



HAL
open science

Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes

Jean François Serratrice

► **To cite this version:**

Jean François Serratrice. Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes. Cerema Méditerranée. 2022. hal-04168295

HAL Id: hal-04168295

<https://hal.science/hal-04168295>

Submitted on 21 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes



Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes

date : 19/09/2022

auteur : Jean François Serratrice

responsable de l'étude :

participants :

sous-traitants :

résumé de l'étude :

Des essais de fluage ont été réalisés sur des marnes prélevées dans le cadre d'un projet de tunnel. Parmi les sols indurés et les roches tendres, ces terrains sont connus pour les déformations différées dans le temps qu'ils produisent autour des ouvrages souterrains. Les essais de fluage d'une durée de un mois sont réalisés en compression uniaxiale et en condition drainée sous différents taux de chargement. Une loi empirique est utilisée pour représenter les réponses observées permet d'obtenir une représentation précise des courbes expérimentales. L'interprétation des essais porte sur la transition entre consolidation et fluage, la part de la déformation de consolidation et celle du fluage ou le taux de chargement déviatoire, puis les écarts des réponses observées par rapport à la loi logarithmique du temps. L'étude se poursuit par une application de la loi empirique à une série d'essais triaxiaux de fluage, puis à des courbes oedométriques standards, de courbes oedométriques de longue durée, des courbes de gonflement libre et de gonflement par paliers successifs de très longue durée.

nombre de pages : 142

n° d'affaire :

maître d'ouvrage :

référence :

citation :

Serratrice J.F., 2022. Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes. Rapport Cerema Méditerranée, Septembre 2022, 142 p.

Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes

J.F. Serratrice

Résumé

Des essais de fluage ont été réalisés sur des marnes prélevées dans le cadre d'un projet de tunnel. Parmi les sols indurés et les roches tendres, ces terrains sont connus pour les déformations différées dans le temps qu'ils produisent autour des ouvrages souterrains. Les essais de fluage d'une durée de un mois sont réalisés en compression uniaxiale et en condition drainée sous différents taux de chargement. Un dispositif particulier est mis en œuvre pour éviter le développement de déformations parasites de retrait et de gonflement. L'exploitation des courbes de fluage se fonde sur la progression de la vitesse de déformation. Une loi empirique est utilisée pour représenter les réponses observées, qui relie sous forme multiplicative une loi puissance du temps avec une fonction exponentielle du taux de chargement déviatoire. Pour aboutir à une meilleure description de ces courbes, une étape préliminaire de consolidation des marnes est introduite sous forme simplifiée au début des courbes de fluage. Les huit paramètres de cette représentation empirique sont identifiés sur les courbes. Des exemples de courbes de fluage sont présentés et commentés. La formulation empirique permet d'obtenir une bonne représentation des courbes expérimentales. L'interprétation des essais porte sur la transition entre consolidation et fluage, la part de la déformation de consolidation et celle du fluage ou le taux de chargement déviatoire, puis les écarts des réponses observées par rapport à la loi logarithmique du temps. L'étude se poursuit par une application de la loi empirique à une série d'essais triaxiaux de fluage, puis à des courbes oedométriques standards, de courbes oedométriques de longue durée, des courbes de gonflement libre et de gonflement par paliers successifs de très longue durée.

Mots clefs – marne, laboratoire, compression uniaxiale, fluage, loi empirique

Citation : Serratrice J.F., 2022. Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes. Rapport Cerema Méditerranée, Septembre 2022, 142 p.

An interpretation of the creep tests performed on marls

J.F. Serratrice

Abstract

Creep tests were carried out on marls sampled as part of a tunnel project. Of the hard soils and soft rocks, these materials are known for the delayed deformation in time that they produce around underground structures. Unconfined compression creep tests lasting one month were carried out in drained conditions under different loading ratios. A special device was used to prevent the development of disturbing shrinkage and swelling strains. The interpretation of the creep curves is based on the progression of the strain rate. An empirical law is used to represent the observed responses, which relates in a multiplicative form a power law of time with an exponential function of the deviatoric load. To achieve a better description of these curves, a preliminary consolidation stage is introduced in simplified form at the start of the creep curves. The eight parameters of this empirical representation are identified on the curves. Examples of creep curves are presented and discussed. The empirical formulation provides a good representation of the experimental curves. The interpretation of the tests focuses on the transition between consolidation and creep, the proportion of consolidation and creep deformation or the deviatoric stress ratio and the deviations of the observed responses from the logarithmic time law. The study continues with an application of the empirical law to a series of triaxial creep tests, followed by standard oedometer curves, long duration oedometer curves, free swelling and very long duration swelling steps.

Keywords – marl, laboratory, unconfined compression, creep, empirical law

Sommaire

Introduction

1. Les terrains testés

- 1.1 – Nature des terrains
- 1.2 – Propriétés physiques et minéralogiques
- 1.3 – Caractéristiques d'état
- 1.4 – Perméabilités
- 1.5 – Déformabilité
- 1.6 – Résistances

2. Les essais de fluage

- 2.1 – Principe des essais
- 2.2 – Procédure d'essai
- 2.3 – Difficultés rencontrées
- 2.4 – Courbes expérimentales. Série 3
- 2.5 – Courbes expérimentales. Série 9-2
- 2.6 – Observations en fin d'essai

3. Une représentation des déformations de fluage

- 3.1 – Objectif
- 3.2 – Mise en oeuvre
- 3.3 – Récapitulation

4. Application à d'autres paliers de longue durée

- 4.1 – Fluage triaxial
- 4.2 – Essais oedométriques standards
- 4.3 – Essais de gonflement libre
- 4.4 – Essais oedométriques de gonflement
- 4.5 – Récapitulation

Conclusion

Références

Annexes

Annexes

Annexe A. Calcul des déformations de consolidation et de fluage

Annexe B. Propriétés physiques et mécaniques des marnes

Annexe C. Matériel

Annexe D. Conditions des essais de fluage. Site d'Arbus

Annexe E. Conditions des essais de fluage triaxial. Site de Nice

Annexe F. Essais oedométriques

Une interprétation des essais de fluage réalisés sur des marnes

Introduction.

Un vaste programme expérimental a été réalisé en laboratoire sur les marnes du site d'Arbus (Pyrénées-Atlantiques) dans le cadre des reconnaissances géotechniques d'un projet de tunnel en 2006 et 2007. Le dossier d'études APS (dossier d'avant-projet sommaire), qui a été élaboré par le CETU (Centre d'Etudes des Tunnels, Bieth et al., 2006), rapporte tous les détails de l'étude géologique, hydrogéologique et géotechnique du site en intégrant notamment les résultats des reconnaissances réalisées en 2006. Les terrains rencontrés sont des molasses de piémont Oligo-Miocène appartenant à la formation des "poudingues de Jurançon". Ces dépôts détritiques d'âge tertiaire se sont formés à la fin de l'orogénèse pyrénéenne. Ils sont entièrement composés d'alluvions de piémont plus ou moins consolidées (Sunyach, 1984 ; AGSO, 1996). Les essais de laboratoire concernent essentiellement la matrice marneuse de cette formation, qui apparaît comme un matériau très sensible à l'eau, relativement homogène et surtout très déformable. Ces terrains sont désignés sous le nom de marnes dans la suite.

Les essais de laboratoire ont été réalisés en partie au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Aix-en-Provence sur des échantillons carottés provenant de six sondages profonds. Les prélèvements sélectionnés concernent les niveaux de marnes et d'argiles situés à proximité du tracé de l'ouvrage. Le programme expérimental comprend principalement des essais triaxiaux à haute pression qui ont pour but de mesurer les propriétés de déformabilité et les résistances des marnes testées dans une large gamme de pressions (0 – 10 MPa). Le programme comprend aussi des essais oedométriques K_0 , des essais de gonflement et des essais de fluage. Les résultats de ces derniers sont présentés ici, après le rappel des principales propriétés des marnes. Par leur dispersion, les résultats expérimentaux traduisent la variabilité spatiale dans le massif de toutes ces propriétés (propriétés physiques, caractéristiques d'état, modules de déformation, résistances, amplitudes des gonflements).

Ce programme d'essais a fait l'objet de rapports en 2006 et 2007 (voir les références de ces comptes rendus en annexe). Des essais complémentaires ont été réalisés ensuite, dont les résultats ont été présentés dans des rapports en 2011 et 2018. Des analyses d'une partie de cet ensemble de données ont été proposées par Rojat (2010) (déformabilité et résistance pour une application au calcul des tunnels) et Merah et Mathier (2014) (fluage et gonflement).

Les marnes sont des matériaux argileux et carbonatés, souvent gréseux, plus ou moins indurés, parfois fissurés ou altérés et parfois gonflants. Intermédiaires entre les sols et les roches, ces terrains se classent dans la famille des sols indurés et des roches tendres (SIRT). Les frontières

qui séparent de façon très floue ces matériaux des sols, d'une part, et des roches, d'autre part, pourraient être définies à partir de la mesure de leur résistance. Un point de vue plus large peut être adopté en se référant aux effets de structure dont l'existence détermine les propriétés mécaniques de ces terrains (Guilloux et al., 2005). Cette notion d'effet de structure a été introduite au début des années 1990 (Leroueil et Vaughan, 1990 ; Burland, 1990 ; Clayton et Serratrice, 1993 ; Kavvas et al., 1993 ; Johnston et Novello, 1993). Mais, dès les années 1960, Skempton (1964, 1967), Bjerrum (1967), Bishop et al. (1965), Chandler (1967, 1969), Blondeau et Josseume (1976) et d'autres avaient mentionné l'importance d'aborder la description des sols naturels surconsolidés et indurés en géotechnique, en matière de stabilité des pentes notamment. Assimilables aux marnes en termes de comportement mécanique, les terrains argileux tels que les molasses, les argilites, les pélites, les schistes figurent parmi les des sols indurés et les roches tendres.

Ces terrains argileux de natures variées, hétérogènes et plus ou moins indurés sont connus aussi pour les déformations différées dans le temps qu'ils produisent autour des excavations et des tunnels. Les mécanismes de consolidation (expulsion de l'eau interstitielle sous l'effet d'un chargement), de retrait, de gonflement, de vieillissement, d'endommagement ou de fluage sont autant de processus qui participent seuls ou superposés à ces déformations différées dans le temps.

Le fluage se définit par la progression des déformations différées irréversibles qui se développent sous l'effet d'un état de contraintes effectives constantes. Il s'étudie au laboratoire au moyen d'essais oedométriques où la compressibilité du sol est naturellement mise en rapport avec l'effet du temps (Bjerrum, 1967) ou au moyen d'essais triaxiaux quand la composante déviatoire du fluage est mise en avant. Les paliers de chargement effectués pendant les essais oedométriques conventionnels servent en effet à identifier les propriétés de consolidation (primaire) et de fluage (consolidation secondaire) des sols saturés. Cette thématique a fait l'objet d'innombrables études. Dans les sols argileux, il est reconnu depuis Buisman (1936) que l'évolution de la déformation axiale pendant le fluage est approximativement linéaire en fonction du logarithme du temps. La pente qui caractérise cette évolution, ou coefficient de fluage, est notée c_α . La forme en "S" de la courbe de consolidation des argiles normalement consolidées permet d'identifier le temps t_{100} , qui marque approximativement la transition entre la phase de consolidation et la phase de fluage, par la méthode de Casagrande (Casagrande et Fadum, 1940). Dans les sols surconsolidés cette transition apparaît moins marquée ou inexistante (Leroueil et al., 1985), ce qui la rend difficile à identifier. Enfin, des écarts par rapport à la loi de variation logarithmique du temps ont été observés expérimentalement (Murayama et Shibata, 1958 ; Mersi et al., 1978 ; et d'autres).

En matière d'essais triaxiaux, des études expérimentales ont été consacrées au fluage des argiles molles ou faiblement surconsolidées (Singh et Mitchell, 1968 ; Tavenas et al., 1978 ; Zhu et Yin, 2001) ou des argiles raides (Bishop et Lovenbury, 1969 ; Cui et al., 2009 ; Yu et al., 2015) ou des argiles reconstituées (Zhao, 2017), en condition drainée. D'autres études ont été consacrées au fluage des argiles en condition non drainée (Walker, 1969 ; Finn et Shead, 1973 ; Campanella et Vaid, 1974). Plus tard, l'attention a été portée sur les marnes très indurées (Gasc-Barbier et al., 2004 ; Fabre et Pellet, 2006 ; Tomanovic, 2012 ; Rassouli et Zoback, 2016) ou des schistes argileux (Sone et Zoback, 2014 ; Napola et Roberts, 2016).

Les deux modes de chargement oedométrique ou triaxial expriment en fait le même comportement différé dans le temps en rapport avec la surface d'états limites (SEL) qui délimitent le domaine pseudo-élastique du sol dans l'espace des contraintes effectives. Tavenas et al. (1978) ont montré que toutes les composantes du tenseur des vitesses de déformation

pouvaient s'exprimer sous la forme générale proposée par Singh et Mitchell (1968), qui relie une loi puissance du temps avec une fonction de contraintes sous forme multiplicative. Dans chaque direction de chargement, cette fonction exprime la distance de l'état de contrainte exercé par rapport à la section de la SEL correspondant à l'indice des vides du sol (Tavenas et Leroueil, 1979). Tavenas et al (1978) ont finalement suggéré qu'une formulation générale de la loi effort-déformation-temps pourrait résulter de la combinaison des notions d'état limite et d'isotaches (Suklje, 1957).

Beaucoup d'auteurs soulignent les difficultés rencontrées pour réaliser des essais de fluage sur des longues périodes en condition triaxiale (Kharchafi et Descoedres, 1995 ; Barla et al., 2004 ; Bérest et al., 2005 ; Fabre, 2005). Une grande difficulté souvent rencontrée avec les terrains argileux, qui sont sensibles aux variations des conditions hydriques, tient au maintien des matériaux dans leur état naturel, sans déformations parasites de retrait ou de gonflement. Un exemple est donné dans Serratrice (2007) où, faute d'une préservation efficace des éprouvettes de marne, les déformations enregistrées pendant des essais de fluage se sont révélées sous la forme de déformations de retrait. L'élimination de ces déformations ou leur contrôle font appel à des dispositifs et des protocoles d'essais particuliers, tels que les méthode de saturation à haute pression et sous contre-pression par exemple (Cui et al., 2009).

De nombreux travaux ont été consacrés à la modélisation du fluage des sols et des roches. Les approches les plus élémentaires se fondent sur des lois empiriques qui expriment la déformation ou la vitesse de déformation sous la forme de fonctions puissances, exponentielles ou logarithmiques du temps. Ce choix est justifié par les bonnes représentations des courbes expérimentales que produisent ces lois. Mais celles-ci ne possèdent pas une validité générale, ce qui a conduit au développement de nombreux modèles de comportement applicables aux argiles molles, aux roches et aux roches tendres. Huang et al. (2020) proposent un panorama des différents types de modèles de fluage applicables aux roches tendres.

L'étude du comportement des marnes a commencé au LRPC d'Aix-en-Provence dans les années 1970 pour répondre aux problèmes de conception des ouvrages à construire dans des massifs marneux, en particulier des tunnels (Gaudin, 1972 ; Gaudin et Ricard, 1974 ; Gaudin et al., 1981). C'est l'étude des déformations différées autour des tunnels qui a motivé les premières recherches sur ces terrains testés dans leur état naturel (Bouyge, 1977 ; Serratrice, 1979). Le LRPC d'Aix-en-Provence s'est alors doté de matériels de laboratoire pour étudier le comportement mécanique des marnes. Il s'agit principalement d'appareils triaxiaux, d'oedomètres standards et d'oedomètres K_0 , parmi lesquels figurent des matériels à haute pression dans la gamme 0 – 20 MPa (Serratrice et Flavigny, 1993 ; Gaudin et Serratrice, 1998 ; Serratrice, 2002).

Ces équipements ont permis de participer à de nombreux programme de reconnaissances géotechniques de sites pour des projets de tunnels et d'excavations implantés dans des marnes et plus généralement dans des sols indurés et des roches tendres (voir les références de quelques comptes rendus d'essais en annexe). Dans ces programmes, la réalisation d'essais de fluage répond à la nécessité d'évaluer l'ordre de grandeur des déformations différées du terrain, et en particulier le fluage amorti, qui déterminent l'équilibre à long terme du terrain et des soutènements.

Le programme expérimental consacré aux marnes du site d'Arbus comprend une trentaine d'essais de fluage réalisés sous la forme de paliers d'une durée de un mois en compression uniaxiale et en condition drainée. Une attention particulière a été portée à la conservation de la marne dans son état naturel pendant le temps des essais. Dans ce but, la méthode d'essai a été

élaborée sur le principe d'une sollicitation en compression uniaxiale pour un suivi de la seule déformation axiale, sans autoriser le contact de la marne avec de l'eau et l'atmosphère ambiante. Ainsi, le chargement ne nécessite pas d'exercer une pression de confinement et une contre-pression en présence d'eau et il s'effectue sans phase de consolidation préalable. Les éprouvettes sont entourées par une membrane étanche. Le dispositif de drainage est prévu pour assurer un échange minimal avec l'extérieur sans apport d'eau. Les niveaux de chargement statiques sont définis en référence à une mesure préalable de la résistance de la marne.

L'utilisation de plusieurs bâtis de chargement statiques permet de réaliser simultanément plusieurs essais de fluage "en parallèle" sous différents niveaux de sollicitation déviatoire. Il n'est pas nécessaire alors de mobiliser des machines triaxiales asservies occupées par ailleurs à la réalisation des essais triaxiaux. Cela permet aussi de réduire la durée de conservation des échantillons carottés en attente d'essai au laboratoire et, plus globalement, d'inscrire le programme expérimental dans les délais impartis pour réaliser l'étude géotechnique.

Des chargements lents sont mis en œuvre avant d'atteindre les paliers de fluage afin de limiter le développement de pressions interstitielles. Néanmoins, cet aspect des réponses de la marne n'est pas ignoré et l'interprétation des essais tient compte de la consolidation des éprouvettes avant le fluage, en identifiant les temps de transition t_{100} sur les enregistrements, comme à l'oedomètre. L'efficacité du dispositif a été évaluée à posteriori, après la fin des essais de fluage. En contrepartie, cette pratique engendre divers inconvénients : pas d'instrumentation locale pour la mesure des déformations, pas de mesure ni de contrôle direct des pressions interstitielles négatives ou positives, pas de mesures des variations de volume de la marne pendant le fluage. Il est fait références aux essais triaxiaux pour se donner des ordres de grandeurs de ces variations.

Ce compte-rendu commence par une présentation détaillée des propriétés des marnes recueillies au laboratoire. La description des terrains marneux est accompagnée par la présentation de leurs propriétés physiques et minéralogiques, puis de leurs caractéristiques d'état. Les propriétés mécaniques obtenues à l'aide d'essais triaxiaux à haute pression sont présentées et commentées ensuite.

La procédure de réalisation des essais de fluage est décrite alors avec une discussion des options choisies. Les courbes d'essais sont présentées à partir de quelques exemples pour donner une illustration des réponses observées pendant les paliers de fluage. Toutes les autres courbes sont rassemblées en annexe. L'interprétation des essais se fonde sur l'analyse des variations de la vitesse de déformation axiale. Une loi empirique en puissance du temps est proposée pour décrire ces variations, où la déformation est représentée par une étape préliminaire de consolidation suivie par la phase de fluage représentée par la loi empirique de Singh et Mitchell (1968). Une illustration est proposée. L'analyse et la discussion porte alors sur la part du taux de chargement déviatoire dans les déformations observées. Une récapitulation des paramètres de fluage est proposée pour discussion. Cela concerne la transition consolidation fluage notamment ou le taux de chargement déviatoire.

L'étude se poursuit par une application de la loi empirique à une série d'essais triaxiaux de fluage réalisés sur une marne du Plaisancien. Enfin, à titre de prospective, la loi est appliquée à l'interprétation de courbes oedométriques standards, de courbes oedométriques de longue durée puis des courbes de gonflement libre et de gonflement par paliers successifs de très longue durée. La formulation empirique permet d'obtenir une bonne représentation des courbes expérimentales. Ces quelques exemples pointent la relation entre la part de la consolidation et celle du fluage, puis les écarts des réponses observées par rapport à la loi logarithmique du temps.

1. Les terrains testés

1.1 – Nature des terrains

Les formations molassiques tertiaires d'âge Miocène-Pliocène forment un ensemble consolidé de piémont représenté par des argiles sableuses, des marnes, des molasses, des poudingues et, localement, des petits éléments calcaires (Sunyach, 1984 ; AGSO, 1996). L'ensemble se caractérise par d'importantes variations latérales de faciès. Les matériaux fins sont décrits comme des argiles plastiques jaunes bariolées de gris et bleu, compactes, plus ou moins marneuses à passées sableuses et des niveaux calcaro-gréseux minces. Ces terrains sont désignés sous le nom de marnes dans la suite.

L'étude porte sur près d'une quarantaine d'échantillons carottés dans six sondages profonds (jusqu'à 108 m), réalisés dans le cadre des reconnaissances géotechniques du site. Les coupes de sondage détaillées sont présentées dans les annexes de l'étude géologique, hydrogéologique et géotechnique produite par le CETU (Centre d'Etudes des Tunnels, Bieth et al., 2006). Les échantillons fournis au laboratoire sont prélevés à proximité du tracé du tunnel parmi les terrains argileux et marneux. Une description précise des échantillons carottés a été effectuée à l'ouverture des conteneurs au laboratoire. Les molasses sont qualifiées de marnes beiges argileuses à silto-sableuses, avec des passages argilo-gréseux et de rares passages de poudingue. De nombreuses concrétions carbonatées blanchâtres tendres, millimétriques à centimétriques apparaissent, disséminées dans la marne. Il apparaît aussi des passages vert-grisâtres ou des passages de teinte rosée à lie de vin, plus ou moins étendus et persistants. Les terrains ne sont pas fissurés.

La description détaillée des échantillons carottés et la totalité des mesures des propriétés des terrains sont données dans les rapports d'études (Serratrice, 2007, 2011). Les essais de fluage ont été réalisés dans les échantillons sélectionnés pour leur aspect homogène et argileux d'après leur description visuelle.

1.2 – Propriétés physiques et minéralogiques

Les propriétés physiques des marnes ont été mesurées au moyen des procédures d'essais normalisées. Elles sont reportées dans le [tableau 1](#). Elles se classent en argiles peu plastiques (Ap) d'après leurs limites de consistance. Les analyses granulométriques ont été effectuées par diffraction laser sur des fragments prélevés directement dans les échantillons carottés (dans leur état naturel, sans séchage). A une exception près, les courbes sont regroupées dans un faisceau relativement étroit qui classe les matériaux dans la catégorie des limons.

Tableau 1 : Propriétés physiques des marnes.

propriétés	w _L (%)	I _p (%)	V _B ⁽¹⁾ (g/100 g)	C ₂ ⁽²⁾ (%)	C ₈₀ ⁽²⁾ (%)	D _{max} ⁽²⁾ (mm)	C _{CO3Ca} ⁽³⁾ (%)
plages des mesures	26 - 42	12 - 24	2 - 5	23 - 36	94 - 100	0,2	0 - 80

⁽¹⁾ 23 mesures (une mesure éliminée)

⁽²⁾ 16 mesures

⁽³⁾ 25 mesures

Les valeurs au bleu de méthylène V_B mesurées sur les molasses sont comprises entre 2 et 5 g/100 g. Les teneurs en carbonates sont très dispersées et elles sont comprises entre 0 et 80 %.

Vingt-cinq analyses minéralogiques semi-quantitatives par diffraction X ont été effectuées sur des fragments d'échantillons issus des sondages carottés. Le [tableau 2](#) indique les teneurs des différents constituants. En moyenne, le quartz, la calcite et les argiles se répartissent en parts à peu près égales (33 % environ). Néanmoins, en comparant entre-elles les différentes analyses, le quartz et la calcite apparaissent en proportions variées (de 16 à 72 % et de 0 à 62 % respectivement), contrairement aux argiles (de 20 à 50 %). Les smectites et les interstratifiés contenant de la smectite constituent la phase dominante des argiles (67 % en moyenne, contre 20 % d'illite et 13 % de kaolinite).

Tableau 2 : Composition des marnes d'après les analyses minéralogiques par diffraction X.

constituants	roche totale			argiles		
	Quartz	Calcite	Argiles	Sm-Is	II	Ka
teneurs (%)	16 - 72	0 - 62	20 - 50	45 - 85	8 - 37	7 - 35

25 analyses

En considérant les pourcentages de quartz (Qz), de calcite (Ca) et des argiles (Ag) qui constituent la roche totale, puis, parmi les argiles, les smectites (Sm-Is) associées à l'ensemble des interstratifiés (smectite, illite/smectite et kaolinite/smectite), l'illite (II) et la kaolinite (Ka), des relations linéaires entre les teneurs des constituants peuvent être établies. Les graphiques de la [figure B-2](#) en [annexe B](#) présentent ces relations entre les constituants. Ces relations sont données là telles qu'elles apparaissaient à partir de 31 analyses minéralogiques réalisées sur les molasses du tunnel du Mont Sion en Savoie (autoroute A41) (Gaudin et Serratrice, 1998).

Les proportions variables du quartz et de la calcite, pour une proportion plus homogène d'argiles, justifient l'appellation de marnes argileuses à silto-sableuses données aux molasses. Ces analyses soulignent la variabilité de la composition des molasses au sein du massif.

1.3 – Caractéristiques d'état

Des mesures des caractéristiques d'état des marnes sont réalisées sur des fragments d'échantillon. Mais la plupart des mesures ont été effectuées sur les éprouvettes découpées dans les échantillons carottés. Le poids volumique γ et le poids volumique sec γ_d sont calculés avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. L'indice des vides e et le degré de saturation S_r sont calculés avec une masse volumique solide $\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$ choisie forfaitairement, soit un poids volumique solide $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$.

Tableau 3 : Moyennes des teneurs en eau et des poids volumiques de l'ensemble des données.

variable	n	mini	maxi	étendue	moyenne	écart-type	coef. variation
teneur en eau (%)	479	7,52	21,10	13,57	14,11	2,24	0,159
poids volumique (kN/m^3)	218	20,09	23,35	3,25	21,68	0,530	0,0244

Tableau 4 : Moyennes des teneurs en eau et des poids volumiques des éprouvettes de fluage.

variable	n	mini	maxi	étendue	moyenne	écart-type	coef. variation
teneur en eau (%)	27	9,59	17,50	7,91	13,50	1,74	0,129
poids volumique (kN/m^3)	27	21,11	22,73	1,62	21,78	0,398	0,0183

Le [tableau 3](#) récapitule les caractéristiques moyennes d'état des marnes, pour ce jeu de données consistant (479 mesures de teneur en eau, 218 mesures des poids volumiques) et confirme la variabilité de ces propriétés. Des détails sont donnés dans les rapports d'études (Serratrice, 2007, 2011). Deux histogrammes de ces données sont reproduits sur la [figure B-1](#) en annexe. Les dispersions sont prononcées comme dans la plupart des massifs de ce type.

Le [tableau 4](#) rassemble les caractéristiques moyennes d'état des vingt-sept éprouvettes de fluage. Ces caractéristiques sont cohérentes avec les précédentes et la dispersion est un peu réduite. Les [tableaux 4 et 5](#) donnent les caractéristiques moyennes d'état des marnes, d'après les [tableaux 3 et 4](#) et avec $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$. Les marnes ne sont pas saturées.

Tableau 5 : État initial moyen pour les marnes. Ensemble des données.

sols	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e ()	S _r (%)	w _{sat} (%)	γ_{sat} (kN/m ³)
marne	14,11	21,68	19,00	0,395	96,6	14,61	21,78

Tableau 6 : État initial moyen pour des éprouvettes de fluage.

sols	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e ()	S _r (%)	w _{sat} (%)	γ_{sat} (kN/m ³)
marne	13,50	21,78	19,19	0,381	95,7	14,10	21,90

1.4 – Perméabilités

Des mesures de la perméabilité des marnes ont été réalisées à l'appareil triaxial au moyen d'essais à charge constante avec mesure du débit entrant et du débit sortant. Pendant chacune des phases d'écoulement, une différence de pression d'une vingtaine de kilopascals est maintenue entre le pied et la tête de l'éprouvette, ce qui produit un écoulement d'eau sous charge hydraulique constante (écoulement ascendant sur la hauteur de 10 cm des éprouvettes, durée de 25 à 60 heures). Cette différence de pression correspond à un gradient hydraulique voisin de vingt.

D'après les quatre essais réalisés, la perméabilité des molasses est égale à 10^{-10} m/s en moyenne, avec une tendance à décroître avec l'augmentation de la pression de confinement. En admettant des modules oedométriques E_{oed} égaux à 10 et 100 MPa, la relation de l'élasticité $c_v = k E_{oed} / \gamma_w$ donne des coefficients de consolidation c_v égaux à 10^{-7} et 10^{-6} m²/s respectivement, en accord avec les temps de consolidation enregistrés pendant les phases de consolidation triaxiales ($\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$ poids volumique de l'eau).

1.5 – Déformabilité

Les essais triaxiaux à haute pression ont pour but de mesurer les propriétés de déformabilité (module de Young, coefficient de Poisson, dilatance) et les résistances (critère de Mohr-Coulomb ou autre) des matériaux testés dans une large gamme de pressions. Le programme d'essais comprend des essais triaxiaux CD, CU et UU à haute pression (HP) en compression, pour des pressions effectives moyennes comprises entre 0,1 et 10 MPa (CD éprouvettes consolidées drainées, CU éprouvettes consolidées non drainées avec mesure de la pression interstitielle, UU éprouvettes non consolidées non drainées). Les essais comprennent des cycles de chargement

déchargement. Des exemples de courbes triaxiales de cisaillement en compression sont donnés sur les figures B-5, B-6 et B-7 en annexe B.

Les variations de volume finales enregistrées pendant les phases de consolidation triaxiales sont représentées en fonction des pressions effectives appliquées sur le graphique de la figure B-3a, en échelles semi-logarithmiques (essais triaxiaux HP CD et CU, au total 114 mesures). La réponse d'un essai triaxial HP à chemin contrôlé quasi-isotrope est superposée aux points expérimentaux individuels (éprouvette BUS10, en vert, $\Delta q/\Delta p = 0,085$). La dispersion des mesures est grande. Néanmoins une tendance se dessine, encadrée par les droites de pente $C_s^* = 0,02$ et $C_c^* = 0,14$ où les coefficients de gonflement et de compression isotropes sont définis en déformations par C_c^* (ou C_s^*) = $d\varepsilon_v / d(\log(p_c))$. La figure B-3b montre le chemin de déformation suivi pendant le chemin radial contrôlé (en vert) et quelques points de consolidations anisotropes.

Les modules de Young E (essais triaxiaux CD) et E_u (essais triaxiaux CU) sont mesurés au début des courbes de cisaillement dans le plan (ε_a, q) ou sur les boucles de chargement-déchargement enregistrées pendant les cycles (E_{ini} et E_{cyc}). Les coefficients de Poisson ν sont déduits des pentes μ des chemins de déformation ($\varepsilon_a, \varepsilon_v$), au début des cisaillements drainés ($\mu = \Delta\varepsilon_v / \Delta\varepsilon_a = 1 - 2\nu$).

Les graphiques de la figure B-4 montrent les modules d'Young en fonction de la contrainte moyenne effective p_c ou totale p_{Tc} . Les modules mesurés en compression uniaxiale sur les éprouvettes de fluage sont reportés aussi. Il apparaît une grande dispersion. Les modules augmentent avec la pression moyenne.

Sur la figure B-4a, les modules $E_{ini CU}$ (essais CU) sont légèrement plus forts que les modules $E_{ini CD}$ (essais CD) en moyenne. Par contre, les modules $E_{ini UU}$ (essais UU), qui sont reportés en fonction de la pression moyenne totale p_{Tc} (étoiles vertes), apparaissent plus faibles systématiquement et ne dépendent pas de p_{Tc} . En effet, pendant ces essais non consolidés non drainés, la contrainte effective moyenne est petite (et inconnue) du fait de la présence d'une pression interstitielle (non mesurée), si bien que les modules $E_{ini UU}$ se rangent à proximité de l'origine du graphique (p_c, E_{ini}), dans la lignée des modules mesurés pendant les essais CD et CU à basse pression. De plus, ces modules sont en accord avec les modules mesurés pendant les essais de compression uniaxiale (triangles).

Tableau 7 : Encadrements des mesures des modules d'Young drainés.

enveloppe	inférieure	supérieure	unités
module initial E_{ini}	$E_{ini} = 6 (p_c)^{1/2}$	$E_{ini} = 15 (p_c)^{1/2}$	(p_c en kPa, E_{ini} en MPa)
module cyclique E_{cyc}	$E_{cyc} = 10 (p_c)^{1/2}$	$E_{cyc} = 28 (p_c)^{1/2}$	(p_c en kPa, E_{cyc} en MPa)

Tableau 8 : Moyennes des modules d'Young mesurés en compression uniaxiale sur les marnes.

variable	n	mini	maxi	étendue	moyenne	écart-type	coef. variation
module E_{ini} (MPa)	32	32	369	337	157	66,8	0,425
module E_{cyc} (MPa)	16	68	380	312	206	87,6	0,424

Sur la figure B-4b, les modules de rechargement E_{cyc} sont reportés en fonction de la contrainte effective moyenne p_c . La dispersion est grande. Les modules $E_{cyc CU}$ (essais CU) sont égaux en moyenne aux modules $E_{cyc CD}$ (essais CD). Un encadrement des mesures est proposé avec une expression en racine carrée de la pression moyenne effective (tableau 7). Ces expressions empiriques prévoient des modules nuls à l'origine, ce qui est contredit par les essais de

compression uniaxiale. D'autres expressions pourraient être adoptées avec des ordonnées non nulles à l'origine en introduisant des paramètres supplémentaires.

Le [tableau 8](#) donne la moyenne des modules d'Young initiaux E_{ini} et cycliques E_{cyc} mesurés en compression uniaxiale.

1.6 – Résistances

Les [figures B1-5 et B1-6](#) donnent des exemples de courbes enregistrées pendant des essais triaxiaux CD HP. La [figure B1-7](#) montre des exemples de courbes d'essais CU HP. Les paramètres mécaniques des marnes sont identifiés à partir de ces courbes. Quelques-uns de ces paramètres sont reportés sur les graphiques. C'est le cas de la dilatance qui est définie par la pente négative des chemins de déformation (ϵ_a , ϵ_v) après le pic de résistance à basse pression pendant les essais CD ($\delta = \Delta\epsilon_v / \Delta\epsilon_a$).

Les résistances exprimées en contraintes effectives sont reportées dans le plan (p , q) de la [figure B-8a](#). Elles sont encadrées par deux droites de Coulomb dont les équations sont indiquées dans le [tableau 9](#) ($\sin\phi' = 3M_c / (6 + M_c)$, $c' = C_{qc} (3 - \sin\phi') / 6 \cos\phi'$, M_c et C_{qc} caractéristiques des droites de Coulomb, c' cohésion, ϕ' angle de frottement interne).

Tableau 9 : Encadrement des résistances au cisaillement des marnes en contraintes effectives.

paramètres	C_{qc} (kPa)	M_c ()	c' (kPa)	ϕ' (degré)
enveloppe mini	0	0,678	0	17,7
enveloppe maxi	1067	1,155	511	29,0

Les résistances mesurées à l'aide des essais CU HP (orange), UU HP (vert) et les résistances en compression uniaxiales (mauve) sont reportées dans le plan des contraintes totales (p_T , q) de la [figure B-8b](#). Les résistances mesurées à l'issue des essais de fluage sont incluses dans ce dernier ensemble. Toutes ces résistances non drainées sont encadrées par deux paraboles d'équation $q_{rup} = A (p_{rup})^{0,5}$ où $A = 33$ et 62 (p_{rup} et q_{rup} en kPa). Les résistances données par les essais UU HP et les résistances en compression uniaxiales sont reportées dans le plan des contraintes totales (p_T , q) de la [figure B-9](#). Trois droites de Coulomb ont été indiquées dans ce plan pour encadrer les résistances mesurées, de pente $M_{cu} = 0,314$ et d'ordonnées à l'origine $C_{qcu} = 0$, 1200 et 2400 kPa respectivement. Ces paramètres sont associés aux caractéristiques $\phi_u = 8,6^\circ$ et $c_u = 0$ et 577 et 1153 kPa. Le [tableau 10](#) donne la moyenne des résistances en compression uniaxiale des marnes.

Tableau 10 : Moyennes des résistances en compression uniaxiale des marnes.

variable	n	mini	maxi	étendue	moyenne	écart-type	coef. variation
résistance σ_c (kPa)	32	304	2370	2066	1236	452	0,366

A l'image de leurs propriétés physiques et minéralogique et de leurs caractéristiques d'état, les propriétés mécaniques des marnes sont dispersées (déformabilité, résistance, gonflement).

2. Les essais de fluage

Ces essais de laboratoire s'inscrivent dans le programme expérimental consacré à l'étude des marnes du site d'Arbus et dont une partie des résultats a été présentée au paragraphe précédent.

2.1 – Principe des essais

Les essais de fluage ont pour but de mesurer les déformations différées dans le temps des marnes sous des états de contraintes déviatoires constants. Les marnes sont testées dans leur état naturel sur des éprouvettes découpées dans des échantillons carottés. Le chargement est effectué en compression uniaxiale en un ou plusieurs paliers. Au cours de chaque palier, un effort axial F_0 est maintenu constant pendant une durée de un mois à l'aide d'un bâti de chargement. La déformation axiale est mesurée depuis le début du chargement, ce qui permet d'évaluer la déformation élastique instantanée, puis les déformations différées dans le temps. En fin d'essai et après déchargement, la recouvrance de la déformation est mesurée au cours d'un dernier palier.

Une difficulté rencontrée pendant les essais de fluage tient au dessèchement des marnes au fil du temps (Serratrice, 2007). L'état initial du terrain n'est pas préservé dans ce cas. Des déformations parasites de retrait se superposent alors aux déformations de fluage. Ces déformations sont des compressions. A l'opposé, le contact de la marne avec de l'eau peut être à l'origine de déformations de gonflement. En vue d'éviter le développement de ces déformations, un dispositif particulier a été mis en œuvre pendant ce programme d'essais. Il consiste en : 1) un chargement des éprouvettes en compression uniaxiale dans une cellule triaxiale sans fluide de confinement ; 2) un drainage du sol par les deux extrémités des éprouvettes dans des conditions minimales d'échange avec l'extérieur ; 3) une protection latérale étanche disposée en périphérie des éprouvettes.

Ces dispositions sont rendues possibles en raison de la faible teneur en eau des marnes ($w = 13,5\%$ en moyenne), de leur forte compacité ($e_0 = 0,381$ en moyenne) et de leur raideur ($E_{ini} = 157$ MPa en moyenne). Le chargement en compression uniaxiale génère peu de variation de la pression moyenne totale (un tiers de la charge axiale). Il évite le recours à la phase de consolidation préalable des chargements triaxiaux standards. Sous les confinements faibles, les marnes sont raides, peu compressibles et légèrement contractantes. Des chargements non drainés modérés génèrent des faibles pressions interstitielles qui sont rapidement dissipées ensuite.

Le chargement s'effectue dans une cellule triaxiale entre des plateaux de diamètres supérieurs à celui des éprouvettes (figure C-1 en annexe). La cellule joue un rôle de guidage de l'effort axial, mais aussi un rôle de protection thermique et hydrique. A l'intérieur de la cellule, les éprouvettes sont placées en contact direct avec l'embase triaxiale et la tête triaxiale, sans dispositif intermédiaire (ni plaque poreuse ni papier-filtre). Cette disposition est destinée à éviter des échanges hydriques entre la marne saturée et l'atmosphère, sans avoir recours à des appareillages de contrôle spécialisés. Il est admis que, aux deux extrémités des éprouvettes, les interfaces éprouvette-acier jouent un rôle de drain, dans un contexte où, sous l'effet du chargement et du fluage, les volumes d'eau interstitielle expulsée sont très faibles et s'effectuent lentement. De plus, le drainage radial n'est pas restreint.

Cette disposition permet aussi d'éviter de connecter la marne à un circuit de drainage saturé en eau sous une contre-pression associée à une pression de confinement. En contrepartie, il n'est pas possible de mesurer ou contrôler les pressions interstitielles. Ce montage est prévu pour

conserver au mieux la marne dans son état naturel pendant une longue période et éviter aussi bien les déformations parasites de gonflement que les déformations de retrait. L'efficacité de cette disposition doit être vérifiée a posteriori en comparant les teneurs en eau finales aux teneurs en eau initiales de chacune des éprouvettes.

Enfin, les éprouvettes de fluage sont revêtues sur leur périphérie par une enveloppe constituée par une feuille d'aluminium, un joint en paraffine et une membrane en latex. La feuille étanche couvre la périphérie de l'éprouvette et vient au contact de la tête et l'embase. Elle est enroulée autour l'éprouvette sur 4/3 du périmètre, sans collage, pour former un raccord coulissant et étanche qui ne s'oppose pas à la déformation radiale du sol. Elle est raccordée aux embases par un joint en paraffine. La membrane en latex coiffe la périphérie de l'éprouvette, ces joints et les embases (figures C-1 à C-3 en annexe). Du fait de l'absence de confinement, ce dispositif ne s'oppose pas au drainage radial de la marne.

Dans ces conditions, le maintien de la marne dans son état naturel est assuré pour les durées d'essais envisagées. Il est admis que, après une première phase de consolidation, le fluage s'effectue en condition drainée et peut être exprimé en contraintes effectives. Afin de limiter les pressions interstitielles momentanées générées par le passage d'un palier au suivant pendant le chargement initial, l'amplitude des paliers est réduite et l'enchaînement des paliers est mis en œuvre lentement, après un premier paliers de préchargement. Une phase de consolidation initiale est prise en compte au début des paliers de fluage dans l'interprétation des essais (avant le temps de consolidation t_{100} à identifier sur les courbes d'essais).

2.2 – Procédure d'essai

Les essais de fluage sont réalisés par série de trois éprouvettes chargées en compression uniaxiale. Pour chaque série, quatre éprouvettes sont découpées manuellement dans un échantillon carotté. La première éprouvette est cassée en compression uniaxiale afin d'obtenir une estimation de la résistance q_r de la marne pour ce prélèvement. Un cycle de chargement déchargement est effectué à la vitesse de chargement $v = 50 \mu\text{m}/\text{min}$, soit une vitesse de déformation axiale de l'ordre de $8 \cdot 10^{-6} /\text{s}$. Cette mesure de résistance permet de définir en première approche les chargements de fluage des trois autres éprouvettes pendant un palier de un mois, au taux de 40, 60 et 80 %. Un autre mode de chargement consiste à appliquer successivement ces trois niveaux de chargement pendant une durée totale de trois mois sur une éprouvette. Les taux de chargement réels sont obtenus en fin d'essai quand les éprouvettes de fluage sont cassées à leur tour en compression uniaxiale. Toutes ces résistances en compression uniaxiale ne sont pas des caractéristiques effectives de résistance des marnes ni des résistances limites, faute d'être obtenues à des vitesses de chargement très lentes. Elles sont néanmoins utilisées pour définir les taux de chargement des paliers de fluage drainés.

Les éprouvettes sont découpées manuellement au touret à partir d'un échantillon carotté (diamètre initial $d_0 = 50 \text{ mm}$, hauteur initiale $h_0 = 100 \text{ mm}$). Ce mode de découpage est rapide et moins agressif que le découpage au carottier (évitant ainsi un contact du sol avec le fluide de carottage, air ou eau) ou à la trousse (pas d'efforts parasites de frottement latéral). Après découpage, les trois éprouvettes de fluage sont revêtues sur leur périphérie par l'enveloppe étanche. Puis elles sont montées dans des cellules triaxiales qui servent de guide de l'effort axial et de protection thermique. Les cellules sont posées sur des bâtis de chargement statique.

Les séries d'essais sont réalisées à l'aide d'un banc de fluage comprenant six bâtis de chargement, ce qui permet d'effectuer deux séries d'essais simultanément (figure C-3). La température de la

salle d'essai est contrôlée à $21,5 \pm 1,5$ °C. Les cellules triaxiales sont placées sur ces bâtis indépendants. Le chargement est effectué par paliers à l'aide de masses marquées. Pour chacune des trois éprouvettes, l'essai de fluage se déroule alors en quatre phases :

- chargement préliminaire sous une contrainte axiale $\sigma'_a = 40$ kPa environ pendant un à deux jours ; cette phase permet d'assurer le rattrapage des différents jeux mécaniques des bâtis,
- chargement jusqu'au taux de contrainte axiale déterminé précédemment et fluage pendant un mois, ou enchaînement par un autre palier de fluage,
- déchargement au palier de 40 kPa pour observer la recouvrance de la déformation axiale,
- transfert de la cellule triaxiale vers une presse triaxiale, sans démontage, suivi par un chargement en compression à la vitesse de chargement $v = 50$ $\mu\text{m}/\text{min}$ jusqu'à la rupture de l'éprouvette, soit une vitesse de déformation axiale de l'ordre de $8 \cdot 10^{-6}$ /s.

Les [figures 1 et 5](#) montrent l'enchaînement des quatre phases principales d'essais pour ces exemples : préchargement, chargement, consolidation-fluage, déchargement. La durée des paliers de fluage est fixée arbitrairement à un mois. Ce choix résulte d'un compromis entre le délai minimal permettant d'identifier les déformations de fluage avec le dispositif mis en œuvre et le délai imparti pour la réalisation des études. Les paliers de fluage ne sont pas lancés pour une durée indéfinie qui amènerait à la stabilisation de la déformation ou à la rupture de la marne.

Le déplacement axial Δh de l'éprouvette est mesuré manuellement depuis le début de l'essai de fluage à l'aide d'un comparateur fixé sur le piston de la cellule triaxiale (résolution 0,01 mm). Il s'agit d'une mesure globale de la déformation. La présence de la protection latérale des éprouvettes ne permet pas l'utilisation d'une instrumentation locale. Le chargement jusqu'à l'effort axial F_0 correspondant au taux de contrainte choisi est effectué par paliers intermédiaires de 50 kg d'amplitude environ pour le premier (250 kPa) puis de 25 kg pour les suivants (125 kPa), appliqués manuellement toutes les six minutes au moyen de masses marquées (soit une vitesse de 20 kPa/min à laquelle correspond une vitesse de déformation axiale égale à $3 \cdot 10^{-6}$ /s). Quand l'effort F_0 est atteint, l'origine du temps du palier de fluage est comptée six minutes après la pose de la dernière masse marquée. La contrainte axiale effective de fluage est $\sigma'_a = F_0 / A_s$, où A_s est la section initiale de l'éprouvette. La variation de cette section n'est pas mesurée et elle est considérée comme négligeable pour un faible niveau de la déformation axiale. Elle est représentée aussi par le déviateur $q = \sigma'_a$ (la contrainte radiale effective $\sigma'_r = 0$).

La déformation axiale est obtenue à partir des mesures Δh depuis le début de l'essai par $\varepsilon_a = \Delta h/h_0$. Pendant chacun des paliers de fluage, la vitesse de déformation axiale $\dot{\varepsilon}_a(t) = d\varepsilon_a / dt$ est déterminée par la pente de la tangente calculée sur cinq points successifs le long de la courbe (t, ε_a) où le temps est compté depuis le début du palier. Enfin, après la fin de l'essai, la résistance $\sigma'_{a \text{ rupt}}$ de l'éprouvette mesurée en compression uniaxiale sert de référence dans le calcul réel du taux de chargement $\sigma'_a / \sigma'_{a \text{ rupt}} = q / q_{\text{rupt}}$.

Les conditions d'essais sont reportées dans le [tableau D1-a](#) en [annexe D](#). Toutes les courbes d'essais sont rassemblées ensuite sur deux planches graphiques par série d'essais. La première planche montre les courbes contrainte-déformation $(\varepsilon_a, \sigma_a)$ mesurées en fin de palier pendant les cycles de chargement-déchargement des essais de fluage. En vis à vis et à la même échelle sont représentées les courbes contrainte-déformation $(\varepsilon_a, \sigma_a)$ enregistrées pendant les compressions uniaxiales avant et après fluage. Les rapports q/q_{rupt} prévisionnels ou post-fluage sont issus des pics de ces courbes (voir les légendes des graphiques). Le graphique du bas montre la déformation axiale en fonction du temps depuis le début des essais de fluage (t, ε_a) .

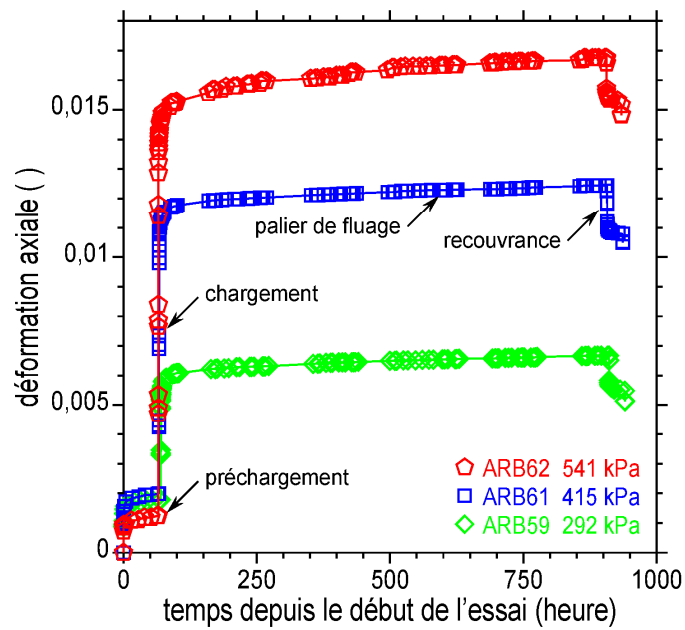


Figure 1 : Essais de fluage drainé en un palier. Déformation axiale en fonction du temps (t , ε_a) pendant toute la durée de l'essai. Série 3.

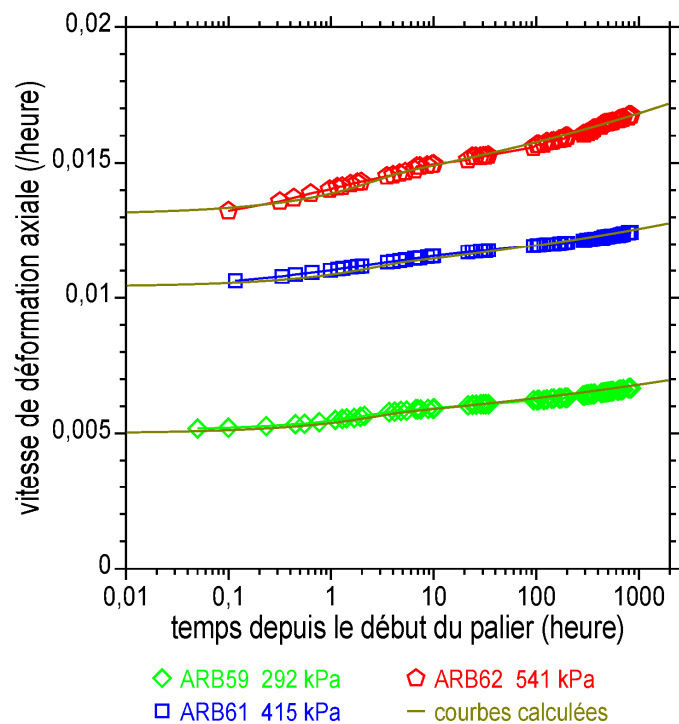


Figure 2 : Essais de fluage drainé en un palier. Déformation axiale en fonction du temps pendant les paliers de fluage ($\log(t)$, ε_a). Série 3.

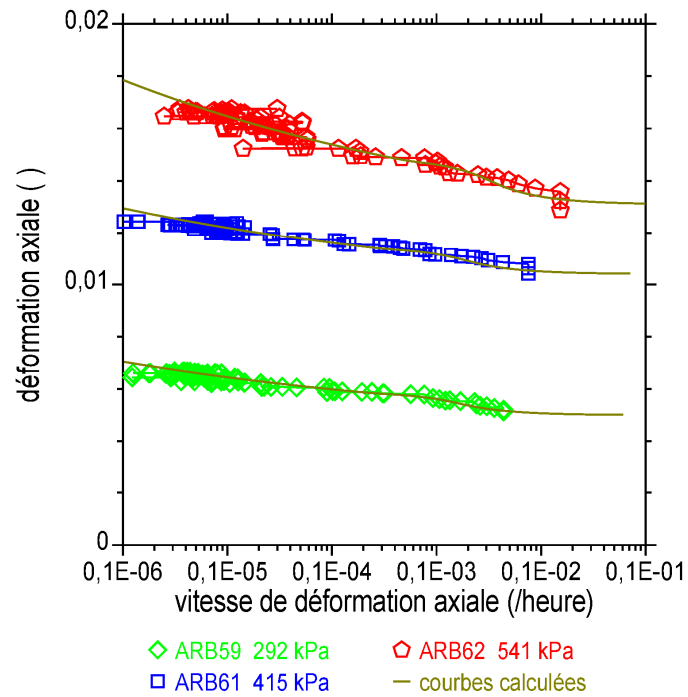


Figure 3 : Essais de fluage drainé en un palier. Déformation axiale en fonction de la vitesse de déformation axiale pendant les paliers de fluage ($\log(\dot{\epsilon}_a)$, ϵ_a). Série 3.

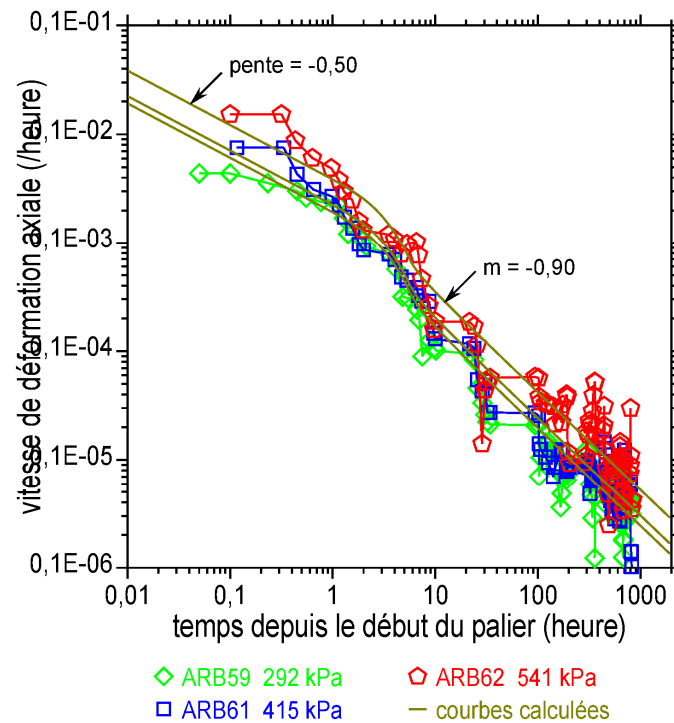


Figure 4 : Essais de fluage drainé en un palier. Vitesse de déformation axiale en fonction du temps pendant les paliers de fluage ($\log(t)$, $\log(\dot{\epsilon}_a)$). Série 3.

La seconde planche graphique montre les résultats des phases de fluage par série d'essais avec la vitesse de déformation axiale en fonction du temps ($\log(\dot{\epsilon}_a)$, $\log(t)$) et en fonction de la déformation axiale ($\log(\dot{\epsilon}_a)$, $\log(\epsilon_a)$) en échelles bi-logarithmiques, puis la déformation axiale en fonction du temps (t , ϵ_a) en échelles semi-logarithmiques ($\log(t)$, ϵ_a) pendant chaque palier de fluage.

2.3 – Difficultés rencontrées

Une première difficulté tient à la fiabilité des essais de compression préliminaire qui fournissent des résistances q_{rupt} dispersées. Les résistances des éprouvettes ARB72 et TAR04 (séries 4 et 7) s'avèrent anormalement faibles et l'estimation de q_{rupt} a été effectuée en référence aux données déjà disponibles à ce stade du programme d'essais. De plus, les premiers chargements indiquent un effet de serrage, avec une déformabilité (module d'Young) plus grande que celle observée pendant les cycles qui suivent.

2.4 – Courbes expérimentales. Série 3

Au total, neuf séries de trois essais de fluage ont été réalisées. Vingt-quatre éprouvettes ont été testées sous un palier de fluage (essais de fluage en parallèle, séries 1 à 8) et trois éprouvettes sous trois à six paliers de fluage successifs (série 9), soit trente-six paliers d'une durée de un mois et plus. Les chargements ont abouti à la rupture de deux éprouvettes. Pour les paliers de fluage amorti, les déformations axiales totales sont comprises entre 0,5 et 1,5 %, ce qui montre un ensemble de réponses assez homogène.

Le [tableau 11](#) donne les caractéristiques de quatre essais de fluage qui ont été choisis pour leur caractère représentatif de l'ensemble des essais (séries 3 et 9-2). Les caractéristiques des autres essais sont données dans [l'annexe D](#), puis l'ensemble des courbes d'essais. Les éprouvettes 1 à 3 sont chargées sous la contrainte axiale σ'_a en un palier de fluage (éprouvettes ARB59, 60 et 61). L'éprouvette 4 provient d'un autre échantillon carotté (éprouvettes TAR45). Elle est chargée sous trois paliers successifs. Les caractéristiques d'état données dans le [tableau 11](#) montrent une bonne homogénéité de la marne (teneur en eau initiale w_{ini} , indice des vides e_{ini}). Les teneurs en eau finales w_{fin} sont peu inférieures aux teneurs en eau initiales. Le [tableau 11](#) indique aussi le nombre total de paliers, en incluant les paliers intermédiaires, puis la durée totale des essais.

Tableau 11 : Caractéristiques de quatre essais de fluage.

	éprouvette	w_{ini} (%)	e_{ini} ()	w_{fin} (%)	nombre de paliers fluage	σ'_a (kPa)	durée totale de l'essai (heure)
1	ARB59	14,3	0,41	14,2	1 / 8	292	941
2	ARB61	14,9	0,41	14,1	1 / 10	415	936
3	ARB62	12,2	0,38	12,1	1 / 10	541	934
4	TAR45	14,4	0,39	14,0	3 / 12	695 à 1694	1951

La [figure 1](#) montre les déformations axiales enregistrées en fonction du temps (t , ϵ_a) pour les trois premières éprouvettes du [tableau 11](#) pendant la totalité de la durée des essais. Au centre figurent les paliers de fluage d'une durée de 840 heures (35 jours). Les taux de chargement réels sont égaux à 43 %, 61 % et 72 % d'après les mesures de résistance en fin d'essai. La progression de la déformation axiale est amortie, d'allure logarithmique.

Les éprouvettes sont déchargées à la fin de cette phase de fluage, ce qui permet d'observer la recouvrance des déformations. Cette recouvrance est partielle et les déformations sont majoritairement irréversibles. La [figure 2](#) montre la déformation axiale en fonction du logarithme du temps ($\log(t)$, ϵ_a) pendant ces trois paliers de fluage indépendants.

L'examen de ces courbes montre deux étapes successives de la déformation. Dans un premier temps, la déformation prend une allure amortie. Puis, après une inflexion vers $t = 5$ heures, la progression de la déformation axiale se révèle légèrement plus rapide qu'une progression logarithmique, tout en restant amortie d'après la [figure 1](#). La première étape s'interprète comme une phase de consolidation. En admettant que cette phase prend fin au temps t correspondant au facteur temps $T_{v92} = 1$ pour un degré de consolidation $U = 92\%$ (dénommé aussi t_{100}), le coefficient de consolidation vaut environ $c_v = T_{v92} H^2 / t = 1 \times 0,05^2 / (3600 \times 5) \approx 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Cet ordre de grandeur est en accord avec les mesures directes de la perméabilité des marnes. Après cette étape, la déformation axiale n'adopte pas toujours une allure plus rapide qu'une progression logarithmique, mais une allure ralentie au contraire.

Les [figures 3 et 4](#) montrent la vitesse de déformation axiale $\dot{\epsilon}$ en fonction du temps et en fonction de la déformation axiale dans des repères semi ou bi-logarithmiques. Ces vitesses de déformation sont entachées de beaucoup de bruit. Ce bruit est lié à la méthode de mesure et la précision des mesures. Il ne peut pas être réduit avec les moyens mis en œuvre. Il augmente avec le temps, quand la vitesse de déformation diminue. La méthode de dérivation des courbes accentue cet effet (pente calculée sur cinq points successifs), en particulier aux deux extrémités d'un palier. Il faut rappeler aussi que les courbes de fluage enregistrées sur les sols naturels présentent parfois des fluctuations (Bishop et Lovenbury, 1968). Néanmoins, cette estimation des vitesses de consolidation et de fluage s'avère très utile pour interpréter les essais, comme elle l'est pour interpréter tous les phénomènes lents en général.

Le graphique ($\log(t)$, $\log(\dot{\epsilon})$) de la [figure 4](#) porte l'essentiel de l'interprétation des essais de fluage sur les marnes. Il fait référence à la proposition de Singh et Mitchell (1968) qui ont présenté une relation empirique sous la forme d'une loi puissance pour décrire l'amortissement progressif de la vitesse de déformation avec le temps. Cette proposition se fonde sur des essais de fluage effectués sur des argiles. La loi puissance est associée sous forme multiplicative à une loi exponentielle reliant la vitesse de déformation au niveau du cisaillement appliqué, le rapport q / q_{rupt} ici.

D'après le graphique de la [figure 4](#) les réponses enregistrées apparaissent sous une forme bilinéaire dans cette représentation bi-logarithmique. Elles commencent par une direction de pente $-1/2$ qui n'est autre que l'expression de la consolidation primaire de la marne (voir [l'annexe A](#)). Puis, après un coude elle se prolonge par une demi-droite de pente m négative ($m < 0$) selon la notation de Singh et Mitchell (1968). Les pentes m des courbes ($\log(\dot{\epsilon})$, $\log(t)$) s'établissent autour de -1 en moyenne. Quand $m = -1$, l'évolution de la déformation axiale est logarithmique en fonction du temps et elle s'exprime par la pente de fluage c_α .

En évoluant autour de $m = -1$, la pente de fluage traduit une allure plus rapide ($-1 < m$) ou ralentie ($m < -1$) de la déformation axiale par rapport à la loi logarithmique du temps. De telles tendances se perçoivent sur des courbes de fluage publiées dans la littérature (Debernardi, 2008 ; Rassouli et Zoback, 2016). L'interprétation des essais reste néanmoins tributaire de la précision des mesures des vitesses de déformation.

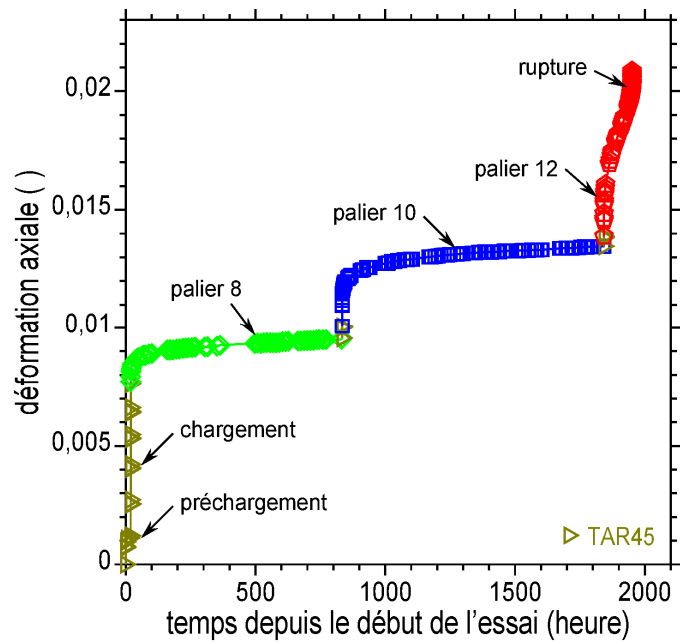


Figure 5 : Essai de fluage drainé en trois paliers. Déformation axiale en fonction du temps (t , ϵ_a) pendant toute la durée de l'essai. Série 9-2.

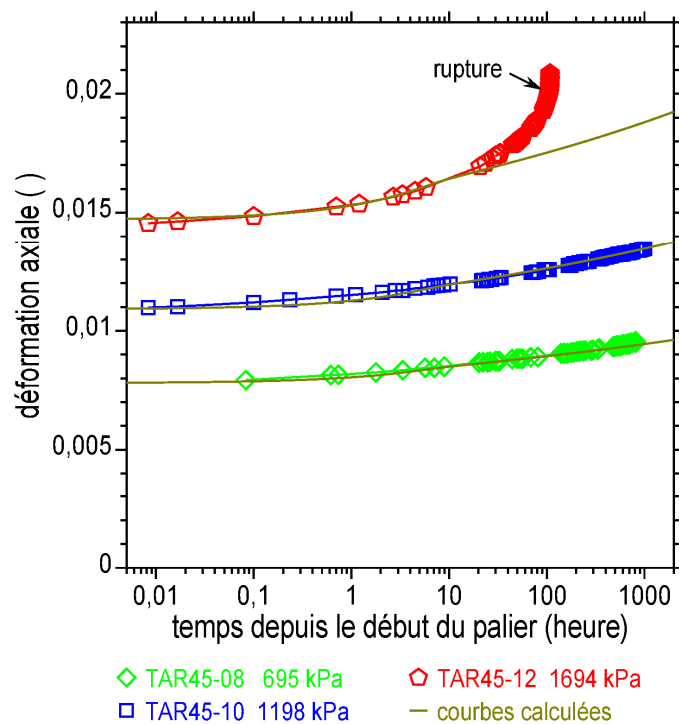


Figure 6 : Essai de fluage drainé en trois paliers. Déformation axiale en fonction du temps pendant les paliers de fluage ($\log(t)$, ϵ_a). Série 9-2.

