

# Chapitre 1

## **CARACTÉRISATION AU LABORATOIRE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ARGILES DE L' AISNE**

---

L'étude expérimentale qui suit nous montrera en particulier qu'à court terme, le comportement instantané des argiles raides est irréversible dès les plus petites déformations (moins de 0,5%) ; de plus, la rupture des échantillons au cours des essais triaxiaux survient pour de faibles valeurs de la déformation axiale (moins de 1%). Ces matériaux présentent donc une certaine fragilité à court terme. A long terme, sous des conditions de fluage non drainé par exemple, ces matériaux peuvent présenter des effets différés importants. Une étude expérimentale complète pour la caractérisation de ces différents aspects doit nécessairement comprendre des essais à court terme et des essais à long terme. C'est ce que nous présentons dans ce chapitre.

Le chargement mécanique est appliqué par le biais d'essais triaxiaux axisymétriques de compression, que ce soit pour les essais d'érouissage ou des essais de fluage. Tous ces essais sont principalement effectués en conditions non drainées. En effet, des études antérieures [Giraud, 1993], montrent que pour les argiles de l'Aisne, en raison de leur faible porosité, le couplage hydro-mécanique est peu important. Plus particulièrement, les auteurs concernés montrent que les effets différés sont surtout dûs à la viscosité du matériau et que la part de ces effets qui peut être attribuée à la redistribution des pressions interstitielles (diffusion hydraulique) est faible. De plus, la durée des essais d'érouissage est si courte que les écoulements d'eau ne sont pas mesurables compte tenu des faibles perméabilités de ces argiles.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons les caractéristiques géologiques et les paramètres physiques des argiles qui ont été mesurés en laboratoire. Plus particulièrement, nous montrons que la teneur en eau de ces argiles est faible et qu'il existe une grande dispersion spatiale. Ensuite, nous faisons une description sommaire du principe des essais triaxiaux axisymétriques utilisés au cours des expériences. Enfin nous présentons les résultats essentiels des essais à court terme et les résultats des essais de relaxation et de fluage par paliers.

### **1.1 DESCRIPTION ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES**

#### **1.1.1 Situation géologique**

Les échantillons des argiles testées proviennent des forages effectués dans le département de l'Aisne. La profondeur de prélèvement dans les forages se situe entre 300 et 1200 mètres. Le carottage a été réalisé au moyen d'outils adaptés aux matériaux tendres.

Les échantillons proviennent essentiellement de deux horizons argileux. D'après la stratigraphie et la lithologie des forages, ces horizons sont :

-le Callovo-Oxfordien, qui est une couche d'épaisseur 153 mètres environ, dont la profondeur varie entre 325 et 478 mètres à l'emplacement du forage. Cet horizon est une transition constituée en majeure partie de marnes à 70%. On distingue d'après [Lebon, 1990] trois niveaux différents pour cet horizon. Le premier niveau entre 325 et 381 mètres de profondeur, où il y a alternance de niveaux marneux prépondérants et de lits de calcaires micritiques; le deuxième niveau entre 381 et 427 mètres de profondeur, constitué d'alternances d'argiles carbonatées et de marnes; le troisième niveau entre 427 et 478 mètres constitué d'argiles silteuses carbonatées.

-le Toarcien-Domérien est une couche d'épaisseur 161 mètres située à une profondeur plus grande: entre 693 et 854 mètres. Cet horizon peut aussi être divisé en trois niveaux d'après sa lithologie. Entre 693 et 772 mètres, il y a des argiles noires très peu carbonatées, pyriteuses; de 772 à 786 mètres, il s'agit de silts argilo-carbonatés peu cimentés; enfin de 786 à 854 mètres, il y a des argiles sombres très peu carbonatées avec de petits lits bioclastiques.

Une coupe synthétique (figure 1.1) résume la stratigraphie et la lithologie de l'un des forages. Sur cette coupe LOG, on observe par exemple qu'entre 478 et 693 mètres de profondeur, il n'y a pas d'horizon argileux.

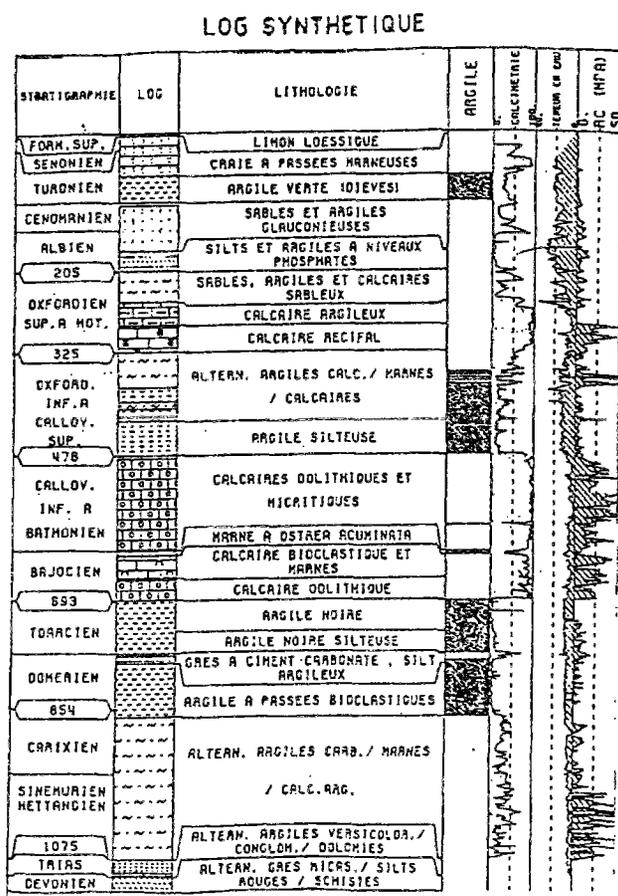


Figure 1.1 LOG synthétique du forage (ANDRA)

Les carottes sont reçues sous forme de tronçon de 30 cm de longueur environ et sont placées dans des cellules dès leur sortie du forage de façon à garantir une bonne conservation jusqu'à l'utilisation au laboratoire. Les échantillons servant aux essais de laboratoire sont taillés dans les carottes provenant des deux horizons précédents et ont en général des diamètres de 36 ou 24 mm et un élançement égal à 2.

Plusieurs procédures sont utilisées pour garantir la stabilité des caractéristiques physiques. Par exemple, les extrémités des échantillons sont surfacées au moyen d'une scie circulaire, ensuite les échantillons sont enveloppés de papier aluminium, le tout immédiatement paraffiné pour garantir la stabilité en teneur en eau.

### 1.1.2 Caractéristiques Physiques

Les paramètres physiques présentés ici ont tous été mesurés par [Rousset, 1989]. Ces mesures ont été effectuées sur un très grand nombre d'échantillons provenant des horizons du Callovo-Oxfordien et du Toarcien-Domérien. Nous insisterons plus particulièrement sur les paramètres physiques les plus significatifs : la teneur en eau, la densité naturelle, et la teneur en carbonate.

#### Teneur en eau

La teneur en eau est déduite d'une pesée différentielle d'un échantillon avant et après passage à l'étuve, selon une procédure classique en mécanique des sols. D'une manière générale, tous les échantillons testés des deux horizons argileux ont une teneur en eau assez faible. L'horizon Callovo-Oxfordien présente une très forte dispersion par rapport à ce paramètre. La figure 1.2 nous montre la variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur pour cet horizon. On y observe que même les plus fortes valeurs restent inférieures à 15%, alors que les plus faibles sont inférieures à 5%. Pour cet horizon, la valeur moyenne calculée est de 9,1% avec un écart type de 4%.

L'horizon Toarcien-Domérien présente par contre des résultats moins dispersés (figure 1.3). Mises à part quelques valeurs singulières (trois), la valeur moyenne calculée est de 8% avec un écart-type de 2%.

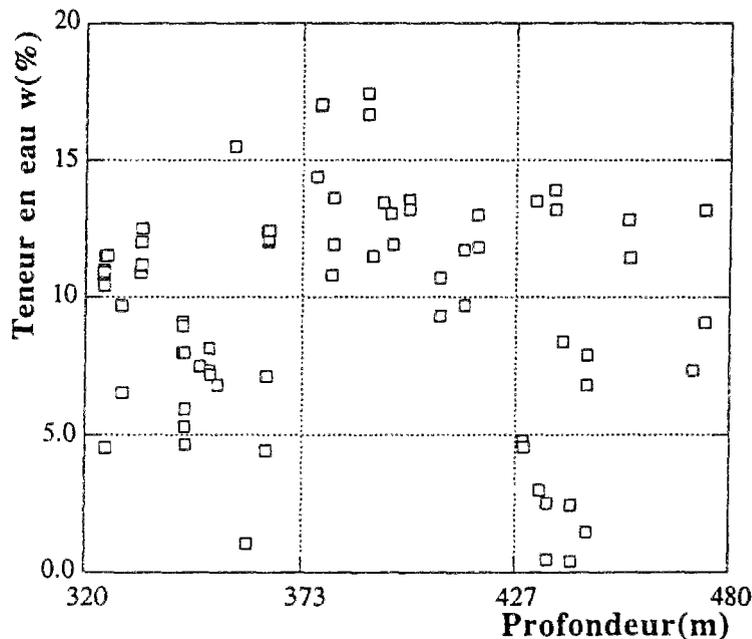


Figure 1.2 Teneur en eau du Callovo-Oxfordien

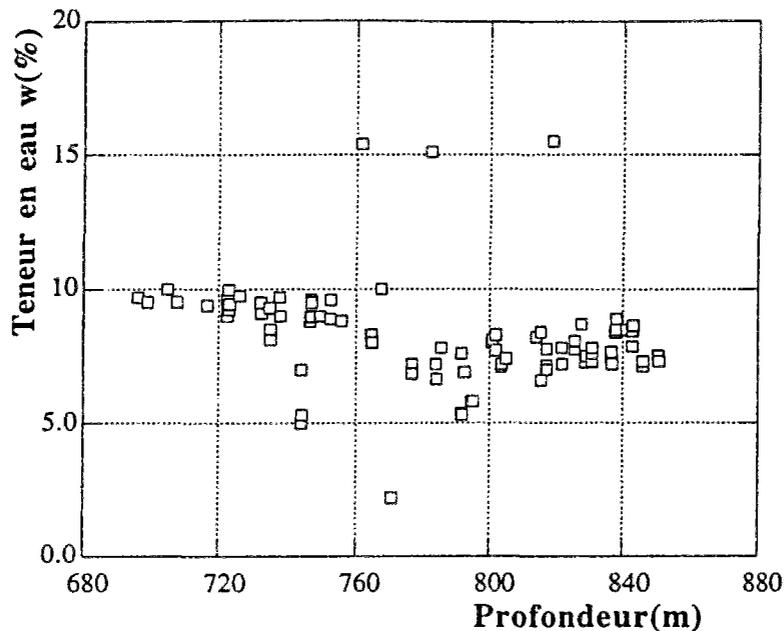


Figure 1.3 Teneur en eau du Toarcien-Domérien

### Teneur en carbonate

La teneur en carbonate est mesurée à l'aide d'un calcimètre Bernard. Le carbonate de calcium (calcite ou aragonite), fait effervescence sous l'action de l'acide chlorhydrique (HCl). Pour un sol fin, la teneur en carbonate est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de celle-ci, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche. D'après [Schlosser, 1988], on distingue d'ailleurs :

- 0 à 10% de CaCO<sub>3</sub> Argile
- 10 à 30% de CaCO<sub>3</sub> Argile marneuse
- 30 à 70% de CaCO<sub>3</sub> Marne
- 70 à 90% de CaCO<sub>3</sub> Calcaire marneux
- 90 à 100% de CaCO<sub>3</sub> Calcaire.

