

Résistance au cisaillement des sols, essais en laboratoire

J.P.Magnan

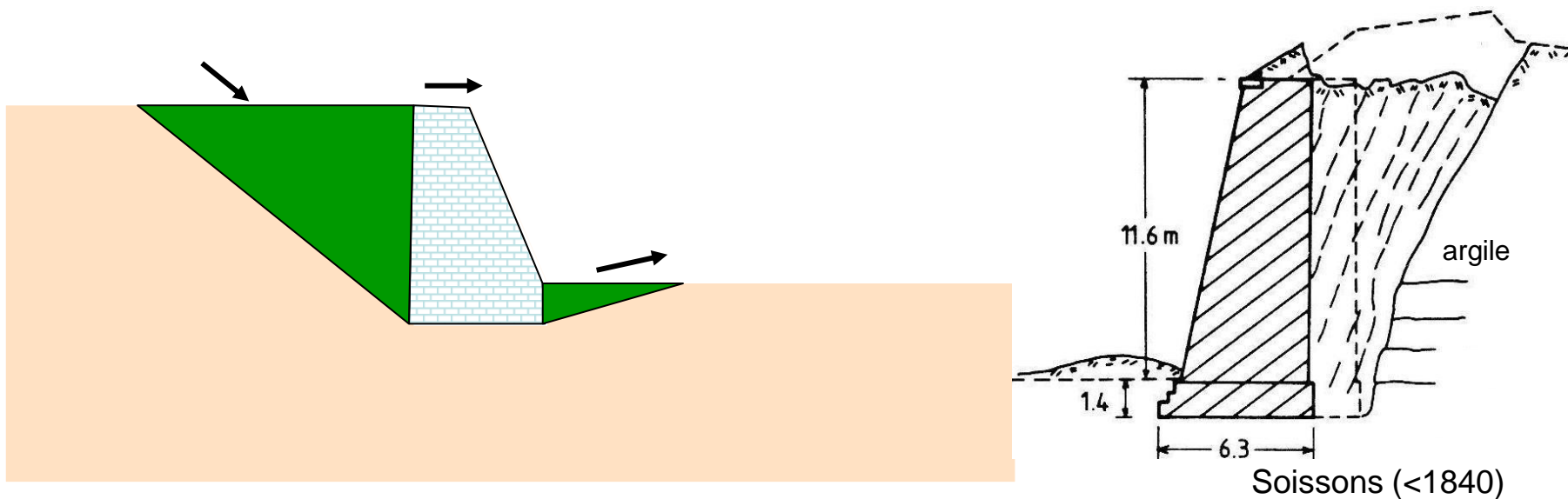
Introduction

L'étude de la résistance des sols est consacrée à l'équilibre des massifs de sols au contact des ouvrages et dans les sites naturels.

Le choix du mot « résistance au cisaillement » évoque un cadre d'analyse, la mécanique des milieux continus, et l'idée qu'on va chercher la valeur limite de la contrainte déviatorique dans le sol. On s'intéresse principalement à cette forme de résistance parce que les résistances à la compression (isotrope) et à la traction des sols sont très forte et quasi nulle et donc ne posent pas de questions.

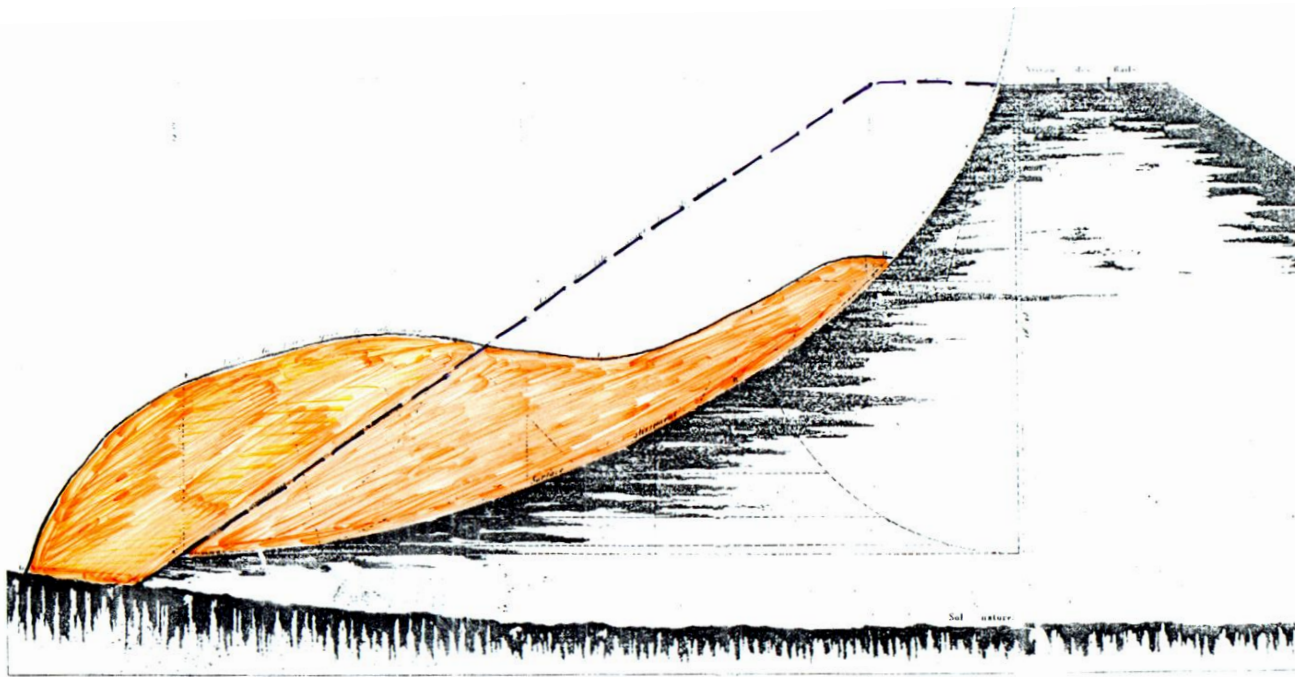
Cette même résistance a été introduite du temps de Coulomb (18^{ème} siècle) comme résistance au frottement sur la surface de glissement entre deux volumes de sols.

La résistance du sol est nécessaire pour les calculs qui se rapportent aux ouvrages, en imitant leurs comportements. L'étude « moderne » de l'équilibre des sols date du 18ème siècle, à une époque où seule existait la mécanique des solides. L'objet de l'étude était l'équilibre des massifs de terre et des fortifications (Vauban). Les ruptures ont la forme de glissements de blocs de section triangulaire :



L'équilibre est analysé en forces normales et tangentes aux limites des blocs et les forces tangentielles sont limitées par le frottement.

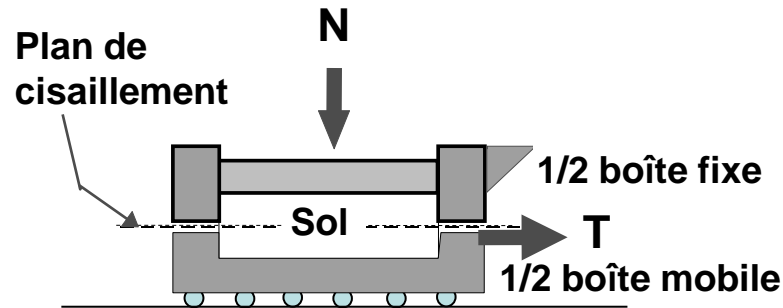
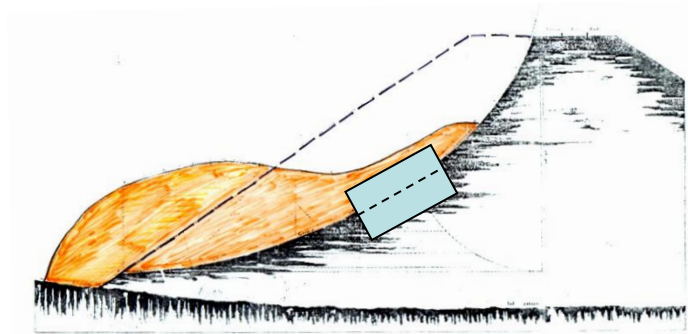
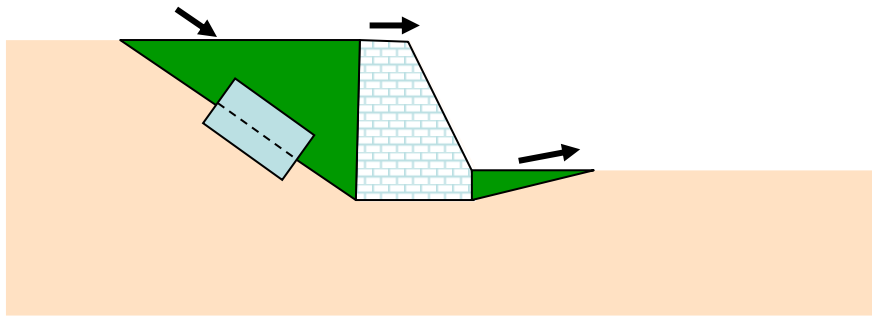
Au 19^{ème} siècle la construction des canaux et des voies ferrées, qui ne pouvaient suivre la géométrie naturelle des terrains, a créé de nombreux déblais et remblais, dont la stabilité était incertaine. Le livre de Collin (1846) en rend compte. On y trouve de nombreux dessins comme celui-ci :



*Chemin de fer de Paris à Versailles (Rive gauche de la Seine)
Remblai de Chaville*

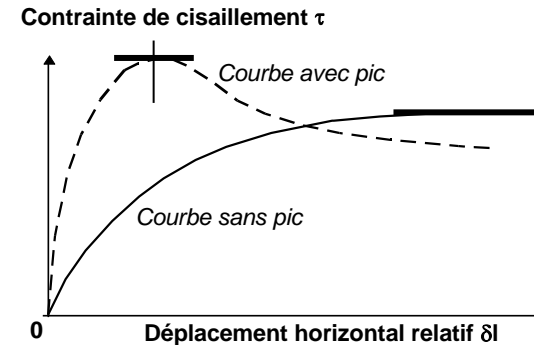
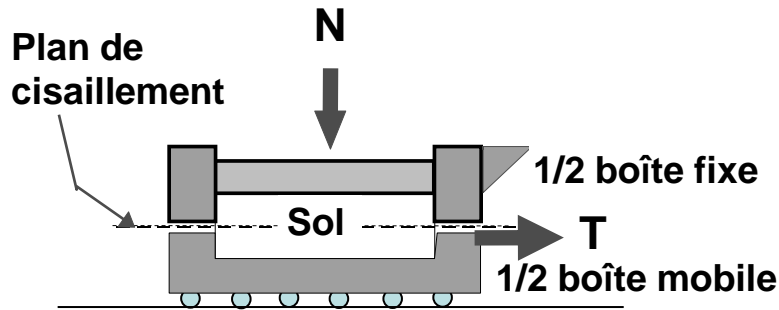
L'équilibre est là aussi analysé en forces normales et tangentes aux limites des blocs et les forces tangentielles sont limitées par le frottement.

Pour déterminer la force tangentielle maximale pour une force normale donnée, on a construit des boîtes de cisaillement, qui reproduisent les conditions de contact et glissement sur une surface de rupture :

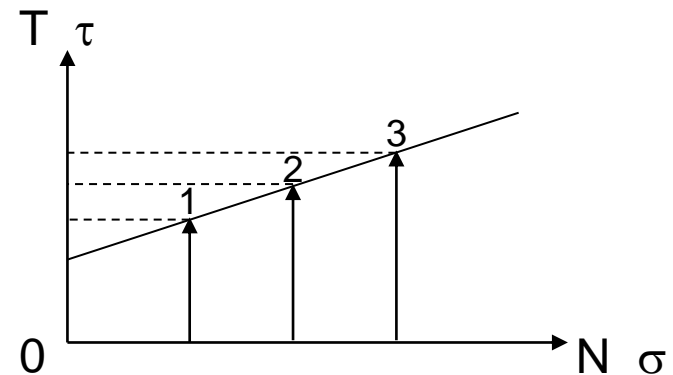


La pression normale N sur la surface de rupture est appliquée par un piston. La boîte inférieure est mise en mouvement et on mesure T .

Chaque éprouvette fournit une courbe de déplacement de la demi-boîte inférieure en fonction de la force appliquée. Ces courbes peuvent avoir deux formes, avec et sans pic.