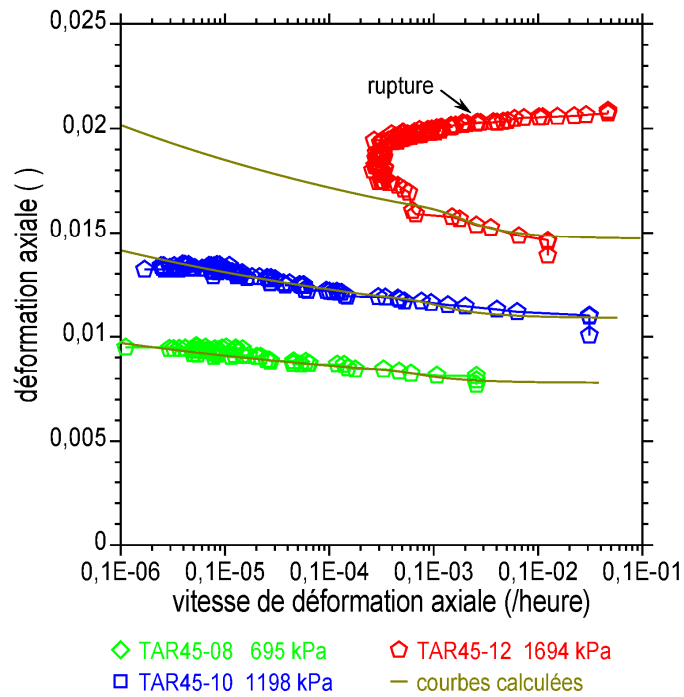


Figure 7 : Essai de fluage drainé en trois paliers. Déformation axiale en fonction de la vitesse de déformation axiale pendant les paliers de fluage ($\log(\dot{\epsilon}_a)$, ϵ_a). Série 9-2.

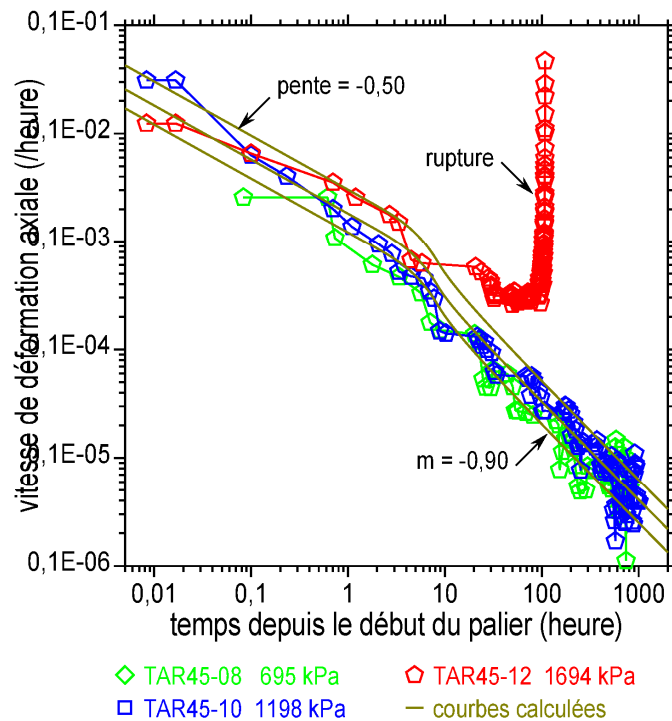


Figure 8 : Essai de fluage drainé en trois paliers. Vitesse de déformation axiale en fonction du temps pendant les paliers de fluage ($\log(t)$, $\log(\dot{\epsilon}_a)$). Série 9-2.

Enfin, les différents graphiques montrent que la vitesse moyenne de déformation croît avec le niveau de chargement déviatoire q/q_{rupt} , comme attendu. Dans les essais présentés ici, qui sont menés en parallèle, il est souvent difficile d'identifier une loi d'évolution $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(q/q_{rupt})$ de la vitesse avec de ce rapport du fait de la variabilité des propriétés des terrains. De plus, les essais sont effectués en compression uniaxiale et ne font pas intervenir la pression moyenne effective. Cet aspect du fluage n'est pas examiné ici.

En pratique et dans le prolongement de l'interprétation bilinéaire globale évoquée ici, il s'avère intéressant d'introduire un raccordement progressif des pentes $-1/2$ et m pour décrire plus fidèlement les courbes observées à la transition entre consolidation et fluage. Cela se traduit par les inflexions visibles sur les courbes $(\log(\dot{\epsilon}_a), \epsilon_a)$ et $(\log(t), \log(\dot{\epsilon}_a))$ des figures 3 et 4. Cette formulation est décrite dans l'annexe A.

2.5 – Courbes expérimentales. Série 9-2

Les figures 5 à 8 montrent la réponse de l'éprouvette TAR45 sous les trois paliers de fluage qui lui ont été appliqués (série 9-2). Le troisième palier aboutit à la rupture de l'éprouvette au bout de 109 heures depuis le début du palier. Les contraintes axiales appliquées sont égales à 695, 1198 et 1694 kPa, soit 41, 71 et 100 % de la résistance de la marne dans ce cas. La durée totale de l'essai est de 1951 heures (81 jours). La réponse observée pendant les deux premiers paliers est comparable aux réponses enregistrées pendant les essais de la série 3 examinés précédemment. La progression de la déformation est amortie. La pente m s'établit autour de $-0,9$ qui indique une allure plus rapide que la loi logarithmique du temps ($-1 < m$) comme le montrent les courbes $(\log(t), \epsilon_a)$ de la figure 6.

La vitesse de déformation axiale diminue pendant les trente premières heures du troisième palier de fluage ou elle atteint le niveau de $3 \cdot 10^{-5}$ /heure ($8,3 \cdot 10^{-9}$ /s) et s'y maintient pendant une cinquantaine d'heures (soit une vitesse de déplacement axial de $3 \mu\text{m}/\text{heure}$ pour cette éprouvette de 100 mm de hauteur). Puis elle augmente jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La vitesse de déformation atteint alors 0,006 /heure, ce qui correspond à une vitesse $v = 0,01 \text{ mm}/\text{min}$ ($10 \mu\text{m}/\text{min}$) dans un essai de chargement monotone. Le chargement ne peut plus être considéré comme drainé. La fin de la rupture de cette éprouvette s'établit en condition non drainée. L'interprétation proposée est donnée à titre d'illustration faute disposer de mesures (amorties) à plus long terme pour ce palier.

2.6 – Observations en fin d'essai

Les éprouvettes de fluage des séries 1 à 8 sont cassées en compression uniaxiale à la fin des essais de fluage. Les courbes contrainte-déformation (ϵ_a, q) sont rassemblées en annexe D. La déformation axiale est mise à zéro au début de la compression. Ces courbes sont placées en vis à vis de celles qui ont été enregistrées pendant les essais de fluage. Les points indiqués sont les mesures effectuées en fin de palier au cours du cycle de chargement-déchargement. Les courbes de compression uniaxiale présentent des pentes plus fortes (module d'Young) et des résistances plus fortes. Ces pentes s'apparentent aux pentes de déchargement mesurées pendant les cycles ou en déchargement après fluage.

En cumulant les déformations mesurées pendant les cycles de fluage avec les déformations de compression après fluage, comme sur la figure 9 (série 2), il apparaît effectivement que les compressions finales s'apparentent à des rechargements.

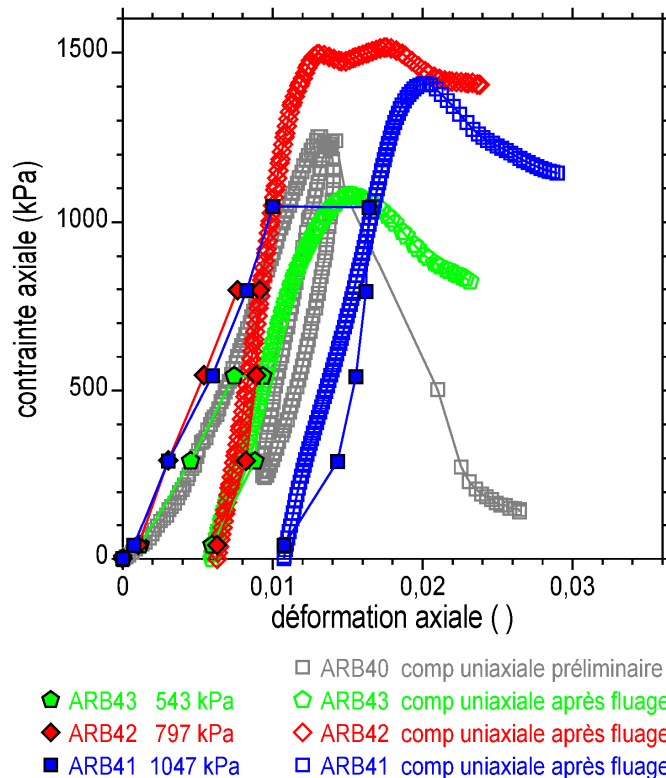


Figure 9 : Courbes contrainte-déformation mesurées pendant les essais de fluage et les essais de compression uniaxiale. Série 2. Les déformations de compression uniaxiale (chargement) et de fluage sont cumulées.

Les résistances après fluage sont très dispersées avec des mesures comprises entre 300 et 2370 kPa. Cette dispersion peut être attribuée à la variabilité des propriétés des marnes. Sur 32 essais, la résistance moyenne est égale à $\sigma_c = 1236$ kPa avec un coefficient de variation égal à 0,37 (tableau 10). Il apparaît majoritairement des résistances plus fortes à la fin des essais de fluage, en comparaison des résistances mesurées préalablement et qui ont servi au prédimensionnement des chargements appliqués. L'excès de résistance peut dépasser 50 %. De ce fait, les taux de chargement réels q/q_{rupt} sont souvent inférieurs aux taux prévisionnels. Ils sont reportés sur les graphiques en annexe D.

Ce supplément de résistance peut être attribué à l'effet du maintien des charges de fluage qui ont provoqué une reconsolidation des marnes. Mais il peut être attribué aussi à la présence du dispositif de protection latérale des éprouvettes.

Les déformations axiales (totales) ε_a observées pendant les paliers de fluage sont restées inférieures à 1,5 %. Avec un coefficient de Poisson $\nu = 0,2$ obtenu avec les essais triaxiaux, les déformations radiales et volumiques correspondantes sont $\varepsilon_r = -0,3$ % et $\varepsilon_v = 0,9$ %, soit une variation de volume de l'éprouvette de l'ordre de 1 cm^3 et un élargissement de son périmètre de l'ordre de 0,5 mm. En l'absence de confinement le raccordement coulissant de la feuille étanche et la membrane en latex semblent en capacité d'absorber cette elongation sans opposer de résistance ni un confinement. Il sera donc admis que le dispositif de protection latérale ne s'oppose pas à la déformation des éprouvettes de marne pendant les paliers de fluage. Par contre cette interaction n'est pas exclue pendant les chargements en compression uniaxiale qui suivent (ou les paliers de fluage qui ont conduit à la rupture), avec la conséquence de fausser le calcul du taux de chargement q/q_{rupt} .

Enfin, les mesures de la teneur en eau en fin d'essai montrent des faibles variations pendant la durée des essais de fluage, inférieures à 0,5 %, comme indiqué dans le [tableau 11](#) et en [annexe D1-b](#) (sauf l'éprouvette TAR46). Ces variations représentent un volume d'eau interstitielle expulsée de l'ordre de 1 cm^3 au maximum pour chacune des éprouvettes. De tels volumes tombent en accord avec les déformations enregistrées pendant la durée des essais de fluage, comme évoqué ci-dessus, et qui sont à attribuer principalement à la consolidation des marnes pendant les phases de chargement et au début des paliers de fluage. Ces déformations sont analogues à celles enregistrées pendant les essais triaxiaux drainés à basse pression (essais CD, voir les [figures B-5c et B-6c](#) en [annexe B](#)).

Ces faibles variations s'expliquent par le comportement mécanique de la marne. Elles prouvent l'efficacité du dispositif de conditionnement des éprouvettes pendant les essais de fluage d'une durée totale de 1000 à 2000 heures (1 à 3 mois). L'éprouvette TAR46 a fait l'objet d'un suivi prolongé au-delà de ce délai, pendant près de 20000 heures (du 30/07/2007 au 09/11/2009, soit 27 mois environ). La perte de masse est significative dans ce cas (plus de 17 g pour une teneur en eau initiale plus faible). Des traces d'oxydation sont apparues en périphérie de la tête et du pied de l'éprouvette (effet probable du contact entre l'aluminium de protection et des têtes triaxiales en acier), indiquant ainsi qu'un drainage s'est produit par les interfaces de contact entre ces têtes lisses et l'éprouvette.

En fin de déchargement, la déformation de recouvrance est faible et elle s'établit plus rapidement que la déformation au début des paliers de fluage. Toutefois, la durée d'observation reste limitée. Des déformations irréversibles importantes apparaissent alors, comme les montrent les courbes contrainte-déformation (ϵ_a, q) pendant les cycles de chargement-déchargement des essais de fluage (fins de paliers) et les enregistrements des déformations depuis le début des essais ([annexe D](#)). Ces déformations irréversibles augmentent avec le taux de chargement q/q_{rupt} , comme la part du fluage observée pendant les essais. Cela signifie que ces déformations irréversibles comptent une part de déformations différées qui ont été accumulées pendant le fluage et qui ne sont pas compensées par la recouvrance.

Cependant, il faut rappeler que tous les premiers chargements (essais de fluage et compressions uniaxiales) manifestent des signes de serrage, comme le montre l'éprouvette ARB40 sur la [figure 9](#) (carrés gris). Cela concerne principalement les taux q/q_{rupt} les plus petits, ce qui pourrait se traduire par une surévaluation du fluage dans ce cas. Ces déformations de serrage s'inscrivent dans les déformations irréversibles en fin de déchargement. Le préchargement effectué ne suffit pas pour effacer les effets du serrage. Une solution permettant d'atténuer ces effets consisterait à réaliser un cycle de chargement-déchargement préliminaire, jusqu'à 50 % de la résistance q_{rupt} par exemple, avant d'entamer le cycle de fluage. Ces questions touchent à la recompression des sols au début des essais de laboratoire et la prise en compte de ces déformations dans l'interprétation des essais. Ces déformations sont considérées comme le signe du remaniement des échantillons carottés dans les sols saturés.

Ces questions se posent pour les essais oedométriques en général et les essais de gonflement en particulier. Il apparaît notamment que les compressibilités oedométriques et isotropes (essai triaxial) ne sont pas strictement comparables, car elles font référence à des phases préparatoires différentes au début des essais (sous le poids du piston pour les premières, au premier palier de saturation pour les secondes) (Serratrice, 2020).

3. Une représentation des déformations de fluage

Une représentation empirique est proposée pour décrire les courbes de fluage analytiquement.

3.1 – Objectif

Cette représentation des courbes de fluage a pour objectif de décrire les déformations de fluage enregistrées dans le temps au cours des paliers qui ont été réalisés dans les conditions présentées au paragraphe précédent. Il ne s'agit pas d'établir une loi de comportement mécanique des marnes et seule la composante uniaxiale de la déformation sous charge constante est examinée. Ainsi, cette représentation empirique est établie dans le temps en associant successivement une phase de consolidation, puis une phase de fluage.

La présente étude est spécialement consacrée à cette phase de déformation devant le constat que les courbes déformation-temps ne sont pas toujours réductibles à la loi semi-logarithmique. Ces écarts ne s'observent pas sur les courbes de consolidation oedométriques standards, qui sont trop courtes (palier de 24 heures). Il apparaît sur les paliers oedométriques de longue durée; les paliers de gonflement et les paliers de fluage dont la durée dépasse une semaine (168 heures).

Dans la suite, la loi de fluage est définie en vitesse de déformation en référence à la proposition de Singh et Mitchell (1968). Elle est principalement déterminée par une direction de pente m dans le plan $(\log(t), \log(\dot{\epsilon}_a))$, dont la variation autour de -1 permet de décrire une évolution légèrement accélérée par rapport à la loi semi-logarithmique, ou au contraire, une évolution légèrement retardée.

3.2 – Mise en œuvre

Au cours d'un palier de chargement, la déformation axiale est représentée successivement par une déformation de consolidation puis une déformation de fluage. La transition s'effectue au temps t_d (voir l'annexe A). Le chargement de l'éprouvette n'est pas effectué en condition oedométrique. Néanmoins, la solution élastique de la consolidation unidimensionnelle est utilisée pour décrire l'évolution de cette déformation dans le temps au début du palier. Un coefficient de consolidation c_v est identifié sur la courbe pour établir le lien entre la déformation axiale et un degré de consolidation.

La déformation de fluage est introduite au moyen d'une loi empirique qui prend effet à partir du temps t_d . Cette loi de type puissance représente la déformation axiale totale, alors que la consolidation se poursuit. Elle est définie en vitesse de déformation dans le plan $(\log(t), \log(\dot{\epsilon}_a))$ où il est admis que cette évolution est guidée dans une direction de pente m ($m < 0$). A cette pente correspond le coefficient de fluage c_α de la loi logarithmique dans le plan $(\log(t), \epsilon_a)$. Dans ce plan, la part du fluage est exprimée par la différence entre cette courbe de fluage et la courbe de consolidation pour $t > t_d$.

Tableau 12 : Paramètres de la loi empirique de consolidation et de fluage (huit paramètres).

	paramètre	unité	définition
1	h_0	m	hauteur de l'éprouvette
2	k_{dra}	-	condition de drainage (drainage par une ou deux extrêmité de l'éprouvette)
3	ε_0	-	déformation axiale initiale à $t = 0$
4	ε_∞	-	déformation axiale de consolidation à $t = \infty$ (ou $\Delta\varepsilon = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0$)
5	c_v	m^2/s	coefficient de consolidation
6	m_d	-	pente de la tangente au temps t_d
7	m	-	pente de l'asymptote de fluage
8	o_m	-	ordonnée de l'asymptote de fluage

Cette proposition fait suite à l'étude de nombreuses représentations empiriques des déformations de fluage (voir les références des comptes rendus). Elle comporte huit paramètres (tableau 12). La méthode d'identification de ces paramètres sur les courbes enregistrées pendant un palier de chargement est présentée en annexe A. Une version simplifiée de six paramètres est indiquée aussi. Les paramètres de ces deux versions ont été identifiés sur chacun des paliers de fluage pris individuellement. Ils sont reportés dans le tableau D-1c de l'annexe D (versions à six et huit paramètres).

En réalité, l'identification est effectuée simultanément sur les trois courbes d'essais d'une série de trois paliers afin de conserver un maximum de paramètres fixes pour ces paliers qui concernent un échantillon carotté, c'est à dire volume relativement homogène de marne. Il s'agit notamment des paramètres c_v , m_d et m qui déterminent la forme de la réponse calculée. L'ajustement porte alors sur les paramètres ε_∞ (ou $\Delta\varepsilon = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0$) et o_m qui déterminent l'amplitude de la déformation à chaque instant.

Les courbes calculées avec la représentation à huit paramètres sont reportées avec les données expérimentales sur les graphiques $(\log(t), \varepsilon_a)$, $(\log(\dot{\varepsilon}_a), \varepsilon_a)$ et $(\log(t), \log(\dot{\varepsilon}_a))$ de l'annexe D. Globalement les courbes permettent de représenter assez fidèlement les données enregistrées, notamment la transition entre la phase de consolidation et la phase de fluage (inflexion des courbes), puis les réponses à plus long terme des marnes dans la limite de la durée des essais (un mois). Dans la majorité des cas, un triplet unique de paramètres c_v , m_d et m est adopté pour représenter la série d'essai. Ces paramètres représentent la réponse de l'échantillon carotté concerné. Ils varient peu d'un échantillon à un autre. Les valeurs les plus courantes sont $c_v = 0,1 \cdot 10^{-6} m^2/s$, m_d de -1,5 à -2 et m de -0,8 à -0,85. Ce jeu d'essai s'avère donc relativement homogène à ce titre, à l'image de la description qui est faite des échantillons de marne à dominante argileuse.

Parallèlement, les paramètres ε_∞ (ou $\Delta\varepsilon = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0$) et o_m d'une série d'essais s'ordonnent logiquement en fonction des taux de chargement. Les vitesses de fluage augmentent avec q/q_{rupt} . Toutefois, il n'est pas possible d'établir une loi de variation, compte-tenu de l'imprécision du calcul de ce taux. En fait, les écarts entre ces paramètres d'une série à l'autre semblent refléter avant tout la variabilité des propriétés de déformabilité des marnes qui est observée par ailleurs.

Les autres formulations étudiées (non présentées ici) fournissent des approximations plus ou moins proches des données expérimentales. Toutes ces réponses calculées s'éloignent rapidement les unes des autres après la fin des paliers, ce qui soulève la question de la pertinence des formulations de ce type et de leur faible capacité de prévision des déformations à long terme.

3.3 – Récapitulation

Les principaux paramètres de la représentation du fluage à huit paramètres sont rassemblés dans le [tableau D-1d2](#) en [annexe D](#). Le [tableau D-1d3](#) rapporte les valeurs min et max de ces caractéristiques et leurs valeurs moyennes pour celles qui ont une signification. Les coefficients de consolidation c_v sont compris entre $0,5 \cdot 10^{-7}$ et $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, dans un intervalle finalement assez resserré. Les temps t_d du début du fluage dans le modèle à huit paramètres sont compris entre 0,84 et 8,4 heures. Ils sont associés à des facteurs temps compris entre 0,49 et 0,81 et des degrés de consolidation compris entre 75 % et 89 %. Ils sont donc compris entre t_{70} et t_{90} (voir les temps caractéristiques de la consolidation élastique sur la [figure D-1d1](#)).

Pour simplifier, l'interprétation des essais fait appel, à la solution élastique de la consolidation unidimensionnelle, alors que le chargement s'effectue en compression uniaxiale et qu'un drainage radial est possible. Ce choix se justifie après coup car les déformations de fluage sont petites devant les déformations élastiques de chargement et les déformations de fluage qui font suite.

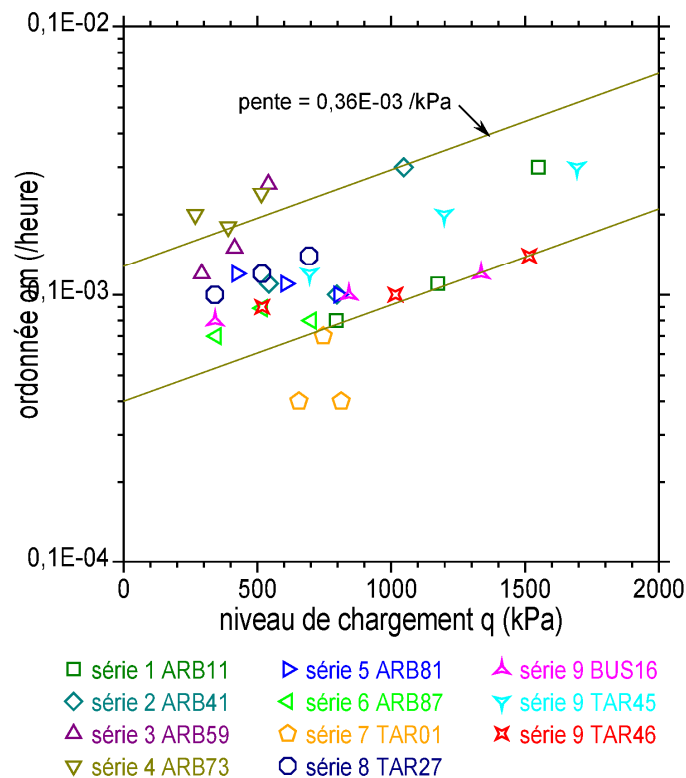


Figure 10 : Ordonnées à l'origine o_m en fonction du niveau de chargement q pour les neuf séries d'essais de fluage.

Les pentes de fluage $m = \Delta \log(\dot{\epsilon}_a) / \Delta \log(t)$ appartiennent à l'intervalle $0,8 < |m| < 0,9$ lui aussi resserré, avec une moyenne égale à 0,84. Elles représentent la première partie de la loi phénoménologique de Singh et Mitchell (1968) et elles s'inscrivent dans la plage indiquée par ces auteurs (voir [l'annexe D](#)). Inférieures à l'unité en valeur absolue ($-1 < m$), elles traduisent la forme concave croissante des courbes $(\log(t), \epsilon_a)$ donnant la déformation axiale en fonction du logarithmique du temps, déjà observée par Murayama et Shibata (1958) ou Mersi et al. (1978) pour le gonflement. Cette évolution "plus que logarithmique du temps" qui est observée systématiquement ici, prend néanmoins une allure amortie en échelles linéaires (t, ϵ_a) .

Les ordonnées à l'origine o_m sont reportées en fonction du niveau de chargement q sur la [figure 10](#) pour les neuf séries d'essais de fluage. Les données sont très dispersées. Un encadrement est proposé néanmoins dont l'expression est $\log(o_m/b) = a q$ où $a = \Delta \log(\dot{\epsilon}_a) / \Delta q = 0,36 \cdot 10^{-3} / \text{kPa}$ et $b = 0,45 \cdot 10^{-4}$ et $b = 1,21 \cdot 10^{-4} / \text{heure}$. Cette expression s'écrit aussi $o_m = b \exp(q/1205)$ où b est en kPa et o_m et b en heure^{-1}). Une expression analogue est donnée en fonction du taux de chargement q/q_{rupt} en [annexe D \(figure D-1d2\)](#). Mais elle est faussée par l'imprécision des mesures des résistances q_{rupt} . Le [tableau D-1d5](#) précise le passage d'une expression à l'autre.

L'expression $\log(o_m/b) = a q$ traduit le second terme de l'expression de Singh et Mitchell (1968), le premier terme étant représenté par la loi puissance d'exposant m . Quelques données de la pente $\Delta \log(\dot{\epsilon}_a) / \Delta q$ ont été recherchées dans la littérature (voir le [tableau D-1d4](#) en [annexe D](#)). Ces pentes semblent dépendre fortement de la nature des sols. Mais ces données sont rares. La pente $a = \Delta \log(\dot{\epsilon}_a) / \Delta q = 0,36 \cdot 10^{-3} / \text{kPa}$ est proche de celle indiquée pour l'argile de Londres.

La réalisation des essais de fluage sur les marnes du site d'Arbus pointe de nouvelles imperfections opératoires. En multipliant raisonnablement le nombre des essais, les essais font apparaître néanmoins un ensemble de réponses cohérentes et relativement homogènes. Ces réponses s'accordent à celles observées sur des argiles et des roches tendres par différents auteurs. Pour progresser, des moyens plus importants que ceux mis en œuvre ici seront à employer.

4. Application à d'autres paliers de longue durée

Les représentations empiriques à six et huit paramètres sont utilisées pour décrire les déformations enregistrées au cours de paliers de fluage, de paliers oedométriques ou de paliers de gonflement.

4.1 – Fluage triaxial

L'interprétation reprend les données d'une série d'essais de fluage réalisés sur une marne en condition triaxiale (voir les rapports d'étude). Les cinq éprouvettes sont confinées et sont consolidées sous la pression effective $p_c = 200$ kPa (éprouvettes FCD131 à 135). Puis elles sont chargées sous des efforts axiaux constants correspondant à des taux q/q_{rupt} compris entre 29 et 85 % du déviateur de rupture. Ce dernier a été mesuré dans des conditions analogues au cours d'un essai triaxial de cisaillement drainé monotone en compression (éprouvette FCD109). Après un chargement progressif par paliers, le fluage est enregistré manuellement pendant une durée de un mois.

Les caractéristiques de la marne, les conditions d'essais, les courbes expérimentales, les paramètres et les courbes calculées sont rassemblées dans [l'annexe E](#). La marne est homogène, moyennement compacte et saturée ($e_0 = 0,57$). Les calculs ont été réalisés avec les modèles à six et à huit paramètres qui fournissent une description assez fidèle des données ([tableau E-1c](#)). Le couple de paramètres ($c_v = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $m = -0,8$) est unique. Les pentes m_d changent avec les deux éprouvettes les plus chargées (FCD131 et FCD135, m_d de -1,5 à -1,3). Les paramètres ε_∞ (ou $\Delta\varepsilon = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0$) et o_m s'ordonnent avec le niveau déviatoire. La divergence entre les réponses calculées par les deux modèles apparaît rapidement après la fin des paliers de fluage.

Les paramètres du modèle à huit paramètres sont rassemblés aussi dans le [tableau E-1d](#). Les ordonnées o_m sont reportées en fonction du taux de chargement q/q_{rupt} sur la [figure E-1](#). L'encadrement proposé pour les marnes d'Arbus est indiqué aussi ([figure D-1d2](#)). Seules les ordonnées o_m des éprouvettes les moins chargées se situent dans cette bande (FCD132, 133 et 134). Les ordonnées o_m des deux autres éprouvettes se situent en-dehors (FCD131 et 135). Les taux de chargement de ces deux éprouvettes sont supérieurs à 0,75 ($q/q_{rupt} > 0,75$), limite à partir de laquelle la relation $\log(o_m/b) = a \cdot q$ cesse d'être valide ici.

4.2 – Essais oedométriques standards

Les exemples portent sur trois essais oedométriques de longue durée et deux essais conventionnels. Les caractéristiques des sols, les conditions d'essais, les courbes expérimentales, les paramètres et les courbes calculées sont rassemblées dans [l'annexe F](#).

Les trois essais de longue durée ont été réalisés sur les éprouvettes AVA02, 04 et 08 en deux cycles de chargement-déchargement. Chacun comprend trois paliers de longue durée. Les courbes de compressibilité ($\log(\sigma'_a)$, e) des deux premiers essais montrent des signes de remaniement des sols. En lien ou pas avec cette imperfection, les courbes de déformation en fonction du logarithme du temps montrent des réponses de formes différentes, dont les particularités sont soulignées par les réponses du modèle à huit paramètres (voir les paramètres dans le [tableau F1-d](#)). Les réponses se distinguent principalement par les coefficients c_v pour les

phases de consolidation et par les pentes m pour les phases de fluage. Avec $m < -1$, le fluage de l'éprouvette AVA02 présente une allure ralentie par rapport à la progression logarithmique, ce qui est souvent le cas des sols tourbeux. L'interprétation conduit à adopter des c_v croissant avec la charge axiale. Au contraire, avec $m = -0,85$, le fluage de l'éprouvette AVA04 est plus rapide par rapport à la progression logarithmique. Enfin, le fluage de l'éprouvette AVA08 s'interprète avec $m = -1$ et s'avère donc fournir une réponse linéaire en fonction du logarithme du temps.

Les deux essais suivants sont des essais oedométriques conventionnels réalisés en deux cycles et trois ou quatre paliers de consolidation (éprouvettes ORA01 et OUR04). Le premier a fait l'objet d'un suivi manuel alors que le second bénéficie d'un enregistrement électronique des mesures, qui sont restituées au pas de 1 heure en fin de paliers sur les graphiques. La dérivation des courbes déformation-temps s'en trouve améliorée. L'interprétation est proposée avec les modèles à six et huit paramètres (voir les paramètres dans le [tableau F1-d](#)). Le second aboutit à une meilleure approximation des courbes de fluage pendant la durée des paliers. Là aussi, des écarts se creusent rapidement entre les réponses des deux modèles après la fin des paliers.

4.3 – Essais de gonflement libre

Ces exemples portent sur deux séries d'essais de gonflement libre réalisés à l'oedomètre ou en condition isotrope (deux couples d'éprouvettes pas série). Dans le premier cas, le gonflement est provoqué par la mise en présence d'eau du sol dans une bague oedométrique sous le poids du piston (0,5 kPa). Dans le second cas, la bague rigide est remplacée par une membrane souple en latex. La déformation radiale est libre. La membrane évite le délitage du sol. Les deux essais sont menés en parallèle sur deux éprouvettes découpées dans un échantillon carotté. La déformation axiale est enregistrée à l'aide d'une chaîne de mesure. Généralement, le gonflement axial oedométrique est plus grand que le gonflement axial isotrope. Mais ce n'est pas toujours le cas (Serratrice, 2013 ; Serratrice et al., 2015).

Les échantillons carottés proviennent du site d'Arbus (voir le [paragraphe 2](#)). Les conditions d'essais et les paramètres sont donnés dans [l'annexe F-2](#). Le signe de la déformation axiale a été changé afin de rendre positives les vitesses de déformation $\dot{\epsilon}_a$ (qui sont à représenter en échelles log). L'interprétation est proposée avec la représentation à huit paramètres (voir les paramètres dans le [tableau F2-d](#)). Les phases initiales de gonflement ("consolidation") sont mal décrites par le calcul dont les réponses s'avèrent plus lentes. L'évolution du fluage dans le temps est ralentie par rapport à la progression logarithmique ($m < -1$). Les écarts entre les courbes traduisent d'abord la variabilité des propriétés des terrains.

4.4 – Essais oedométriques de gonflement

Les courbes de gonflement présentées ici ont été recueillies au cours d'essais de gonflement par paliers successifs réalisés sur des marnes (voir les [tableaux F3](#)). Le signe de la déformation axiale a été changé afin de rendre positives les vitesses de déformation $\dot{\epsilon}_a$ (qui sont à représenter en échelles log). Sauf l'essai BMB17 qui commence par une phase à volume constant, les essais se déroulent en deux cycles. Le premier cycle est réalisé rapidement sur la marne dans son état naturel. Le second se déroule après la mise en présence d'eau de la marne. Ces paliers de gonflement sous imbibition et sous des charges successivement décroissantes sont des paliers de longue durée (un mois et plus) et parfois de très longue durée (jusqu'à deux ans), notamment les paliers réalisés sous le poids du piston (1 à 5 kPa). L'interprétation des essais est réalisée avec le

modèle à huit paramètres qui fournit une assez bonne approche des données (voir les paramètres dans le [tableau F3-d](#)). Sauf l'essai ATS24 qui s'interprète avec une évolution ralentie du gonflement (fluage) par rapport à la loi semi-logarithmique ($m < -1$), les trois autres exemples montrent des évolutions franchement plus rapides ($-1 < m$). Pendant les paliers de très longue durée, la déformation augmente de 1,5 % (BAR01-18), 2 % (THI09-22), voire 3 % (BMB17-32 et TBT01-15) après la fin de la phase initiale de gonflement.

4.5 – Récapitulation

Les paramètres de la relation à huit paramètres sont reportés dans le [tableau F-4](#) de l'[annexe F](#). Ces paramètres sont très dépendants de la nature des sols (c_v , o_m , m). Les graphiques montrent que, en majorité, les déformations de fluage sont minoritaires par rapport aux déformations de consolidation quand l'expression de la consolidation est bien marquée avec une forte amplitude et les temps de consolidation longs. Dans la représentation proposée ici, cela se traduit par des temps t_d du début du fluage qui sont repoussés au-delà du temps de fin de consolidation t_{92} ($T_v > 1$). Sauf quelques exceptions sous faibles charges, cette situation apparaît pendant tous les paliers de gonflement. Des exemples opposés sont donnés par l'éprouvette AV04 (temps de consolidation court) et l'éprouvette AV02 (faible amplitude de la consolidation). A la limite, l'inflexion qui marque la fin de la consolidation peut être totalement effacée.

Conclusion

Un programme expérimental a été consacré à la mesure des propriétés mécaniques d'une marne prélevée dans un massif molassique des Pyrénées dans le cadre des reconnaissances géotechniques d'un projet de tunnel. Les échantillons carottés profonds ont été sélectionnés parmi les horizons argileux et marneux du massif. Le programme comprend des essais d'identification, des essais triaxiaux et des essais oedométriques à haute pression, puis des essais de gonflement. Les propriétés physiques et mécaniques mesurées sont dispersées, ce qui est courant dans ce type de massifs du fait de la variabilité spatiale des horizons qui les constituent. Ces propriétés présentent néanmoins une bonne cohérence d'ensemble.

La partie du programme présentée ici concerne une trentaine d'essais de fluage. Les éprouvettes de fluage sont testées dans leur état naturel. Le chargement est effectué en compression uniaxiale en un ou plusieurs paliers d'une durée de un mois. Afin d'éviter des déformations parasites de retrait et de gonflement, un dispositif particulier a été mis en œuvre, qui est constitué par une protection latérale étanche disposée en périphérie des éprouvettes et une ouverture étroite sur l'atmosphère. Après une phase de consolidation peu ou pas prononcée, les vitesses de fluage sont très faibles et progressivement amorties. Elles augmentent en moyenne avec le taux de chargement et elles se développent à un rythme plus rapide que la loi logarithmique du temps. Le fluage s'effectue en condition drainée. Les déformations axiales totales (chargement et fluage) sont comprises entre 0,5 % et 1,5 % pour des taux de chargement estimés compris entre 40 % et 80 %. Seuls des taux de chargement plus forts ont provoqué la rupture de deux éprouvettes. La recouvrance est rapide. Les déchargements laissent apparaître des déformations irréversibles notables.

Le dispositif mis en œuvre a permis de maintenir la marne dans son état naturel pendant la durée des essais de fluage. En fin d'essais la diminution de la teneur en eau reste inférieure à 0,5 % et cette diminution correspond à un volume d'eau interstitielle expulsée conforme aux déformations observées. Toutefois, l'allongement de cette durée ne paraît pas envisageable. Ce dispositif reste en effet perfectible, car le suivi des déformations volumiques et des pressions interstitielles n'est pas assuré pendant les chargements et le fluage. Le suivi manuel des essais doit être remplacé par un système automatisé.

Par ailleurs, l'estimation des taux de chargement, fondée sur des mesures de la résistance en compression uniaxiale de la marne, s'est trouvée mise en défaut du fait de l'imprécision de ces mesures et des conditions d'essai mal adaptées pour les recueillir. De plus, ces essais de compression ont montré un effet de serrage qui se semble se résorber qu'après l'application de cycles de chargement-déchargement ou après la fin des paliers de fluage. La méthode d'essai de fluage doit être améliorée dans ce sens en envisageant non seulement un palier de préchargement comme ici, mais aussi un cycle de préchargement jusqu'à 50 % de la résistance par exemple. Une telle pratique est en usage dans les procédures d'essais de gonflement par paliers successifs, où la référence de ce cycle de préchargement peut être le poids des terres en place exprimé en contrainte effective.

Une représentation empirique des courbes expérimentales a été proposée pour les faibles chargements qui ne conduisent pas à la rupture. Il est possible de décrire la réponse de la marne sous un palier de fluage à l'aide de six ou huit paramètres. Il est fait appel à une hypothèse simplificatrice qui consiste à combiner une étape de consolidation suivie de l'étape de fluage. L'identification des paramètres s'effectue directement sur les courbes expérimentales. C'est le cas

du temps " t_{100} " qui marque la fin de la consolidation et dont l'identification revient à déterminer le coefficient de consolidation c_v . Pour simplifier la formulation, la solution élastique de la consolidation unidimensionnelle a été adoptée, alors que le chargement s'effectue en compression uniaxiale et qu'un drainage radial est possible. Ce choix paraît acceptable a posteriori car la part des déformations de consolidation est petite devant la déformation élastique des éprouvettes et le fluage.

Enfin, la transition entre la consolidation (qui se poursuit ensuite) et le fluage (qui définit alors l'évolution de la déformation) s'établit pour des degrés de consolidation compris entre 75 % et 89 %, c'est à dire dans la plage des temps caractéristiques de consolidation t_{70} à t_{90} . Cela traduit le relatif effacement de la consolidation devant le fluage dans les terrains surconsolidés, comme cela a été décrit par différents auteurs. Au contraire, dans les terrains argileux compressibles, la part de la consolidation gagne sur le fluage et la transition apparaît plus tardivement, au-delà de t_{92} . Les quelques exemples proposés d'interprétation de courbes oedométriques en donnent l'illustration.

Après cette transition, les pentes de fluage, exprimées en vitesse de déformation axiale, appartiennent à l'intervalle assez resserré $0,8 < |m| < 0,9$ avec une moyenne égale à $-0,84$. Elles représentent la première partie de la loi phénoménologique de Singh et Mitchell (1968) et elles s'inscrivent dans la plage indiquée par ces auteurs. Inférieures à l'unité en valeur absolue, elles traduisent la forme concave croissante des courbes $(\log(t), \epsilon_a)$ donnant la déformation axiale plus rapide que la loi logarithmique du temps, mais néanmoins amortie.

Les vitesses moyennes de fluage, qui sont représentées par l'ordonnée à l'origine o_m , croissent avec le niveau de chargement. Cette évolution n'a pas pu être caractérisée par le taux de chargement q/q_{rupt} en raison de la l'incertitude des mesures de résistance des éprouvettes de marne. Rapportée au niveau de chargement q , ces vitesses moyennes augmentent avec lui comme le prévoit la seconde partie de la loi phénoménologique de Singh et Mitchell (1968), tant que le taux de chargement n'est pas trop fort. Ces résultats sont conformes aux observations (déjà anciennes) de la littérature.

La loi empirique d'évolution de la déformation axiale permet de décrire précisément les courbes de fluage, mais aussi des courbes de consolidation et de gonflement. Il est nécessaire de disposer de paliers de longue durée et d'enregistrements continus. Il est important de tenir compte de la consolidation avant de décrire le fluage et de pointer le rapport entre ces deux types de déformations (amplitude et transition). Il paraît imprudent d'extrapoler la réponse calculée avec ces lois empiriques au-delà de la durée des essais et en dehors de la plage des taux de chargement appliqués ici. La qualité des résultats présentés reste dépendante des imperfections du dispositif d'essai et de sa mise en œuvre. Des améliorations sensibles de ce dispositif et de la procédure d'essai sont à développer.

Références

- Adachi T., Oka F., 1982. Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity. *Soils and Foundations*, 22(4): 57-70.
- AFNOR (Association Française de Normalisation), 1994. Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution. Généralités. Définitions. Norme française NF P 94-070, Octobre 1994, 21 p.
- AFNOR (Association Française de Normalisation), 1994. Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution. Appareillage. Préparation des éprouvettes. Essais UU non consolidé non drainé. Essai CU+u consolidé non drainé. Essai CD consolidé drainé. Norme française NF P 94-074, Octobre 1994, 36 p.
- AGSO (Association des Géologues du Sud-Ouest), 1996. Géologie et terroirs : Deux complexes détritiques du piémont pyrénéen dans le Vic Bilh et le Jurançonnais. LGMBS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 1^{er} juin 1996, 80 p.
- Alexandre G., Martins I., Santa Maria P., 2013. Creep prediction of an undisturbed sensitive clay. <hal-00880388>
- Armand G., Noiret A., Zghondi J., Seyedi D.M., 2013. Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, *J. of Rock Mech. and Geotech. Engng.* 5: 221-230.
- Barla G., Barla M., Bonini M., 2004. Characterisation of Italian clay shales for tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41(3): 221-227.
- Bérest P., Blum P.A., Charpentier J.P., Gharbi H., Valès F., 2005. Very slow creep tests on rock samples. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42: 569-576.
- Bishop A.W., Webb D.L., Lewin P.I., 1965. Undisturbed samples of London clay from the Ashford Common shaft. Strength effective stress relationship. *Géotechnique*, 15(1): 1-31.
- Bishop A.W., Lovenbury H.T., 1969. Creep characteristics of two undisturbed clays. 7th ICSFME, Mexico City, tome 1, 29-37.
- Bjerrum L., 1967. Mechanism of progressive failure in slopes in overconsolidated plastic clay and clay shales. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 93(5): 3-49.
- Bjerrum L., 1967. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Géotechnique*, 17(2): 83-118.
- Blondeau F., Josseaume H., 1976. Mesure de la résistance au cisaillement résiduelle au laboratoire. *Bull. liaison labo P. et Ch., Spécial II, 1. Versants naturels*. Mars 1976, 90-106.
- Bonini M., Debernardi D., Barla M., Barla G., 2009. The mechanical behaviour of clay shales and implications on the design of tunnels. *Rock Mech. Rock. Engng.*, 42: 361-388.
- Buisman A.S.K., 1936. Results of long duration settlement test. 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard University, 1, 103-106.
- Campanella R.G., Vaid Y.P., 1974. Triaxial and plane-strain creep rupture of an undisturbed clay. *Canadian Geotech. J.*, 11(1): 1-10.
- Casagrande A., Fadum R.E., 1940. Notes on soil testing for engineering purposes. *Harvard Soil Mechanics*, Series No. 8, Cambridge, Mass.
- Charollais J., Weidmann M., Berger J.P., Engesser B., Hotellier J.F., Gorin G., Reichenbacher B., Schäfer P., 2007. La Molasse du bassin franco-génois et son substratum. *Arch.Sci.*, 60: 59-174.
- Clayton C.R.I., Serratrice J.F., 1993. Les propriétés mécaniques et le comportement des sols indurés et des roches tendres. Rapport général de la session 2. *Symp. Int. sur les sols indurés et les roches tendres*, Athènes, vol. 3 (1993), 1839-1877.
- Cui Y.J., Le T.T., Tang A.M., Delage P., Li X.L., 2009. Investigating the time-dependent behaviour of Boom clay under thermo-mechanical loading. *Géotechnique*, 2009, 59(4): 319-329.
- Gasc-Barbier M., Chanchole S., Bérest P., 2004. Creep behavior of Bure clayey rock. *Applied Clay Science*, 26: 449-458.

- Cui Y.J., Le T.T., Tang A.M., Delage P., Li X.L., 2009. Investigating the time-dependent behaviour of Boom clay under thermo-mechanical loading. *Géotechnique*, 59(4): 319-329.
- Debernardi D., 2008. Viscoplastic behaviour and design of tunnels. Dissertation, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- Einstein H.H., 2000. Tunnels in opalinus clayshale - A review of case histories and new developments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(1):13-29.
- Fabre G., 2005. Fluage et endommagement des roches argileuses : évolution de la microstructure et modélisation phénoménologique. Dissertation, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Fabre G., Pellet F., 2006. Creep and time-dependant damage in argillaceous rocks. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 43(6): 950-960.
- Finn W.D.L., Shead D., 1973. Creep and creep rupture of an undisturbed sensitive clay. 8th ICSMFE, Moscou, vol. 1-1, pp. 135-142.
- Gasc-Barbier M, Chanchole S, Bérest P., 2004. Creep behavior of Bure clayed rock. *Applied Clay Science*, 26:449-458.
- Gaudin B., 1972. Pressions de terrain sur une galerie creusée dans des marnes du Stampien. *Bulletin des Labo. des Ponts et Chaussées*, 59:133-155.
- Gaudin B., Ricard A., 1974. Sollicitations différées des revêtements de tunnels creusés dans les marnes. *Revue de l'Industrie Minière*, Avril 1974.
- Gaudin B., Folacci J.P., Panet M., Salva L., 1981. Support of a gallery cut through Cenomanian marls. *Bulletin des Labo. des Ponts et Chaussées, Special XI E*, 12-16.
- Gaudin B., Serratrice J.F., 1998. Étude en laboratoire du comportement mécanique d'une molasse. 2nd. Int. Symp. on Hard Soils and Soft Rocks, Naples, tome 1, 173-1810.
- Sous la direction d'Alain Guilloux, 2005. Note sur la définition des "Sols Indurés Roches Tendres" (SIRT). *Revue Française de Géotechnique*, 111: 59-66.
- Huang M., Zhan J.W., Xu C.S., Jiang S., 2020. New creep constitutive model for soft rocks and its application in the prediction of time-dependent deformation in tunnels. *International Journal of Geomechanics*, 20(7).
- Johnston I.W., Novello E.A., 1993. Soft rocks in the geotechnical spectrum. 1st International Symposium on Hard Soils - Soft Rocks, Athènes, vol. 1, 177-183.
- Kavvas M.J., Anagnostopoulos A.G., Kalteziotis N., 1993. A framework for the mechanical behaviour of the cemented Corinth marl. 1st International Symposium on Hard Soils - Soft Rocks, Athènes, vol. 1, 577-583.
- Kharchafi M., Descoedres F., 1995. Comportement différé des roches marneuses encaissant des tunnels. *Colloquium Mundanum Chalk and Shales, Bruxelles*, 1.2.68-1.2.79.
- Kovari K., Amstad C., Anagnostou G., 1995. Long term field observation of swelling phenomena in tunnels and their back analysis. *Colloquium Mundanum Chalk and Shales, Bruxelles*, 1.2.58-1.2.67.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R., 1985. Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Géotechnique*, 35(2): 159-180.
- Leroueil S., Vaughan P.R. (1990) The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40(3): 467-488.
- Merah C., Mathier J.F., 2014. Comportement différé des marnes du tunnel d'Arbus (France) soumises à des essais de fluage et de gonflement. *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, 29: 24-35.
- Mesri G., Ullrich C.R., Choi Y.K., 1978. The rate of swelling of overconsolidated clays subjected to unloading. *Géotechnique*, 28(3): 281-307.
- Murayama S., Shibata T., 1958. On the rheological characters of clay. Part I. Disaster Prevention Research Institute. *Kyoto University Bulletins*, 26: 1-43.
- Nopola J.R., Roberts L.A., 2016. A comparison of short-term and long-term creep experiments in unconventional reservoir formations. 50th US Rock Mech. Geomech. Symp., Houston, Texas.
- Rojat F., 2010. Comportement des tunnels dans les milieux rocheux de faibles caractéristiques mécaniques. Thèse, Ecole des Ponts ParisTech, 24 novembre 2010, 312 p.

- Rassouli F.S., Zoback M.D., 2016. Time-dependant deformation of Pieree Shale as determined by long-duration creep tests. 50th US Rock Mech. Geomech. Symp., Houston, Texas.
- Sharifzadeh M., Tarifard A., Moridi M.A., 2013. Time-dependent behavior of tunnel lining in weak rock mass based on displacement back analysis method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38: 348-356.
- Singh A., Mitchell J.K., 1968. General stress-strain-time function for soil. *J. Soil Mech. and Found. Div.*, 94(1): 21-46.
- Skempton A.W., 1964. Long term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2): 77-102.
- Skempton A.W., 1967. First time slides in overconsolidated clays. *Géotechnique*, 20(3): 320-324.
- Sone H., Zoback M.D., 2014. Time-dependant deformation of shale gas reservoir rocks and its long-term effect on the in-situ state of stress. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 69: 120-132.
- Steiner W., 2003. Swelling rock in tunnels: Rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedure. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30(4): 361-380.
- Suklje L., 1957. The analysis of the consolidation process by the isotaches method. 4th ICSMFE, Londres, vol. 1, 200-206.
- Sunyach J., 1984. Formations molassiques du bassin d'Aquitaine. Recherche d'une méthodologie de reconnaissance. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, 131: 45-60.
- Tavenas F., Leroueil S., La Rochelle P., Roy M., 1978. Creep behavior of an undisturbed lightly overconsolidated clay. *Canadian Geotech. J.* 15(3): 402-423.
- Tavenas F., Leroueil S., 1979. Les concepts d'état limite et d'état critique et leurs applications pratiques à l'étude des argiles. *Revue Française de Géotechnique*, 6: 27-49.
- Tomanovic Z., 2012. The stress and time dependent behaviour of soft rocks. *Gradevinar*, 64(12): 993-1007.
- Walker L.K., 1969. Undrained creep in a sensitive clay. *Géotechnique*, 19(4): 515-529.
- Yin Z.Y., Hicher P.Y., Riou Y., Huang H.W.W., 2006. An elasto-viscoplastic model for soft clay. *GeoShanghai International Conference 2006, Shanghai, China*, 312-319.
- Yin Z.Y., Chang C.S., Karstunen M., Hicher P.Y., 2010. An anisotropic elastic-viscoplastic model for soft clays. *International Journal of Solids and Structures*, 47: 665-677.
- Yu H.D., Chen W.Z., Cong Z., Tan X.J., Ma Y.S., Li X.L., Sillen X., 2015. Creep behavior of Boom clay. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 76: 256-264.
- Zhao D., 2017. Study on the creep behavior of clay under complex triaxial loading in relation to the microstructure. Thèse, University of Lorraine, 18 December 2017, 205 p.
- Zhu J.G., Yin J.H., 2001. Drained creep behaviour of soft Hong Kong marine deposits. *Géotechnique*, 51(5): 471-474.

Références "marnes, sols indurés et roches tendres"

- Bouyge B., 1977. Déformations différées dans les marnes. Application au problème du tunnel. Thèse DI, Université Grenoble, 1977.
- Auriault J.L., Bouyge B., Gaudin B., Serratrice J.F., 1978. Déformations différées dans les marnes. Application au calcul des tunnels circulaires. Colloque Franco-Polonais de Mécanique des Sols Appliquée, Gdansk, 7 p.
- Serratrice J.F., 1978. Contribution à l'étude du comportement mécanique des marnes. Thèse DI, Université Grenoble, 27 novembre 1978.
- Serratrice J.F., Flavigny E., 1993. Mesure en laboratoire du coefficient K_0 d'une marne. Symposium International sur les sols indurés et les roches tendres, Athènes, vol. 1, 787-793.
- Lee Y.L., Arafati N., Leca E., Magnan J.P., Mestat P., Serratrice J.F., 1993. Comportement et modélisation des marnes de Las Planas. Symposium International sur les sols indurés et les roches tendres, Athènes, vol. 2, 1479-1486.
- Clayton C.R.I, Serratrice J.F., 1993. The mechanical properties and behaviour of hard soils and soft rocks. Les propriétés mécaniques et le comportement des sols indurés et des roches tendres. Rapport général de la session 2. Symposium International sur les Sols indurés et les roches tendres, Athènes, vol. 3, 1839-1877.
- Magnan J.P., Serratrice J.F., 1995. Détermination de la courbe d'état limite d'une marne. 11th Euro. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engng., Copenhague, vol. 3, 1839-1847.
- Serratrice J.F., 1995. Essais de laboratoire à haute pression sur une marne. Colloquium Mundanum, Craies et Schistes, Bruxelles, mars 1995, 61-70.
- Serratrice J.F., Soyez B., 1996. Les essais de gonflement. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 204: 65-85.
- Serratrice J.F., 1998. Caractéristiques mécaniques des marnes de l'Oligocène du bassin de Marseille. 2ème Symposium International sur les sols indurés et les roches tendres, The Geotechnics of hard soils - soft rocks, Naples, vol. 1, 301-310.
- Gaudin B., Serratrice J.F., 1998. Etude en laboratoire du comportement mécanique d'une molasse. Comptes rendus, 2ème Symposium International sur les sols indurés et les roches tendres, The Geotechnics of hard soils - soft rocks, Naples, vol. 1, 173-181.
- Magnan J.P., Bescond B., Serratrice J.F., 1998. Déformabilité d'une marne chargée par des remblais. 2ème Symposium International sur les sols indurés et les roches tendres, The Geotechnics of hard soils - soft rocks, Naples, vol. 2, 659-667.
- Guillaume A., Jeanette D., Paquet H., Serratrice J.F., 2001. Géotechnique de la Formation d'Esna et conservation de la tombe de Ramsès II (Vallée des Rois, Louqsor, Egypte). Revue d'Archéométrie, 25: 113-123.
- Serratrice J.F., 2002. Outils et procédures de caractérisation des sols indurés et des roches tendres : l'expérience du LRPC d'Aix en Provence. Symposium International PARAM 2002, Paris, 313-326.
- Boutonnier L., Serratrice J.F., 2002. Caractérisation du comportement d'une marne en vue de la réalisation d'un déblai. Symposium International PARAM 2002, Paris, 519-530.
- Windal T., Shahrour I. , Magnan J.P., Serratrice J.F., 2002. Étude du gonflement des sols pour des projets de tunnels. Revue Française de Géotechnique, 100: 91-99.
- Windal T., Shahrour I. , Magnan J.P., Serratrice J.F., 2002. Use of a flexible odometer for the analysis of the behavior of natural expansive soils. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brésil, vol. 2, 583-586.
- Serratrice J.F., Reiffsteck P., 2006. Typologie de la forme des chemins non drainés à l'appareil triaxial. Symposium International ELU-ULS, Paris, 147-156.
- Serratrice J.F., 2007. Retrait-gonflement des sols argileux et des marnes. Revue Française de Géotechnique, 120-121: 107-120.

- Serratrice J.F., 2009. Étude expérimentale du comportement des sols, des roches et des ouvrages géotechniques. Mémoire de HDR, Université de Caen / Basse Normandie, Caen, 07 mai 2009.
- Ch 1 Présentation générale des activités de recherche.
 - Ch 2 Le laboratoire de mécanique des sols et des roches du LRPC d'Aix en Provence.
 - Ch 3 Propriétés mécaniques des sols raides et des roches tendres.
 - Ch 4. Étude du comportement des massifs rocheux.
 - Ch 5 Instrumentation, mesures et fonctionnement des ouvrages.
- Zumbo V., Serratrice J.F., Delhomel A., Dewaele J., Giraud E., 2010. Réemploi des marnes irisées supérieures du Keuper du Tronçon G de la LGV Est 2ème phase. JNGG 2010, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Grenoble, tome 1, 353-360.
- Serratrice J.F., 2011. Propriétés mécaniques d'une marne. 15th Euro. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engng., Athènes, 459-464.
- Serratrice J.F., Calissano H., Batilliot L., 2012. Résistances triaxiales d'une marne et de son argile d'altération. 6ème Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur JNGG 2012, Bordeaux, 427-434.
- Serratrice J.F., 2013. Quelques illustrations du retrait et du gonflement des argiles d'après des essais de laboratoire. 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique CMIG'13, Alger.
- Serratrice J.F., 2013. Essais triaxiaux sur des marnes fissurées. 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique CMIG'13, Alger.
- Serratrice J.F., 2014. Divers aspects du comportement mécanique des marnes en laboratoire. Symposium International sur la Stabilité des Versants Rocheux RSS 2014, Marrakech, 175-189.
- Serratrice J.F., 2015. Une représentation des courbes de retrait des sols argileux. Symposium International SEC 2015, Retrait et gonflement des sols - Climat et constructions, Champs-sur-Marne, 179-186.
- Serratrice J.F., Calissano H., Batilliot L., 2015. Divers aspects du gonflement des marnes en laboratoire. Symposium International SEC 2015, Retrait et gonflement des sols - Climat et constructions, Champs-sur-Marne, 187-196.
- Serratrice J.F., 2016. Mesures des propriétés mécaniques d'une argile surconsolidée au laboratoire. 8ème Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, 450-457.
- Serratrice J.F., 2017. Divers aspects du comportement mécanique des marnes en laboratoire. Revue Française de Géotechnique, 151, 3.
- Savatier V., Deluzarche R., Serratrice J.F., 2018. Variation des modules en fonction du niveau de déformation d'après des essais in-situ et des essais de laboratoire. Application au Métro toulousain. 9ème Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Champs-sur-Marne.
- Rachdi S., Jahangir E., Tijani M., Serratrice J.F., 2019. Critical state constitutive models and shear loading of overconsolidated clays with deviatoric hardening. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2019; 1–16.
- Serratrice J.F., Dufour N., Gasc-Barbier M., 2020. De l'importance de préserver les bonnes conditions de réalisation des essais de laboratoire. 10ème Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, JNGG 2020, Lyon.
- Serratrice J.F., 2021, Les sols indurés et les roches tendres dans les projets. Exposé. Séance technique CFMR, CFGI, CFMS "Roches tendres, sols indurés", 18/03/2021, 26 p.
- Serratrice J.F., 2022. Exemples de courbes d'essais oedométriques K_0 à haute pression. 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, JNGG 2022, Lyon.
- Serratrice J.F., 2022. Caractéristiques des chemins des contraintes enregistrés à l'aide d'un oedomètre K_0 à haute pression. *Revue Française de Géotechnique*. Soumis.
- Serratrice J.F., 2022. Essais de gonflement avec mesure de la contrainte radiale à l'oedomètre K_0 à haute pression. *Revue Française de Géotechnique*. Soumis.

Rapports d'études de projet

Bieth E. et al., 2006. A650 - Tunnel d'Arbus. Complément au dossier d'APS. Rapport et annexes. Centre d'Etudes des Tunnels, Bron. Novembre 2006.

Rapports de recherche

Bescond B., Serratrice J.F., 1981. Essais de fluage drainés sur une marne. Interprétation avec quatre modèles viscoélastiques linéaires monodimensionnels. LCPC AER 1-06-53-0, rapport CETE d'Aix en Provence, jfs/mt gs80-610 juil 1981, 104 p.

Bescond B., Serratrice J.F., 1986. Gonflement des marnes. Présentation de quelques résultats expérimentaux. Rapport CETE d'Aix en Provence, jfs/mhf gs86-139, 02/01/1986, 78 p.

Gaudin B., Serratrice J.F., 1986. Comportement mécanique de la marne de Las Planans en compression. Rapport CETE d'Aix en Provence, jfs/mt gs86-162, 01/02/1986, 60 p.

Gaudin B., Serratrice J.F., 1986. Etude des propriétés rhéologiques d'une marne. Rapport CETE d'Aix en Provence, jfs/xx gs86-209, 01/10/1986, 112 p.

Serratrice J.F., 1987. Comportement mécanique d'une marne en compression et en extension. Rapport CETE d'Aix en Provence, jfs/fb gs87-121, 18/03/1987, 94 p.

Serratrice J.F., 1994. Comportement mécanique de la marne du Plaisancien. Rapport CETE Méditerranée, jfs i93-334, 06/01/1994, 101 p. Annexe 1, 70 p. Annexe 2, 290 p. Annexe 3, 210 p. Annexe 4, 154 p.

Serratrice J.F., 1995. Marnes altérées du Toarcien. Récapitulation des essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i95-322, 01/12/1995, 108 p. Annexe 142 p.

Serratrice J.F., 1999. TGV Méditerranée. Tunnel de Tartaignuille. Essais de laboratoire sur la marne. Rapport CETE Méditerranée, jfs i98-298, 08/01/1999, 253 p.

Serratrice J.F., Vallanchon H., 2004. Les essais de gonflement en laboratoire. Récapitulation des essais 1994-1998. Rapport CETE Méditerranée, jfs i01-343, 10/12/2001, 206 p.

Serratrice J.F., Vallanchon H., 2004. Les essais de gonflement en laboratoire. Récapitulation des essais 1998-2001. Rapport CETE Méditerranée, jfs i04-136, 29/07/2004, 174 p.

Serratrice J.F., Vallanchon H., 2004. Les essais de gonflement en laboratoire. Récapitulation des essais 2002-2004. Rapport CETE Méditerranée, jfs i04-136, 29/07/2004, 204 p.

Serratrice J.F., 2010. Site de Saint Saturnin. Argile et marne. Rapport CETE Méditerranée, jfs i10-121, 09/08/2010, 27 p. Annexe 1, 86 p. Annexe 2, 113 p. Annexe 3, 83 p. Annexe 4, 54 p. Annexe 5, 53 p. Annexe 6, 32 p.

Serratrice J.F., 2011. Essais de laboratoire sur une marne. Site d'Arbus. IFSTTAR Opération 11S082, rapport CETE Méditerranée, jfs i11-109, 20/12/2011, 132 p. Annexe 1, 90 p. Annexe 2, 90 p. Annexe 3, 68 p. Annexe 4, 74 p. Annexe 5, 72 p.

Serratrice J.F., 2017. Comportement mécanique des marnes. Recueil de données expérimentales. Rapport Cerema Méditerranée, Action CPT06-LP101b-A151069, jfs i17-102, 15/01/2018, 152 p. Annexe 16/24. Molasses Miocène-Pliocène des Pyrénées. 74 p.

Serratrice J.F., 2019. Les essais oedométriques de gonflement. Apport de l'oedomètre K_0 HP. Rapport Cerema Méditerranée, Action C16IO0269, 20/11/2019, 74 p. Annexe 1, 68 p. Annexe 2, 44 p. Annexe 3, 58 p.

Serratrice J.F., 2020. Un bilan des pratiques courantes de mesure des propriétés de compressibilité des sols fins au laboratoire. Rapport Cerema Méditerranée, Février 2020, 166 p.