L'horizon Callovo-Oxfordien présente une particularité par rapport à ce paramètre, comme nous le montre la figure 1.4.

-Le premier niveau (1) a une teneur en carbonate dont le calcul de la moyenne nous donne 54% et un écart-type de 20%. Ce niveau est donc essentiellement constitué de Marnes d'après la classification précédente.

-Les deux autres niveaux (2) de cet horizon ont par contre une teneur en carbonate relativement faible par rapport au premier. D'après la figure 1.4 la valeur moyenne est de 17% avec un écart type de 4,5%. Ce sont donc des argiles marneuses qui constituent ces niveaux.

L'horizon Toarcien-Domérien est essentiellement constitué d'argiles puisque en général, cet horizon a une teneur en carbonate dont la valeur moyenne calculée est inférieure à 10% . Plus exactement elle est de 8,2% et l' écart-type est de 4% comme nous le montre la figure 1.5.

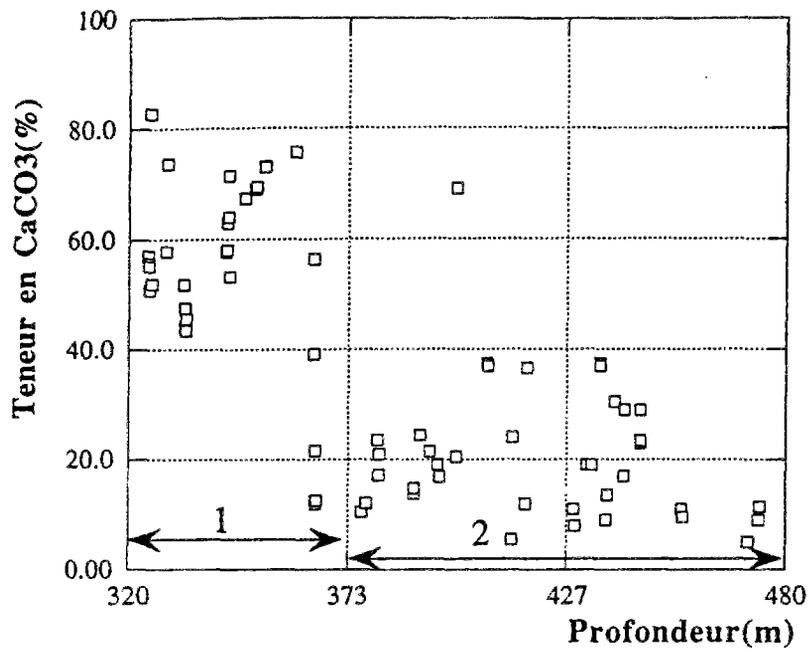


Figure 1.4 Teneur en carbonate du Callovo-Oxfordien

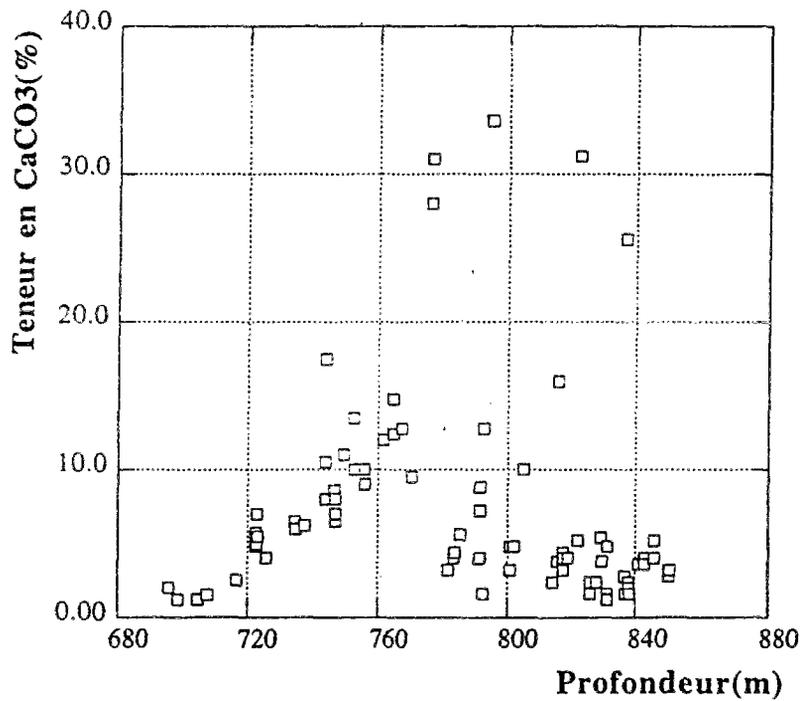


Figure 1.5 Teneur en carbonate du Toarcien-Domérien

## Densité naturelle

La densité naturelle est calculée à la suite de pesée et de mesures géométriques de l'éprouvette après carottage. Ce paramètre est théoriquement lié à la teneur en eau  $w$ , et à la densité sèche du sol  $\gamma_d$  par la relation :  $\gamma = (1 + w)\gamma_d$ . Contrairement aux paramètres précédents qui présentent une forte dispersion, la densité naturelle des deux horizons est beaucoup plus homogène et cette homogénéité est illustrée par les figures 1.7 et 1.8. La densité moyenne calculée est 2,23 avec un écart type de 0,11 pour le Callovo-Oxfordien (figure 1.7). Cependant, des valeurs singulières de 2,01 ou 2,57 ont été mesurées sur certains échantillons. Le Toarcien-Domérien a une densité naturelle légèrement supérieure à celle du Callovo-Oxfordien. D'après la figure 1.8, la valeur moyenne de la densité naturelle est de 2,26 avec un écart type de 0,26%.

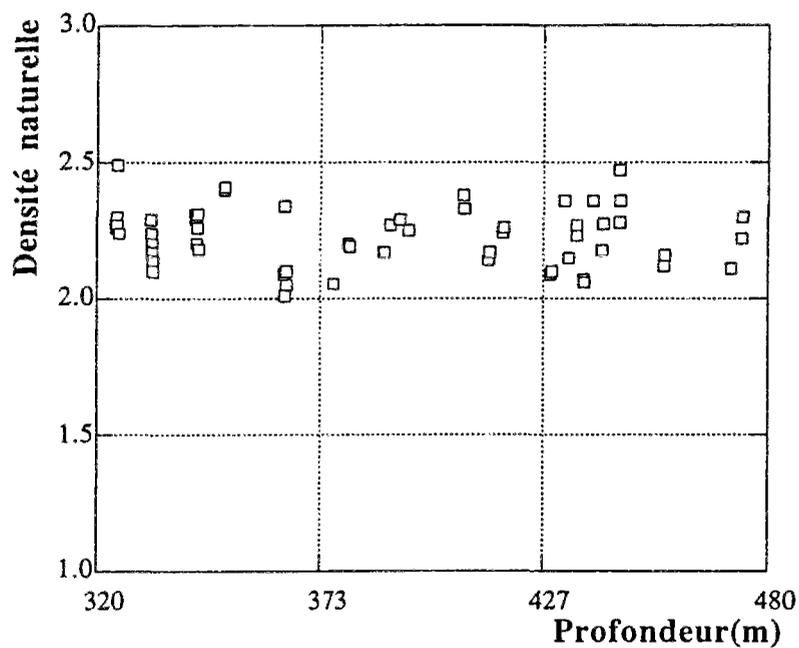


Figure 1.7 Densité naturelle du Callovo-Oxfordien

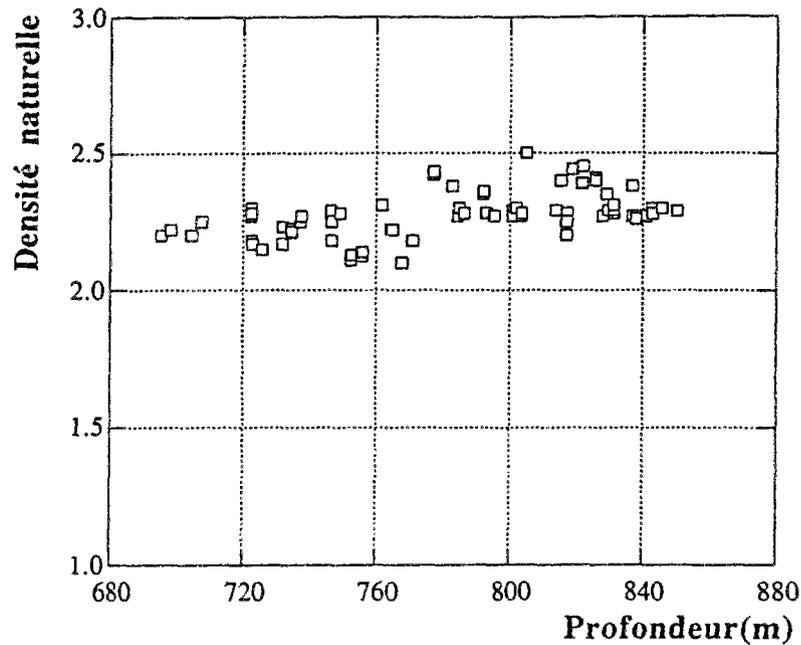


Figure 1.8 Densité naturelle du Toarcien-Domérien

### Conclusions sur les caractéristiques physiques

L'analyse des paramètres physiques des deux horizons argileux de l'Aisne nous permet de classer ces matériaux dans la classe des argiles raides [Rousset, 1989].

En résumé, ces matériaux sont physiquement caractérisés par les points suivants:

- la teneur en eau moyenne est faible (de 3 à 11% suivant les horizons)
- la densité est élevée (de 2,01 à 2,57)
- la dispersion locale est importante, surtout pour le Callovo-Oxfordien
- la teneur en carbonate est élevée pour certains niveaux.

La porosité a été calculée à partir des valeurs de la densité naturelle, de la teneur en eau et de la densité des grains prise égale à 2,65. Malgré quelques dispersions observées, la valeur moyenne de la porosité pour ces argiles est inférieure à 20%.

Le degré de saturation est également calculé à partir des paramètres précédents. La moyenne de l'ensemble des valeurs est proche de 96% pour le Callovo-Oxfordien, si l'on excepte quelques singularités entre 429 et 430 mètres. Pour le Toarcien-Domérien, elle est de 80% avec également quelques singularités.

Il est à prévoir que la dispersion de ces paramètres physiques aura une influence notable sur la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux.

### 1.2 PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Chaque tronçon de 30 cm provenant du forage est ouvert et débité en trois ou quatre tronçons de 8 cm de longueur environ. Chaque nouveau tronçon de 8 cm est alors carotté dans l'axe initial de la carotte (sauf quelques cas pour lesquels le carottage a été transversal de façon à étudier l'anisotropie des matériaux). Rappelons que le carottage des échantillons est effectué en diamètre de 36 mm et 24 mm, il est réalisé au

moyen d'un carottier mince au diamant. L'éclatement des échantillons est toujours égal à 2.