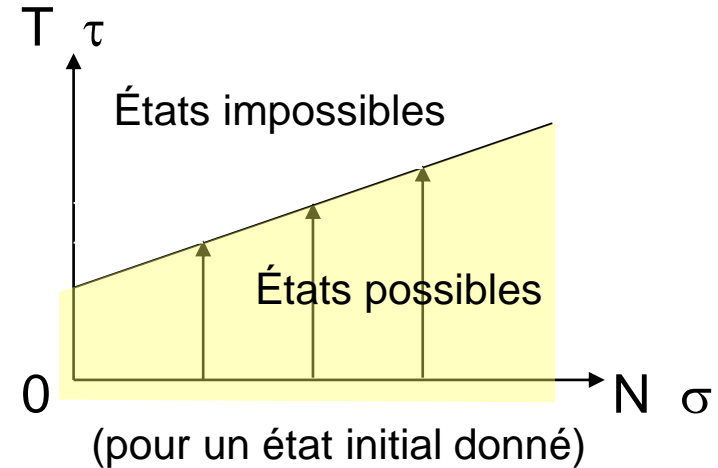
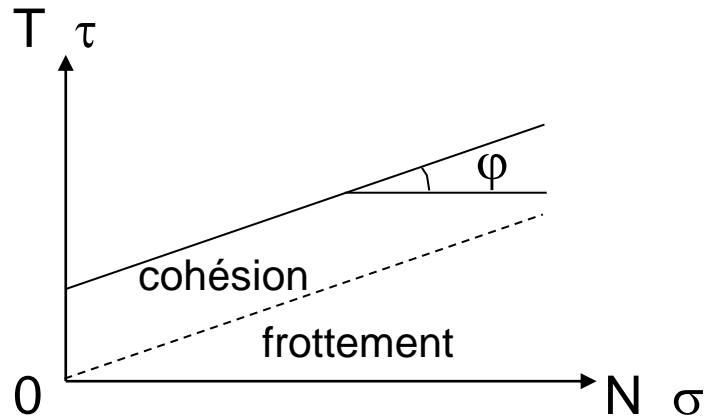
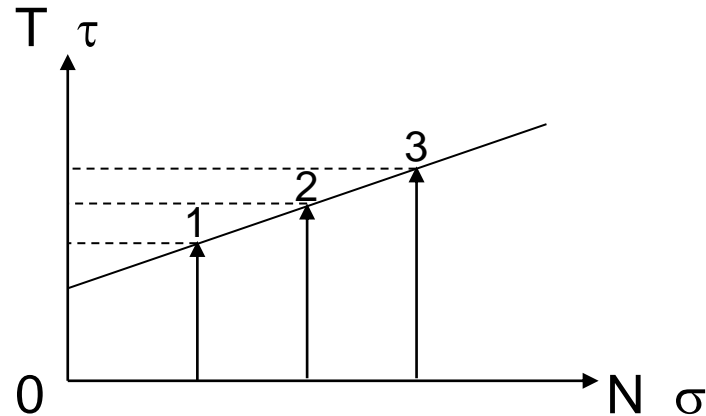
Pour chaque valeur de N on détermine une valeur maximale de T , soit au pic, soit à l'asymptote. On reporte le point (N, T_{\max}) sur le diagramme (N, T) . On peut représenter le diagramme en remplaçant N et T par $\sigma = N/S$ et $\tau = T/S$, S étant la surface de contact à la rupture.



Il faut deux éprouvettes pour définir la courbe enveloppe des efforts possibles, dont on admet qu'elle est linéaire. Les normes d'essai imposent trois éprouvettes.

Que représente la courbe définie par les points de rupture ?

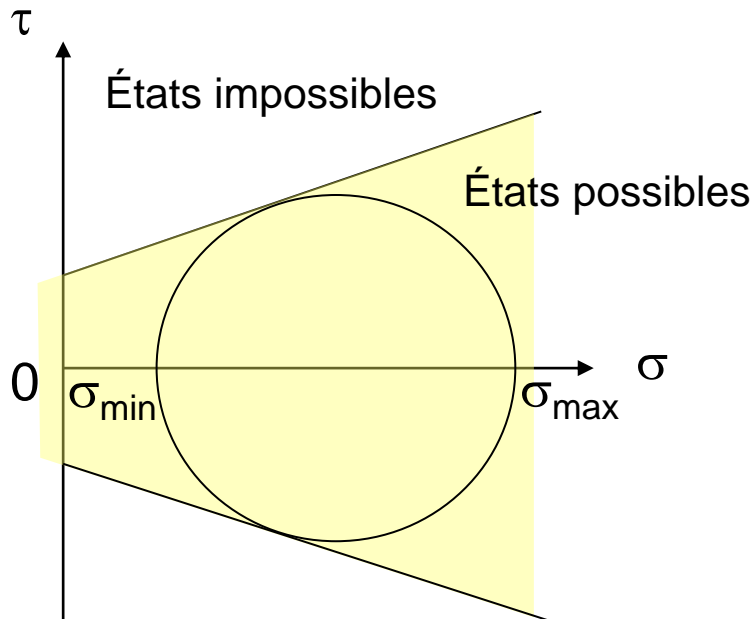
Résultats bruts



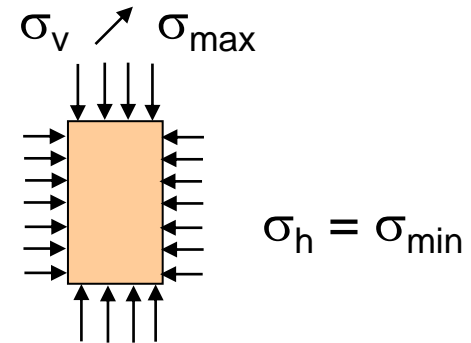
La droite est la limite (enveloppe) des états possibles. On l'appelle « droite intrinsèque », « critère de rupture », « droite de Mohr-Coulomb » (en France).

Analyse en contraintes – essai triaxial

Le 19ème siècle a vu le développement de la théorie de l'élasticité (Young, 1807; Cauchy, 1828), l'utilisation des contraintes pour analyser les efforts exercés par les sols sur les parois verticales (Rankine, 1857), et les travaux de Mohr sur la représentation des contraintes (1882). L'idée d'utiliser les cercles de Mohr pour déterminer le critère de rupture découle de ces travaux, ouvrant la voie aux essais triaxiaux de révolution.



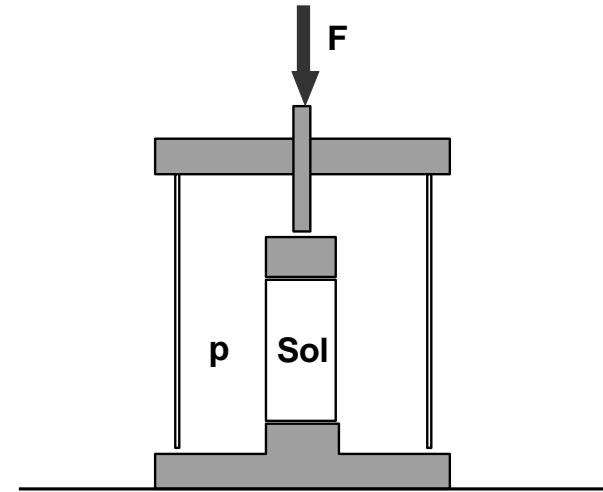
Les cercles de Mohr doivent être dans la zone des états possibles.



On utilise deux cercles pour déterminer leur tangente commune (norme = 3).

Essai triaxial

L'essai triaxial est construit autour d'une cellule cylindrique qui applique une pression latérale uniforme (à la pression hydrostatique près). La pression verticale est créée par un vérin qui impose une vitesse de déformation constante. On parle souvent de contrainte et déformation axiale/latérale : σ_a, ε_a ou σ_1, ε_1 ; σ_h, ε_a ou σ_3, ε_3 .



L'essai est réalisé sur plusieurs éprouvettes (minimum absolu : deux ; minimum de la norme : trois).

Le chargement de l'éprouvette est effectué en deux phases :

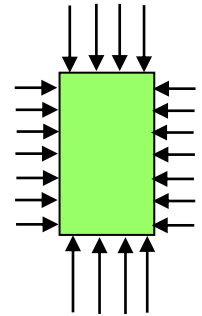
- compression isotrope : $\sigma_1 = \sigma_3$ augmente ;
- chargement axial : σ_3 reste constant ; σ_1 (ε_1) augmente.

Étape 1

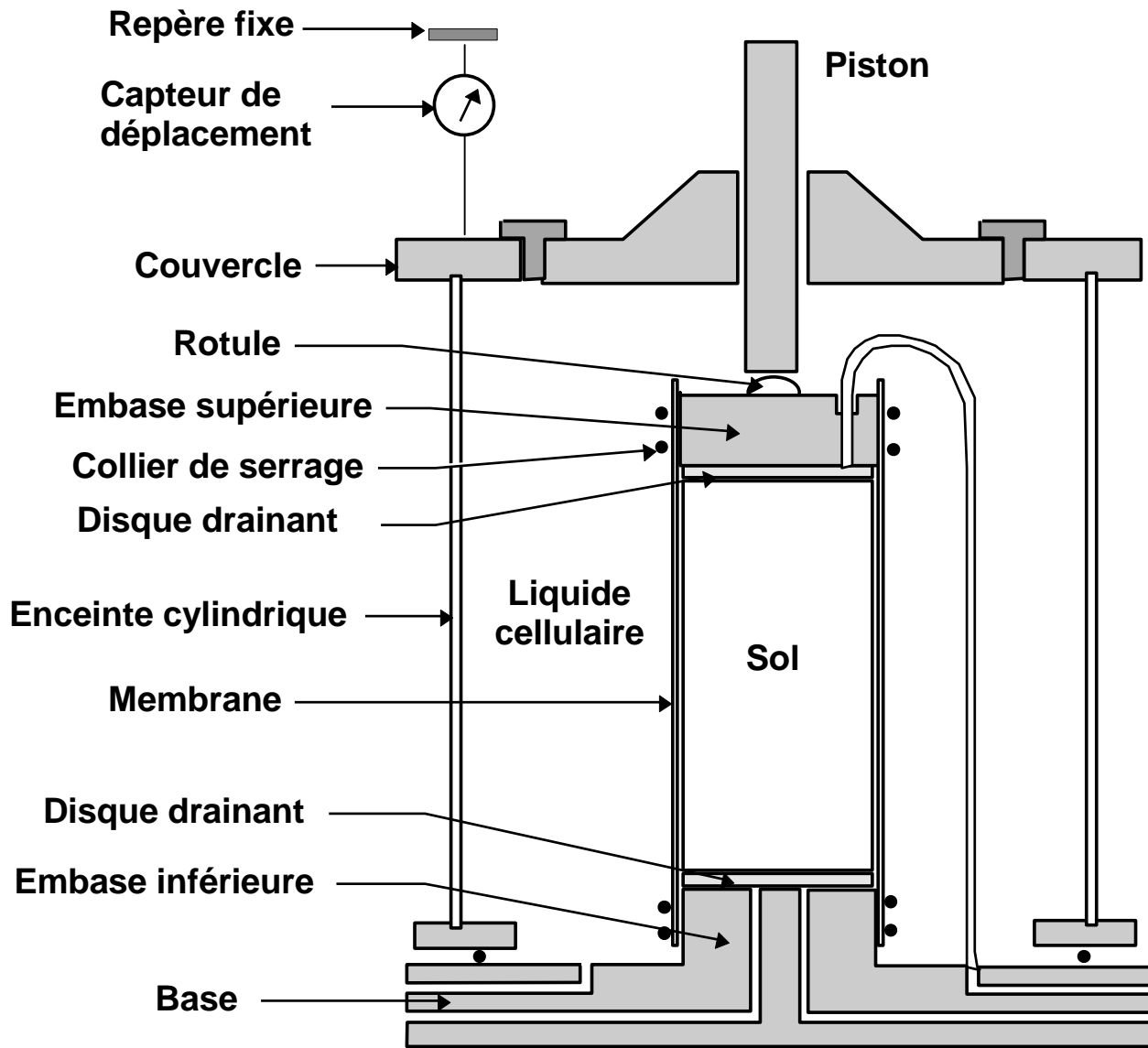


$\sigma_1 = \sigma_3$

Étape 2



σ_1 croît



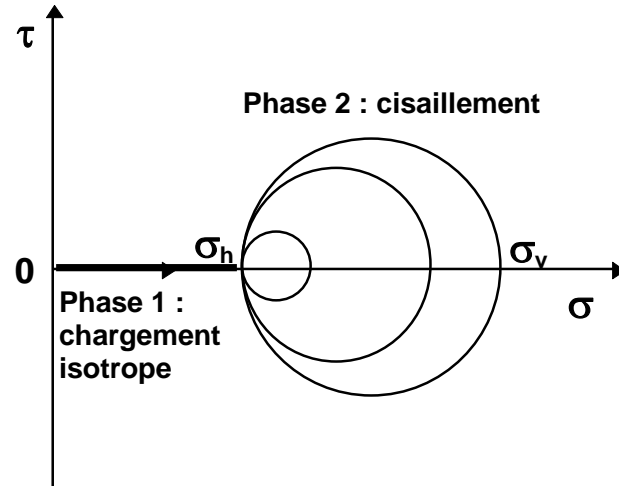
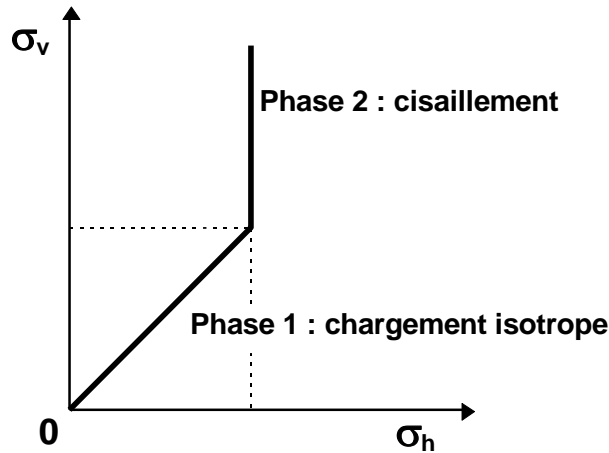
Détails d'un appareil triaxial

L'appareil triaxial permet de contrôler les échanges d'eau entre l'éprouvette et l'extérieur. Cette possibilité permet de pratiquer quatre types d'essais sur éprouvettes saturées, selon les combinaisons retenues de drainage ou absence de drainage lors des deux étapes de l'essai :