Rapports d'essais LRPC d'Aix en Provence. Argiles raides et marnes

- Marseille. Parking Felix Baret. Essais de laboratoire. Rapport CETE d'Aix en Provence, bg/mhf-gs87-24, 21/01/1987, 39 p.
- A41 Tunnel du Mont du Sion. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i94-049, 26/02/1994, 82 p.
- A40 Tunnel de Chamoise. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i94-164, 23/09/1994, 77 p.
- Marcoule. ANDRA. Site du Gard. Forage MAR203. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i95-256, 18/10/1995, 130 p. Annexe 1, 187 p. Annexe 2, 30 p. Annexe 3, 40 p. Annexe 4, 72 p.
- A41 Tunnel du Mont du Sion. Essais de laboratoire. Tête Nord. Rapport CETE Méditerranée, jfs i96-043, 15/02/1996, 53 p. Zone centrale, jfs i96-057, 07/03/1996, 252 p. Tête Sud, jfs i96-042, 15/02/1996, 104 p. Programme complémentaire, jfs i96-282, 21/10/1996, 130 p. Synthèse, jfs i96-283, 21/11/1996, 111 p.
- Taverny. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i98-202, 13/10/1998, 131 p.
- Marseille, Barreau B55. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i01-xxx, 16/07/1999, 29 p. Annexe 1, 109 p. Annexe 2, 85 p. Annexe 3, 117 p. Annexe 4, 28 p.
- Tunnel du Bois du Peu. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i99-242, 23/06/1999, 146 p.
- LGV Est Déblai 12. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i00-209, 31/07/2001, 130 p.
- LGV Est Déblai 36. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i01-216, 20/08/2001, 110 p.
- Tunnel du Bois du Peu. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i00-279, 31/01/2001, 157 p.
- Marseille, Rocade L2 Nord. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i01-xxx, 08/08/2001, 201 p. Photos, 73 p.
- LGV Rhin-Rhône. Sondage 03CA456. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i04-011, 14/01/2004, 150 p.
- LGV Rhin-Rhône. Sondage 03CA486. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i04-010, 14/01/2004, 162 p.
- LGV Rhin-Rhône. Tunnel de Chavannes. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i04-023, 26/01/2004, 146 p.
- Barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie). Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i05-026, 27/01/2005, 283 p.
- RN134 Tunnel d'Arbus. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i06-143, 17/07/2006, 70 p. Annexe 1. Sondage AR1-06, 73 p. Annexe 2. Sondage AR2-05, 58 p. Annexe 3. Sondage AR3-06, 72 p. Annexe 4. Sondage AR4-06, 75 p.
- RN134 Tunnel d'Arbus. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i07-042, 06/08/2007, 60 p. Annexe 5/6. Sondages AR5-07, AR6-07, 102 p.
- A41 Tunnel du Mont Sion. Essais de laboratoire. Envoi 1. Rapport CETE Méditerranée, jfs i07-205, 20/11/2007, 112 p. Envoi 2, jfs i08-013, 22/01/2008, 112 p. Envoi 3, jfs i08-053, 03/03/2008, 95 p. Envoi 4, jfs i08-105, 02/05/2008, 79 p. Envoi 5, jfs i08-169, 25/08/2008, 65 p.
- A31 Zoufftgen. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i09-212, 18/12/2009, 20 p. Annexe 1, 68 p. Annexe 2, 80 p. Annexe 3, 70 p.
- Marange Silvange. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i13-049, 20/03/2013, 168 p, Anx, 56 p..
- A304 Déblai D9B. Essais de laboratoire. Rapport CETE Méditerranée, jfs i13-152, 21/08/2013, 96 p.
- Barrage de Tabellout (Algérie). Essais de laboratoire. Rapport Cerema Méditerranée C14MX0285, jfs i14-222, 28/10/2014, 294 p.
- Site du Tricastin. Essais de laboratoire. Rapport Cerema Méditerranée C15MX0351, jfs i15-158, 30/09/2016, 80 p. Annexe 1, 70 p. Annexe 2, 48 p. Annexe 3, 422 p. Annexe 4, 38 p.
- Métro de Toulouse. Essais de laboratoire. Rapport Cerema Méditerranée C16MX017528, jfs i16-134, 27/06/2016, 28 p. Annexe 1, 36 p., Annexe 2, 96 p. Annexe 3, 82 p.

Annexes

Annexe A. Calcul des déformations de consolidation et de fluage

Annexe B. Propriétés physiques et mécaniques des marnes

Annexe C. Matériel

Annexe D. Conditions des essais de fluage. Site d'Arbus

Annexe E. Conditions des essais de fluage triaxial. Site de Nice

Annexe F. Essais oedométriques

Annexe A. Calcul des déformations de consolidation et de fluage

Consolidation unidimensionnelle

Dans la solution de l'équation de consolidation unidimensionnelle, le degré de consolidation s'écrit en fonction du temps :

$$U(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (1)$$

où T_v est le facteur temps, $M = (2m+1) \pi/2$, H la longueur de drainage ($H = h_0/2$ dans une éprouvette de hauteur h_0 drainée par ses deux extrémités) et c_v le coefficient de consolidation. En élasticité, $c_v = k E_{\text{oed}} / \gamma_w$ où E_{oed} est le module oedométrique, k la perméabilité et γ_w le poids volumique de l'eau. La déformation axiale du sol au cours d'un palier de consolidation s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + (\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_0) U(t) \quad (2)$$

où ε_0 est la déformation initiale au début du palier et ε_{∞} la déformation finale. La vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ se déduit de ces expressions (vitesse de déformation positive en compression).

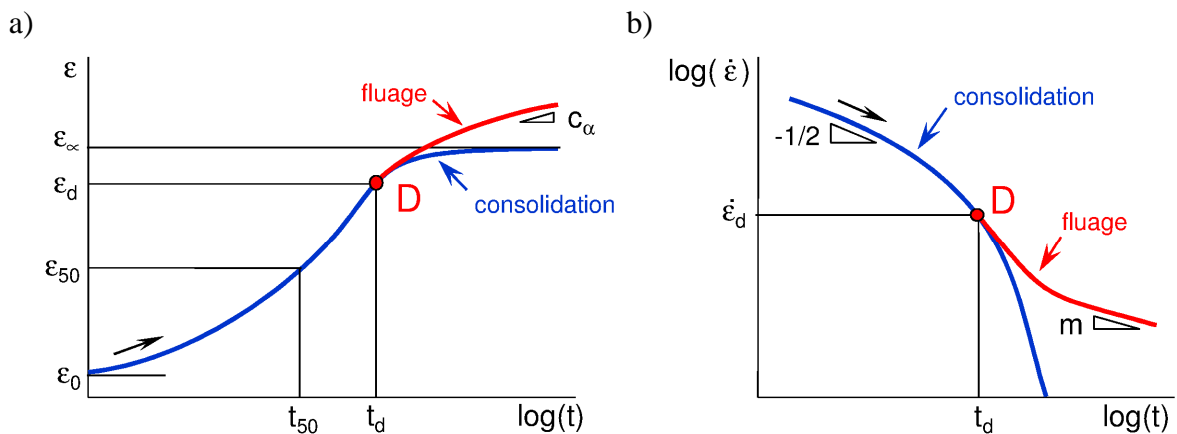


Figure A-1 : Représentation des courbes de consolidation et de fluage pour un palier.

- Déformation axiale en fonction du temps dans le plan ($\log(t)$, ε).
- Vitesse de déformation axiale en fonction du temps dans le plan ($\log(t)$, $\log(\dot{\varepsilon})$).

Les graphiques de la [figure A-1](#) représentent la déformation axiale en fonction du temps dans le plan ($\log(t)$, ε) et la vitesse de déformation axiale en fonction du temps dans le plan ($\log(t)$, $\log(\dot{\varepsilon})$) pour un palier de chargement. La consolidation du sol est représentée par les courbes bleues.

Expression simplifiée

Une expression simplifiée du début de la courbe de consolidation est donnée par l'approximation de Taylor :

$$T_v < 0,4 \quad U < 30 \% \quad T_v = \frac{\pi U^2}{4} \quad (3)$$

Dans ce cas :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) \sqrt{\frac{t}{t_c}} \quad t_c = \frac{\pi H^2}{4c_v} \quad (4)$$

et la vitesse de déformation est :

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_c \sqrt{\frac{t_c}{t}} \quad \dot{\varepsilon}_c = \frac{\varepsilon_\infty - \varepsilon_0}{2t_c} \quad (5)$$

Le début de la courbe de consolidation est une droite de pente $-1/2$ dans le plan $(\log(t), \log(\dot{\varepsilon}))$. L'ordonnée à l'origine de cette droite dépend de $\varepsilon_\infty - \varepsilon_0$ et de t_c et donc de c_v . La forme $U^2 = t/t_c$ de l'approximation montre que, pour être applicable, le temps doit être limité par $t < t_c/2$ environ.

Fluage

La déformation de fluage est introduite au moyen d'une loi empirique qui prend effet à partir du point D au temps t_d sur la [figure A-1](#) (courbes rouges). Cette loi représente la déformation axiale totale, alors que la consolidation se poursuit (courbes bleues). Cette loi est définie en vitesse de déformation dans le plan $(\log(t), \log(\dot{\varepsilon}))$. Il est admis généralement que cette évolution est guidée dans une direction de pente m ($m < 0$). A cette pente correspond le coefficient de fluage c_α du plan $(\log(t), \varepsilon)$. La part de la consolidation est exprimée par (1) et (2) (courbes bleues). La part du fluage est exprimée par la différence entre la courbe rouge et la courbe bleue pour $t > t_d$.

Première expression du fluage

Dans la suite deux expressions sont utilisées pour représenter la déformation axiale de fluage.

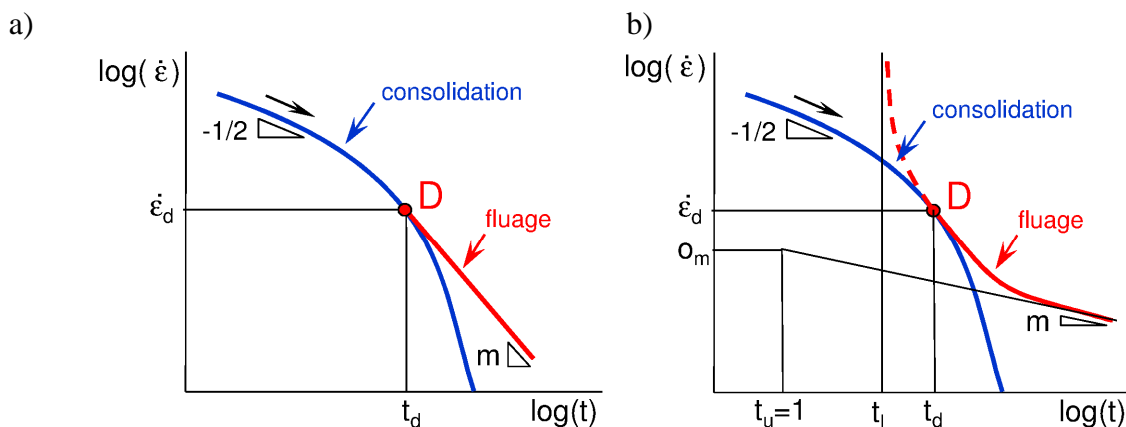


Figure A-2 : Représentation des deux expressions du fluage dans le plan $(\log(t), \log(\dot{\varepsilon}))$.

a) Demi-droite de pente m tangente en D.

b) Hyperbole tangente en D avec son asymptote de pente m .

Dans la première, une demi-droite de pente m est installée à partir du point D où elle constitue la tangente à la courbe de consolidation dans le plan $(\log(t), \log(\dot{\varepsilon}))$, [figure A-2a](#). L'expression de la vitesse de déformation est ($t > t_d$) :

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_d \left(\frac{t}{t_d} \right)^m \quad (6)$$

où $\dot{\varepsilon}_d$ est la vitesse de déformation au point D. Si $m = -1$, la déformation axiale est ($t > t_d$) :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_d + M t_d \dot{\varepsilon}_d \log \left(\frac{t}{t_d} \right) \quad (7)$$

où $M = \ln(10)$. Dans ce cas la déformation (consolidation et fluage) est linéaire en logarithme du temps et $c_\alpha = M t_d \dot{\varepsilon}_d$. Si $m \neq -1$, la déformation axiale est ($t > t_d$) :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_d + \frac{t_d \dot{\varepsilon}_d}{m+1} \left[\left(\frac{t}{t_d} \right)^{m+1} - 1 \right] \quad (8)$$

Le fluage est amorti par rapport à la loi logarithmique si $m < -1$ ou amplifié si $m > -1$.

En pratique, la donnée de la pente $m_d = m$ permet de calculer t_d et trouver ainsi le point D le long de la courbe de consolidation. La loi fluage tangente (6) prend le relai ensuite. Le calcul nécessite de connaître six paramètres (tableau A-1).

Tableau A-1 : Paramètres de la première expression du fluage.

	paramètre	unité	définition	
1	h_0	m	hauteur de l'éprouvette	
2	k_{dra}	-	condition de drainage	$H = h_0/k_{dra}$ $k_{dra} = 2$ pour un drainage sur les deux faces
3	ε_0	-	déformation axiale initiale à $t = 0$	
4	ε_∞	-	déformation axiale de consolidation à $t = \infty$	
5	c_v	m^2/s	coefficient de consolidation	
6	m	-	pente de fluage	$m < 0$

La forme simplifiée (4) en racine du temps peut être utilisée pour représenter le début de la courbe de consolidation, suivie par l'expression (6) pour représenter le fluage à partir du temps t_d . La vitesse de déformation axiale prend une allure bilinéaire dans le plan ($\log(t)$, $\log(\dot{\varepsilon})$). Pour effectuer le calcul, il faut se donner t_d l'abscisse du coude, soit un paramètre supplémentaire dans le tableau A-1.

Seconde expression du fluage

La demi-droite de pente m est remplacée par une hyperbole dont l'asymptote inclinée a pour pente m . Elle est tangente à la courbe de consolidation au point D où la pente m_d est donnée ($m_d < m$), figure A-2b). Dans le plan ($\log(t)$, $\log(\dot{\varepsilon})$), son expression est :

$$\log(\dot{\varepsilon}) = \frac{n}{\log\left(\frac{t}{t_1}\right)} + m \log\left(\frac{t}{t_d}\right) + \log(o_m) \quad (9)$$

où m et o_m sont des paramètres et n et t_1 des paramètres intermédiaire de calcul.

La donnée de m_d permet de calculer t_d et trouver ainsi le point D le long de la courbe de consolidation. Puis, en posant $x_d = \log(t_d)$, $y_d = \log(\dot{\epsilon}_d)$, $y_{om} = \log(o_m)$:

$$r = x_d - x_1 = \frac{y_d - m x_d - y_{om}}{m - m_d} \quad (10)$$

il vient $\log(t_1) = x_1 = x_d - r$ et $n = (m - m_d) r^2$, ce qui permet d'effectuer le calcul de la vitesse de déformation (fluage et consolidation) au temps t d'après (9) :

$$t > t_d \quad x = \log(t) \quad \log(\dot{\epsilon}) = \frac{n}{x - x_1} + m x + y_{om} \quad (11)$$

Tableau A-2 : Paramètres de la seconde expression du fluage.

	paramètre	unité	définition	
1	h_0	m	hauteur de l'éprouvette	
2	k_{dra}	-	condition de drainage	$H = h_0/k_{dra}$ $k_{dra} = 2$ pour un drainage sur les deux faces
3	ϵ_0	-	déformation axiale initiale à $t = 0$	
4	ϵ_∞	-	déformation axiale de consolidation à $t = \infty$	
5	c_v	m^2/s	coefficient de consolidation	
6	m_d	-	pente de la tangente en D	$m_d < m < 0$
7	m	-	pente de l'asymptote de fluage	$m < 0$
8	o_m	-	ordonnée de l'asymptote de fluage	

La déformation axiale $\epsilon(t)$ s'obtient alors par intégration numérique. Le calcul nécessite de connaître huit paramètres (tableau A-2). Les trois premiers sont donnés par les conditions de l'essai (h_0 , k_{dra}) et le début du palier (ϵ_0). Puis c_v et ϵ_∞ (ou $\Delta\epsilon = \epsilon_\infty - \epsilon_0$) sont choisis pour décrire les coudes des courbes ($\log(t)$, ϵ) et ($\log(t)$, $\log(\dot{\epsilon})$), c'est à dire la fin de la consolidation et l'amplitude de cette déformation. Les paramètres 7 et 8 (m et o_m) sont identifiés sur la partie linéaire de la courbe ($\log(t)$, $\log(\dot{\epsilon})$) (figure A-2b). Enfin, la pente m_d est choisie pour définir le point D (au temps t_d) et le raccordement entre la courbe de consolidation et la droite (m , o_m). Des ajustements successifs sont nécessaires pour affiner la représentation des données expérimentales le long d'un palier.

Annexe B. Propriétés physiques et mécaniques des marnes

Caractéristiques d'état

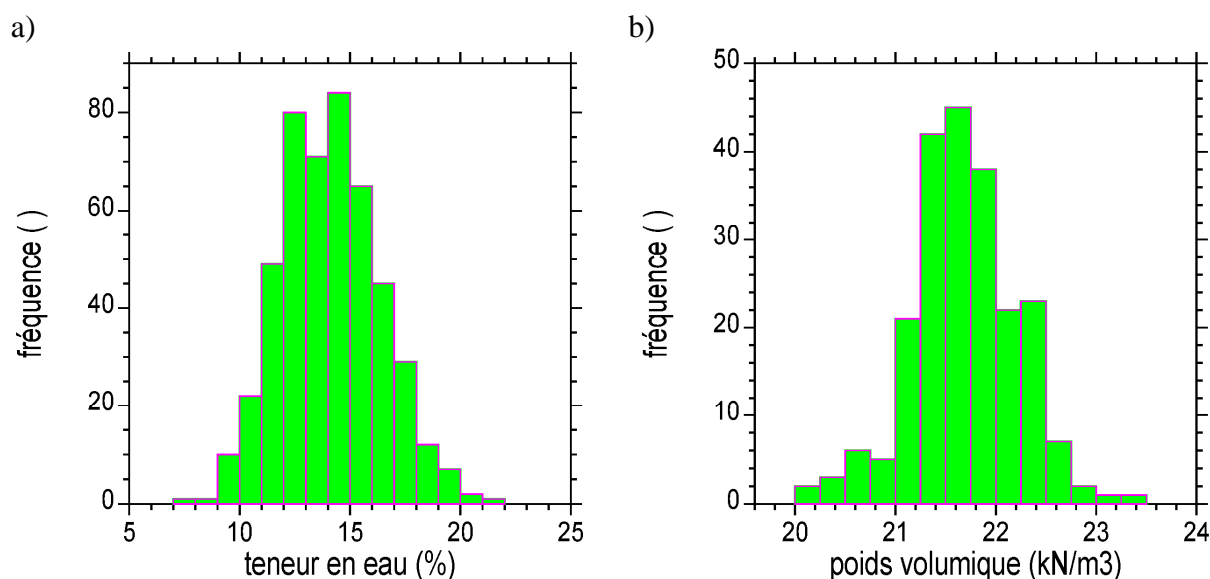


Figure B-1 : Histogramme des teneurs en eau et des poids volumiques des marnes pour l'ensemble des données.

Tableau B-1 : Moyennes des teneurs en eau et des poids volumiques.

variable	n	mini	maxi	étendue	moyenne	écart-type	coef. variation
teneur en eau (%)	479	7,52	21,10	13,57	14,11	2,24	0,159
poids volumique (kN/m ³)	218	20,09	23,35	3,25	21,68	0,530	0,0244

variable	asymétrie	aplatissement	b inf conf moyenne	b sup conf moyenne	b inf conf variance	b sup conf variance
teneur en eau (%)	0,268	-0,133	13,91	14,31	4,43	5,71
poids volumique (kN/m ³)	-0,084	0,419	21,61	21,76	0,234	0,342

n nombre de mesures

b inf/sup conf bornes des intervalles de confiance à 95 % sur la moyenne et la variance

Analyses minéralogiques

Tableau B-2 : Composition des marnes d'après les analyses minéralogiques par diffraction X.

constituants	roche totale			argiles		
	Quartz	Calcite	Argiles	Sm-Is	Il	Ka
teneurs (%)	16 - 72	0 - 62	20 - 50	45 - 85	8 - 37	7 - 35

25 analyses

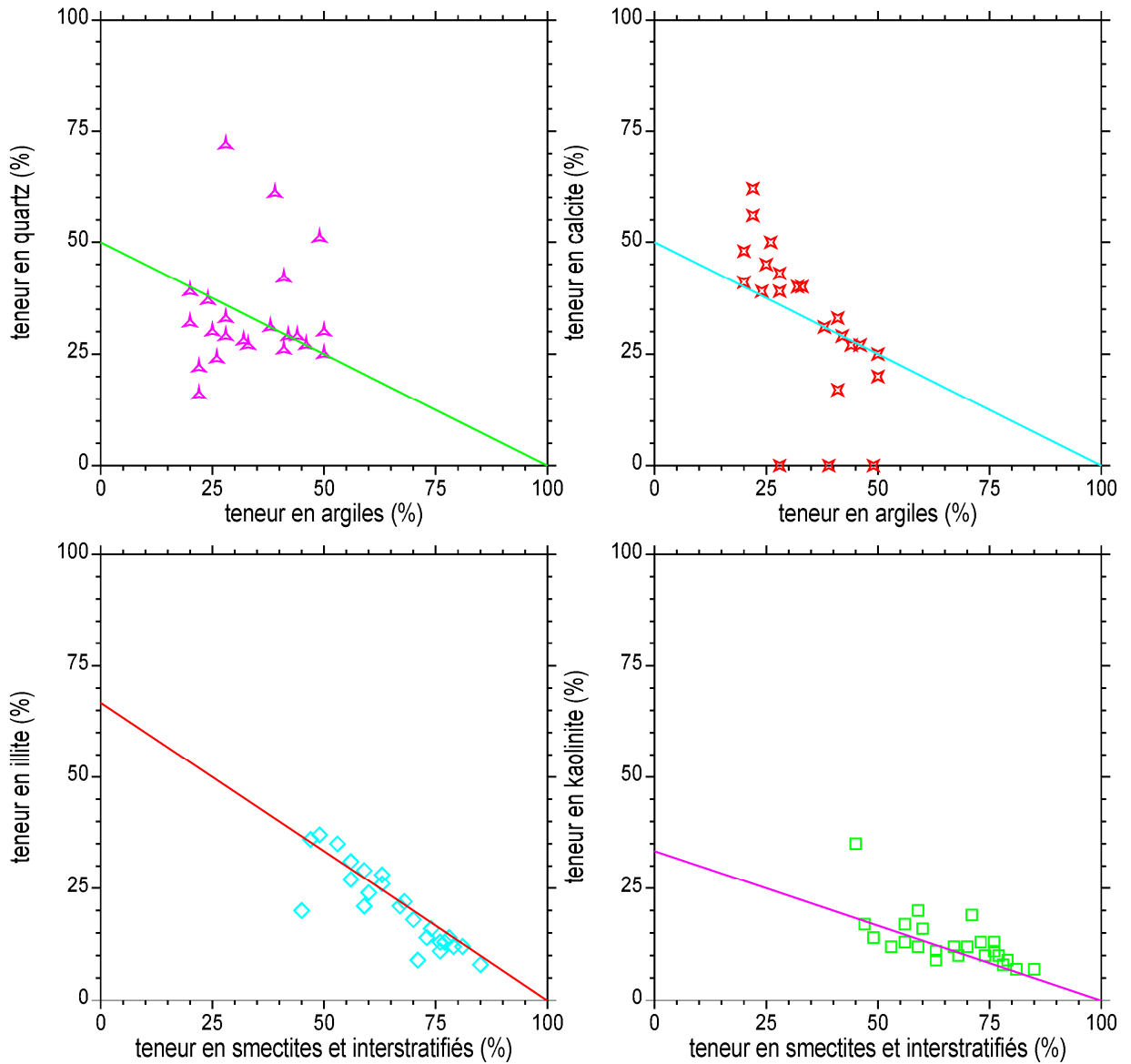
Figure B-2 (page suivante) : Proportions relatives des constituants des marnes d'après les analyses minéralogiques par diffraction X.

jfs i07-042 07/07/2007

Cerema DTer Méditerranée
 Laboratoire d'Aix en Provence
 Labo Sols Roches Rhéologie

Analyses minéralogiques par diffraction X

Tunnel d'Arbus AR1-06 AR3-06 AR4-06
 Analyses minéralogiques Molasses
 Diffraction X Ar_Mine



▲ Quartz Argiles	▲ $2Qz = 100 - Ag$ (en %)
✕ Calcite Argiles	✕ $2Ca = 100 - Ag$ (en %)
◇ Illite Smectites (et interstratifiés)	◇ $3Il = 2(100 - Sm)$ (en %)
□ Kaolinite Smectites (et interstratifiés)	□ $6Ka = 2(100 - Sm)$ (en %)

Pourcentages des constituants.

Tunnel d'Arbus

LRPC Aix Dta v3-0 Jul 2005 403trx 3/ 8/2007

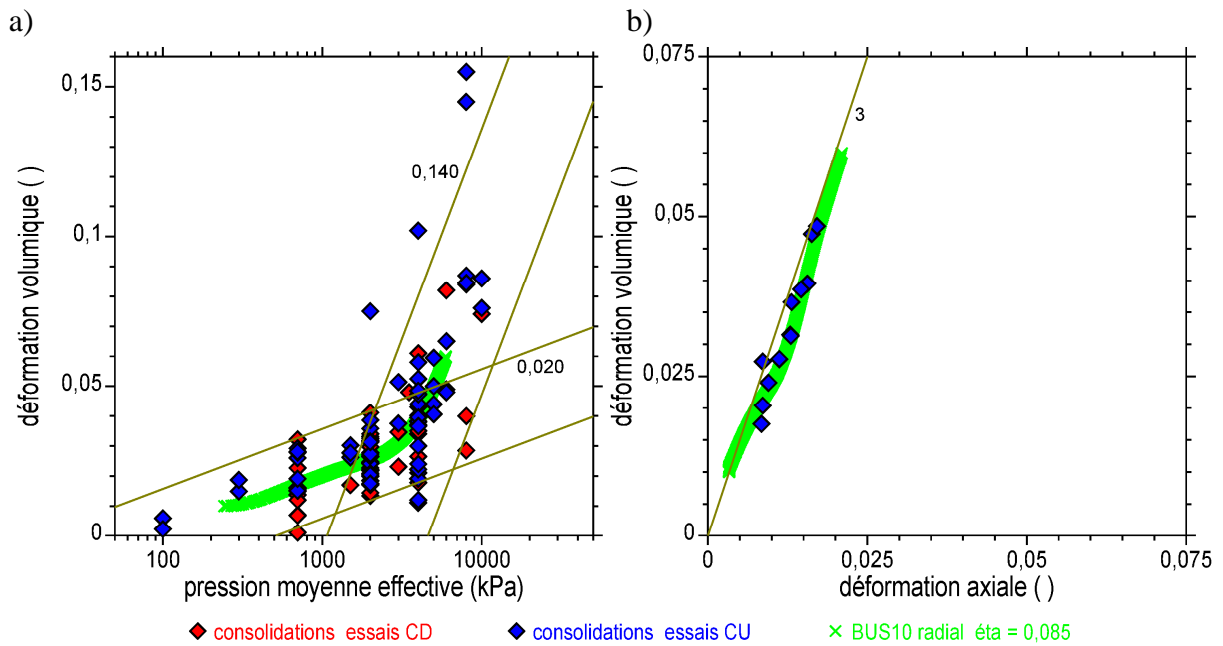
Essais triaxiaux

Figure B-3 : Déformations mesurées pendant les paliers de consolidation isotrope.

a) Déformation volumique en fonction de la pression de consolidation en échelles semi-logarithmiques ($\lg(p_c)$, ε_{vc}).

b) Plan des déformations (ε_{ac} , ε_{vc}).

La réponse à un essai de chargement radial est indiquée (éprouvette BUS10).

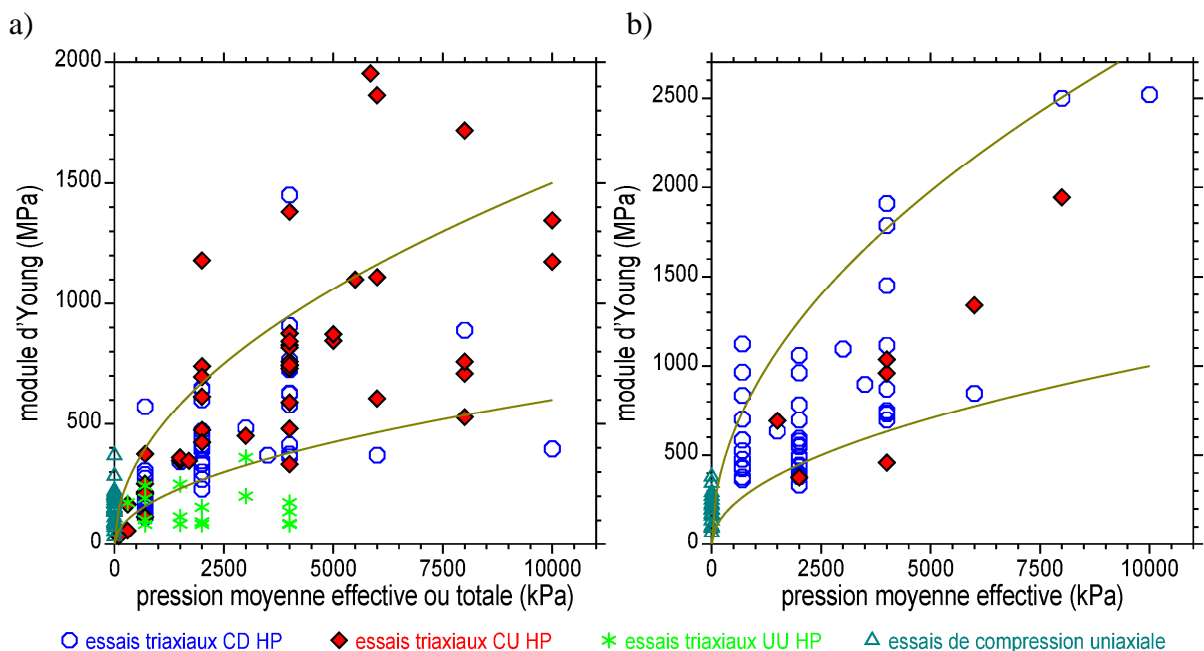


Figure B-4 : Modules d'Young mesurés pendant les essais triaxiaux et de compression.

a) Modules tangents initiaux E_{ini} mesurés au début des cisaillements.

b) Modules cycliques E_{cyc} mesurés pendant les cycles.

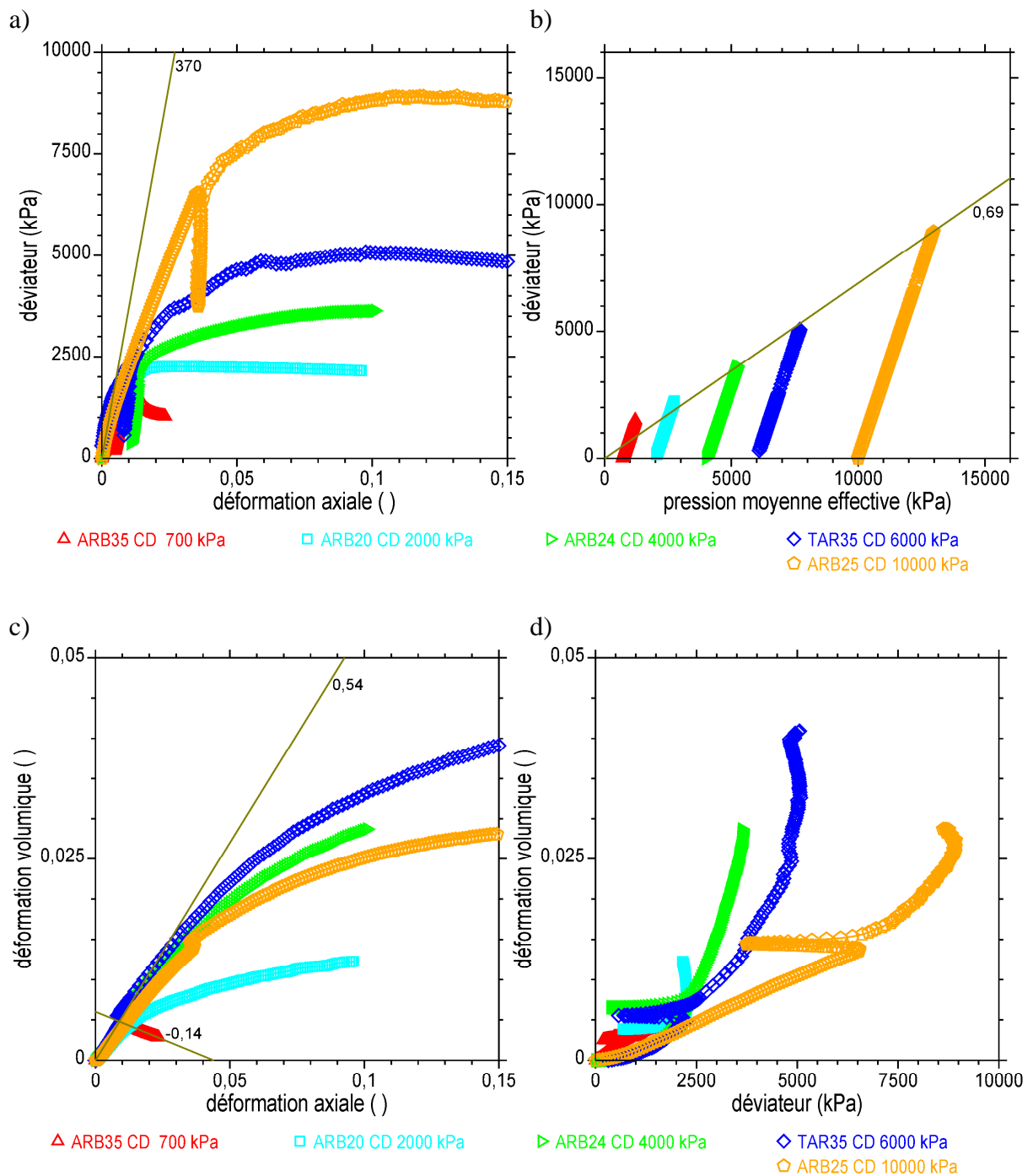


Figure B-5 : Essais triaxiaux CD à basse pression et à haute pression.

- a) Courbes contrainte-déformation (ϵ_a , q).
- b) Chemins des contraintes effectives (p , q).
- c) Chemins des déformations (ϵ_a , ϵ_v).
- d) Déformation volumique-déviateur (q , ϵ_v).

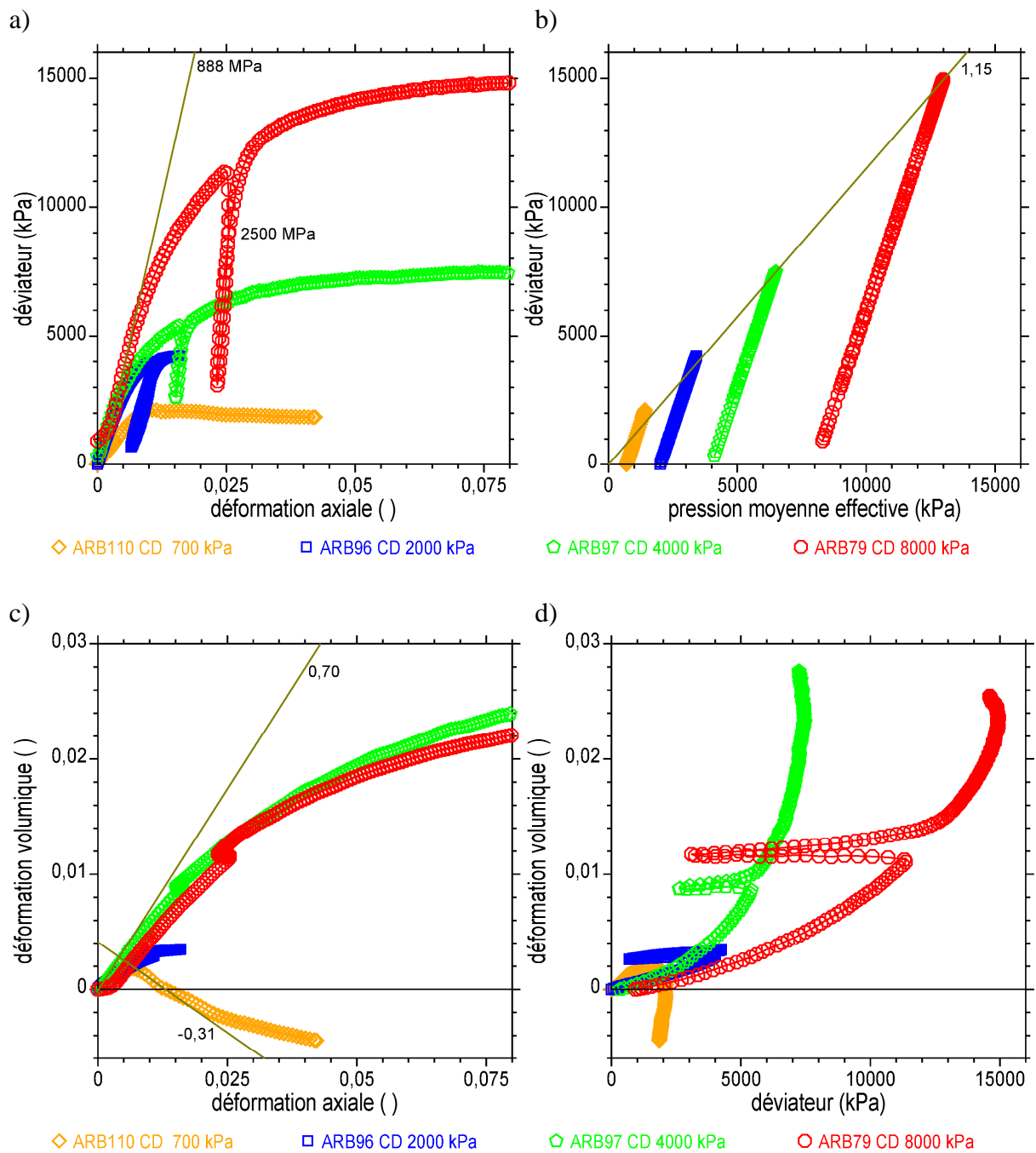


Figure B-6 : Essais triaxiaux CD à basse pression et à haute pression.

- Courbes contrainte-déformation (ϵ_a , q).
- Chemins des contraintes effectives (p , q).
- Chemins des déformations (ϵ_a , ϵ_v).
- Déformation volumique-déviateur (q , ϵ_v).

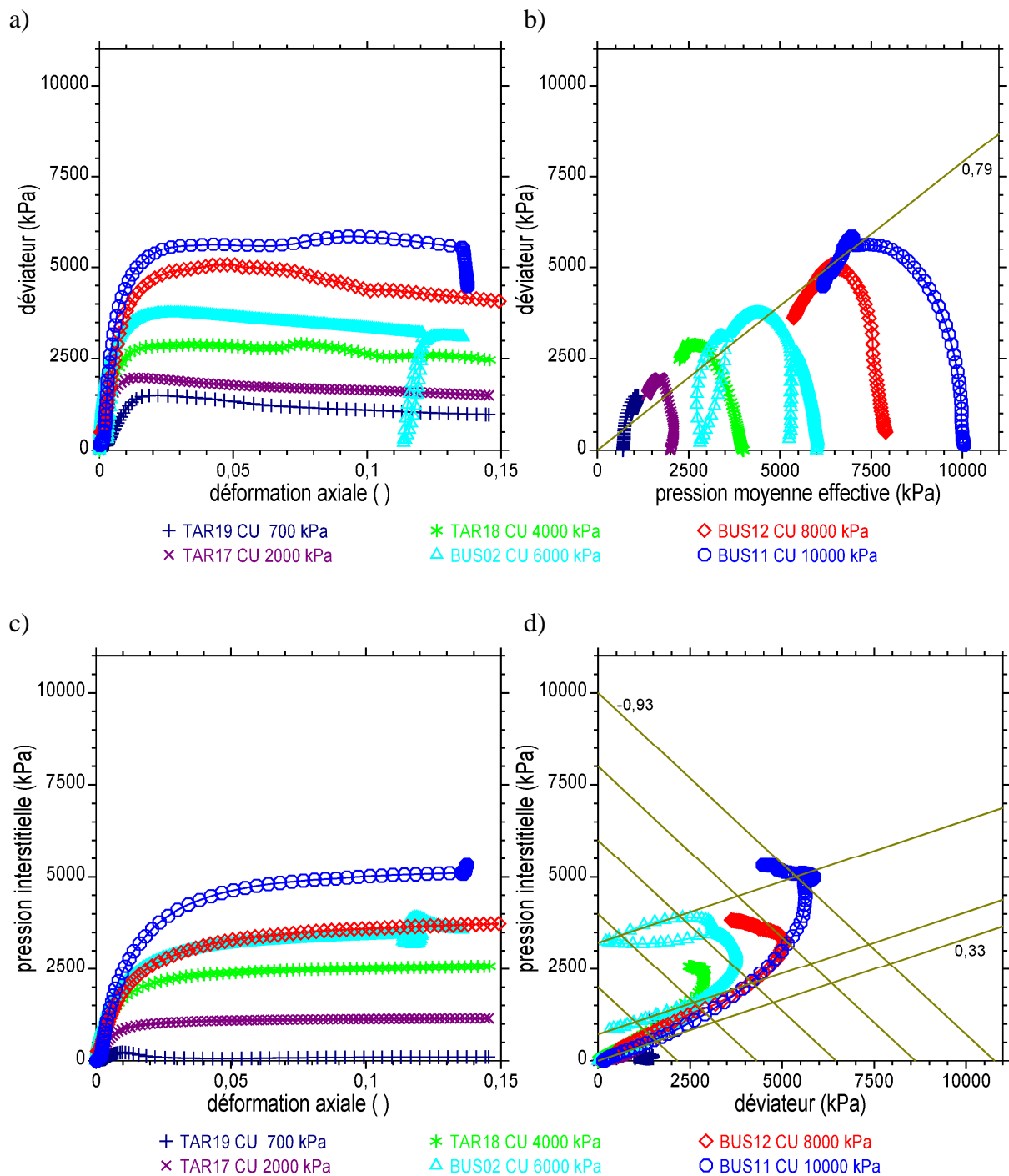


Figure B-7 : Essais triaxiaux CU à basse pression et à haute pression.

- Courbes contrainte-déformation (ϵ_a , q).
- Chemins des contraintes effectives (p , q).
- Pression interstitielle déformation axiale (ϵ_a , u).
- Pression interstitielle déviateur (q , u).

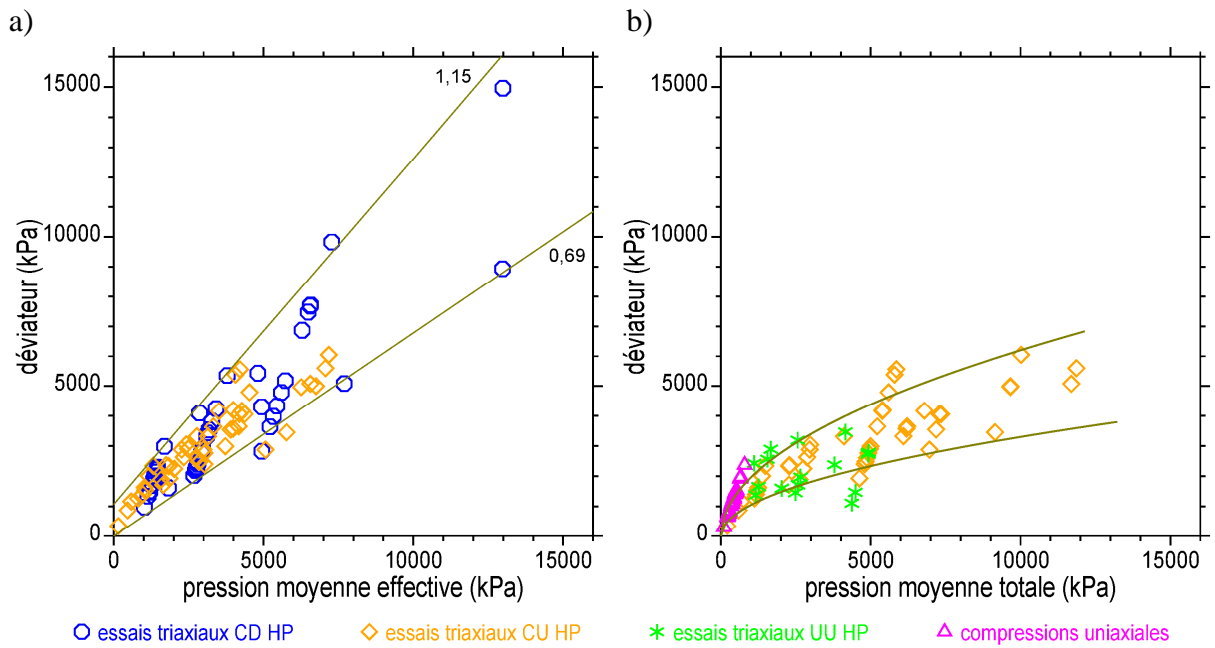


Figure B-8 : Résistances des marnes mesurées à l'aide d'essais triaxiaux HP.

a) Dans le plan des contraintes effectives (p , q).

b) Dans le plan des contraintes totales (p_T , q).

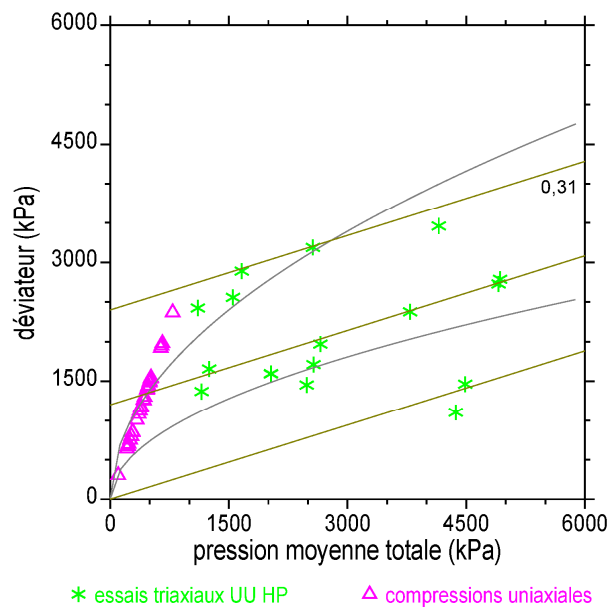


Figure B-9 : Résistances des marnes en contraintes totales.

Annexe C. Matériel

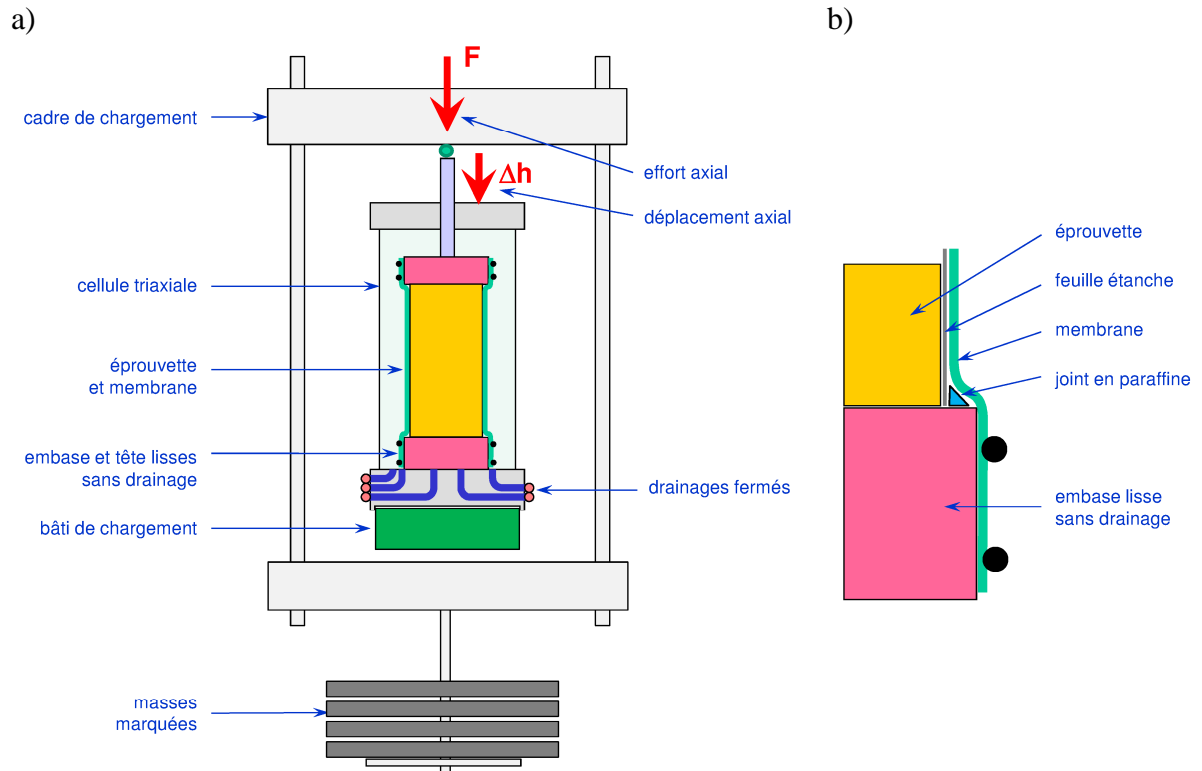


Figure C-1 : Schéma du dispositif d'essai de fluage en compression uniaxiale.
a) Vue d'ensemble. b) Détail.

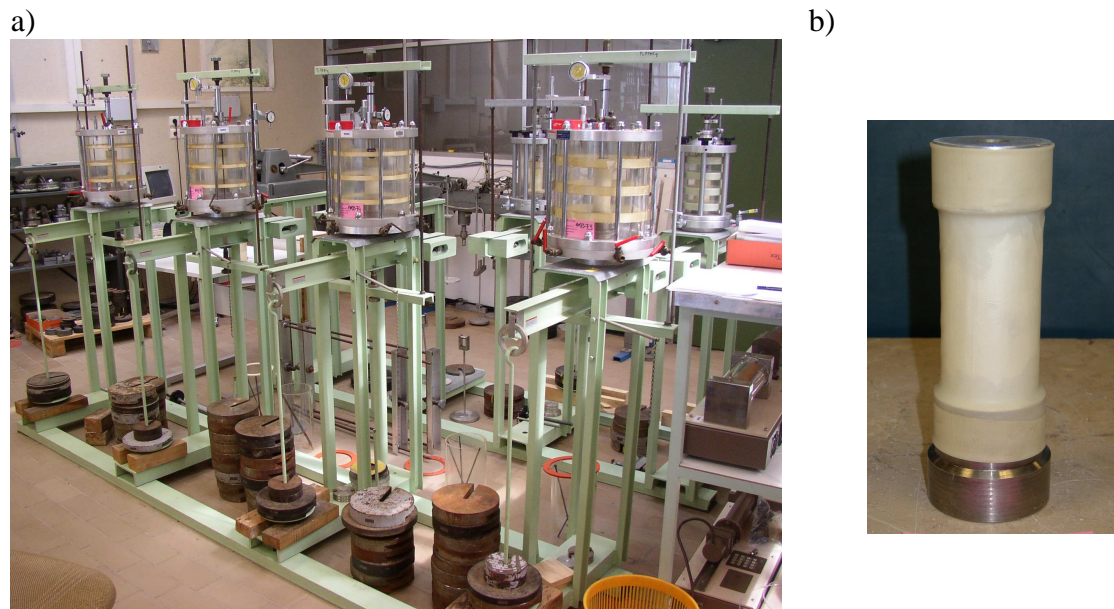


Figure C-2 : Photos du dispositif d'essai de fluage en compression uniaxiale.
a) Banc de fluage (bâtis, cellules triaxiales, masses marquées).
b) Echantillon ARB11 enveloppé dans sa membrane avant essai. Diamètre 50 mm.

a)



b)



c)



d)



e)



Figure C-3 : Photos du dispositif d'essai de fluage en compression uniaxiale. Six bâtis.

a) Rangée avant de quatre bâtis.

b) Rangée arrière de deux bâtis.

c) Epruvette ARB11 en cours de montage. Diamètre 50 mm.

d) Epruvette BUS16 en cours de démontage.

L'éprouvette a été cassée en compression après la fin de l'essai de fluage. La membrane extérieure en latex a été enlevée, laissant apparaître la feuille étanche déchirée par le cisaillement. Le joint en parafine apparaît au contact de la feuille étanche avec les embases.

e) Epruvette BUS16 après démontage (rupture sur un plan de cisaillement).

Annexe D. Conditions des essais de fluage. Site d'Arbus

Tableau D-1a : Essais de fluage en compression uniaxiale. Conditions d'essai.

série 1						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q_{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
ARB11	AR2-05 E17	marne	CD fluage	40	1550	03/02/2006 10/03/2006
ARB12	AR2-05 E17	marne	CD fluage	60	1174	03/02/2006 09/03/2006
ARB14	AR2-05 E17	marne	CD fluage	80	795	03/02/2006 09/03/2006
ARB13	AR2-05 E17	marne	comp uniaxiale			03/02/2006

série 2						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q_{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
ARB40	AR3-06 G13	marne	comp uniaxiale			13/03/2006
ARB41	AR3-06 G13	marne	CD fluage	80	1047	13/03/2006 11/04/2006
ARB42	AR3-06 G13	marne	CD fluage	60	797	13/03/2006 11/04/2006
ARB43	AR3-06 G13	marne	CD fluage	40	543	13/03/2006 11/04/2006

série 3						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q_{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
ARB59	AR1-06 G16	marne	CD fluage	40	292	03/04/2006 12/05/2006
ARB60	AR1-06 G16	marne	comp uniaxiale			03/04/2006
ARB61	AR1-06 G16	marne	CD fluage	60	415	03/04/2006 12/05/2006
ARB62	AR1-06 G16	marne	CD fluage	80	541	03/04/2006 12/05/2006

série 4						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q_{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
ARB72	AR1-06 G6	marne	comp uniaxiale			03/04/2006
ARB73	AR1-06 G6	marne	CD fluage	80	515	11/04/2006 14/05/2006
ARB74	AR1-06 G6	marne	CD fluage	60	391	11/04/2006 14/05/2006
ARB75	AR1-06 G6	marne	CD fluage	40	268	11/04/2006 12/05/2006

série 5						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q_{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
ARB80	AR4-06 G3	marne	comp uniaxiale			19/05/2006
ARB81	AR4-06 G3	marne	CD fluage	80	804	19/05/2006 04/07/2006
ARB82	AR4-06 G3	marne	CD fluage	60	606	19/05/2006 04/07/2006
ARB83	AR4-06 G3	marne	CD fluage	40	541	19/05/2006 04/07/2006

q contrainte axiale

q/q_{rupt} rapport des contraintes à la rupture (estimé)

Tableau D-1a (suite) : Essais de fluage en compression uniaxiale. Conditions d'essai.

série 6						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q _{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
ARB84	AR4-06 G10	marne	comp uniaxiale			19/05/2006
ARB85	AR4-06 G10	marne	CD fluage	40	346	19/05/2006 04/07/2006
ARB86	AR4-06 G10	marne	CD fluage	80	701	19/05/2006 04/07/2006
ARB87	AR4-06 G10	marne	CD fluage	60	518	19/05/2006 04/07/2006

série 7						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q _{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
TAR01	AR5-07 E9	marne	CD fluage	80	813	12/03/2007 29/05/2007
TAR02	AR5-07 E9	marne	CD fluage	60	746	12/03/2007 29/05/2007
TAR03	AR5-07 E9	marne	CD fluage	40	655	12/03/2007 29/05/2007
TAR04	AR5-07 E9	marne	comp uniaxiale			13/03/2007

série 8						
éprouvette	échantillon	matériau	condition	q/q _{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
TAR27	AR6-07 E13	marne	CD fluage	40	341	29/05/2007 19/07/2007
TAR28	AR6-07 E13	marne	CD fluage	60	517	29/05/2007 19/07/2007
TAR29	AR6-07 E13	marne	CD fluage	80	693	29/05/2007 19/07/2007
TAR30	AR6-07 E13	marne	comp uniaxiale			31/05/2007

q contrainte axiale

q/q_{rupt} rapport des contraintes à la rupture (estimé)

série 9					
éprouvette	d ₀ (cm)	h ₀ (cm)	condition		date d'essai
BUS16	4,98	9,84	CD fluage	3 paliers	30/07/2007 16/10/2007
TAR45	4,97	9,83	CD fluage	3 paliers	30/07/2007 22/10/2007
TAR46	4,98	9,84	CD fluage	6 paliers	30/07/2007 09/11/2009

éprouvette	phase d'essai ⁽¹⁾	q (kPa)	durée (h)	durée totale (h)
BUS16	06	342	815	1872
	08	842	1009	
	10	1336	28 (rupture)	
TAR45	08	695	815	1951
	10	1198	1009	
	12	1694	108 (rupture)	
TAR46	07	518	812	19985
	09	1016	1009	
	11	1516	2350	
	13	1764	11426	
	15	1996	3191	
	20	2618	983	

⁽¹⁾ les autres numéros de phase sont des paliers de chargement intermédiaires
q contrainte axiale

Tableau D-1b : Essais de fluage. Caractéristiques d'état des éprouvettes.

	z m	w %	gam kN/m3	gamd kN/m3	e	Sr %	wf %
ARB11	32,56	12,07	22,01	19,64	0,349	93,3	11,70
ARB12	32,68	10,75	21,42	19,34	0,370	78,5	10,42
ARB14	32,81	12,09	22,06	19,68	0,346	94,3	11,94
ARB41	66,92	12,51	21,92	19,48	0,360	93,8	12,28
ARB42	67,04	9,59	22,73	20,74	0,277	93,4	9,43
ARB43	67,44	13,88	21,68	19,04	0,392	95,7	13,72
ARB59	99,82	14,33	21,49	18,79	0,410	94,4	14,15
ARB61	99,95	14,27	21,41	18,74	0,414	93,0	14,11
ARB62	100,07	12,22	21,61	19,26	0,376	87,7	12,06
ARB73	80,78	13,37	21,95	19,36	0,368	98,0	13,23
ARB74	80,90	12,51	22,20	19,73	0,343	98,6	12,37
ARB75	81,02	12,08	22,36	19,95	0,329	99,3	11,95
ARB81	31,74	14,17	21,52	18,85	0,406	94,4	13,79
ARB82	31,86	15,24	21,38	18,56	0,428	96,1	14,84
ARB83	31,98	14,41	21,52	18,81	0,409	95,3	14,00
ARB87	55,99	12,74	21,95	19,47	0,361	95,3	12,59
ARB86	56,11	13,19	21,92	19,37	0,368	96,7	13,00
ARB85	56,23	12,37	22,05	19,63	0,350	95,4	12,21
TAR03	54,67	15,74	21,42	18,51	0,432	98,4	15,52
TAR02	54,79	13,73	21,97	19,32	0,372	99,8	13,41
TAR01	54,91	12,60	22,26	19,77	0,341	100,0	12,39
TAR29	58,50	15,82	21,42	18,49	0,433	98,7	15,50
TAR28	58,62	15,98	21,15	18,24	0,453	95,3	15,69
TAR27	58,74	17,50	21,11	17,97	0,475	99,6	17,22
BUS16	56,48	14,97	21,42	18,63	0,422	95,7	14,66
TAR45	57,72	14,39	21,77	19,03	0,393	99,0	14,02
TAR46	57,28	12,07	22,25	19,85	0,335	97,3	7,57

Tableau D-1c : Essais de fluage. Paramètres de calcul.

série 1									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
ARB11	09	1550	6	10,0	2,0	0,0130	0,0013	0,10E-06	-0,80
ARB12	08	1174	6	10,0	2,0	0,0090	0,0006	0,10E-06	-0,90
ARB14	06	795	6	10,0	2,0	0,0090	0,0005	0,10E-06	-0,95

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ARB11	8	2,4	2,0	0,0125	0,0019	0,10E-06	-1,20	-0,80	0,30E-03
ARB12	8	2,4	2,0	0,00905	0,00065	0,10E-06	-2,00	-0,83	0,11E-03
ARB14	8	2,4	2,0	0,0088	0,00075	0,10E-06	-2,00	-0,85	0,80E-04

série 2									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
ARB41	07	1047	6	10,0	2,0	0,0128	0,00142	0,10E-06	-0,95
ARB42	06	797	6	10,0	2,0	0,0079	0,0006	0,10E-06	-1,00
ARB43	05	543	6	10,0	2,0	0,0077	0,00075	0,10E-06	-1,00

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ARB41	8	2,4	2,0	0,0128	0,0015	0,10E-06	-1,20	-0,90	0,30E-03
ARB42	8	2,4	2,0	0,0079	0,0006	0,10E-06	-2,00	-0,90	0,10E-03
ARB43	8	2,4	2,0	0,0077	0,00095	0,10E-06	-2,00	-0,90	0,11E-03

série 3									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
ARB59	05	292	6	10,0	2,0	0,0050	0,0005	0,50E-06	-0,95
ARB61	06	415	6	10,0	2,0	0,0103	0,0007	0,50E-06	-0,95
ARB62	06	541	6	10,0	2,0	0,0128	0,0012	0,50E-06	-0,95

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ARB59	8	2,4	2,0	0,0050	0,0009	0,10E-06	-2,00	-0,90	0,12E-03
ARB61	8	2,4	2,0	0,0104	0,00105	0,10E-06	-2,00	-0,90	0,15E-03
ARB62	8	2,4	2,0	0,0131	0,0018	0,10E-06	-2,00	-0,90	0,26E-03

q contrainte axiale
n par nombre de paramètres
Δε Δε = ε_∞ - ε₀

Tableau D-1c (suite) : Essais de fluage. Paramètres de calcul.

série 4									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
ARB73	06	515	6	10,0	2,0	0,0140	0,00107	0,50E-06	-0,90
ARB74	06	391	6	10,0	2,0	0,0098	0,00068	0,50E-06	-0,90
ARB75	05	268	6	10,0	2,0	0,0081	0,00071	0,50E-06	-0,90

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ARB73	8	2,4	2,0	0,0141	0,0015	0,20E-06	-1,50	-0,85	0,24E-03
ARB74	8	2,4	2,0	0,0097	0,00095	0,20E-06	-1,50	-0,85	0,18E-03
ARB75	8	2,4	2,0	0,0081	0,00115	0,20E-06	-2,00	-0,85	0,20E-03

série 5									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
ARB81	06	804	6	10,0	2,0	0,0085	0,0005	0,50E-06	-0,85
ARB82	06	606	6	10,0	2,0	0,0074	0,0005	0,50E-06	-0,85
ARB83	06	541	6	10,0	2,0	0,0048	0,0005	0,50E-06	-0,85

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ARB81	8	2,4	2,0	0,0085	0,0009	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,10E-03
ARB82	8	2,4	2,0	0,0074	0,00085	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,11E-03
ARB83	8	2,4	2,0	0,0050	0,00006	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,12E-03

série 6									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
ARB85	06	346	6	10,0	2,0	0,0056	0,0005	0,10E-06	-0,95
ARB86	06	701	6	10,0	2,0	0,0100	0,00058	0,10E-06	-0,95
ARB87	06	518	6	10,0	2,0	0,0070	0,00045	0,10E-06	-0,95

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ARB85	8	2,4	2,0	0,0056	0,0005	0,10E-06	-1,50	-0,85	0,70E-04
ARB86	8	2,4	2,0	0,0100	0,00062	0,10E-06	-1,50	-0,85	0,90E-04
ARB87	8	2,4	2,0	0,0070	0,00045	0,10E-06	-1,50	-0,85	0,89E-04

q contrainte axiale
n par nombre de paramètres
Δε Δε = ε_∞ - ε₀

Tableau D-1c (suite) : Essais de fluage. Paramètres de calcul.

série 7									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
TAR01	06	813	6	10,0	2,0	0,0043	0,00017	0,50E-06	-0,80
TAR02	06	746	6	10,0	2,0	0,0050	0,00025	0,50E-06	-0,80
TAR03	06	655	6	10,0	2,0	0,0048	0,00020	0,50E-06	-0,80

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
TAR01	8	2,4	2,0	0,00425	0,0004	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,40E-04
TAR02	8	2,4	2,0	0,00505	0,0005	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,70E-04
TAR03	8	2,4	2,0	0,00480	0,00040	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,40E-04

série 8									
Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
TAR27	06	341	6	10,0	2,0	0,0048	0,00045	0,50E-06	-0,90
TAR28	08	517	6	10,0	2,0	0,0079	0,00065	0,10E-06	-0,90
TAR29	08	693	6	10,0	2,0	0,0088	0,0008	0,10E-06	-0,90

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
TAR27	8	2,4	2,0	0,0048	0,00045	0,50E-06	-1,50	-0,80	0,10E-03
TAR28	8	2,4	2,0	0,0079	0,00065	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,12E-03
TAR29	8	2,4	2,0	0,0088	0,00080	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,14E-03

q contrainte axiale

n par nombre de paramètres

Δε Δε = ε_∞ - ε₀

Tableau D-1c (suite) : Essais de fluage. Paramètres de calcul.

série 9-1									
Eprouvette	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
BUS16	06	342	6	10,0	2,0	0,0057	0,0004	0,50E-06	-0,90
	08	842	6	10,0	2,0	0,0109	0,00070	0,50E-06	-0,95
	10	1336	6	10,0	2,0	0,0150	0,0011	0,50E-06	-0,90

Eprouvette	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
BUS16	8	2,4	2,0	0,0055	0,00066	0,50E-06	-2,00	-0,85	0,80E-04
	8	2,4	2,0	0,0105	0,00125	0,50E-06	-2,00	-0,85	0,10E-03
	8	2,4	2,0	0,0148	0,0013	0,50E-06	-2,00	-0,85	0,12E-03

série 9-2									
Eprouvette	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
TAR45	08	695	6	10,0	2,0	0,0078	0,00042	0,50E-06	-0,90
	10	1198	6	10,0	2,0	0,0108	0,00067	0,50E-06	-0,90
	12	1694	6	10,0	2,0	0,0145	0,0009	0,50E-06	-0,90

Eprouvette	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
TAR45	8	2,4	2,0	0,0078	0,0008	0,50E-07	-1,50	-0,90	0,12E-03
	8	2,4	2,0	0,0109	0,0012	0,50E-07	-1,50	-0,90	0,20E-03
	8	2,4	2,0	0,0147	0,0020	0,50E-07	-1,50	-0,90	0,30E-03

série 9-3									
Eprouvette	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
TAR46	07	518	6	10,0	2,0	0,0074	0,0006	0,10E-06	-0,90
	09	1016	6	10,0	2,0	0,0112	0,00065	0,10E-06	-0,90
	11	1516	6	10,0	2,0	0,0142	0,00066	0,10E-06	-0,85

Eprouvette	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
TAR46	8	2,4	2,0	0,0076	0,0007	0,50E-07	-1,50	-0,80	0,90E-04
	8	2,4	2,0	0,0112	0,0085	0,50E-07	-1,50	-0,80	0,10E-03
	8	2,4	2,0	0,0142	0,0007	0,50E-07	-1,50	-0,80	0,14E-03

q contrainte axiale

n par nombre de paramètres

Δε Δε = ε_∞ - ε₀

Récapitulation des caractéristiques des courbes de fluage

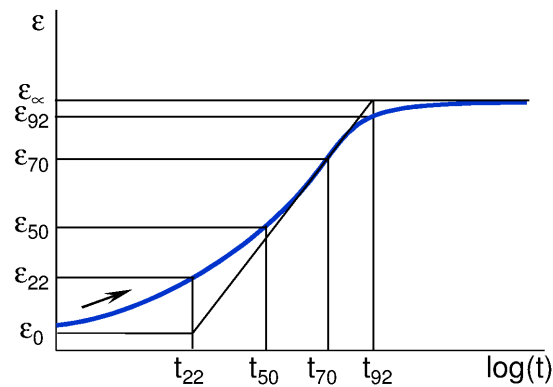


Figure D-1d1 : Temps particuliers le long de la courbe de consolidation élastique.

