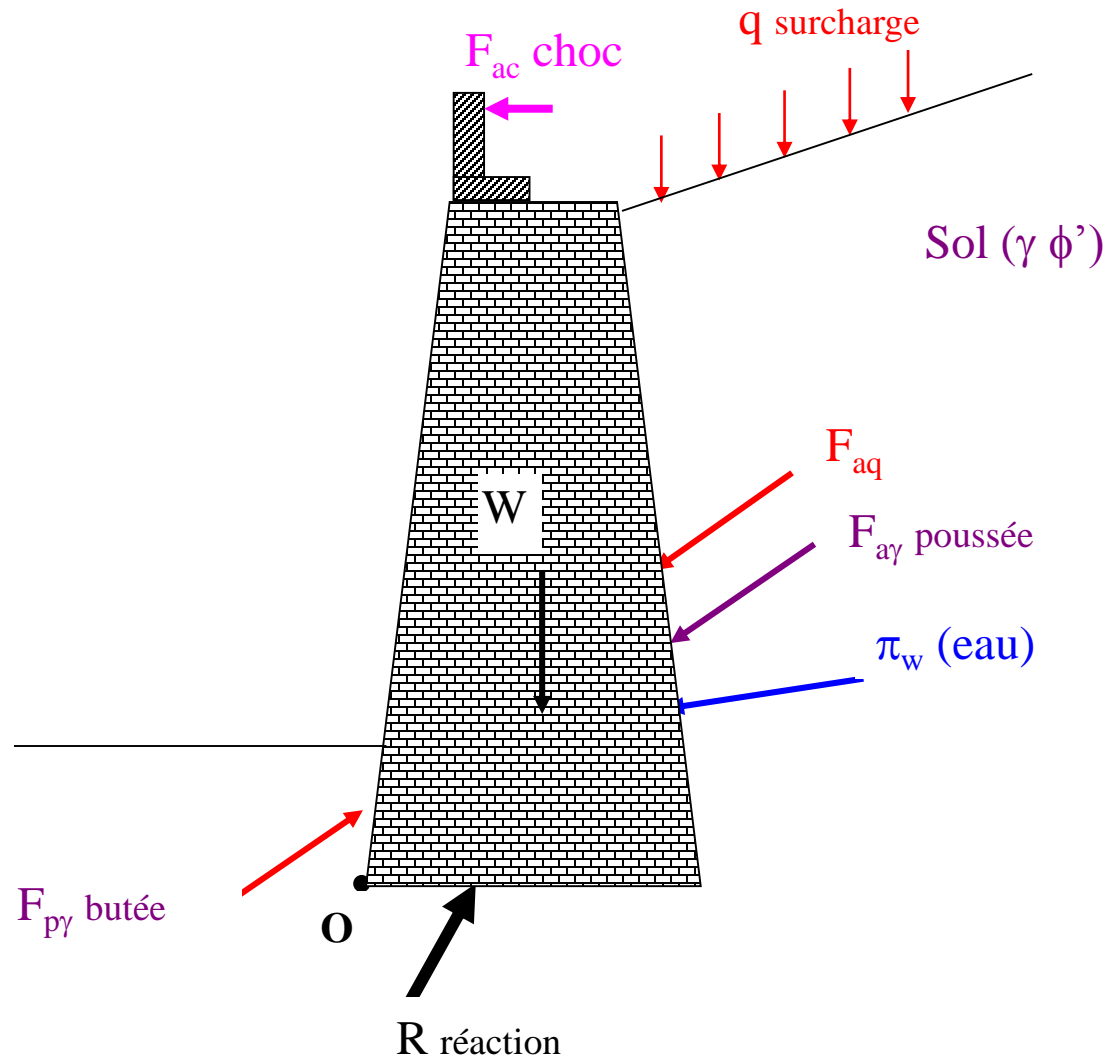


Murs encastrés : Encastrés dans la terre font partie d'une structure plus importante. Utilisés pour les fondations de maisons exemple.

Nécessitent un soutien durant la construction.



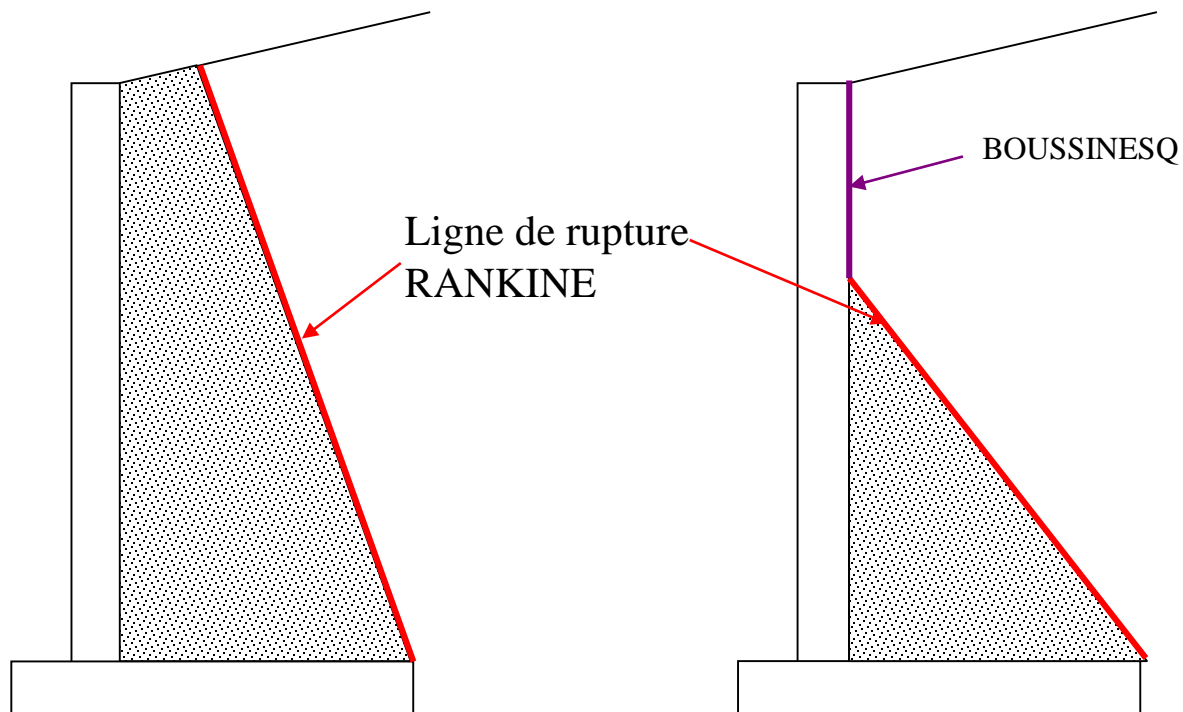
2) Actions sur un mur poids



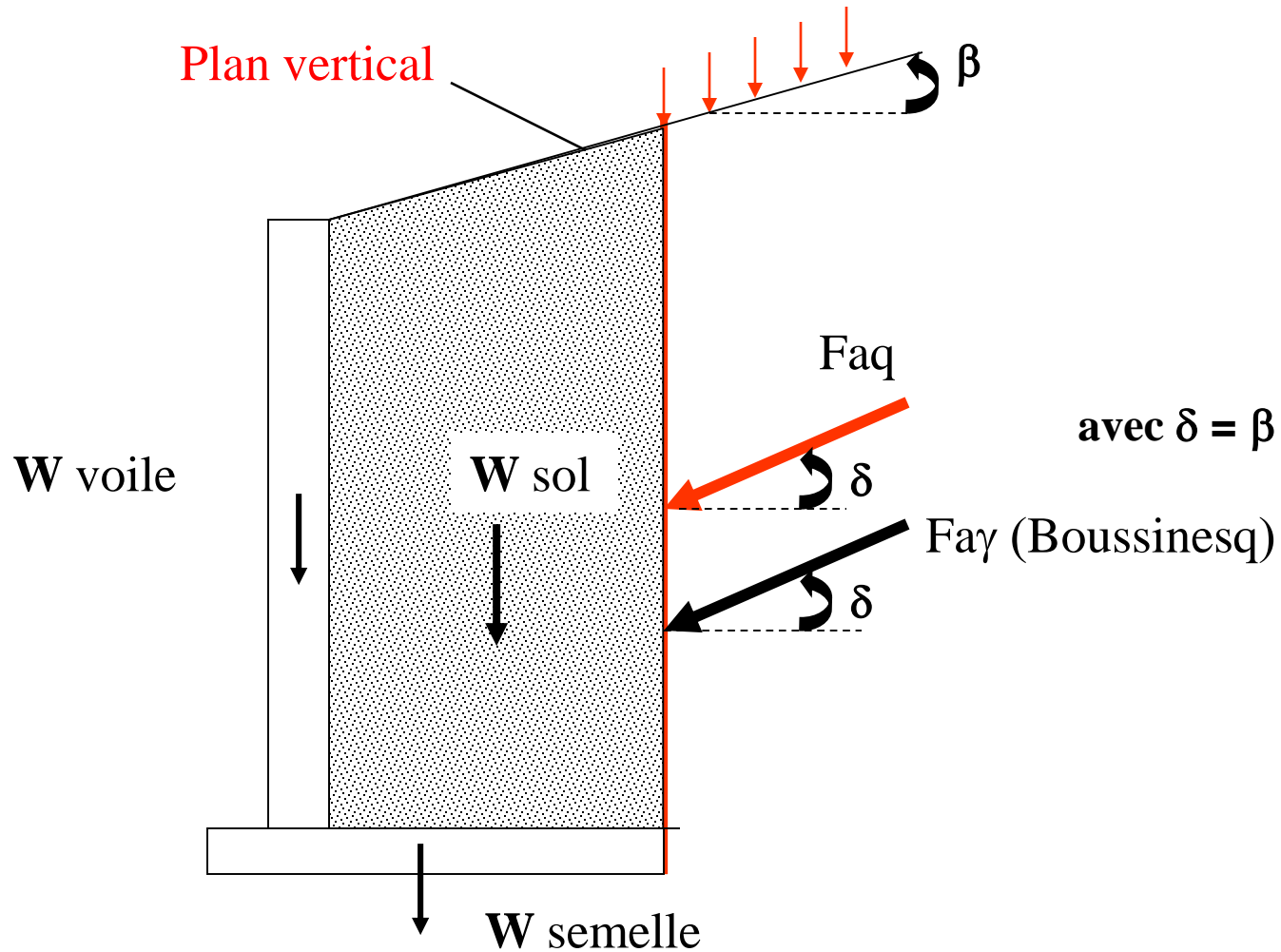
3) Actions sur un mur voile

Une partie du remblai reste solidaire du mur dans son déplacement

Ce prisme de sol est en équilibre pseudo élastique.



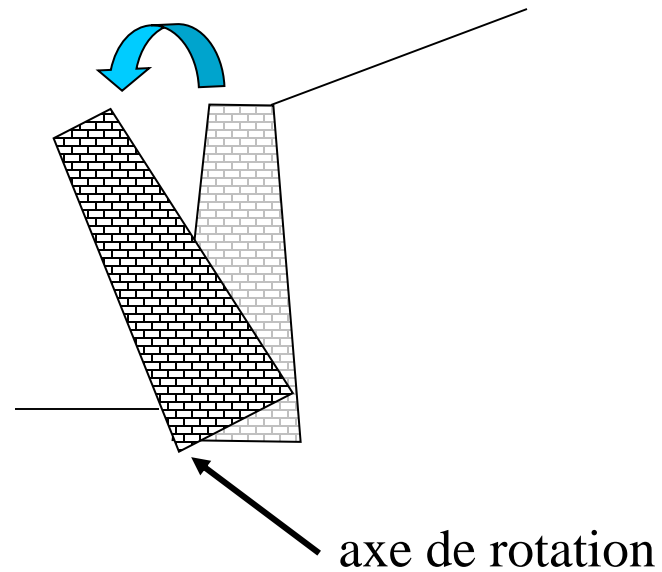
Ces schémas de calcul sont compliqués et on leur préfère un schéma simplifié.