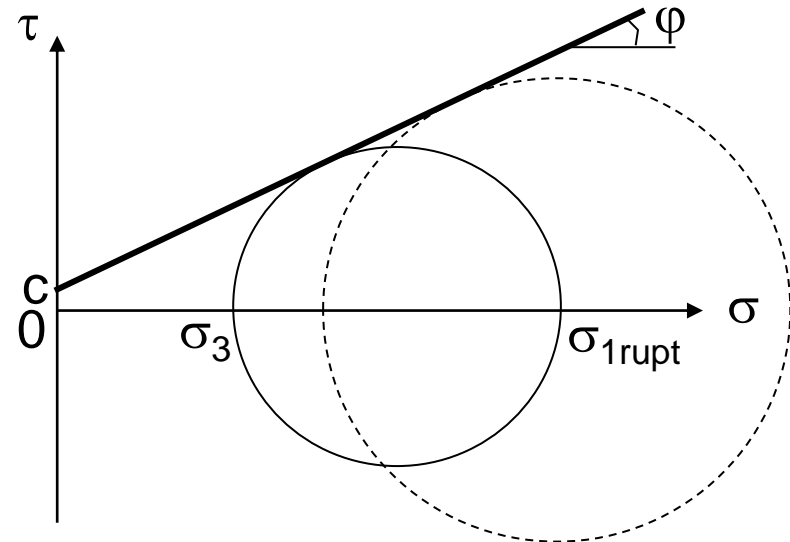
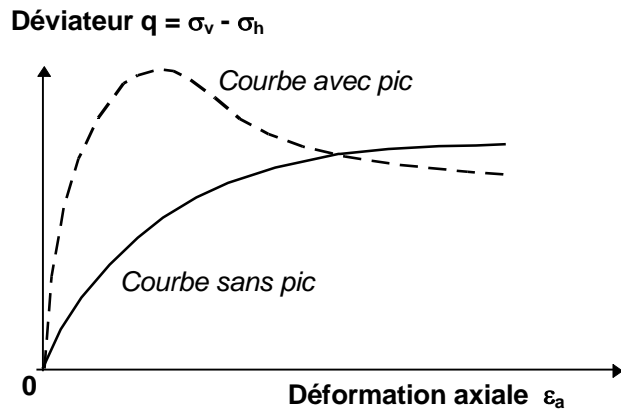
- **essai UU** (non consolidé non drainé) : l'éprouvette ne peut échanger d'eau avec l'extérieur ni pendant la compression isotrope ni pendant le cisaillement par compression axiale ;
- **essai CU** (consolidé non drainé) : le drainage est ouvert pendant la compression isotrope et fermé après ;
- **essai CD** (consolidé drainé) : le drainage est ouvert pendant tout l'essai ;
- **essai UD** (non consolidé drainé) où le drainage serait fermé dans la première étape et ouvert ensuite. Mais ce dernier type d'essai n'est pas réalisé (considéré comme inutile).

La présence d'eau dans le sol pendant l'essai en conditions non drainées modifie sa réponse dans l'essai parce qu'elle oblige les déformations à se produire à volume constant;

Essai triaxial - interprétation

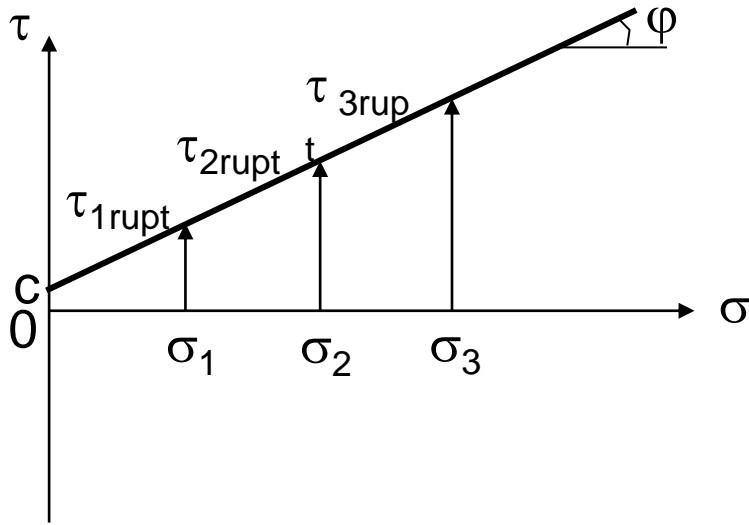


Représentation du chargement.

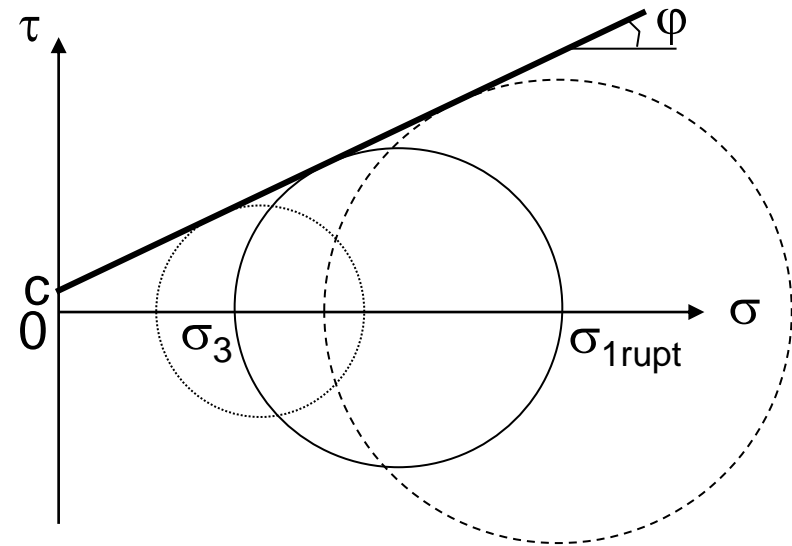


Résultats et cercle de Mohr à la rupture.

Résumé



Essai de cisaillement direct : 3 éprouvettes, 3 points, 1 droite



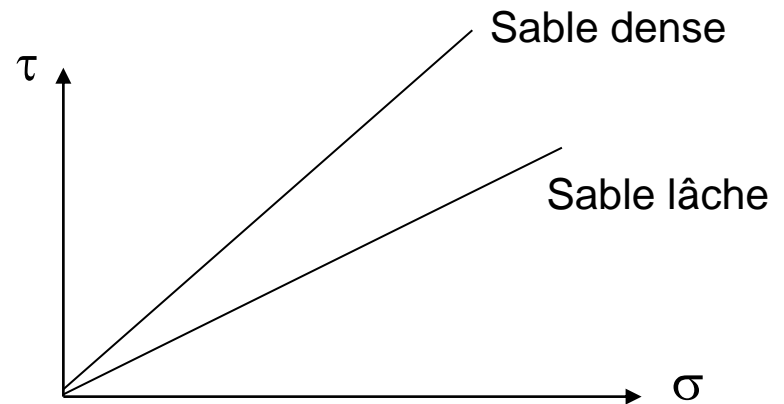
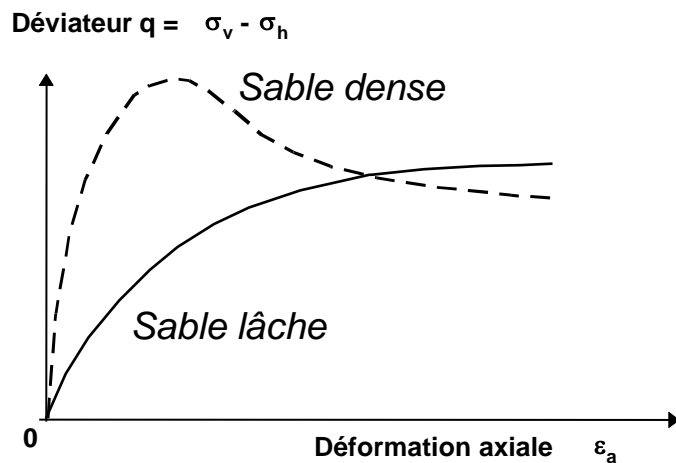
Essai triaxial : 3 éprouvettes, 3 cercles de Mohr, 1 tangente

Diverses vérifications ont montré que les différences existent mais sont tolérables. Les difficultés viennent de la qualité des éprouvettes, de l'homogénéité de leurs déformations, de la taille des particules, de l'eau...

Résistance au cisaillement des sables

Préambule : il est difficile de prélever des carottes intactes de sable, de sorte que les essais réalisés en laboratoire fournissent des informations sur l'empilement de particules que l'on a testé, mais pas sur les propriétés que pourrait avoir le sable en place.

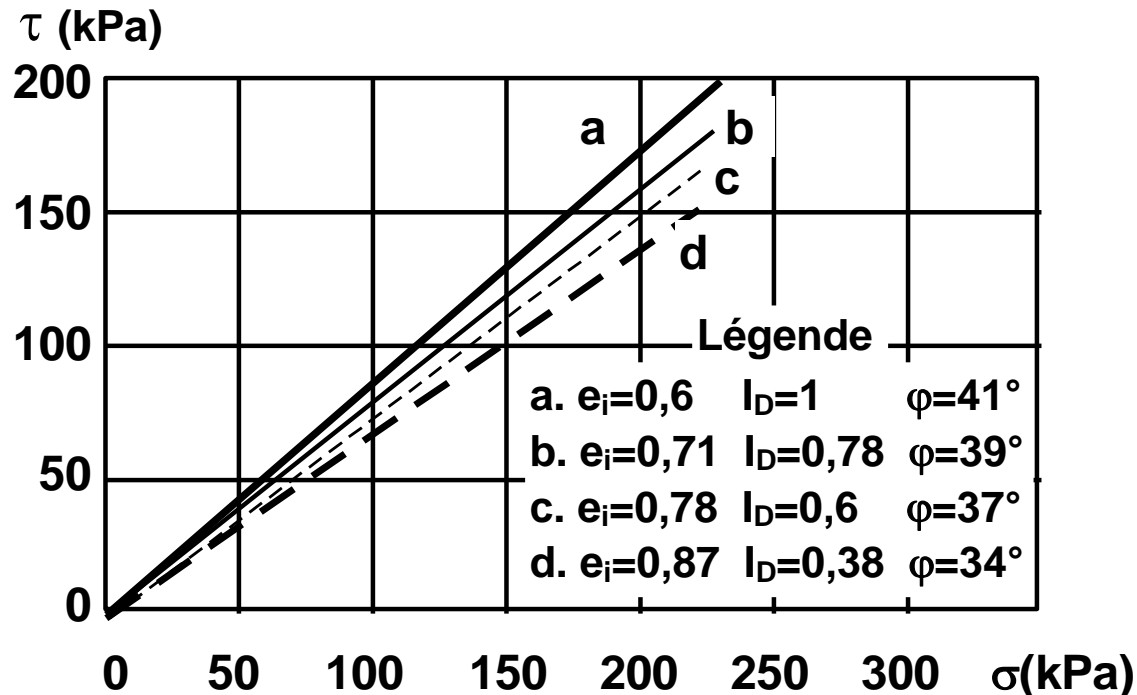
Les essais sur sable donnent des résultats qui correspondent à ce que l'on vient de voir. Les courbes de déformation avec pic de rupture sont obtenues pour les sables denses ; les sables lâches donnent plutôt des courbes avec asymptote.



Les sables denses sont plus résistants

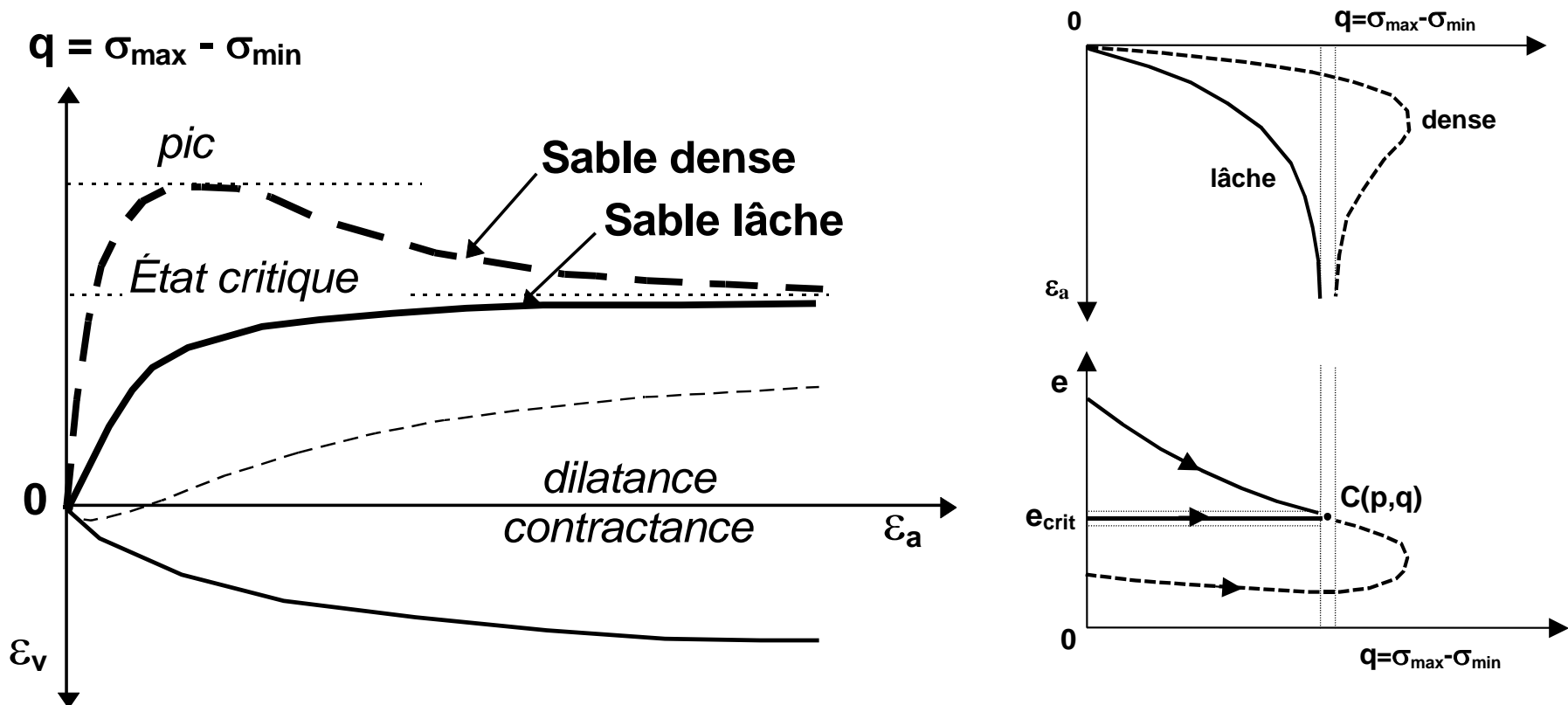
Résistance au cisaillement des sables

Les essais sur sable sont généralement réalisés sans eau. Les angles de frottement interne dépendent de la forme et de la granularité des particules, mais aussi de la densité de l'empilement de ces particules, comme le montre cette figure.



