

Comportement différé des marnes du tunnel d'Arbus (France) soumises à des essais de fluage et de gonflement

Differed behavior from marl of Arbus tunnel (France) subjected to creep and swelling tests

Chafia Merah^{1*} & Jean François Mathier²

¹Département de Génie Minier, Université de Tébessa, B.P. 12002, Tébessa, Algérie.

²Laboratoire de Mécanique des Roches, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

Soumis le : 26.03.2013

Révisé le : 26.01.2014

Accepté le : 09.04.2014

ملخص :

هذا العمل يتركز حول الاستجابة المتأخرة للمارل تحت تأثير تغيير حالة الضغط وتأثير المياه. يمكن لتاريخ الشحن ووجود المياه إحداث تغييرات كبيرة في سلوك المكونات الجيولوجية، ومع مرور الوقت قد تتداخل آثارها وتسبب أضرار كبيرة في مختلف المجالات المنجمية والهندسة المدنية، خاصة فيما يخص التراكم الجوفية.

أجريت سبع تجارب وذلك باستخدام *oedometers* على مارل نفق أربوس بفرنسا. أخضعت العينات أولاً إلى حمولة تحت مستوى واحد أو إلى عدة مستويات، ثم بعد ذلك يتم إمهاة العينات وإنزال الحمولة تدريجياً تبعاً لعدة المستويات.

تم تمثيل التشوه الناتج على الزحف باستخدام نموذج *Lemaitre*، أما الانتفاخ أو التورم فتم تمثيله بقانون راندي المقطع. أظهر النموذج العام الذي يشمل توزيع التشوه أثناء الزحف والانتفاخ أنه يطابق التشوه التجريبي.

الكلمات المفتاحية: المارل - تشوه الزحف - اللزوجة البلاستيكية - نموذج *J. Lemaitre* - انتفاخ.

Résumé

Le travail présenté se concentre sur le comportement différé des marnes consécutif à la modification de l'état de contrainte et à l'action de l'eau. L'historique des chargements et la présence d'eau peuvent induire des changements importants dans le comportement des géomatériaux. Au cours du temps, leurs effets peuvent se superposer et créer des dégâts considérables dans les différents domaines miniers et du génie civil, notamment en construction souterraine.

Sept essais ont été réalisés avec des oedomètres sur des marnes du tunnel d'Arbus (France). Les échantillons sont d'abord soumis à un chargement sous un seul palier (fluage mono palier) ou à un chargement par paliers successifs (fluage multi paliers), ensuite ils sont hydratés puis déchargés selon plusieurs paliers.

Le comportement dû au fluage est simulé par le modèle de Lemaitre et le gonflement est modélisé par une loi hyperbolique. Le modèle global considérant la partition des déformations pendant le fluage et le gonflement reproduit fidèlement la déformation expérimentale mesurée.

Mots clés: Marnes - Fluage - Viscoplasticité - Modèle *J. Lemaitre* - Gonflement.

Abstract

The paper focuses on the delayed behavior of marls induced by a change in stress state and by the effect of water. Loading history and presence of water can induce important changes in the behavior of geomaterials. During time, their effects may enhanced-up and generate great damage in different applications in mining and civil engineering, in particular in underground construction.

Seven experiments were conducted in oedometric cells on marl from the Arbus tunnel (France). The samples were subjected to a single loading step (one-stage creep test) or to successive loading steps (multi-stage creep test), after they are hydrated and discharged according to a several stages.

The creep behavior was simulated by Lemaitre model and swelling was modeled by a hyperbolic law. A global model that partitions the deformation during the creep and swelling allows to faithfully giving the measured experimental deformation.

Keywords: Marls - Creep - Viscoplasticity - *J. Lemaitre model* - Swelling.

*Auteur correspondant : merahchafia@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Apparues vers la fin du 19^{ème} siècle, les études sur le comportement différé des roches ne cessent de se développer et cela à cause des dégâts et désordres considérables engendrés au cours du temps sur les ouvrages de génie civil en surface et en souterrain.