### 1.2.1 Préparation des essais triaxiaux.

L'échantillon est recouvert d'une jaquette de silastène et placé dans une cellule (figure 1.9, pression maximale de 20 MPa). La cellule est ensuite remplie d'huile, elle est alors fermée et placée sous la presse. Les circuits d'huile sont purgés et la pression dans la cellule est montée progressivement jusqu'à la valeur désirée au moyen du contrôleur de volume et de pression, ou GDS. Les essais sont réalisés en condition non drainée. La tête supérieure au contact de l'échantillon n'est pas solidaire du piston; ainsi, la pression transmise par le fluide à l'échantillon est bien isotrope ( $P=Q$ ) pendant cette phase. Par ailleurs, les essais sont réalisés à température ambiante, et de ce fait l'ensemble est laissé dans l'état pendant une heure environ jusqu'à la stabilisation des variations de volume d'huile dans la cellule.

La figure 1.9 nous présente un schéma de la cellule triaxiale utilisée pour les essais.

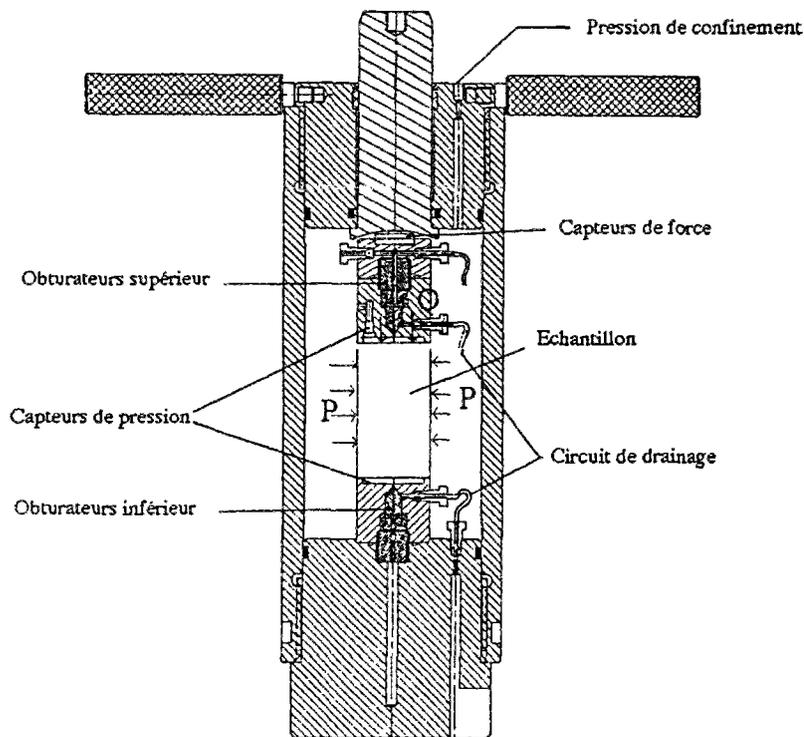


Figure 1.9. Cellule triaxiale[G.3S, 1992]

### 1.2.2 Déroulement des essais

#### Essais à court terme

La presse asservie (MTS) permet d'imposer une vitesse d'avancement constante au piston. Ce qui génère un déviateur Q-P des contraintes non nul, c'est-à-dire une contrainte axiale différente de la contrainte radiale. Dans notre cas, il s'agit essentiellement d'essais de compression au cours desquels la contrainte axiale (-Q) augmente en valeur absolue.

Les phases de chargement déviatorique des essais à court terme sont réalisés: -à pression de confinement P constante (comprise entre 0 et 20 MPa),

- à vitesse de déplacement axial du piston imposée (comprise entre 0,0006mm/min à 2mm/min),
- en mesurant la force appliquée par la presse sur le piston  $F$  ( $Q-P=F/S$ ) (la force est mise à zéro en fin de chargement hydrostatique),
- en mesurant le déplacement du piston et la variation de volume de l'échantillon.

La variation globale du volume de l'éprouvette est mesurée avec précision au cours de l'essai. Cette procédure nous semble plus intéressante que la procédure couramment utilisée qui consiste à mesurer la déformation orthoradiale de l'éprouvette au moyen des jauges. En particulier, dans notre cas, le comportement après rupture, lorsque la déformation n'est plus homogène est mieux apprécié puisqu'on mesure en fait une déformation volumique moyenne.

Le système de régulation du confinement (contrôleur de volume et de pression, appelé GDS) mesure la quantité d'huile qu'il est nécessaire de faire rentrer ou sortir de la cellule pour maintenir le confinement  $P$  constant. Il suffit alors de retrancher à cette variation de volume, le volume d'huile déplacé par le piston pour obtenir la grandeur désirée.

Pour ce qui concerne les essais cycliques, seul le chargement est modifié. Il n'est pas monotone. Dès que la déformation atteint une certaine valeur, le sens du piston est inversé (avec la même vitesse de déplacement en valeur absolue). Dès que la valeur du déviateur est proche d'une valeur nulle, on inverse à nouveau le sens du piston et on attend que la déformation ait atteint une nouvelle valeur supérieure à la précédente. Le processus est ensuite répété sur un certain nombre de cycles (entre 2 et 6).

#### Essais à long terme

Pour le fluage, on dispose d'un dispositif expérimental spécialement mis au point par [Rousset, 1992] pour l'étude du comportement différé des argiles. Cependant toutes les capacités du dispositif ne sont pas utilisées pour nos essais. En effet, ce dispositif offre la possibilité de travailler avec une pression de pore ou en température. Les échantillons ont les mêmes caractéristiques géométriques que ceux utilisés pour les essais à court terme.

Le déroulement des essais à long terme est le suivant:

- une pression hydrostatique  $P$  est d'abord appliquée sur l'échantillon : le piston étant désolidarisé de la tête au contact de la face supérieure de l'échantillon, on augmente progressivement la pression de confinement en maintenant le piston bloqué; on a alors à chaque instant un état parfaitement hydrostatique,
- la force sur le piston est ensuite augmentée jusqu'à une valeur prédéterminée, en maintenant la pression de confinement constante égale à  $P$ , un déviateur  $Q-P$  sur l'échantillon est ainsi généré que l'on maintient constant jusqu'à ce que la stabilisation relative de la déformation axiale de l'échantillon soit obtenue, ou qu'une certaine durée totale soit atteinte,
- Le déviateur est alors augmenté d'une certaine valeur et l'essai continue jusqu'à ce que le critère de changement éventuel de palier soit atteint et ainsi de suite.

Au cours des essais sont mesurés :

- la force axiale  $F$
- le confinement  $P$
- la déformation axiale  $\epsilon$

L'acquisition des données est automatique, et le pas d'acquisition varie de deux minutes à quatre heures, suivant la vitesse de variation de la déformation.

Pour la relaxation, après avoir généré le déviateur  $Q-P$  sur l'éprouvette, on mesure la déformation axiale que l'on maintient constante. On laisse le piston libre

jusqu'à ce que la stabilisation relative du déviateur soit obtenue ou qu'une certaine durée totale soit atteinte. La déformation est alors augmentée d'une certaine valeur (déplacement du piston), et l'essai continue jusqu'à ce que le critère de changement éventuel de palier soit atteint et ainsi de suite.

Un autre type d'essai de caractérisation du comportement à long terme a également été réalisé. Pour les essais de ce type, on utilise le dispositif expérimental des essais de fluage. Il s'agit d'essais triaxiaux à différentes vitesses de déformation (entre 0,0006mm/mn et 2mm/min) suivis d'un fluage simple.

### 1.3 RÉSULTATS DES ESSAIS TRIAXIAUX À COURT TERME

La grande partie des essais présentés dans ce paragraphe a été réalisée par Rousset dans le cadre du programme de caractérisation mécanique des argiles de l'Aisne pour le compte de l'ANDRA [Rousset, 1992].

#### 1.3.1 Essais d'écroutissage

Les figures 1.10 et 1.11 nous montrent l'évolution du déviateur des contraintes (Q-P) en fonction de la déformation axiale  $\epsilon$ . Ces deux essais ont été effectués sur des échantillons obtenus sur des carottes prélevées à la profondeur de 347 mètres pour l'échantillon du Callovo-Oxfordien et une profondeur de 776,82 mètres pour l'échantillon du Toarcien-Domérien. Ces deux échantillons ont une teneur en eau respective de 7,5% et 6,85% et une densité 2,24 et 2,29. Ces deux essais ont été réalisés sous une pression de confinement assez faible de 1 MPa, et une vitesse de déformation de 0,48mm/min.

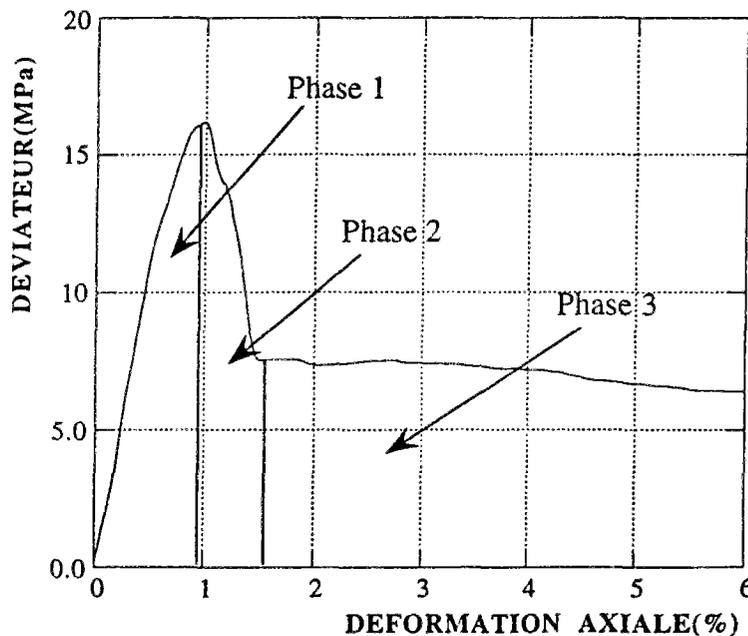


Figure 1.10. Courbe d'essais triaxial: Callovo-Oxfordien (P=1 MPa)

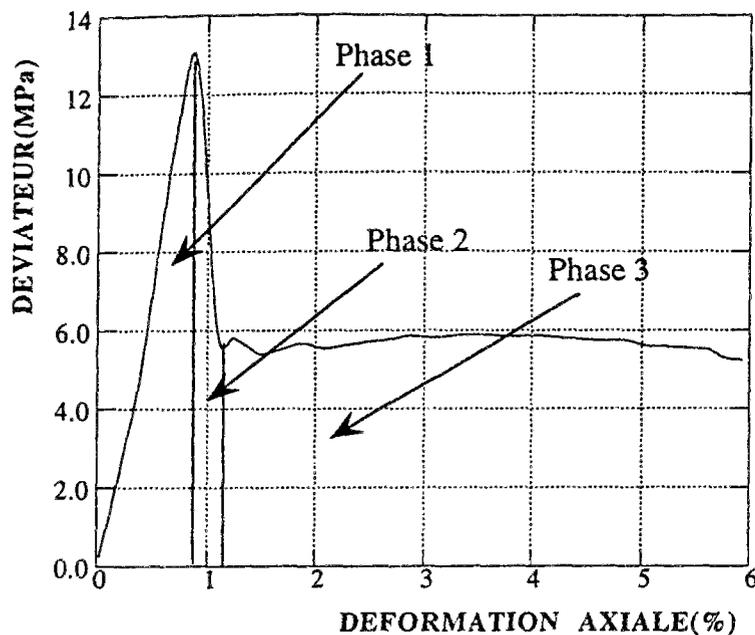


Figure 1.11. Courbe d'essai triaxial : Toarcien-Domérien (P=1 MPa)

Le comportement mécanique illustré par ces deux figures représente qualitativement celui de l'ensemble des deux horizons argileux pour des confinements assez faibles. En effet, ces deux courbes d'essai sont représentatives de tous les essais (plus de 500) effectués sur ces matériaux (Annexe 1). On peut déjà remarquer que le déviateur à la rupture est supérieur à 12 MPa pour les deux essais, ce qui témoigne de la haute résistance mécanique de ces matériaux.