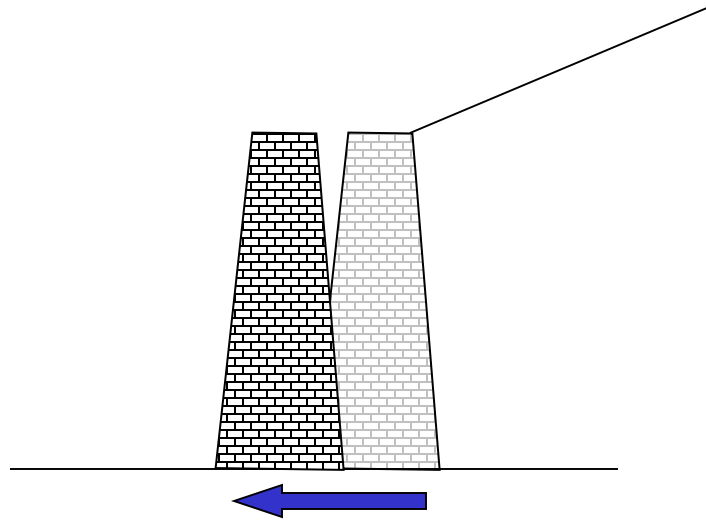
4) Mécanismes de ruine et d'instabilité

4.1) Stabilité externe de l'ouvrage

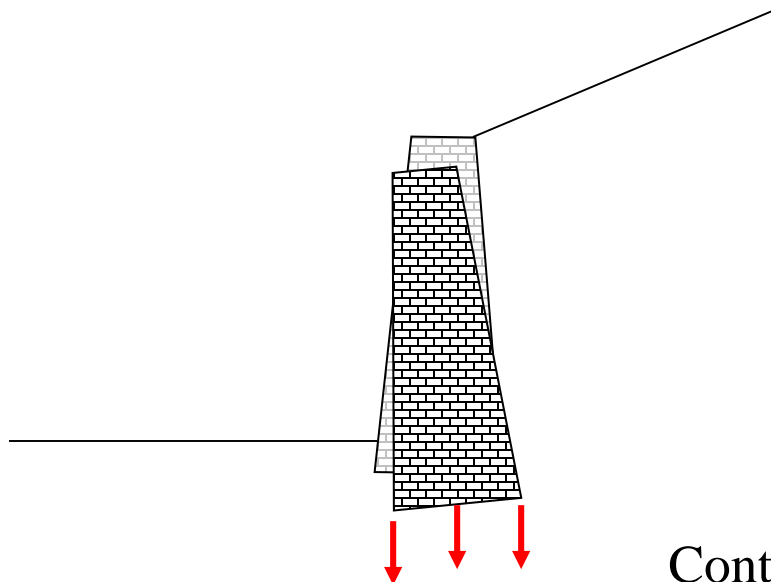
a) renversement



b) Glissement

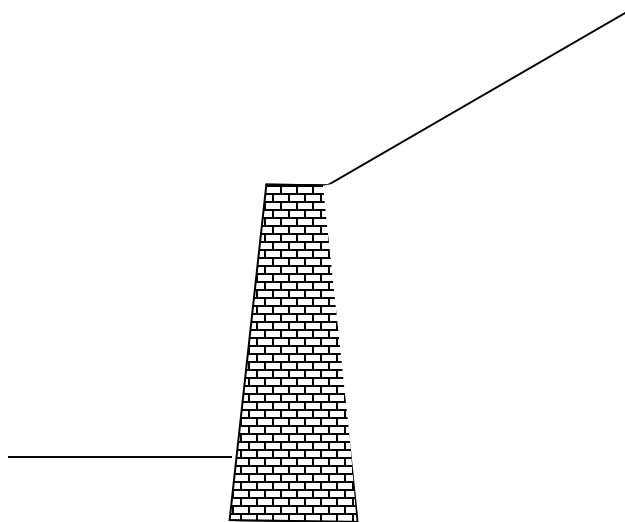


c) Portance

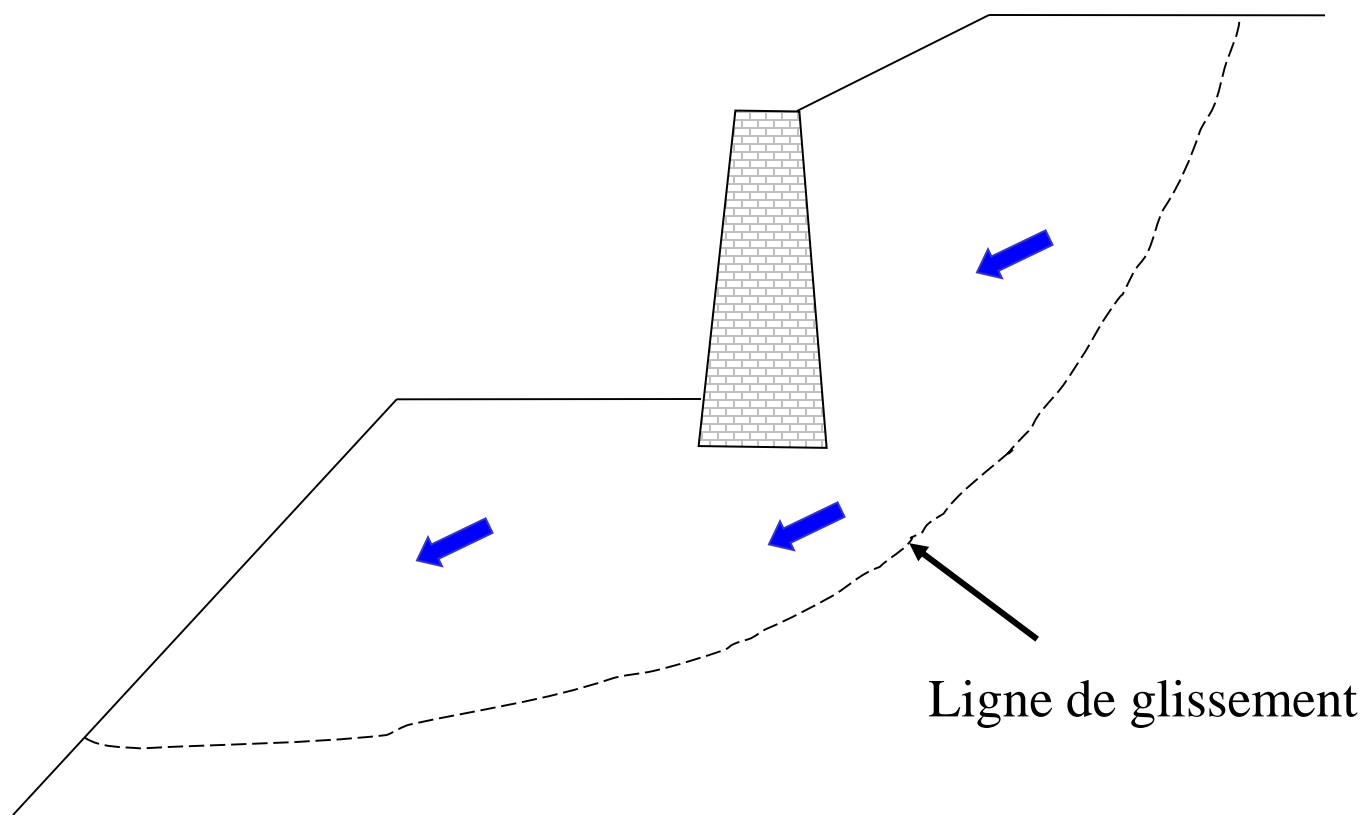


Contraintes trop
élevées conduisant à
la rupture du sol

4.2) Résistance interne de l'ouvrage



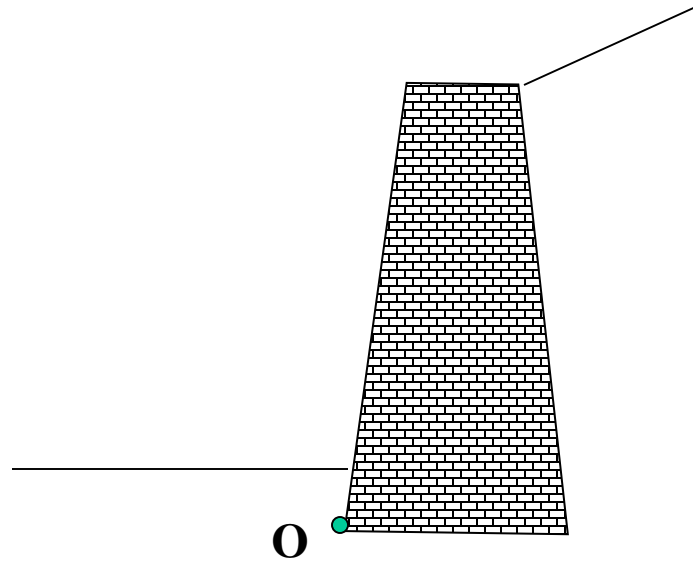
4.3) Stabilité d'ensemble



5) La stabilité externe

5.1) Stabilité au renversement

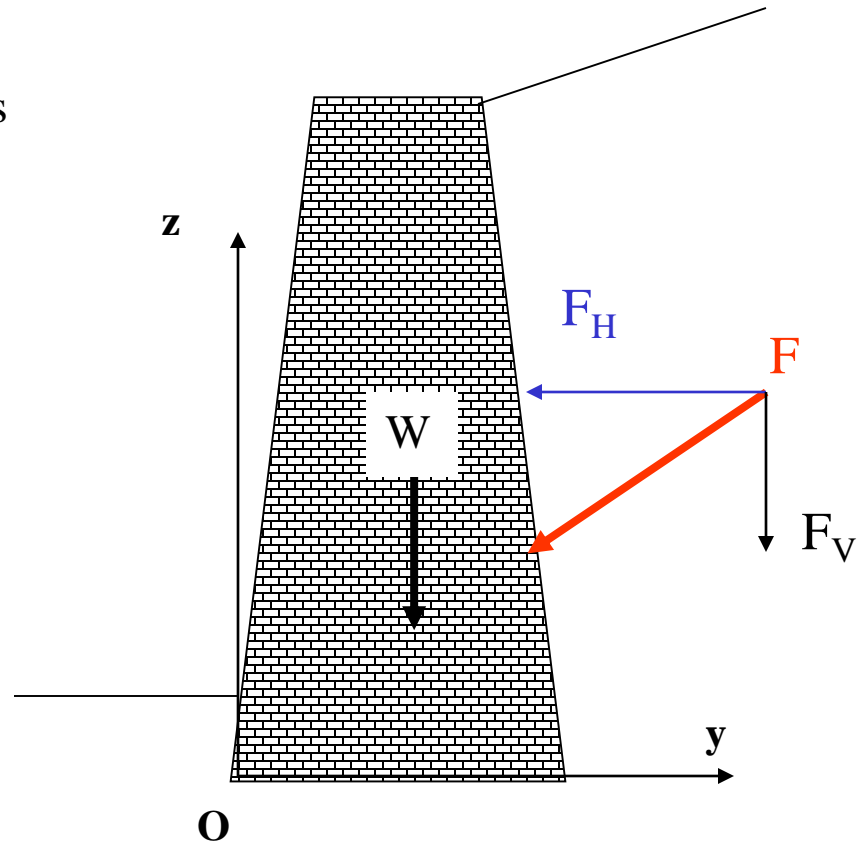
On fait l'hypothèse d'une rotation possible par rapport au point O.