Résistance au cisaillement des sables

L'effet de la densité est complexe. Cette figure montre le comportement d'un même sable à partir d'un état initial lâche et d'un état initial dense. Le sable dense passe par un pic de résistance, mais sa déformation est d'abord de contractance puis de dilatance. Le sol lâche se contracte toujours.

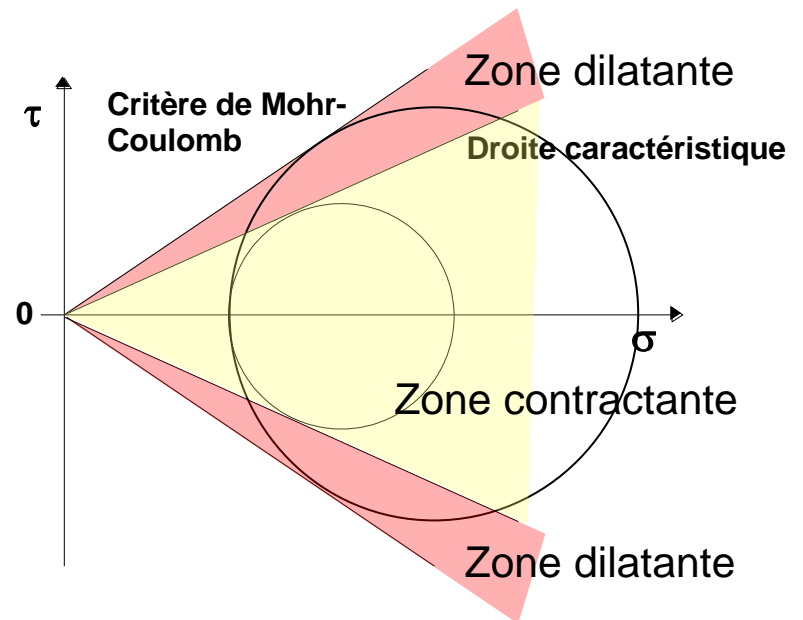
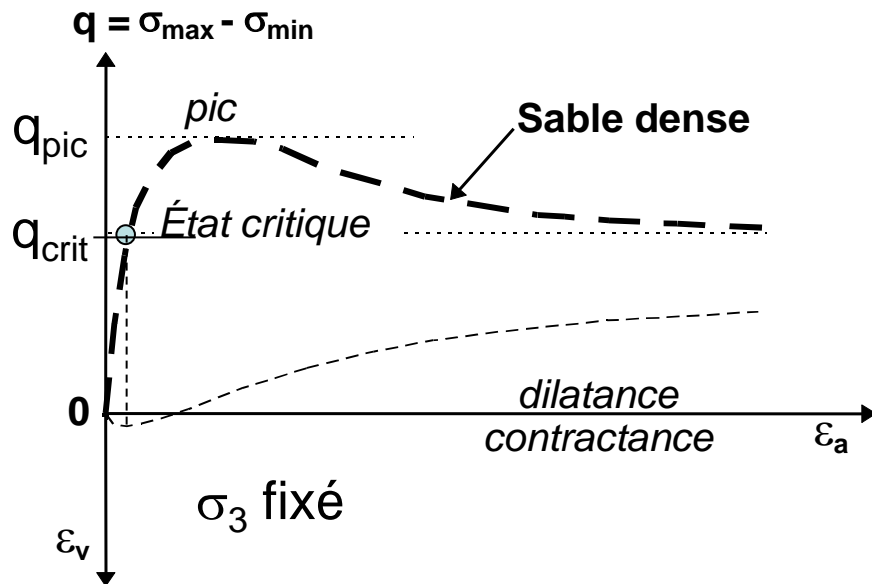


L'état critique (caractéristique) sépare ces deux types de comportement.

Résistance au cisaillement des sables

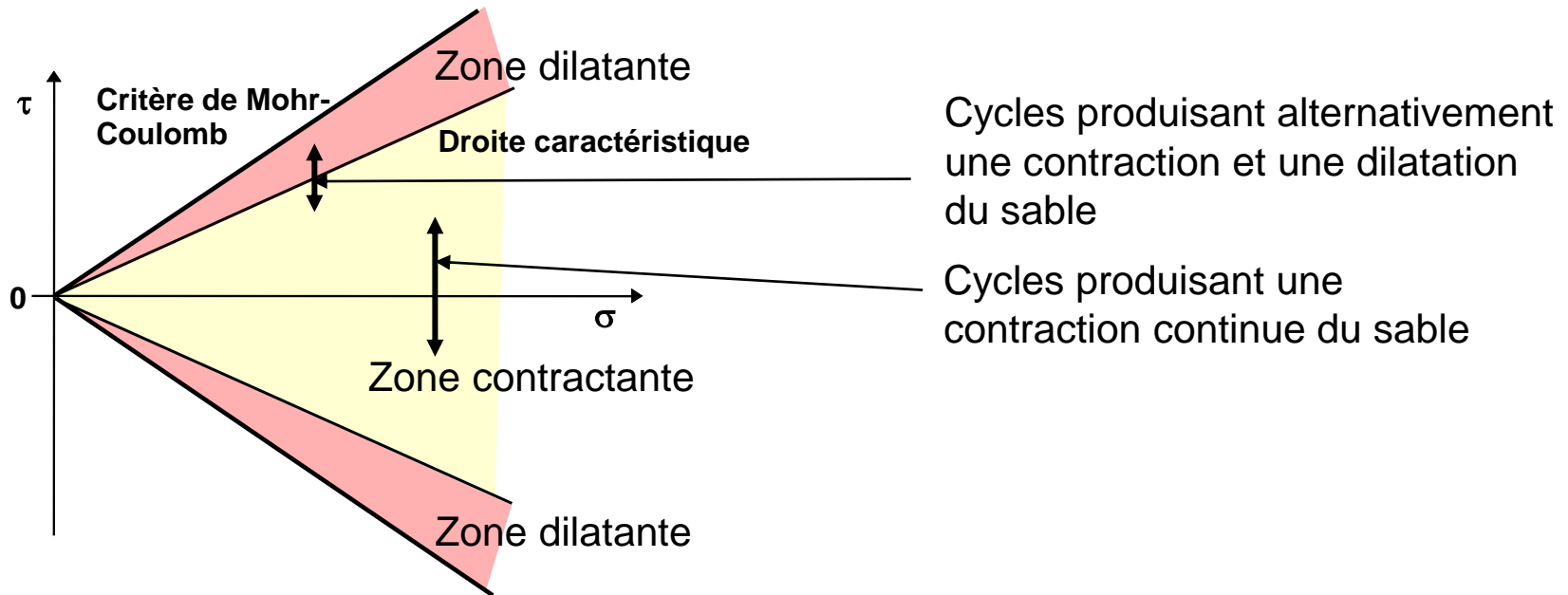
La dilatance et la contractance sont des propriétés de déformation qui ont une grande importance en cas de chargement cyclique, mais aussi pour certains chargements statiques en conditions de déformation confinées.

Si l'on utilise la valeur caractéristique du déviateur q_{crit} pour construire le cercle de Mohr (au lieu du déviateur à la rupture q_{pic}), pour les trois éprouvettes d'un essai, on trouve que chaque série de cercles est tangente à une droite : droite caractéristique et droite de Mohr-Coulomb.



Résistance au cisaillement des sables

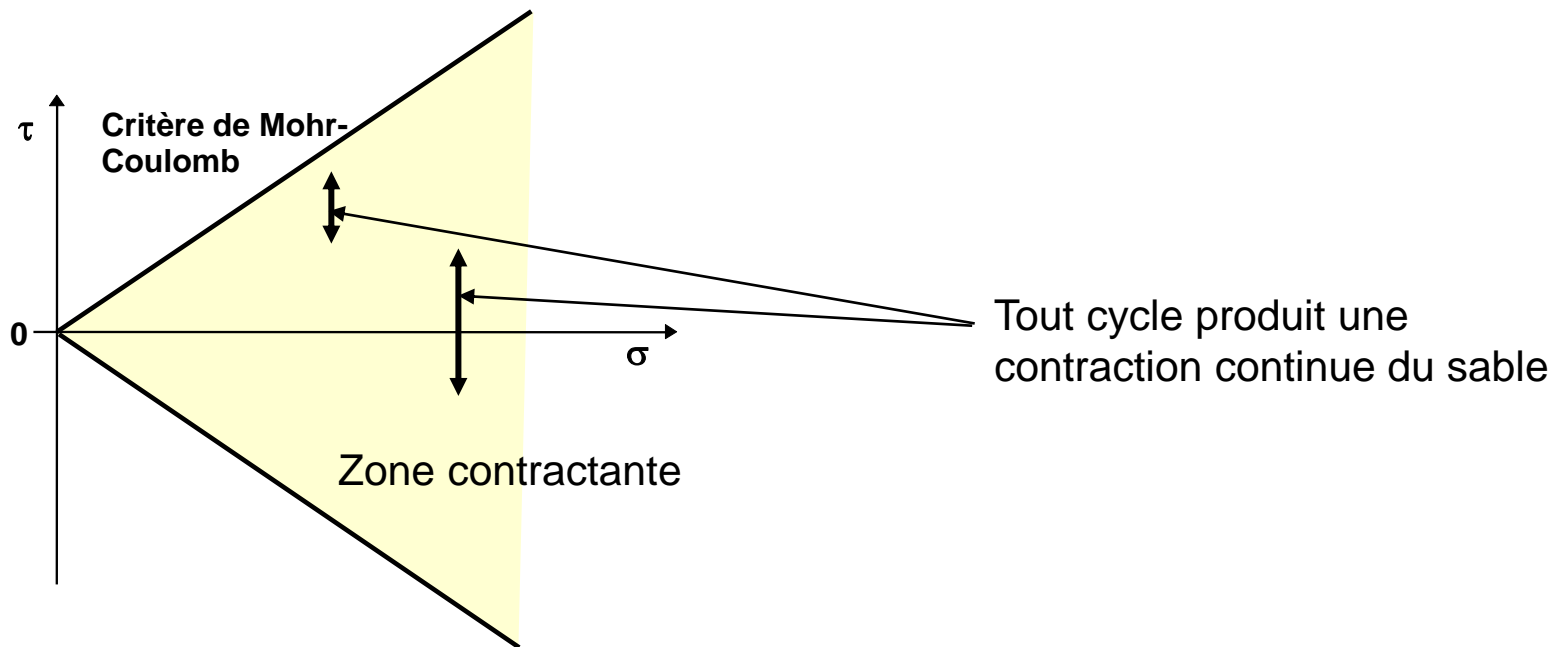
En cas de chargement cyclique, la position des cycles dans le diagramme de Mohr conditionne les variations de volume.



Si le sable est sec, les cycles contractants vont produire un tassement du massif, les autres des déformations cycliques à définir. Par contre, si le sable est saturé et les cycles sont rapides (tremblement de terre), la compression du sable sera empêchée par une augmentation de la pression interstitielle et des grandes déformations du sol. Sans rupture, normalement, parce que les cycles finiront par toucher la droite caractéristique.

Résistance au cisaillement des sables

Dans le cas des sables lâches, il n'y a pas de droite caractéristique et pas de zone de dilatance. Tout cycle de cisaillement va produire une diminution de volume; donc des tassements dans un sol sec ou une augmentation de la pression interstitielle dans un sable saturé. L'état ultime de ces déformations est la liquéfaction du sol (les contraintes effectives deviennent nulles).



Résistance au cisaillement des sables

Résumé

Comportement usuel : drainé, en contraintes effectives.

Résistance plus forte pour les sables denses.

Dilatance et contractance.

En conditions sismiques, la contractance peut provoquer la liquéfaction des sables saturés lâches.

Les sables ont des angles de frottement interne supérieurs à 30 degrés.

Résistance au cisaillement des argiles

Dans les argiles, la distinction entre drainé et non drainé est importante : ces sols sont généralement saturés ou quasi saturés et l'eau interstitielle ne se déplace pas rapidement pendant les essais. Le comportement non drainé va caractériser la réponse des massifs argileux lors de l'application des charges et le comportement drainé leur réponse à long terme, quand les pressions interstitielles auront eu le temps de se stabiliser.

