

Ressources Éducatives Libres

RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey



Novembre 2023

La résistance au cisaillement d'un sol est la contrainte maximale de cisaillement que le sol peut supporter, le cisaillement étant le mode de rupture dans lequel la portion du sol situé d'un côté d'un plan ou d'une surface glisse le long de la portion située de l'autre côté.

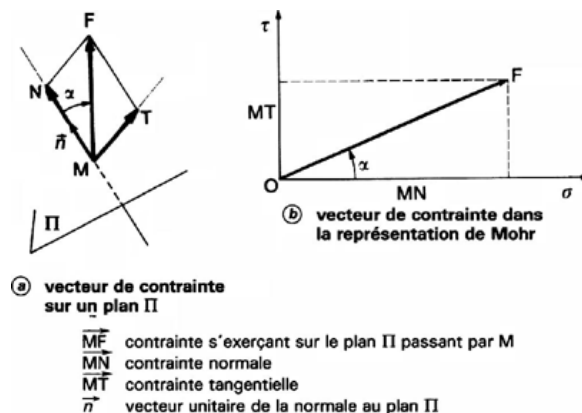
Dans tous les sols, il existe un frottement qui se manifeste aux points de contact entre les grains. Ce frottement intergranulaire est mesuré par l'angle de frottement interne noté ϕ .

Dans les sols très fins, on rencontre en plus des frottements intergranulaires, des forces d'attraction entre particules (résultant à la fois de la structure de ces particules et de leur très faible dimension) qui se traduisent par une « cohésion du sol ». Elle est exprimée par une pression et varie en fonction de la teneur en eau des sols. D'après Coulomb, «la cohésion d'un sol est la résistance que ses particules solides opposent à leur désunion».

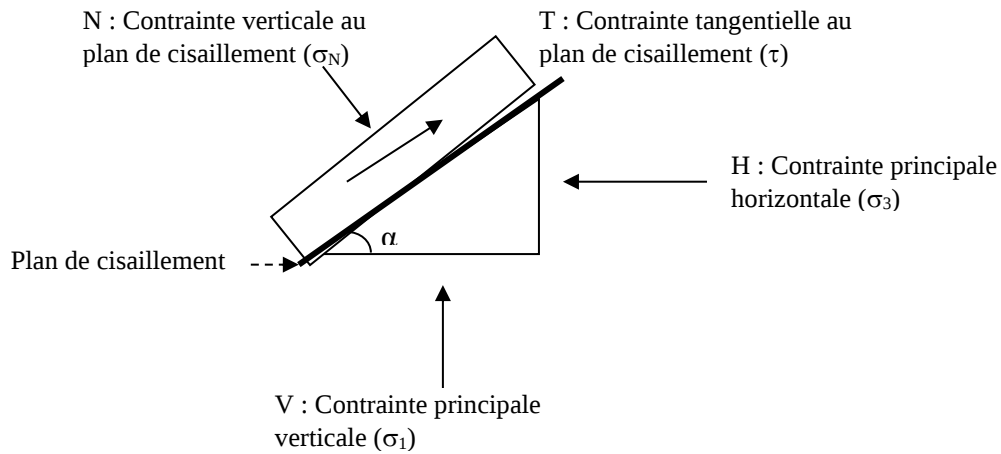
1- Etats de contrainte - Définition du Cercle de Mohr - Courbe intrinsèque

Soit une section unitaire dans un massif de sol. La résultante des forces (forces extérieures, poids propre) qui s'exercent sur cette section est la contrainte totale.

Un vecteur contrainte $\vec{\sigma}$ en un point d'un milieu continu peut être projeté sur la normale $\vec{n}$ et sur le plan de la surface. On a ainsi : $\vec{\sigma} = \sigma \vec{n} + \vec{\tau}$ $\vec{n}$ et $\vec{t}$ étant les vecteurs unitaires de la normale et de la direction de la contrainte tangentielle dans le plan Π de la section.



Il existe en tout point trois plans privilégiés pour lesquels la contrainte est uniquement normale ($\tau = 0$). Ils sont appelés plans principaux et sont orthogonaux ; les contraintes normales correspondantes sont les contraintes principales notées : $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Elles sont orthogonales entre elles. En se limitant aux problèmes à deux dimensions, on convient que $\sigma_2 = 0$. Le vecteur contrainte $\vec{\sigma}$ peut donc se décomposer dans le repère des directions principales en deux composantes désignées respectivement par : σ_1 pour la plus grande, σ_3 pour la plus petite. La méthode de Mohr est une manière de représenter graphiquement dans un système de coordonnées orthogonal (σ, τ) un état de contraintes. Les points représentant les contraintes principales ($\tau = 0$) sont donc sur l'axe $O\sigma$.