Les forces agissant sur le mur sont décomposées en leurs composantes verticales et horizontales

F_H est renversante

F_V et W sont stabilisantes



La force de butée n'est pas prise en compte pour des raisons de sécurité.

Coefficient de sécurité au renversement:

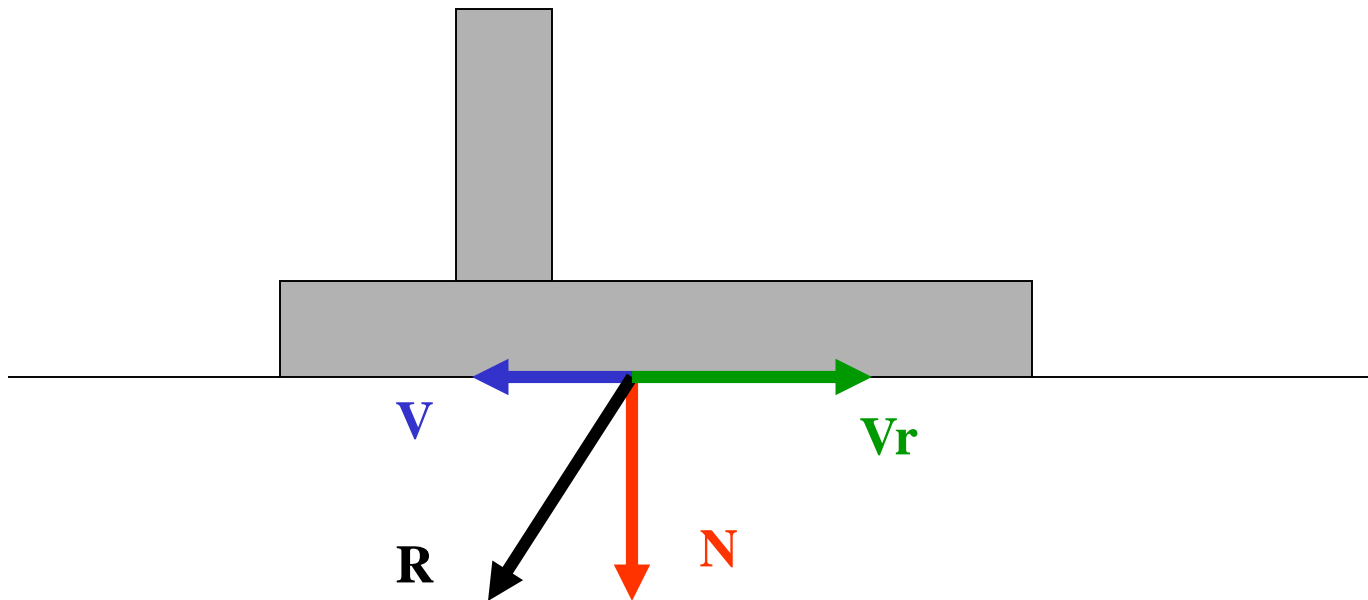
$$F_R = \frac{\text{Moment des forces stabilisantes/O}}{\text{Moment des forces renversantes/O}}$$

La stabilité est assurée si $F_R > 1,5$

Dans cette approche les forces ne sont pas pondérées (ELS).

5.2) Stabilité au glissement

Dans le plan de la fondation la composante horizontale V de la résultante des forces R doit être équilibrée par le frottement mobilisé par le sol V_r .



Coefficient de sécurité au glissement:

$$F_G = \frac{V_r}{V}$$

La stabilité est assurée si $F_G > 1,5$

Résistance au cisaillement à long terme

$$V_r = N.tg\phi' + c'.B'$$

Résistance au cisaillement à court terme

$$V_r = c_u.B'$$

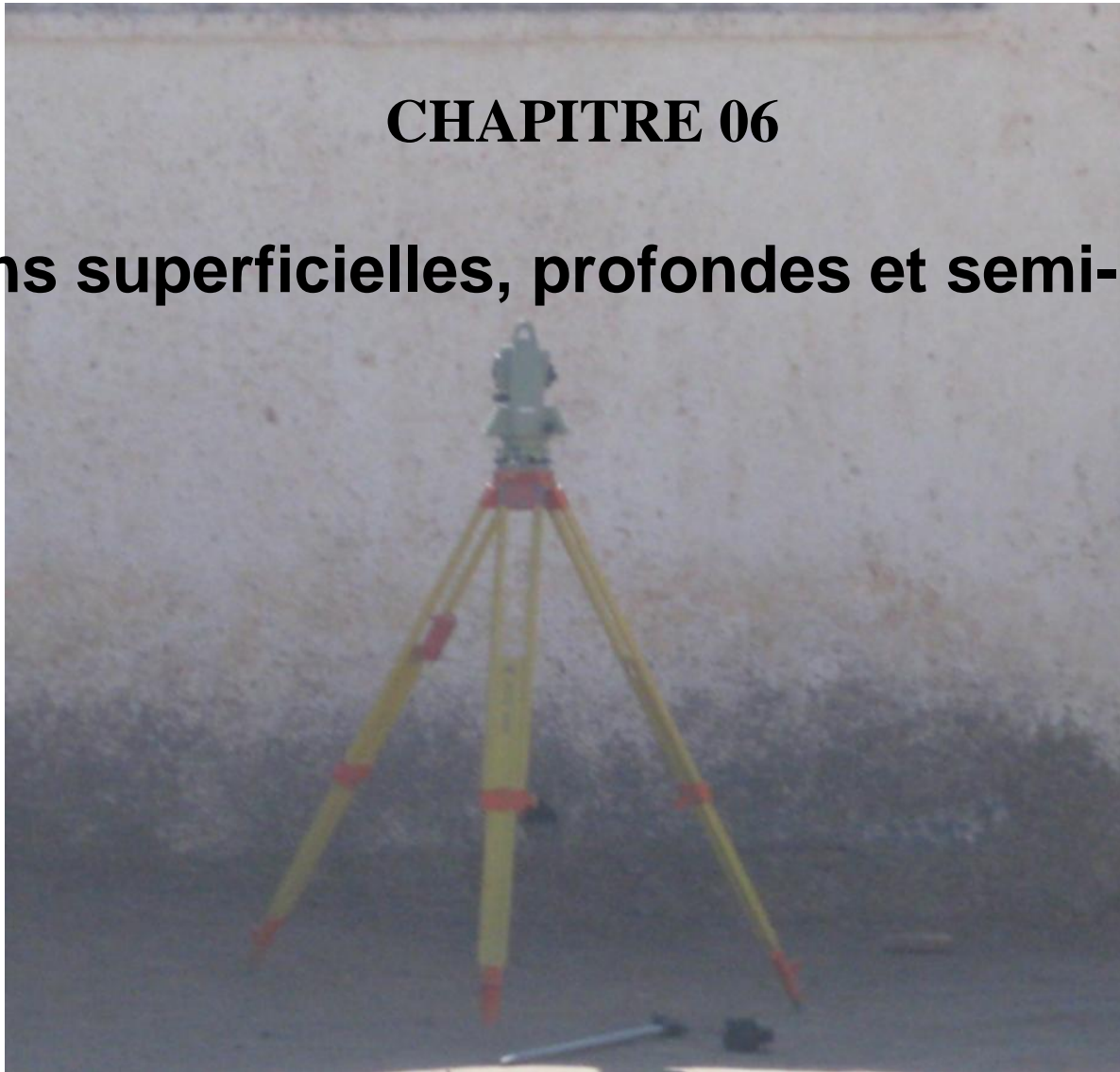
avec B' : surface comprimée de la semelle

MECANIQUE DES SOLS

2^{ème} année

CHAPITRE 06

Fondations superficielles, profondes et semi-profondes



1- Les fondations

1-Définitions :

On appelle fondation, la base de l'ouvrage qui se trouve en contact direct avec le terrain d'assise et qui a pour rôle de transmettre à celui-ci toutes les charges et les surcharges supportées par la construction.

La technique des fondations concerne donc simultanément deux problèmes à savoir; L'évaluation de la capacité portante du sol et le calcul de l'élément intermédiaire qui lui transmet les charges.

2- Fonctions assurées par les fondations

Les fondations doivent assurées deux fonctions essentielles :

- * Reprendre les charges et les surcharges supportées par la structure.
- * Transmettre ces charges et surcharges au sol dans de bonnes conditions, de façon à assurer la stabilité de l'ouvrage.

2.1- Équilibre des fondations

Les fondations doivent être en équilibre sous :

- * Les sollicitations dues à la superstructure;
- * Les sollicitations dues au sol.

2.2- stabilité des ouvrages :

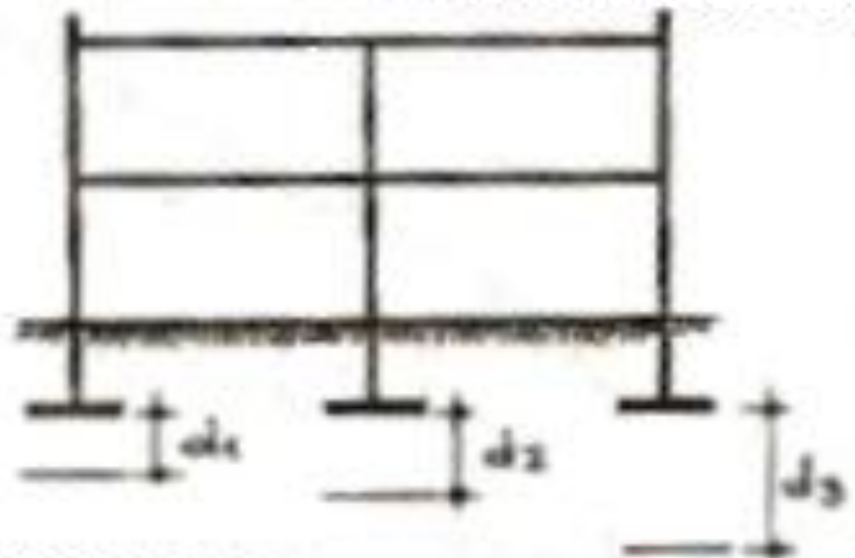
- * Les fondations ont pour rôle d'assurer la stabilité de l'ouvrage en fonction des forces transmises par la superstructure et par le terrain.
- * Les conditions de stabilité doivent conduire à respecter le principe fondamental de l'égalité des actions transmises par la superstructure avec les réactions transmises par le sol.

* Le terrain d'assise ne doit pas tasser sous les massifs de fondation. Dans la pratique, les tassements de l'ordre de 5mm à 25 mm ne présentent aucun danger s'ils sont uniformément reparties sous la construction. Ces types de tassement sont dits "**uniformes ou instantanés**" (fig. 1).

* Lorsque les tassements ne sont pas uniformément repartis sous l'ouvrage, ils sont dits "**différentiels**" (fig. 2).