Les géomatériaux et les roches en particulier ont un comportement mécanique complexe qui dépend souvent du temps [1].

La difficulté d'appréhender la modélisation du comportement différé réside dans la diversité des causes qui peuvent en être à l'origine [2]. On peut citer d'une part des phénomènes liés à l'eau comme la consolidation ou le gonflement, et d'autre part le fluage, qui a diverses origines physiques. Il s'agit entre autres, de la viscosité propre de la matrice rocheuse ou de celle du remplissage (généralement des argiles) pour un massif fracturé, qui s'accompagne d'une modification de la structure à différentes échelles (atomes, molécules, particules, grain).

Dans cet article, on s'intéresse à deux de ces phénomènes: le fluage et le gonflement.

Le fluage est une déformation différée due à l'application d'une charge constante au cours du temps [3].

L'essai de fluage permet d'étudier le comportement de la roche en fonction du temps. Il consiste à imposer à un échantillon un déviateur de contrainte constant, dans des conditions hydriques et de température contrôlées.

Durant un essai de chargement sous une contrainte constante, trois phases peuvent être observées [4]: le fluage primaire, connu aussi sous le nom de fluage transitoire caractérisé par une vitesse de déformation décroissante, le fluage secondaire durant lequel la vitesse de déformation est constante, et finalement le fluage tertiaire pendant lequel la vitesse de déformation augmente.

L'essai de fluage demeure le plus simple à réaliser comparativement à l'essai de relaxation [5]. Le gonflement se manifeste par une augmentation de volume suite à des réactions physico-chimiques avec l'eau. Ce phénomène dépend étroitement de la nature du terrain rencontré et du milieu environnant (état de contrainte) [6]. Il existe un nombre important d'essais géotechniques courants visant à déterminer le potentiel, la pression et

l'amplitude de gonflement [7] dont les principaux sont :

- - essai de gonflement libre
- - essais en parallèle
- - essais à volume constant
- - essais Huder-Amberg.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

Un programme expérimental, comprenant des essais de fluage et de gonflement, a été réalisé au Laboratoire de Mécanique des Roches (LMR) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) sur des échantillons de marne provenant du tunnel d'Arbus en France [8]. L'objectif poursuivi a été l'étude de cette roche sous deux aspects:

Le premier vise le suivi et la quantification du fluage à l'aide d'essais de fluage sous un seul palier de chargement (fluage mono palier) ou sous plusieurs paliers de chargement (fluage multi paliers).

Le second concerne le comportement de la roche vis-à-vis du gonflement par des essais de type Huder-Amberg.

2.1 Roche testée

Les essais de laboratoire sont réalisés sur des échantillons issus des forages AR1, AR4 du tunnel d'Arbus (France).

Ce tunnel fait partie de la liaison routière RN134 Pau-Oloron. Il traverse la formation géologique des Poudingues du Jurançon.

Dès leur réception, les échantillons ont été conservés dans une chambre humide avec contrôle des conditions de température et d'hygrométrie. Les échantillons paraffinés ont été transportés jusqu'au laboratoire dans des tubes en PVC scellés hermétiquement.

La roche est constituée d'une marne tendre argileuse à silto-sableuse dont les caractéristiques sont représentées sur le tableau 1.

2.2 Procédure expérimentale

Les essais de fluage et de gonflement ont été effectués selon des procédures accréditées du LMR et validées par le Service d'Accréditation Suisse.

Tableau 1. Caractéristiques des échantillons soumis aux essais.

éch	γ_{app} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)
éch1	21.27	18.6	14.42
éch2	21.61	18.66	15.87
éch3	21.32	18.45	15.63
éch4	21.54	18.56	16.06
éch5	22.15	19.19	15.49
éch6	21.45	18.57	15.51
éch7	21.73	18.78	15.82

Le poids volumique des grains solides mesuré au laboratoire est de 26.49 kN/m³.