Tableau D-1d1 : Temps particuliers le long de la courbe de consolidation élastique.

facteur temps ()	0,0385	0,197	0,287	0,403	0,848	1,00
degré de consolidation ()	0,22	0,50	0,60	0,70	0,90	0,92

La [figure D-1d1](#) et le [tableau D-1d1](#) indiquent des temps particuliers le long de la courbe de consolidation élastique (t_{70} marque le point d'inflexion de la courbe, t_{92} marque le " t_{100} "). Le [tableau D-1d2](#) récapitule les caractéristiques des courbes de fluage. Le [tableau D-1d3](#) donne les moyennes de ces caractéristiques. Les temps t_d du début du fluage dans le modèle à huit paramètres sont compris entre 0,84 et 8,4 heures. Ils sont associés à des facteurs temps compris entre 0,49 et 0,81 et des degrés de consolidation compris entre 75 % et 89 %. Ils sont donc compris entre t_{70} et t_{90} .

Tableau D-1d2 : Essais de fluage. Caractéristiques des courbes de fluage.

s	épr	q kPa	q/qrupt	c _v m ² /s	t _d h	epsd	T _v	U	m	o _m /h
1	ARB11	1550	0,807	0,10E-06	3,38	0,0139	0,486	0,756	0,80	0,30E-03
1	ARB12	1174	0,497	0,10E-06	5,63	0,0096	0,810	0,890	0,83	0,11E-03
1	ARB14	795	0,408	0,10E-06	5,63	0,0095	0,810	0,890	0,85	0,80E-04
2	ARB41	1047	0,745	0,10E-06	3,38	0,0139	0,486	0,756	0,90	0,30E-03
2	ARB42	797	0,531	0,10E-06	5,63	0,0084	0,810	0,890	0,90	0,10E-03
2	ARB43	543	0,502	0,10E-06	5,63	0,0085	0,810	0,890	0,90	0,11E-03
3	ARB59	292	0,434	0,10E-06	5,63	0,0058	0,810	0,890	0,90	0,12E-03
3	ARB61	415	0,614	0,10E-06	5,63	0,0113	0,810	0,890	0,90	0,15E-03
3	ARB62	541	0,718	0,10E-06	5,63	0,0147	0,810	0,890	0,90	0,26E-03
4	ARB73	515	0,438	0,20E-06	2,11	0,0153	0,608	0,819	0,85	0,24E-03
4	ARB74	391	0,309	0,20E-06	2,81	0,0105	0,810	0,890	0,85	0,18E-03
4	ARB75	268	0,206	0,20E-06	2,81	0,0091	0,810	0,890	0,85	0,20E-03
5	ARB81	804	0,520	0,10E-06	4,22	0,0092	0,608	0,819	0,80	0,10E-03
5	ARB82	606	0,392	0,10E-06	4,22	0,0081	0,608	0,819	0,80	0,11E-03
5	ARB83	423	0,285	0,10E-06	4,22	0,0055	0,608	0,819	0,80	0,12E-03
6	ARB87	518	0,358	0,10E-06	4,22	0,0074	0,608	0,819	0,85	0,89E-04
6	ARB86	701	0,457	0,10E-06	4,22	0,0105	0,608	0,819	0,85	0,80E-04
6	ARB85	346	0,248	0,10E-06	4,22	0,0060	0,608	0,819	0,85	0,70E-04
7	TAR03	655	0,820	0,10E-06	4,22	0,0051	0,608	0,819	0,80	0,40E-04
7	TAR02	746	0,660	0,10E-06	4,22	0,0055	0,608	0,819	0,80	0,70E-04
7	TAR01	813	0,700	0,10E-06	4,22	0,0046	0,608	0,819	0,80	0,40E-04
8	TAR29	693	0,483	0,10E-06	3,00	0,0095	0,608	0,819	0,80	0,14E-03
8	TAR28	517	0,398	0,10E-06	4,22	0,0084	0,608	0,819	0,80	0,12E-03
8	TAR27	341	0,303	0,50E-06	0,84	0,0052	0,608	0,819	0,80	0,10E-03
91	BUS16	342	0,181	0,50E-06	1,13	0,0061	0,810	0,890	0,85	0,80E-04
91	BUS16	842	0,630	0,50E-06	1,13	0,0116	0,810	0,890	0,85	0,10E-03
91	BUS16	1336	1,000	0,50E-06	1,13	0,0160	0,810	0,890	0,85	0,12E-03
92	TAR45	695	0,410	0,50E-07	8,44	0,0085	0,608	0,819	0,90	0,12E-03
92	TAR45	1198	0,707	0,50E-07	8,44	0,0119	0,608	0,819	0,90	0,20E-03
92	TAR45	1694	1,000	0,50E-07	8,44	0,0163	0,608	0,819	0,90	0,30E-03
93	TAR46	518	0,173	0,50E-07	8,44	0,0082	0,608	0,819	0,80	0,90E-04
93	TAR46	1016	0,339	0,50E-07	8,44	0,0119	0,608	0,819	0,80	0,10E-03
93	TAR46	1516	0,505	0,50E-07	8,44	0,0148	0,608	0,819	0,80	0,14E-03

Tableau D-1d3 : Essais de fluage. Moyennes des caractéristiques des courbes de fluage.

variable	n	mini	maxi	étendue	moyenne	écart-type	coef. variation
c _v (m ² /s)	33	0,50E-07	0,50E-06				
t _d (heure)	33	0,84	8,4				
T _v ()	33	0,49	0,81	0,32	0,65	0,108	0,161
U ()	33	0,75	0,89	0,14	0,84	0,040	0,048
m ()	33	0,80	0,90	0,10	0,84	0,041	0,049
o _m (/heure)	33	0,40E-04	0,30E-03				

Loi de Singh et Mitchell (1968)

La loi de Singh et Mitchell (1968) donne la vitesse de déformation axiale de fluage $\dot{\epsilon}_a$ en fonction du temps t et du déviateur q . Elle s'exprime sous la forme multiplicative d'une loi puissance du temps (exposant $m < 0$; $0,75 < |m| < 1$) et d'une loi exponentielle de q :

$$\dot{\epsilon}_a(t, q) = A \left(\frac{t}{t_u} \right)^m \exp(\alpha q) \quad (D1-1)$$

où t_u est l'unité de temps (ici 1 heure) et A , m et α sont des paramètres. Pour un niveau de chargement q_f donné pendant un palier de fluage :

$$\dot{\epsilon}_{aqf}(t) = [A \exp(\alpha q_f)] \left(\frac{t}{t_u} \right)^m \quad (D1-2)$$

soit ($t = t_u$) :

$$o_m = A \exp(\alpha q_f) \quad (D1-3)$$

ou :

$$\log[o_m] = \log[A] + \frac{\alpha}{\ln(10)} q_f \quad (D1-4)$$

Pour un temps t_f donné pendant chacun des paliers de fluage :

$$\dot{\epsilon}_{atf}(q) = A \left(\frac{t_f}{t_u} \right)^m \exp(\alpha q) \quad (D1-5)$$

soit :

$$\log[\dot{\epsilon}_{atf}(q)] = \log \left[A \left(\frac{t_f}{t_u} \right)^m \right] + \frac{\alpha}{\ln(10)} q \quad (D1-6)$$

La relation (D1-3) donne le lien entre o_m et α . La relation (D1-6) exprime la relation entre $\dot{\epsilon}_a$ et q . Et :

$$\frac{\Delta \log(\dot{\epsilon}_a)}{\Delta q} = \frac{\Delta \log(o_m)}{\Delta q} = \frac{\alpha}{\ln(10)} \quad (D1-7)$$

Tableau D-1d4 : Relation entre la vitesse de déformation et le niveau déviatoire.
Essais triaxiaux de fluage. Données de la littérature.

sol	w_0 (%)	e_0 ()	p_c (kPa)	$\Delta \log(\dot{\epsilon}_a) / \Delta q$ (/kPa)	auteurs
argile de San Francisco	69	1,86	100	0,25E-01 ⁽¹⁾	Singh et Mitchell (1968)
argile de Londres	29,3	0,79	141	0,74E-03	Singh et Mitchell (1968) ⁽²⁾
argile d'Osaka	65	1,76	0	0,20E-01	Singh et Mitchell (1968) ⁽³⁾
argilite de Bure	8	0,22	12000	(0,70E-04) ⁽⁴⁾	Gasc-Barbier et al. (2004)

⁽¹⁾ fluage non drainé

⁽²⁾ essais de Murayama et Shibata (1958)

⁽³⁾ essais de Bishop (1966) et Bishop et Lovenbury (1969) $q_{rupt} = 850$ kPa

⁽⁴⁾ estimation

Le [tableau D-1d4](#) donne quelques valeurs de ces pentes qui relient les vitesses de déformation axiale au niveau déviatoire pendant les essais de fluage triaxial en échelles semi-logarithmiques, d'après des données de la littérature.

Récapitulatif des ordonnées o_m

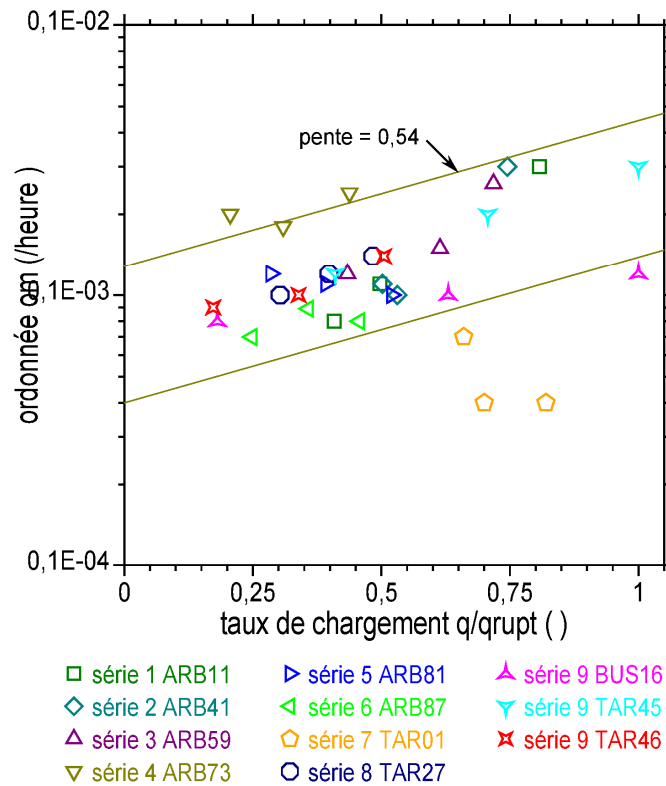


Figure D-1d2 : Ordonnées à l'origine o_m en fonction du taux de chargement q/q_{rupt} pour les neuf séries d'essais de fluage.

Tableau D-1d5 : Caractéristiques des encadrements des ordonnées à l'origine o_m .

$o_m = f(q/q_{rupt})$			$o_m = f(q)$		
pente a ()	limite inf b (/heure)	limite sup b (/heure)	pente a (/kPa)	limite inf b (/heure)	limite sup b (/heure)
0,54	$0,40 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$0,36 \cdot 10^{-3}$	$0,40 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$

Le graphique de la [figure D-1d2](#) donne les ordonnées à l'origine o_m en fonction du taux de chargement q/q_{rupt} pour les neuf séries d'essais de fluage. Les droites indiquées ont pour équation $\log(o_m/b) = a q/q_{rupt}$. Elles représentent la seconde partie de la loi de Singh et Mitchell (1968). Elles forment un encadrement dont les caractéristiques sont reportées à gauche dans le [tableau D-1d5](#). Les caractéristiques de l'encadrement de o_m en fonction de la résistance q sont reportées à droite du tableau. Le passage de l'une à l'autre de ces pentes s'effectue en admettant une résistance $q_{rupt} = 1500 \text{ kPa}$ ($0,36 \cdot 10^{-3} \times 1500 = 0,54$).

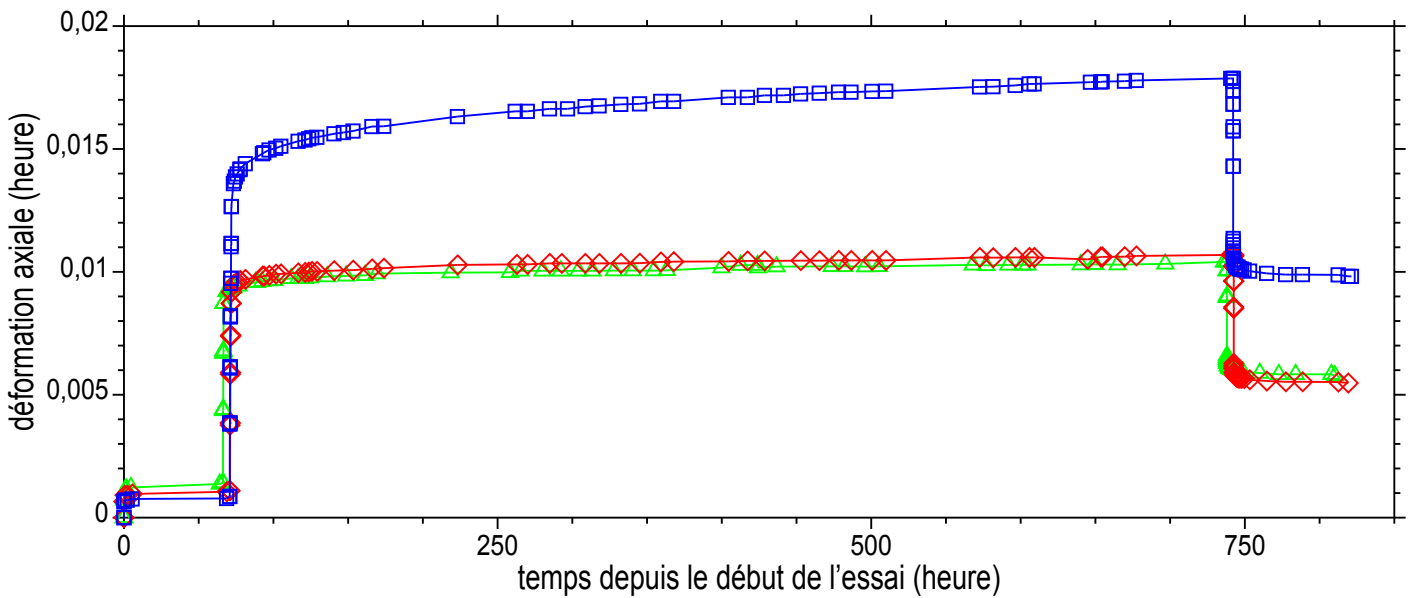
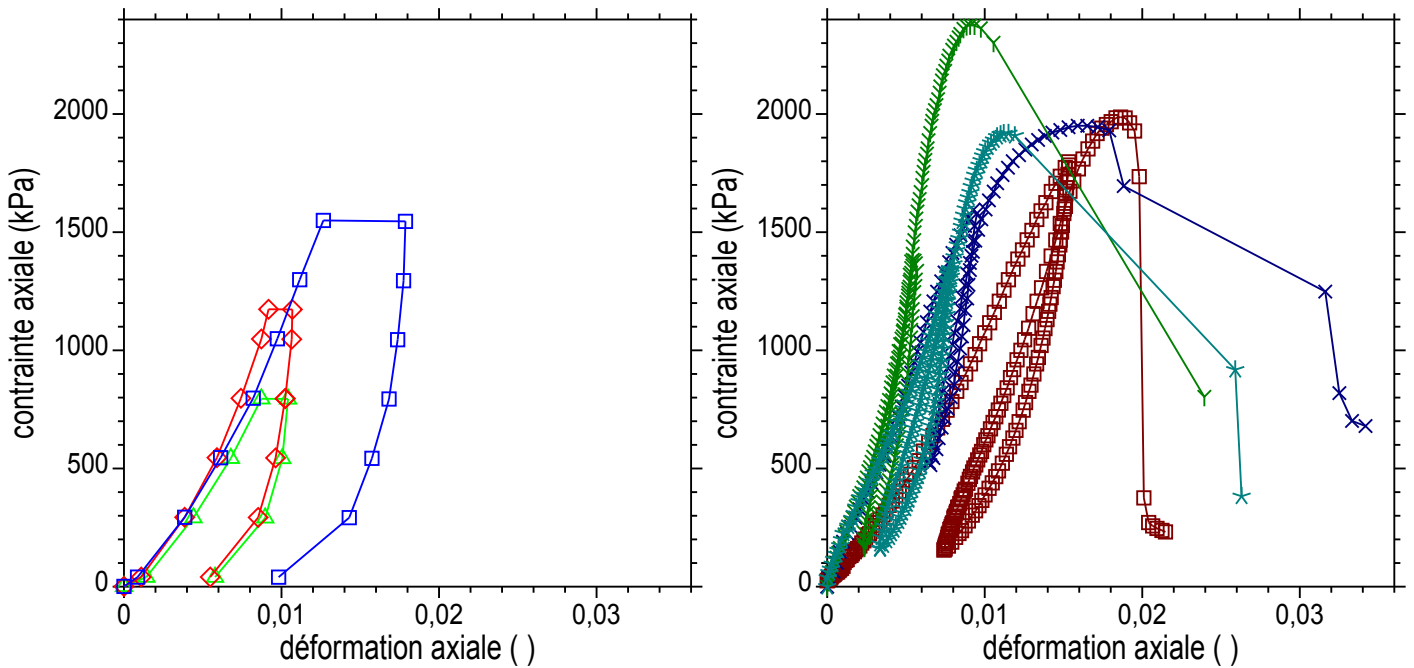
Tableau D-1d6 : Essais de fluage. Caractéristiques des chargements.

s	épr	e	q kPa	Eini MPa	Ecyc MPa	qrup kPa
1	ARB13	0.317	1981	145.0	200.0	1981
1	ARB11r	0.349	1920	156.0	272.0	1920
1	ARB12r	0.370	2370	185.0	380.0	2370
1	ARB14r	0.346	1950	155.0	345.0	1950
2	ARB40	0.393	1254	136.3	230.5	1254
2	ARB41r	0.360	1405	175.3		1405
2	ARB42r	0.277	1500	284.5		1500
2	ARB43r	0.392	1081	152.5		1081
3	ARB60	0.389	700	90.4	195.7	700
3	ARB59r	0.410	673	210.0		673
3	ARB61r	0.414	676	216.7		676
4	ARB62r	0.376	754	369.3		754
4	ARB72	0.402	640	32.0	68.3	640
4	ARB73r	0.368	1303	84.2		1303
4	ARB74r	0.343	1267	96.7		1267
4	ARB75r	0.329	1175	113.8		1175
5	ARB80	0.384	1007	89.7	136.5	1007
5	ARB81	0.406	1548	173.0		1548
5	ARB82	0.428	1546	173.7		1546
5	ARB83	0.409	1484	224.0		1484
6	ARB84	0.402	854	95.9		854
6	ARB85	0.350	1393	145.2		1393
6	ARB86	0.368	1534	204.5		1534
6	ARB87	0.361	1445	195.7		1445
7	TAR01r	0.341	1164	207.3	292.9	1164
7	TAR02r	0.372	1124	185.0	252.0	1124
7	TAR03r	0.432	801	169.0	220.0	801
7	TAR04	0.503	304	73.3	104.1	304
8	TAR27r	0.475	1124	139.2	162.6	1124
8	TAR28r	0.453	1300	144.8	175.2	1300
8	TAR29r	0.433	1435	148.8	175.0	1435
8	TAR30	0.412	850	57.0	94.0	850
91	BUS16	0,422	342 842 1336	75.0		
92	TAR45	0,393	695 1198 1694	107.0		
93	TAR46	0,335	518 1016 1516	119.0		

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 E17
 Marne légèrement gréseuse

AR2-05
 32,00 - 33,00 m
 ARB14



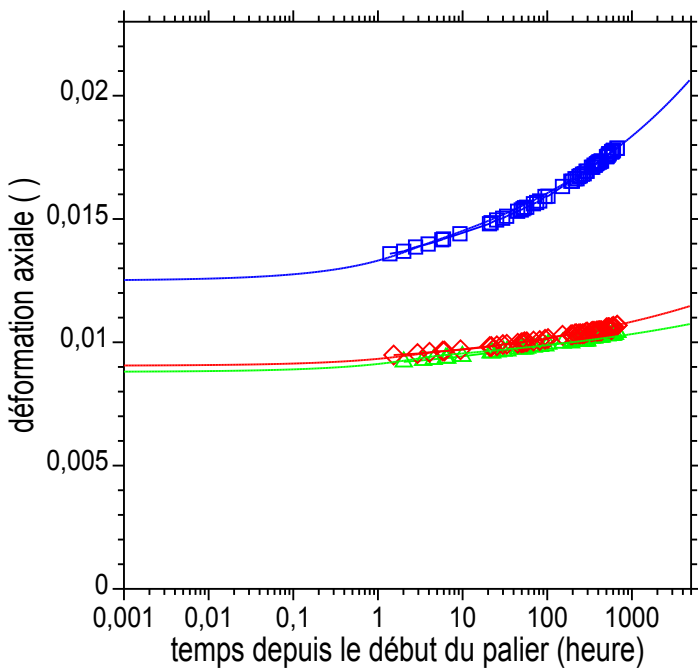
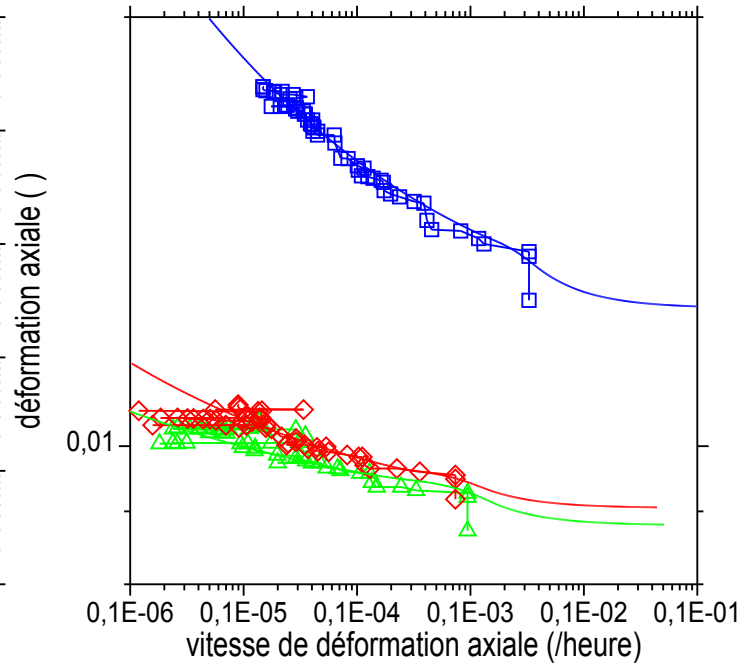
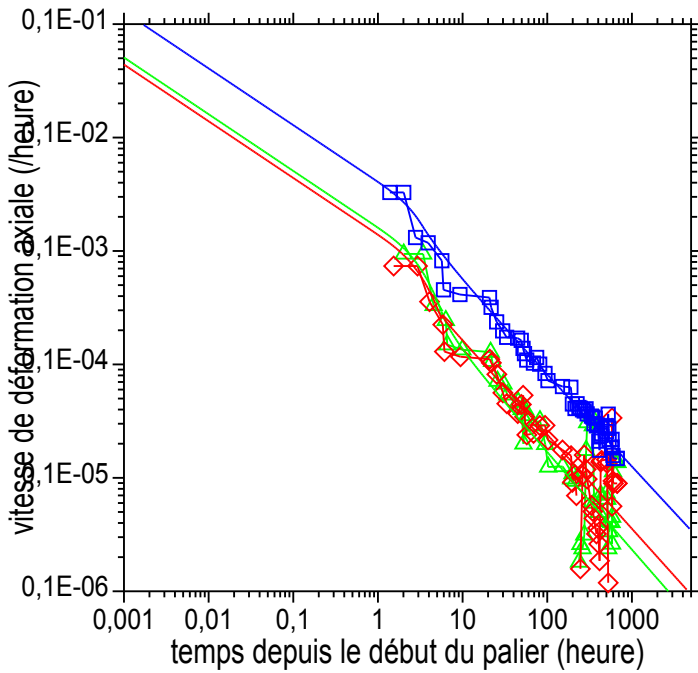
- △-△ ARB14 40 % qr
 $q = 795 \text{ kPa} / 1950 \text{ kPa} = 40,8 \%$
- ◇-◇ ARB12 60 % qr
 $q = 1174 \text{ kPa} / 2370 \text{ kPa} = 49,5 \%$
- ARB11 80 % qr
 $q = 1550 \text{ kPa} / 1920 \text{ kPa} = 80,7 \%$
- ARB13 comp uniaxiale préliminaire
- ×-× ARB14r comp uniaxiale après fluage
- γ-γ ARB12r comp uniaxiale après fluage
- *-* ARB11r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
E17
Marne légèrement gréseuse

AR2-05
32,00 - 33,00 m
ARB14



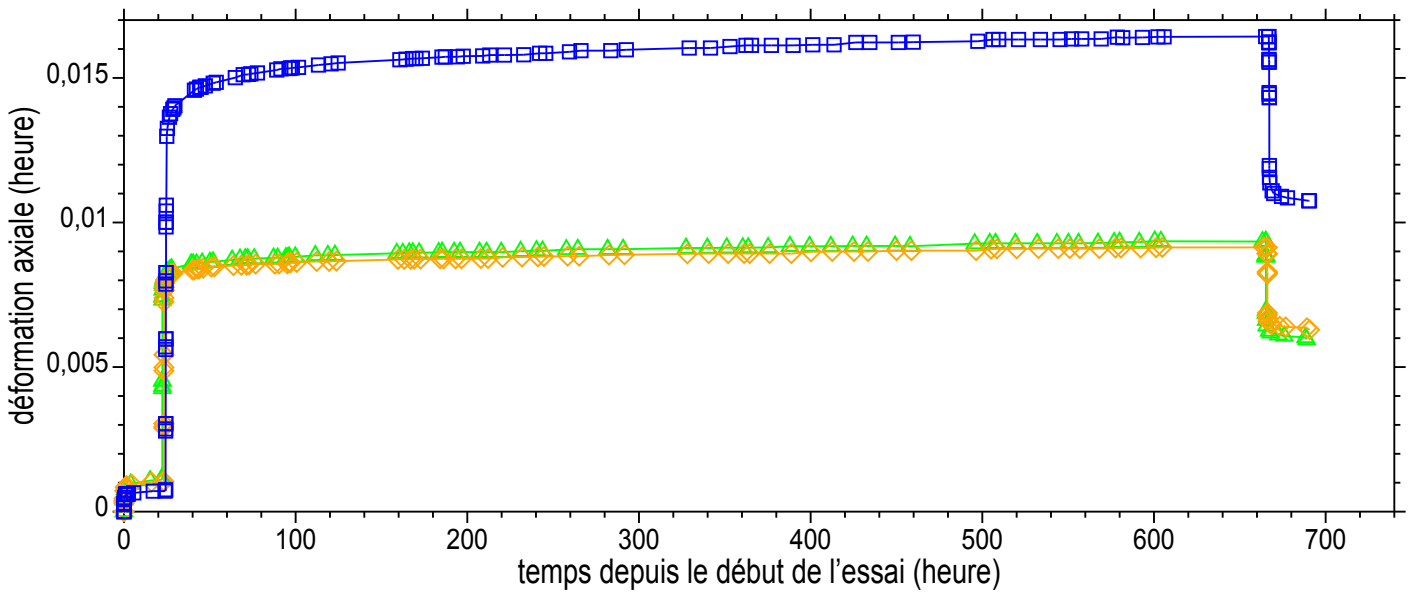
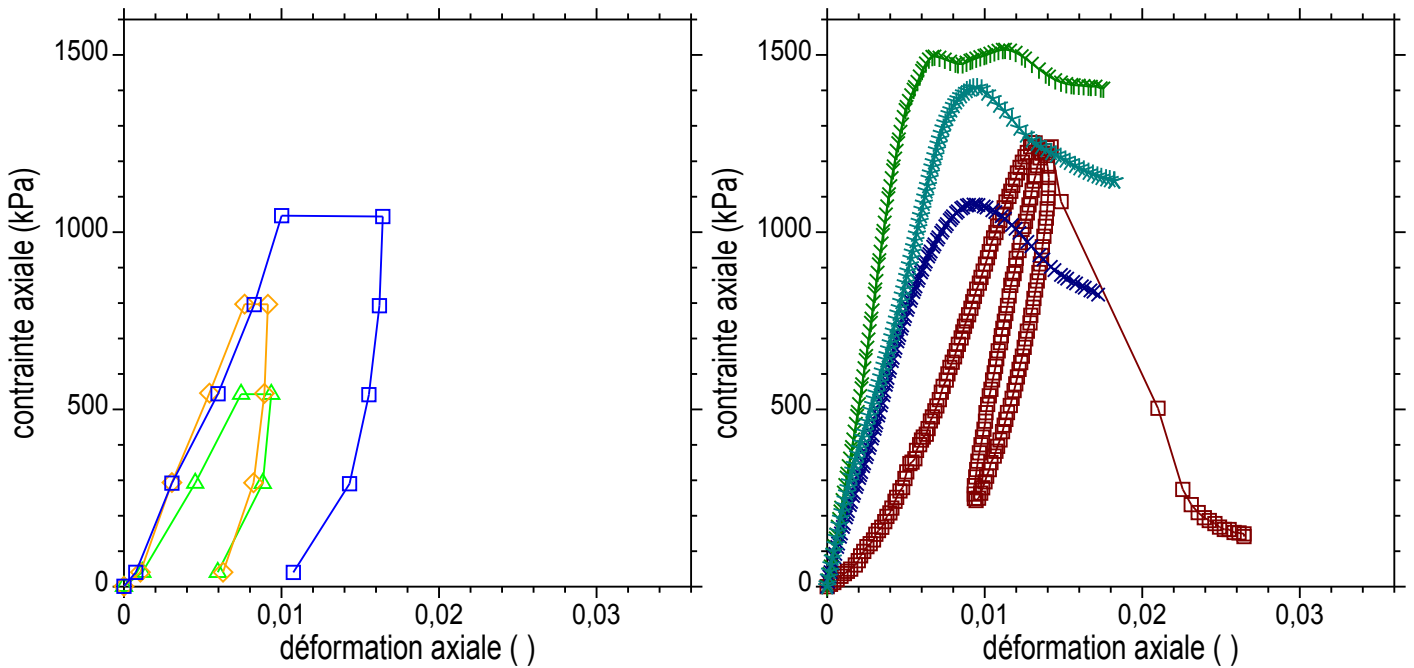
- △ ARB14 40 % qr
 $q = 795 \text{ kPa} / 1950 \text{ kPa} = 40,8 \%$
- ◇ ARB12 60 % qr
 $q = 1174 \text{ kPa} / 2370 \text{ kPa} = 49,5 \%$
- ARB11 80 % qr
 $q = 1550 \text{ kPa} / 1920 \text{ kPa} = 80,7 \%$

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
G13
Marne argileuse et nodules

AR3-06
66,68 - 67,66 m
ARB43



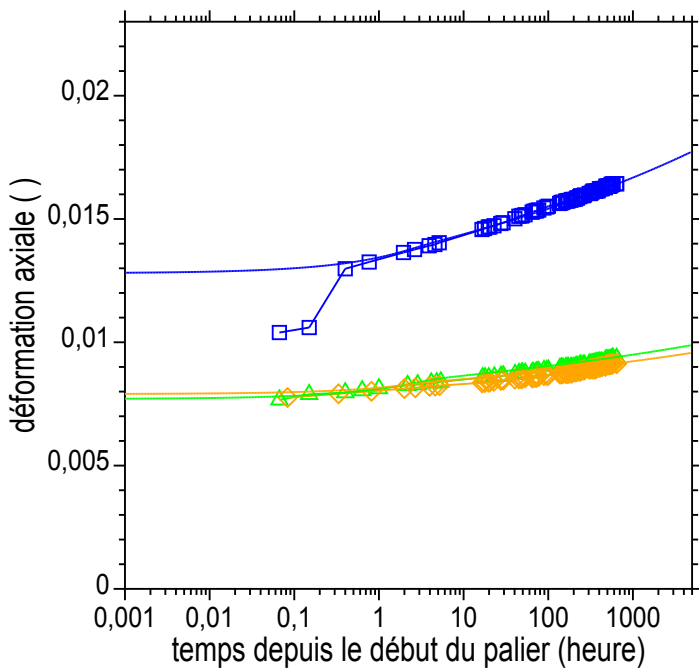
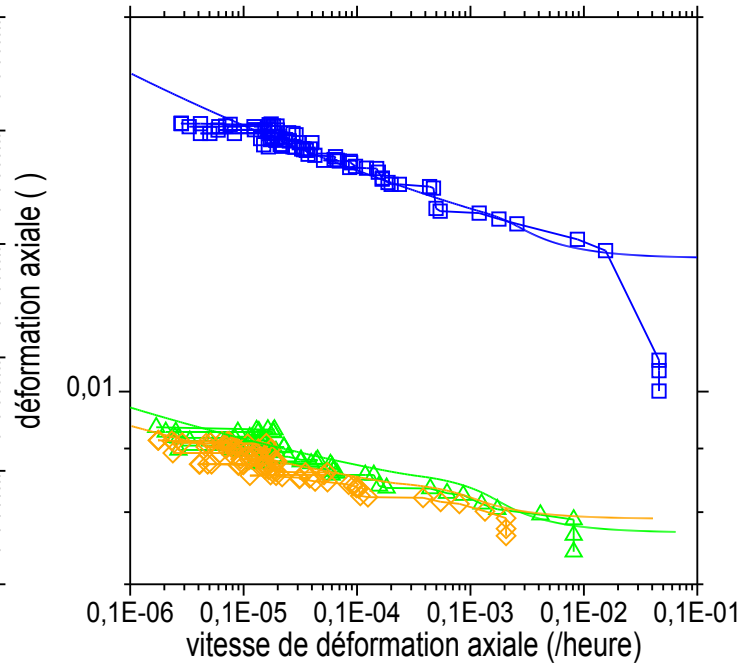
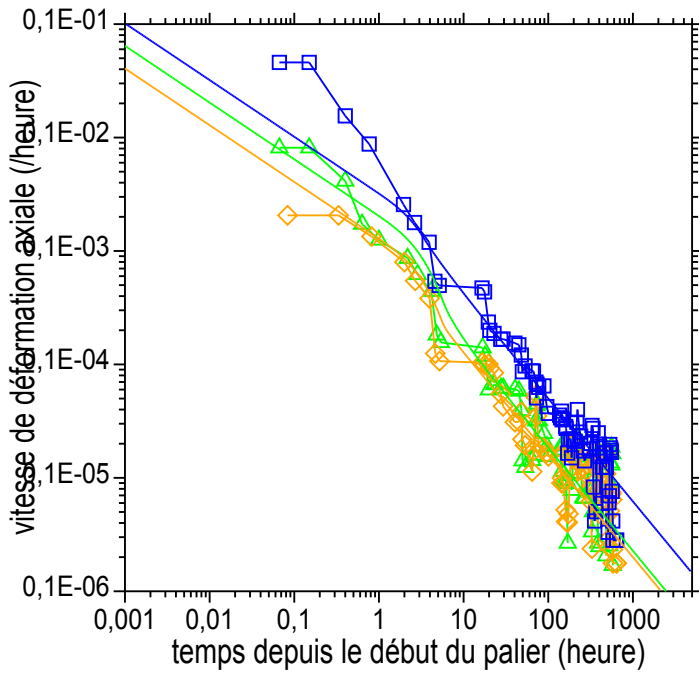
- △-△ ARB43 40 % qr
q = 543 kPa / 1081 kPa = 50,2 %
- ◇-◇ ARB42 60 % qr
q = 797 kPa / 1500 kPa = 53,1 %
- ARB41 80 % qr
q = 1047 kPa / 1405 kPa = 74,5 %
- ARB40 comp uniaxiale préliminaire
- ×-× ARB43r comp uniaxiale après fluage
- ∇-∇ ARB42r comp uniaxiale après fluage
- *-* ARB41r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G13
 Marne argileuse et nodules

AR3-06
 66,68 - 67,66 m
 ARB43



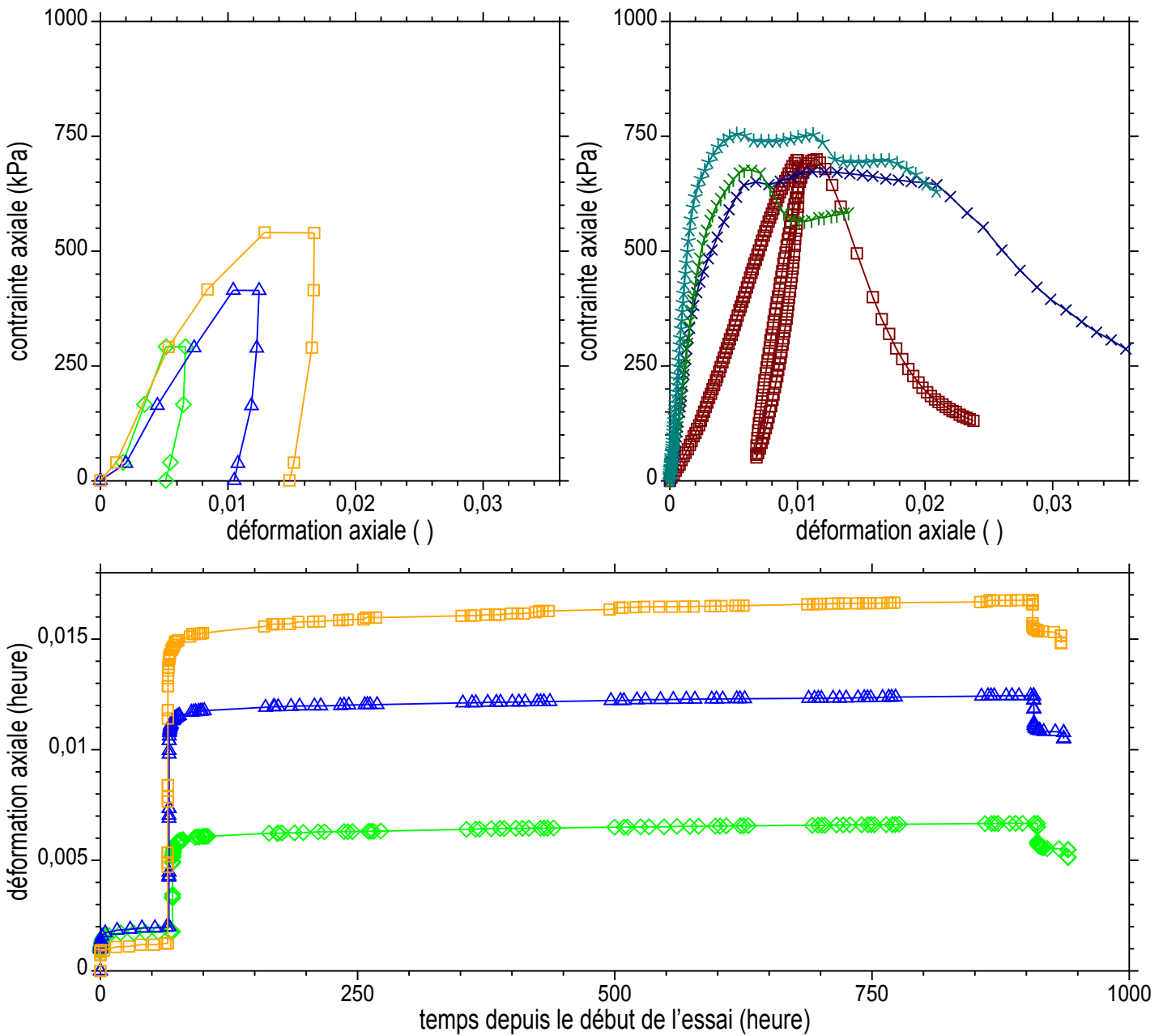
- △ ARB43 40 % qr
 $q = 543 \text{ kPa} / 1081 \text{ kPa} = 50,2 \%$
- ◇ ARB42 60 % qr
 $q = 797 \text{ kPa} / 1500 \text{ kPa} = 53,1 \%$
- ARB41 80 % qr
 $q = 1047 \text{ kPa} / 1405 \text{ kPa} = 74,5 \%$

Courbes déformation temps et vitesse de déformation.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
G16
Marne argileuse beige gris

AR1-06
99,35 - 100,29 m
ARB59



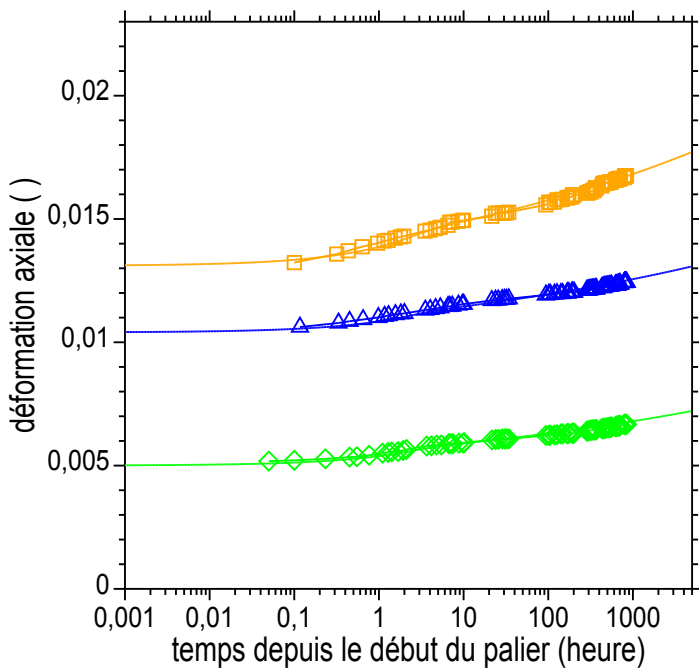
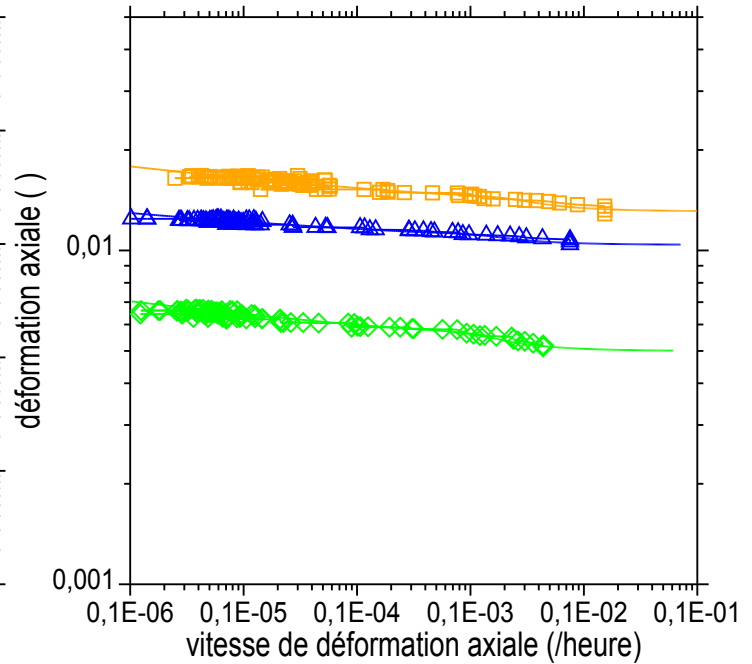
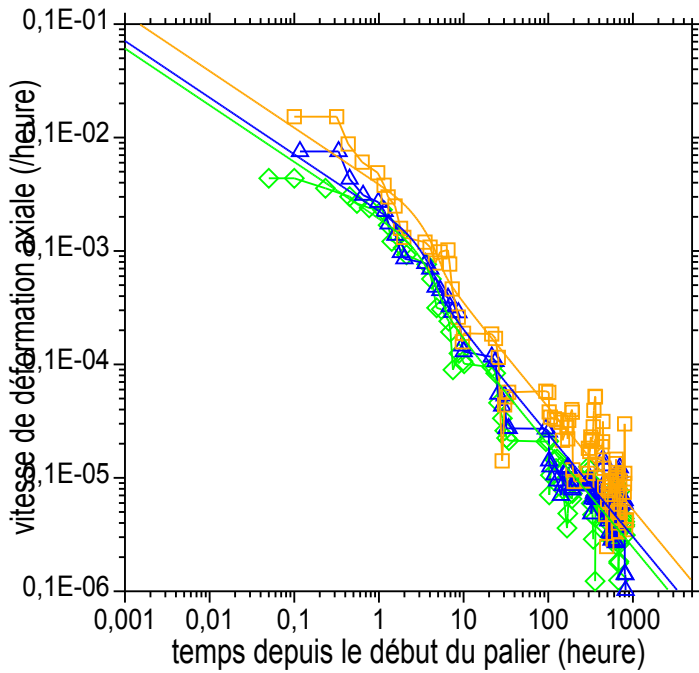
- ◇—◇ ARB59 40 % qr
q = 292 kPa / 673 kPa = 43,4 %
- △—△ ARB61 60 % qr
q = 415 kPa / 676 kPa = 61,4 %
- ARB62 80 % qr
q = 541 kPa / 754 kPa = 71,8 %
- ARB60 comp uniaxiale préliminaire
- ×—× ARB59r comp uniaxiale après fluage
- ▽—▽ ARB61r comp uniaxiale après fluage
- *—* ARB62r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G16
 Marne argileuse beige gris

AR1-06
 99,35 - 100,29 m
 ARB59



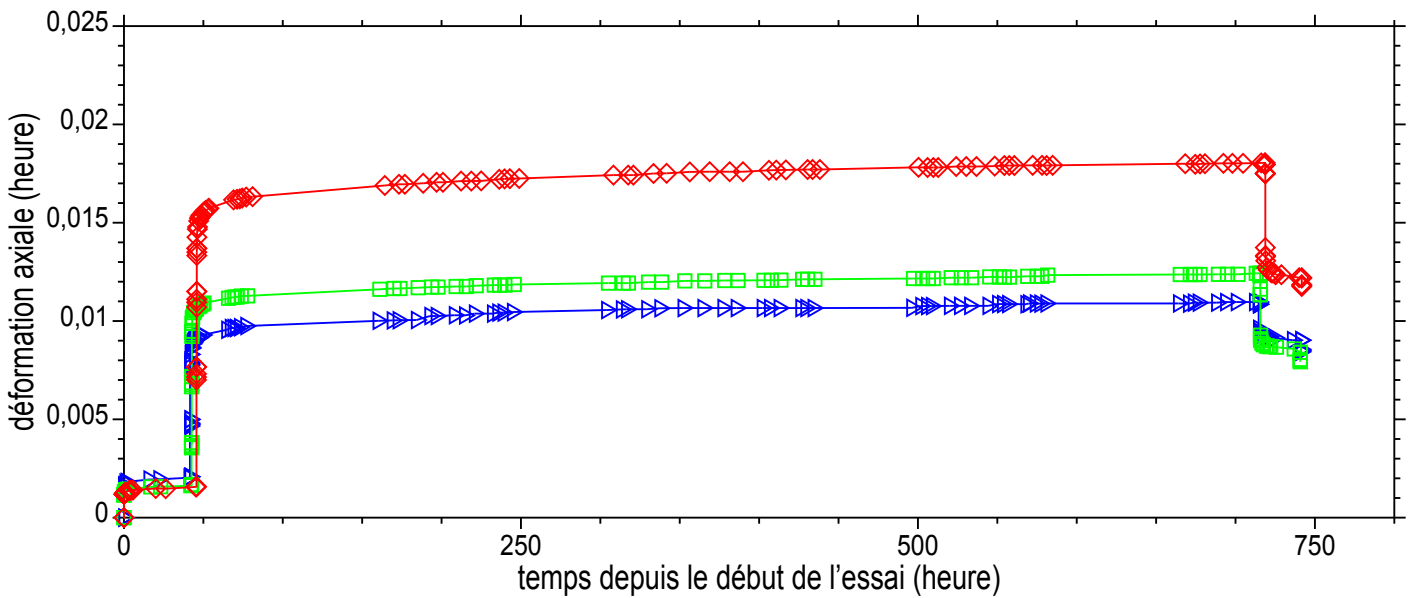
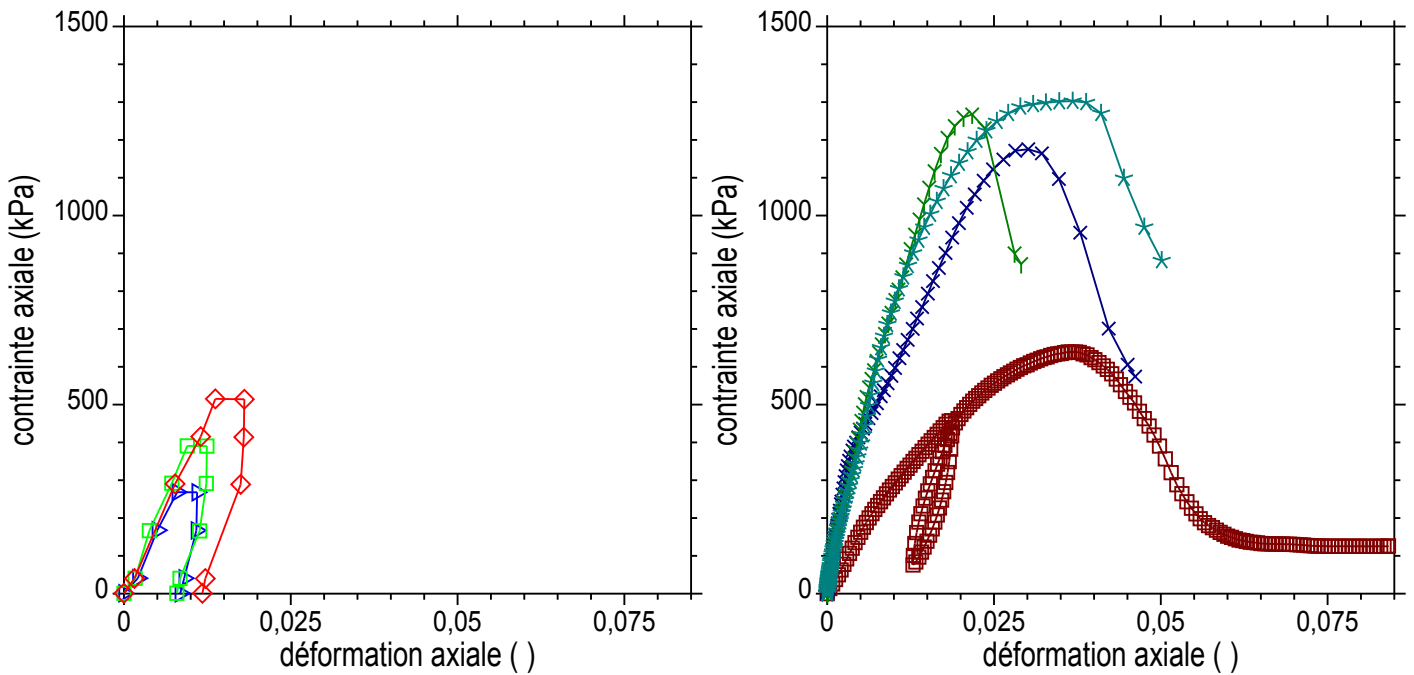
- ◇ ARB59 40 % qr
 $q = 292 \text{ kPa} / 673 \text{ kPa} = 43,4 \%$
- △ ARB61 60 % qr
 $q = 415 \text{ kPa} / 676 \text{ kPa} = 61,4 \%$
- ARB62 80 % qr
 $q = 541 \text{ kPa} / 754 \text{ kPa} = 71,8 \%$

Courbes déformation temps et vitesse de déformation .

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G6
 Marne beige foncée

AR1-06
 80,11 - 81,07 m
 ARB75



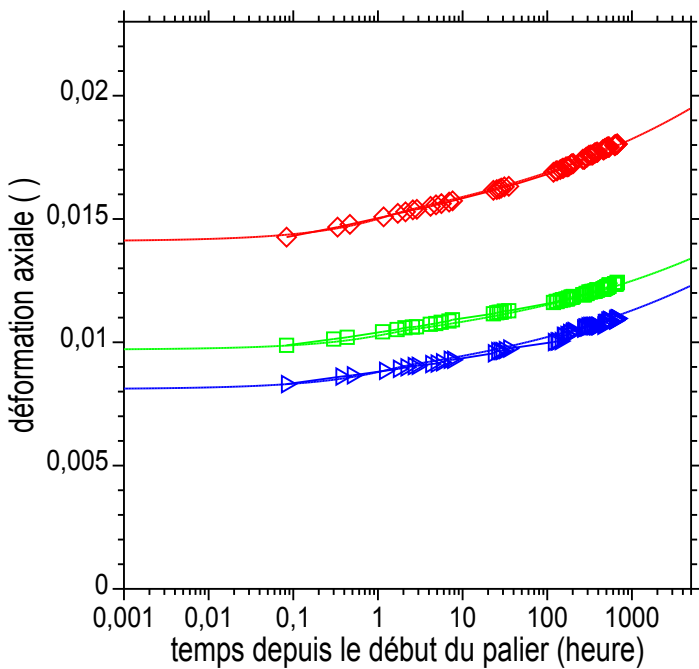
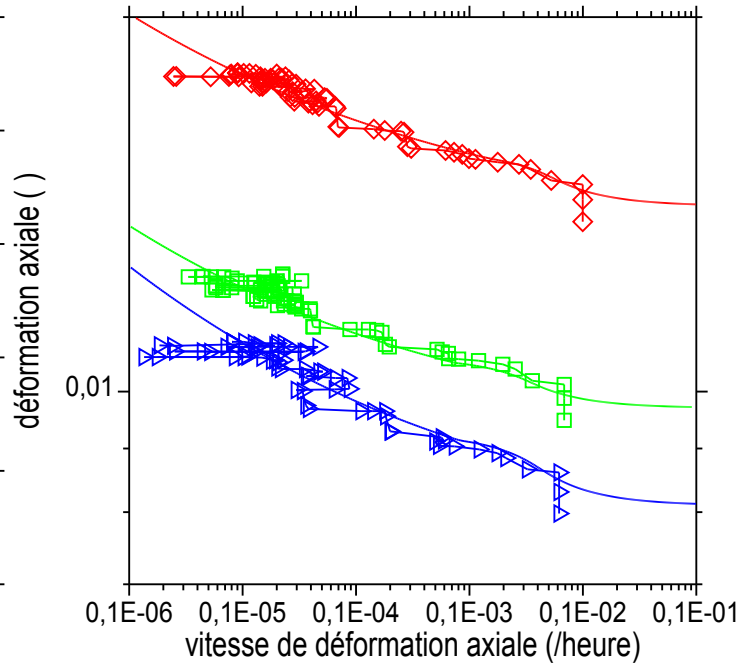
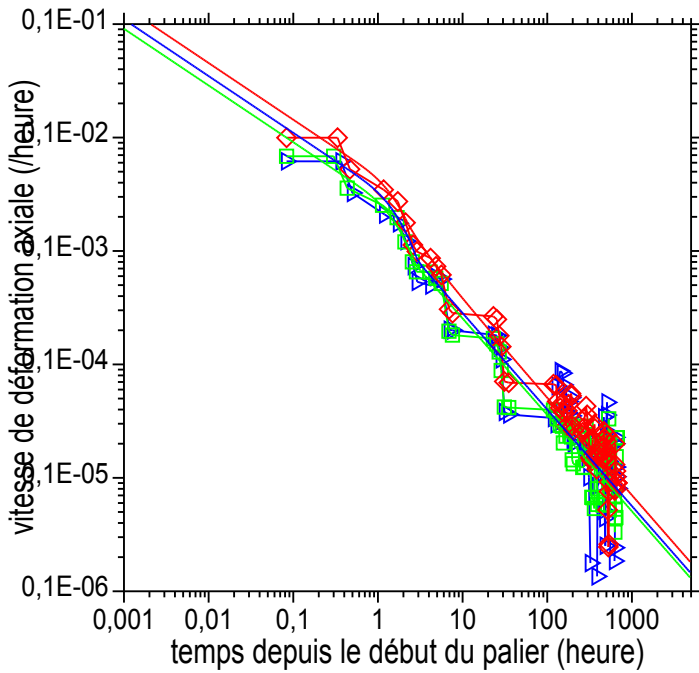
- ▶▶ ARB75 40 % qr
 $q = 268 \text{ kPa} / 1303 \text{ kPa} = 20,6 \%$
- ARB74 60 % qr
 $q = 391 \text{ kPa} / 1267 \text{ kPa} = 30,9 \%$
- ◇◇ ARB73 80 % qr
 $q = 515 \text{ kPa} / 1175 \text{ kPa} = 43,8 \%$
- ARB72 comp uniaxiale préliminaire
- ×× ARB75r comp uniaxiale après fluage
- ∇∇ ARB74r comp uniaxiale après fluage
- *∗ ARB73r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G6
 Marne beige foncée

AR1-06
 80,11 - 81,07 m
 ARB75



▶▶ ARB75 40 % qr
 $q = 268 \text{ kPa} / 1303 \text{ kPa} = 20,6 \%$

▶▶ ARB74 60 % qr
 $q = 391 \text{ kPa} / 1267 \text{ kPa} = 30,9 \%$

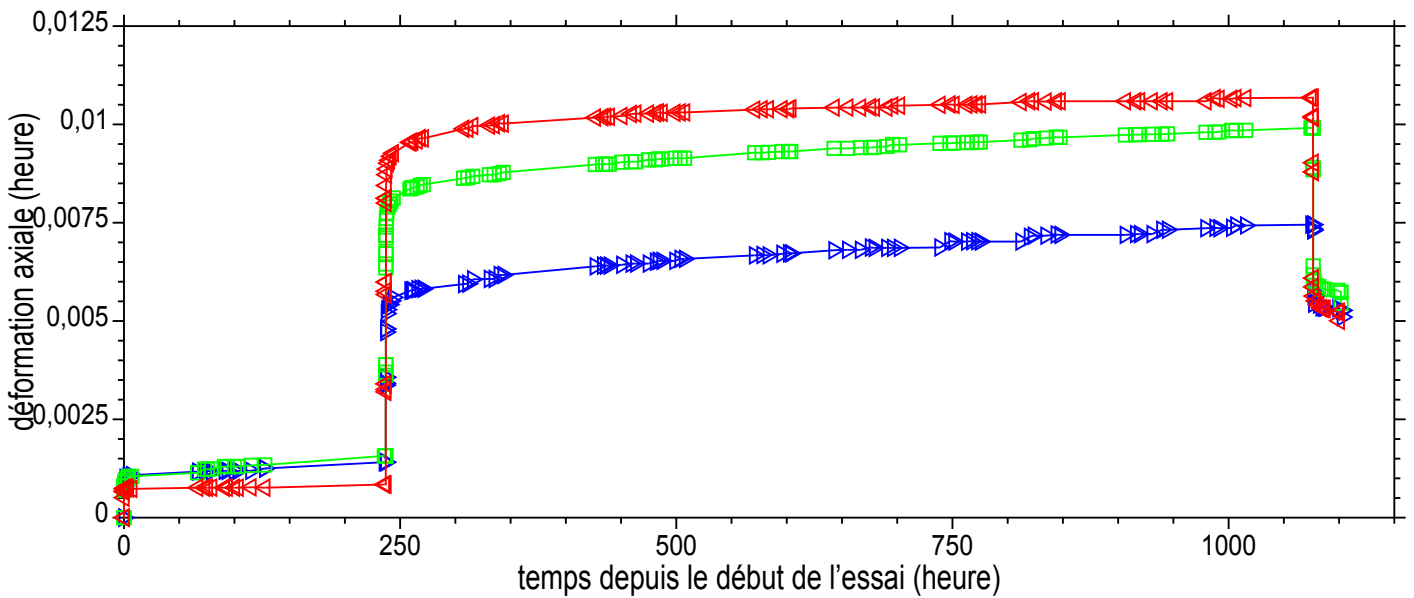
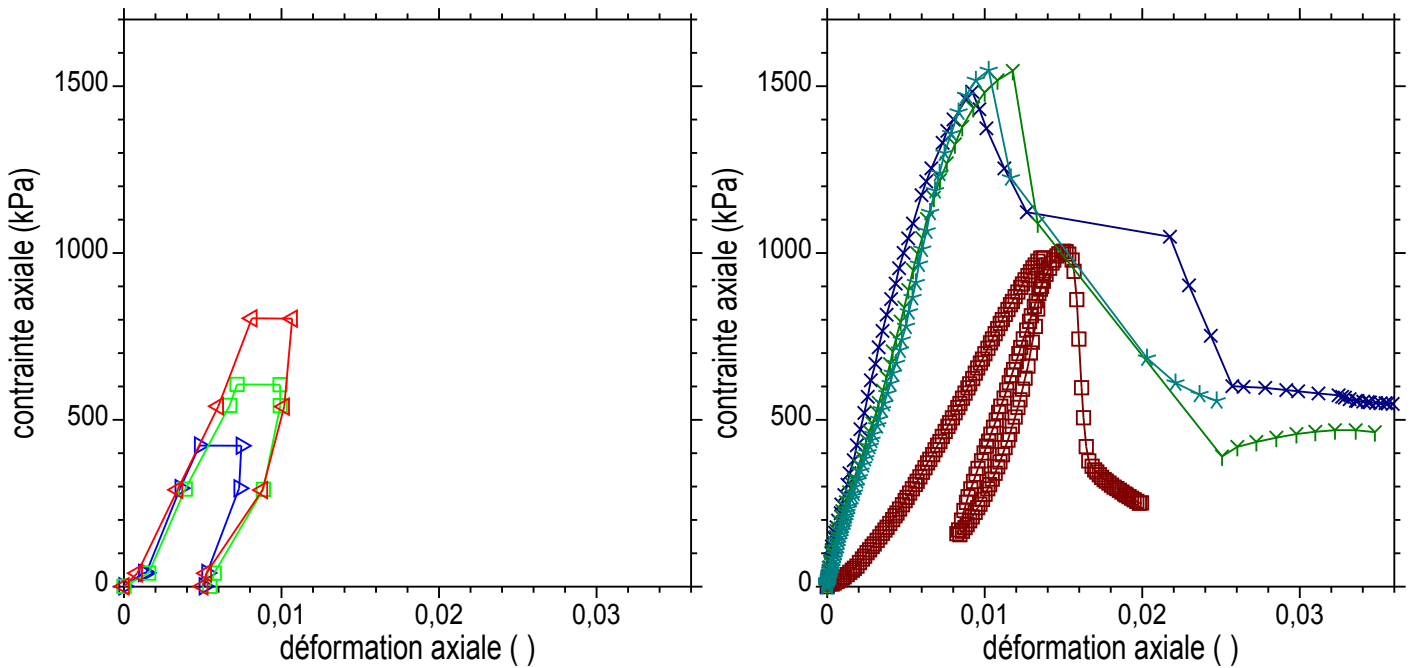
▶▶ ARB73 80 % qr
 $q = 515 \text{ kPa} / 1175 \text{ kPa} = 43,8 \%$

Courbes déformation temps et vitesse de déformation .

