

### Quel est le principe de cet essai ?

L'essai triaxial consiste à appliquer à une éprouvette cylindrique de rapport  $H/D=2$ , une contrainte hydrostatique (ou radiale) constante et une contrainte déviatorique (ou axiale) croissante.

Sur sa surface latérale, l'éprouvette est recouverte d'une membrane souple et imperméable (en latex ou néoprène en général). Elle est montée dans une enceinte étanche avec embases supérieures et inférieures et disques drainants ou non selon le type d'essais à réaliser.

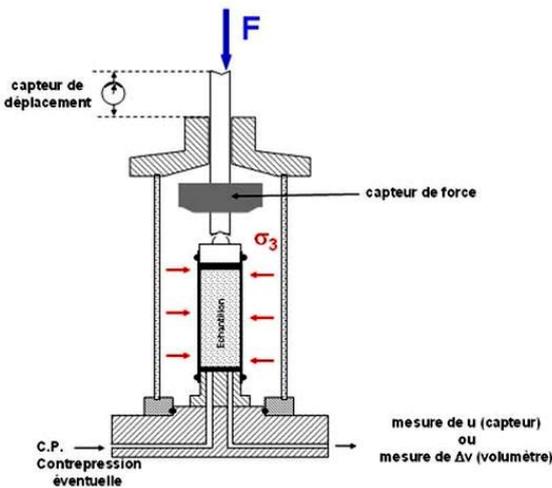
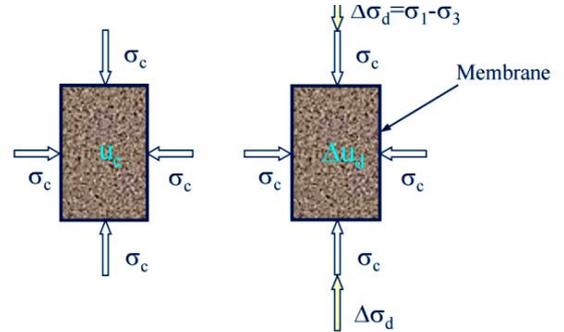


Schéma de principe du montage de l'éprouvette dans la cellule triaxiale

Le piston de chargement vertical s'appuie sur le chapeau supérieur.

La cellule est ensuite remplie d'eau que l'on met sous pression. Cette pression dite de confinement ( $\sigma_3$ ) s'applique tout autour de l'éprouvette et sans effort vertical, elle se trouve dans des conditions dites « isotropes ».

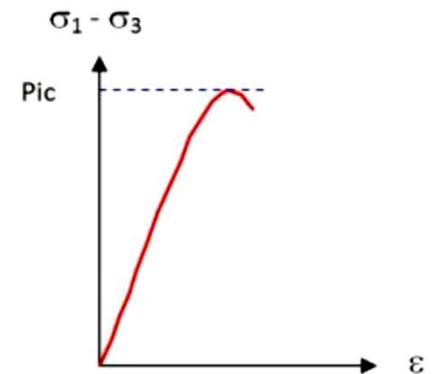
Après saturation et consolidation éventuelles de l'échantillon, on impose à l'éprouvette une déformation axiale à vitesse constante. Le piston s'enfonce alors et appuie sur l'éprouvette de section  $S$  en faisant croître la force  $F$  que l'on mesure tout en maintenant le confinement constant.

On obtient  $F/S = q = \sigma_1 - \sigma_3$   
Avec  $\sigma_1 =$  contrainte axiale totale

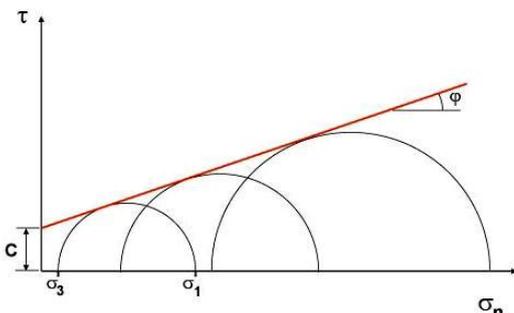
La courbe effort-déformation ( $\sigma_1 - \sigma_3 ; \epsilon$ ) peut être enregistrée au cours de l'essai. La résistance au cisaillement correspond souvent au maximum du déviateur atteint lors de cette compression triaxiale.