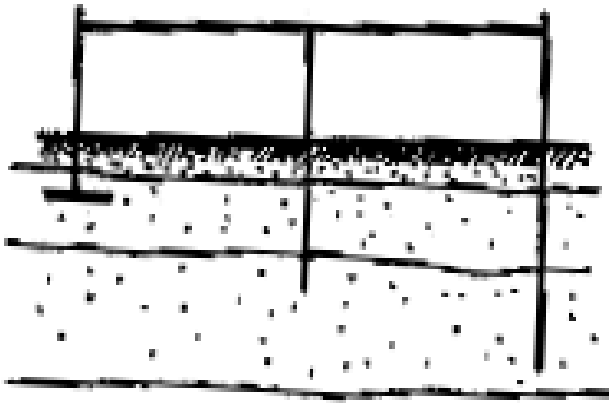
(fig. 1)



(fig. 2)

Ces tassements peuvent faire apparaître des fissures dans les murs et les dalles et provoquent des ruptures de canalisation. En général les tassements différentiels apparaissent dans les cas suivants :

- * lorsque les fondations sont de nature différentes sous un même ouvrage (profondes et superficielles) (fig. 3);
- * Lorsque elles s'appuient sur des couches de terrains situées à des profondeurs très différentes (fig. 4).



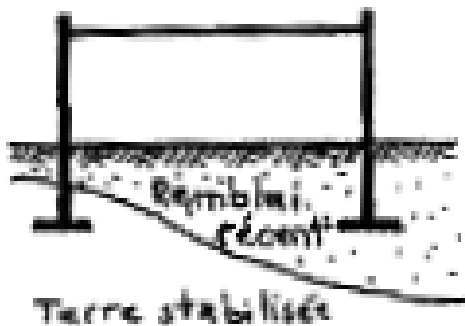
(fig. 3)



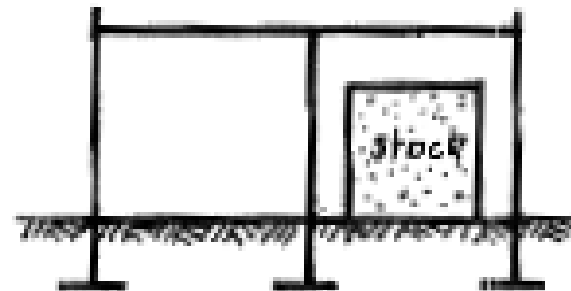
(fig. 4)

- * Lorsque l'ouvrage repose sur des sols de nature très différentes "terre stabilisée et remblai récent " (fig. 5)
- * Lorsque l'ouvrage est chargé dissymétriquement, soit par sa superstructure, soit par des stocks (fig. 6)
- * Lorsque deux bâtiments mitoyens sont construits à des époques différentes.

Pour éviter ces phénomènes, on doit adapter les fondations à la nature du sol et au type de l'ouvrage à supporter (joint de rupture, articulations, dimensions etc.).



(fig. 5)



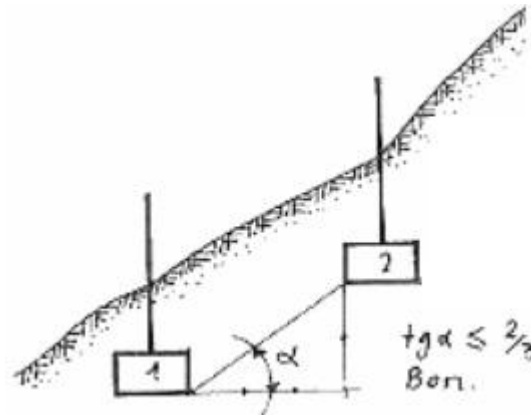
(fig. 6)

L'ouvrage ne doit pas se déplacer sous l'action des forces horizontales ou obliques appliquée à la superstructure (vent, poussée de l'eau, séisme, etc.). Les fondations doivent être conçus de façon à éviter :

- * Toute translation de la superstructure par rapport aux fondations et des fondations par rapport au sol.
- * Pour les constructions réalisées sur des terrains inclinés, les actions exercées par les fondations sur le terrain doivent s'opposer au glissement éventuel de l'ouvrage suivant la pente (fig7).

fig.7 : fondation sur terrain incliné

- * Pente maximale 2/3 ($\text{tg}\alpha \leq 2/3$).



* Pente maximale 2/3 ($\text{tg}\alpha \leq 2/3$).

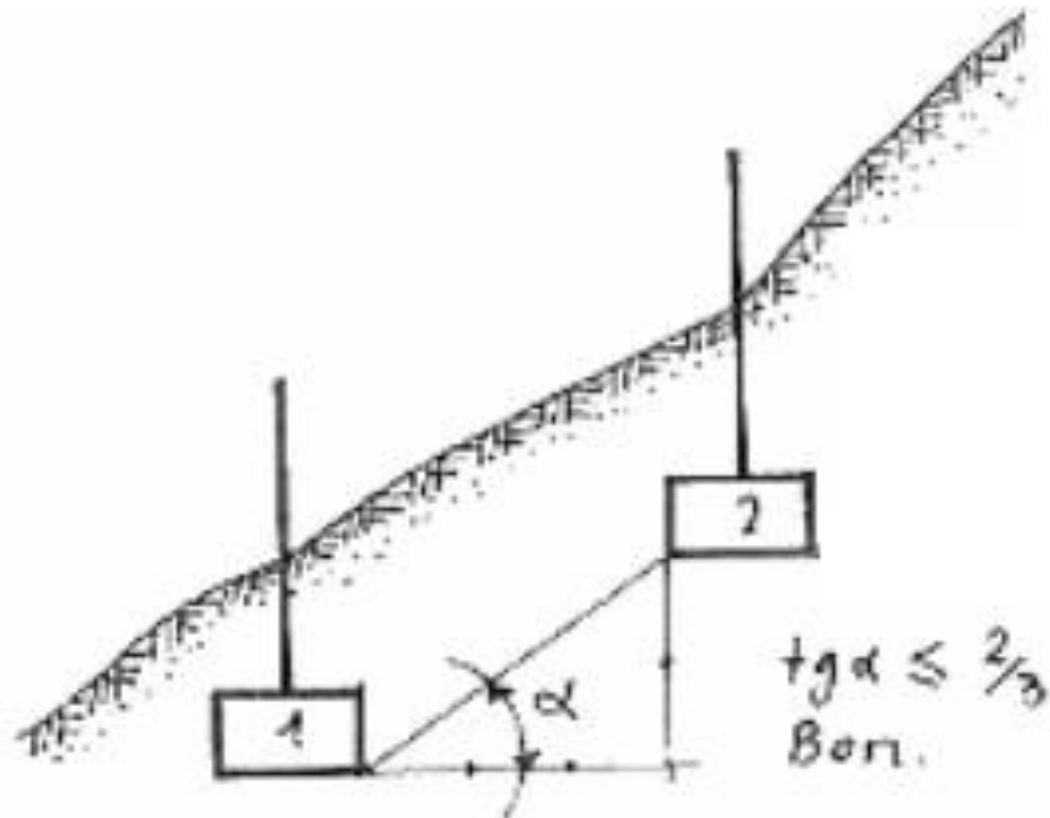


fig.7 : fondation sur terrain incline

4. Types de fondations

- Sous un bâtiment, on peut mettre en place trois principaux types de fondations:
des fondations superficielles
des fondations semi profondes
des fondations profondes.

Le choix de l'une ou l'autre dépend directement du terrain et de la taille de l'ouvrage, il faut respecter autant que possible l'homogénéité des fondations lors d'un projet de bâtiments. Tous les éléments doivent être fondés sur le même système afin de limiter principalement les tassements différentiels.

4.1 - Fondations superficielles :

On appelle "fondation superficielles", toutes les fondations dont *l'encastrement D dans le sol n'excèdent pas deux fois la largeur B de la semelle.*

On distingue trois types de fondations superficielles :

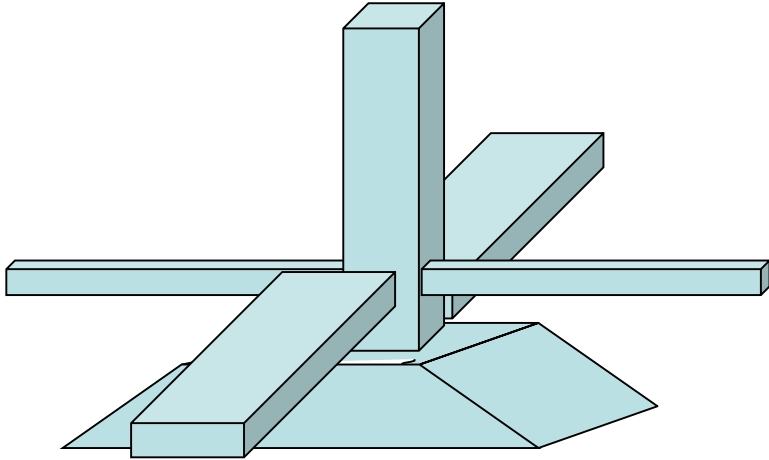
A - Fondations ponctuelles

Il s'agit des semelles isolées sous poteau. Destinées à transmettre au sol des charges concentrées. La forme et les dimensions de telles semelles dépendent :

- * Des charges transmises à la semelle;
- * Du taux de travail admis par le sol;
- * De la section droite des poteaux reposant sur ces semelles.

Généralement, les semelles isolées sont réalisées en béton armé et peuvent supporter des charges assez importantes sur des terrains de résistance à la compression moyenne. Ces semelles peuvent être excentrées.
se présentent sous les formes suivantes :