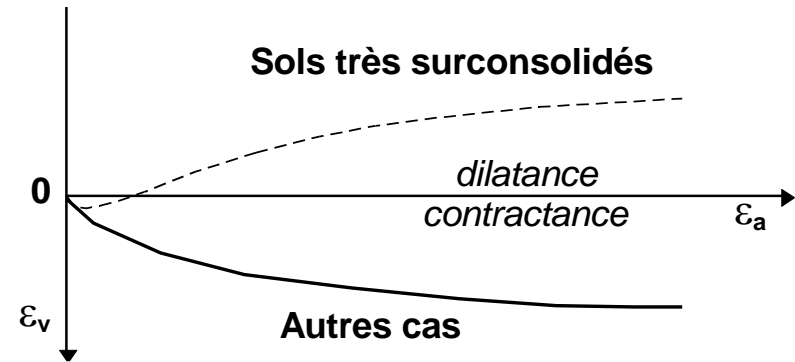
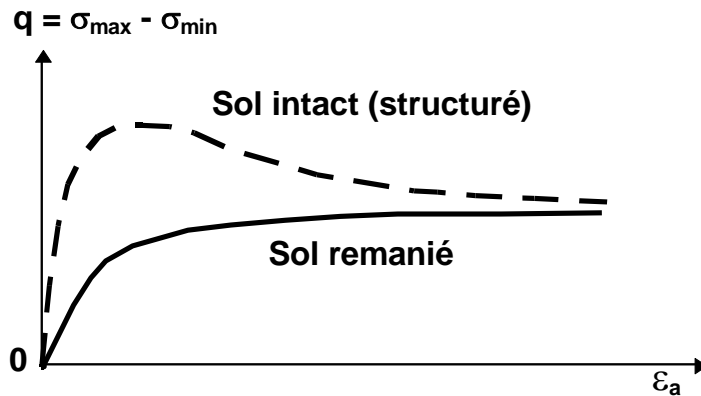
Nous allons étudier :

- le comportement drainé des argiles dans les essais CD,
- le comportement drainé des argiles dans les essais CU+u,
- le comportement non drainé des argiles dans les essais CU+u.

Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Essais consolidés drainés (CD)

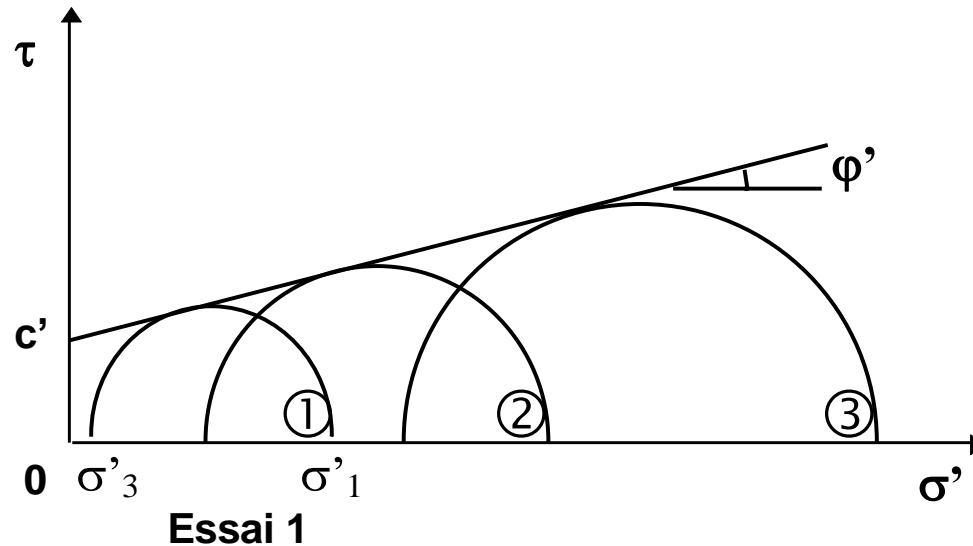
La description des résultats d'essais et de leur interprétation est semblable à celle effectuée pour les sables :



On obtient aussi des courbes avec pic et des courbes sans pic, mais cette fois l'explication associée à l'absence de pic est le remaniement. Les argiles n'ont un comportement dilatant que quand elles sont très surconsolidées.

Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Essais consolidés drainés (CD)



La représentation des cercles de Mohr à la rupture donne le diagramme représenté ci-dessus. L'équation du critère de rupture s'écrit :

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

ou

$$\sigma'_1 = 2c' \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right) + \sigma'_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

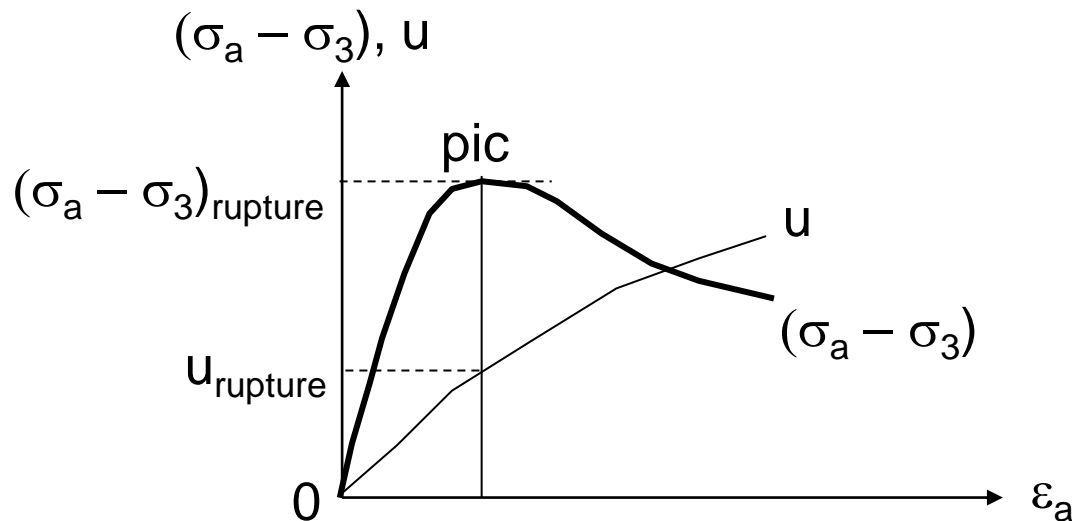
Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Essais consolidés non drainés avec mesure de u (CU+u)

Pendant l'essai, on mesure en continu :

- la contrainte axiale produite par la déformation axiale à vitesse imposée,
- la pression de l'eau aux extrémités de l'éprouvette.

On obtient des courbes telles que :

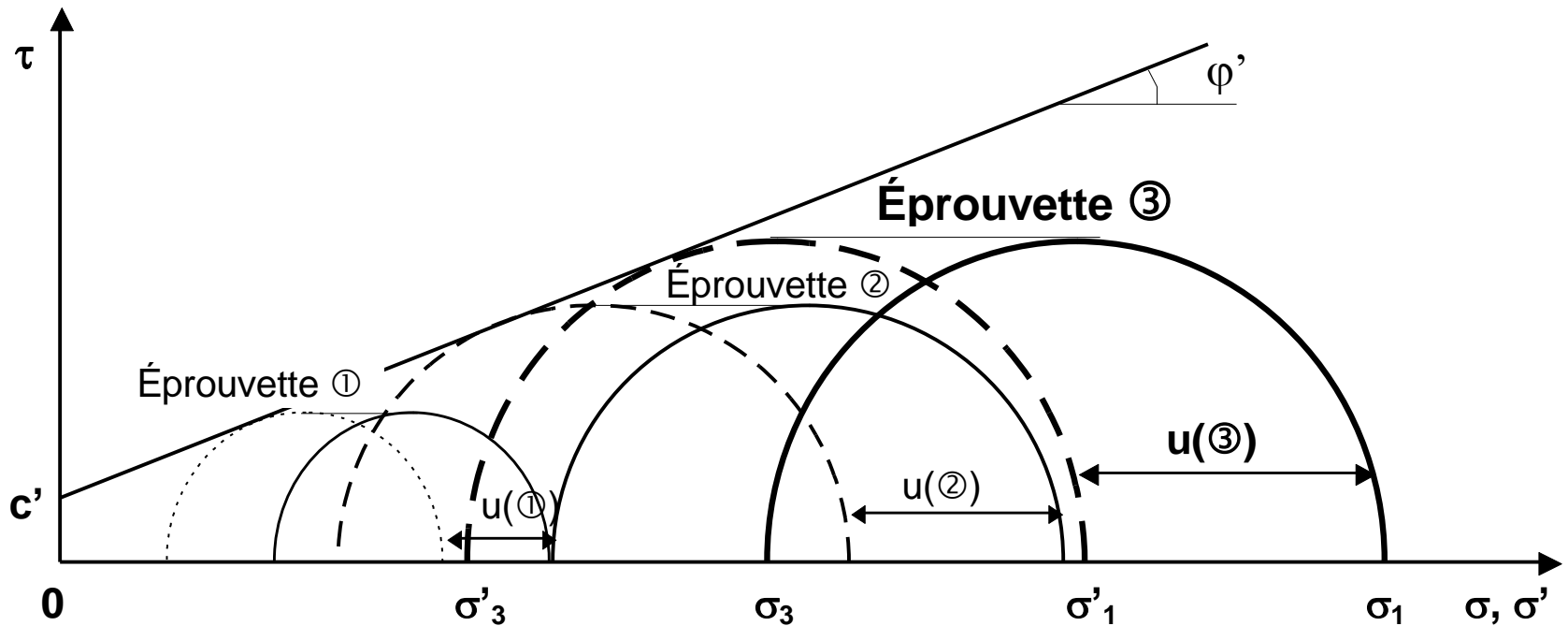


sur lesquelles on choisit le déviateur et la pression interstitielle à la rupture.

Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Essais consolidés non drainés avec mesure de u (CU+u)

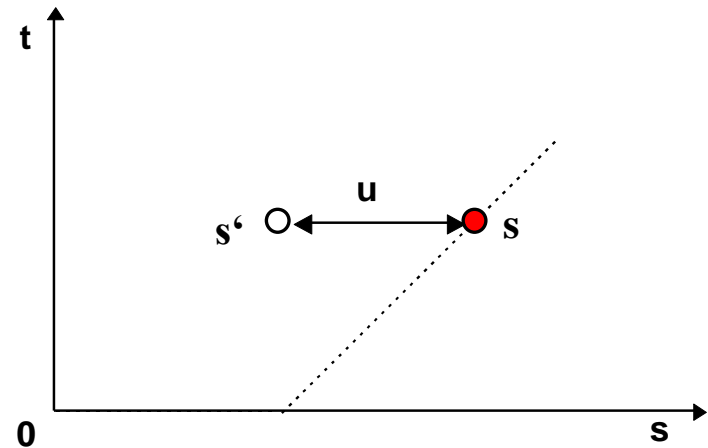
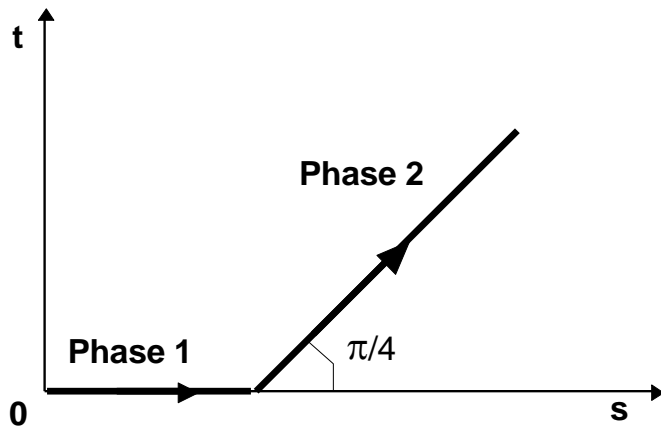
On peut alors construire les cercles de Mohr en contraintes totales et en contraintes effectives pour obtenir le diagramme suivant, qui permet de trouver la cohésion effective c' et l'angle de frottement interne φ' .



Résistance au cisaillement des argiles

Analyse en chemins de contraintes

Les cercles de Mohr peuvent être représentés par les coordonnées de leur sommet $s = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ et $t = (\sigma'_1 - \sigma'_2)/2$ pour l'analyse des essais de cisaillement à l'appareil triaxial. Dans ce cas, les chemins de contraintes suivis pendant l'essai ont pour allure :

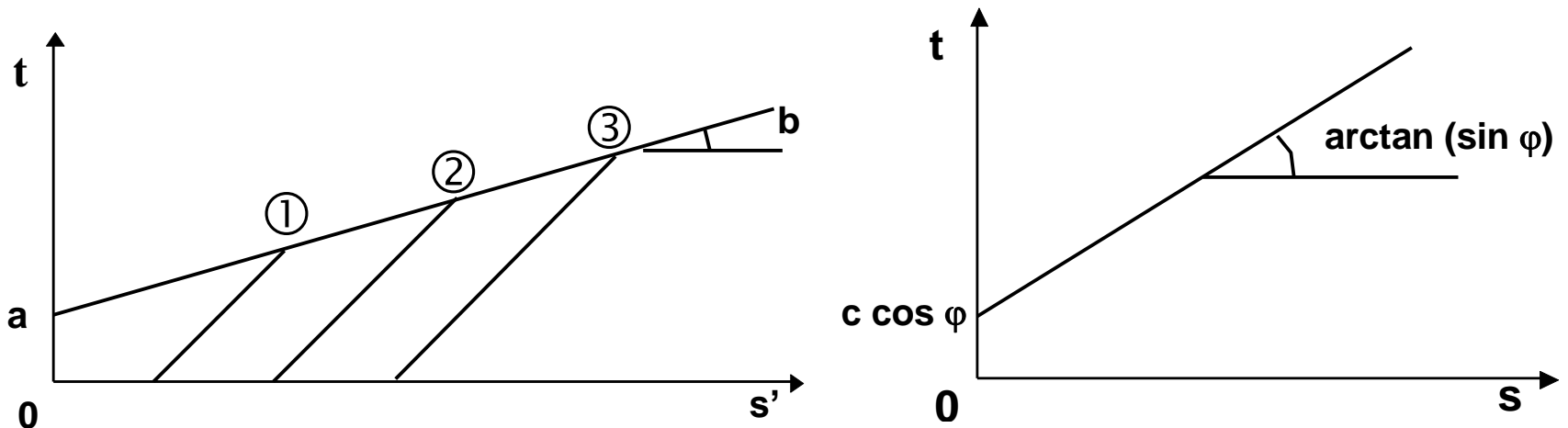


La pression interstitielle vient en déduction de la contrainte s pour passer des contraintes totales aux contraintes effectives.