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G3
 Marne beige argileuse

AR4-06
 31,56 - 32,55 m
 ARB83



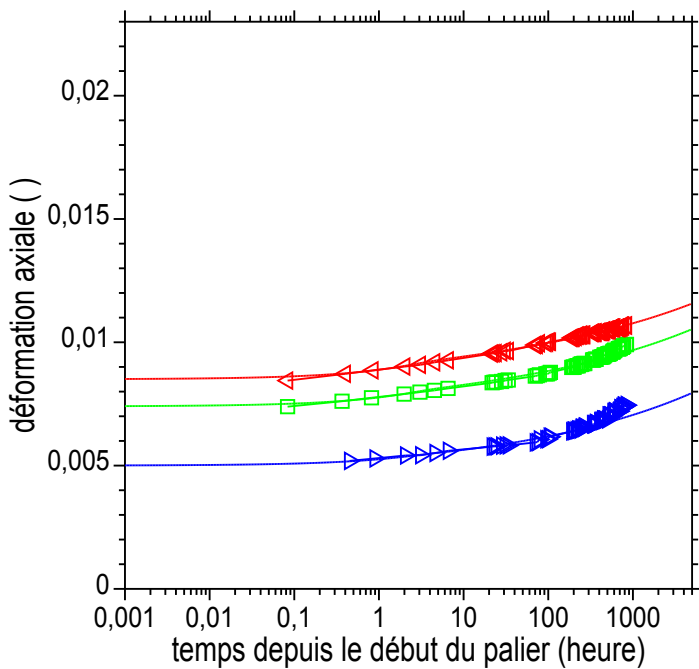
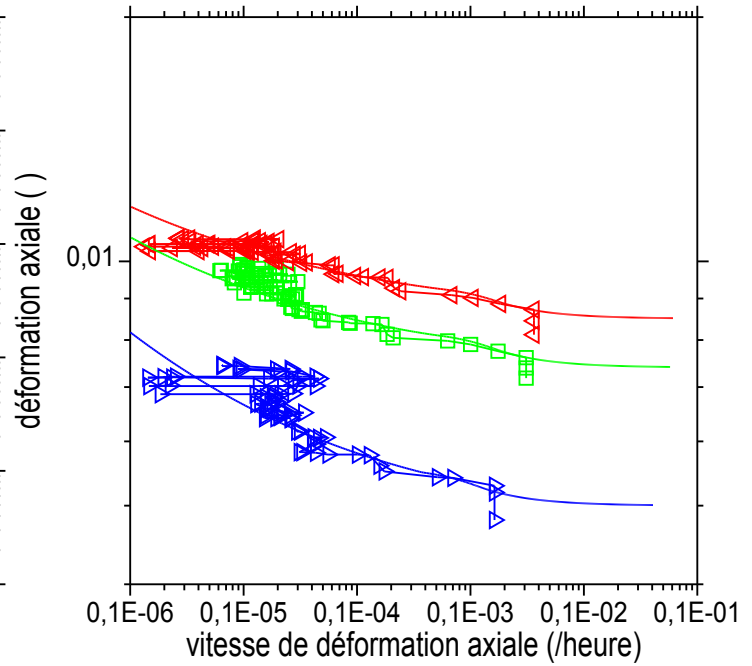
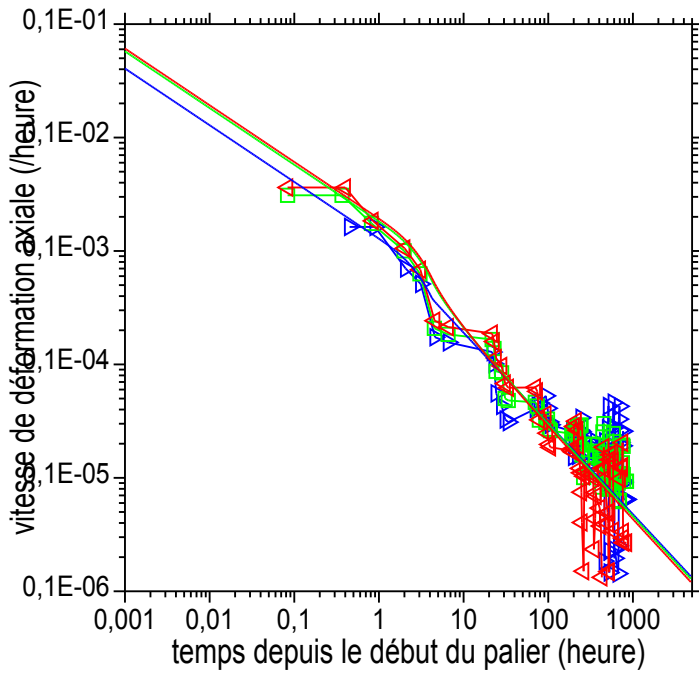
- ▷▷ ARB83 40 % qr
 $q = 423 \text{ kPa} / 1484 \text{ kPa} = 28,5 \%$
- ◻◻ ARB82 60 % qr
 $q = 606 \text{ kPa} / 1546 \text{ kPa} = 39,2 \%$
- ◁◁ ARB81 80 % qr
 $q = 804 \text{ kPa} / 1548 \text{ kPa} = 52,0 \%$
- ◻◻ ARB80 comp uniaxiale préliminaire
- ×× ARB83r comp uniaxiale après fluage
- ∟∟ ARB82r comp uniaxiale après fluage
- ∗∗ ARB81r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
G3
Marne beige argileuse

AR4-06
31,56 - 32,55 m
ARB83



▶▶ ARB83 40 % qr
 $q = 423 \text{ kPa} / 1484 \text{ kPa} = 28,5 \%$

◻◻ ARB82 60 % qr
 $q = 606 \text{ kPa} / 1546 \text{ kPa} = 39,2 \%$

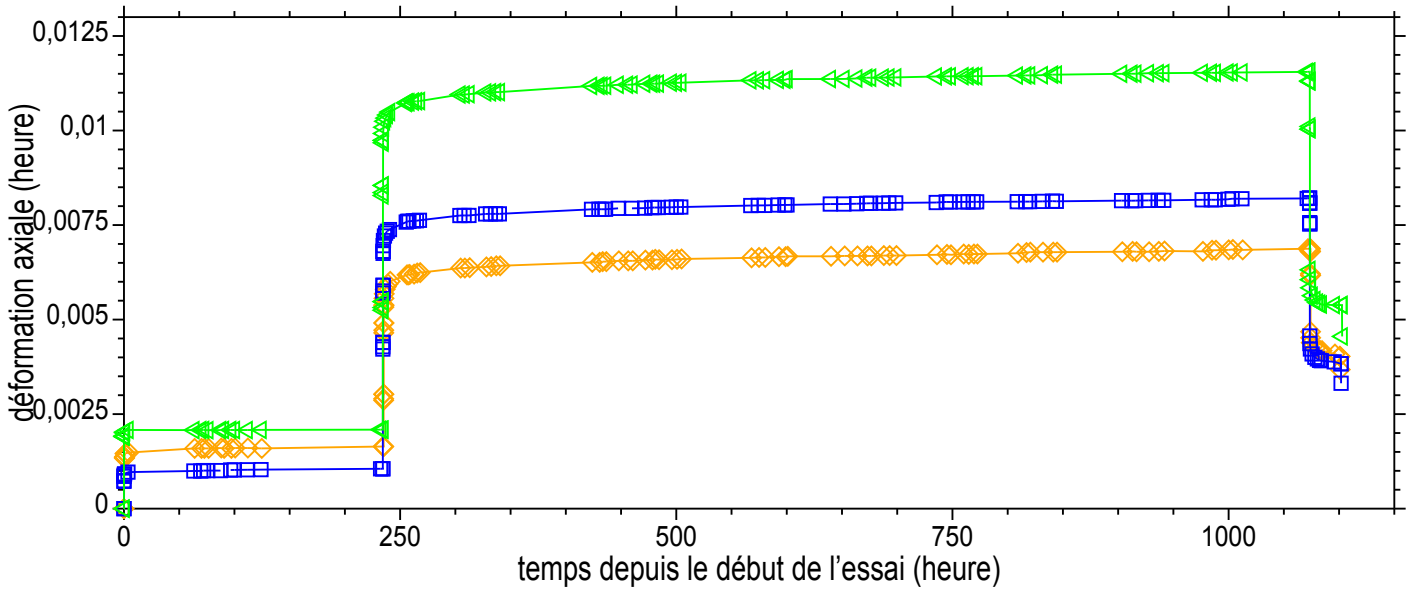
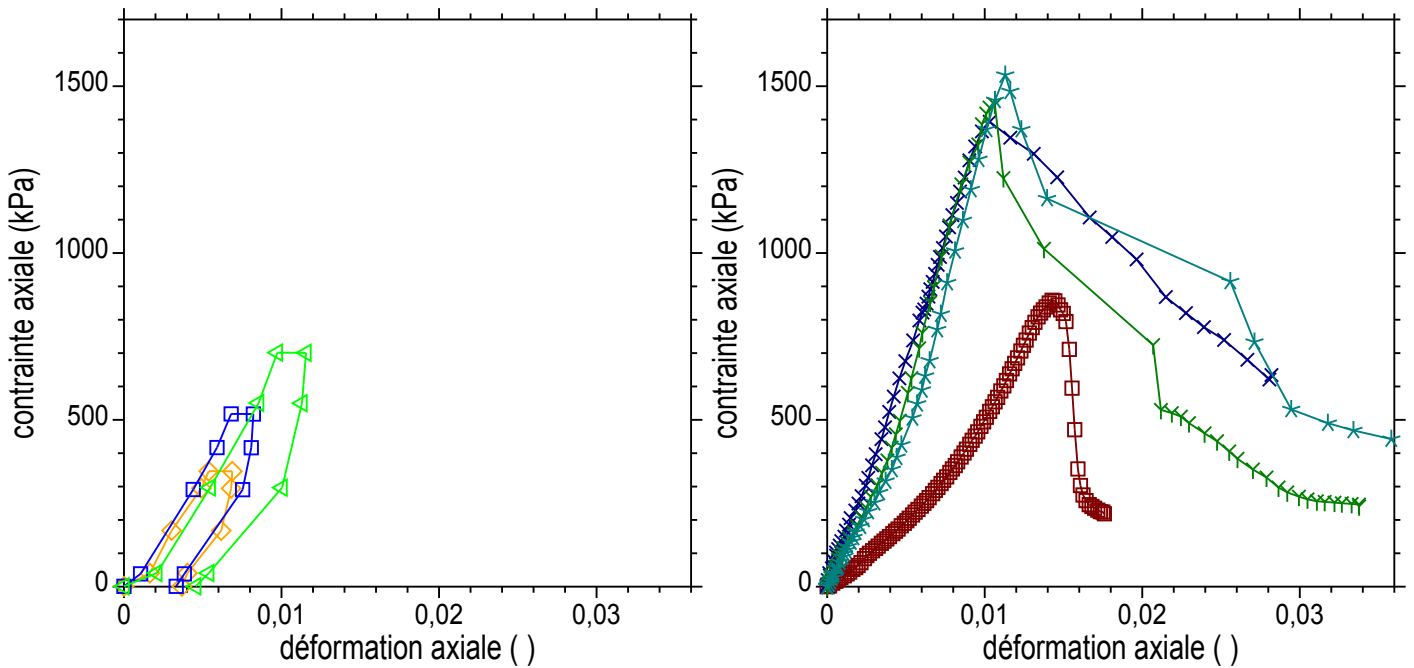
◀◀ ARB81 80 % qr
 $q = 804 \text{ kPa} / 1548 \text{ kPa} = 52,0 \%$

Courbes déformation temps et vitesse de déformation .

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
G10
Marne beige silteuse

AR4-06
55,45 - 56,42 m
ARB85



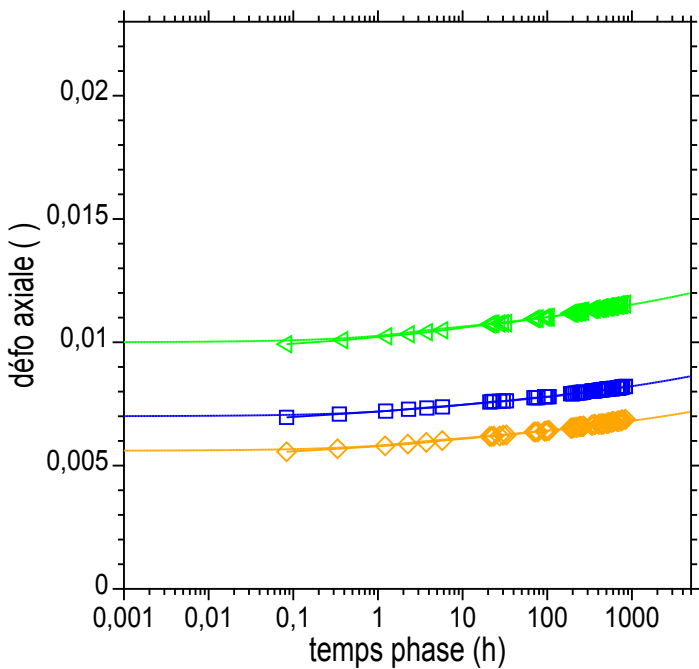
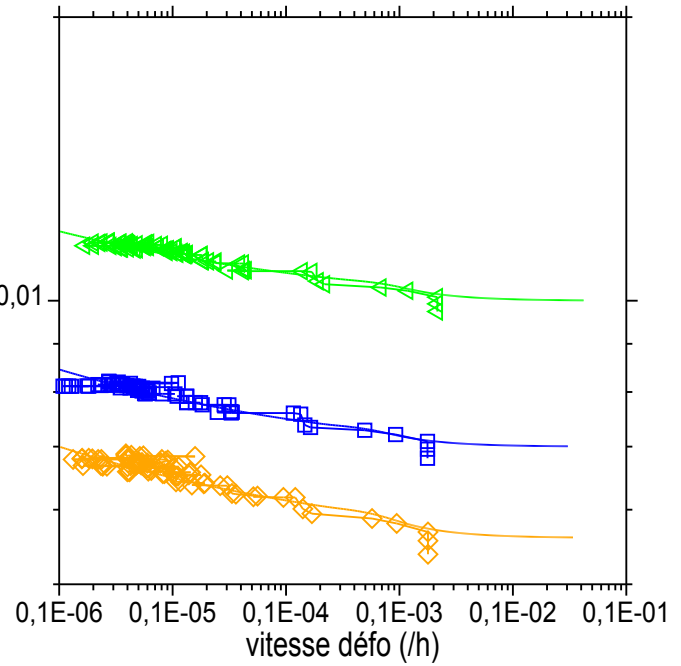
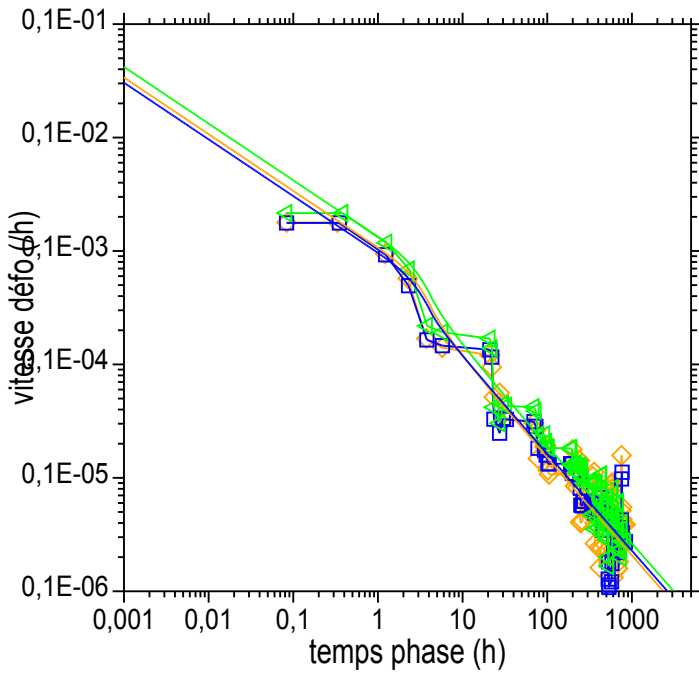
- ◇—◇ ARB85 40 % qr
q = 346 kPa / 1394 kPa = 24,8 %
- ARB87 60 % qr
q = 518 kPa / 1445 kPa = 35,8 %
- ◁—▷ ARB86 80 % qr
q = 701 kPa / 1534 kPa = 45,7 %
- ARB84 comp uniaxiale préliminaire
- ×—× ARB85r comp uniaxiale après fluage
- ∟—∟ ARB87r comp uniaxiale après fluage
- *—* ARB86r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G10
 Marne beige silteuse

AR4-06
 55,45 - 56,42 m
 ARB85



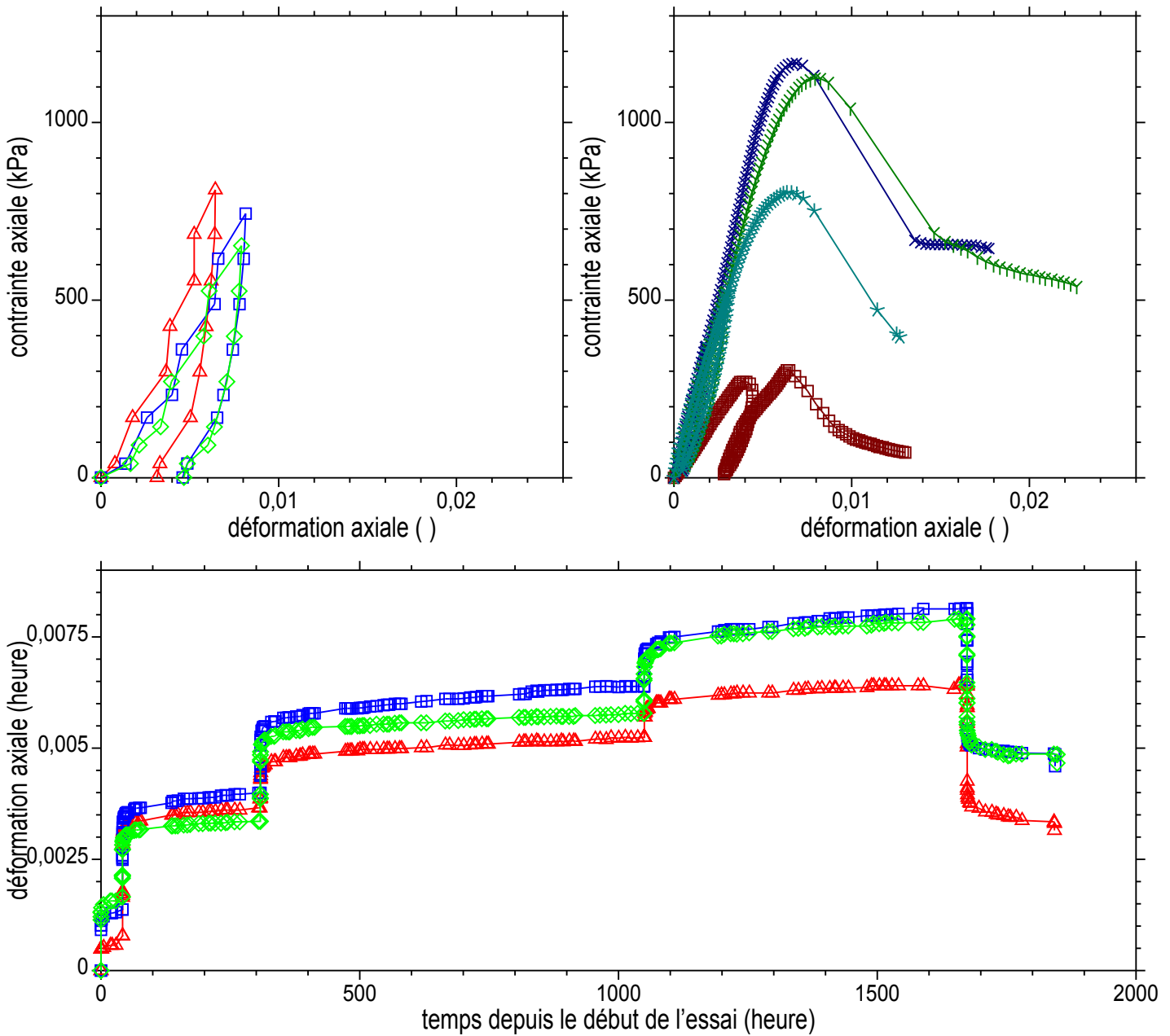
- ◇ ARB85 40 % qr
 $q = 346 \text{ kPa} / 1394 \text{ kPa} = 24,8 \%$
- ARB87 60 % qr
 $q = 518 \text{ kPa} / 1445 \text{ kPa} = 35,8 \%$
- ◀ ARB86 80 % qr
 $q = 701 \text{ kPa} / 1534 \text{ kPa} = 45,7 \%$

Courbes déformation temps et vitesse de déformation .

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
E9
Marne beige marron

AR5-07
54,05 - 55,00 m
TAR01



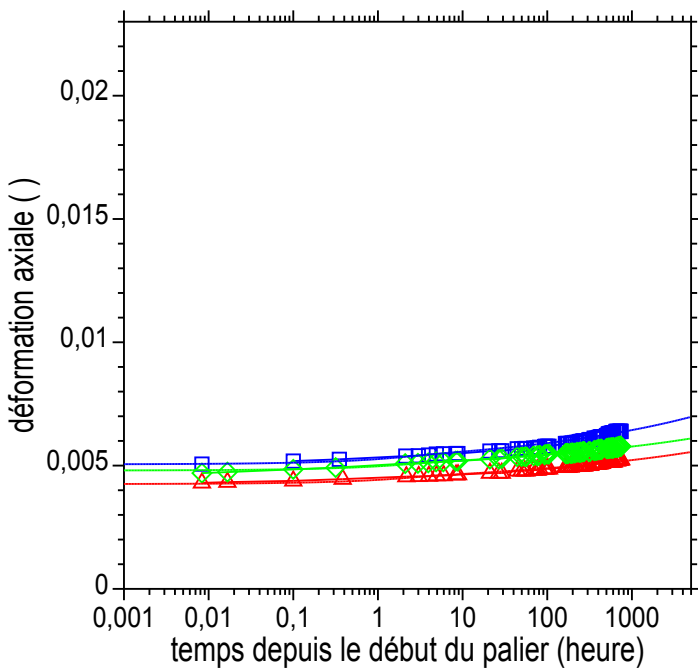
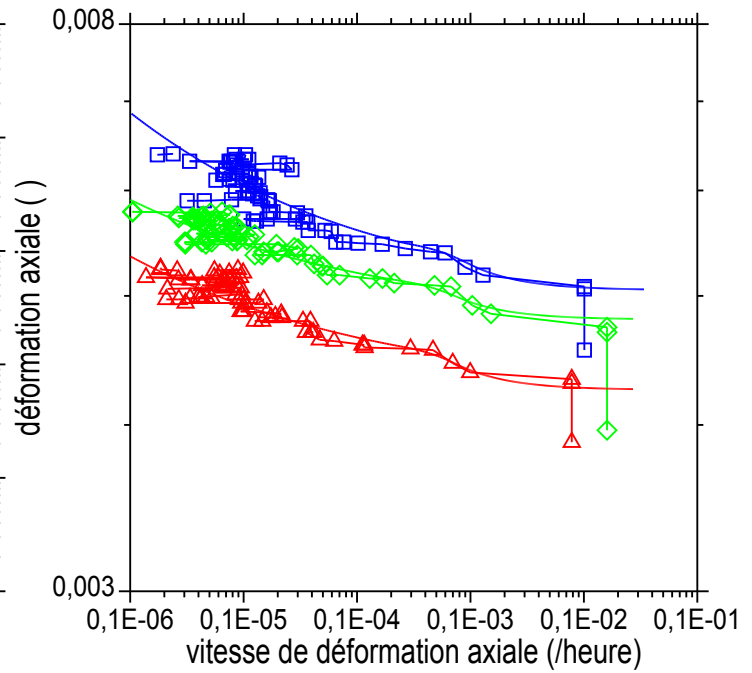
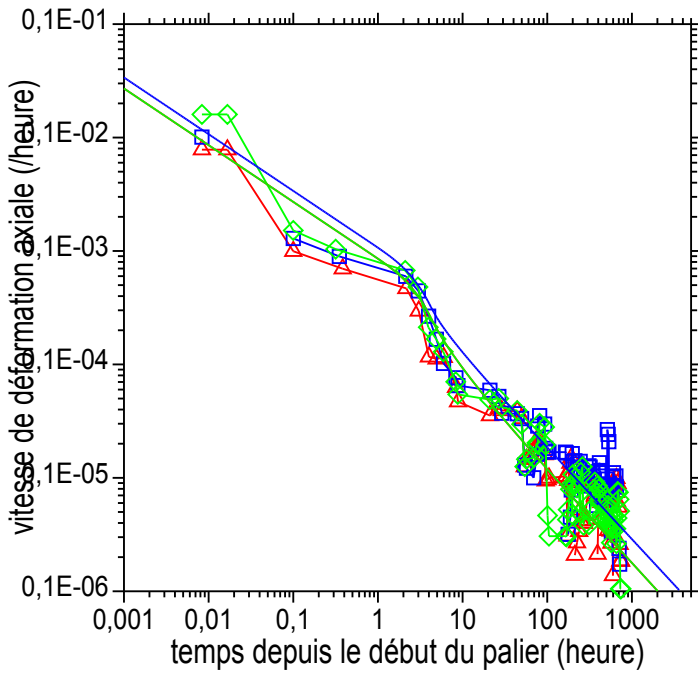
- △-△ TAR01 60 % qr
q = 813 kPa / 1164 kPa = 70,0 %
- TAR02 60 % qr
q = 746 kPa / 1124 kPa = 66,0 %
- ◇-◇ TAR03 80 % qr
q = 655 kPa / 801 kPa = 82,0 %
- TAR04 comp uniaxiale préliminaire
- ×-× TAR01r comp uniaxiale après fluage
- ∩-∩ TAR02r comp uniaxiale après fluage
- *-* TAR03r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 E9
 Marne beige marron

AR5-07
 54,05 - 55,00 m
 TAR01-6



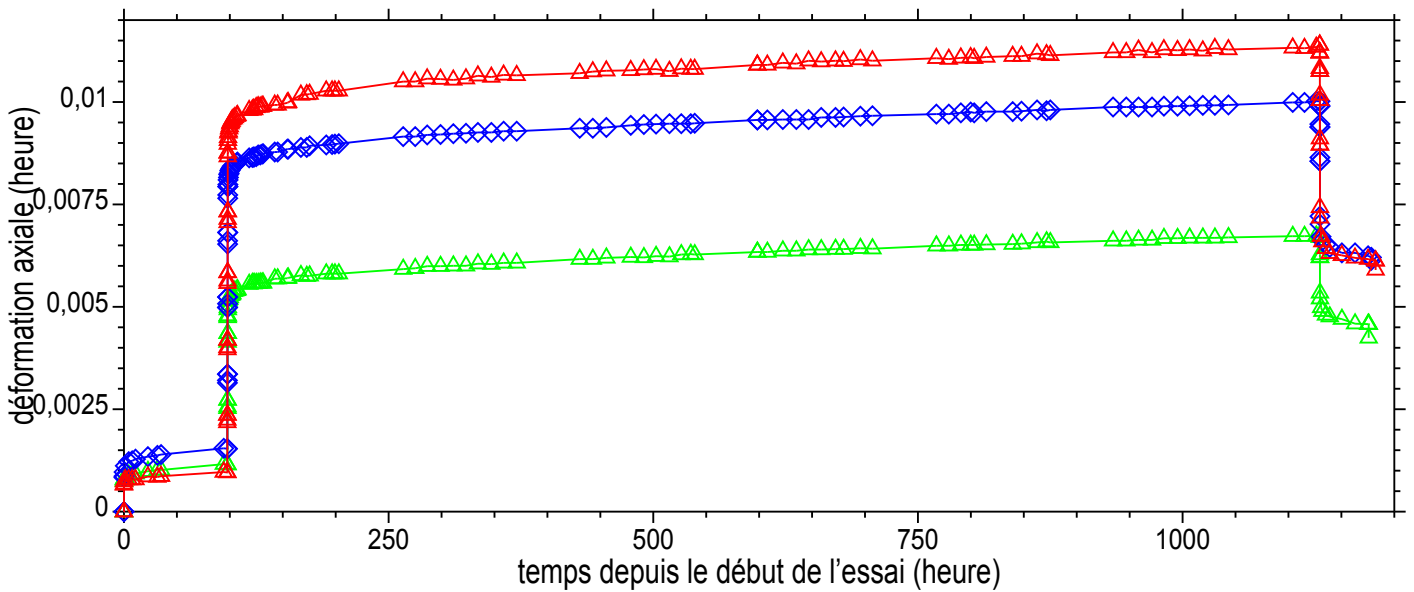
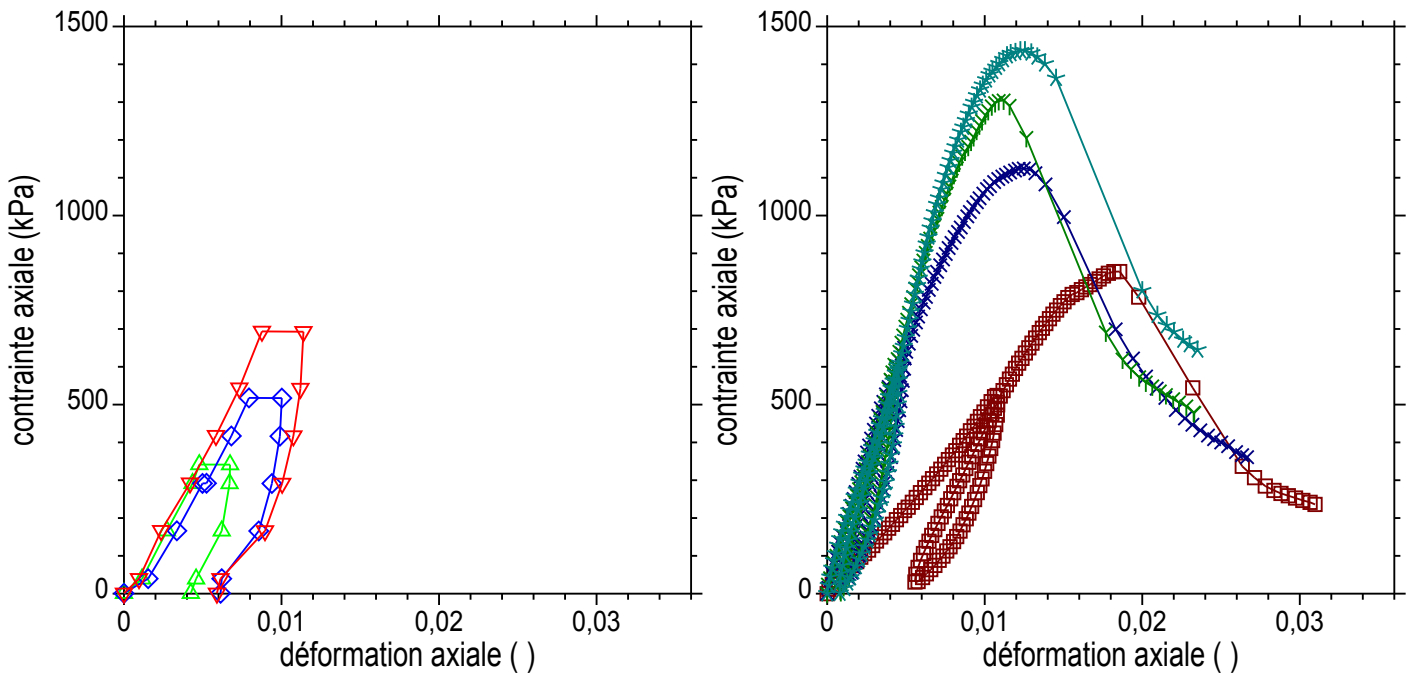
- △—△ TAR01-6 60 % qr
 q = 556 kPa = 48 %
- TAR02-6 60 % qr
 q = 490 kPa = 44 %
- ◇—◇ TAR03-6 60 % qr
 q = 400 kPa = 50 %

Courbes déformation temps et vitesse de déformation.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
E13
Marne argileuse beige

AR6-07
58,15 - 59,10 m
TAR27



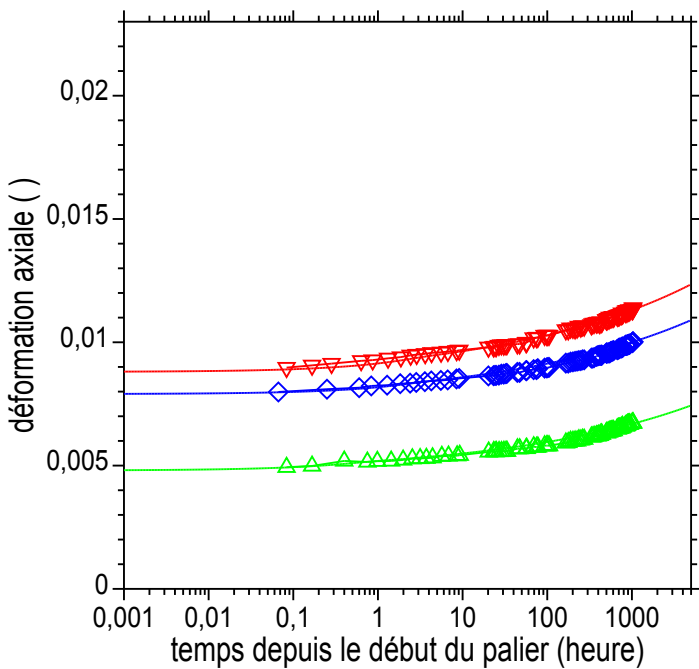
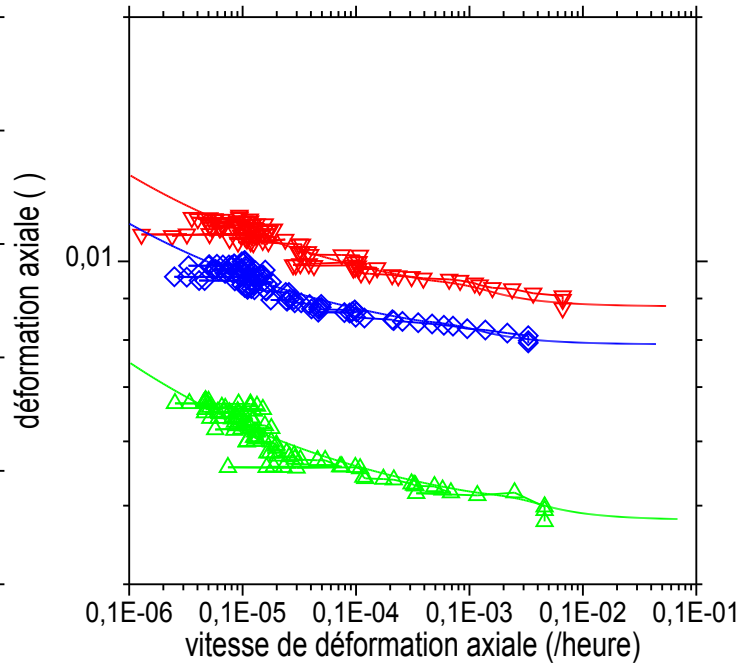
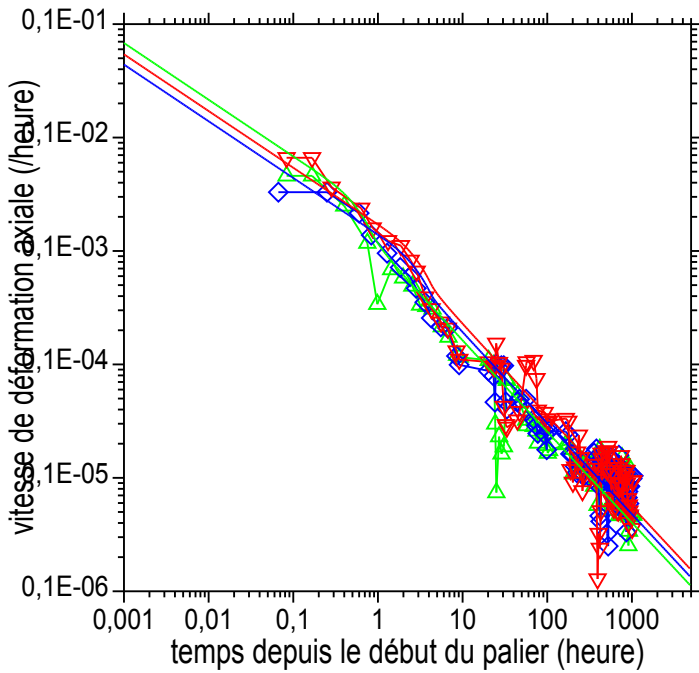
- △-△ TAR27 40 % qr
q = 341 kPa / 1124 kPa = 30,3 %
- ◇-◇ TAR28 60 % qr
q = 517 kPa / 1300 kPa = 39,8 %
- ▽-▽ TAR29 80 % qr
q = 693 kPa / 1435 kPa = 48,3 %
- TAR30 comp uniaxiale préliminaire
- ×-× TAR27r comp uniaxiale après fluage
- ∇-∇ TAR28r comp uniaxiale après fluage
- *-* TAR29r comp uniaxiale après fluage

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 E13
 Marne argileuse beige

AR6-07
 58,15 - 59,10 m
 TAR27



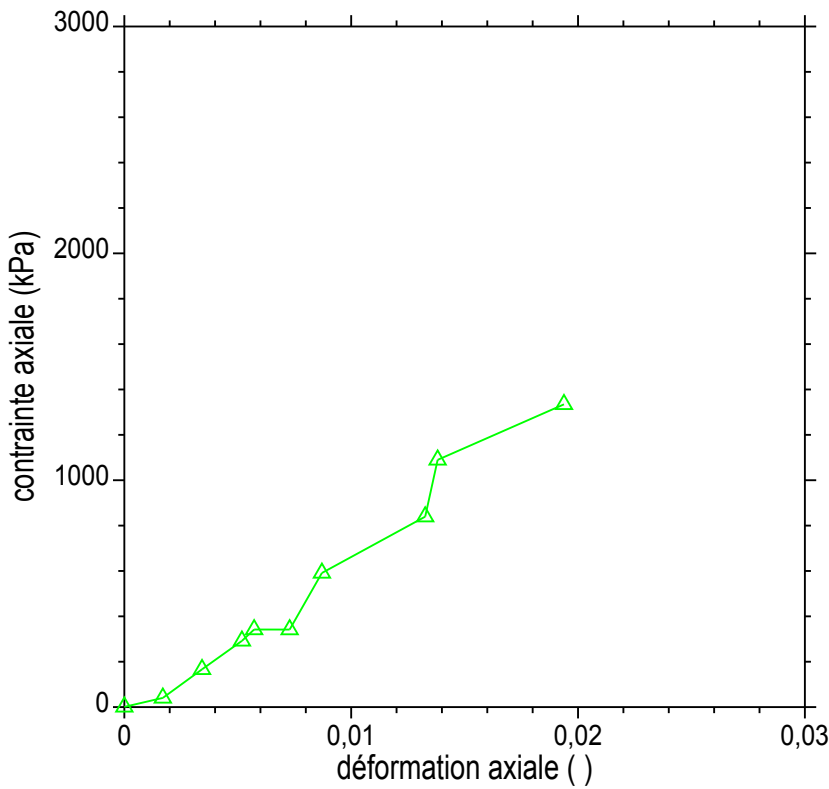
- △ TAR27 40 % qr
 $q = 341 \text{ kPa} / 1124 \text{ kPa} = 30,3 \%$
- ◇ TAR28 60 % qr
 $q = 517 \text{ kPa} / 1300 \text{ kPa} = 39,8 \%$
- ▽ TAR29 80 % qr
 $q = 693 \text{ kPa} / 1435 \text{ kPa} = 48,3 \%$

Courbes déformation temps et vitesse de déformation.

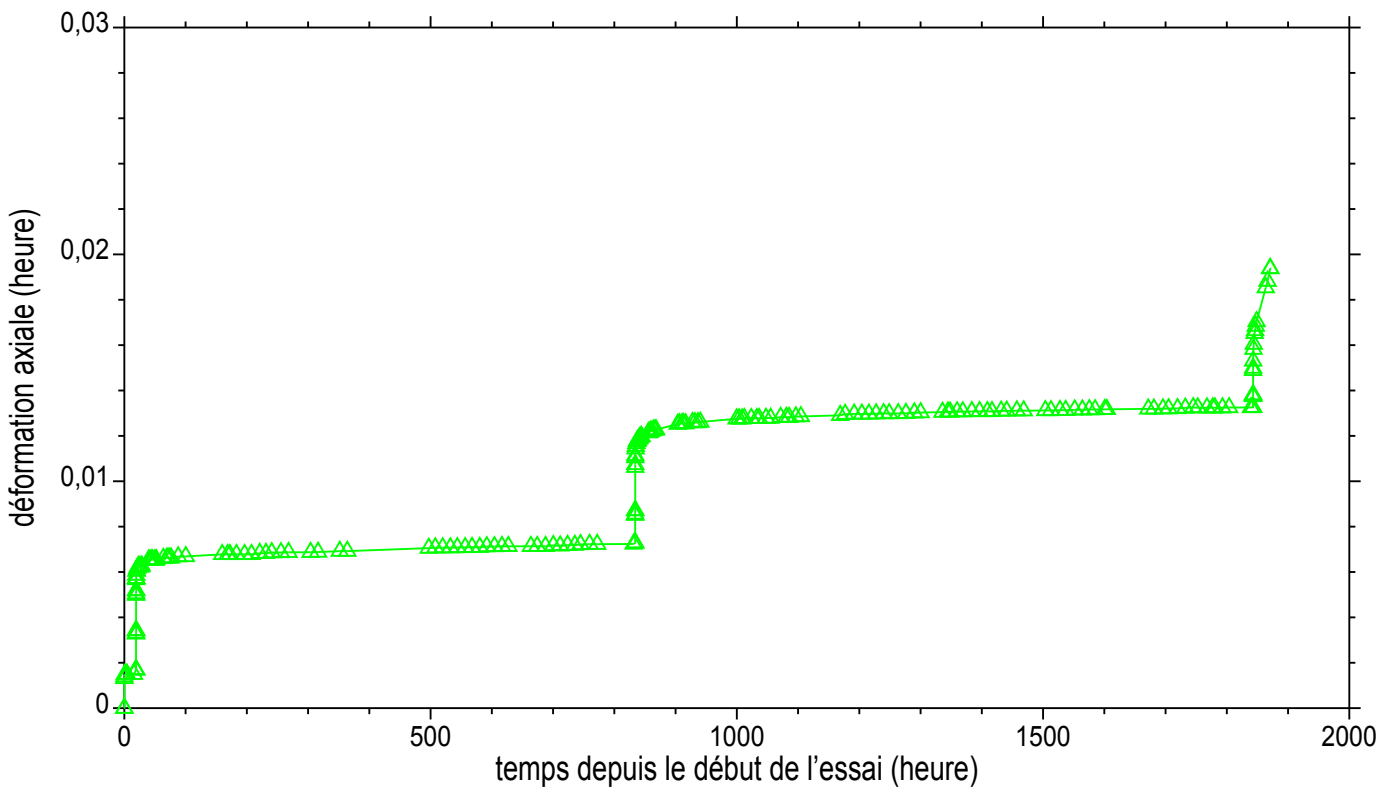
Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
G11
Marne argileuse beige

AR4-06
56,42 - 57,34 m
BUS16



△—△ BUS16 fluage en 3 paliers
06 q = 342 kPa
08 q = 842 kPa
10 q = 1336 kPa rupture

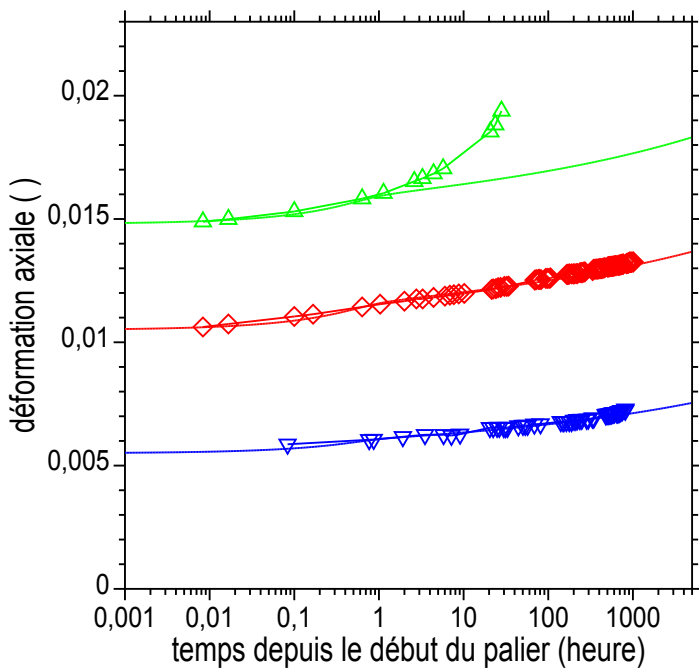
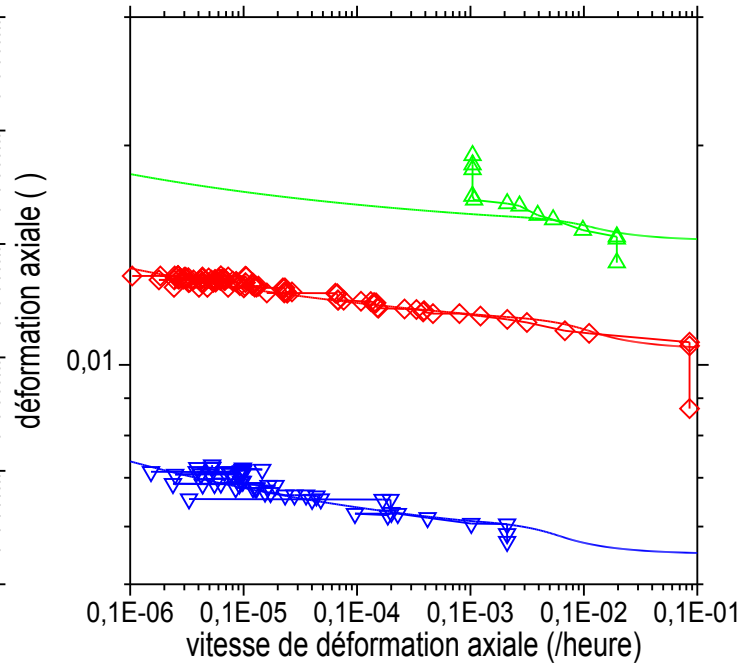
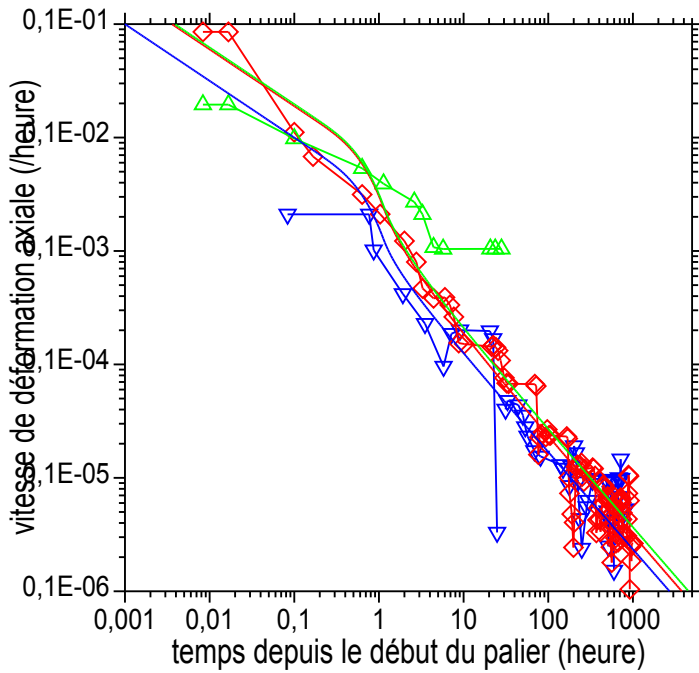


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 G11
 Marne argileuse beige

AR4-06
 56,42 - 57,34 m
 BUS16



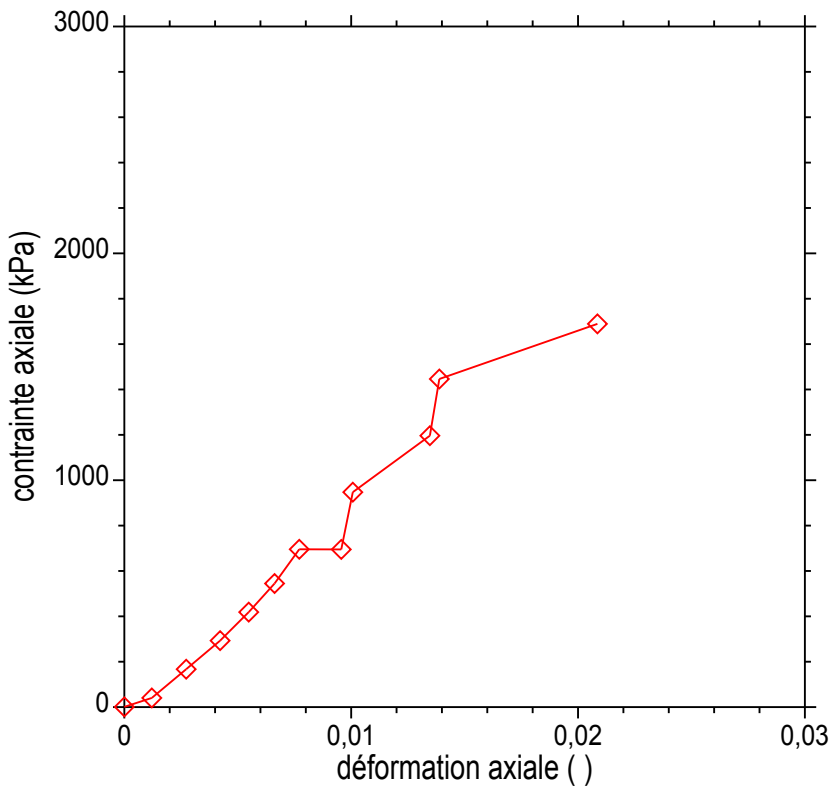
- ▽ BUS16 06 q = 342 kPa
- ◇ BUS16 08 q = 842 kPa
- △ BUS16 10 q = 1336 kPa rupture

Courbes vitesse de déformation et déformation temps.

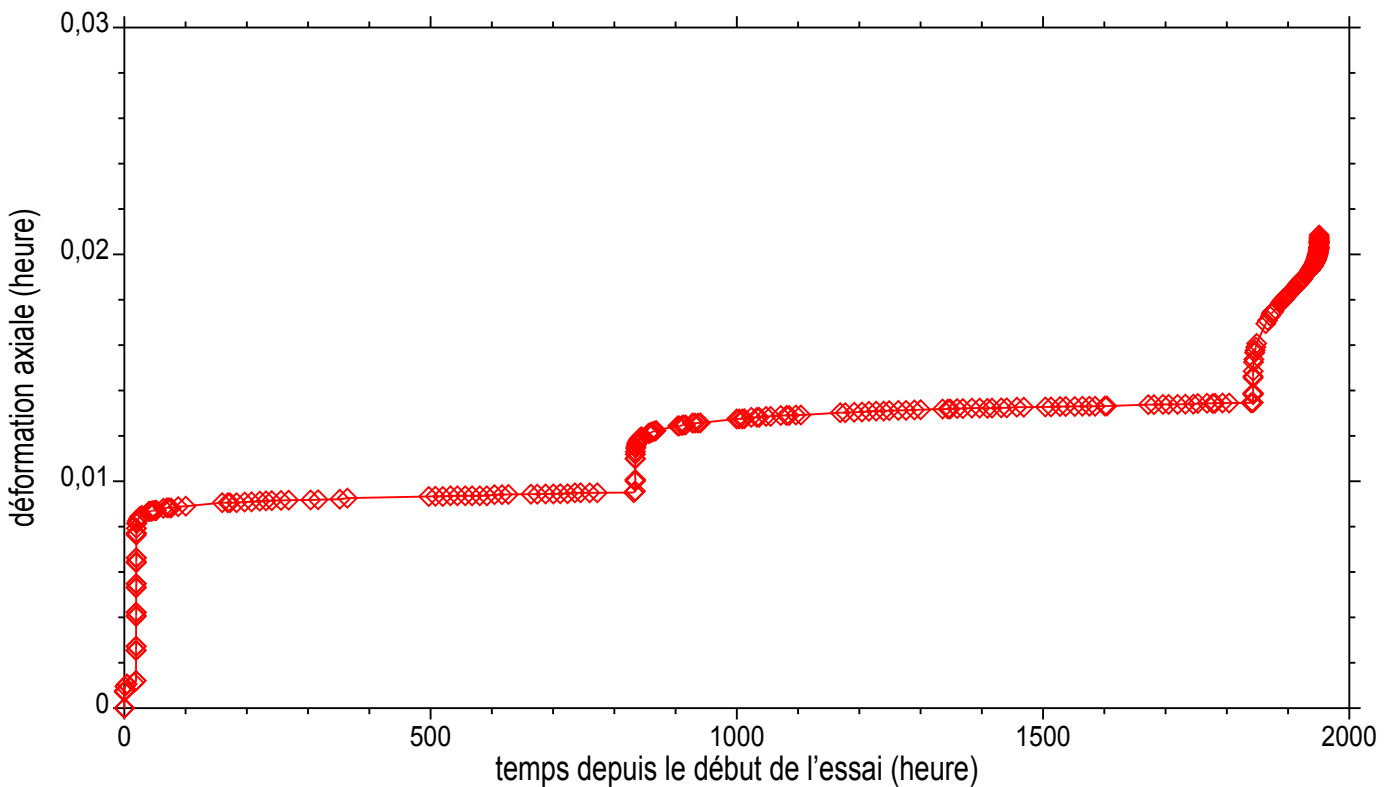
Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
E12
Marne argileuse silteuse beige

AR6-07
57,20 - 58,15 m
TAR45



◇—◇ TAR45 fluage en 3 paliers
08 q = 695 kPa
10 q = 1198 kPa
12 q = 1694 kPa rupture

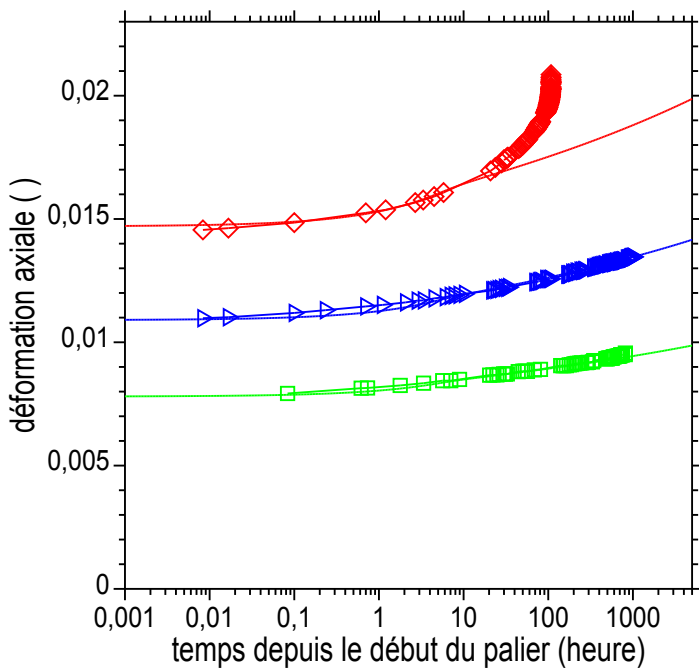
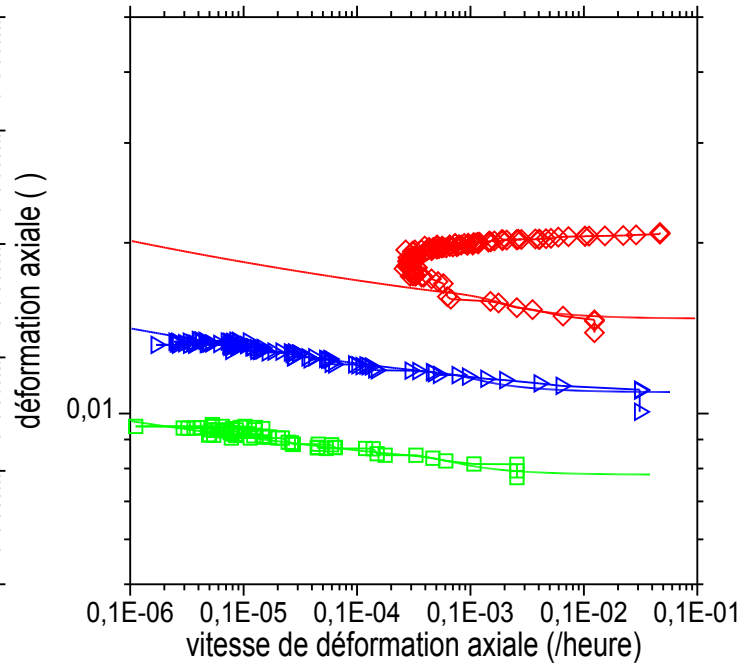
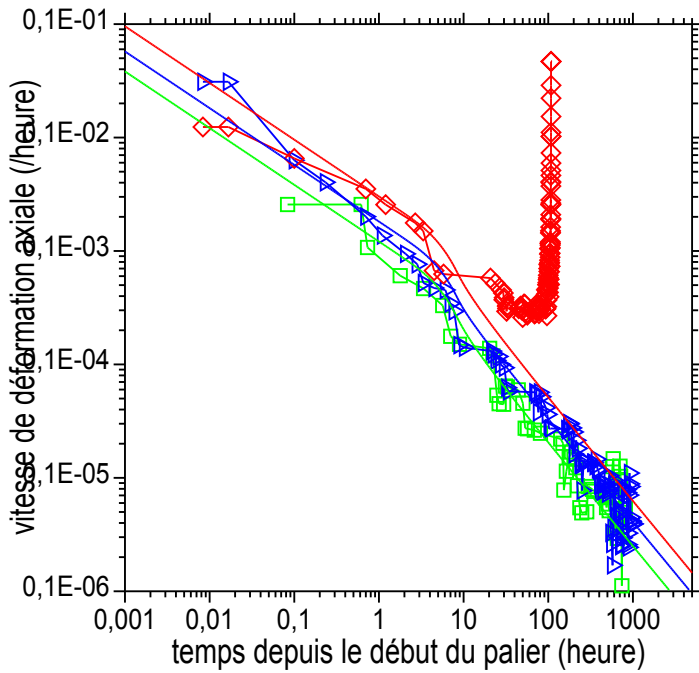


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
 E12
 Marne argileuse silteuse beige

AR6-07
 57,20 - 58,15 m
 TAR45



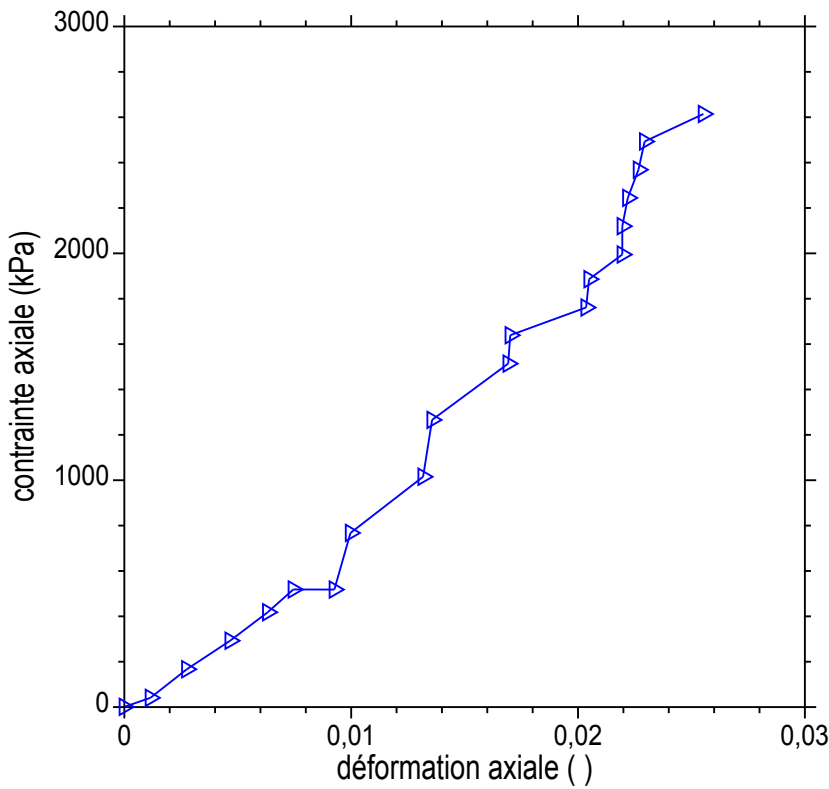
- TAR45 08 q = 695 kPa
- ▷ TAR45 10 q = 1198 kPa
- ◇ TAR45 12 q = 1694 kPa rupture

Courbes vitesse de déformation et déformation temps.

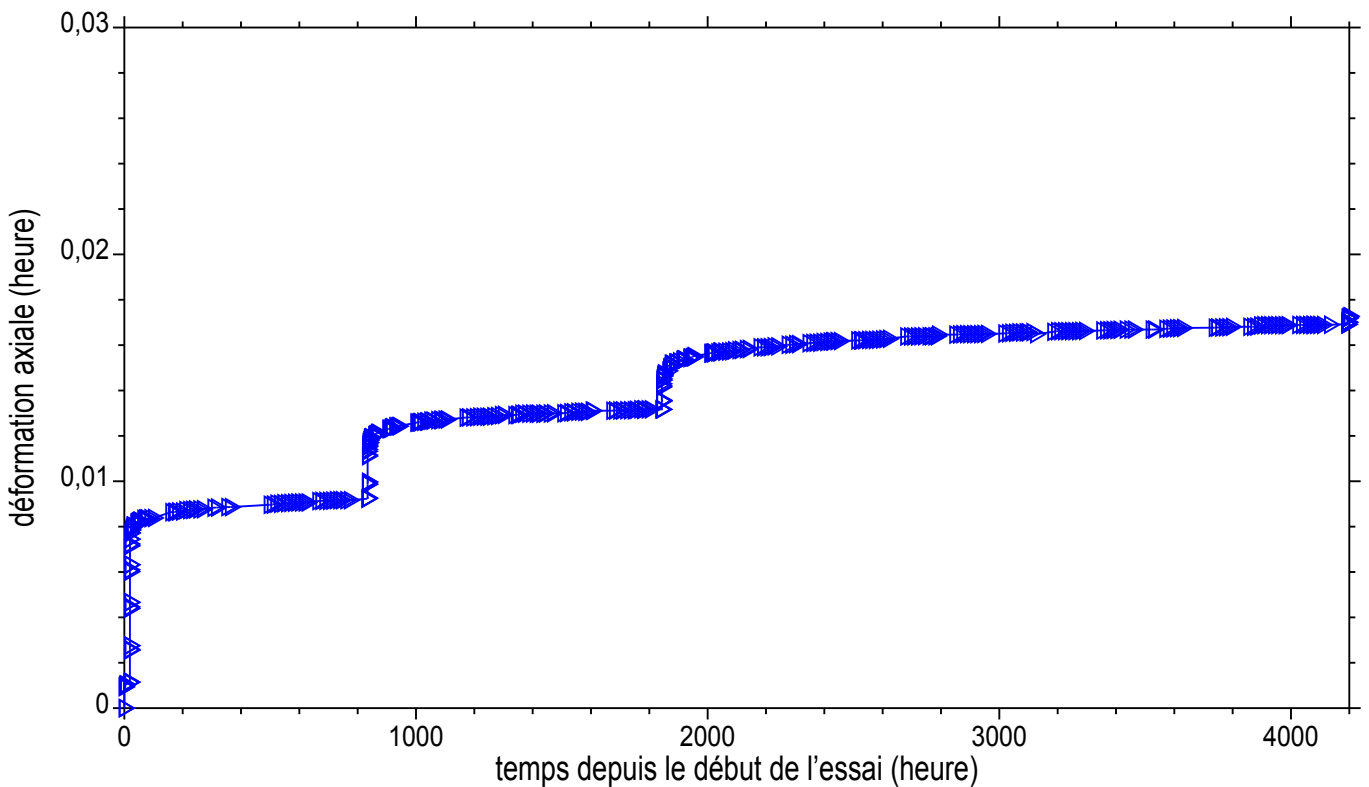
Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
E12
Marne argileuse noduleuse beige foncé

AR6-07
57,20 - 58,15 m
TAR46



▶ TAR46 fluage en 3 paliers
07 q = 518 kPa
09 q = 1016 kPa
11 q = 1516 kPa

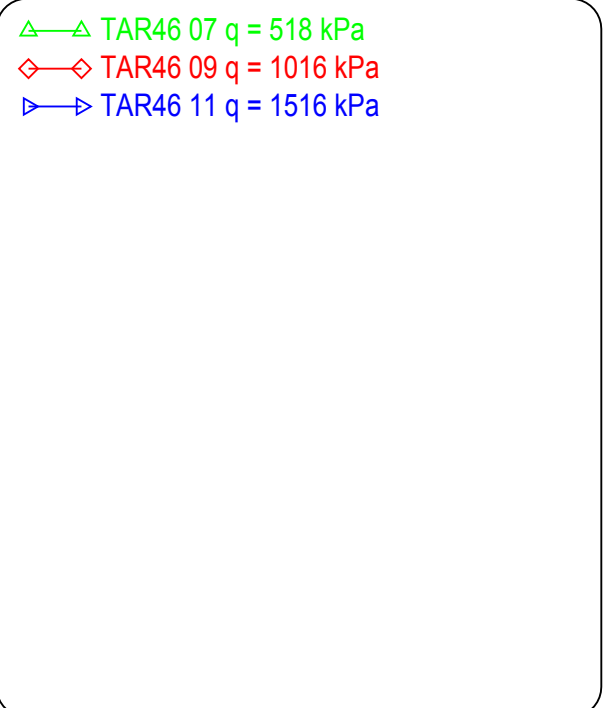
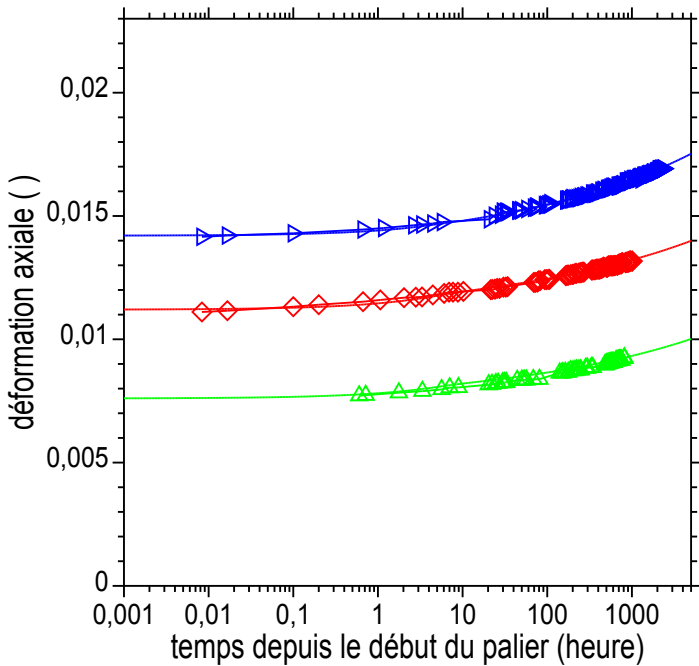
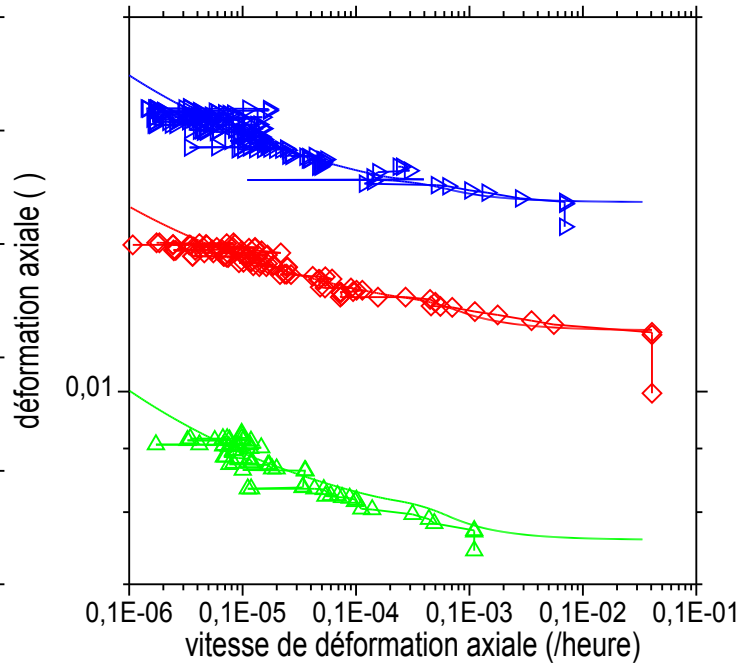
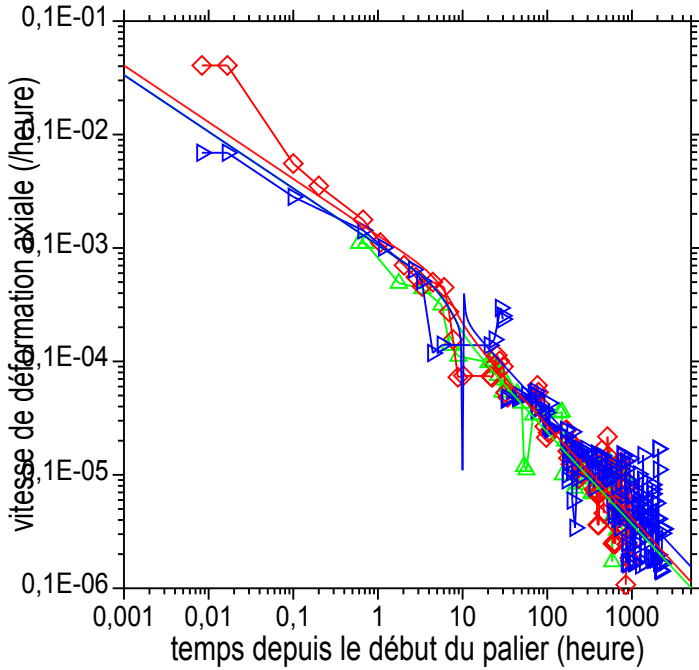


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Tunnel d'Arbus
E12
Marne argileuse noduleuse beige foncé

AR6-07
57,20 - 58,15 m
TAR46



Courbes vitesse de déformation et déformation temps.