2.2.1 Phase de fluage

La mesure du fluage en fonction du temps sous une charge appliquée a été effectuée dans une cellule oedométrique.

L'échantillon de 75 mm de diamètre et de 19 mm de hauteur est placé dans une bague métallique rigide, entre deux pierres poreuses.

L'échantillon est soigneusement isolé de l'extérieur pour éviter les échanges hydriques : l'oedomètre était emballé dans une enceinte en plastique étanche. Le déplacement axial est mesuré par un capteur de type LVDT de 10 mm de course et une précision de 0.001 mm.

L'étude du comportement différé et le calage d'une loi constitutive sont souvent réalisés sur la base d'essais de fluage, effectués sous différents paliers de chargement. Ces chargements sont réalisés selon deux modes: soit un seul palier par éprouvette désigné par fluage mono palier (Tab.2), soit des paliers successifs sur une même éprouvette nommé fluage multi paliers (Tab.3). Dès que le déplacement est stabilisé à un critère fixé à $2/12 \mu\text{m}/h$, l'échantillon est soit chargé au palier suivant, dans le cas d'un essai multi paliers, soit hydraté pour un essai mono palier.

2.2.2 Phase de gonflement

Une fois la phase de fluage terminée, on procède à l'hydratation de l'échantillon. Les

essais de gonflement ont été effectués selon un mode inspiré par l'essai Huder-Amberg.

L'essai Huder-Amberg [10] consiste à placer l'éprouvette de roche dans une bague oedométrique placée entre deux pierres poreuses.

L'échantillon est ensuite chargé jusqu'à une contrainte axiale désirée σ_{v0} . Pour éliminer les effets de remaniement dus au prélèvement de la roche et à sa mise en place dans l'oedomètre, l'éprouvette est ensuite soumise à un cycle de déchargement-rechargement jusqu'à la contrainte σ_{v0} . Sous cette contrainte, elle est alors mise en eau, ce qui provoque le gonflement ou l'effondrement. On procède ensuite au déchargement par paliers successifs. Les paliers de déchargement sont précisés dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2. Contraintes appliquées pour les essais mono palier.

Echantillon	Fluage (kPa)	Gonflement (kPa)
éch1	250	250-125-60-15
éch2	500	500-250-125-60-15
éch3	1000	1000-500-250-125-60-15

Tableau 3. Contraintes appliquées pour les essais multi paliers.

Echantillon	Fluage (kPa)	Gonflement (kPa)
éch4	15-60-125-250-500-750	500-250-125-60-15
éch5	15-60-125-250	250-125-60-15
éch6	15-60-125-250-500	500-250-125-60-15
éch7	15-60-125-250-500	500-250-125-60-15

3. LOIS D'AJUSTEMENT

3.1 Fluage

La déformation due au fluage peut être divisée en une partie réversible (élastique) et une partie irréversible (non élastique) [1].

Selon l'hypothèse de la décomposition des déformations, la déformation totale d'un matériau peut être exprimée par:

$$\varepsilon_{totale} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{vp} \quad (1)$$

La loi de Lemaitre [11] permet de prendre en compte le caractère viscoplastique du matériau considéré. Elle suppose que la vitesse de déformation dépend à la fois de la contrainte appliquée et de la déformation visqueuse du matériau.

La loi de comportement s'écrit sous la forme:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = A \left(\frac{q}{q_0} \right)^n (\varepsilon_{vp})^m \quad (2)$$

A : paramètre de viscosité ;

n et m sont deux paramètres caractéristiques du matériau ;

q_0 : correspond à l'unité de contrainte de référence fixée à $q_0=1\text{MPa}$.