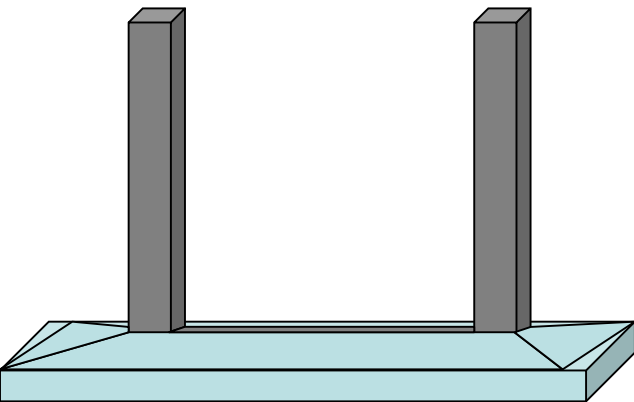
Semelle isolée



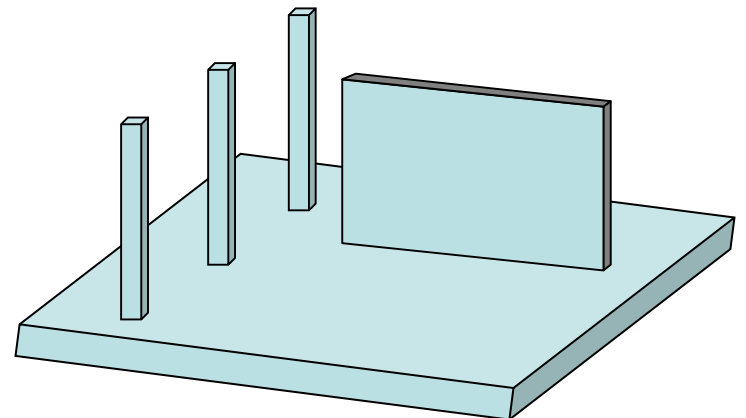
Semelle Filante sous mur



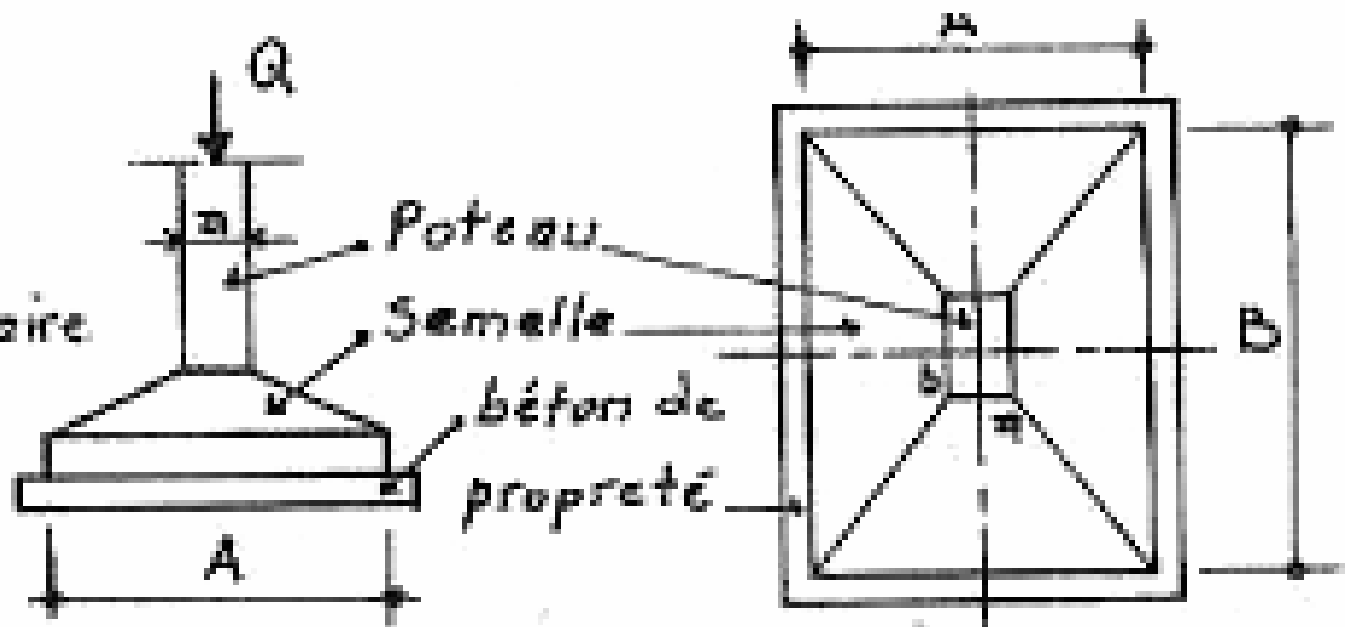
Semelle Filante sous poteaux



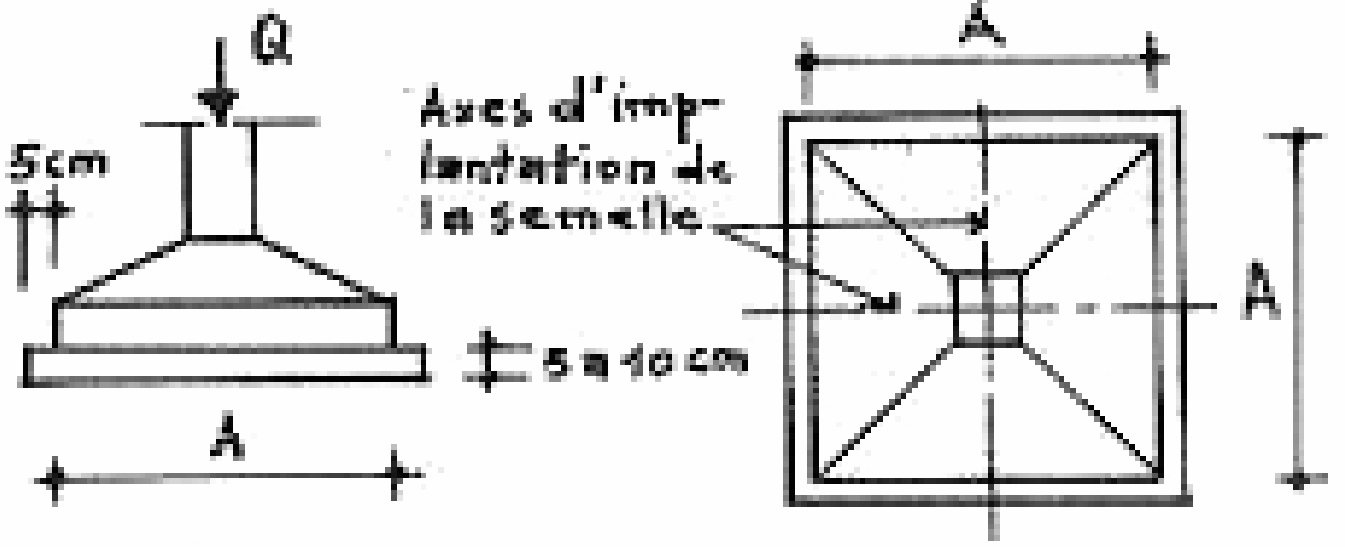
Radier général

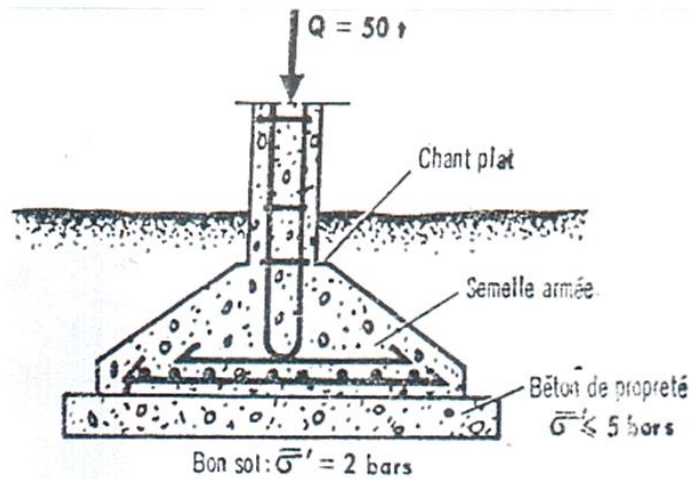


Rectangulaire

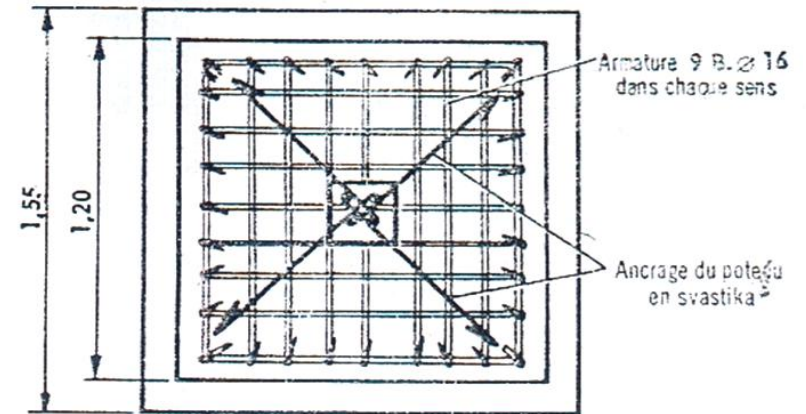


Carreé



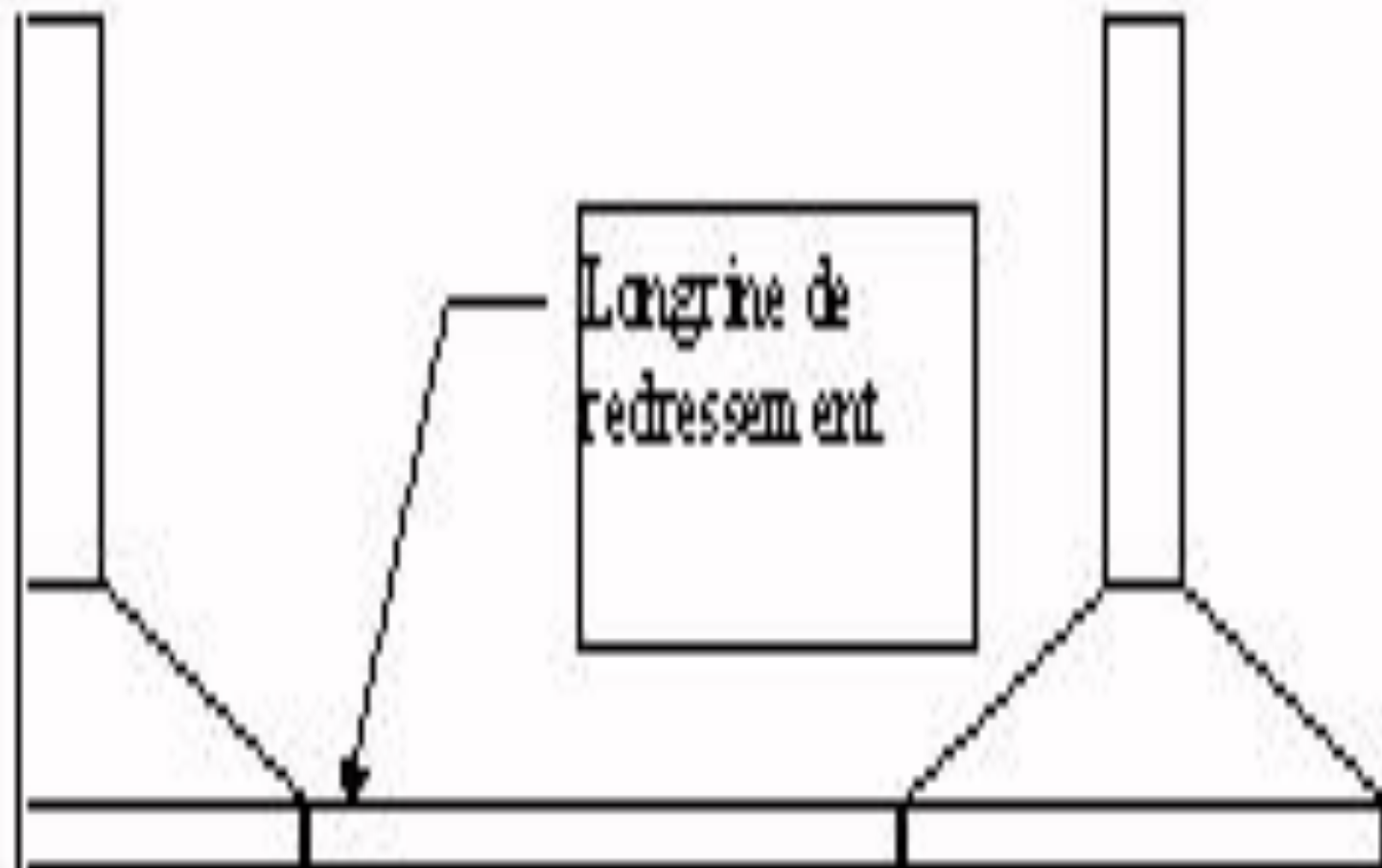