L'examen détaillé des deux courbes d'essai nous montre que l'on peut décomposer l'évolution du déviateur en trois phases.

Dans la phase 1, le déviateur évolue plus ou moins linéairement avec la déformation axiale. Avec dans certains cas une phase non linéaire très marquée tout au début de la courbe (ce phénomène est surtout observé sur les échantillons à fort taux de carbonate). Cette phase est caractérisée par la valeur de la déformation axiale pour laquelle l'évolution du déviateur des contraintes n'est plus croissante. D'après les deux courbes, cette valeur est d'environ 1%. A cette valeur de la déformation correspond une valeur maximale du déviateur qui est égale à 16 MPa pour le Callovo-Oxfordien et 13 MPa pour l'échantillon du Toarcien-Domérien. Ces valeurs assez élevées pour le déviateur maximal des contraintes sont justifiées eu égard à la faible teneur en eau des échantillons considérés.

Notons une fois de plus qu'à ce stade, cette analyse reste avant tout qualitative. Cependant, des études statistiques effectuées sur les résultats des essais similaires montrent une forte variation des paramètres mécaniques en question (déviateur maximal, et déformation correspondante) avec les paramètres physiques [Rousset, 1989], [Hou&Wong, 1992]. Dans le cas d'un paramètre physique tel que la teneur en carbonate, plus il est élevé, plus la valeur du déviateur maximal est élevée. Cette valeur peut atteindre 40 MPa pour certains échantillons très carbonatés; la valeur de la déformation correspondante diminue avec l'augmentation de la teneur en carbonate (moins de 1% dans certains cas).

Dans la phase 2, dès que la valeur maximale du déviateur des contraintes est atteinte, le déviateur décroît linéairement et plus ou moins brutalement pendant que la déformation axiale continue à croître. Ce qui témoigne du caractère fragile du comportement à court terme pour de faibles valeurs du confinement. Sur ces deux figures (1.10 et 1.11) cette décroissance est assez brutale. Cette valeur dépend fortement de la valeur de la pression de confinement. Plus le confinement est faible plus la décroissance est brutale. Les figures 1.12 et 1.13 nous montrent les essais réalisés avec une pression de confinement plus élevée; 10 MPa pour un échantillon du Callovo-Oxfordien et 15 MPa pour l'échantillon du Toarcien-Domérien. Pour ces deux essais, les caractéristiques physiques des échantillons sont les mêmes que ceux des essais effectués à 1 MPa de confinement pour les deux horizons. Sur ces deux courbes, la décroissance n'est plus brutale et la pente de décroissance est nettement plus faible que celle des essais à 1 MPa de confinement. Ce résultat exprime l'influence du confinement sur la transition entre un comportement fragile et un comportement ductile. On note également que le déviateur maximal pour  $P=10$  MPa est supérieur à celui mesuré pour  $P=1$  MPa (23 MPa à comparer à 16 MPa pour le Callovo-Oxfordien, 24 MPa à comparer à 13 MPa pour le Toarcien-Domérien).

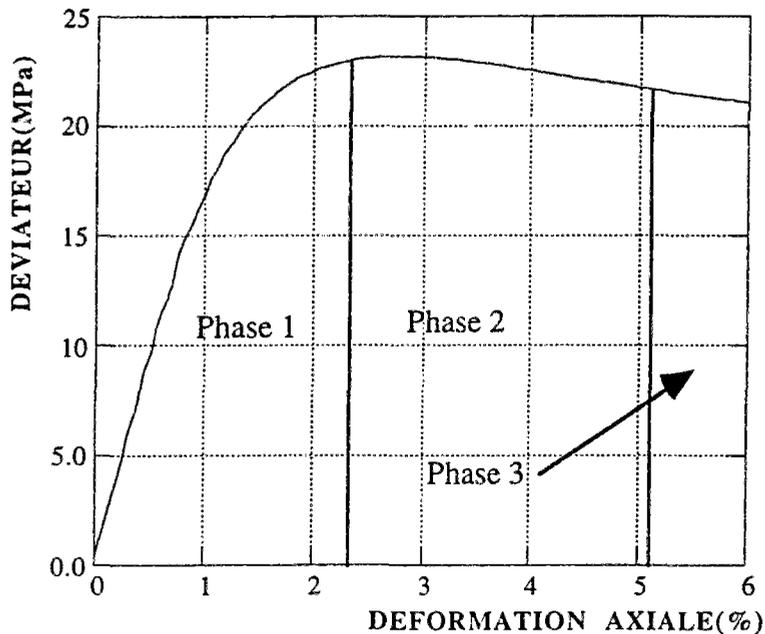


Figure 1.12. Courbe d'essai triaxial : Callovo-Oxfordien ( $P=10$  MPa).

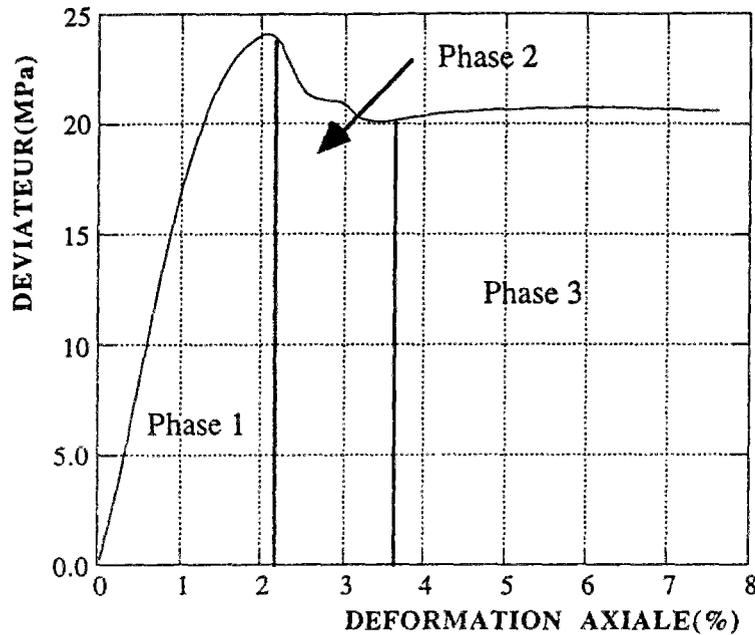


Figure 1.13. Courbe d'essai triaxial : Toarcien-Domérien (P=15 MPa).

Au cours de cette phase 2, il y a localisation des déformations et l'échantillon subit une rupture macroscopique. Le mode de rupture dépend également de la valeur de la pression de confinement, cette dépendance est similaire à celle donnée par [Santarelli&Brown, 1987] pour les sables ou les dolomites. Pour de faibles valeurs de la pression de confinement (P=0 ou 1 MPa), la rupture macroscopique se fait dans l'axe de l'échantillon, alors que pour de grandes valeurs du confinement (15 MPa ou 20 MPa), on observe des bandes de cisaillement.

Dans la phase 3, dès que le déviateur atteint une valeur résiduelle de 7 MPa pour le Callovo-Oxfordien et de 6 MPa pour le Toarcien-Domérien (figures 1.10 et 1.11), la localisation des déformations se poursuit et le déviateur des contraintes reste à sa valeur résiduelle. Pendant cette phase, l'échantillon perd son homogénéité et sa symétrie à l'échelle du laboratoire.

### 1.3.2 Essais Cycliques

Les figures 1.14 et 1.15 nous montrent l'évolution du déviateur en fonction de la déformation axiale pour deux essais cycliques effectués sur des échantillons du Callovo-Oxfordien et du Toarcien-Domérien. Ces deux essais sont effectués à une pression de confinement de 10 MPa, la procédure expérimentale a été décrite dans les paragraphes précédents.

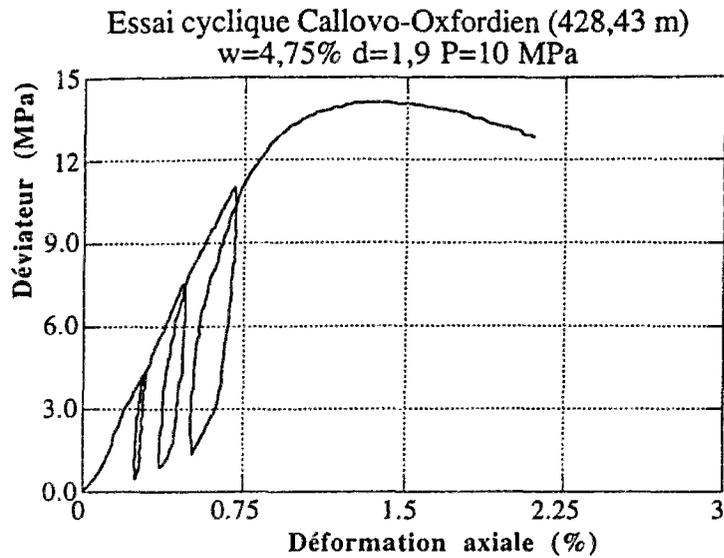


Figure 1.14a. Essai cyclique (428,43 mètres)

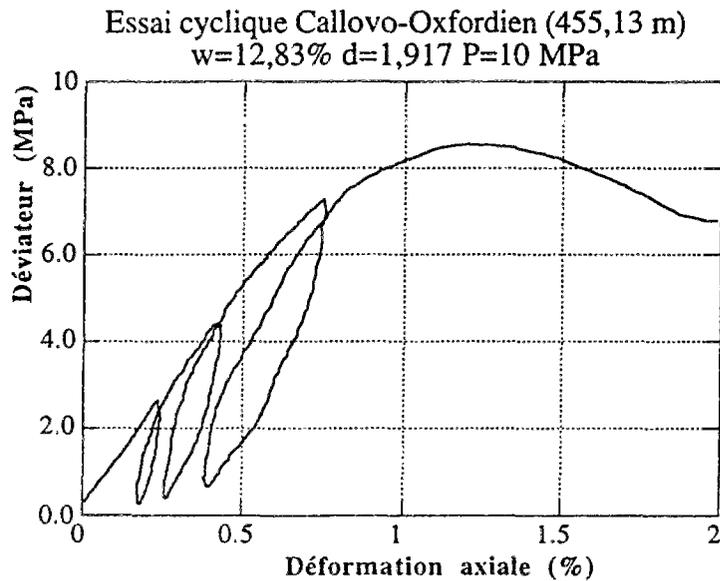


Figure 1.14b. Essai cyclique (455,13 mètres)

On constate que les valeurs du déviateur maximal au cours des essais cycliques est inférieure à celles obtenues lors des essais d'écroutissage simple (figure 1.12 et 1.13), qui pourtant sont réalisés avec le même confinement. Cette différence peut s'expliquer par la valeur de la densité naturelle des échantillons : elle est de 1,9 pour les échantillons utilisés au cours des essais cycliques, et de 2,2 pour ceux utilisés pour les essais d'écroutissage.