La loi de comportement s'écrit sous sa forme générale:

$$\frac{d\varepsilon_{vp}}{(\varepsilon_{vp})^m} = Aq^n . dt \quad (3)$$

A déviateur q constant, l'expression explicite de la loi de fluage $\varepsilon = f(t)$ pour une roche isotrope s'obtient par intégration de l'équation (3):

A $t = 0$, $\varepsilon_{vp} = 0$ en intégrant entre 0 et t, pour $m \neq 1$:

$$-\frac{(\varepsilon_{vp})^{1-m}}{m-1} = Aq^n . t \quad (4)$$

Soit :

$$\varepsilon_{vp} = [(1 - m). Aq^n . t]^{1/(1-m)} \quad (5)$$

$$\text{On pose : } \varepsilon_{vp} = a q^\beta t^\alpha \quad (6)$$

Avec:

$$\alpha = \frac{1}{1-m} ; \beta = \frac{n}{1-m} ; a = \left(\frac{A}{\alpha} \right)^\alpha$$

Le temps est exprimé en secondes, la contrainte en MPa et le a en (secondes)⁻¹.

©UBMA - 2014

3. 2 Gonflement

Une fois que la stabilisation du déplacement lors du fluage est atteinte selon le critère fixé à $2/ 12 \mu\text{m}/h$, on réalise l'hydratation de l'échantillon et encore une fois lorsque le déplacement est stabilisé on procède à son déchargement. Le temps et le déplacement sont enregistrés en continu.

Pour ajuster la déformation due au gonflement à partir des essais expérimentaux, il est intéressant d'employer les résultats obtenus par Parcevaux [12].

Les courbes expérimentales donnant, en fonction du temps, les variations d'épaisseur d'un échantillon placé dans un oedomètre et soumis à une contrainte axiale peuvent être ajustées par une loi hyperbolique avec asymptote parallèle à l'axe du temps [13] du type:

$$\varepsilon_g(t) = G \frac{t}{(B+t)} \quad (7)$$

G : taux de gonflement final obtenu pour un temps infini ;

B : temps de demi-gonflement (par rapport au gonflement final).

L'équation (7) peut s'écrire sous la forme:

$$\frac{t}{\varepsilon_g(t)} = \frac{t}{G} + \frac{B}{G} \quad (8)$$

Ce qui correspond à une droite dans le système de coordonnées $(t, t/\varepsilon_g(t))$. Les paramètres G et B peuvent être déterminés graphiquement et correspondent à l'inverse de la pente et au produit de G par l'ordonnée à l'origine.

Le temps est exprimé en minutes, la déformation en pourcent, le G en pourcent et le B en minutes.

3. 3 Modèle global

Le modèle employé permet de prédire le gonflement à la suite d'une phase de fluage [14, 15]. Ce modèle comprend trois phases : une phase d'élasticité, une phase de fluage et une phase de gonflement.

La formule (9) comprend le modèle de base complété par un terme ε_{eg} dû à la déformation élastique au moment de chaque palier de déchargement.

Le modèle donnant la partition des déformations est :

$$\varepsilon(t) = [\varepsilon_{ef} + \varepsilon_{vp}(t)].He(t_S - t) + [\varepsilon_{eg} + \varepsilon_g(t)].He(t - t_S) \quad (9)$$

Avec:

- ε_{ef} : déformation élastique instantanée résultant des paliers de chargement;
- $\varepsilon_{vp}(t)$: déformation viscoplastique du fluage au temps t;
- ε_{eg} : déformation élastique instantanée résultant des paliers de décharge;
- $\varepsilon_g(t)$: gonflement au temps t;
- t_S : temps d'hydratation de l'échantillon ;
- He : Fonction de Heaviside (χ vaut 0 pour $\chi < 0$ et 1 pour $\chi > 0$).

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4. 1 Fluage

Les sept essais réalisés ont montré des variations de vitesses de déformation expérimentales en fonction du temps similaires à celles représentées sur la figure 1. La vitesse de déformation expérimentale des marnes testées continue à décroître jusqu'à $10^{-5}/h$ (Fig.1). Au delà de 170h, la vitesse de déformation expérimentale devient constante, ce qui signifie le passage du fluage primaire au fluage secondaire.