A - COUPE VERTICALE



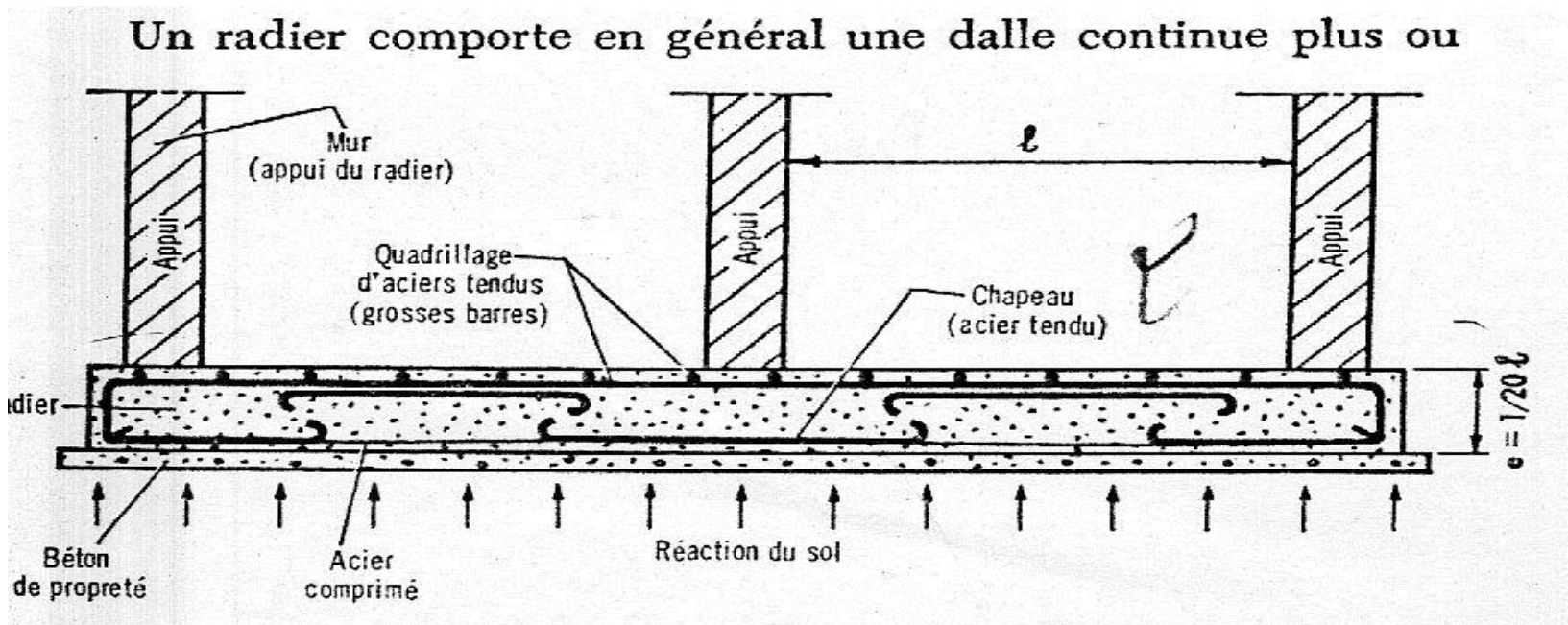
B - VUE EN PLAN

Fig. 3,24. — Exemple de semelle isolée armée.



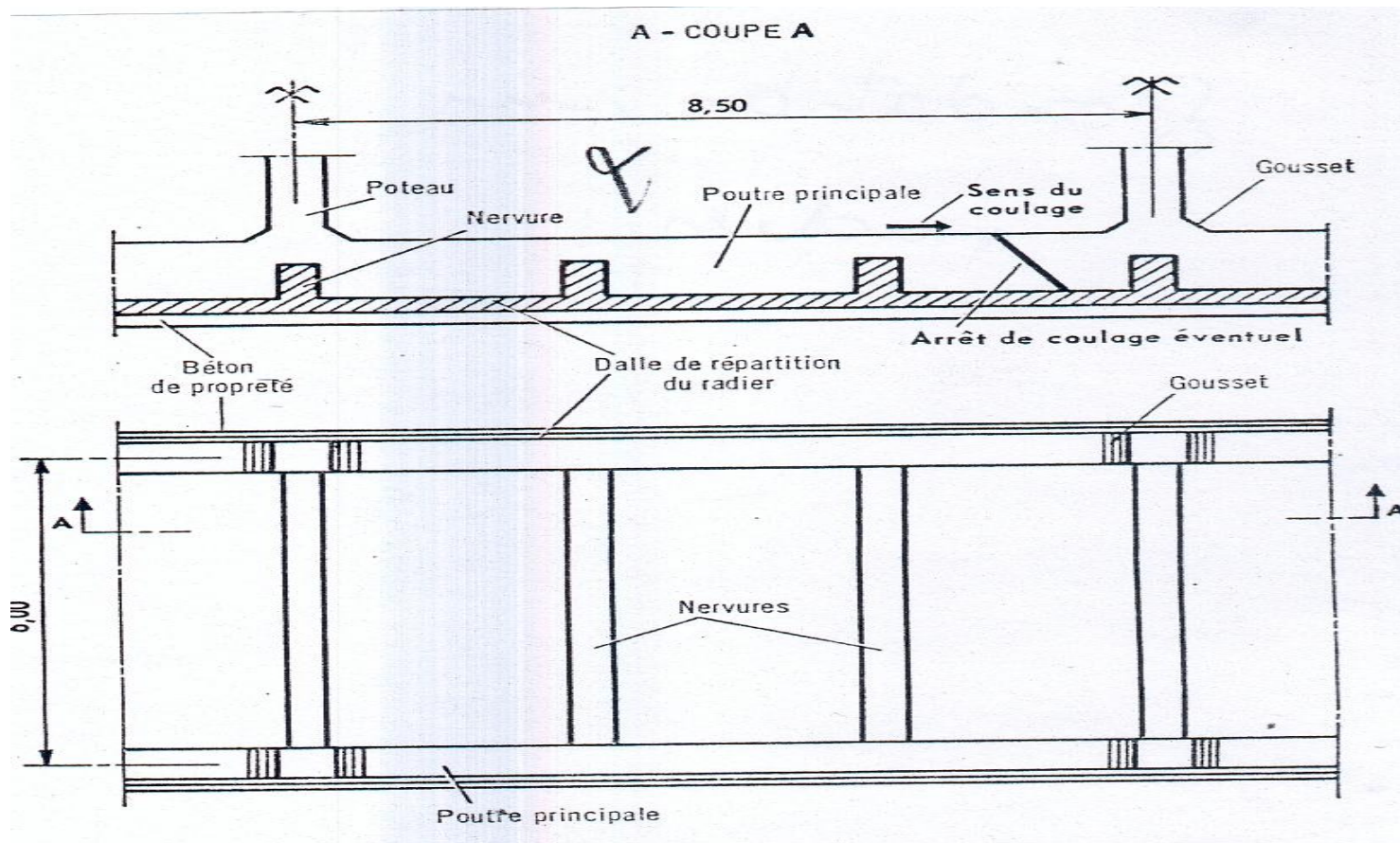
Radiers plats :

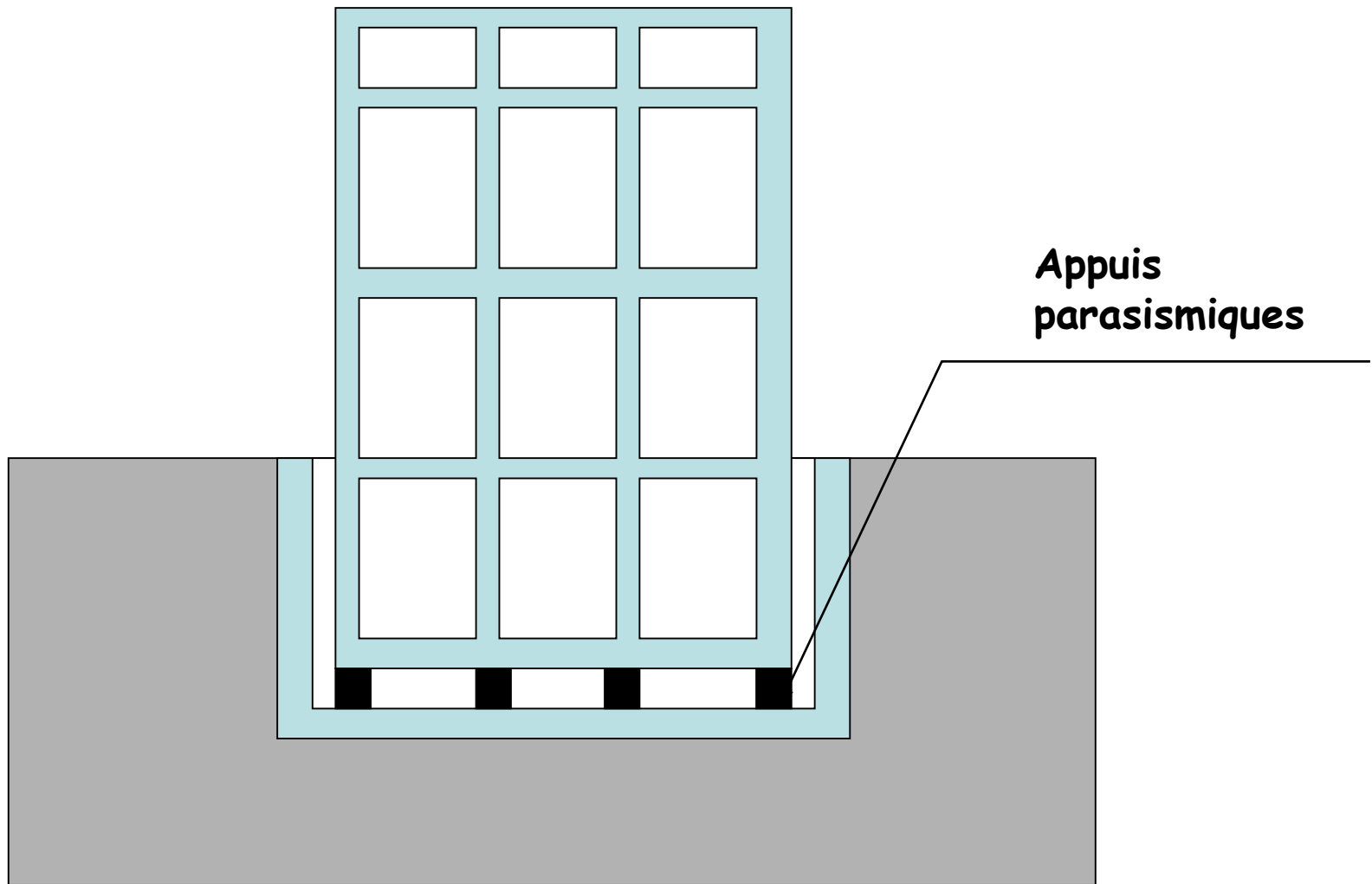
Ce sont des radiers constitués par une simple dalle reposant directement sur le sol et sur laquelle les murs (poteaux) viennent s'appuyer.