Annexe E. Conditions des essais de fluage triaxial. Site de Nice

Tableau E-1a : Essais de fluage triaxial. Conditions d'essai.

éprouvette	échantillon	matériau	condition ⁽¹⁾	q/q _{rupt} ()	q (kPa)	date d'essai
FCD131	SCH E1	marne	CD fluage	83	1490	novembre 1977
FCD132	SCH E1	marne	CD fluage	68	1230	novembre 1977
FCD133	SCH E1	marne	CD fluage	49	880	novembre 1977
FCD134	SCH E1	marne	CD fluage	29	530	novembre 1977
FCD135	SCH E1	marne	CD fluage	85	1520	novembre 1977

⁽¹⁾ p_c = 200 kPa

q déviateur

q/q_{rupt} rapport des contraintes à la rupture

Tableau E-1b : Essais de fluage triaxial. Caractéristiques d'état des éprouvettes.

	z m	w %	gam kN/m ³	gamd kN/m ³	e	Sr %	wf %
FCD131-135	1,10	20,94	20,41	16,88	0,570	99,3	

Tableau E-1c : Essais de fluage triaxial. Paramètres de calcul.

Eprouvettes	n° pal	q (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
FCD131	14	1490	6	17,0	2,0	0,0103	0,0026	0,10E-06	-0,80
FCD132	12	1230	6	17,0	2,0	0,0085	0,0016	0,10E-06	-0,90
FCD133	09	880	6	17,0	2,0	0,0057	0,0010	0,10E-06	-0,90
FCD134	05	530	6	17,0	2,0	0,00335	0,0007	0,10E-06	-0,90
FCD135	12	1520	6	17,0	2,0	0,0107	0,0033	0,10E-06	-0,80

Eprouvettes	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
FCD131	8	17,0	2,0	0,0102	0,0028	0,10E-06	-1,30	-0,80	0,51E-03
FCD132	8	17,0	2,0	0,0085	0,0016	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,25E-03
FCD133	8	17,0	2,0	0,0057	0,0010	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,15E-03
FCD134	8	17,0	2,0	0,0034	0,0007	0,10E-06	-1,50	-0,80	0,10E-03
FCD135	8	17,0	2,0	0,0107	0,0033	0,10E-06	-1,30	-0,80	0,65E-03

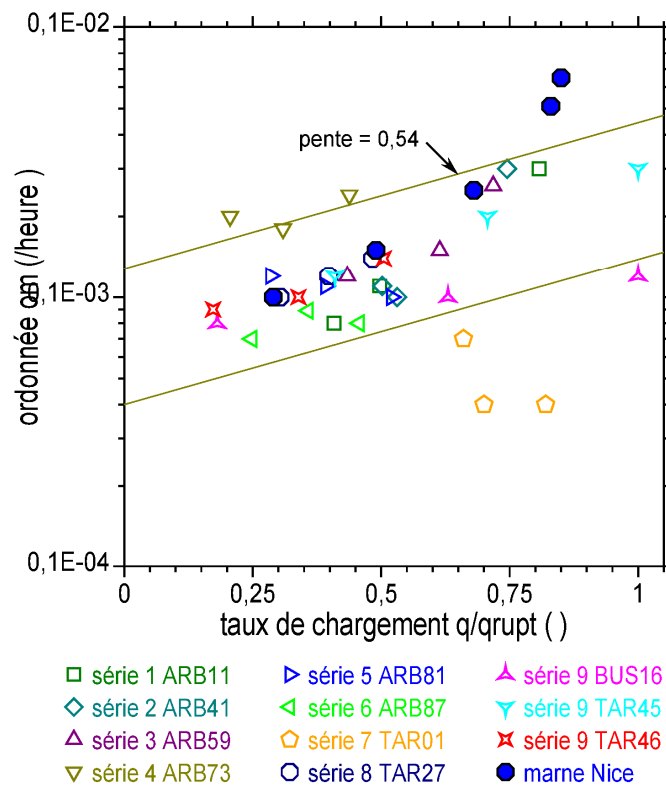
q déviateur (p_c = 200 kPa)

n par nombre de paramètres

Δε Δε = ε_∞ - ε₀

Tableau E-1d : Essais de fluage. Caractéristiques des courbes de fluage. Site de Nice.

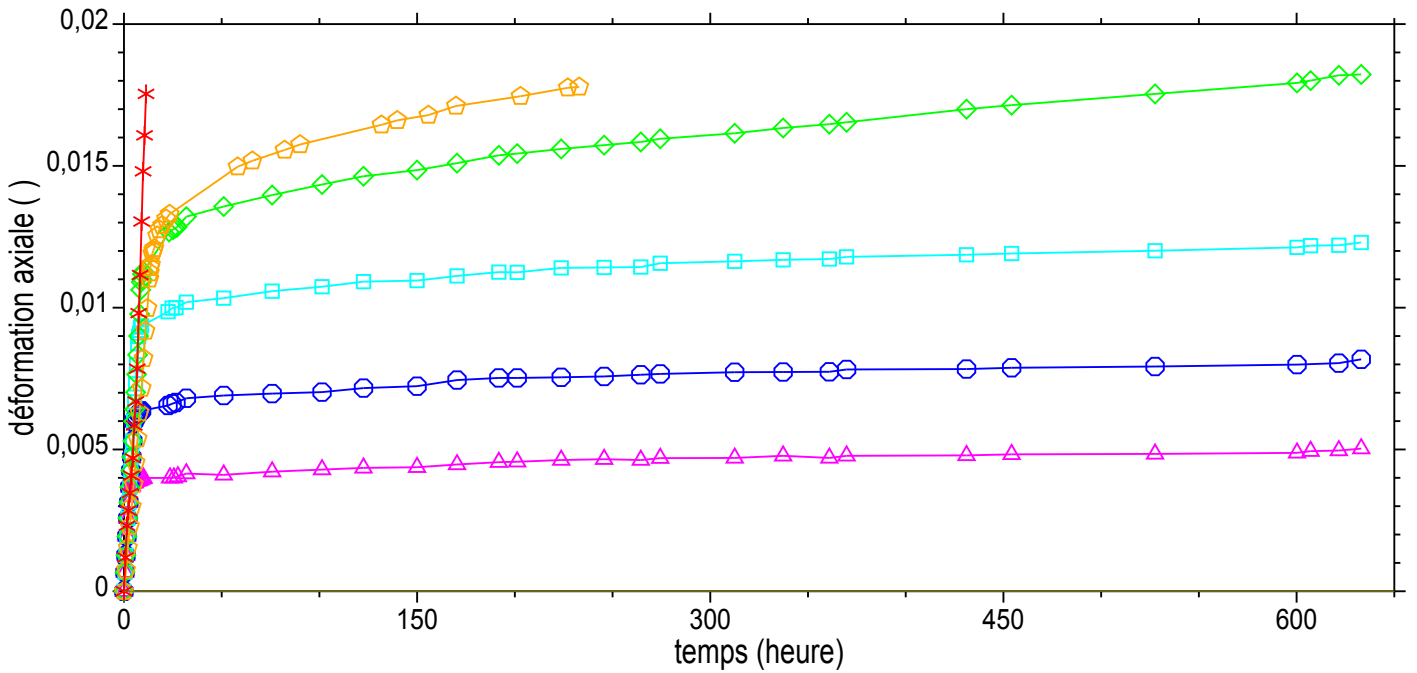
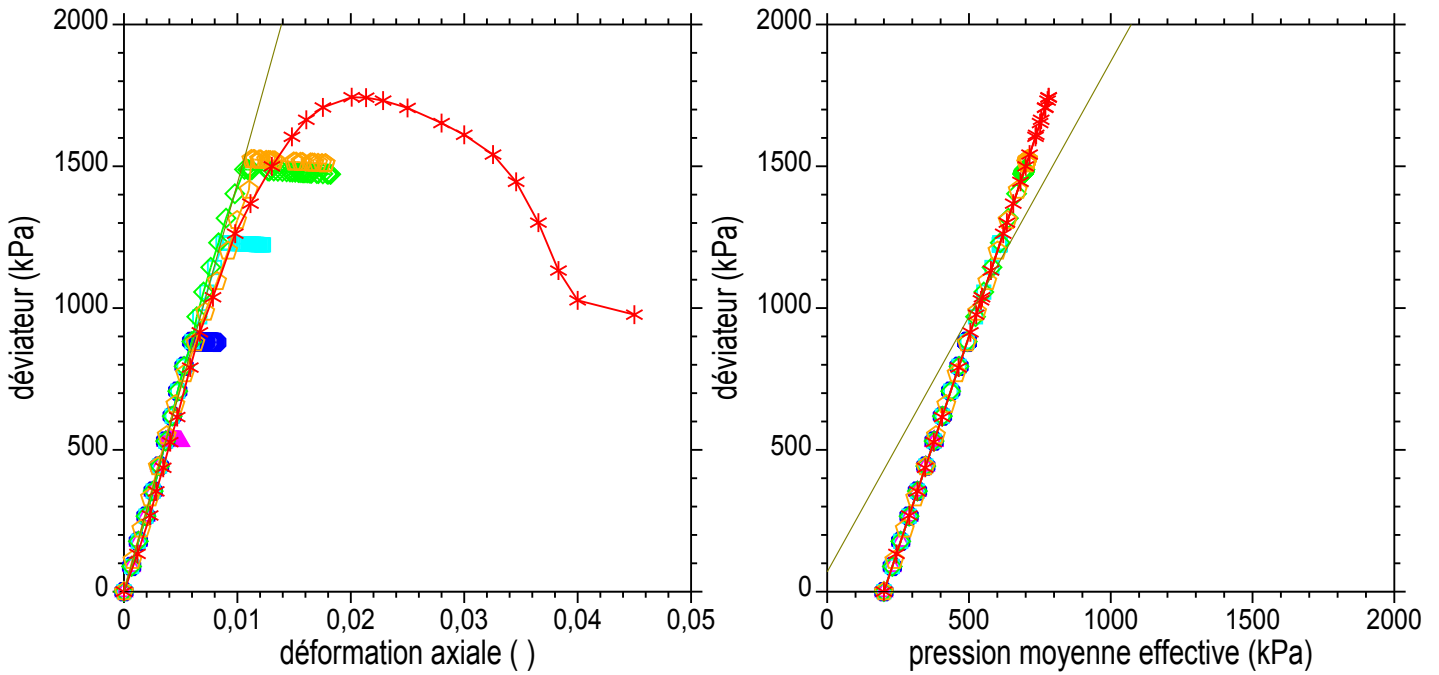
s	épr	q kPa	q/q _{rupt}	cv m ² /s	td h	epsd	Tv	U	m	om /h
1	FCD131	1490	0,83	0,10E-06	10,57	0,0124	0,527	0,779	0,80	0,51E-03
1	FCD132	1230	0,68	0,10E-06	12,20	0,0098	0,608	0,819	0,80	0,25E-03
1	FCD133	880	0,49	0,10E-06	12,20	0,0065	0,608	0,819	0,80	0,15E-03
1	FCD134	530	0,29	0,10E-06	12,20	0,0065	0,608	0,819	0,80	0,10E-03
1	FCD135	1520	0,85	0,10E-06	10,57	0,0133	0,527	0,779	0,80	0,65E-03

Figure E-1 : Ordonnées à l'origine o_m en fonction du taux de chargement q/q_{rupt} pour la série d'essais de fluage sur la marne du Plaisancien. Site de Nice.

Essais de fluage

Auchan Nice
 E
 Marne grise

SCH
 1,00 - 2,00 m
 FCD134



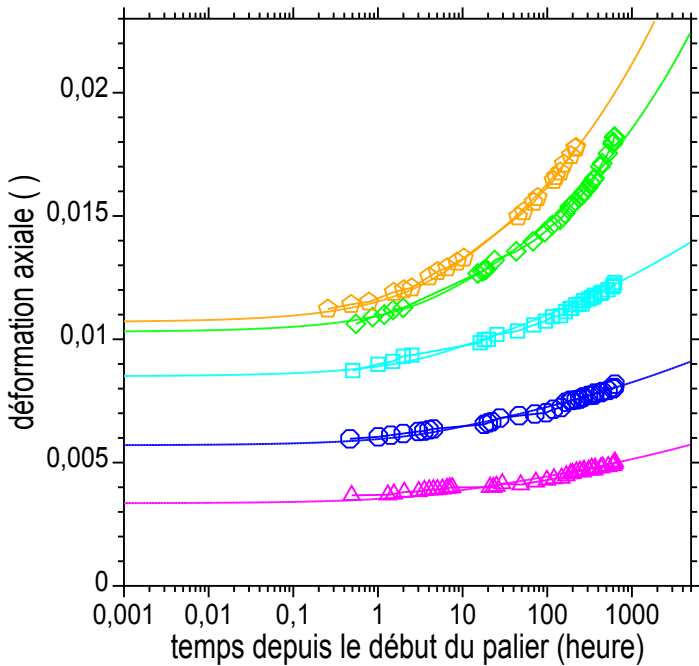
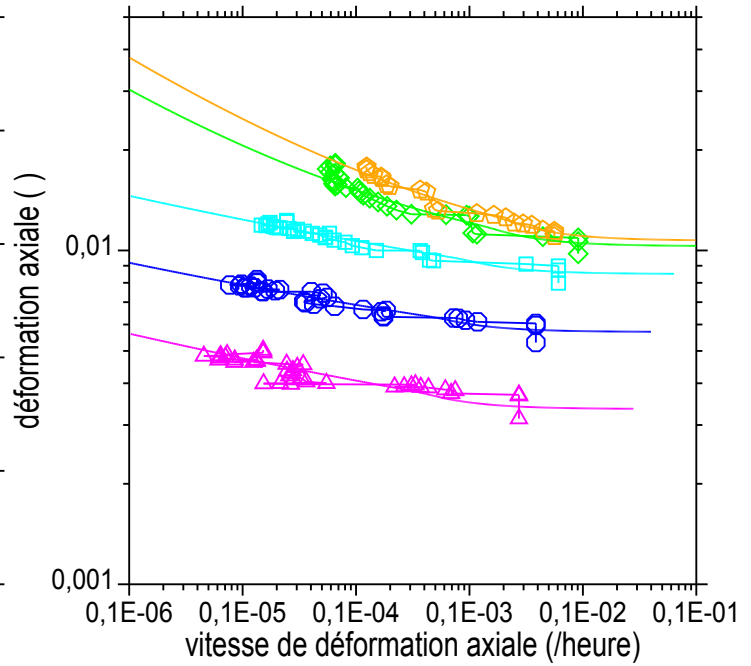
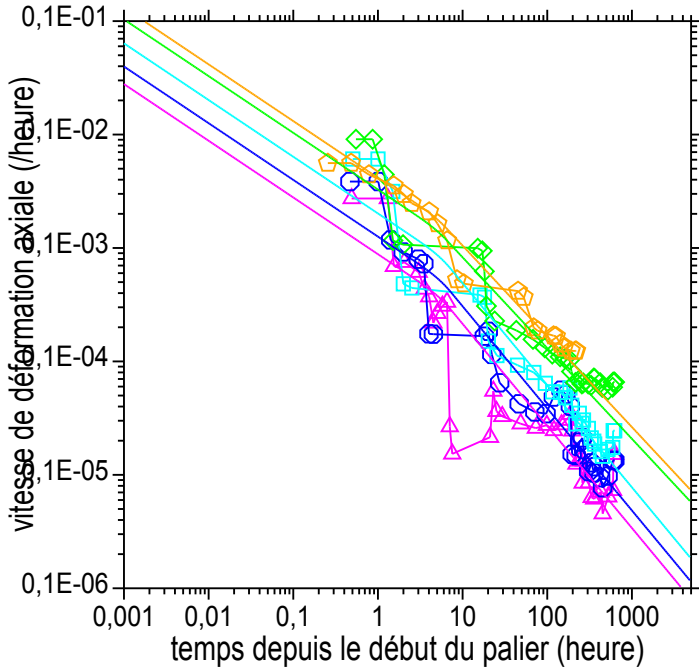
△-△ FCD134 FCD 530 kPa 29 %	*-* FCD109 CD 1742 kPa
○-○ FCD133 FCD 880 kPa 49 %	E = 144 MPa
□-□ FCD132 FCD 1230 kPa 68 %	Mc = 1,80 Cqc = 70 kPa Me = -1,12
◇-◇ FCD131 FCD 1490 kPa 83 %	c' = 37 kPa phi' = 43,8 °
◇-◇ FCD135 FCD 1520 kPa 85 %	

Courbes contraintes déformations temps.

Essais de fluage

Auchan Nice
E
Marne grise

SCH
1,00 - 2,00 m
FCD134



△ FCD134 FCD 530 kPa 29 %
○ FCD133 FCD 880 kPa 49 %
□ FCD132 FCD 1230 kPa 68 %
◇ FCD131 FCD 1490 kPa 83 %
◇ FCD135 FCD 1520 kPa 85 %

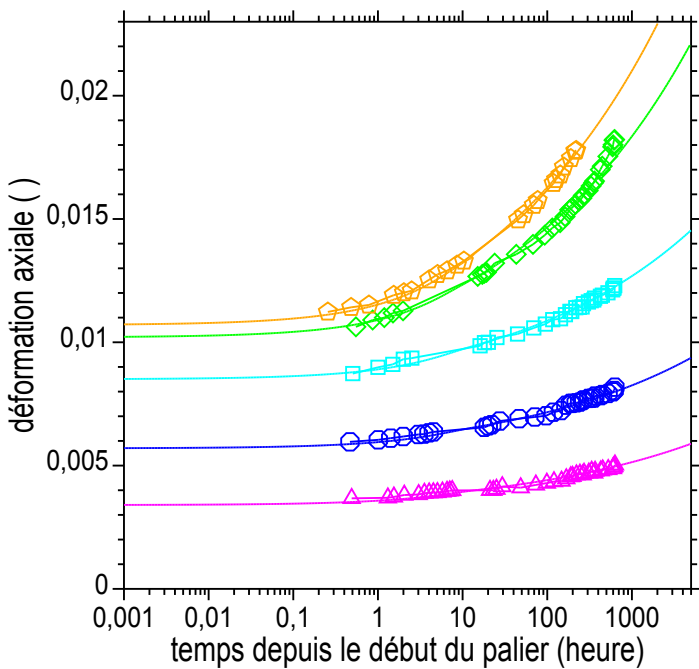
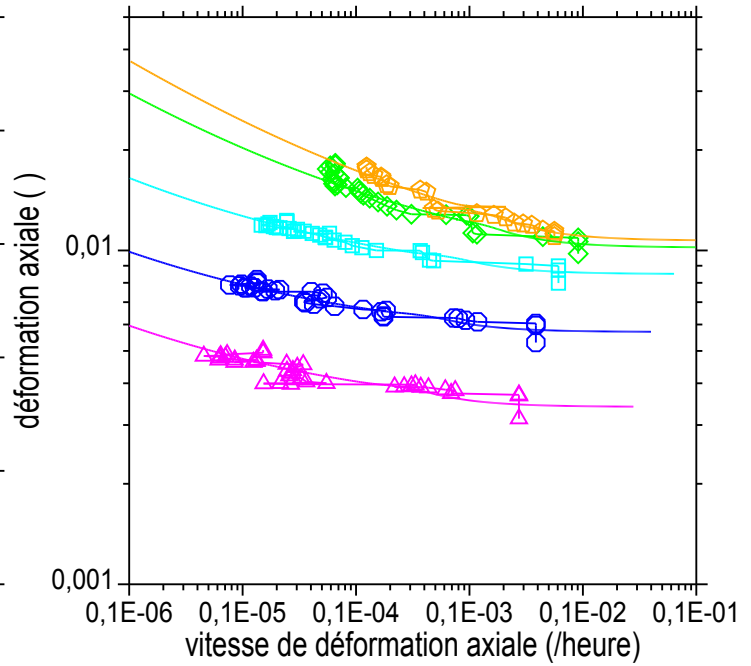
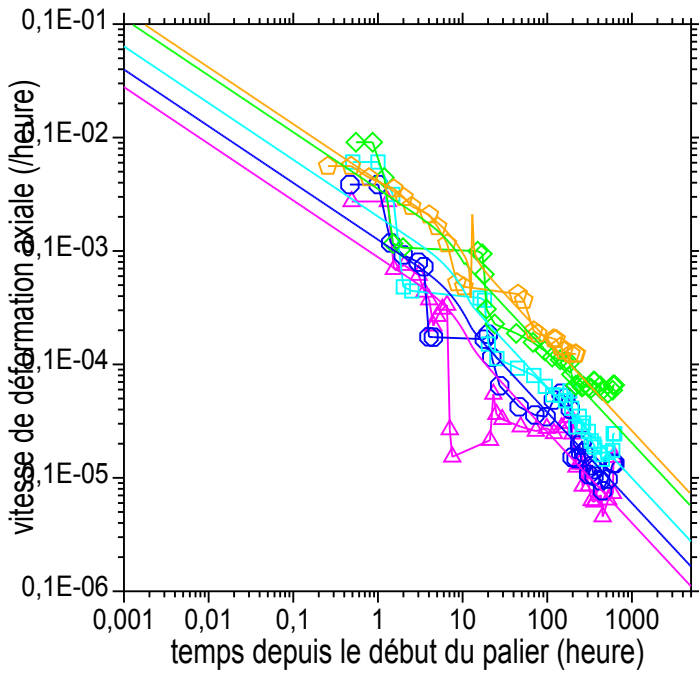
$E = 144 \text{ MPa}$
 $Mc = 1,80 \text{ Cqc} = 70 \text{ kPa} \quad Me = -1,12$
 $c' = 37 \text{ kPa} \quad \phi' = 43,8^\circ$

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de fluage

Auchan Nice
 E
 Marne grise

SCH
 1,00 - 2,00 m
 FCD134



△-△	FCD134	FCD	530 kPa	29 %
○-○	FCD133	FCD	880 kPa	49 %
□-□	FCD132	FCD	1230 kPa	68 %
◇-◇	FCD131	FCD	1490 kPa	83 %
◇-◇	FCD135	FCD	1520 kPa	85 %

E = 144 MPa
 Mc = 1,80 Cqc = 70 kPa Me = -1,12
 c' = 37 kPa phi' = 43,8 °

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Annexe F. Essais oedométriques

Tableau F-1a : Essais oedométriques standards. Conditions d'essai.

éprouvette	sondage échantillon	nature du sol	type d'essai	n cycles n paliers	σ'_a (kPa)	date de l'essai
AV02	SC45 E4 11,00 - 11,70	argile tourbeuse	paliers LD	2 14	311 616 1254	02/12/1991 - 15/01/1992
AV04	SC45 E2 6,00 - 6,50	argile	paliers LD	2 14	170 336 680	02/12/1991 - 15/01/1992
AV08	SC42 E1 5,50 - 6,00	argile	paliers LD	2 14	119 247 502	06/12/1991 - 10/01/1992
ORA01	SC5 E1 2,80 - 4,30	argile	paliers	2 13	107 210 414 822	06/10/2010 - 27/10/2010
OUR04	SC176 E2 8,50 - 9,80	argile	paliers	2 14	158 311 643	10/03/2015 - 26/03/2015

paliers chargement par paliers successifs
 LD paliers de longue durée (> 168 heures)
 n cycles nombre de cycles de chargement-déchargement
 n paliers nombre total de paliers
 σ'_a contrainte axiale effective des paliers de consolidation-fluage

Tableau F-1b : Essais oedométriques standards. Propriétés physiques des sols.

n	Eprouvettes	Nature du sol	w _L (%)	I _p (°)	C ₂ (%)	V _B (g/100g)	e ₀ (°)
1	AV02	argile grise tourbeuse	79	48	-	-	0,92
2	AV04	argile grise	37	13	-	-	0,89
3	AV08	argile	44	17	-	-	1,27
4	ORA01	argile beige à grise	31	11	37	-	0,63
5	OUR04	argile ferme verte	60	31	33	-	0,92

Tableau F-1c : Essais oedométriques standards. Caractéristiques d'état des éprouvettes.

	z m	w %	gam kN/m ³	gamd kN/m ³	e	Sr %	w _f %
AV02	11,65	45,01	16,58	11,43	1,274	94,0	58,01
AV04	6,35	33,94	18,43	13,76	0,889	101,0	34,61
AV08	5,60	37,40	18,60	13,54	0,920	108,0	34,16
ORA01	3,90	23,06	20,00	16,25	0,631	98,8	19,19
OUR04	8,91	33,49	18,48	13,84	0,915	98,9	32,46

Tableau F-1d : Essais oedométriques standards. Paramètres de calcul.

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
AV02-06	8	2,4	2,0	0,0030	0,0135	0,40E-06	-1,20	-1,03	0,15E-02
AV02-11	8	2,4	2,0	0,039	0,015	0,80E-06	-1,20	-1,05	0,15E-02
AV02-12	8	2,4	2,0	0,065	0,020	0,40E-05	-1,20	-1,05	0,15E-02

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
AV04-06	8	2,4	2,0	0,0740	0,0042	0,50E-05	-1,20	-0,85	0,10E-03
AV04-11	8	2,4	2,0	0,092	0,0059	0,50E-05	-1,20	-0,85	0,10E-03
AV04-12	8	2,4	2,0	0,115	0,0076	0,50E-05	-1,20	-0,85	0,10E-03

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
AV08-06	8	2,4	2,0	0,0351	0,0157	0,50E-06	-2,50	-1,00	0,13E-02
AV08-11	8	2,4	2,0	0,0630	0,0130	0,50E-06	-2,50	-1,00	0,13E-02
AV08-12	8	2,4	2,0	0,086	0,0162	0,50E-06	-2,50	-1,00	0,13E-02

n par nombre de paramètres

Δε Δε = ε_∞ - ε₀

Tableau F-1d (suite) : Essais oedométriques standards. Paramètres de calcul.

Eprouvette	n° pal	σ'_a (kPa)	n par	h_0 (cm)	k_{dra} ()	ε_0 ()	$\Delta\varepsilon$ ()	c_v (m ² /s)	m ()
ORA01	5	107	6	2,4	2,0	0,0220	0,0085	0,17E-06	-1,40
	10	210	6	2,4	2,0	0,0370	0,0102	0,19E-06	-1,40
	11	414	6	2,4	2,0	0,0540	0,0130	0,21E-06	-1,40
	12	822	6	2,4	2,0	0,0750	0,0153	0,32E-06	-1,40

Eprouvette	n° par	h_0 (cm)	k_{dra} ()	ε_0 ()	$\Delta\varepsilon$ ()	c_v (m ² /s)	m_d ()	m ()	o_m ()
ORA01	8	2,4	2,0	0,0220	0,0085	0,17E-06	-3,00	-1,00	0,83E-03
	8	2,4	2,0	0,0370	0,0110	0,25E-06	-3,00	-1,00	0,83E-03
	8	2,4	2,0	0,0535	0,0160	0,21E-06	-3,00	-1,00	0,83E-03
	8	2,4	2,0	0,0745	0,0180	0,32E-06	-3,00	-1,00	0,11E-02

Eprouvette	n° pal	σ'_a (kPa)	n par	h_0 (cm)	k_{dra} ()	ε_0 ()	$\Delta\varepsilon$ ()	c_v (m ² /s)	m ()
OUR04	6	158	6	2,4	2,0	0,0180	0,0080	0,16E-07	-1,40
	11	311	6	2,4	2,0	0,0310	0,0100	0,21E-07	-1,40
	12	643	6	2,4	2,0	0,0465	0,0155	0,23E-07	-1,40

Eprouvette	n° par	h_0 (cm)	k_{dra} ()	ε_0 ()	$\Delta\varepsilon$ ()	c_v (m ² /s)	m_d ()	m ()	o_m ()
OUR04	8	2,4	2,0	0,0180	0,0090	0,16E-07	-3,00	-1,00	0,83E-03
	8	2,4	2,0	0,0310	0,0120	0,21E-07	-3,00	-1,10	0,83E-03
	8	2,4	2,0	0,0465	0,0178	0,23E-07	-3,00	-1,10	0,83E-03

n° pal numéro du palier

n par nombre de paramètres

σ'_a contrainte axiale effective des paliers de consolidation

$\Delta\varepsilon$ $\Delta\varepsilon = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0$

Tableau F-2a : Essais de gonflement libre. Conditions d'essai.

éprouvette	sondage échantillon	nature du sol	type d'essai	d _o (cm)	h _o (cm)	date de l'essai
BUS25	AR1-06 E9	marne	libre oedo	6,00	2,51	04/11/2010 – 17/11/2010
BUS26	AR1-06 E9	marne	libre iso	5,00	2,78	04/11/2010 – 17/11/2010
BUS29	AR1-06 E9	marne	libre oedo	6,00	2,51	19/11/2010 – 04/12/2010
BUS30	AR1-06 E9	marne	libre iso	5,00	2,73	19/11/2010 – 04/12/2010
BUS41	AR3-06 E15	marne	libre iso	5,00	2,74	27/01/2011 – 14/02/2011
BUS43	AR3-06 E15	marne	libre oedo	6,00	2,50	27/01/2011 – 14/02/2011
BUS44	AR3-06 E15	marne	libre oedo	6,00	1,83	27/01/2011 – 14/02/2011
BUS45	AR3-06 E15	marne	libre oedo	6,00	2,19	27/01/2011 – 14/02/2011

Tableau F-2b : Essais de gonflement libre. Propriétés physiques des sols.

n	Eprouvettes	Nature du sol	w _L (%)	I _p (%)	C ₂ (%)	V _B (g/100g)	e ₀ (%)
1	BUS25 – 30	marne lgt silteuse	-	-	(33)	-	(0,4)
2	BUS41 – 45	marne argileuse beige	-	-	-	-	0,38

Tableau F-2c : Essais de gonflement libre. Caractéristiques d'état des éprouvettes.

	z m	w %	gam kN/m ³	gamd kN/m ³	e	Sr %	wf %
BUS25	93,04	11,64	22,33	20,00	0,325	96,8	13,76
BUS26	93,09	11,06	22,03	19,83	0,336	88,9	14,89
BUS29	93,39	17,47	20,99	17,87	0,483	97,7	20,72
BUS30	93,48	17,62	21,11	17,95	0,477	99,9	23,06
BUS41	69,48	14,25	21,63	18,93	0,400	96,3	17,75
BUS43	69,43	14,10	21,61	18,94	0,399	95,4	16,14
BUS44	69,38	13,59	21,99	19,36	0,369	99,5	15,13
BUS45	69,33	13,14	21,56	19,05	0,391	90,8	15,31

Tableau F-2d : Essais de gonflement libre. Paramètres de calcul.

Eprouvette	n par	h_0 (cm)	k_{dra} ()	$\epsilon_0^{(1)}$ ()	$\Delta\epsilon$ ()	c_v (m ² /s)	m_d ()	m ()	o_m ()
BUS25	8	2,5	2,0	0,000	0,030	0,50E-08	-3,00	-1,10	0,20E-02
BUS26	8	2,5	2,0	0,000	0,025	0,10E-07	-3,00	-1,10	0,70E-03
BUS29	8	2,5	2,0	0,000	0,0495	0,25E-08	-3,00	-1,10	0,40E-02
BUS30	8	2,5	2,0	0,000	0,033	0,40E-08	-3,00	-1,10	0,20E-02

Eprouvette	n par	h_0 (cm)	k_{dra} ()	$\epsilon_0^{(1)}$ ()	$\Delta\epsilon$ ()	c_v (m ² /s)	m_d ()	m ()	o_m ()
BUS41	8	2,5	2,0	0,000	0,022	0,80E-08	-3,00	-1,10	0,12E-02
BUS43	8	2,5	2,0	0,000	0,0311	0,10E-07	-3,00	-1,10	0,70E-03
BUS44	8	2,5	2,0	0,000	0,018	0,20E-07	-3,00	-1,10	0,10E-02
BUS45	8	2,5	2,0	0,000	0,0296	0,60E-08	-3,00	-1,10	0,45E-03

n par nombre de paramètres

$\Delta\epsilon$ $\Delta\epsilon = \epsilon_\infty - \epsilon_0$

⁽¹⁾ après translation et changement de signe

Tableau F-3a : Essais oedométriques de gonflement. Conditions d'essai.

éprouvette	sondage échantillon	nature du sol	type d'essai	n cycles n paliers	σ'_a (kPa)	date de l'essai
ATS24	193-0056-TO 0,24	marne	pal succ	2 15	1496 269 44 1	27/11/2007 - 07/01/2008
BAR01	bloc puits 2 0,85 - 1,00	marne	pal succ	2 18	930 388 79 17 1	21/08/1986 - 12/04/1988
BMB17	SC33 E11 35,80 - 36,75	marne	vol cst et pal succ	1 32	1	02/04/1998 - 12/08/1998
THI09	bloc galerie	marne	pal succ	2 22	2	24/02/1989 - 29/07/1992
TBT01	bloc galerie	marne	pal succ	2 15	1510 275 45 2	12/06/2014 - 14/08/2014

n cycles nombre de cycles de chargement-déchargement
n paliers nombre total de paliers
pal succ paliers successifs
vol cst volume constant
 σ'_a contrainte axiale effective des paliers de gonflement

Tableau F-3b : Essais oedométriques de gonflement. Propriétés physiques des sols.

n	Eprouvette	Nature du sol	w_L (%)	I_p (%)	C_2 (%)	V_B (g/100g)	e_0 (%)
1	ATS24	marne beige à gris verdâtre	-	-	-	-	0,39
2	BAR01	marne grise	55	29	54	-	0,49
3	BMB17	marne marron rouge	(64)	(35)	(34)	-	0,35
4	THI09	marne gris vert	94	52	62	-	0,83
5	TBT01	argile marneuse grisâtre	30	7	-	-	0,17

Tableau F-3c : Essais oedométriques de gonflement. Caractéristiques d'état des éprouvettes.

	z m	w %	γ_{am} kN/m ³	γ_{amd} kN/m ³	e	S_r %	w _F %
ATS24	0,24	11,14	21,64	19,47	0,386	79,3	15,20
BAR01	0,90	17,50	20,97	17,84	0,485	97,5	18,78
BMB17	36,40	12,69	22,19	19,69	0,346	99,1	17,44
THI09	(30)	29,85	18,78	14,46	0,831	97,0	31,03
TBT01	(140)	4,61	23,79	22,74	0,165	75,4	14,57

Tableau F-3d : Essais oedométriques de gonflement. Paramètres de calcul.

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
ATS24 - 12	8	2,4	2,0	0,0039	0,0025	0,20E-08	-2,50	-2,00	0,10E-03
ATS24 - 13	8	2,4	2,0	0,017	0,016	0,20E-08	-2,50	-1,80	0,17E-01
ATS24 - 14	8	2,4	2,0	0,037	0,024	0,20E-08	-2,50	-1,60	0,22E-01
ATS24 - 15	8	2,4	2,0	0,064	0,036	0,20E-08	-2,50	-1,40	0,17E-01

Eprouvette	n° pal	σ' _a (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
BAR01	14	930	6	2,5	2,0	0,0016	0,0045	0,10E-06	-1,50
	15	338	6	2,5	2,0	0,0107	0,0035	0,80E-07	-1,20
	16	79	6	2,5	2,0	0,020	0,0078	0,11E-06	-1,20
	17	17	6	2,5	2,0	0,0355	0,0047	0,10E-07	-1,10
	18	1	6	2,5	2,0	0,0454	0,0040	0,50E-09	-0,90

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
BAR01	8	2,5	2,0	0,0016	0,0053	0,50E-07	-5,00	-0,90	0,50E-04
	8	2,5	2,0	0,0107	0,0052	0,50E-07	-4,00	-0,90	0,12E-03
	8	2,5	2,0	0,0200	0,0111	0,30E-07	-3,00	-0,90	0,50E-03
	8	2,5	2,0	0,0355	0,0057	0,70E-08	-2,00	-0,90	0,50E-03
	8	2,5	2,0	0,0454	0,0040	0,50E-09	-1,10	-0,90	0,80E-03

Eprouvette	n° pal	σ' _a (kPa)	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m ()
BMB17	32	1	6	2,5	2,0	0,0000	0,032	0,15E-08	-1,15

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
BMB17	8	2,5	2,0	0,0000	0,034	0,15E-08	-2,10	-0,90	0,30E-02

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
THI09	8	2,5	2,0	0,0013	0,0043	0,30E-06	-3,50	-0,73	0,35E-03

Eprouvette n° palier	n par	h ₀ (cm)	k _{dra} ()	ε ₀ ⁽¹⁾ ()	Δε ()	c _v (m ² /s)	m _d ()	m ()	o _m ()
TBT01	8	2,5	2,0	-0.0337	0.020	0.70E-09	-3.50	-1.10	0.50E-03
	8	2,5	2,0	-0.0098	0.029	0.60E-09	-2.50	-1.10	0.40E-02
	8	2,5	2,0	0.0234	0.043	0.40E-09	-2.50	-1.10	0.60E-02
	8	2,5	2,0	0.0680	0.074	0.30E-09	-2.50	-1.10	0.80E-02

n par nombre de paramètres

Δε = ε_∞ - ε₀⁽¹⁾ après translation et changement de signe

Tableau F-4 : Essais oedométriques. Caractéristiques des courbes de fluage.

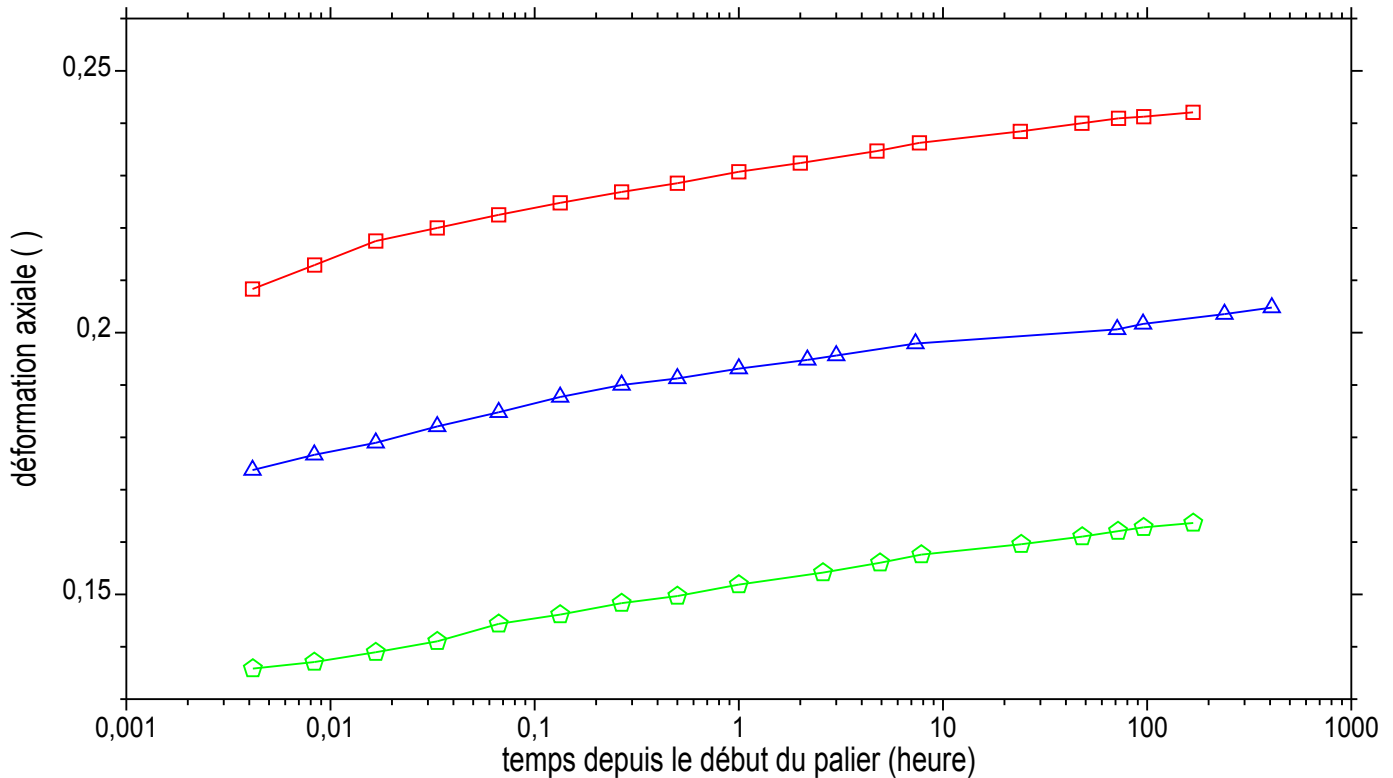
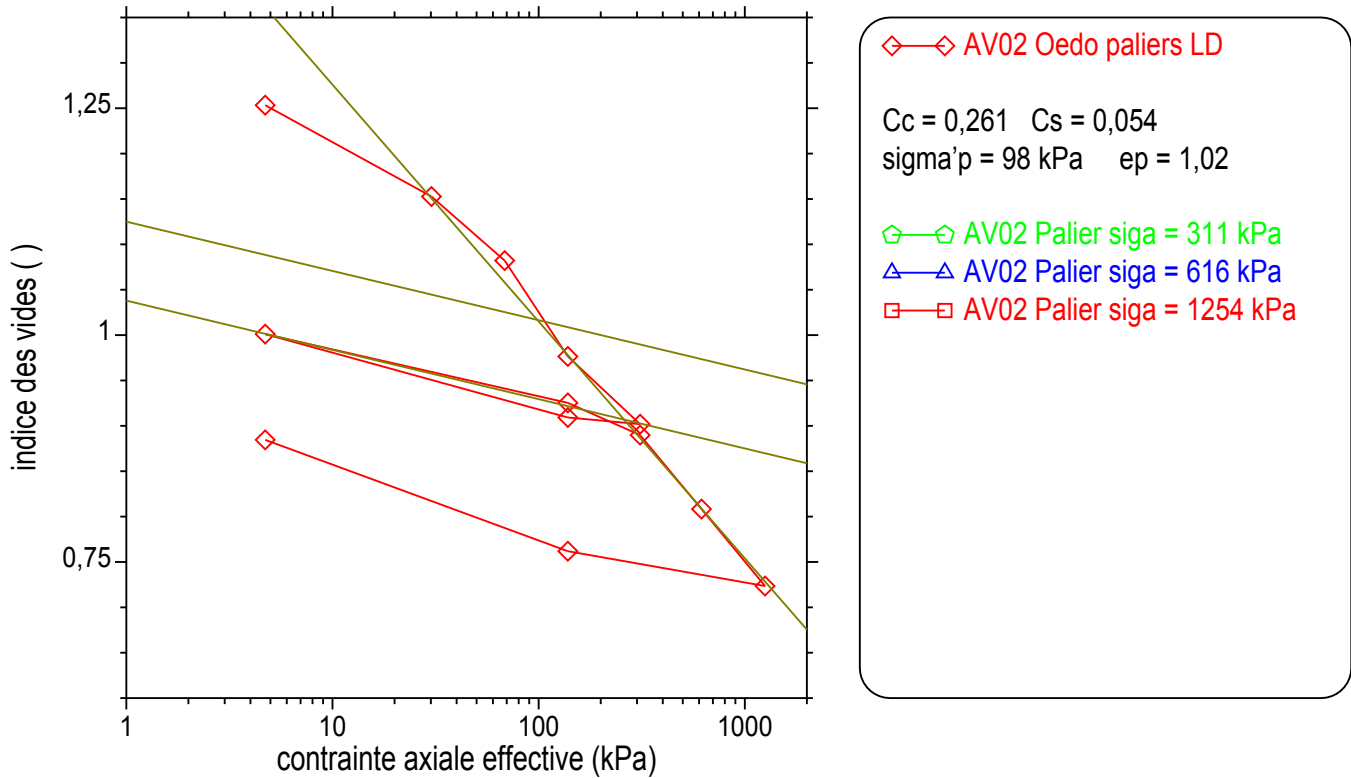
s	épr	sigma kPa	cv m2/s	td h	epsd	Tv	U	m	om /h
1	AV02	311	0,40E-06	0,0486	0,0132	0,486	0,756	1,03	0,15E-02
1	AV02	616	0,80E-06	0,0243	0,0503	0,486	0,756	1,05	0,15E-02
1	AV02	1254	0,40E-05	0,00486	0,0801	0,486	0,756	1,05	0,15E-02
2	AV04	170	0,50E-05	0,00389	0,0772	0,486	0,756	0,85	0,10E-03
2	AV04	336	0,50E-05	0,00389	0,0964	0,486	0,756	0,85	0,10E-03
2	AV04	680	0,50E-05	0,00389	0,1207	0,486	0,756	0,85	0,10E-03
3	AV08	119	0,50E-06	0,0811	0,0498	1,013	0,933	1,00	0,13E-02
3	AV08	247	0,50E-06	0,0811	0,0751	1,013	0,933	1,00	0,13E-02
3	AV08	502	0,50E-06	0,0811	0,1011	1,013	0,933	1,00	0,13E-02
4	ORA01	107	0,17E-06	0,2861	0,0302	1,216	0,960	1,00	0,83E-03
4	ORA01	210	0,25E-06	0,195	0,0476	1,216	0,960	1,00	0,83E-03
4	ORA01	414	0,21E-06	0,232	0,0688	1,216	0,960	1,00	0,83E-03
4	ORA01	822	0,32E-06	0,152	0,0918	1,216	0,960	1,00	0,11E-02
5	OUR04	158	0,16E-07	3,04	0,0266	1,216	0,959	1,00	0,83E-03
5	OUR04	311	0,21E-07	2,21	0,0425	1,216	0,959	1,00	0,83E-03
5	OUR04	643	0,23E-07	2,11	0,0636	1,216	0,959	1,00	0,83E-03
6	BUS25	1	0,50E-08	10,55	0,0288	1,216	0,959	1,10	0,20E-02
6	BUS26	1	0,10E-07	5,28	0,0240	1,216	0,959	1,10	0,70E-03
6	BUS29	1	0,25E-08	21,11	0,0475	1,216	0,959	1,10	0,40E-02
6	BUS30	1	0,40E-08	13,19	0,0317	1,216	0,959	1,10	0,20E-02
7	BUS41	1	0,80E-08	6,60	0,0211	1,216	0,960	1,00	0,12E-02
7	BUS43	1	0,10E-07	5,28	0,0298	1,216	0,960	1,00	0,70E-03
7	BUS44	1	0,20E-07	2,64	0,0173	1,216	0,960	1,00	0,10E-02
7	BUS45	1	0,60E-08	8,80	0,0284	1,216	0,960	1,00	0,45E-02
8	ATS24	1496	0,20E-08	20,26	0,0062	1,013	0,933	2,00	0,10E-03
8	ATS24	269	0,20E-08	20,26	0,0319	1,013	0,933	1,80	0,17E-01
8	ATS24	44	0,20E-08	20,26	0,0594	1,013	0,933	1,60	0,22E-01
8	ATS24	1	0,20E-08	20,26	0,0976	1,013	0,933	1,40	0,17E-01
9	BAR01	930	0,50E-07	1,759	0,0069	2,026	0,995	0,90	0,50E-04
9	BAR01	388	0,50E-07	1,407	0,0158	1,621	0,985	0,90	0,12E-04
9	BAR01	79	0,30E-07	1,759	0,0307	1,216	0,959	0,90	0,50E-03
9	BAR01	17	0,70E-08	5,026	0,0406	0,811	0,890	0,90	0,50E-03
9	BAR01	1	0,50E-09	38,65	0,0483	0,445	0,730	0,90	0,80E-03
10	BMB17	1	0,15E-08	24,63	0,0306	0,851	0,901	0,90	0,30E-02
11	THI09	2	0,30E-06	0,205	0,0055	1,419	0,976	0,73	0,35E-03
12	TBT01	1510	0,70E-09	87,95	-0,0142	1,419	0,976	1,10	0,50E-03
12	TBT01	275	0,60E-09	73,29	0,0173	1,013	0,933	1,10	0,40E-02
12	TBT01	45	0,40E-09	109,94	0,0635	1,013	0,933	1,10	0,60E-02
12	TBT01	2	0,30E-09	146,59	0,1371	1,013	0,933	1,10	0,80E-02

Note : Le signe de la déformation axiale a été inversé pour les gonflements (séries 6 à 11).

Essai oedométrique par paliers

A51 SISTERON GAP VALLEE DE L'AVANCE
 E4
 ARGILE GRISE TOURBEUSE

SC45
 11.00/11.70
 AV02

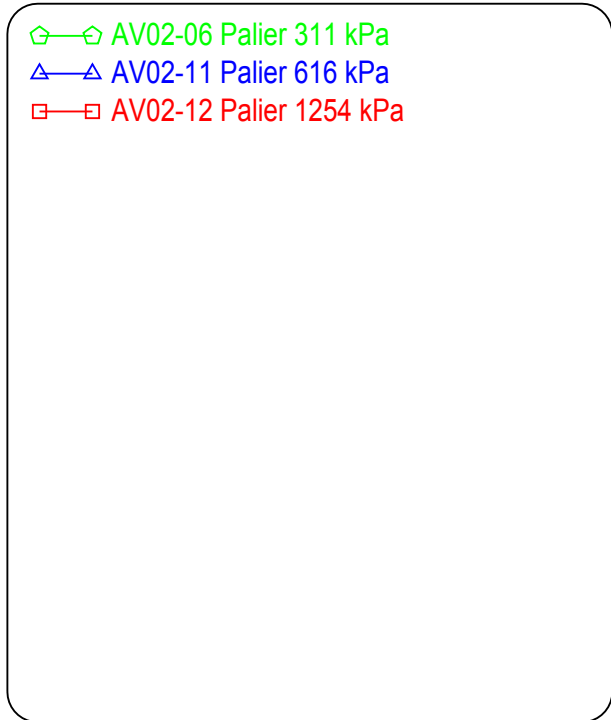
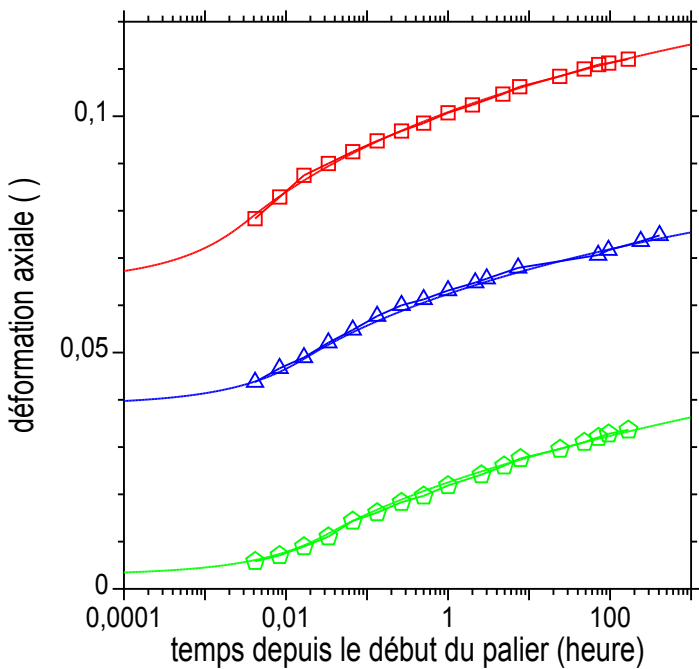
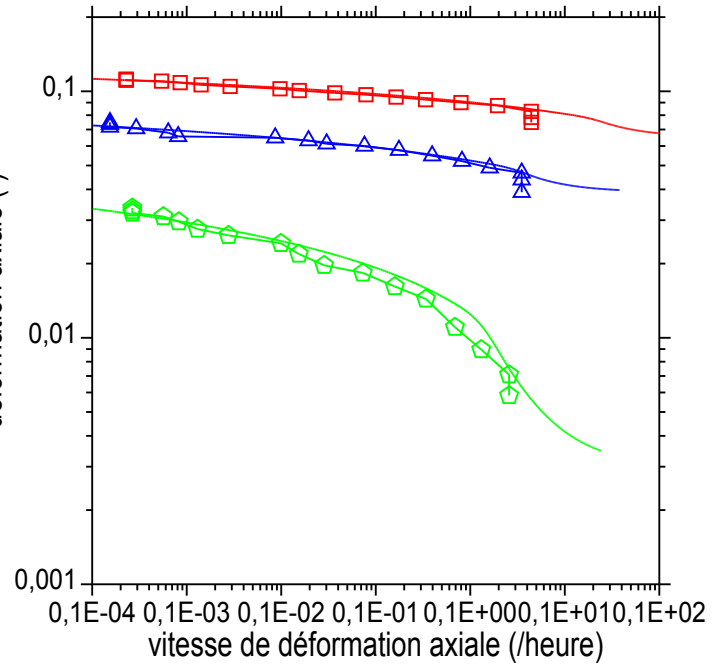
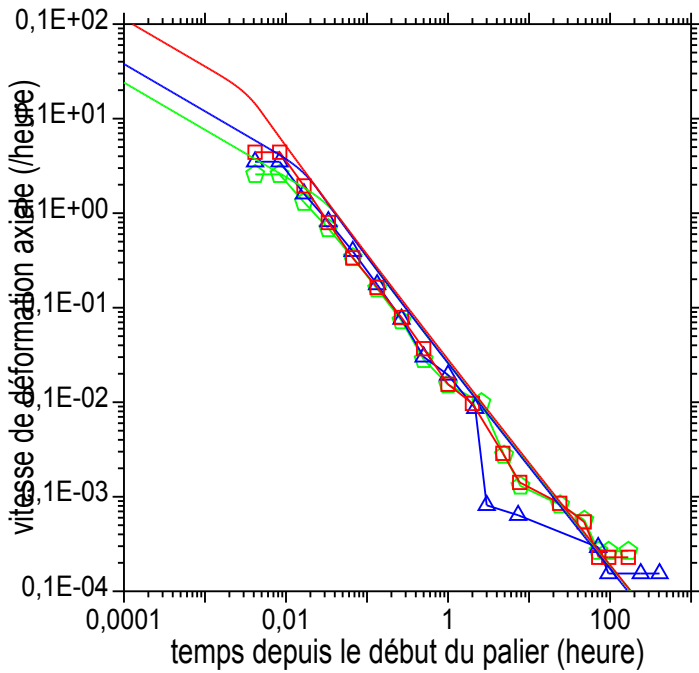


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique

A51 SISTERON GAP VALLEE DE L'AVANCE
E4
ARGILE GRISE TOURBEUSE

SC45
11.00/11.70
AV02-06

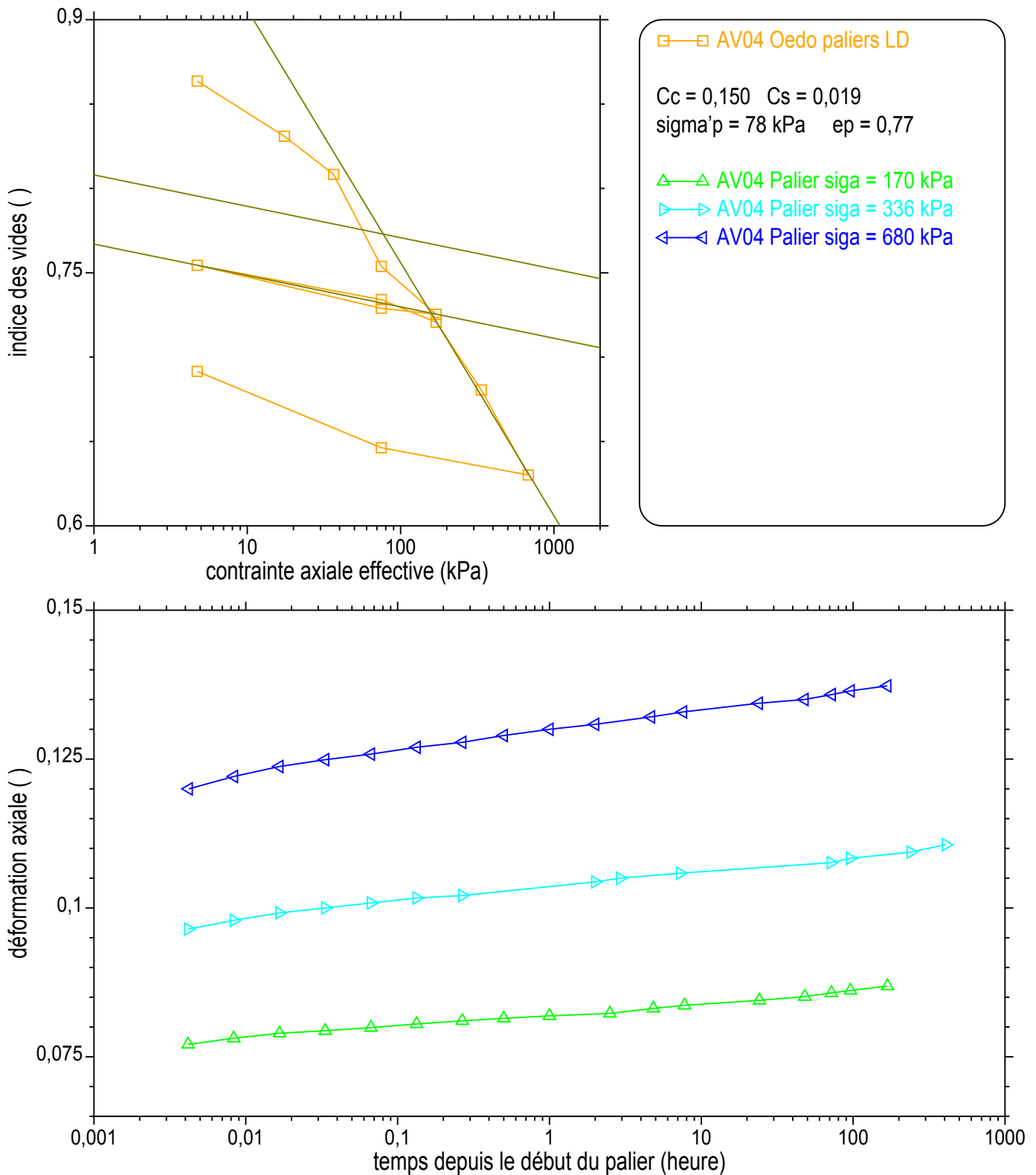


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique par paliers

A51 SISTERON GAP VALLEE DE L'AVANCE
 E2
 ARGILE GRISE

SC45
 6.00/6.50
 AV04



Courbes contraintes déformations et déformation temps.