Ce déviateur maximal des contraintes (valeur du pic :  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ) est obtenu lors de la rupture de l'éprouvette. Il définit alors un cercle de Mohr tangent à la courbe intrinsèque de l'échantillon testé.

Plusieurs essais sont effectués (de 3 à 4) à des pressions de cellules différentes et représentatives du confinement in-situ.



Courbe effort -déformation



Les caractéristiques mécaniques sont obtenues en représentant dans le plan de Mohr l'état des contraintes à la rupture, soit la cohésion ( $c$  ou  $c'$ ) et l'angle de frottement ( $\phi$  ou  $\phi'$ ), respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente de la droite intrinsèque (en conditions drainées ou non).

Plan de Mohr-Coulomb - courbe intrinsèque

Dans l'approche automatique de l'essai, les procédures sont asservies via un logiciel d'application sous un environnement convivial Windows. Un PC gère en permanence les consignes et établit en temps réel les tableaux et graphes recherchés.

L'essai triaxial se réalise en général sur 3 à 4 éprouvettes de même taille. Il se décompose (sauf pour les essais UU\*) en 3 phases : saturation, consolidation puis cisaillement.

Les 2 premières étapes étant longues, il convient de mener l'essai sur 3 à 4 cellules en même temps puis de cisailier les éprouvettes, les unes après les autres sur une presse à vitesse imposée (ou simultanément sur plusieurs presses).

L'un des choix importants est la mise en pression : soit selon un tableau classique air-eau manuel, soit par contrôleurs pression-volume (CPV) permettant un contrôle à la fois local et par ordinateur.

Un ensemble de mesure est nécessaire pour connaître les forces, pressions et déplacements et il existe un large choix de capteurs. On peut y ajouter une centrale d'acquisition et un logiciel de gestion de l'essai pour le rendre totalement gérable à distance et automatique.



### Quels sont les équipements nécessaires pour réaliser un essai triaxial ?

Il faut pouvoir découper les échantillons, les monter dans la ou les cellules, les mettre sous pression, mesurer les variations de volume, appliquer une charge verticale à vitesse constante et mesurer les paramètres effort, pression interstitielle et déplacement pendant l'écrasement de l'éprouvette.

Il faut donc :

- **1 Presse triaxiale** : de 10 ou 50 kN pour les sols, de 100 à 2000kN sur roches, bâti dynamique de 10 à 40kN (et de 2 à 10Hz) par exemple. Elle est choisie selon le type d'échantillons testés et de leur raideur présumée (les sols type limon ou argile de petits diamètres sont le plus souvent testés sur des presses de 10kN)
- **1 à 3 cellules triaxiales** : choix selon le type d'essai : production ou recherche. Elles existent de différentes tailles selon les diamètres à tester et selon l'utilisation que l'on veut en faire (aspect ergonomique du système : poids et répétition des manipulations). Les cellules sols permettent de confiner des éprouvettes jusque 1,7 ou 2 ou 3,5MPa. Pour les roches on peut atteindre jusque 64 ou 100MPa (la chambre n'est plus alors en acrylique transparent mais en acier inox de grande épaisseur et le fluide utilisé est alors de l'huile et non plus de l'eau). Chaque cellule possède 5 robinets pour permettre le remplissage-vidange et les drainages supérieurs et inférieurs. Les cellules peuvent être équipées de piédestaux et chapeaux interchangeable adaptés aux diamètres des échantillons à tester (exemple la cellule basique pour petits diamètres accepte les tailles de 35 - 38 ou 50mm).