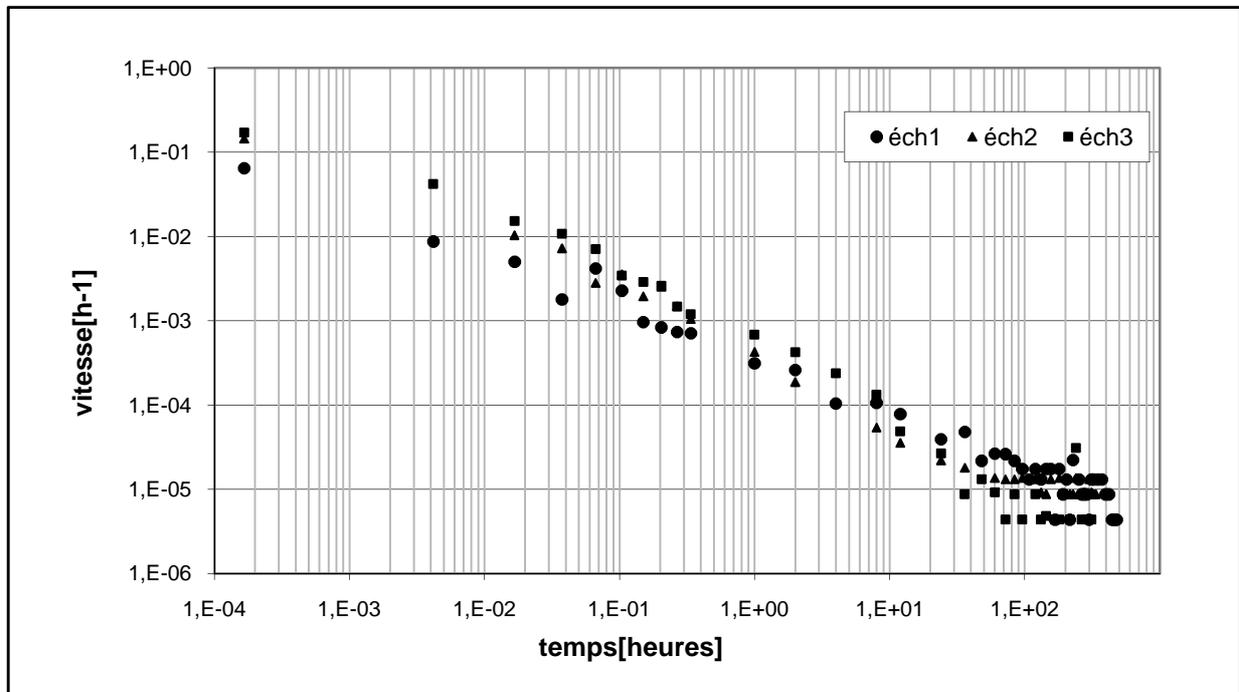


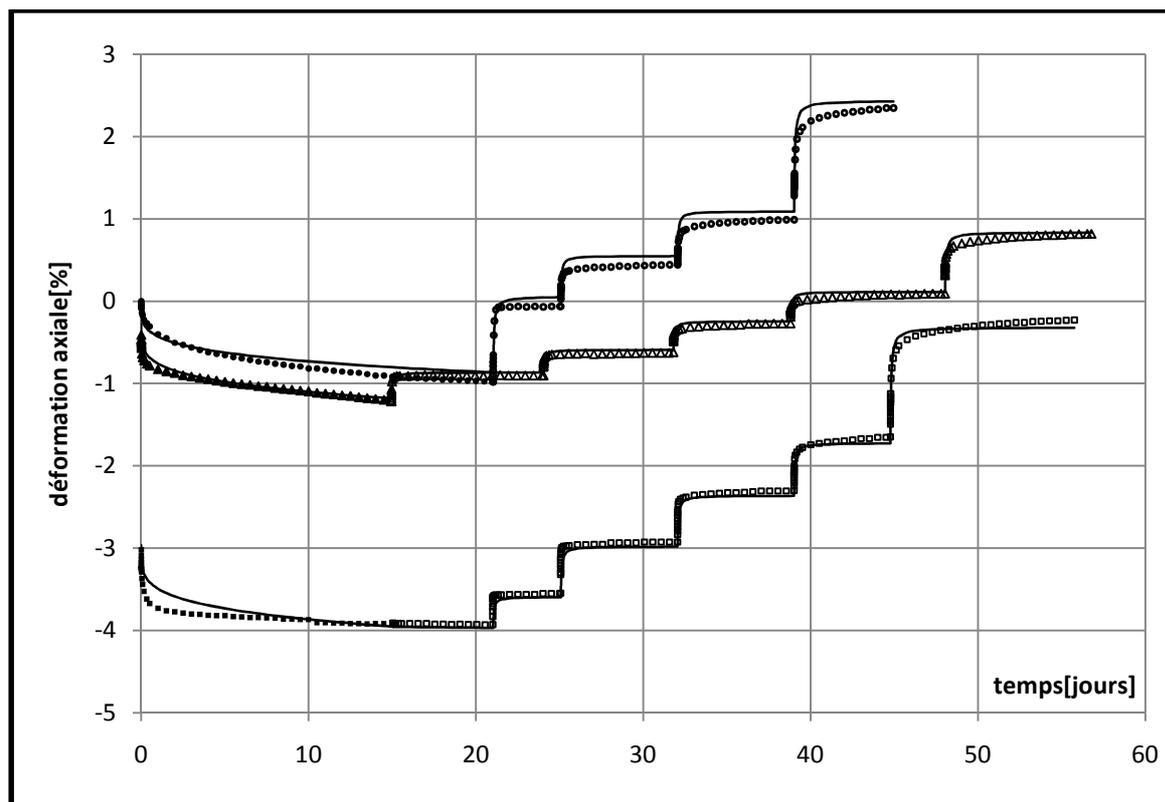
Figure 1. Variation de la vitesse de déformation expérimentale en fonction du temps (diagramme log-log).

La déformation viscoplastique ne peut être mesurée directement, elle est déduite de la déformation totale expérimentale en lui soustrayant la partie instantanée supposée élastique.

Les essais de fluage mono palier (Fig.2) ont été réalisés en utilisant trois éprouvettes en parallèles pour trois charges différentes ; on aboutit à un jeu de paramètres global : $a = 5.85 \cdot 10^{-4} s^{-1}$, $\alpha = 0.22$ et $\beta = 0.17$.

Les symboles en trait plein, de la figure 2, représentent le fluage et les symboles vides représentent le gonflement.

Pour le fluage multi paliers, les coefficients de la loi de Lemaitre sont présentés dans le tableau 4 et les résultats sont représentés sur la figure 3. Le jeu de paramètres optimal des essais de fluage multi paliers est obtenu avec : $a = 2.96 \cdot 10^{-5} s^{-1}$, $\alpha = 0.46$ et $\beta = 0.26$, le résultat est représenté sur la figure 4.



● éch1 ▲ éch2 ■ éch3 — fluage sim ○ éch1 Δ éch2 □ éch3 — gonf sim

Figure 2. Simulation analytique des essais de fluage mono palier, suivi par les essais de gonflement. Evolution de la déformation axiale en fonction du temps.

Tableau 4. Paramètres du modèle visco-plastique déterminés à partir des essais de fluage multi paliers.