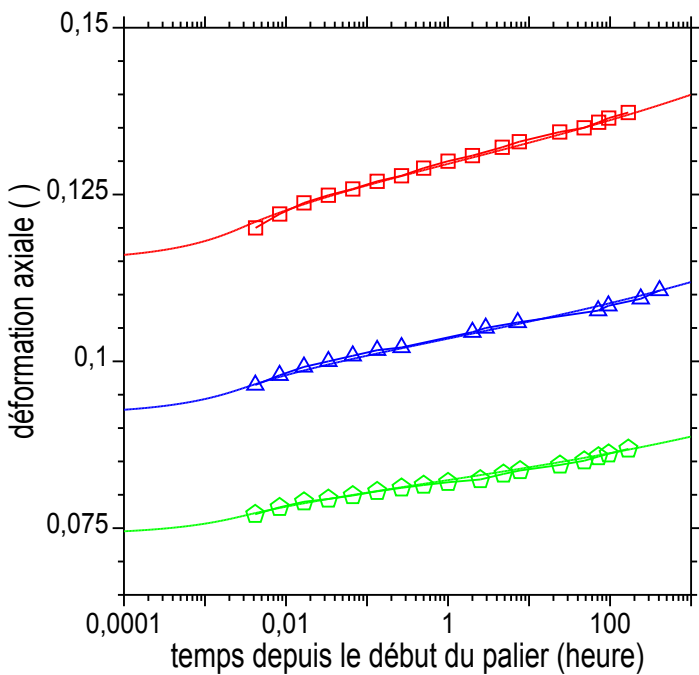
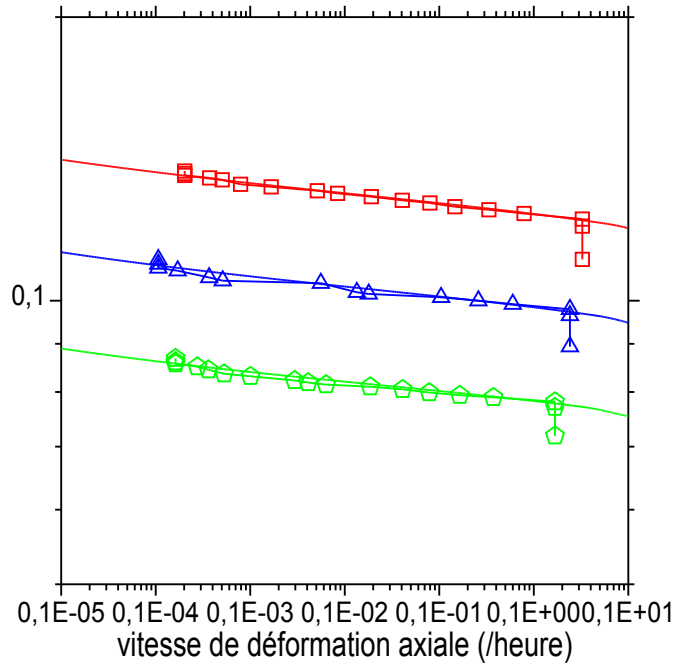
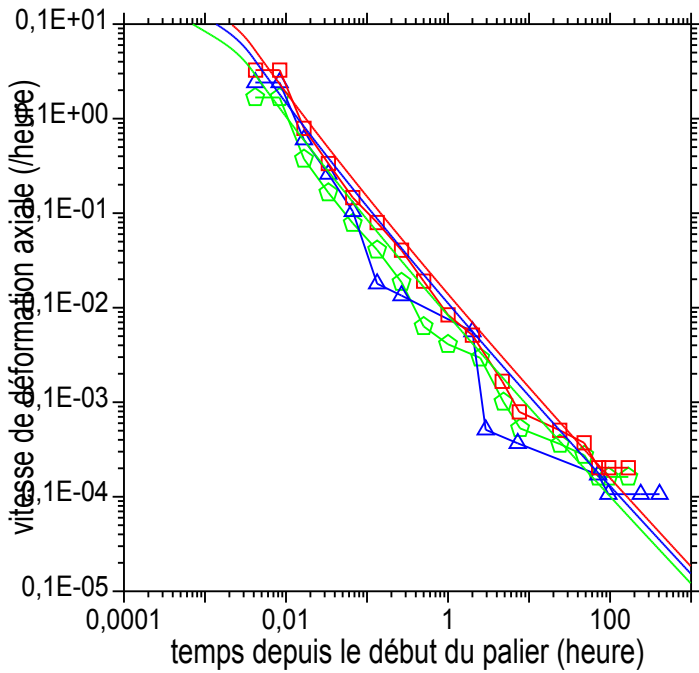
Essai oedométrique

A51 SISTERON GAP VALLEE DE L'AVANCE

E2

ARGILE GRISE

SC45
 6.00/6.50
 AV04-06



Legend:

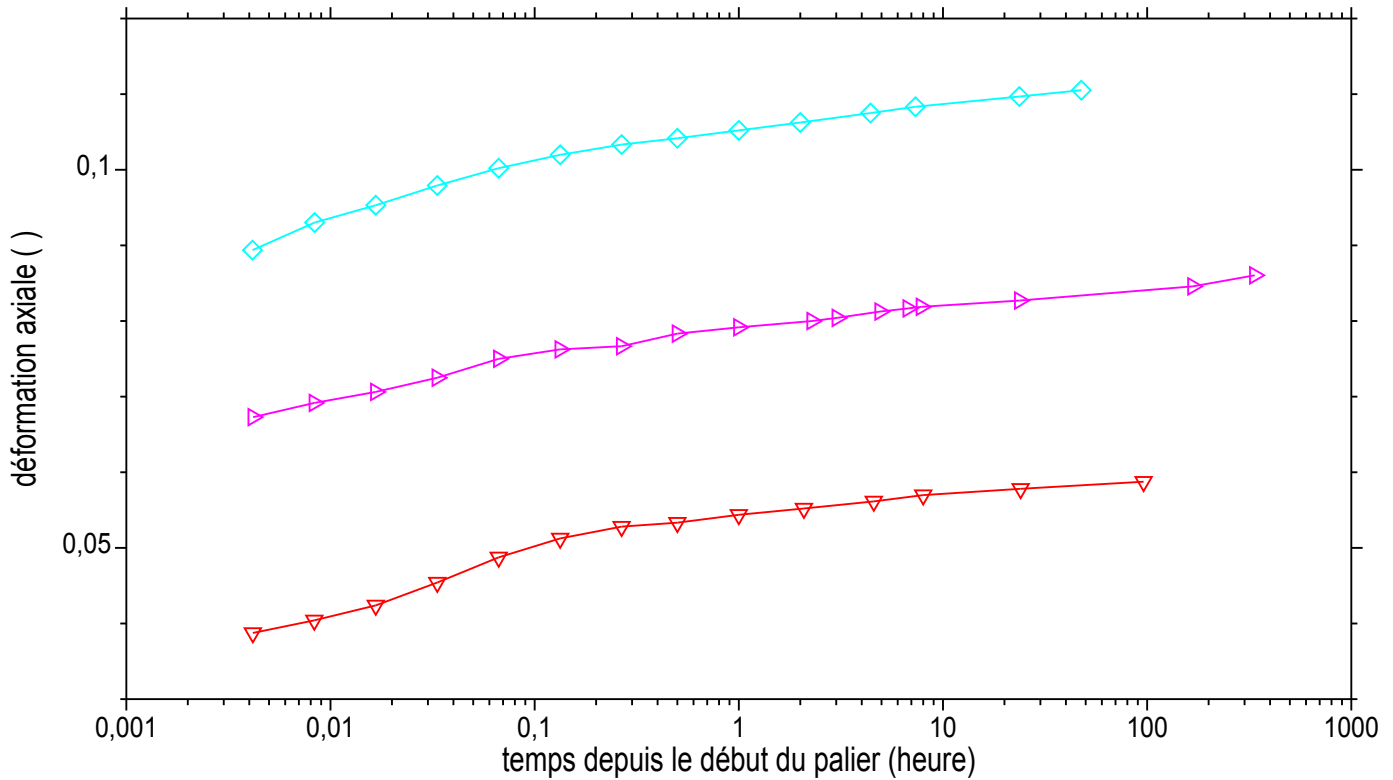
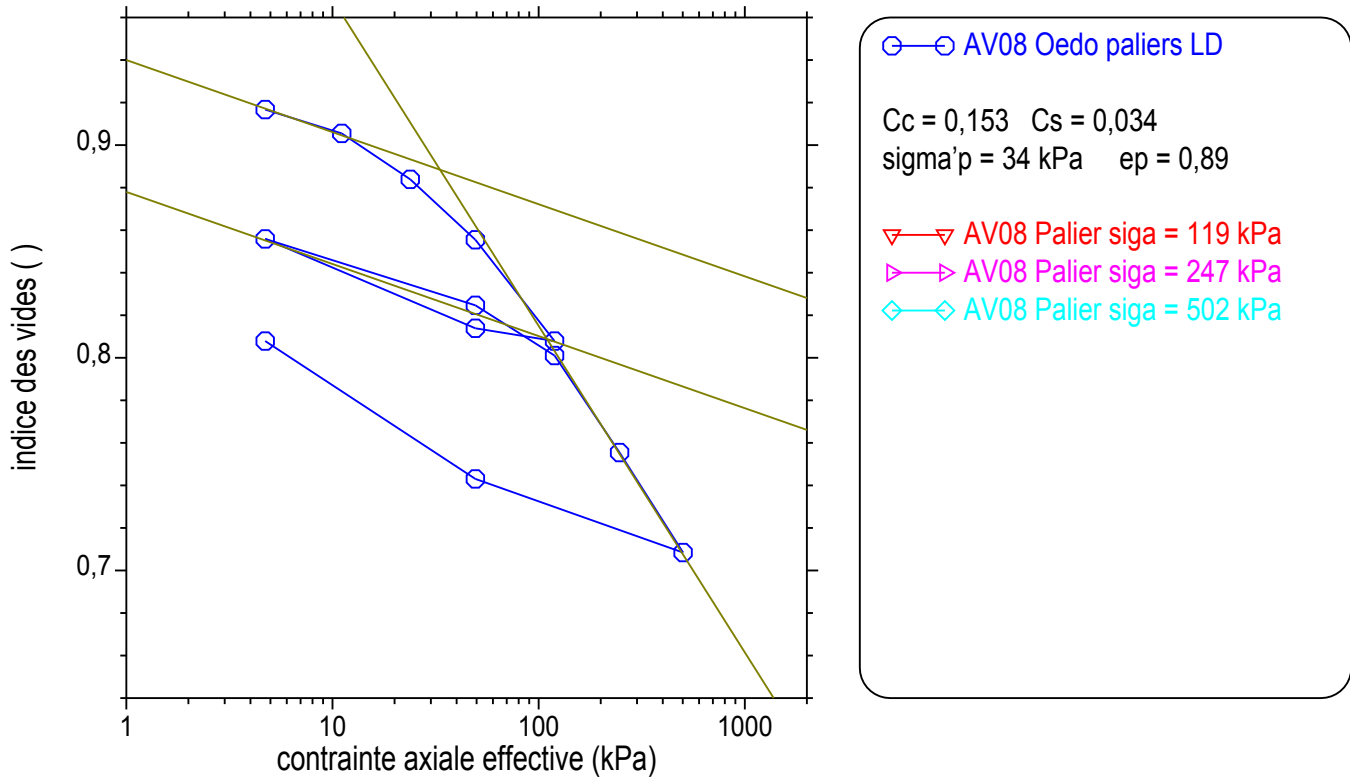
- ◇ AV04-06 Palier 170 kPa
- △ AV04-11 Palier 336 kPa
- AV04-12 Palier 680 kPa

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique par paliers

A51 SISTERON GAP GRENOBLE VALLEE DE L'AV
 E1
 ARGILE

SC42
 5.50/6.00
 AV08



Courbes contraintes déformations et déformation temps.

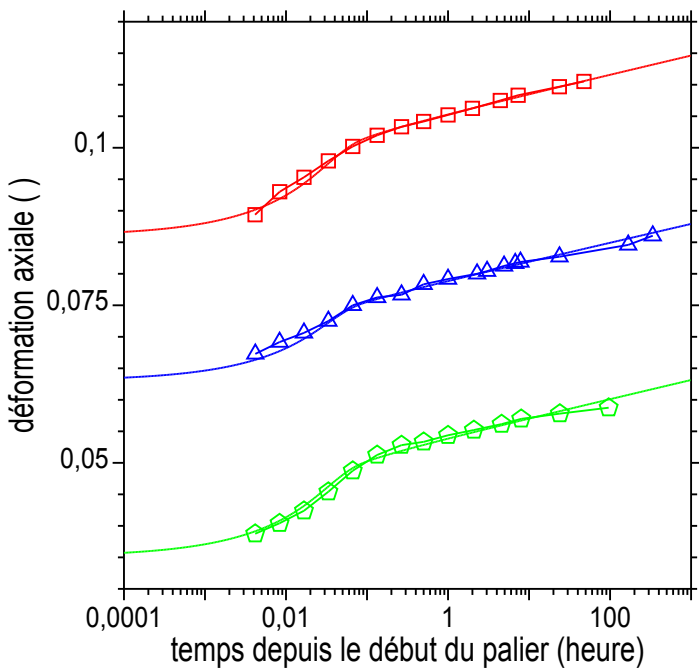
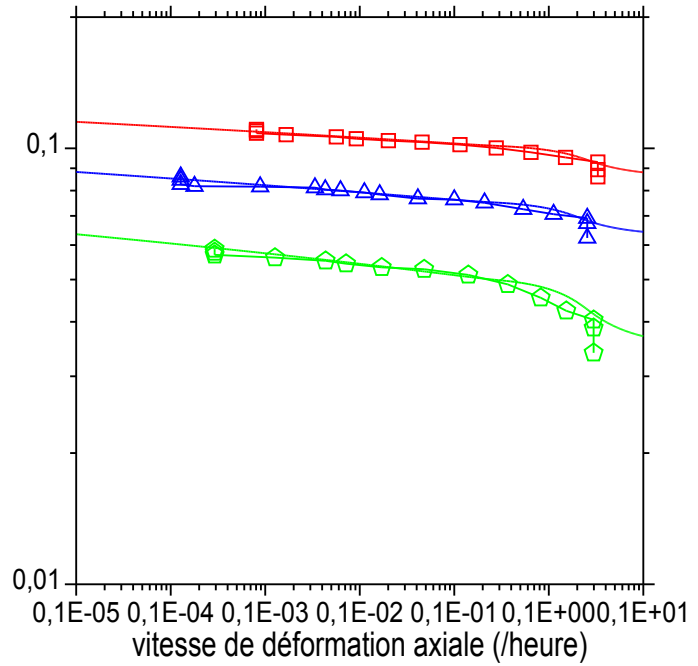
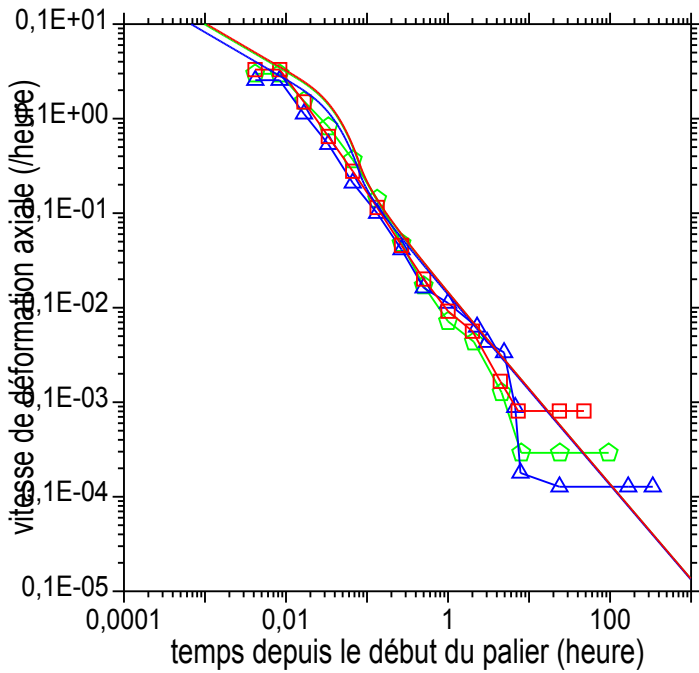
Essai oedométrique

A51 SISTERON GAP GRENOBLE VALLEE DE L'AV

E1

ARGILE

SC42
5.50/6.00
AV08-06



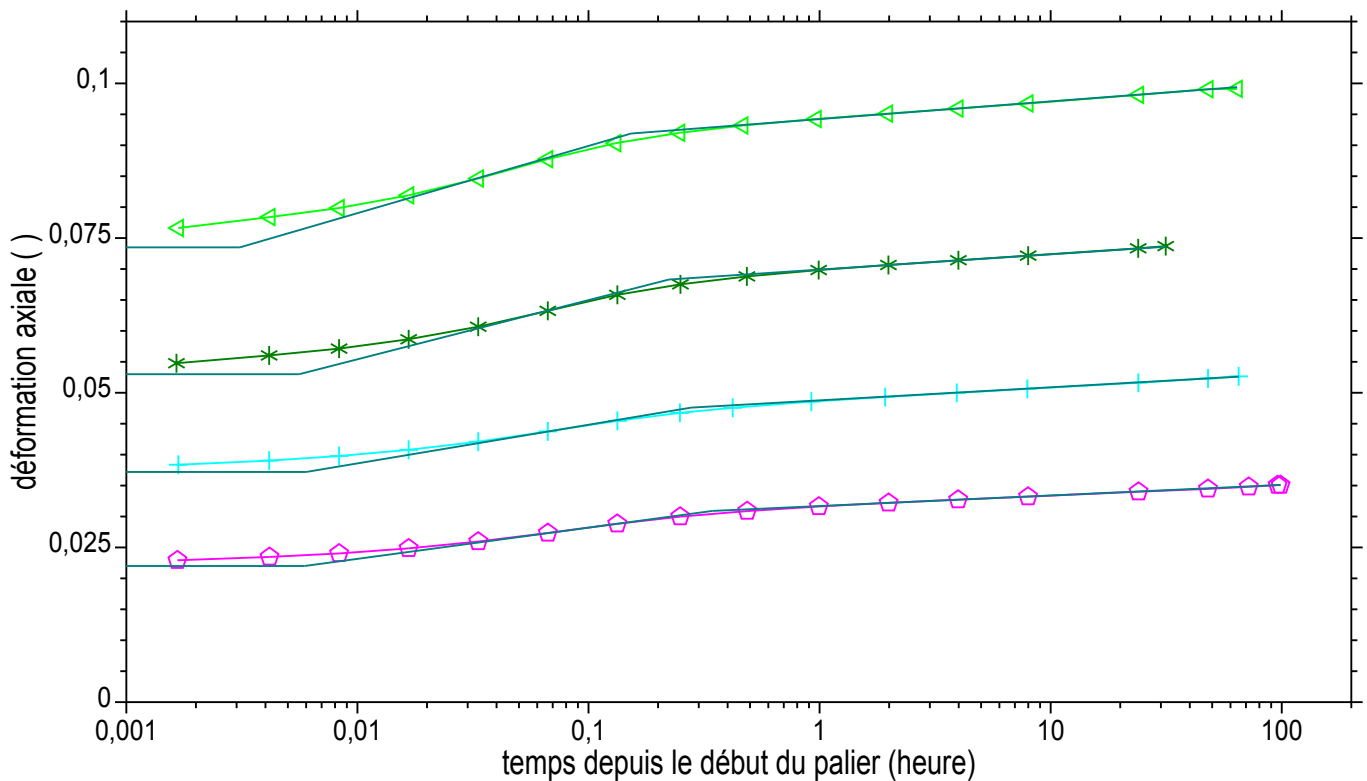
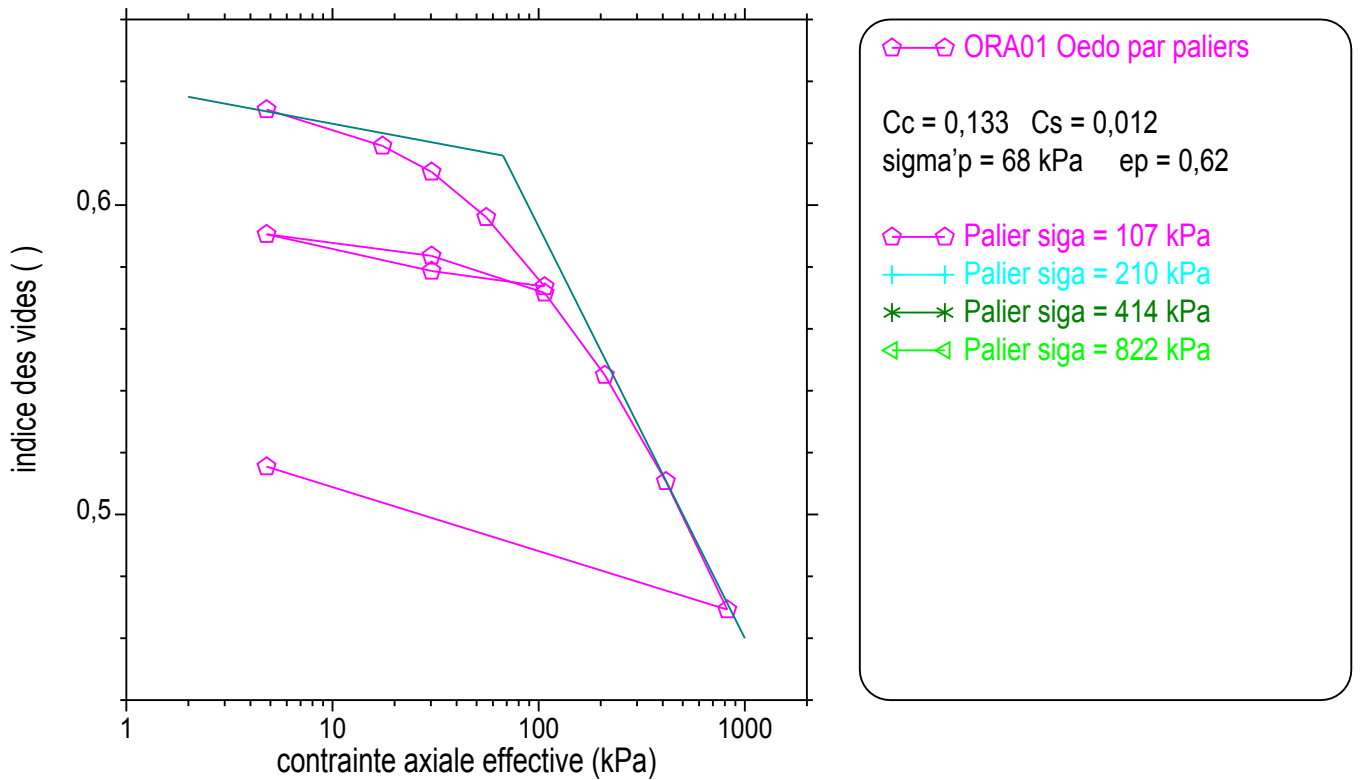
◇ AV08-06 Palier 119 kPa
△ AV08-11 Palier 247 kPa
□ AV08-12 Palier 502 kPa

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique par paliers

Déviation d'Orange
E1
Argile beige à grise

SC5
2,80 - 4,30 m
ORA01

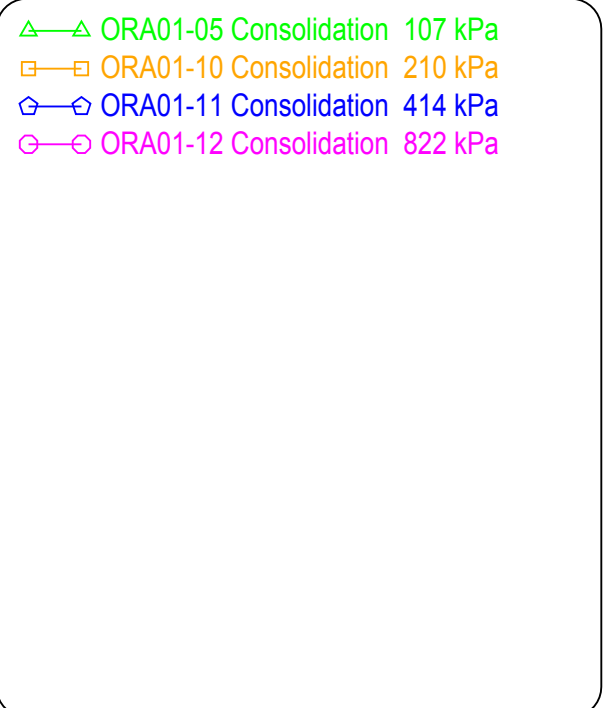
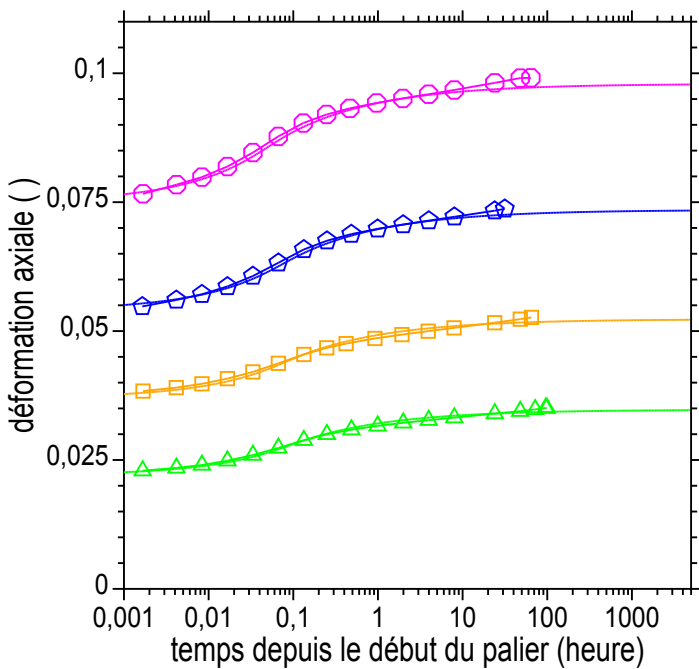
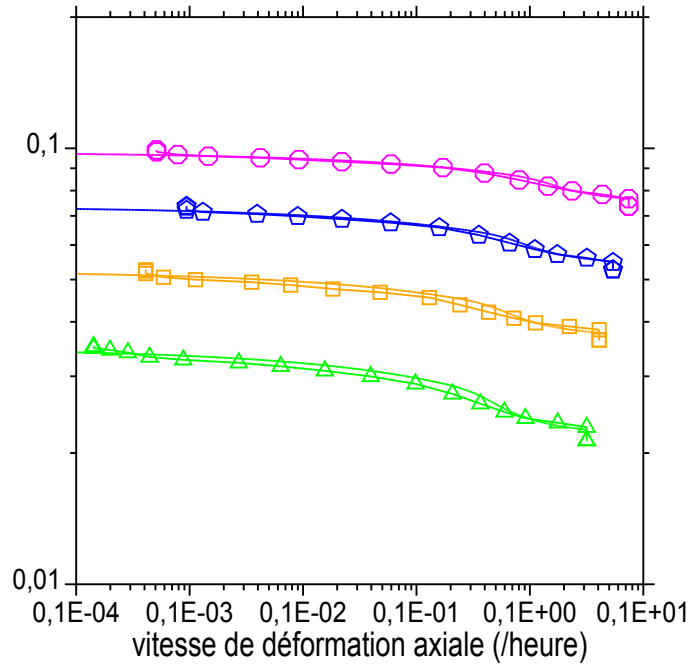
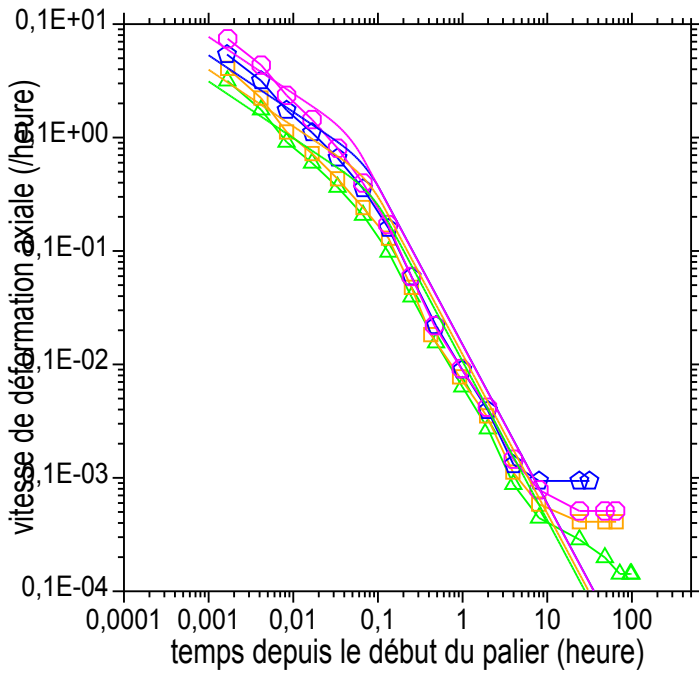


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique

Déviation d'Orange
E1
Argile beige à grise

SC5
2,80 - 4,30 m
ORA01-05

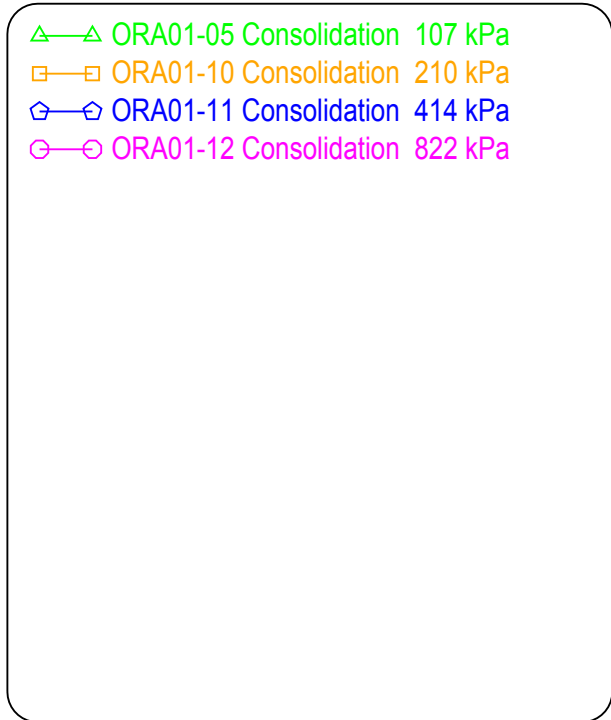
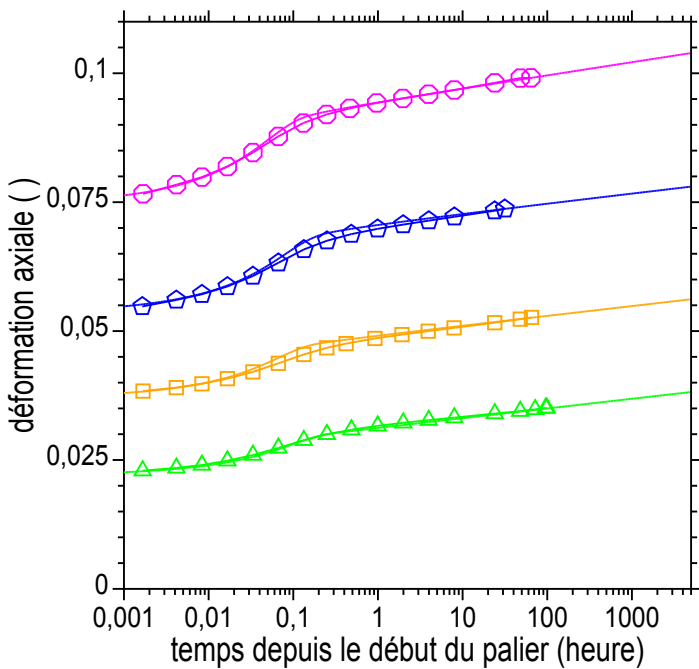
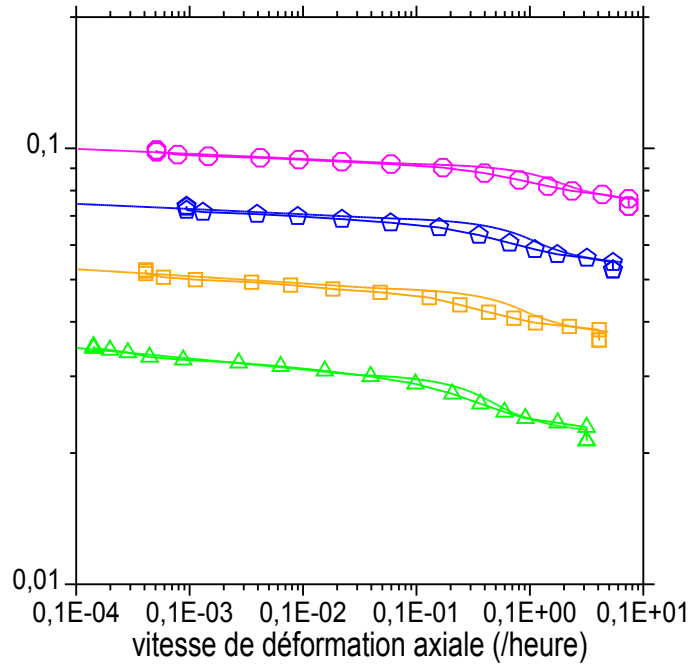
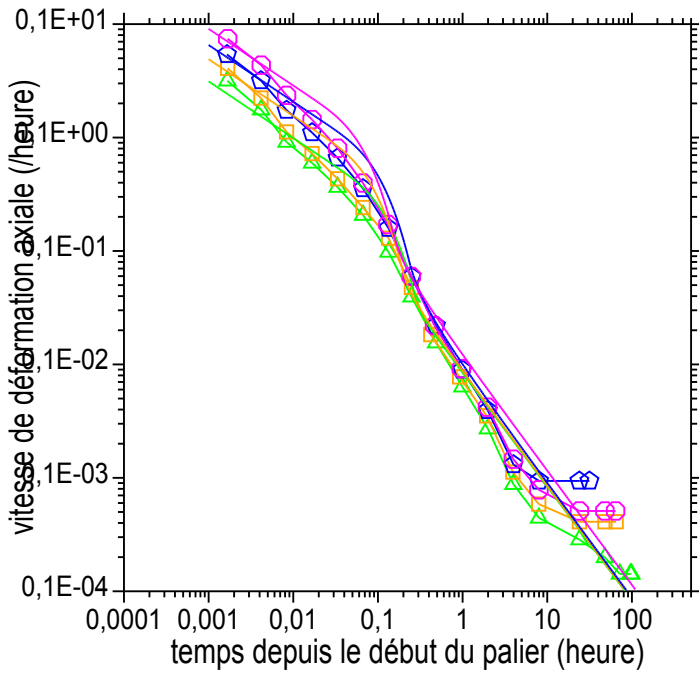


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique

Déviations d'Orange
 E1
 Argile beige à grise

SC5
 2,80 - 4,30 m
 ORA01-05

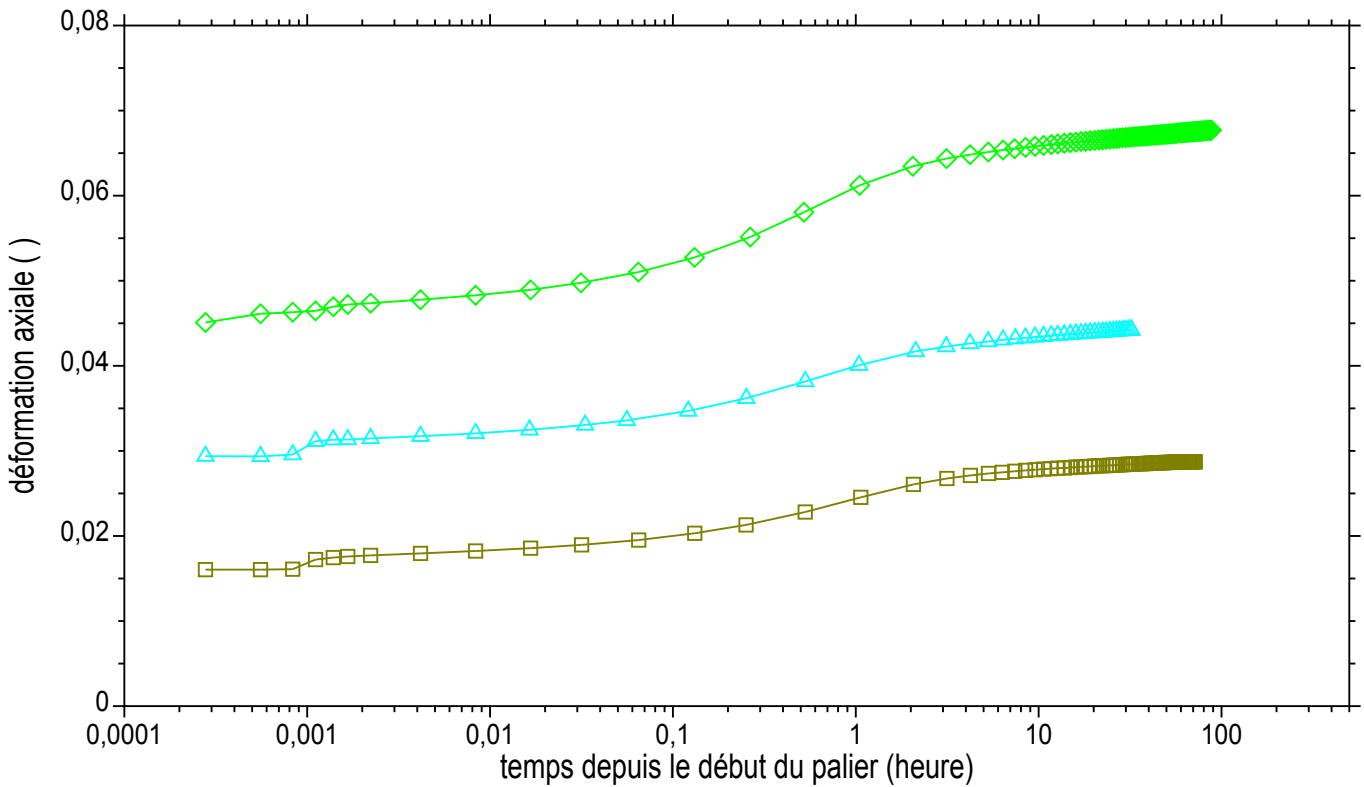
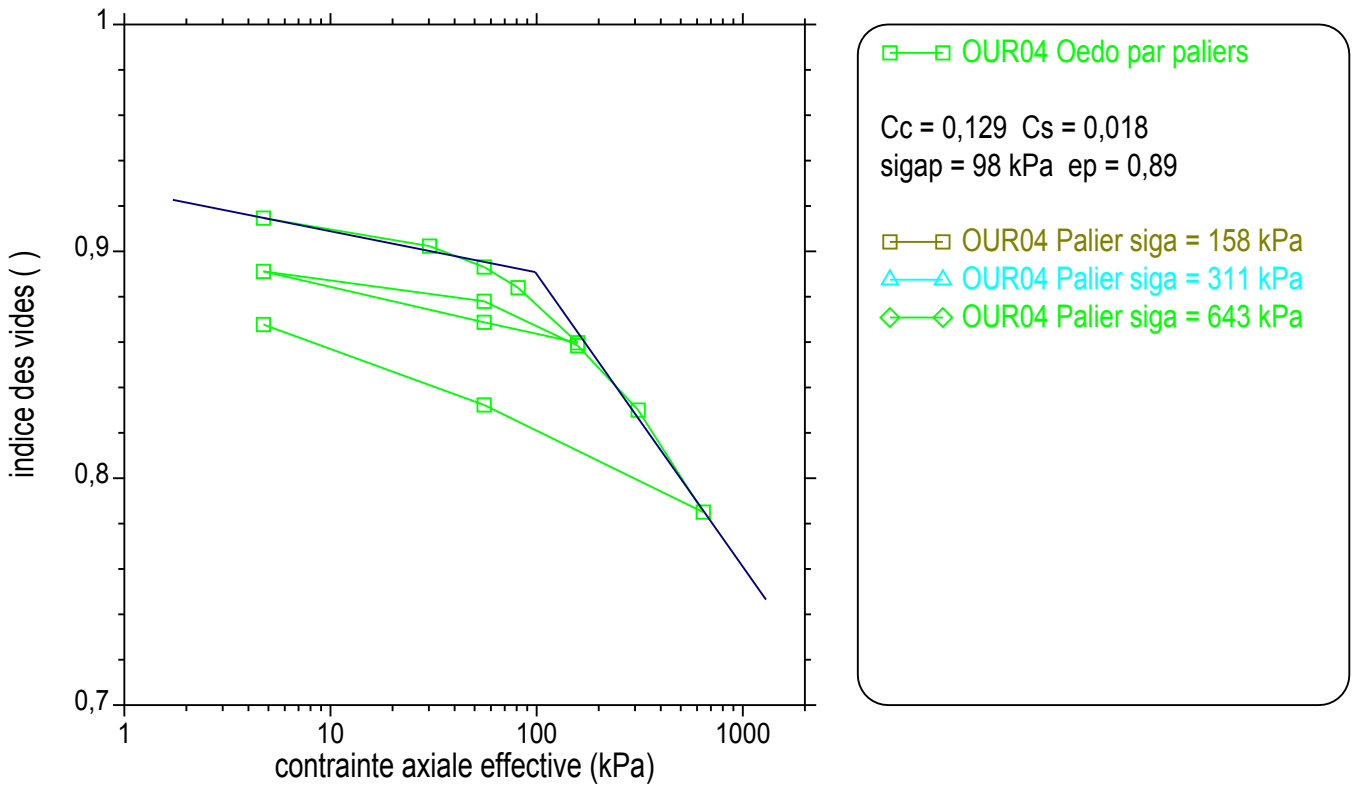


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique par paliers

RN88 - Tranchée couverte Ours-Mons
E2
Argile verte ferme

SC176+10
8,50 - 9,80 m
OUR04

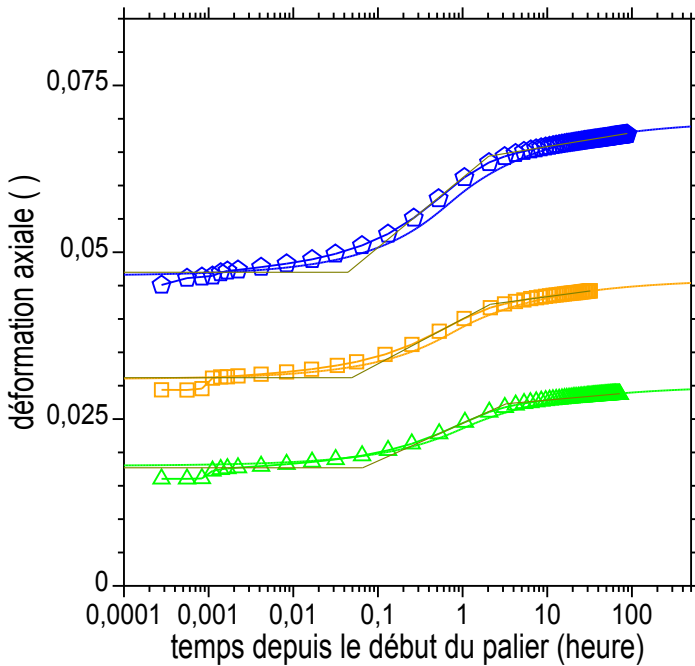
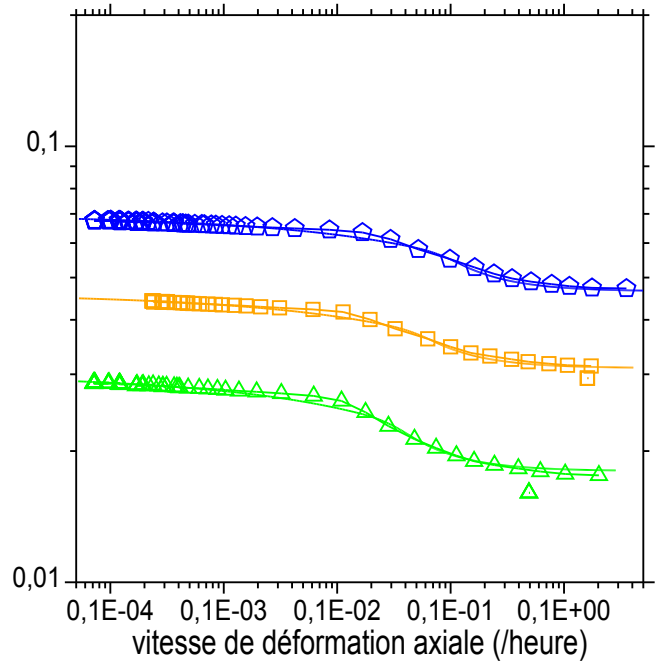
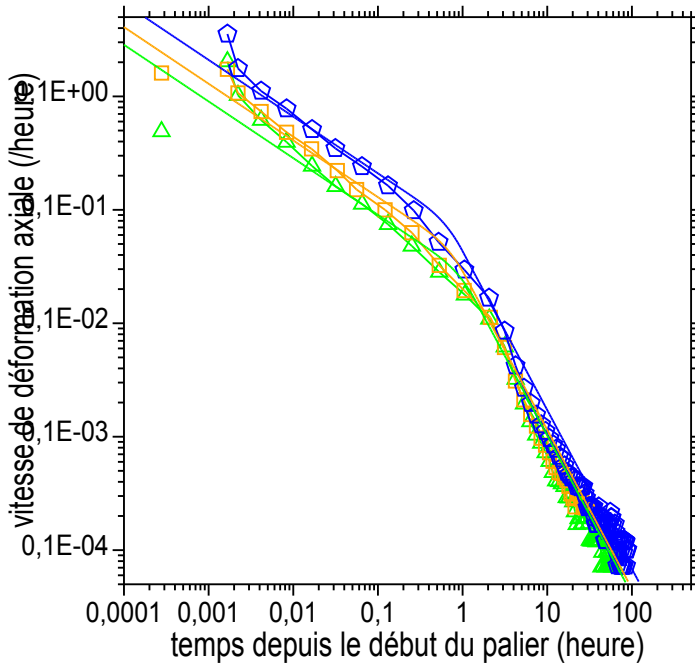


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique

RN88 - Tranchée couverte Ours-Mons
E2
Argile verte ferme

SC176+10
8,50 - 9,80 m
OUR04-06



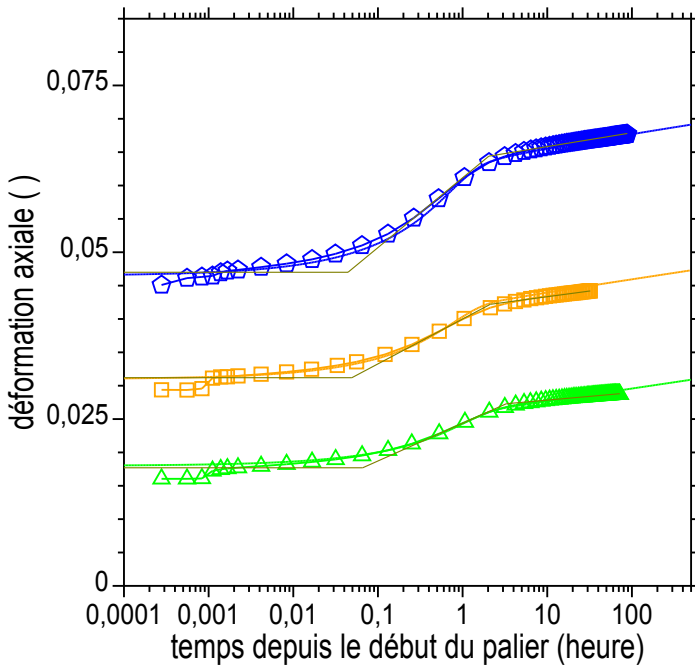
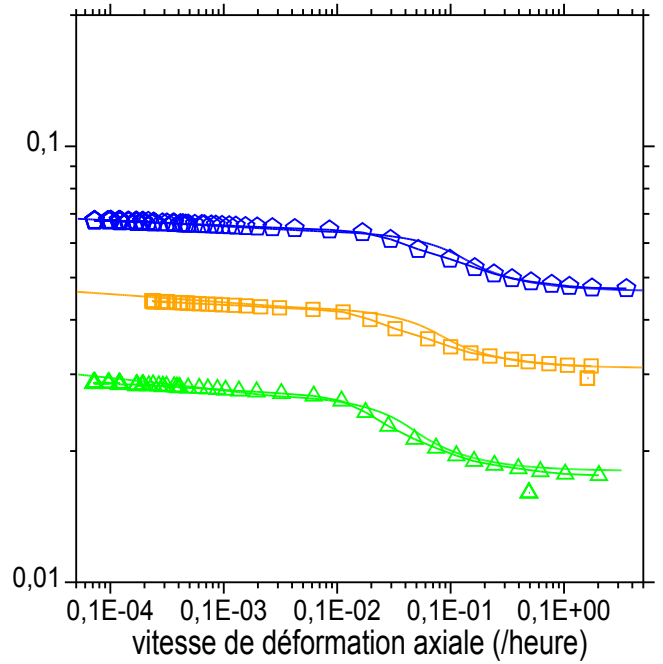
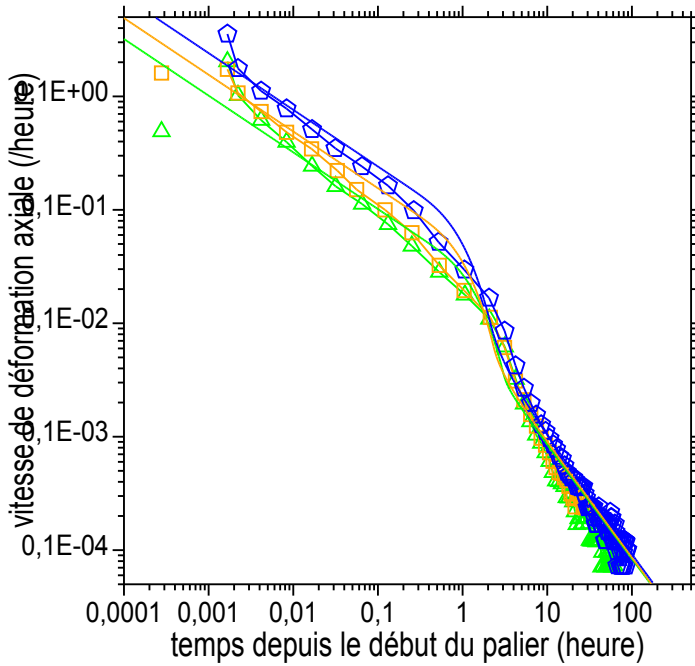
- △ OUR04-06 Palier 158 kPa $c_v = 0,16E-07$ m²/s
- OUR04-11 Palier 311 kPa $c_v = 0,23E-07$ m²/s
- ◇ OUR04-12 Palier 643 kPa $c_v = 0,23E-07$ m²/s

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique

RN88 - Tranchée couverte Ours-Mons
E2
Argile verte ferme

SC176+10
8,50 - 9,80 m
OUR04-06



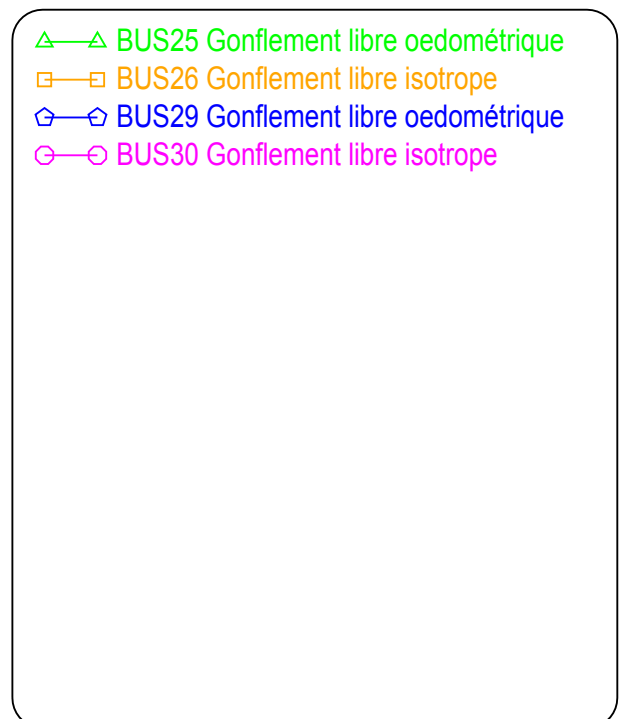
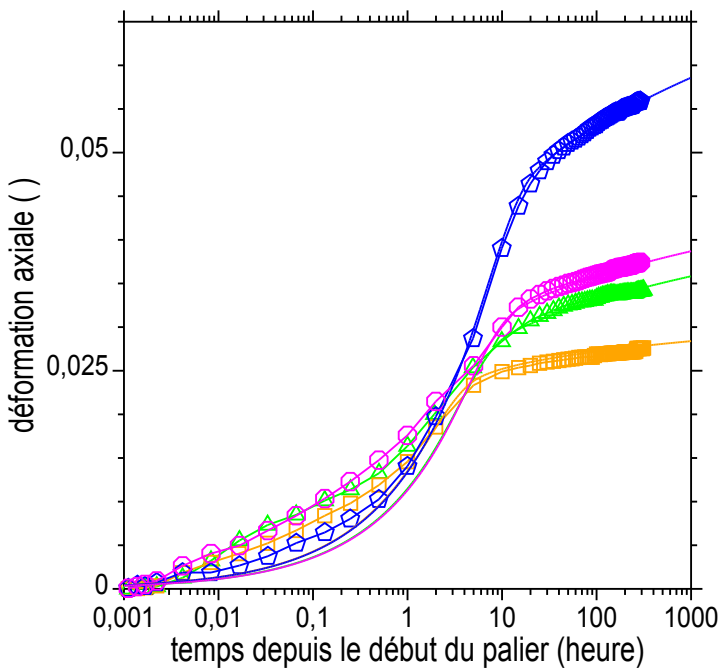
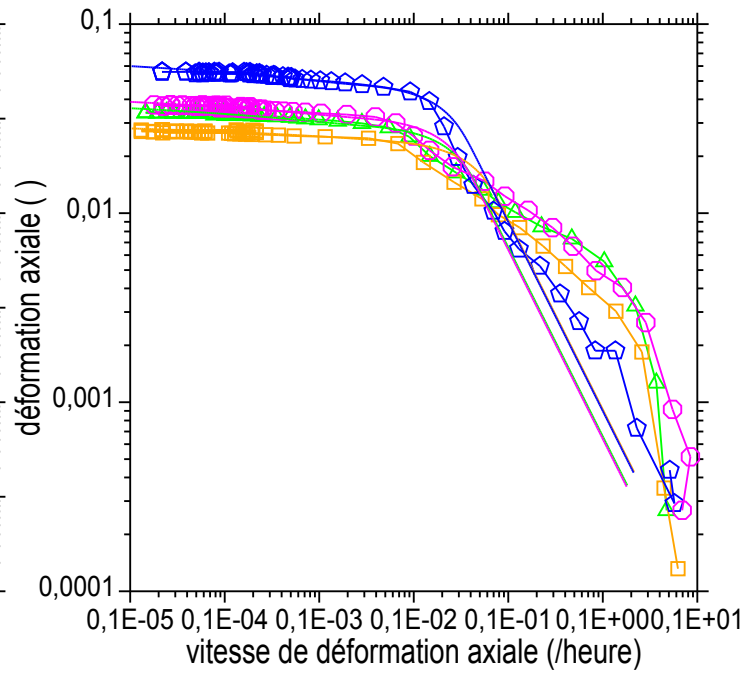
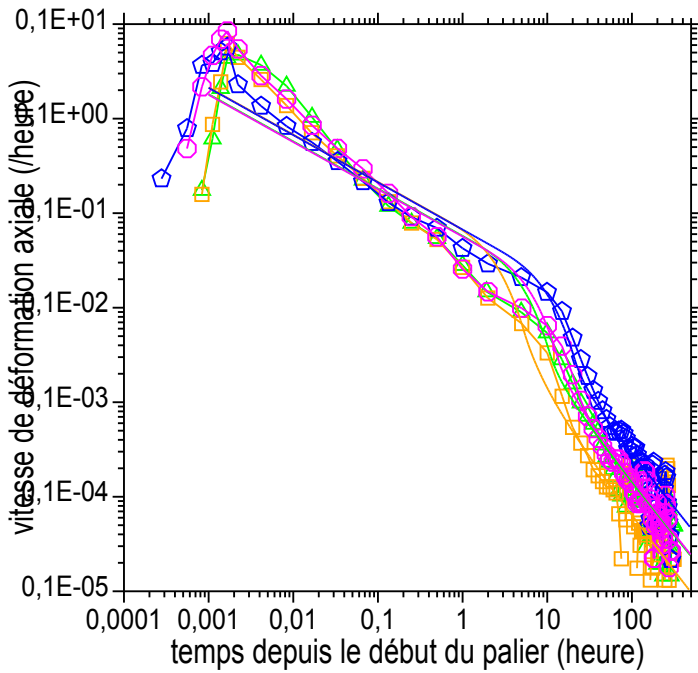
- △ OUR04-06 Palier 158 kPa $c_v = 0,16E-07$ m²/s
- OUR04-11 Palier 311 kPa $c_v = 0,23E-07$ m²/s
- ◇ OUR04-12 Palier 643 kPa $c_v = 0,23E-07$ m²/s

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de gonflement libre

Tunnel d'Arbus
 E9
 Marne peu silteuse ocre jaune

AR1-06
 92,63 - 93,61 m
 BUS25

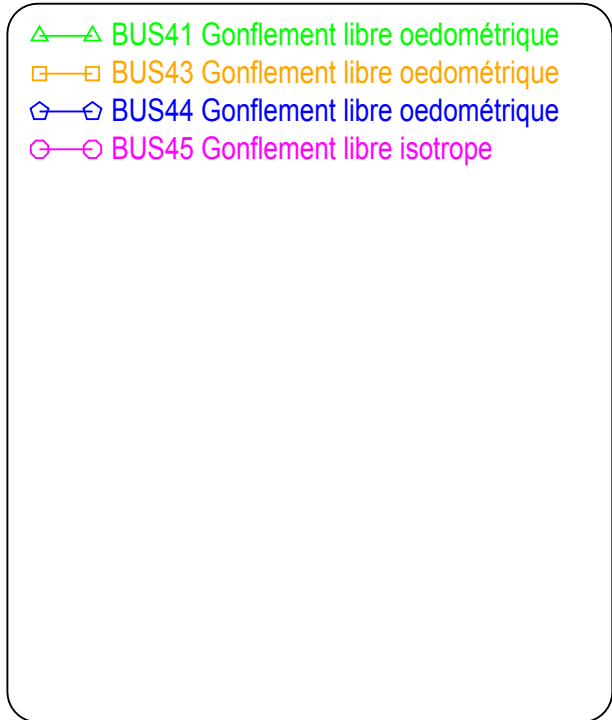
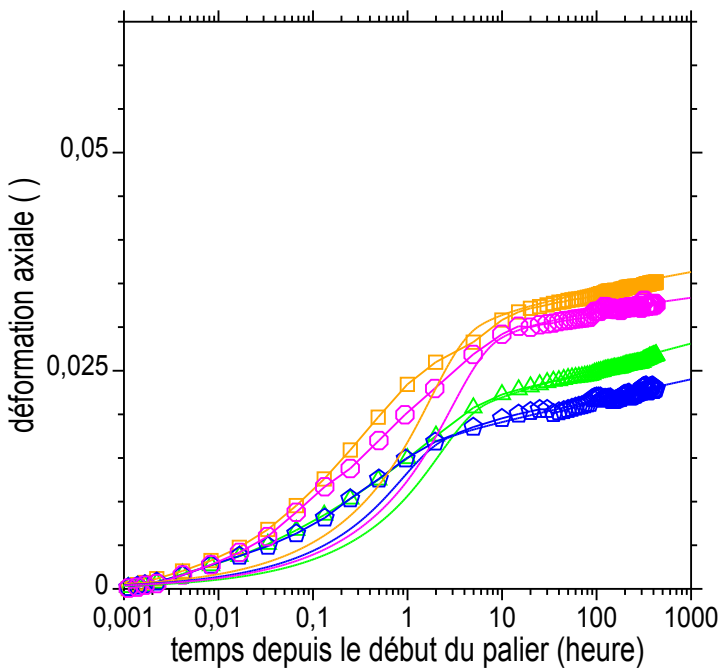
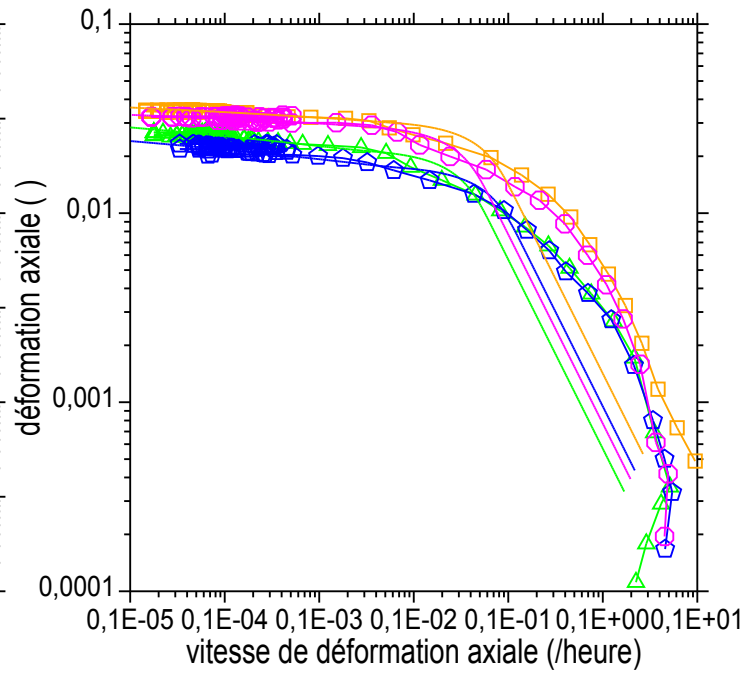
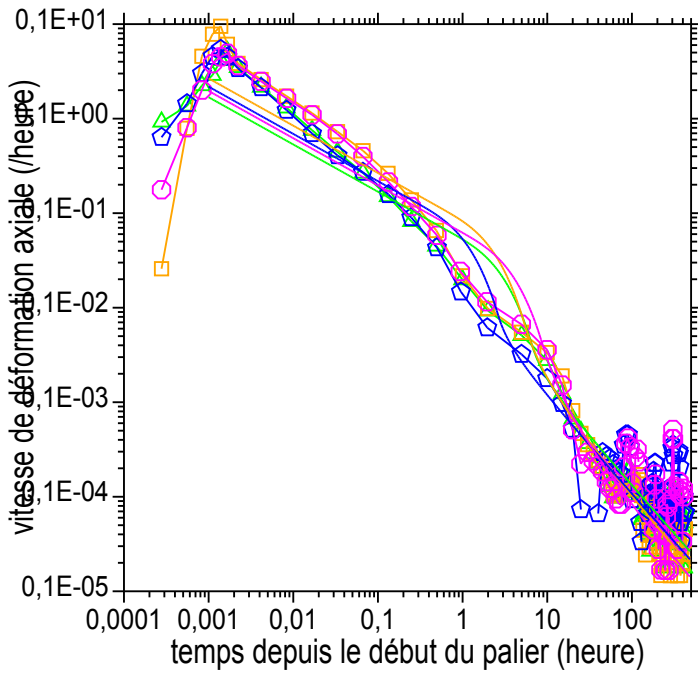


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essais de gonflement libre

Tunnel d'Arbus
 E15
 Marne argileuse beige marron compacte

AR3-06
 68,64 - 69,48 m
 BUS41

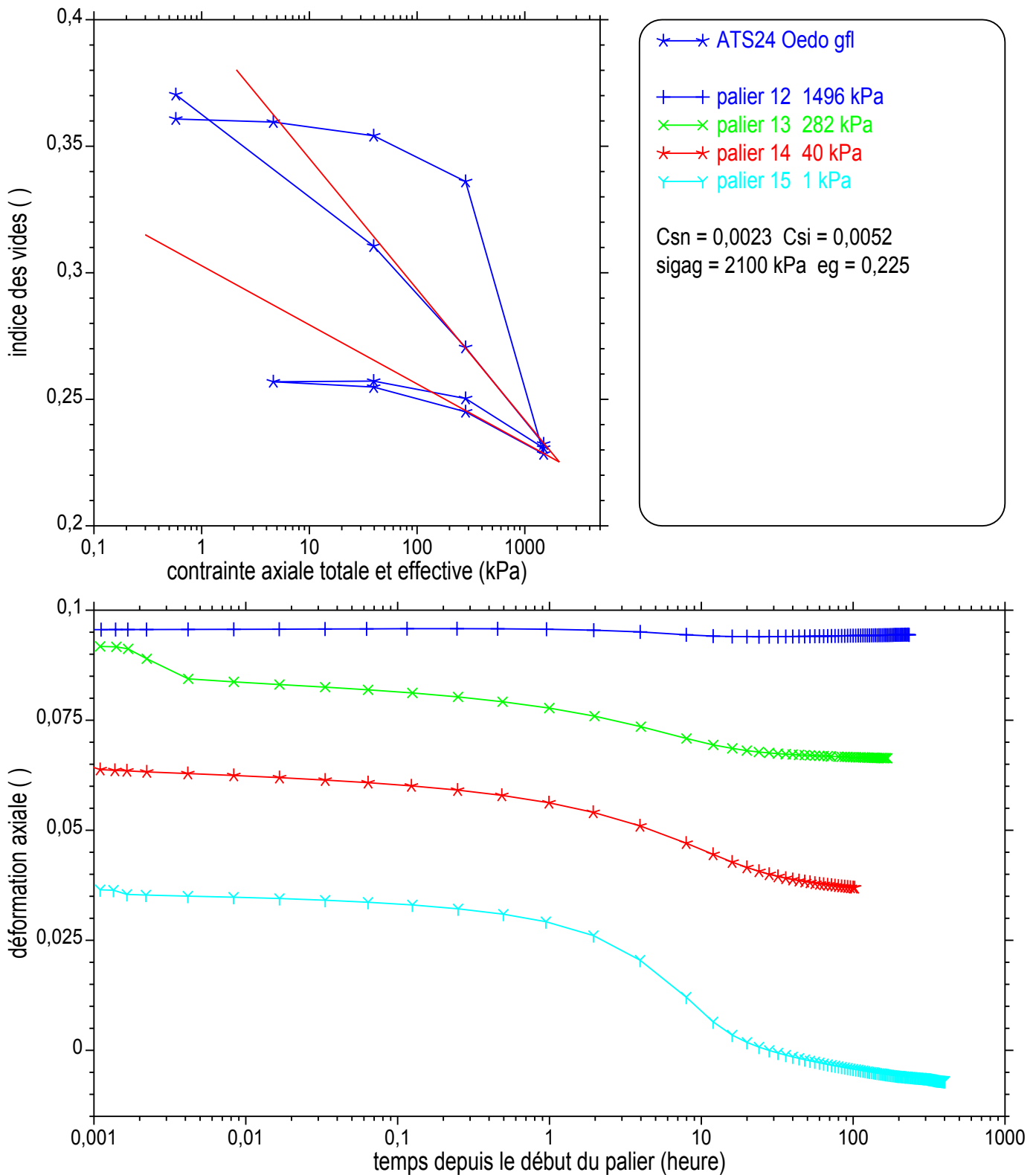


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai de gonflement par paliers