Résistance au cisaillement des argiles

Analyse en chemins de contraintes

Pour les essais CD, les courbes déduites de l'essai ont pour allure :

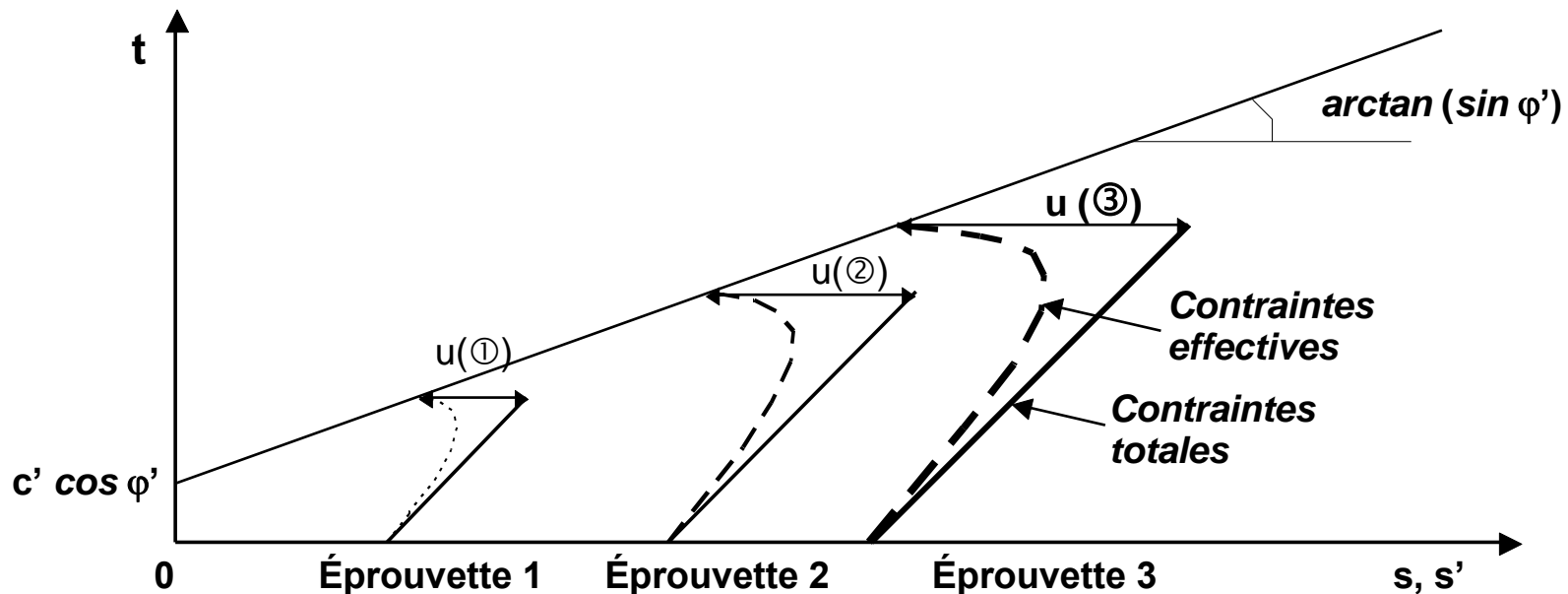


L'ordonnée à l'origine a est égale à $c \cos \varphi$ et l'angle de la droite avec l'axe horizontal b est tel que $\sin \varphi = \tan b$.

Résistance au cisaillement des argiles

Analyse en chemins de contraintes

Pour les essais CU+u, les courbes déduites de l'essai ont pour allure :



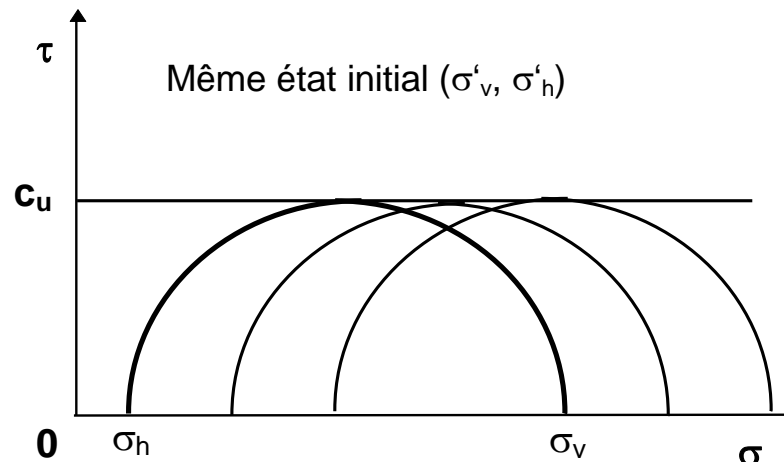
Rappel : l'ordonnée à l'origine a est égale à $c \cos \varphi$ et l'angle de la droite avec l'axe horizontal b est tel que $\sin \varphi = \tan b$.

Résistance au cisaillement des argiles

Comportement non drainé – Essais non drainés (CU)

Préambule

Si l'on effectue un essai non drainé sur des éprouvettes qui sont toutes dans le même état initial, l'expérience montre que le sol possède une résistance unique, appelée « cohésion non drainée », qui se traduit par le fait que tous les cercles de Mohr ont le même diamètre. Le type d'essai à réaliser dans ce but est une sorte d'essai CUU, dans la mesure où l'on doit consolider le sol sous une même contrainte σ_3 pour créer l'état initial, puis faire un essai totalement non drainé à partir de pressions de cellule (aussi appelées σ_3) différentes. Sinon on n'aurait qu'un seul cercle de Mohr.

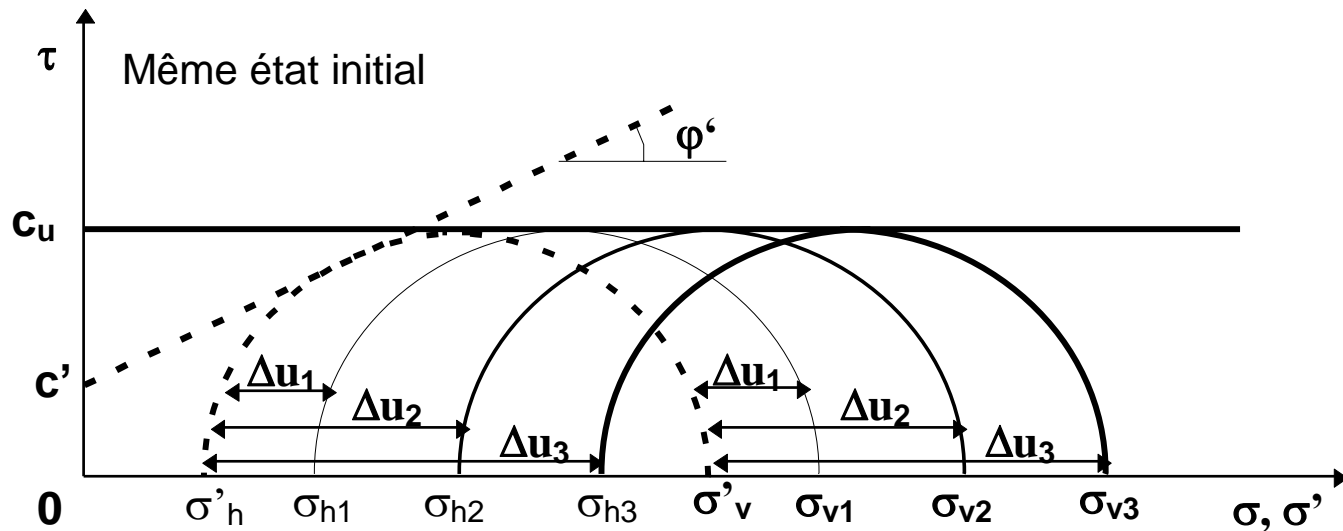


Résistance au cisaillement des argiles

Comportement non drainé – Essais non drainés (CU)

Préambule

Pour rester dans le cadre du principe des contraintes effectives, qui dit que le même comportement correspond nécessairement à des contraintes effectives identiques, cela s'interprète comme une adaptation des pressions interstitielles pour qu'il n'y ait qu'un seul cercle de Mohr en contraintes effectives, tangent au critère de rupture.

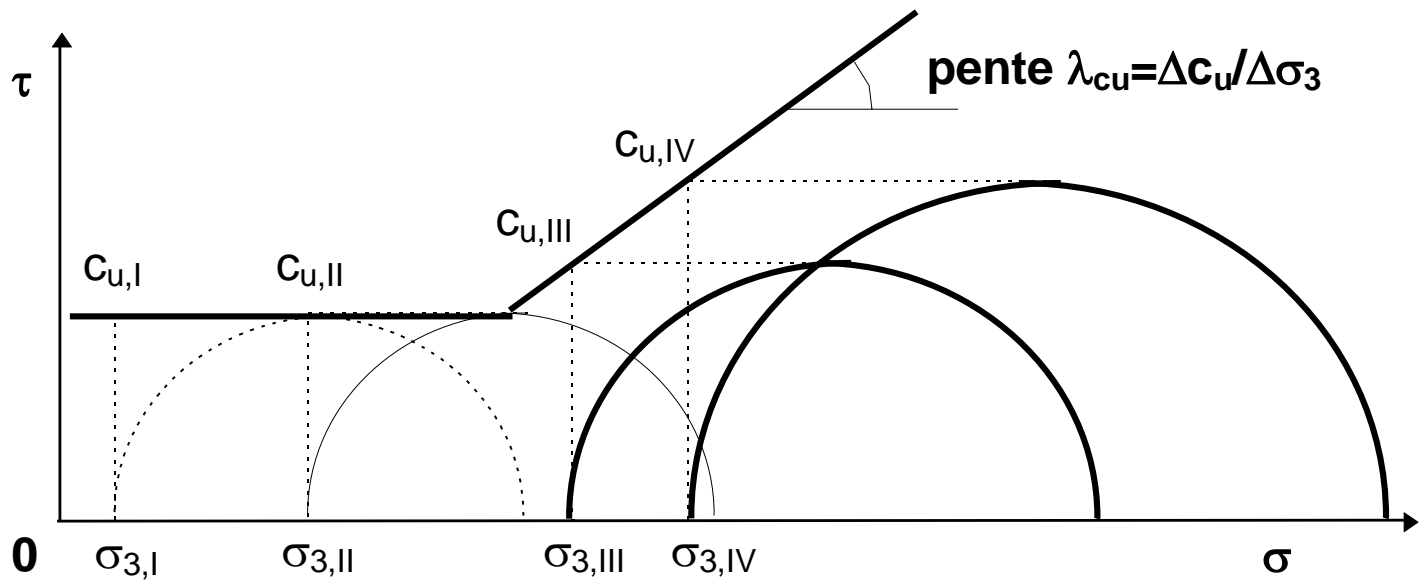


Résistance au cisaillement des argiles

Comportement non drainé – Essais consolidés non drainés (CU)

Pour analyser le comportement non drainé des argiles, il n'est pas besoin de mesurer u , mais on peut bien sûr utiliser les essais CU+ u pour cette analyse, effectuée en contraintes totales. L'interprétation de l'essai CU rattache chaque valeur de c_u à la contrainte effective de consolidation σ'_3 .

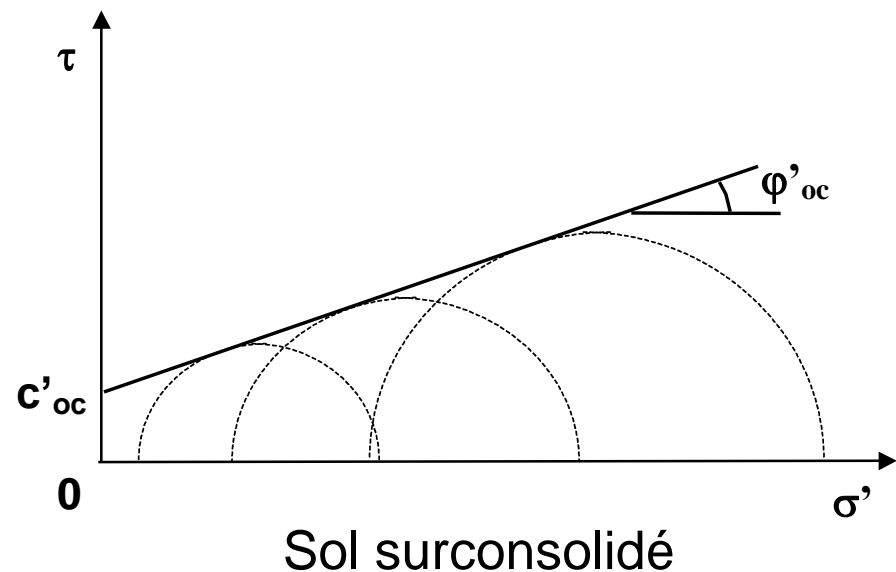
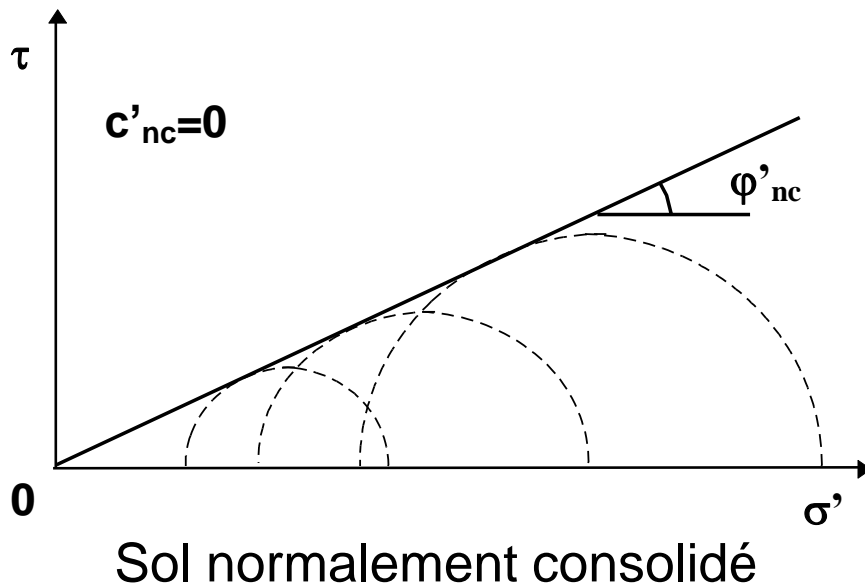
On en déduit le coefficient de variation de c_u en fonction de σ'_3 , noté λ_{cu} .



Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Influence de la surconsolidation

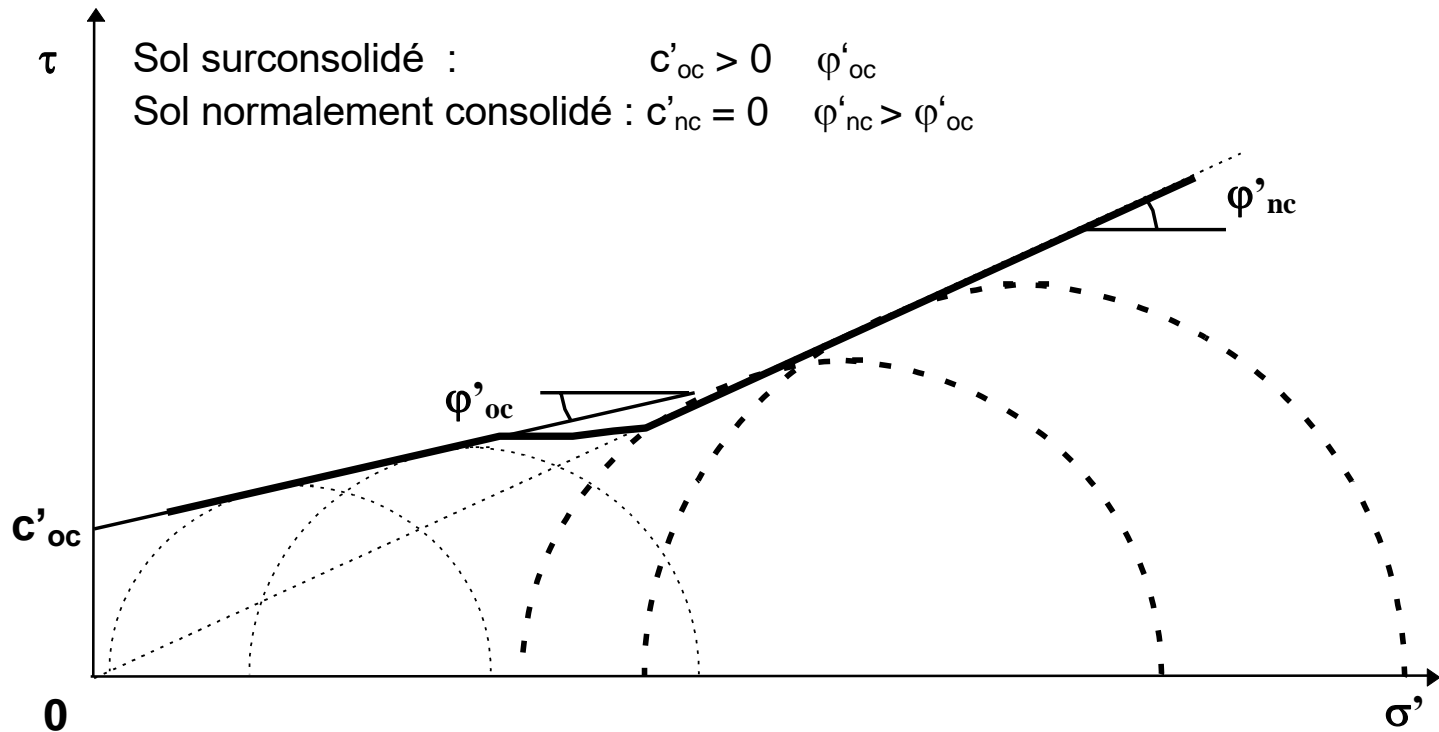
Il reste beaucoup de questions sans réponse définitive ou même sans réponse concernant la résistance des sols, notamment l'effet de la rotation des champs de contraintes et de déformations, qui n'est pas reproduite dans les essais. L'influence de la surconsolidation du sol est une des questions dont la réponse n'est pas bien définie. On sait que les critères de rupture des sols normalement consolidés et surconsolidés diffèrent :



Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Influence de la surconsolidation

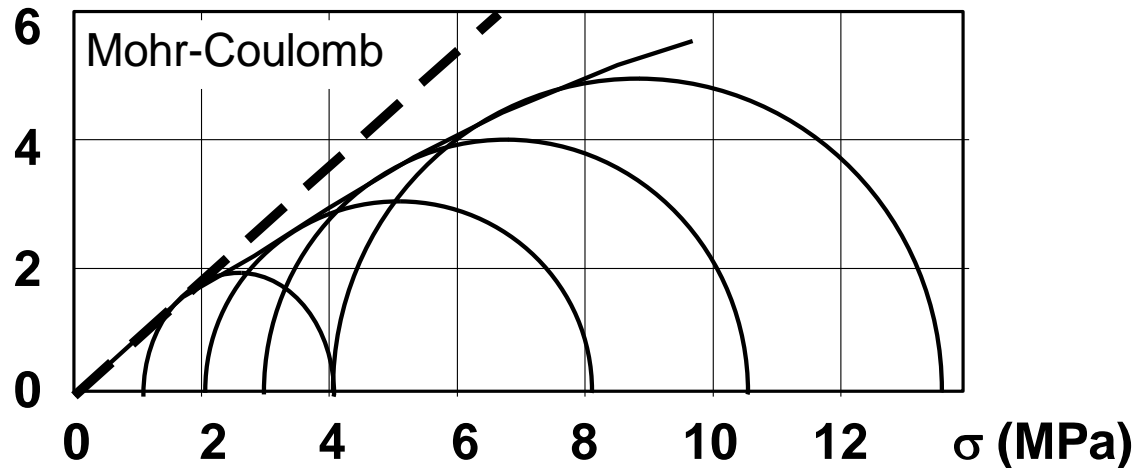
On peut imaginer que la continuité entre les états surconsolidés (faibles contraintes) et surconsolidés (fortes contraintes) se traduise comme cela :



Résistance au cisaillement des argiles

Comportement drainé – Influence de la surconsolidation

Mais il faut garder à l'esprit la variation du critère de rupture pour les fortes contraintes, qui a tendance à s'incurver :



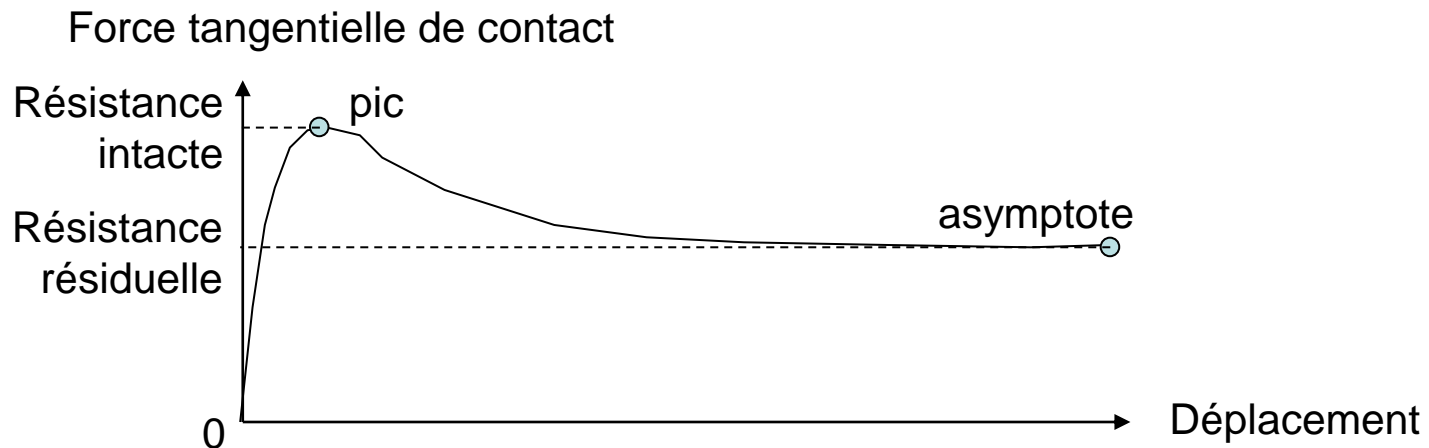
Essais sur du sable, mais on devrait trouver la même chose pour les argiles très denses, susceptibles de résister à de telles charges.

Résistance au cisaillement des argiles

Résistance résiduelle

La notion de résistance résiduelle a été inventée pour représenter le comportement des sols sur les surfaces de glissement anciennes. On a souvent observé la réactivation de glissements historiques ou très anciens dont l'instabilité ne pouvait être calculée en utilisant les paramètres de résistance du sol du site.

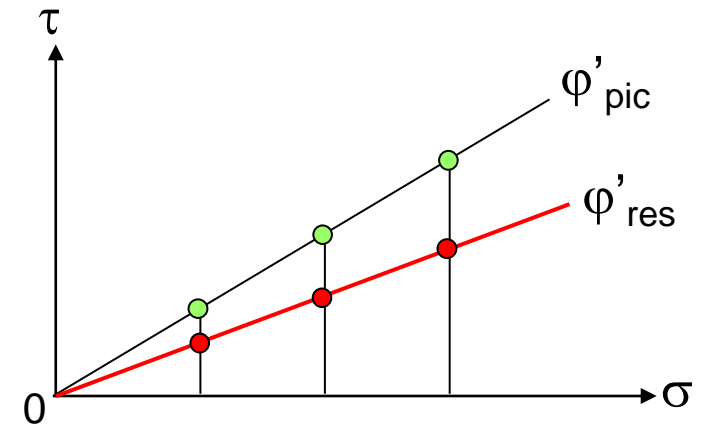
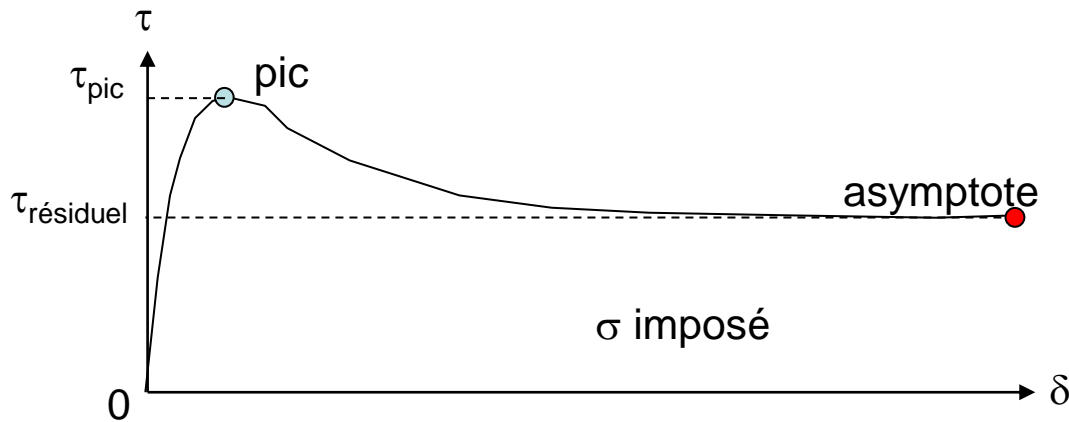
L'idée de déterminer les propriétés du sol dans des essais de cisaillement où l'on fait frotter les deux demi-éprouvettes sur la surface de rupture a permis de comprendre qu'un frottement prolongé faisait évoluer la résistance de contact vers une valeur plus faible, appelée « résiduelle ».



Résistance au cisaillement des argiles

Résistance résiduelle

Si l'on réalise plusieurs essais de cisaillement direct prolongé jusqu'à l'état résiduel, et si l'on utilise les résistances de pic et résiduelle pour déterminer des points du diagramme (s, t), comme on l'a vu précédemment, on obtient deux droites, le critère de rupture classique pour la résistance de pic et une autre droite pour la résistance résiduelle. On utilisera la résistance résiduelle sur les anciennes surfaces de glissement.

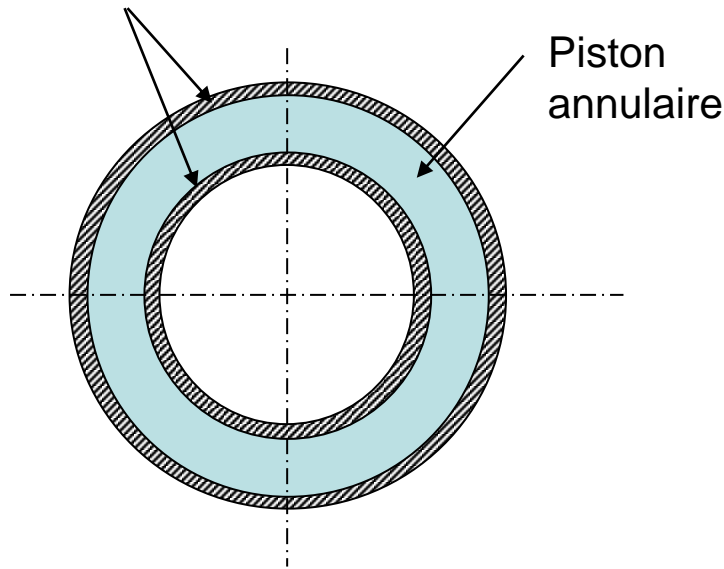


Résistance au cisaillement des argiles

Résistance résiduelle

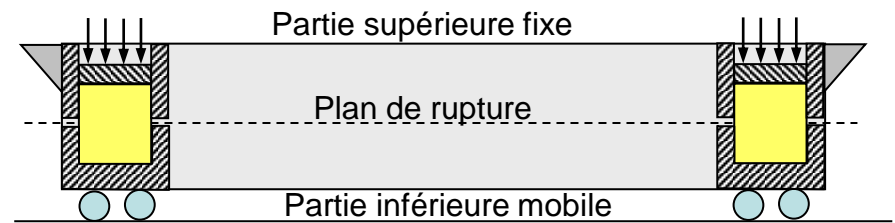
Pour déterminer expérimentalement la résistance résiduelle d'un sol argileux, il a fallu imaginer un dispositif mécanique permettant d'imposer un grand déplacement relatif sur la surface de rupture. Cela a été fait en construisant une boîte annulaire du type représenté sur la figure.