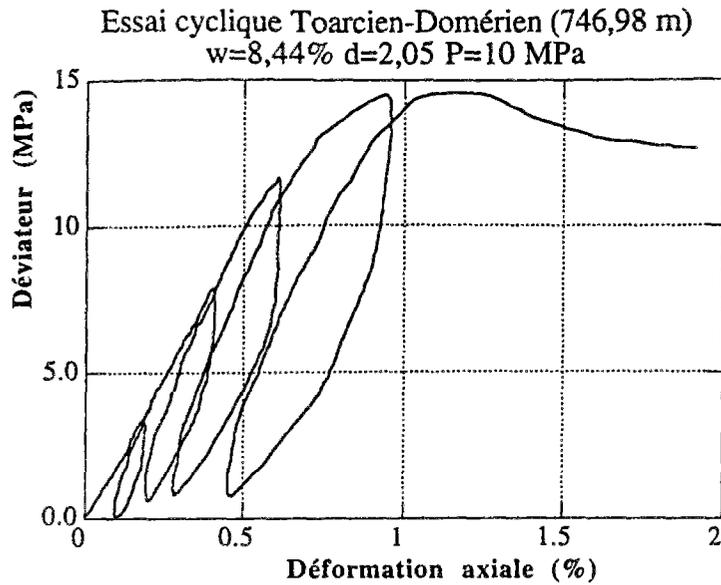


Figure 1.15a. Essai cyclique (746,98 mètres)

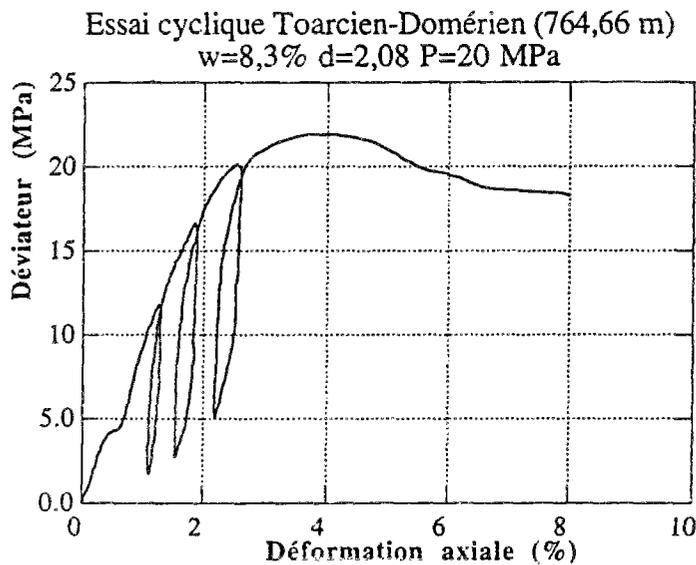


Figure 1.15b. Essai cyclique (764,66 mètres)

Les résultats de ces quatre essais cycliques sont très remarquables. Après la première décharge, quelle que soit la valeur du déviateur des contraintes au moment de cette décharge, l'état de la déformation initiale n'est jamais retrouvé. Des déformations irréversibles apparaissent donc dès l'application du moindre déviateur de contrainte. Ce comportement est observé même pour de très petites valeurs de la déformation axiale (moins de 0,3%). Après la phase de décharge, si la valeur du déviateur est maintenue nulle, la déformation axiale n'évolue plus. Il y a de ce fait apparition des déformations irréversibles pour de très faibles valeurs du déviateur ou de la déformation axiale.

Notons une fois de plus que ces deux figures représentent qualitativement tous les résultats d'essais cycliques effectués sur les échantillons des argiles de l'Aisne.

D'une manière générale, le nombre de cycles charge-décharge au cours des essais cycliques varie de 2 à 6. La figure 1.16a nous montre un essai avec deux cycles.

Pour des échantillons qui présentent une teneur en eau assez élevée (figure 1.14b et 1.16b), le déviateur maximal est plus faible. En effet, plus la teneur en eau est élevée, plus le déviateur maximal est faible comme on l'a déjà remarqué.

Essai avec 2 cycles de charge-décharge Callovo-Oxfordien (399,735 m)  
 $P=10 \text{ MPa}$  ;  $w=13,15\%$  ;  $d=2,04$

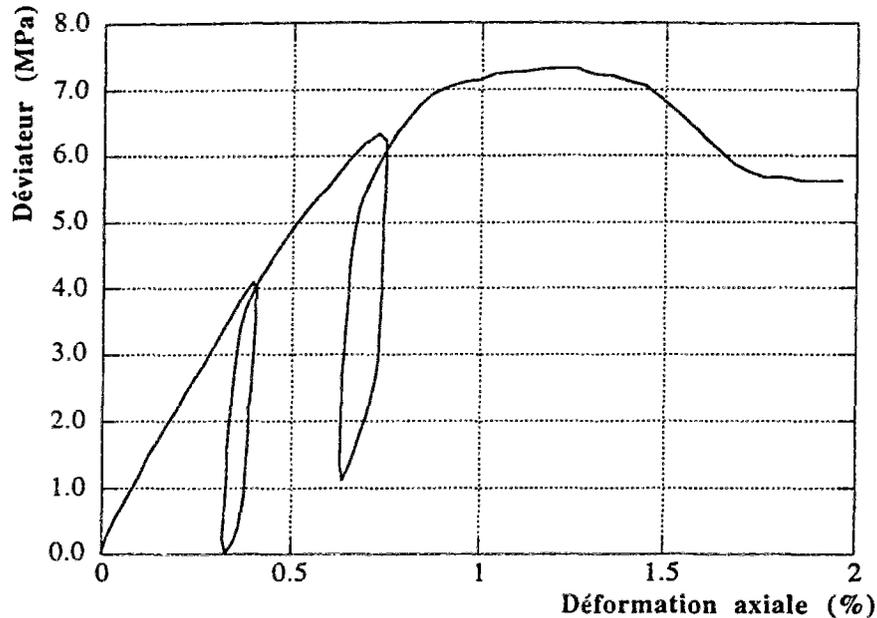


Figure 1.16a. Essai avec deux cycles.

Des essais Brésiliens ont également été réalisés. La grandeur essentielle qui caractérise cet essai est la résistance à la traction de la roche. Ces essais montrent d'une manière générale, que cette résistance est faible comme pour les roches en général; pour le Callovo-Oxfordien, sa valeur moyenne est de 0,6 MPa pour les échantillons ayant un taux de  $\text{CaCO}_3$  inférieur à 50%, et 1,7 MPa pour ceux avec un taux supérieur à 50%. Le Toarcien-Domérien qui a un taux de carbonate faible a une résistance à la traction de l'ordre de 0,7 MPa.

#### Influence du confinement.

Les figures 1.17 et 1.18 nous montrent les résultats de quelques essais qui ont été réalisés à différents confinements. Ces courbes sont représentatives de tous les échantillons du Callovo-Oxfordien et du Toarcien-Domérien.

L'analyse de ces deux courbes nous permet de montrer l'influence de la contrainte moyenne sur la valeur du déviateur maximal. Nous observons que suivant la gamme de confinement considérée, le déviateur varie de manière plus ou moins significative.

De façon générale, pour des valeurs de confinement supérieures à 10 MPa, le déviateur maximal est pratiquement constant quand le confinement augmente. Dans cette gamme de contrainte moyenne (qui correspond sensiblement aux conditions in situ), le critère de rupture s'apparente à un critère de type Tresca.

Dans la gamme de confinement inférieure à 5 MPa par contre, quand le confinement augmente, la valeur du déviateur maximal augmente également, et très

significativement. Dans cette gamme de confinement, le critère de rupture sera plutôt de type Coulomb.

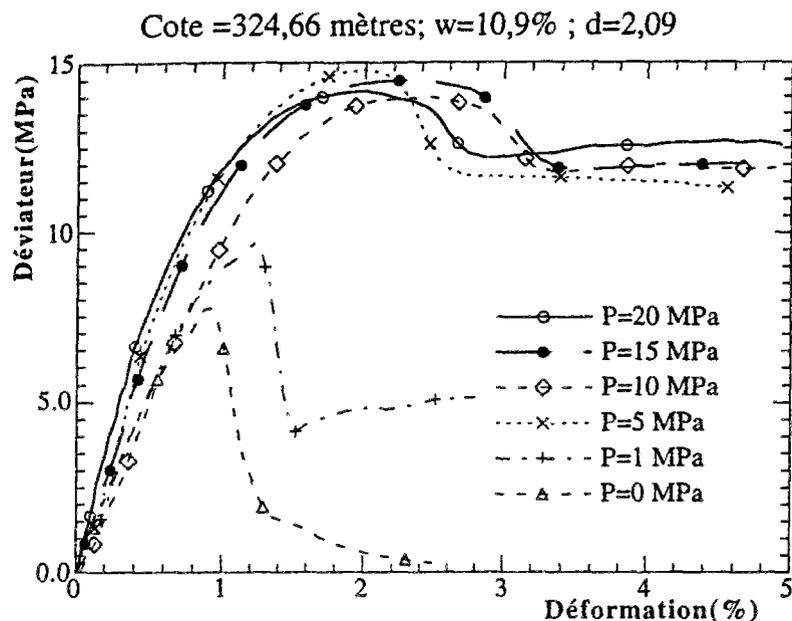


Figure 1.17. Essais à différents confinements (Callovo-Oxfordien)

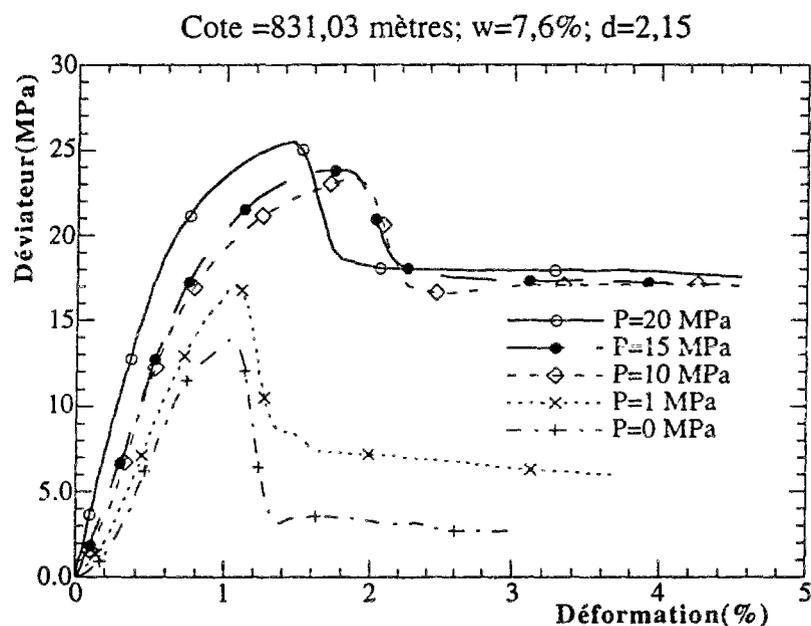


Figure 1.18. Essais à différents confinements (Toarcien-Domérien)

### Conclusions sur les essais à court terme

L'analyse des essais d'écroutissage simple à vitesse de déformation constante et des essais cycliques met en évidence différents phénomènes.