(\*) : UU : non consolidé, non drainé, contrairement aux essais CD et CU (consolidés drainés ou consolidés non drainés pour lesquels des phases de saturation et de consolidation sont nécessaires)

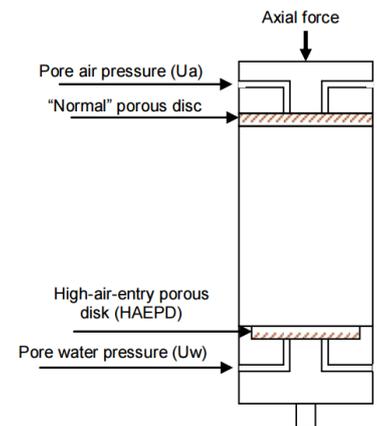
- **Choisir la taille des éprouvettes à tester** : selon les carottages disponibles et le diamètre des grains ( $D_{max}$ ), on choisira les accessoires tels que piédestal et chapeau drainant de diamètre 38 – 50 – 70 ou 100mm ainsi que les consommables nécessaires au montage (membrane, pierres poreuses, disques non drainants, papiers filtres, joints toriques). Des outils existent aussi pour faciliter le montage (outil d'installation des bracelets, tendeur de membrane, moules pour échantillons intacts et remaniés).
- **Les sources de mise en pression** : les anciens systèmes air-eau fonctionnant avec tableau à manomètre, régulateurs d'air, cylindres interface et compresseur sont aujourd'hui avantageusement remplacés par des **contrôleurs pression-volume** permettant d'injecter des pressions précises tout en **mesurant simultanément les variations de volume**. Chaque cellule est alors associée à 2 contrôleurs, l'un pour le confinement et l'autre pour la contre pression. Chaque contrôleur est une seringue poussant via un moteur pas à pas et une vis à billes le piston dans le réservoir rempli d'eau. La pression est régulée par un capteur situé en sortie du contrôleur et la régulation est interne, le contrôleur peut réguler seul la pression désirée via son écran et son clavier. Chaque pas du moteur est compté, on connaît donc parfaitement les volumes entrant et sortant donc on mesure très précisément les variations de volume au sein de l'échantillon. Il est aussi bien-sûr pilotable à distance via une liaison série ou USB permettant d'automatiser les procédures d'essai.  
Il existe de nombreuses versions en terme de **capacité en volume** (200-250-1000cc) et en **pression** (1, 2, 3 et jusque 100MPa et plus) selon la raideur des sols-roches testés et leurs dimensions.
- **1 à 3 capteurs de pression interstitielle** : chaque échantillon doit être relié à un capteur pour mesurer la pression de fluide qui s'y développe au plus près de ce dernier. Le capteur est ainsi monté sur un bloc de saturation connecté directement sur l'un des robinets de la cellule, le plus souvent celui de l'embase inférieure (ou piédestal). La gamme du capteur choisi sera fonction des pressions à appliquer, de la capacité de confinement de la cellule et de celle des contrôleurs (de 1 à 3MPa en standard et jusque 64 MPa ou plus en hautes pressions).
- **1 capteur de force** : c'est lui qui permettra de mesurer les efforts appliqués sur l'échantillon pendant l'essai et de déterminer le déviateur à la rupture. De type externe, il se monte sous la traverse de la presse et est utilisé pour tous les cisaillements quelle que soit la cellule. De type interne, il se monte dans la cellule à la place du piston plein et permet de s'affranchir des frottements du piston et des calculs de correction dus à la pression de confinement. Mais il faut alors prévoir un capteur par cellule. Ils existent dans de multiples gammes de 1 à 64kN (ou plus pour les essais sur roches). Ils sont choisis selon son type, la capacité de la presse, le diamètre de l'éprouvette et le type de sol testé (exemple un 5kN suffit pour la majorité des sols « courants » type argile, limon de 38 à 50mm de diamètre).
- **1 capteur de déplacement** : il permet la mesure des déformations en cours de cisaillement (la norme indiquant la fin de l'essai au maximum après 15% de déformation). Il sera choisi de 25 ou 50mm le plus souvent selon la longueur de l'éprouvette (exemple d'un diamètre de 50mm : la hauteur de l'échantillon sera de 100mm et la déformation max à mesurer de 15% soit 15mm, donc un capteur de 25mm convient).
- **1 acquisition de données** : elle peut être directement intégrée sur la presse triaxiale, ce qui rend le système très compact et évite les longueurs de câble inutiles, ou déportée, en général de 4 ou 8 voies selon le besoin (F, PI, D, capteurs locaux...). Jouant le rôle de conditionneur de signal, elle permet d'alimenter les capteurs (+/- 5V DC) et de récupérer leurs signaux de sortie (tensions de 0 à 10VDC max) pour les transmettre à l'ordinateur de commande via leur interface série RS 232. De résolution généralement de 16 bits, elles assurent une bonne stabilité et fiabilité des mesures.  
Note : Pour les essais triaxiaux dynamiques, des conditionneurs spéciaux à haute vitesse sont utilisés de façon à suivre l'évolution des paramètres en temps réel (1kHz) et sont en liaison USB.