On trace le cercle de Mohr ayant pour diamètre $\sigma_1 - \sigma_3$ et pour centre $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, σ_1 et σ_3 étant supposés connus en grandeur et en direction. Il est admis que pour tout matériau, si l'on fait varier les couples $(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2})$, les cercles de Mohr correspondants aux contraintes appliquées juste avant la rupture, admettent une même enveloppe appelée **courbe intrinsèque**. Cette courbe sépare dans le plan (σ, τ) les zones de contraintes possibles, des zones de contraintes impossibles à atteindre parce qu'il y a rupture du matériau avant.

Pour les sols, à des niveaux de contrainte courant en construction, on peut assimiler la courbe intrinsèque à une droite d'équation :

- sol sec : $\tau = C + \sigma \tan \varphi$
- sol saturé : $\tau = C + (\sigma - u) \tan \varphi = C + \sigma' \tan \varphi$

C'est le critère de Mohr-Coulomb.

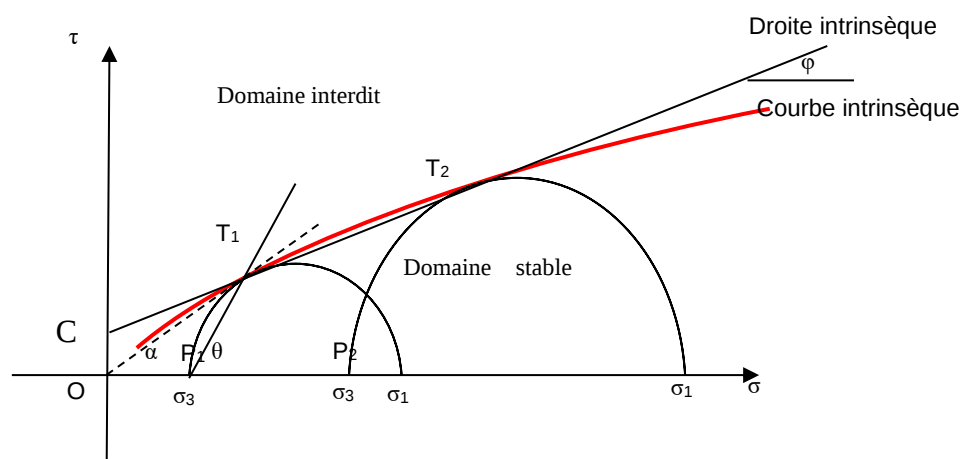


Figure 1: Courbe et Droite intrinsèques

Appelée **droite de Coulomb**, cette droite est définie à l'aide de l'ordonnée à l'origine qui est la cohésion **C** et de l'angle que fait cette droite avec l'axe des contraintes normales σ qui est

l'angle de frottement interne φ ou angle de résistance aux contraintes tangentielles. Elle coupe l'axe des abscisses à $-C \cdot \cotg \varphi$

Remarques :

☞ La perpendiculaire au point de tangence d'un cercle donné à la droite intrinsèque coupe l'axe des contraintes au milieu du cercle.

☞ À la rupture, le cercle de Mohr devient tangent à la courbe intrinsèque en un point T qui correspond à l'orientation du plan de rupture dans l'éprouvette et dont les coordonnées (σ, τ) sont égales aux contraintes normale et tangentielle qui s'exercent sur ce plan.

☞ Les vecteurs contraintes s'appliquant sur les plans de cisaillement $(PT_1, PT_2, \dots)$ sont OT_1 et OT_2 (figure 1), T_1 et T_2 étant les points de tangence des cercles avec la droite de Mohr-Coulomb. L'orientation des plans de cisaillement fait un angle $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$.

☞ Un sol tel que $C = 0$ et $\varphi \neq 0$ est un sol pulvérulent ; $C \neq 0$ et $\varphi \neq 0$ est un sol cohérent ; $C \neq 0$ et $\varphi = 0$ est un sol purement cohérent. (ex : la bentonite).

☞ Un calcul trigonométrique conduit aux relations suivantes :

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 2C \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad \sigma_3 = \sigma_1 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - 2C \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

2- Différentes caractéristiques mécaniques d'un sol

Les valeurs de C et φ dépendent des conditions d'essais (drainage, vitesse de chargement, consolidation, ...). On distingue les **caractéristiques apparentes** et les **caractéristiques effectives**.

Un comportement à court terme est caractérisé par la non-évacuation de l'eau. Le sol se déforme à volume constant. Dans un comportement à long terme, l'eau s'est évacuée après un assez long chargement.

2-1- Caractéristiques apparentes

Elles sont également dénommées **caractéristiques non consolidées non drainées** lorsqu'elles sont déterminées à l'essai triaxial. Leurs symboles sont les suivants :

- sols non saturés: Cohésion apparente C_{uu} (kPa); Angle de frottement apparent φ_{uu} (°)
- sols saturés : Cohésion non drainée C_{uu} (kPa) avec $\varphi_{uu} = 0$.