Bords de la demi-boîte supérieure



Vue de dessus

Diamètre 30-40 cm

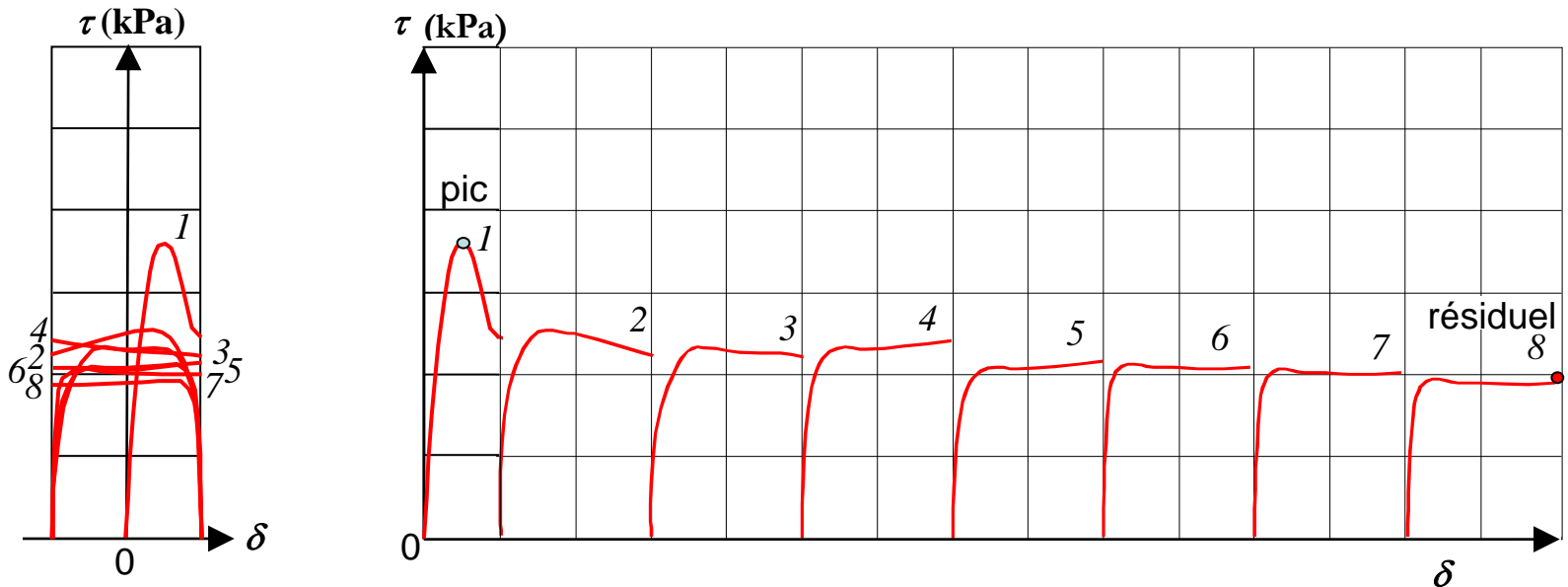


Vue en coupe

Résistance au cisaillement des argiles

Résistance résiduelle

Pour disposer d'un matériel plus pratique, on a utilisé la boîte de cisaillement classique en la faisant fonctionner alternativement dans les deux sens pour « user » la surface de glissement.



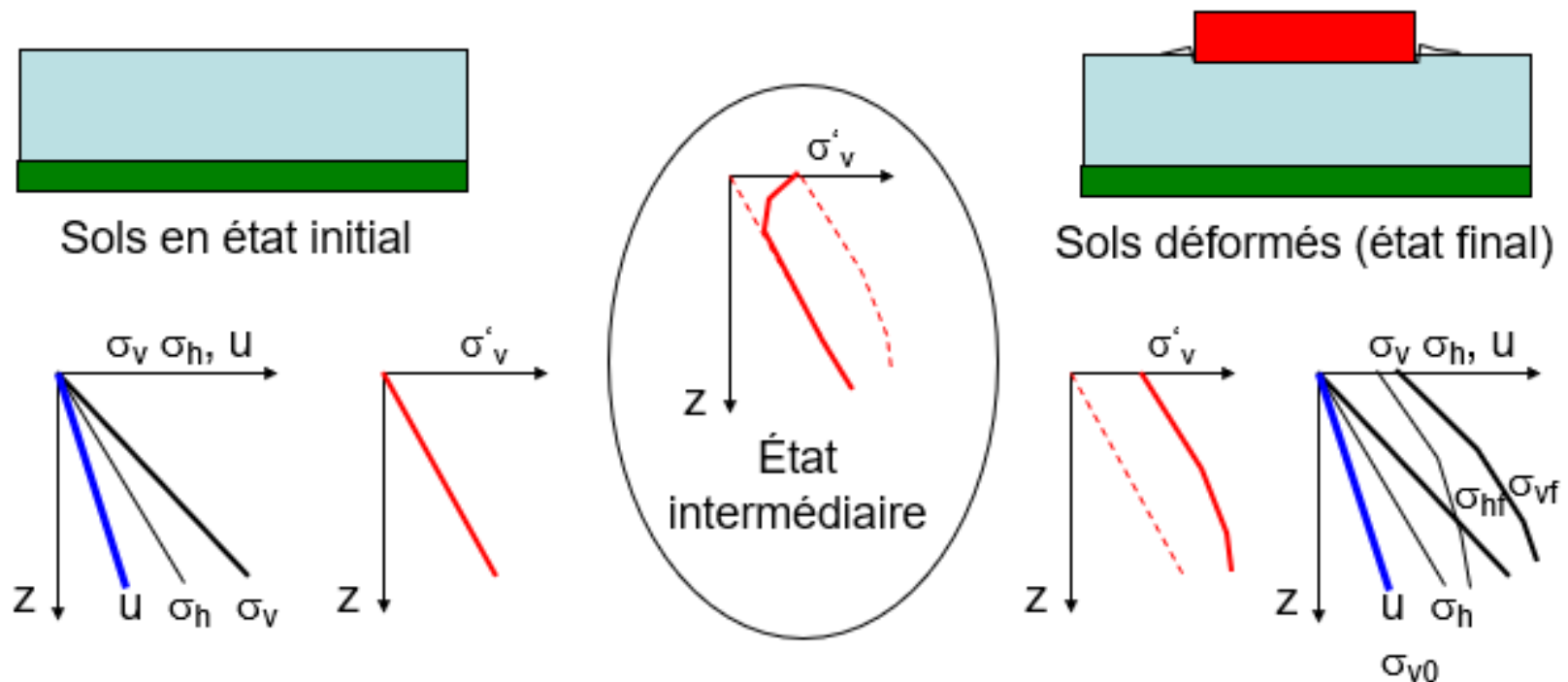
La comparaison des essais de cisaillement annulaire et de cisaillement alterné a conclu que les méthodes sont équivalentes. Les essais alternés ont l'avantage de nécessiter des éprouvettes plus petites et faciles à obtenir.

Rappel de la consolidation et son rôle

Dans un sol saturé peu perméable, l'eau ne peut se déplacer instantanément lors de l'application des charges et le volume ne varie pas (mais des déformations à volume constant sont possibles).

Le principe des contraintes effectives induit que les contraintes effectives s'adaptent pour créer les déformations non drainées, sans devenir égales aux variations des contraintes totales dues au chargement.

Il se crée un état provisoire, dans lequel la surpression interstitielle compense la différence entre la contrainte totale et la contrainte effective.



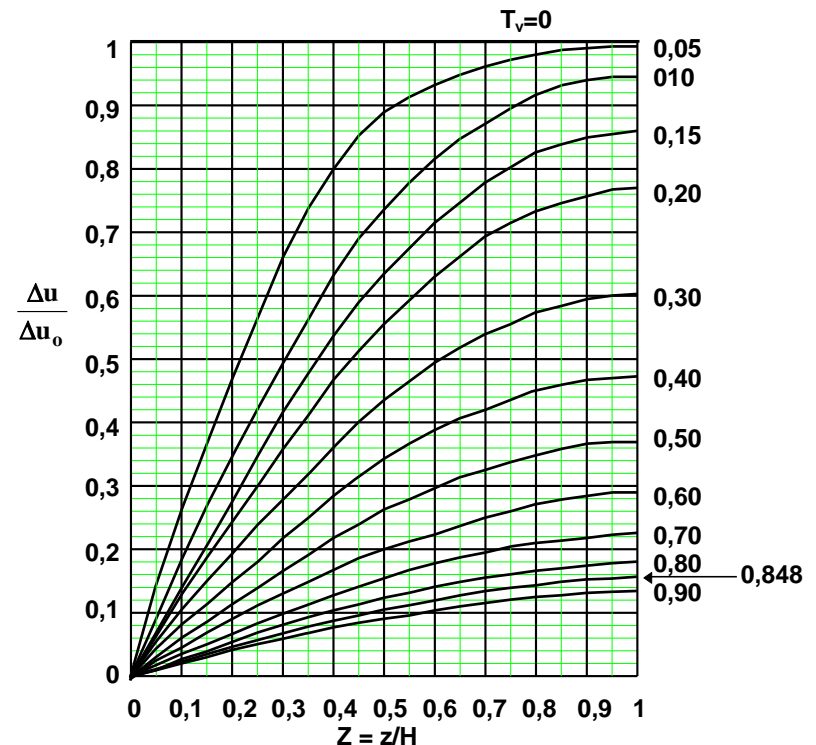
On admet :

- que le sol est saturé, les particules indéformables et l'eau incompressible,
- que les variations de volume du sol sont égales au volume d'eau qui sort,
- que les déformations du sol sont linéaires et proportionnelles à $\Delta\sigma'_v$,
- que les lois de l'hydraulique et la loi de Darcy s'appliquent.

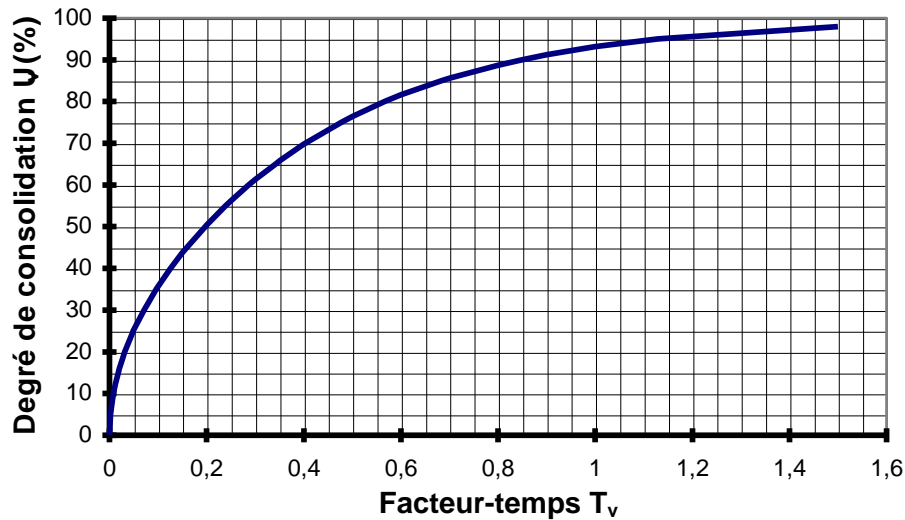
On obtient l'équation

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Et sa solution en fonction du facteur temps T_v



Le degré de consolidation $U_v(T_v)$ est égal à :

$$U_v(T_v) = 1 - \frac{\int_0^1 \Delta u(Z, T_v) dZ}{\int_0^1 \Delta u_0 dZ}$$


$$T_v = c_v t / H^2$$

c_v est déterminé sur un échantillon de sol lors d'un essai œdométrique, H est la longueur de drainage, t le temps nécessaire pour le T_v qui correspond au degré de consolidation souhaité.

En fonction du degré de consolidation la résistance à court terme des argiles augmente avec ce dernier.

On a la relation:

variation de la cohésion non drainée c_u = variation de la pression de consolidation notée $\Delta\sigma'_3$, multipliée par $\text{tg } \lambda_{cu}$

(voir Essai CD)

Ceci est très utile lors de la construction par étapes des remblais sur sol mou (voir remblai sur sol mou)

Résistance au cisaillement des argiles

Résumé

La résistance des argiles déterminée dans les essais de laboratoire est caractérisée par :

- la différence entre un comportement drainé et un comportement non drainé,
- la différence entre le comportement du sol « intact » ou quasi intact et le comportement en grand déplacement sur une surface de rupture (comportement résiduel),
- l'influence de l'état initial (surconsolidation),
- la cohésion effective c' est liée à la surconsolidation,
- l'angle de frottement interne φ' est inférieur à 30 degrés,
- la cohésion non drainée c_u augmente avec la contrainte de consolidation au-delà de la pression de préconsolidation.