-Les déformations de ces matériaux sont irréversibles dès le début du chargement déviatorique, et le déviateur des contraintes augmente au cours des cycles de chargement. Ce résultat pourra être interprété plus loin par un écrouissage positif de ces matériaux.

-Dans la gamme de confinement qui représente le mieux les conditions in-situ ( $P$  supérieur à 10 MPa), le déviateur maximal ne varie pas quand le confinement augmente. Le critère de rupture correspondant est alors de type Tresca.

-Pour des valeurs de confinement faible (inférieures à 5 MPa), le déviateur croît de façon sensible quand le confinement augmente. Dans cette gamme de confinement, le critère de rupture correspondant est de type Coulomb. Dans cette gamme de confinement, la chute du déviateur après le pic peut se traduire par un radoucissement du matériaux (voir plus loin).

## 1.4 RESULTATS DES ESSAIS POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT A LONG TERME

### 1.4.1 Essais à différentes vitesses de déformation

Les figures 1.19a et 1.19b nous montrent la courbe de variation du déviateur des contraintes en fonction de la déformation axiale des essais réalisés à différentes vitesses de déformation variant de 2mm/min à 0,0006mm/min.

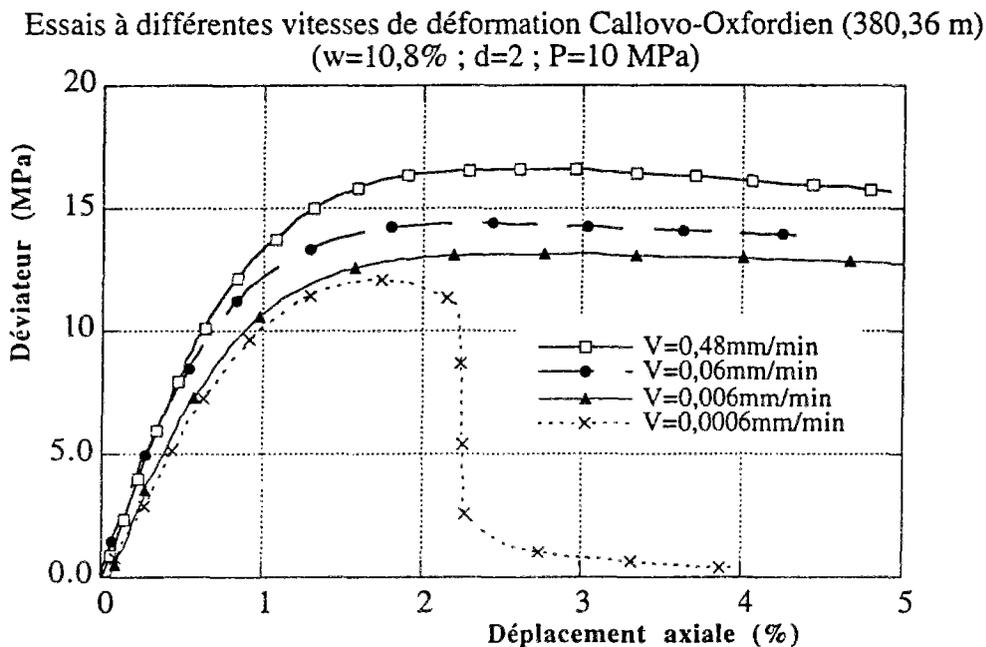


Figure 1.19a. Essais à différentes vitesses de déformation (380,48 m)

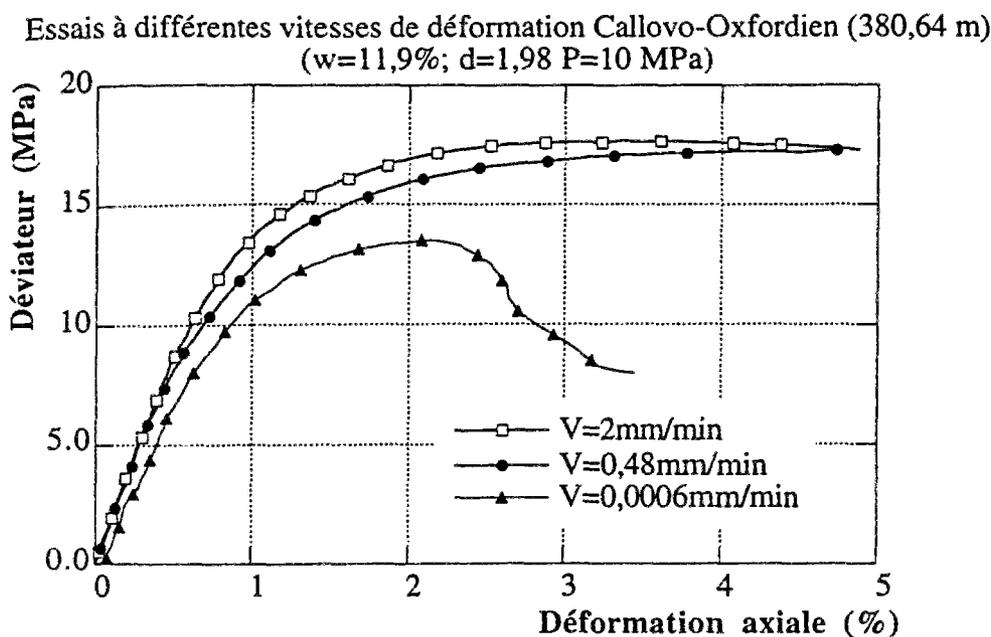


Figure 1.19b. Essais à différentes vitesses de déformation (380,64 m)

Sur ces figures, la mise en évidence de l'influence de la vitesse de déformation sur l'évolution du déviateur des contraintes est très clairement illustrée : plus la vitesse de déformation est élevée, plus la valeur du déviateur est grande, pour une même valeur de la déformation axiale. Ce premier phénomène traduit l'influence de la vitesse de déformation sur l'évolution des contraintes sur les échantillons des argiles de l'Aisne. La viscosité dans le comportement de ses matériaux est donc clairement démontrée par ces deux figures (1.19a et 1.19b). En effet, les essais étant réalisés en conditions non-drainés, ces phénomènes ne peuvent pas être dus à l'écoulement de l'eau interstitielle (viscosité intrinsèque).

#### 1.4.2 Essais de fluage

Nous présentons dans ce paragraphe les principaux résultats d'essais de fluage par paliers qui ont été effectués. Les figures 1.20a , 1.20b et 1.20b nous montrent l'évolution de la déformation axiale en fonction du temps au cours de trois essais de fluage par paliers.

On remarque (figures 1.20a et 1.20b) qu'il existe un seuil de déviateur en dessous duquel il n'y a pas de fluage. Sur ces figures, à 7 MPa de déviateur, le matériau ne flue pas. Sur la figure 1.20a on remarque que plus le palier du déviateur est grand, plus le fluage est important. Par ailleurs, on constate que le fluage dépend fortement du taux de carbonate comme on peut le voir sur la figure 1.20c où l'échantillon à un taux de carbonate de 1,6% seulement.

Sur les figures 1.21a et 1.21b nous avons les résultats de deux essais de fluage sur un seul palier du déviateur. Sur la figure 1.21a par exemple, on observe les trois phases usuelles d'un essai de fluage : une phase de fluage primaire, une phase de fluage secondaire, et une phase de fluage tertiaire. Sur la figure 1.21b, on observe essentiellement du fluage secondaire.

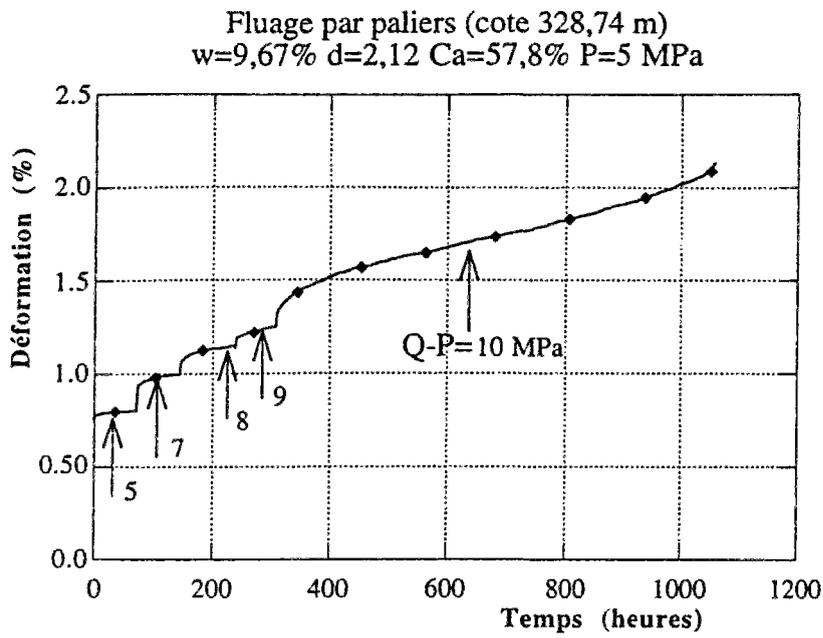


Figure 1.20a Fluage par palier (5 paliers)

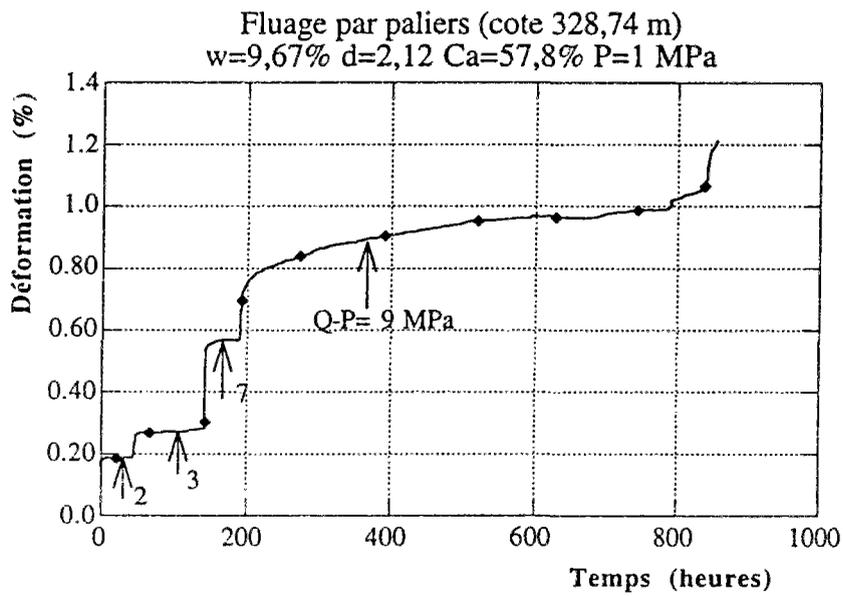


Figure 1.20b Fluage par paliers (4 paliers).