Ces caractéristiques traduisent le comportement du sol lorsque les sollicitations sont telles qu'aucune consolidation n'a le temps de se produire. Elles sont mesurées soit par un essai

triaxial UU, soit par un essai de cisaillement non consolidé, rapide (essai non normalisé). Ces essais conduisent à déterminer des contraintes totales.

Sols non saturés : $\tau = C_{uu} + \sigma \tan \phi_{uu}$ Sol saturé : $\tau = C_{uu}$ ($\tan \phi_{uu} = 0$)

On réserve ces résultats aux dimensionnements sur sols non saturés et pour calculer des comportements d'ouvrage à court terme.

Exemple d'utilisation : soit un terrain argileux très peu perméable, sur lequel est prévue la construction d'un immeuble transmettant au sol une charge q ; la vitesse de construction (vitesse de chargement) peut être très grande par rapport à celle de drainage du sol.

2-2- Caractéristiques effectives

Leurs symboles Cohésion effective C' (kPa), Angle de frottement effectif ϕ' (degrés)

Ces caractéristiques représentent le comportement du matériau lorsque les pressions interstitielles sont nulles ou parfaitement connues ; elles sont déterminées en appliquant la formule $\tau' = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$. Elles sont mesurées soit par un essai de cisaillement consolidé lent, soit par un essai triaxial consolidé drainé (CD), soit par un essai triaxial CU+u. Ils conviennent pour des sols saturés ou non, de perméabilité assez élevée.

Exemple d'utilisation : pour un bâtiment construit sur du sable; le drainage est rapide; la consolidation primaire se fait en cours de construction.

3- Essais de cisaillement au laboratoire

Il s'agit principalement de deux essais. L'essai de cisaillement rectiligne à la boîte et l'essai triaxial.

3-1- Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Principe

L'appareil utilisé pour l'essai, appelé boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande, est constitué (figure 1) de deux châssis métalliques indépendants, séparés par le plan de cisaillement.

L'essai consiste à appliquer à l'éprouvette une force normale constante N sur sa face supérieure, à tirer horizontalement sur un châssis à vitesse constante V et à mesurer la force de cisaillement T sur l'autre ainsi que les déplacements horizontaux relatifs δ correspondants.

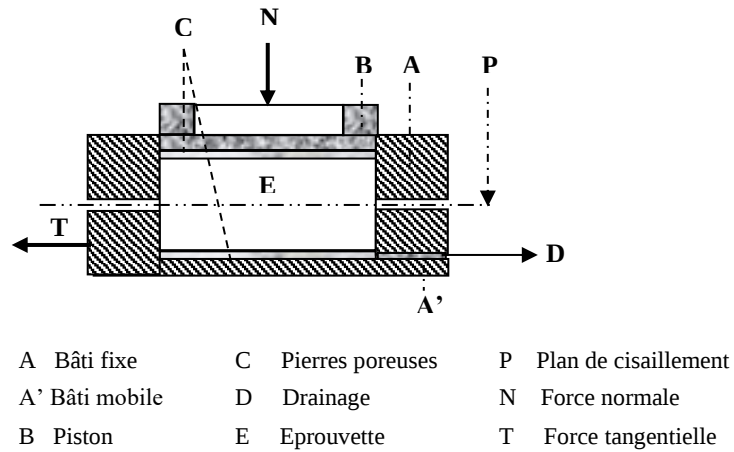


Figure 1 - Boîte de cisaillement

Exploitation des résultats

Soit S la section de l'échantillon ;

$\sigma = \frac{N}{S}$, la contrainte normale appliquée à l'échantillon, supposée uniforme

$\tau = \frac{T_{\max}}{S}$ la contrainte tangentielle (de cisaillement) maximale mesurée à la rupture

En reproduisant l'essai sur plusieurs éprouvettes, pour différentes valeurs de la contrainte normale σ , on peut construire point par point la courbe intrinsèque.