A41 Tunnel du Mont Sion
 E
 Marne GRIS beige verdâtre

07-193-0056-TO
 0,24 m
 ATS24

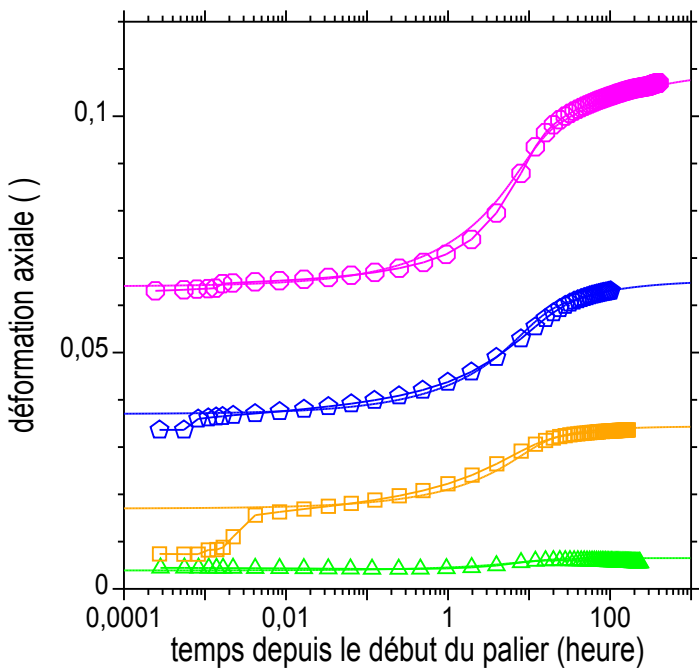
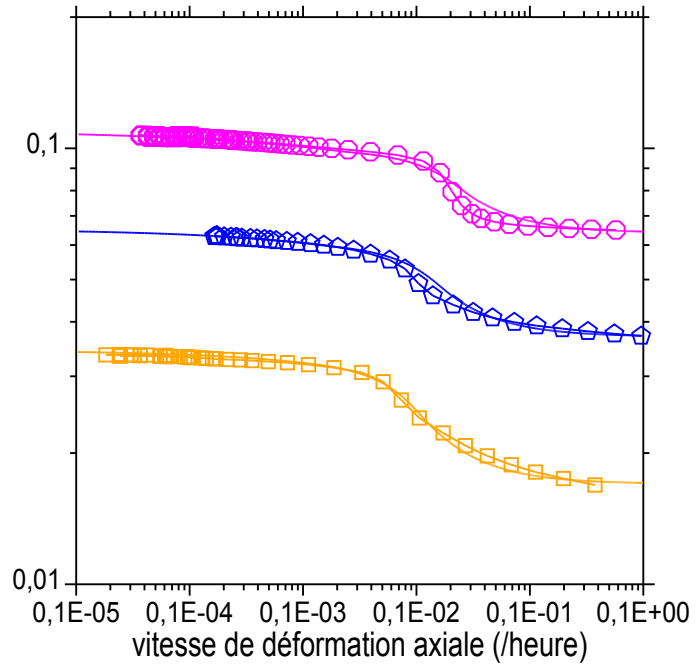
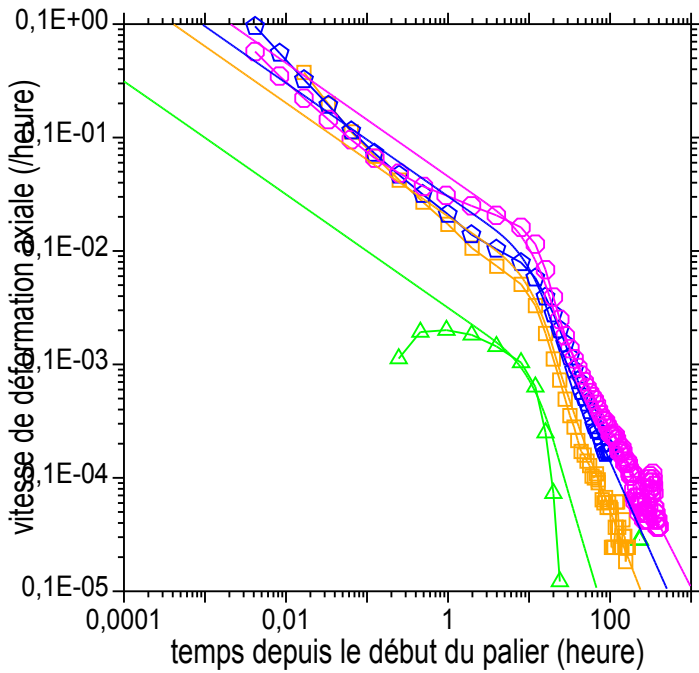


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

A41 Tunnel du Mont Sion
 E
 Marne GRIS beige verdâtre

07-193-0056-TO
 0,24 m
 ATS24-12



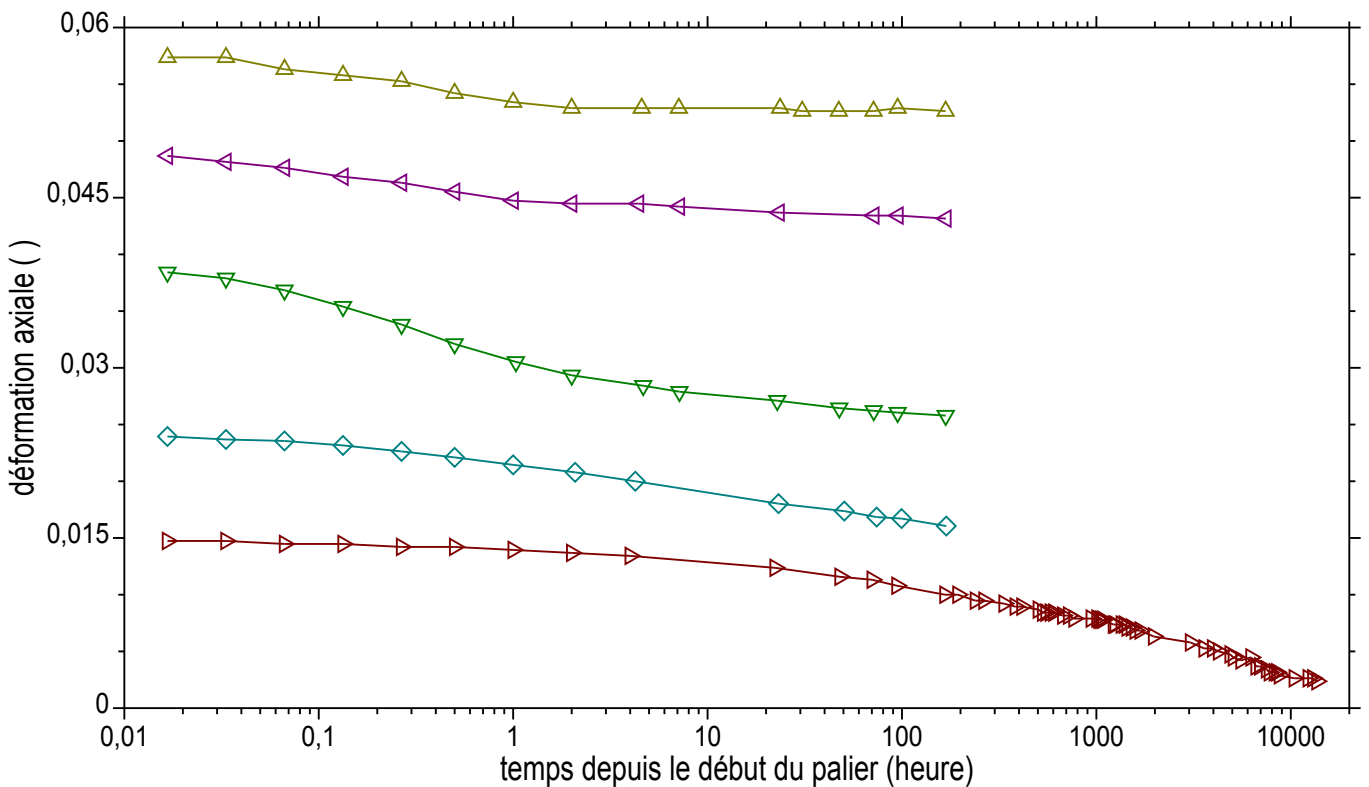
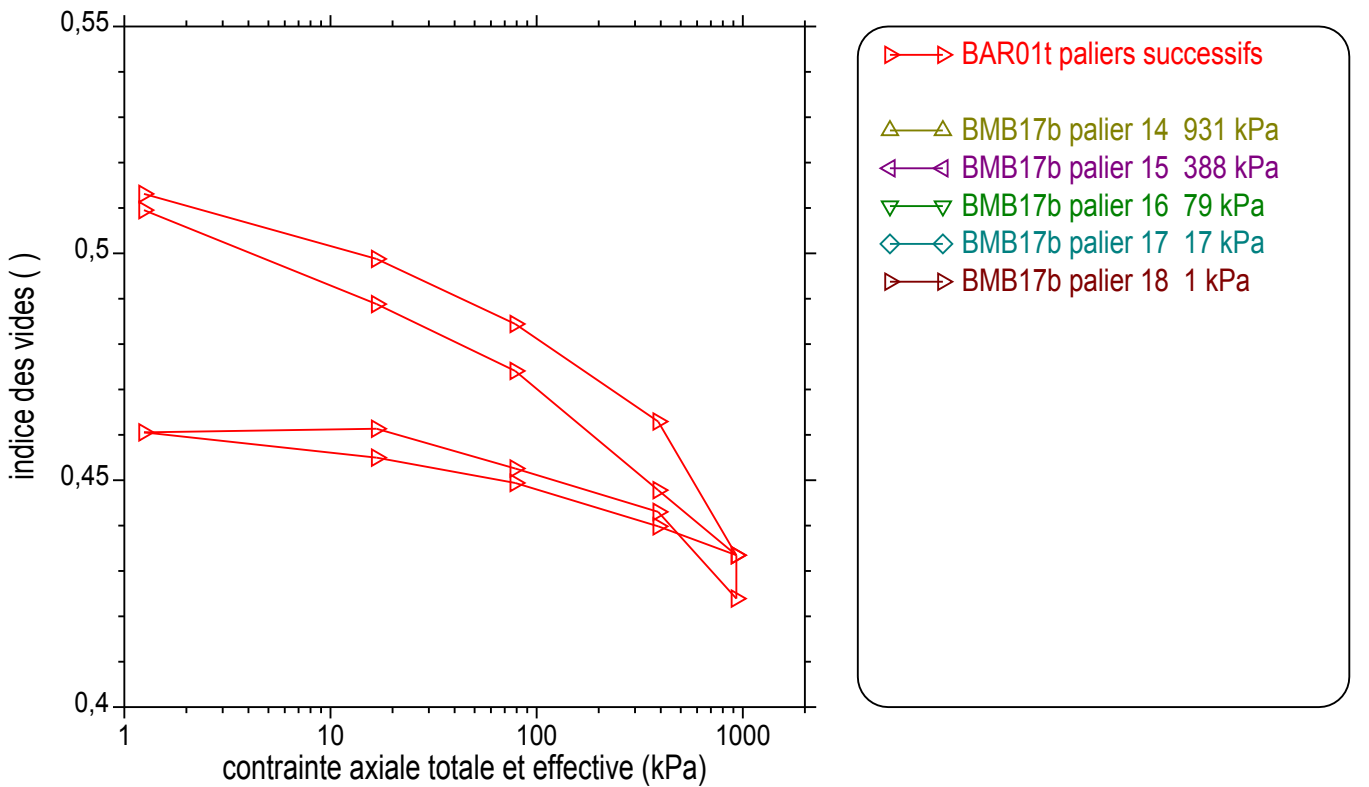
- △—△ ATS24-12 palier 1496 kPa mise en eau
- ATS24-13 palier 269 kPa
- ◇—◇ ATS24-14 palier 44 kPa
- ATS24-15 palier 1 kPa

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique à volume constant

Parking Félix Baret
E
Marne du Stampien

Puits 2
0,85 1,00 m
BAR01t

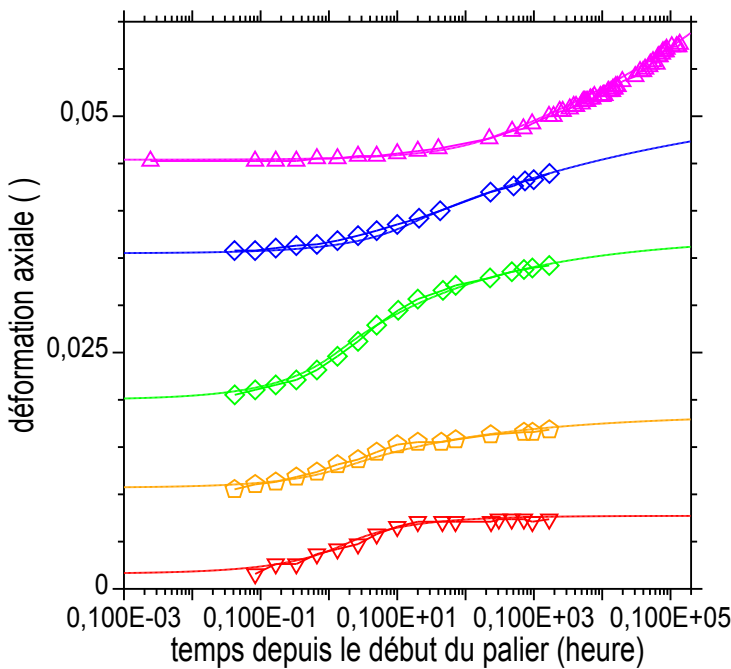
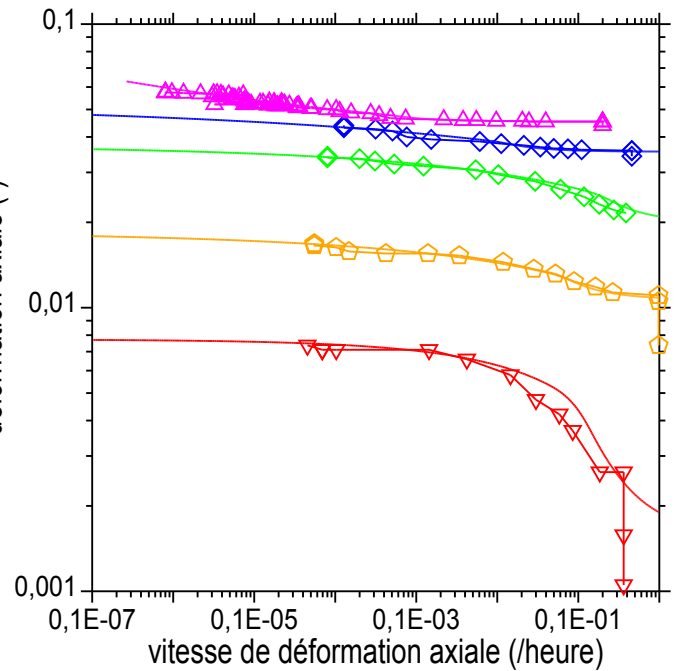
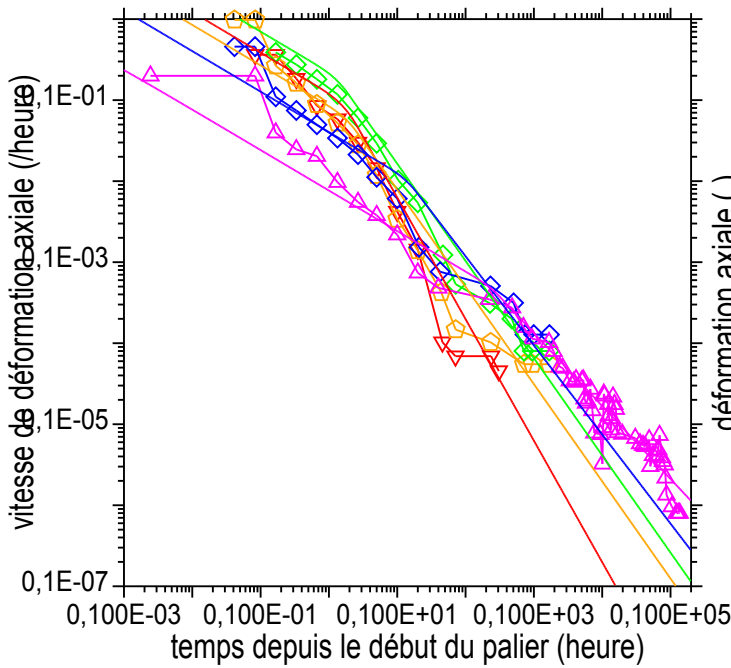


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

Parking Félix Baret
 E
 Marne du Stampien

Puits 2
 0,85 1,00 m
 BAR01t-14



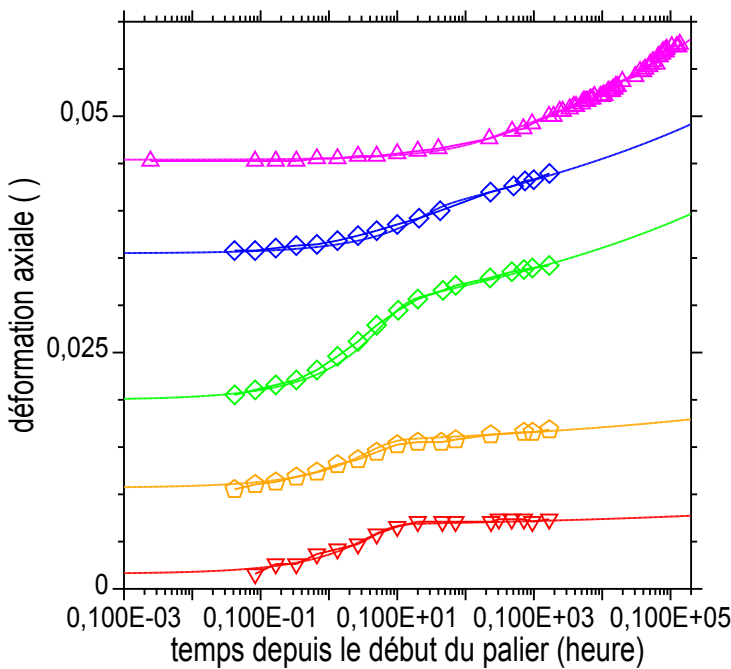
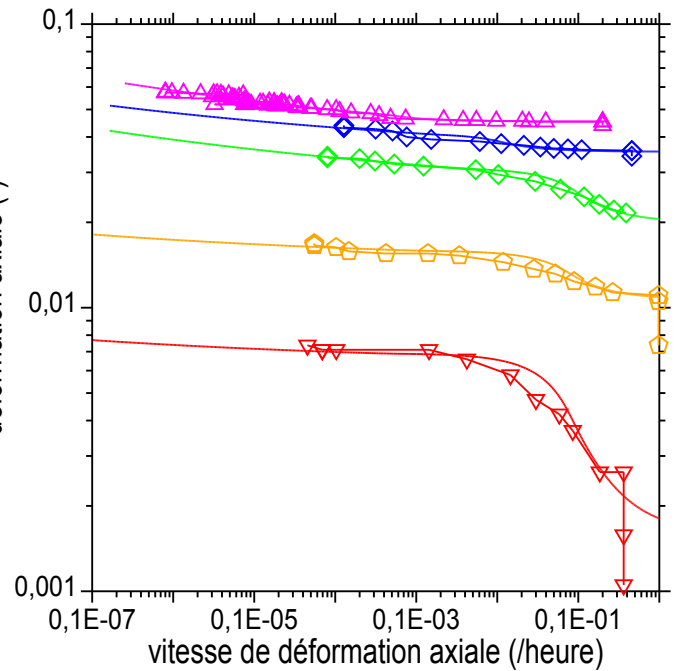
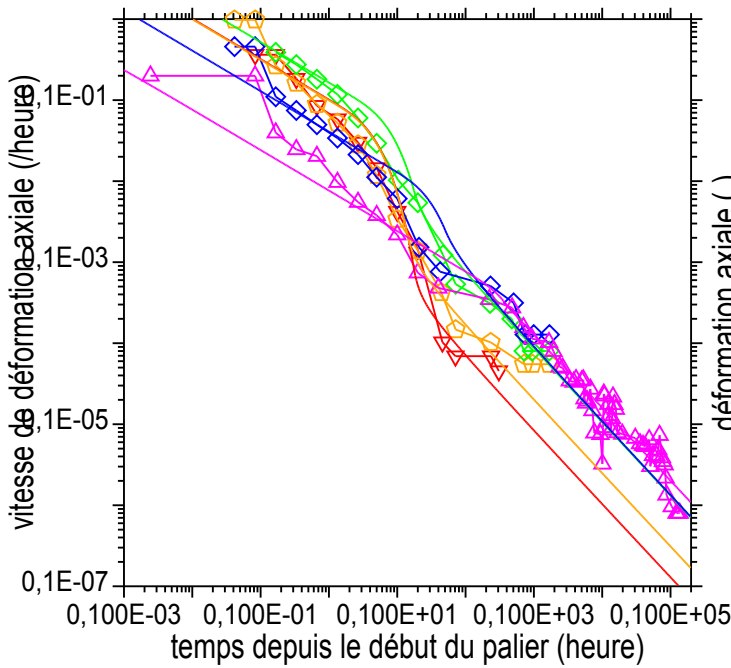
- ▽ BAR01t-14 Gonflement 930 kPa
- ◇ BAR01t-15 Gonflement 388 kPa
- ◇ BAR01t-16 Gonflement 79 kPa
- ◇ BAR01t-17 Gonflement 17 kPa
- △ BAR01t-18 Gonflement 1 kPa

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

Parking Félix Baret
 E
 Marne du Stampien

Puits 2
 0,85 1,00 m
 BAR01t-14



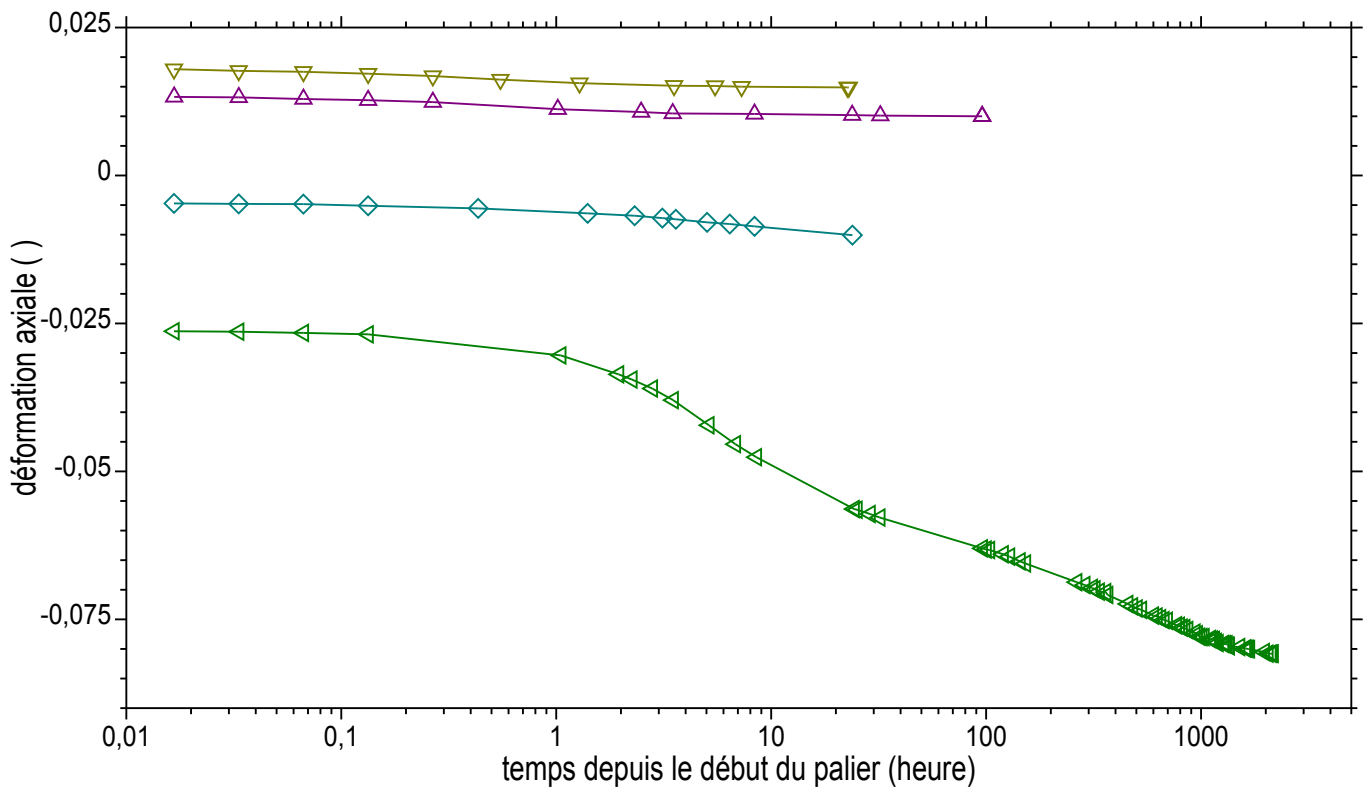
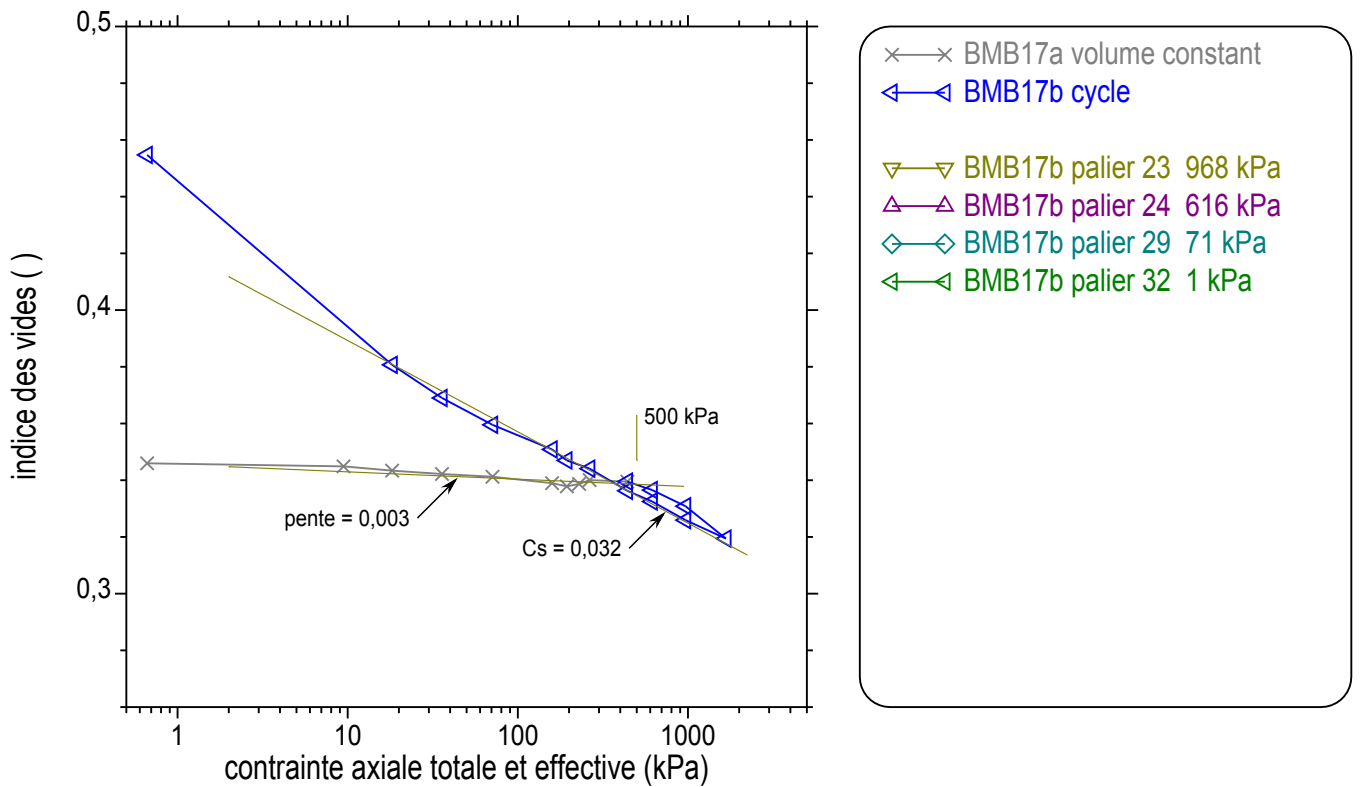
- ▽ BAR01t-14 Gonflement 930 kPa
- ◇ BAR01t-15 Gonflement 388 kPa
- ◇ BAR01t-16 Gonflement 79 kPa
- ◇ BAR01t-17 Gonflement 17 kPa
- △ BAR01t-18 Gonflement 1 kPa

Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique à volume constant

Barreau B55
 E11
 Marne

SC33
 35,80 - 36,75 m
 BMB17a

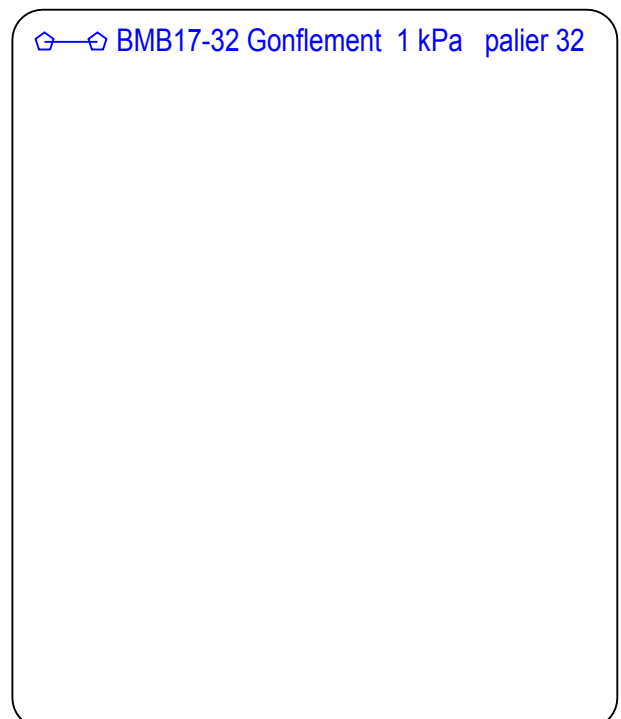
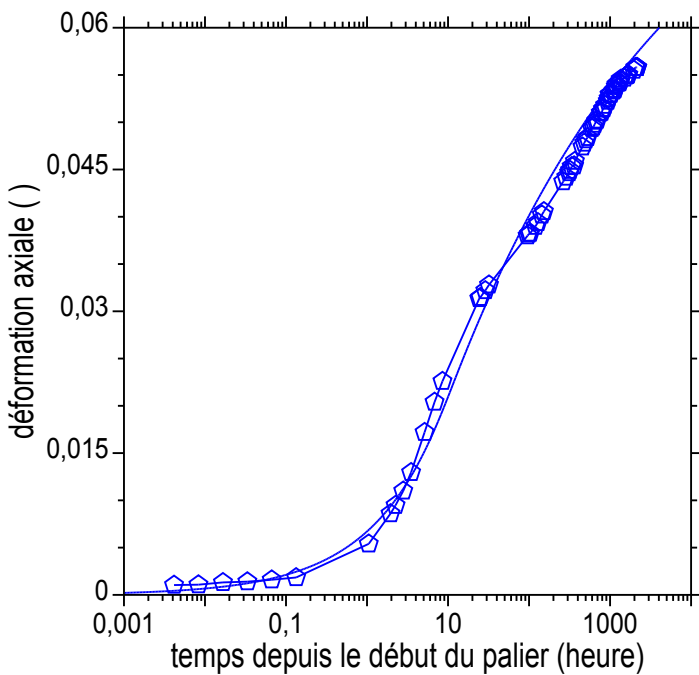
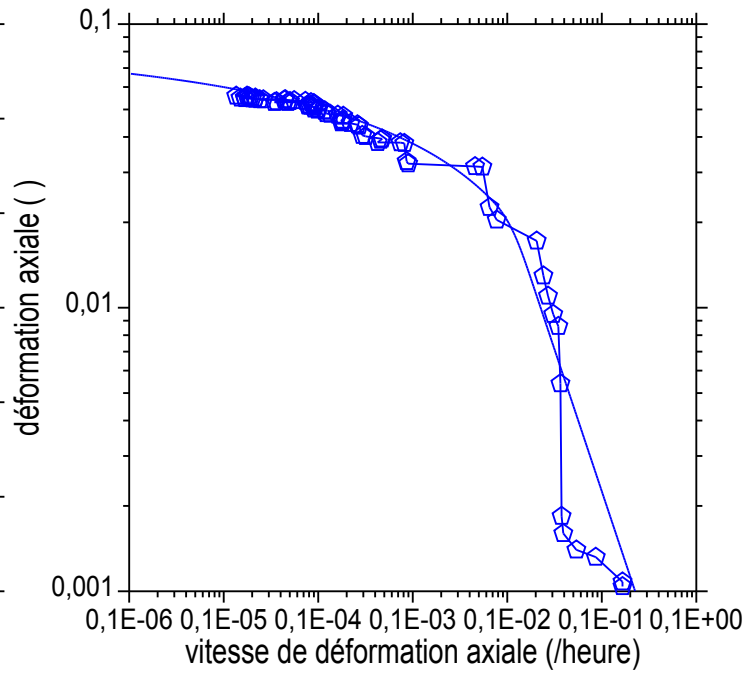
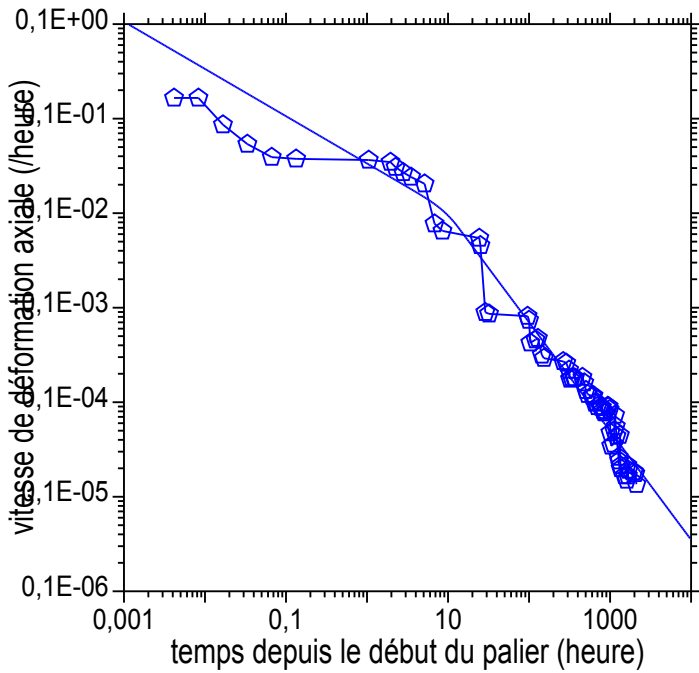


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

Barreau B55
E11
Marne

SC33
35,80 - 36,75 m
BMB17-32

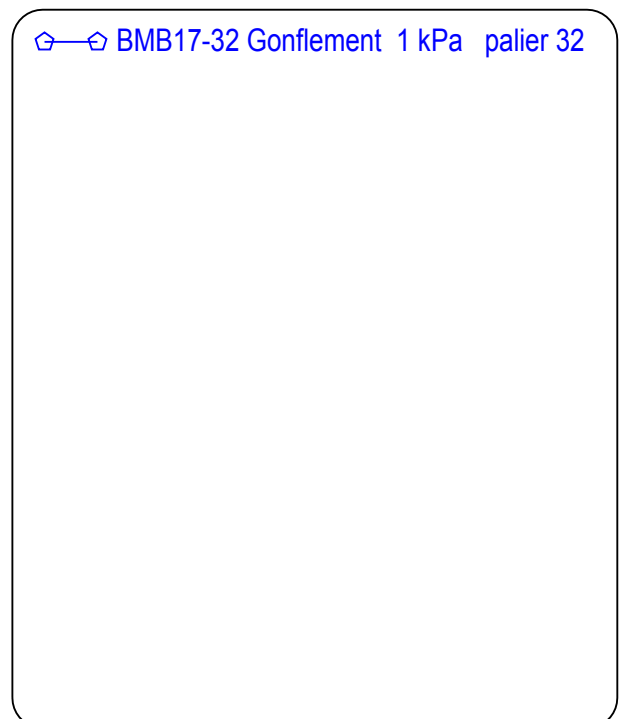
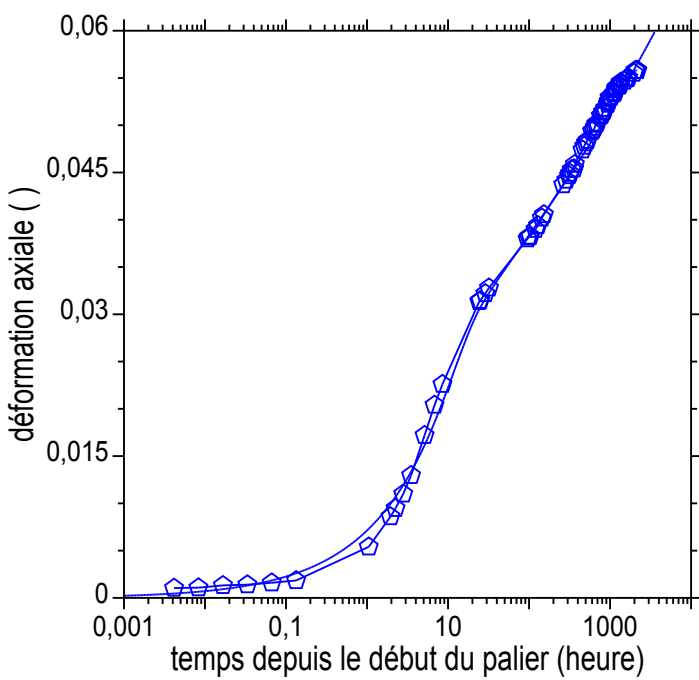
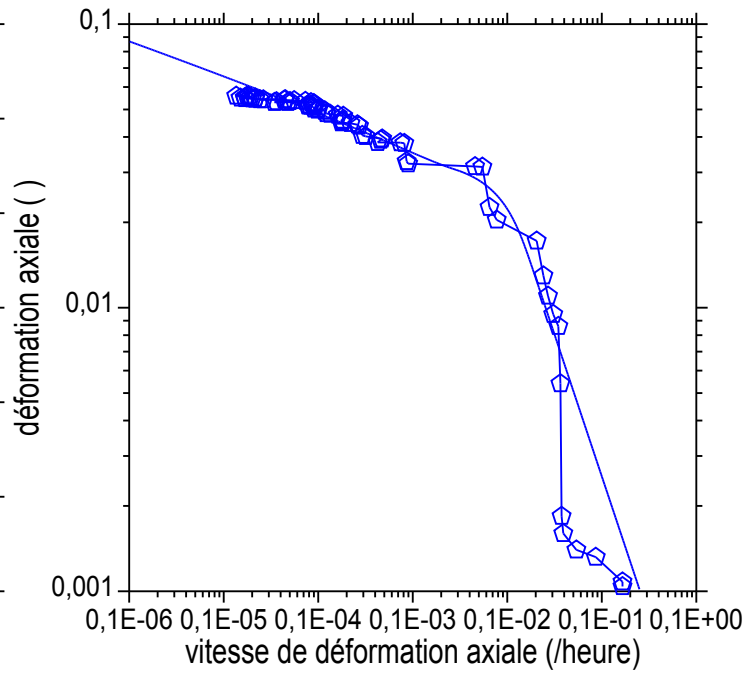
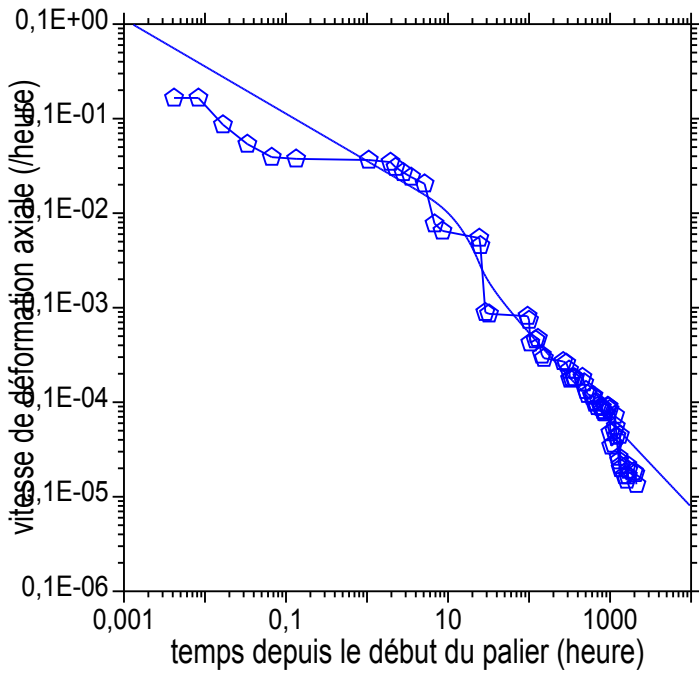


Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

Barreau B55
E11
Marne

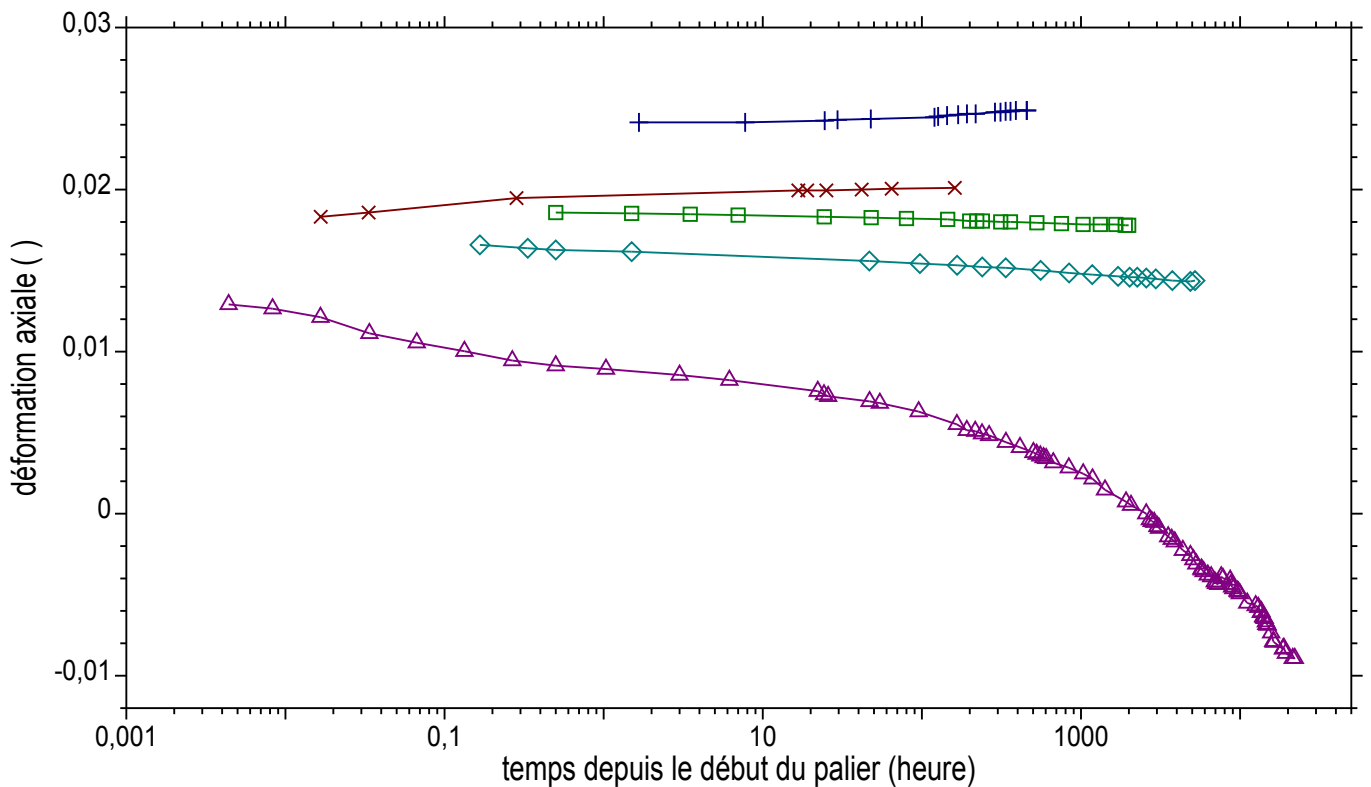
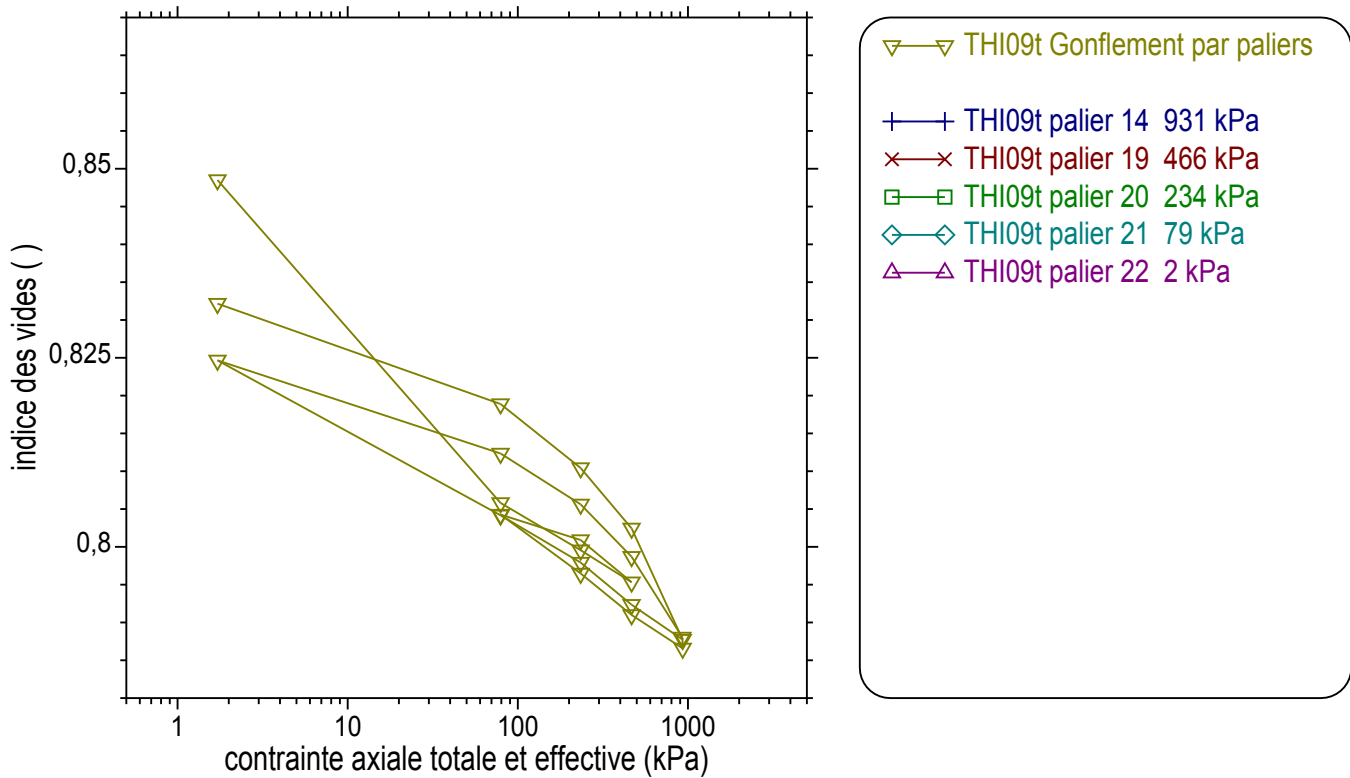
SC33
35,80 - 36,75 m
BMB17-32



Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement par paliers

Galerie de Thiais Bloc E1 Haut
 Sommet de la couche PM 51,5
 Marne THI09t

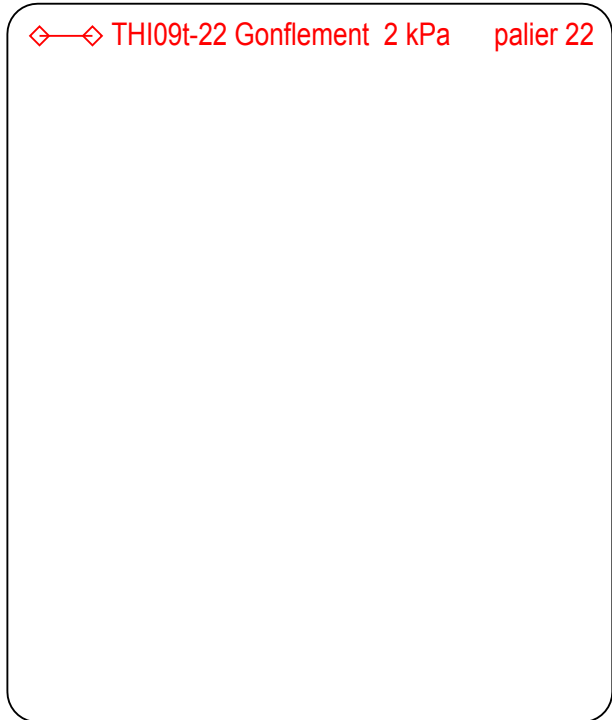
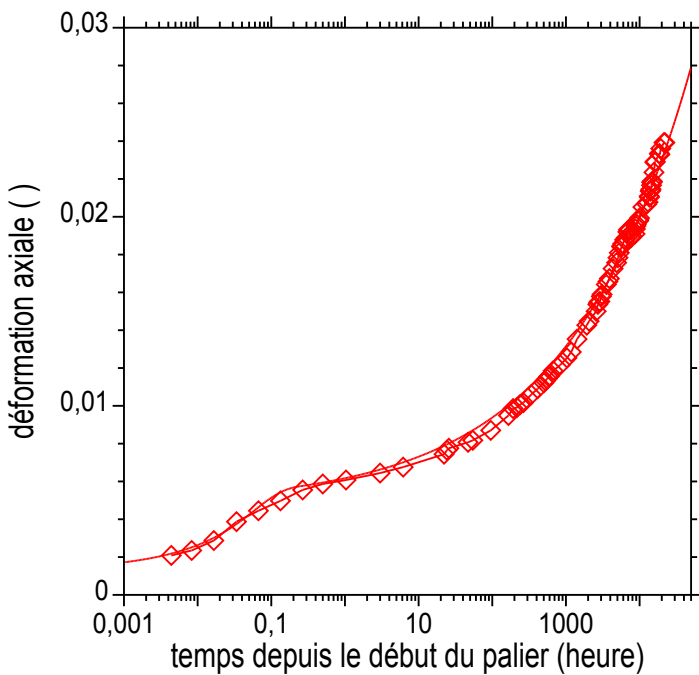
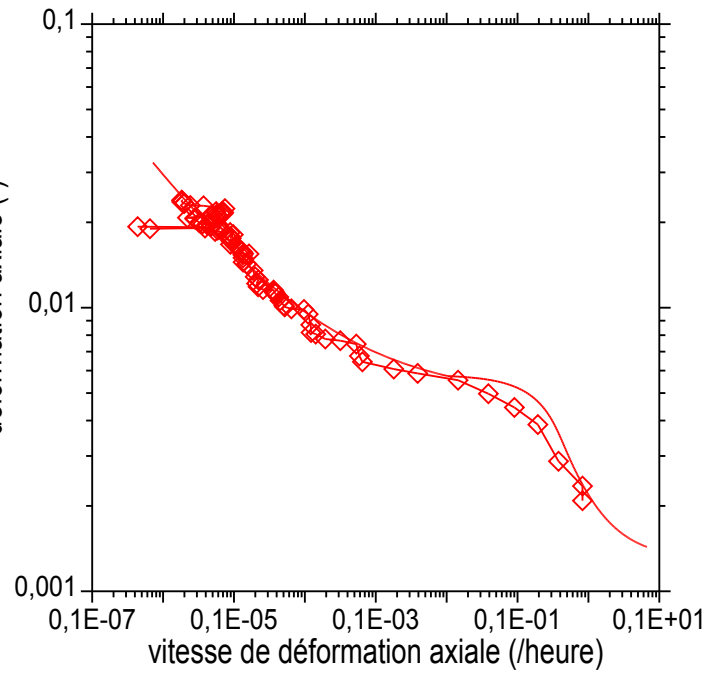
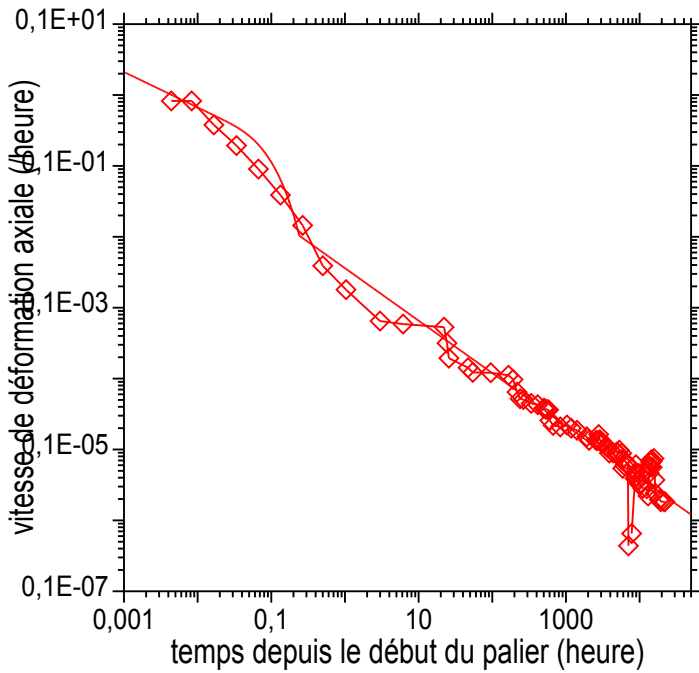


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

Galerie de Thiais
Sommet de la couche
Marne

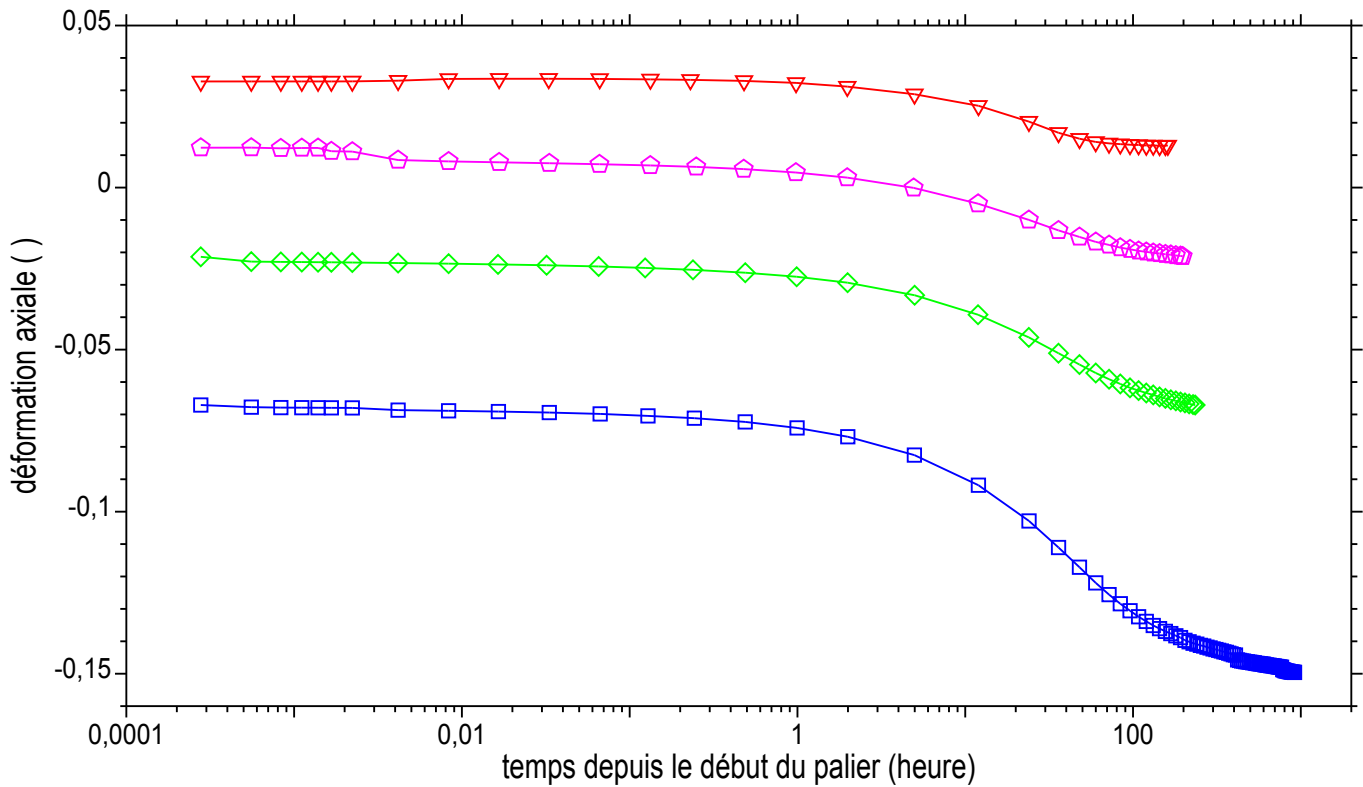
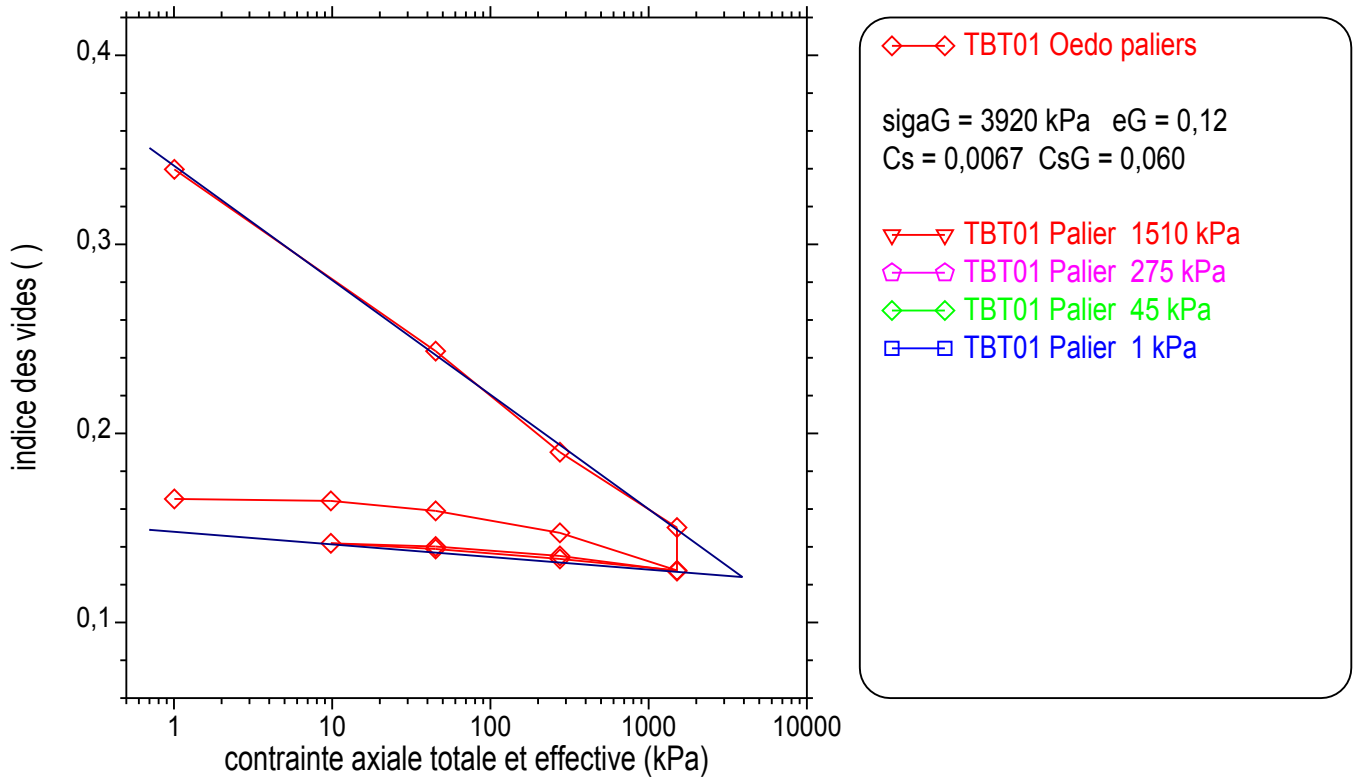
Bloc E1 Haut
PM 51,5
THI09t-22



Courbes contrainte déformation et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement par paliers

Barrage de Tabellout Galerie Lot 2
 Ech n° 6 Bloc 2013
 Argile un peu marneuse grisâtre TBT01

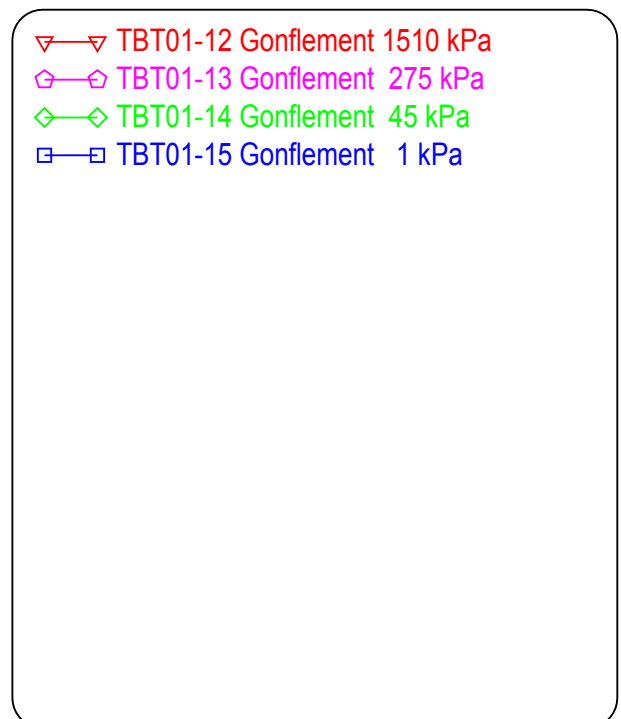
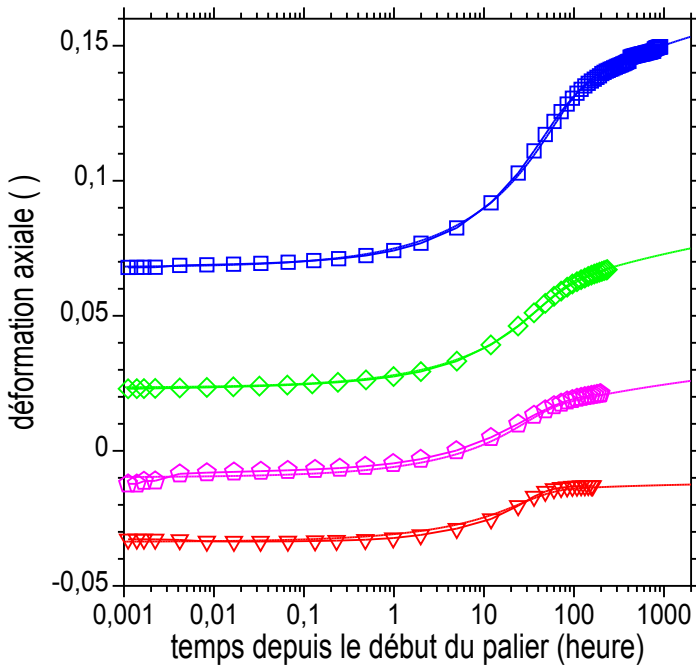
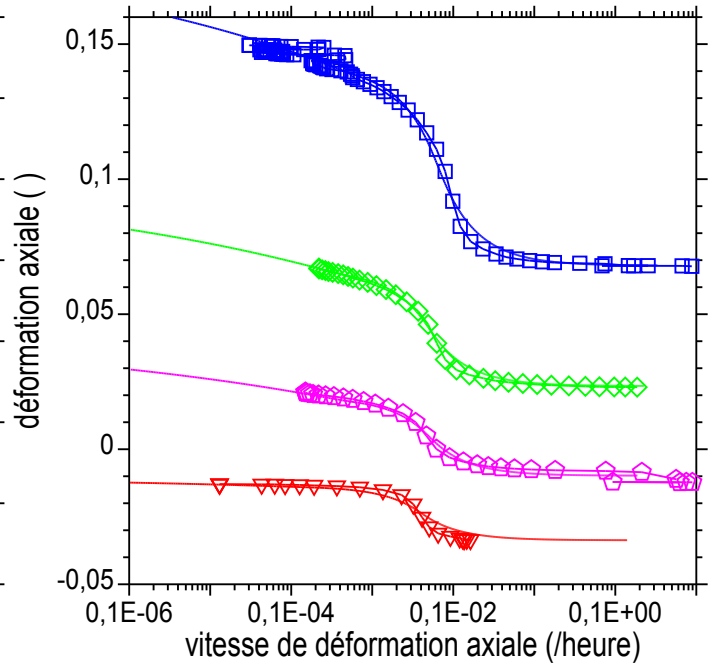
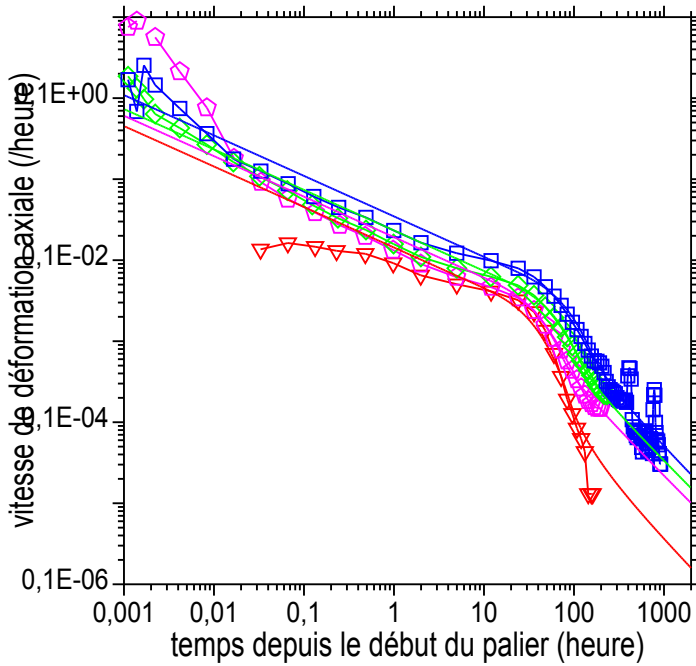


Courbes contraintes déformations et déformation temps.

Essai oedométrique de gonflement

Barrage de Tabellout
 Ech n° 6
 Argile un peu marneuse grisâtre

Galerie Lot 2
 Bloc 2013
 TBT01-12



Courbes contrainte déformation et déformation temps.