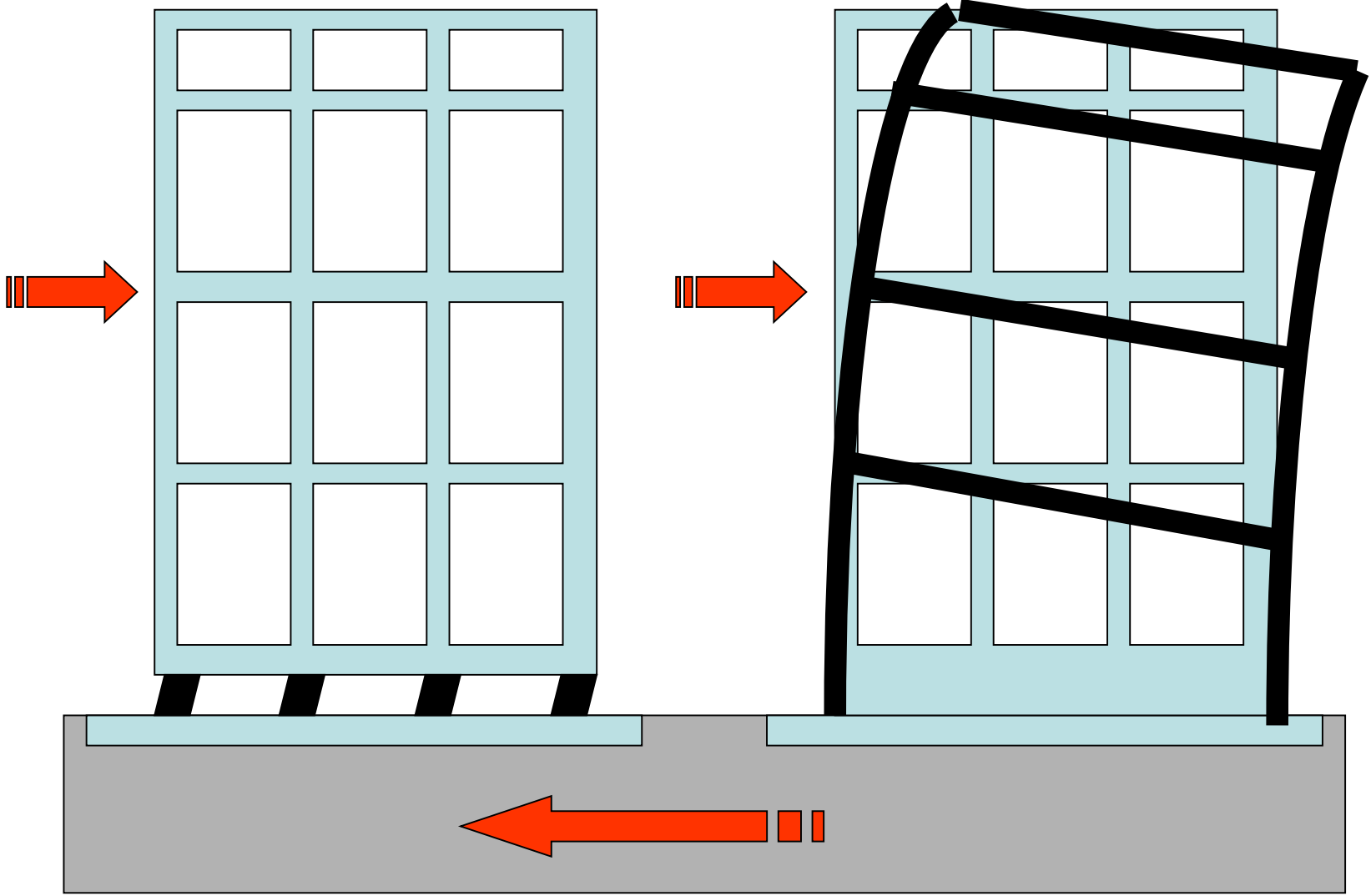
2-Les radiers nervurés

Il sont constitués par un système de dalles, de poutres et de solives





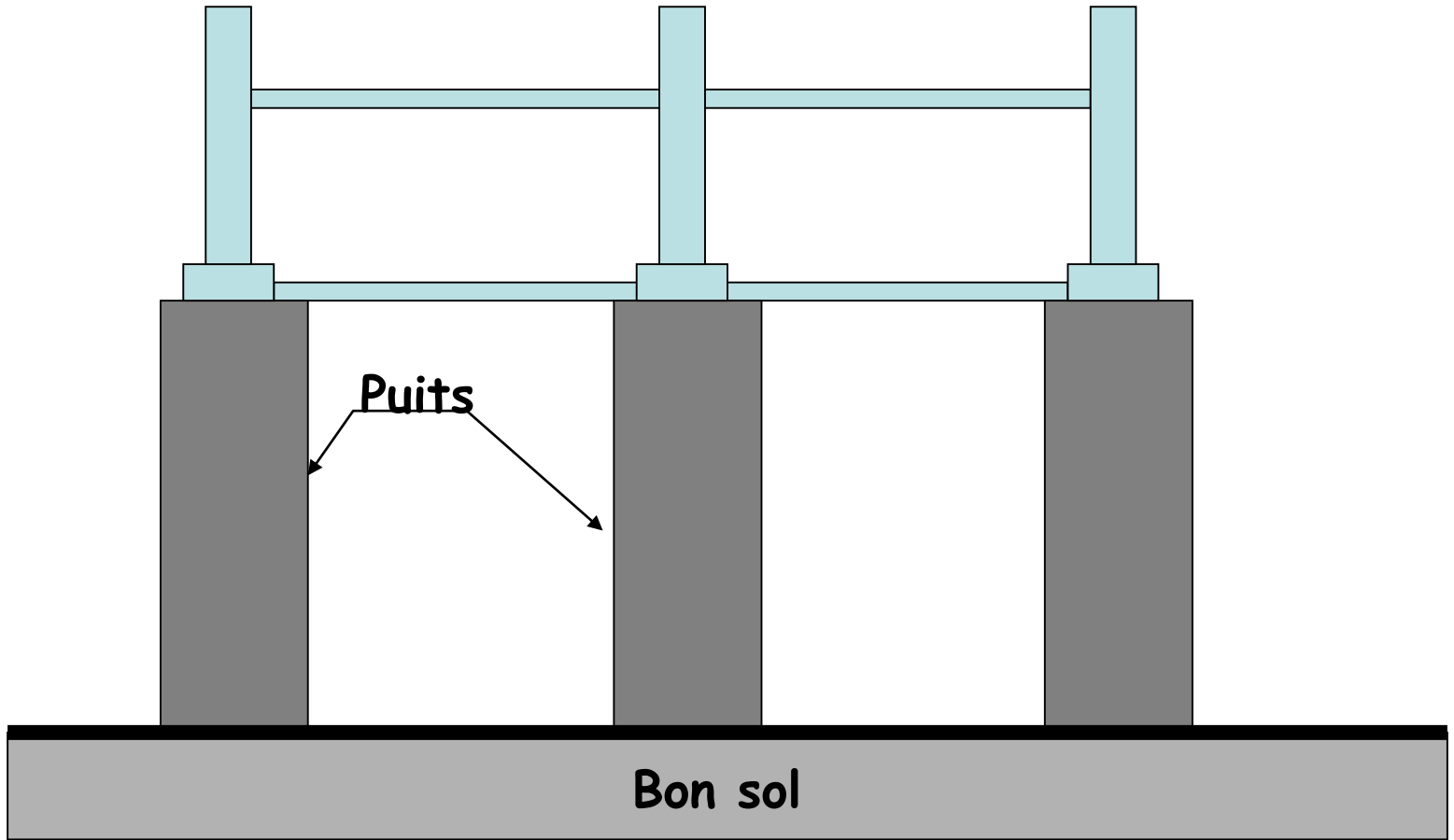
**Appuis
parasismiques**



4.2 -Fondations Semi Profondes

- Ces fondations sont utilisées lorsque le sol est de mauvaise qualité sur une épaisseur inférieure à 8 mètres ou dans le cas de sols gonflants (sols argileux).

Elles sont constituées par des colonnes rondes ou rectangulaires en gros béton, d'une profondeur variant de 2 à 10 mètres. Elles transmettent jusqu'au bon sol les charges apportées par une semelle de section réduite, et par leur poids, s'oppose aux variations de volume des terrains argileux.



4.3-Fondations profondes :

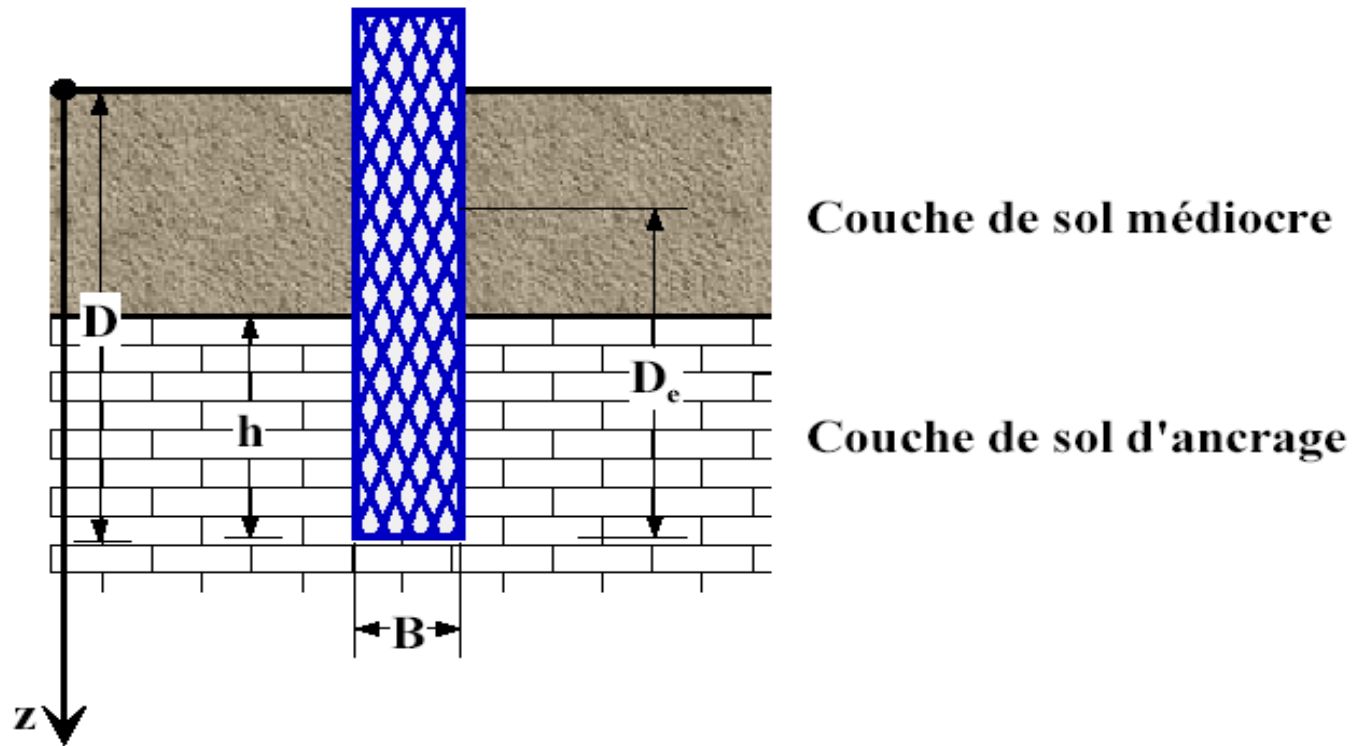
On opte pour ce mode de fondation, lorsque les charges à transmettre au sol sont très importantes et lorsque le terrain en surface est de mauvaise portance. Les fondations profondes sont surtout utilisées pour les ouvrages importants supportant de fortes charges : bâtiments industriels, ouvrages d'art, etc. ...