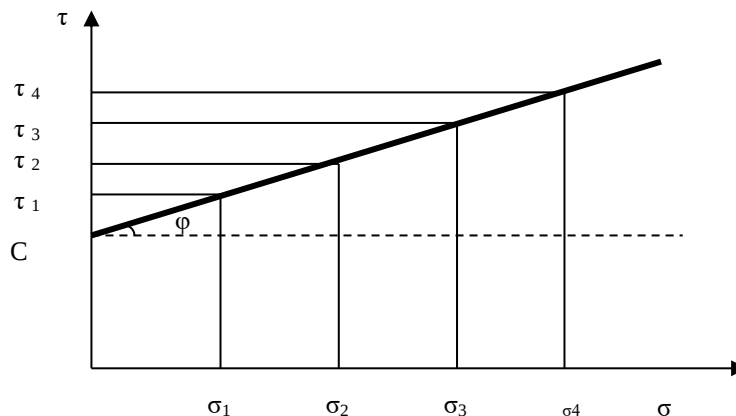


Figure 2 : Essai de cisaillement (Détermination de C et ϕ)

3-2- L'essai triaxial

Principe

L'appareil est constitué d'une enceinte fermée contenant un échantillon cylindrique se trouvant dans une enveloppe souple et étanche et dont les faces inférieure et supérieure sont généralement au contact d'un disque drainant (pierre poreuse). L'enceinte est remplie d'eau sous pression.

L'essai consiste à faire croître F en enfonçant le piston à vitesse constante tout en maintenant la pression σ_3 constante. On a : $\frac{F}{S} = q = \sigma_1 - \sigma_3$.

Au moment de la rupture, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ est connu et correspond au cercle de Mohr tangent à la courbe intrinsèque. L'essai permet de connaître également la déformation verticale et éventuellement la pression interstitielle u et les variations de volume de l'éprouvette.

Au cours de l'essai, on peut laisser expulser l'eau interstitielle (essai drainé) ou l'empêcher (essai non drainé).

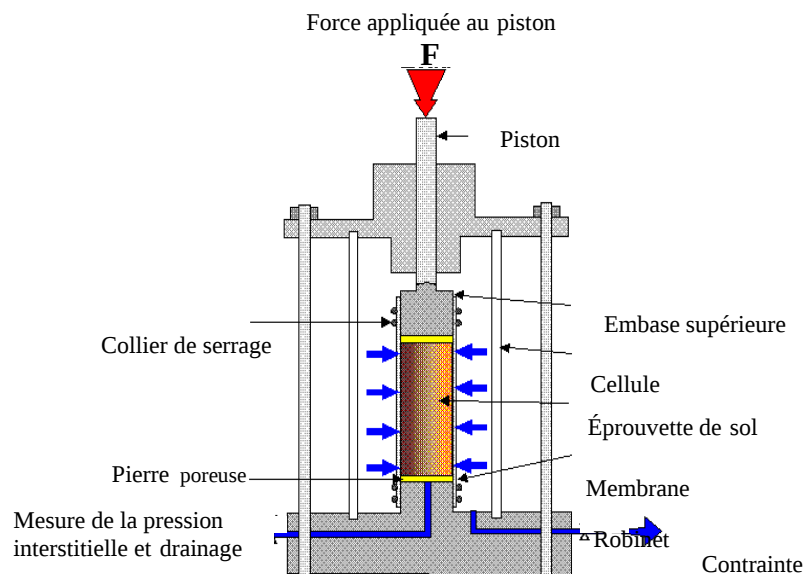


Figure 3 : Appareil triaxial

Exploitation des résultats

En répétant l'essai pour différentes valeurs de σ_3 , plusieurs cercles de Mohr peuvent être déterminés. Il est alors possible de tracer la courbe intrinsèque (voir figure 1).

Type d'essais

Différentes modalités d'essais sont définies:

- **essais consolidés-drainés (CD)** ou essai S Test :

Dans cet essai, l'échantillon est cisailé, après consolidation avec une pression interstitielle Δu nulle à tout instant. Il consiste à déterminer la courbe intrinsèque du squelette solide du sol. On a ainsi à tout instant $\sigma = \sigma'$. Correspondant au comportement à long terme, il est utilisé

lorsqu'on désire connaître la résistance au cisaillement des ouvrages dont l'eau est appelé à se dissiper (remblais compactés, barrages, ...)

- **essais consolidés-non drainés (CU)** ou essai R (conçu afin de palier à la lenteur de l'essai S) ; L'échantillon est consolidé sous un champ de contraintes sphériques **avant** d'être mis en charge. Si au cours de l'étape de cisaillement on mesure la pression interstitielle pendant le chargement jusqu'à la rupture (on parle alors d'**essais CU avec mesure de u**) ; Il peut être interprété en contraintes totales ou en contraintes intergranulaires si u a été mesurée.

- **essais non consolidés-non drainés (UU)** ou essai **Q** (Quick Test) : L'échantillon est cisailé rapidement dès application de la charge ; celle-ci passe ainsi intégralement sur la phase liquide. Cet essai doit donc se faire sur les sols où k est petit. Il fournit la limite inférieure de la résistance au cisaillement. Il est nécessairement interprété en contraintes totales. Il est réservé pour les fondations de fouille qu'on veut exécuter rapidement ; il suppose que la teneur en eau n'a pas variée et permet de calculer le pouvoir portant du sol dans l'état où il se trouve.