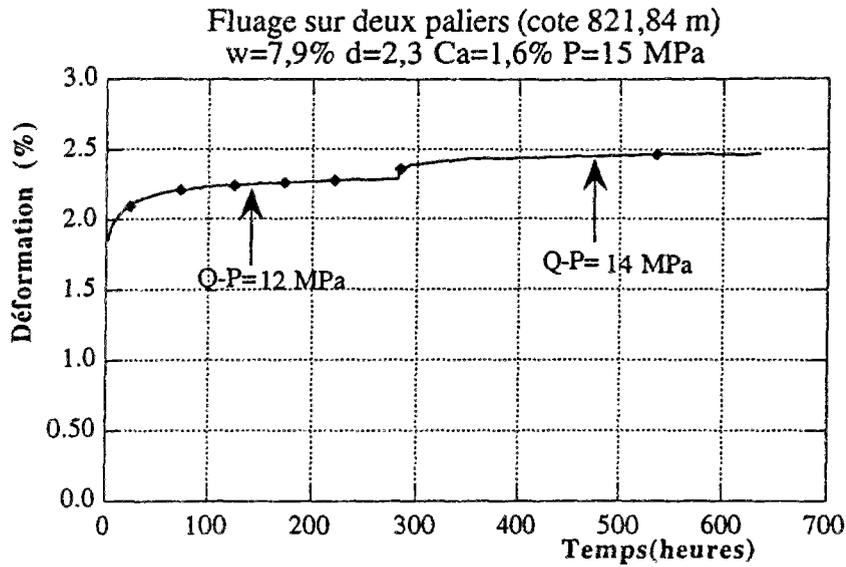


Figure 1.20c Fluage par paliers (2 paliers)

Les figures 1.20 (a,b,c) mettent en évidence plusieurs caractéristiques générales du comportement différé non drainé :

- Il y a une évolution de la déformation au cours du temps pour une contrainte constante qui est très visible, les déformations observées au cours d'un palier de contrainte sont sensiblement du même ordre de grandeur que celles observées instantanément au cours d'un changement brusque de palier, le fluage est donc significatif,
- la rupture survient pour des déformations comprises entre 1 et 2%, cest-à-dire analogues aux déformations de rupture à court terme,
- Il existe un seuil de déviateur en deçà duquel, le fluage se stabilise (pas de fluage secondaire ou tertiaire).

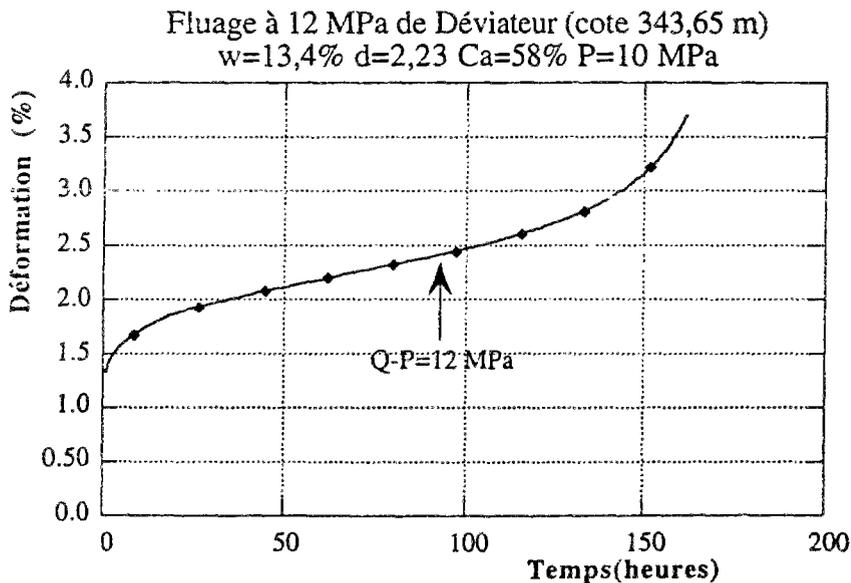


Figure 1.21a Fluage sur un palier (343,65 m)

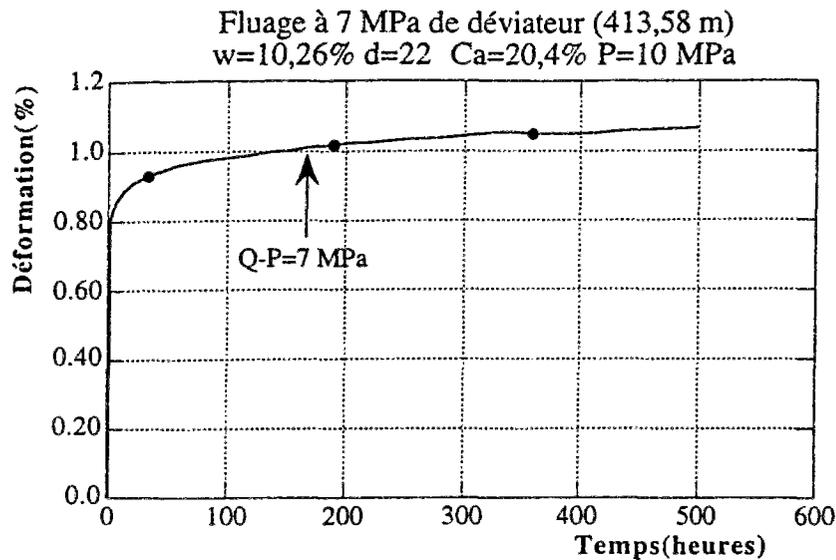


Figure 1.21b Fluage sur un palier (413,58 m)

La différence entre les courbes 1.21a et 1.21b s'explique par le taux de carbonate relativement fort de la courbe 1.21. En effet, pour ces matériaux, on montre que plus le taux de carbonate est élevé, plus le fluage est important [Rousset, 1992].

Une analyse de l'influence du confinement sur le fluage de ces matériaux, montre que les courbes de fluage ne sont pas significativement influencées par la valeur du confinement, comme on le voit par exemple sur la figure 1.22. Sur cette figure, où les deux essais ont été réalisés sur le même matériau à 2 pressions de confinement différentes ( $P=5$  MPa et  $P=10$  MPa) pour deux paliers du déviateur identiques ( $Q-P=6$  et  $Q-P=8$  MPa), bien que le changement de palier ne soit pas intervenu après le même nombre d'heures, à une translation près dans le temps, les deux courbes sont sensiblement identiques. Cette remarque nous permet en première analyse de dire que l'effet de la contrainte moyenne sur le comportement à long terme peut être négligé.

Quelques essais ont également été effectués pour la comparaison entre le fluage drainé et non-drainé. Le résultat de cette comparaison est illustré sur la figure 1.23, où deux essais qui ont duré plus de 6000 heures chacun sont présentés. D'une façon générale, le comportement de fluage drainé est peu différent du comportement de fluage non-drainé; la part de la déformation différée due à la dissipation de l'eau interstitielle ("consolidation") peut être au maximum équivalente à celle due au fluage de l'argile (teneur en eau supérieure à 12%) et au minimum être négligée devant celle du squelette de l'argile.

Ce résultat important justifie en partie l'approche monophasique adoptée dans ce mémoire pour interpréter le comportement des argiles raides.

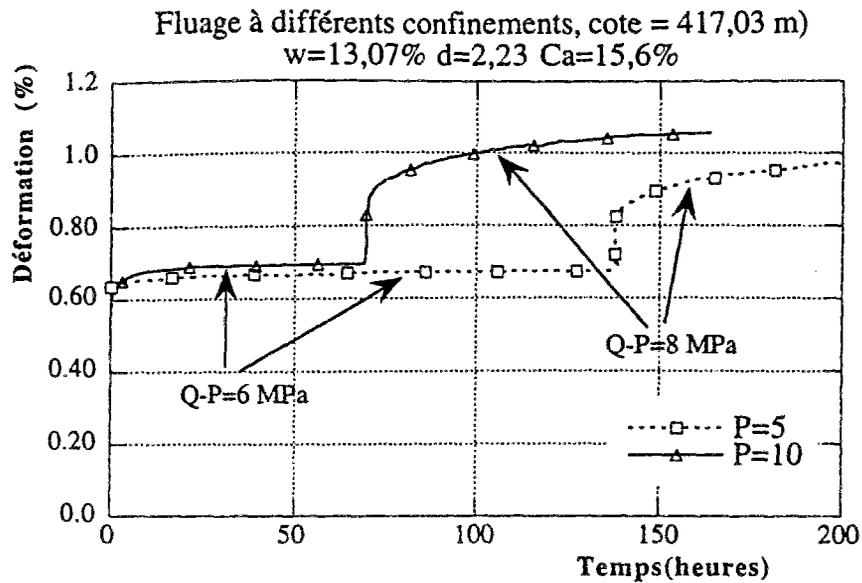


Figure 1.22 Influence du confinement sur le fluage

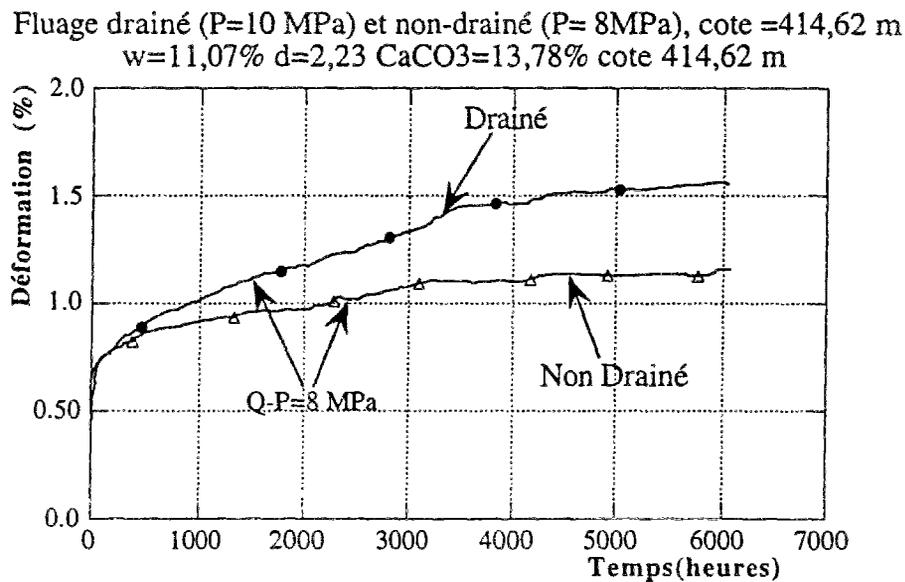


Figure 1.23. Influence du drainage sur le fluage

### 1.4.3 Relaxation

La figure 1.24 nous montre l'évolution du déviateur des contraintes en fonction du temps au cours d'un essai de relaxation sur un échantillon du Callovo-Oxfordien. Cet essai de relaxation met également en évidence l'importance des phénomènes visqueux sur le comportement à long terme des échantillons de l'argile de l'Aisne. On note surtout une relaxation des contraintes d'autant plus forte que la déformation imposée est élevée.