PIEUX

Définitions d'un pieu

Un pieu est une **fondation élancée** qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles.

Il existe deux types de pieux: Pieux battus et Pieux forés.



Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique D_e

On considère qu'un élément de fondation est de type profond lorsque sa hauteur d'encastrement relatif $D_e/B > 5$.

a- Les pieux battus

Ceux-ci sont enfoncés dans le sol grâce à des 'sonnettes de battage'
Ces pieux peuvent être préparés à l'avance sous la forme de pieux en béton armé en béton précontraint, en bois ou encore en acier. Ils peuvent être de section carrée, polygonale, circulaire.

Leur pied a le plus souvent la forme d'une pyramide. La difficulté principale pour les pieux préfabriqués réside dans la détermination de la longueur des pieux avant le chantier.



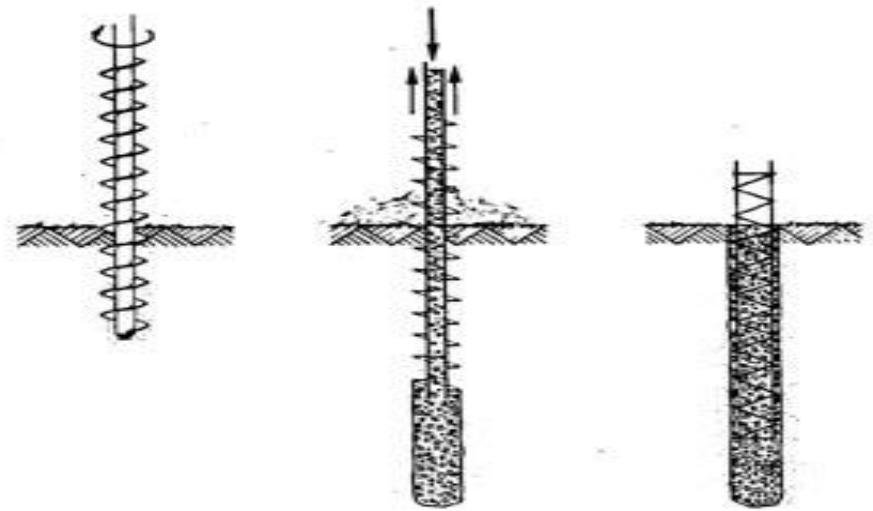
b- Les pieux forés :

Ils sont réalisés par extraction du sol et bétonnage en place. L'intérêt des pieux forés est de permettre la traversée des couches dures d'épaisseur insuffisantes sur lesquelles s'arrêtaient éventuellement des pieux battus. Le forage est généralement exécuté mécaniquement.

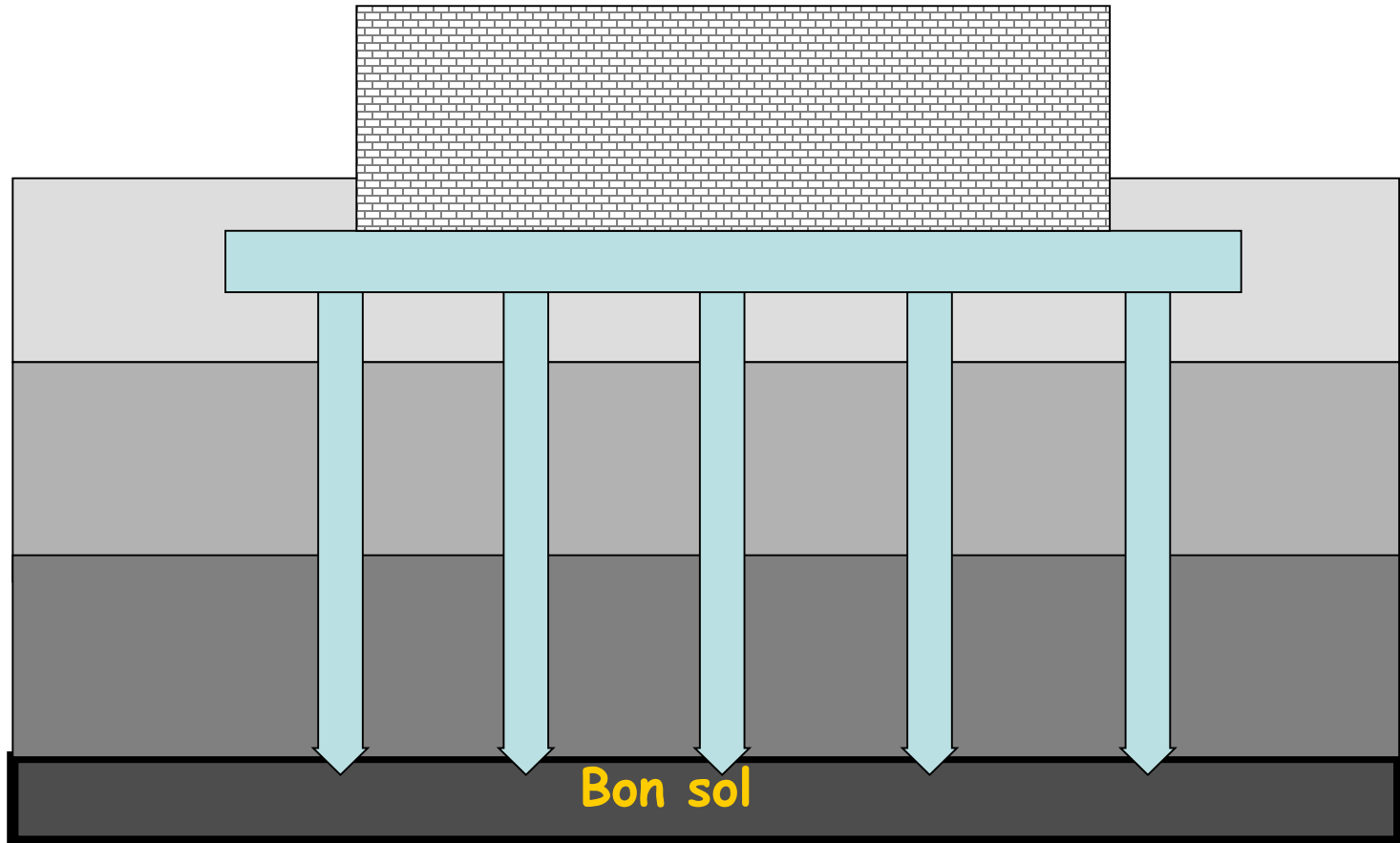
La mise en place du béton exige de grandes précautions pour qu'il n'y ait pas de mélange avec la boue.

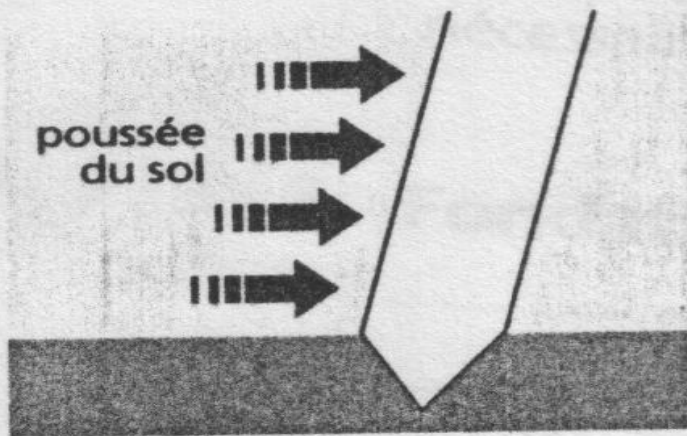
Pourquoi l'utilisation des pieux ? :

Dans les sols de fondation dits «mous», la charge d'un bâtiment doit bien souvent être absorbée par des pieux. Un pieu peut transmettre la charge soit par le poinçonnement de son extrémité inférieure, soit par son frottement le long de la paroi latérale. Le nombre de pieux est déterminé par la charge de la structure, ainsi que par la capacité moyenne que peut prendre en charge chaque pieu du groupe.

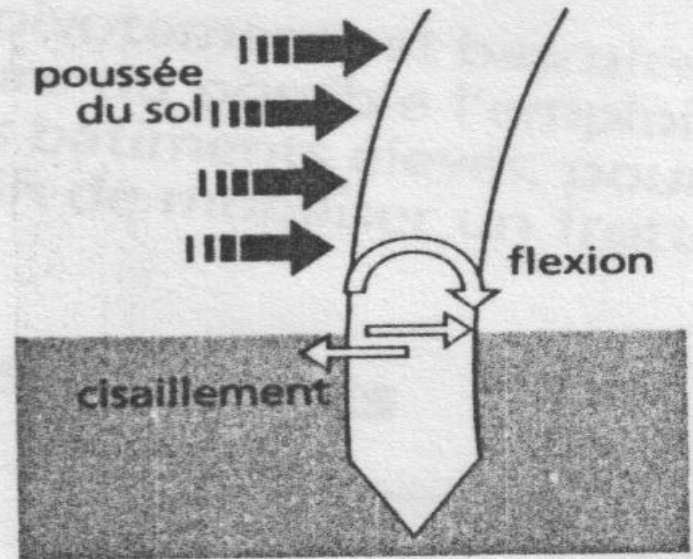


Pieux travaillant en pointe





**a) ancrage faible :
effet d'articulation**



**b) ancrage important :
effet d'encastrement**

FIG. VII | 14

Appui des pieux.

Origines des accidents pouvant survenir aux fondations :

Ils sont souvent liés aux mauvais choix du type de fondations et même à l'entreprise qui les avait réalisé.

1. Les fondations superficielles :

- Fondations assises sur des remblais non stabilisés
- Présence d'eau dans le sol (nappe phréatique,...)
- Fondations hétérogènes (terrain, type de fondation,...)
- Fondations réalisées en mitoyenneté avec des bâtiments existants (sol décomprimé, règles des 3/2,...)
- Fondations réalisées sur des sols instables (terrain incliné, éboulement,...)

NB/Environ 85% des accidents sont dus à la méconnaissance des caractéristiques des sols ou à des interprétations erronées des reconnaissances.

2. Les fondations profondes :

L'essentiel des sinistres rencontrés sur ce type de fondations est:

- Soit une reconnaissance des sols incomplète;
- Soit une mauvaise interprétation des reconnaissances;
- Soit à cause des erreurs lors de l'exécution;
- Soit une détérioration des pieux (présence d'eaux agressives,...).

Réparation des fondations

1. Préliminaires

Les problèmes de renforcement ou réparation des structures touchent également le domaine des fondations. Dans de nombreux cas les problèmes de fondations sont associés aux problèmes de la structure proprement dite, mais quelquefois ils se limitent aux seules fondations, sans atteindre le niveau des superstructures.

- **LE RENFORCEMENT** : C'est envisagé et exécuter avant que ne se produise un désordre, soit par le changement prévu de la destination d'un ouvrage, soit par la modification programmée des conditions extérieures (exemple: travaux au voisinage).
- **LA RÉPARATION** éliminer les causes et les inconvénients.

Les principales techniques de réparation des fondations font appel aux techniques suivantes :

- - renforcement des sols par injection ;
- reprises en sous oeuvre (semelles, etc.) ;
- le drainage des sols.

•







2001 11 29

Merci de
votre
Attention