- **1 logiciel de pilotage** : installé sur un ordinateur dédié, il permet de communiquer avec les machines, de calibrer les capteurs à distance, de configurer les essais, de lancer l'acquisition des données et de les visualiser en temps réel et enfin de rapatrier les données des essais sur un tableur type Excel. L'utilisateur peut alors éditer le rapport d'essai.
- **D'autres accessoires sont importants** : la découpe de l'échantillon (tour échantillonneur, échantillonneur-extrudeur vertical ou de table, berceaux, carottiers), la préparation d'eau désaérée (avec cylindre réservoir, tableau distributeur, pompe à vide), l'outillage et les tubulures sont à prévoir pour un nouveau laboratoire.
- **INSTALLATION et FORMATION** des opérateurs : Sols Mesures vous accompagne jusqu'au bout de votre démarche pour que vous puissiez maîtriser votre matériel rapidement et efficacement, dans les meilleures conditions !

### Rappel à propos des équipements pour essais sur sols non-saturés :

Les essais sur échantillons prélevés au-dessus de la nappe phréatique ont peu de chance de répondre au critère de sols saturés des essais conventionnels. Les études tentent donc de plus en plus de se rapprocher des conditions réelles de l'échantillon lors de son prélèvement.

Il faut alors trouver le moyen de recréer au laboratoire des suctions variables (différentiel de pression entre l'eau et l'air dans l'éprouvette) et de pouvoir dans le même temps garantir le maintien de la pression de confinement! La principale difficulté est la mesure des variations de volume, quelle est la part de l'eau, celle de l'air?



Les différentes méthodes proposées par nos partenaires montrent les façons d'accéder soit directement soit indirectement au volume de l'air dans l'éprouvette. L'utilisation d'une céramique à Haute Entrée d'Air (HEA de 1 à 15 bars) au niveau du piédestal en remplacement de la pierre poreuse permet de « bloquer » l'air et d'éviter la désaturation. La mesure des variations de volume de l'eau se fait au moyen d'un contrôleur pression-volume générant la contre-pression. Le contrôle des variations de volume de la phase gazeuse se fait au niveau de la pierre poreuse supérieure.

**Pour plus d'informations, reportez-vous à notre mémo spécifique !**

**SOLS MESURES vous accompagne à la création et au cours du développement de votre laboratoire de mécanique des sols. Nous sommes là pour vous aider à choisir les matériels qui vous conviennent et pour vérifier ensemble si tous les accessoires nécessaires ont été prévus afin de vous livrer un système clé en main !**

**N'hésitez-pas, nous sommes LE spécialiste français de l'équipement pour la mécanique des sols et restons toujours à votre service !**