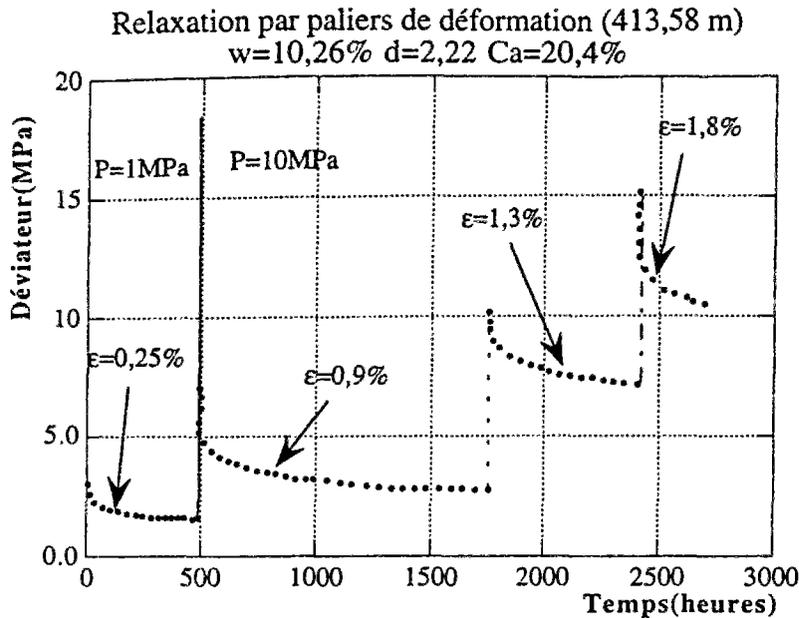


Figure 1.24 Essai de relaxation

Au cours de l'essai de relaxation, nous avons utilisé deux valeurs pour la pression de confinement. Le premier palier de déformation (0,25%) est réalisé sous 1 MPa de confinement, ensuite les paliers suivants sont effectués avec 10 MPa de confinement. Cependant, il n'y a pas de différence significative sur l'évolution du déviateur.

### 1.5 DEVIATEUR MAXIMAL À LONG TERME ET À COURT TERME

Le déviateur maximal est un paramètre important dont la valeur permet de quantifier les cohésions à court terme et à long terme. Les figures 1.25 (a et b), 1.26 (a et b) nous donnent pour une certaine série argileuse (cote 746,67m) les valeurs comparées de ce paramètre (long terme et court terme) obtenues au cours des essais d'écroutissage et de fluage par paliers.

D'après les figures 1.25a et 1.25b, la valeur du déviateur maximal est de 26 MPa à court terme et, pour le même matériau (même cote donc même paramètres physiques), à 17 MPa de déviateur, le fluage secondaire conduit à la rupture. Pour les figures 1.26a et 1.26b qui correspondent à une autre série (cote 821,89 m), ces valeurs sont respectivement de 23 MPa et 17 MPa.

Ces observations traduisent quantitativement le fait que dans les argiles raides, la cohésion à court terme est supérieure à celle à long terme. Le rapport entre ces deux cohésions est varié entre 1,2 et 2.

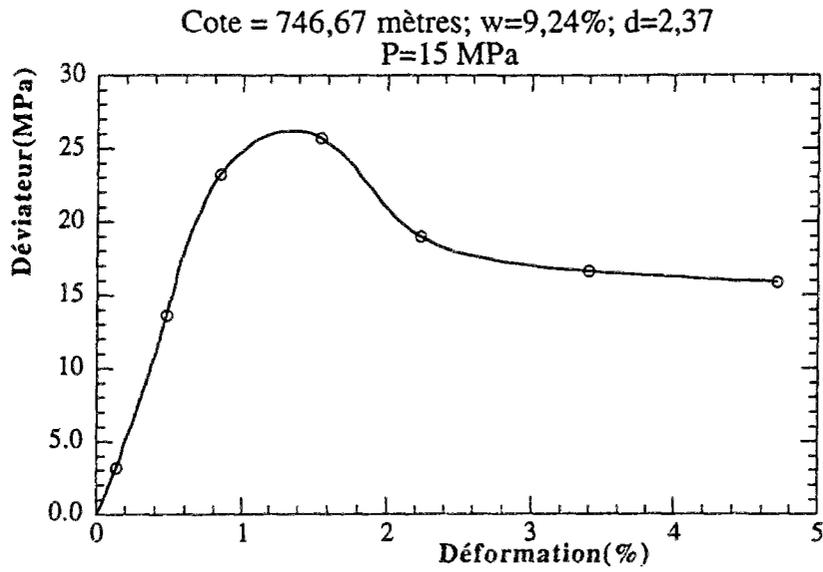


Figure 1.25a. Ecouissage (746,67 m).

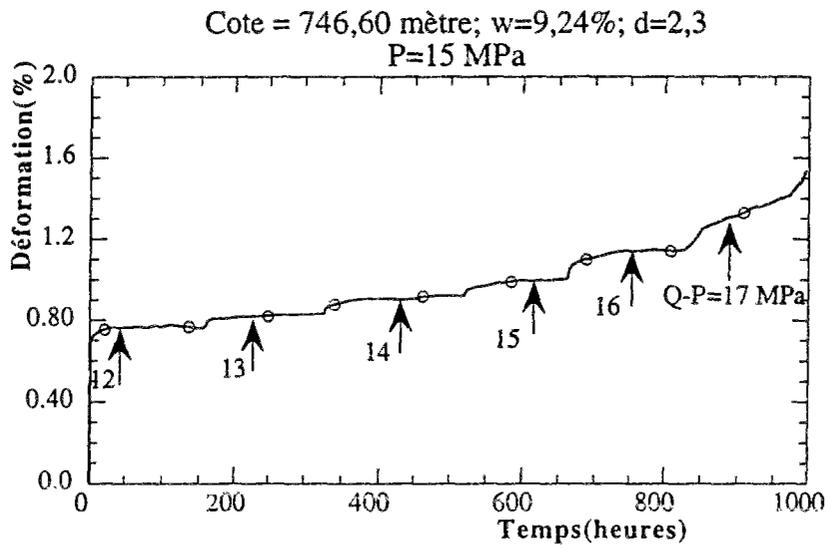


Figure 1.25b. Fluage par palier (746,67 m).

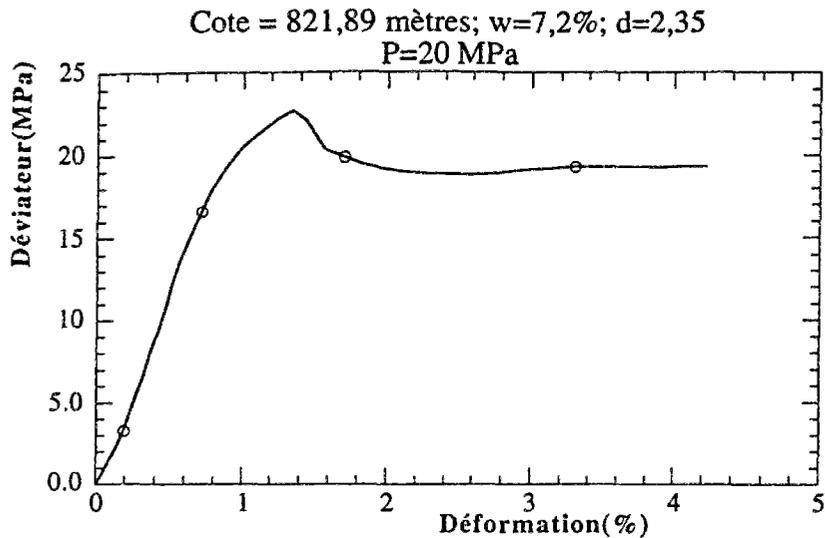


Figure 1.26a Ecrouissage (821,89 m).

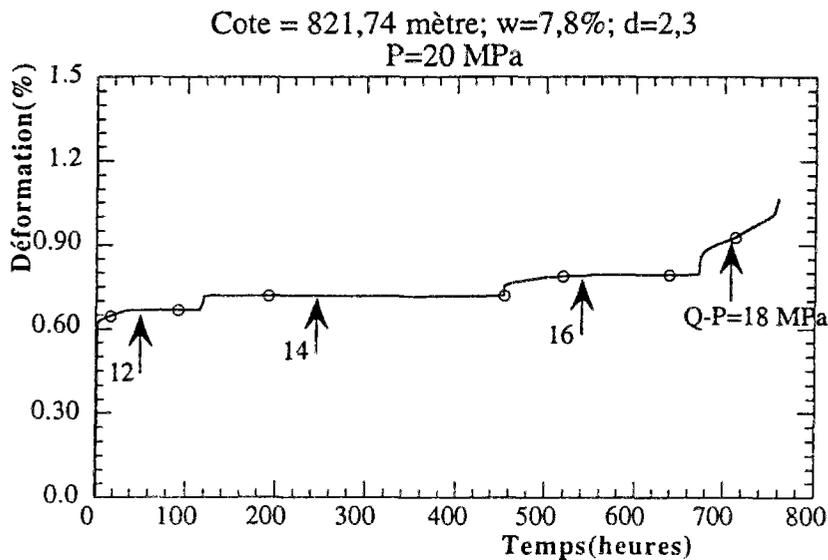


Figure 1.26b. Fluage par palier (821,89 m).

## CONCLUSION

Un vaste programme d'essais de laboratoire a été réalisé pour caractériser le comportement mécanique des argiles de l'Aisne. Nous avons présenté ici les résultats les plus significatifs; en tout plus d'un millier d'essais ont été réalisés au cours de ce programme expérimental. Quelques résultats supplémentaires sont présentés en Annexe 1.

L'analyse qualitative des résultats de ces essais montre que les déformations irréversibles apparaissent même pour des faibles valeurs du déviateur des contraintes. L'influence de la vitesse de déformation sur l'évolution des contraintes a été clairement illustrée dans ce chapitre. Les essais à long terme réalisés au cours de ce mémoire,

montrent également au cours du temps, un fluage important du matériau. Le fluage n'est pas influencé par la contrainte moyenne, de même qu'il y a peu de différence entre le fluage non-drainé et drainé. Nous supposons donc par la suite que le milieu est monophasique.

Ces matériaux présentent cependant une grande dispersion par rapport aux caractéristiques physiques. Des études effectuées par [Rousset, 1992] [ Hou&Wong, 1993] montrent que pour des modèles de comportement de type élastoplastique, les paramètres du modèle dépendent des caractéristiques physiques (teneur en eau, taux de carbonate, etc...). Cependant dans la suite de ce mémoire nous accorderons moins d'importance à cet aspect.

La suite de cette partie est consacrée à l'interprétation et à la modélisation dans le cadre d'un milieu monophasique des résultats des essais de laboratoire que nous avons présentés.