Paramètres de la déformation viscoplastique			
éch	a[s ⁻¹]	α	β
éch4	2.28*10 ⁻⁵	0.48	0.28
éch5	1.43*10 ⁻⁵	0.51	0.26
éch6	4.32*10 ⁻⁶	0.59	0.28
éch7	7.72*10 ⁻⁵	0.39	0.25

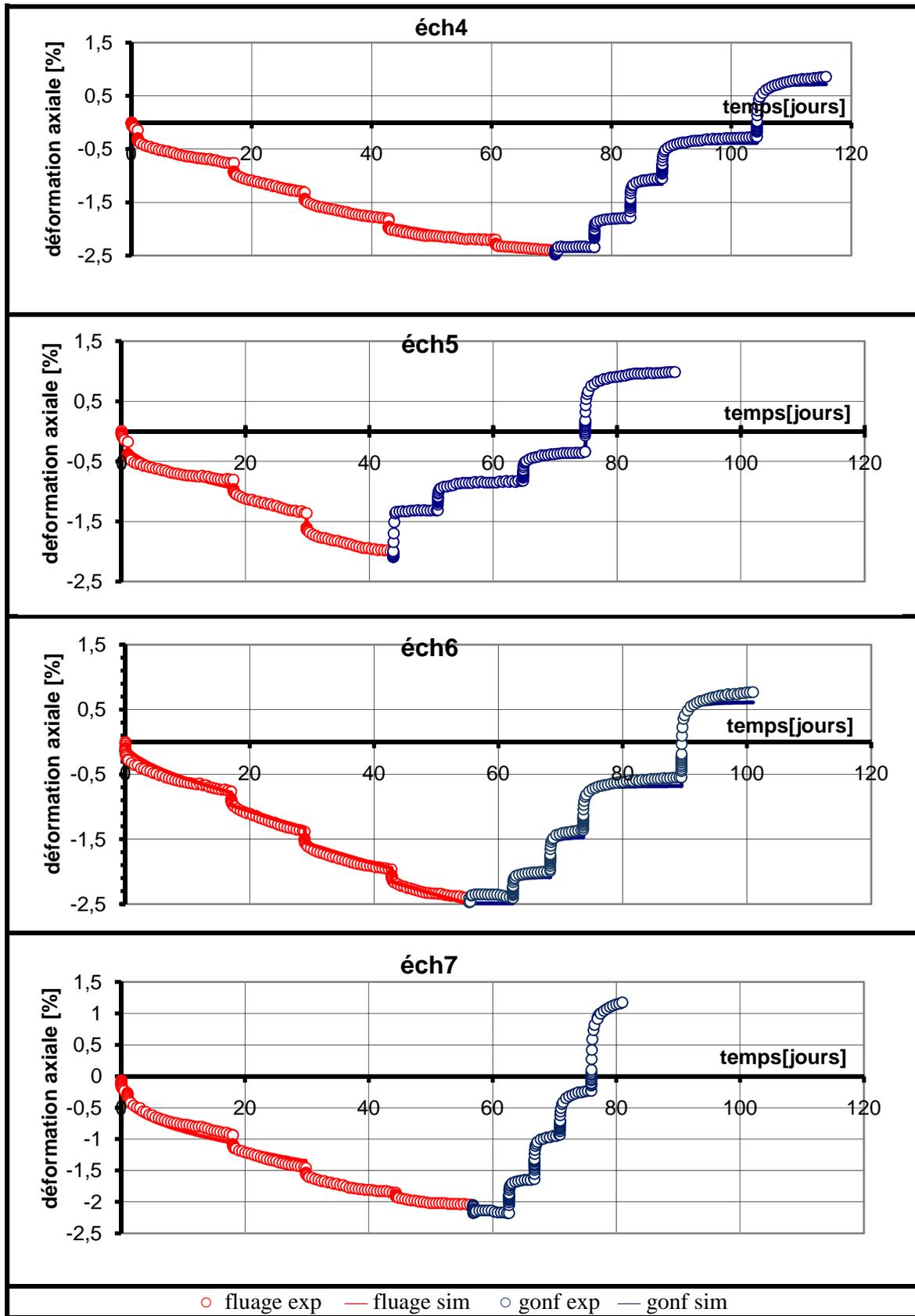
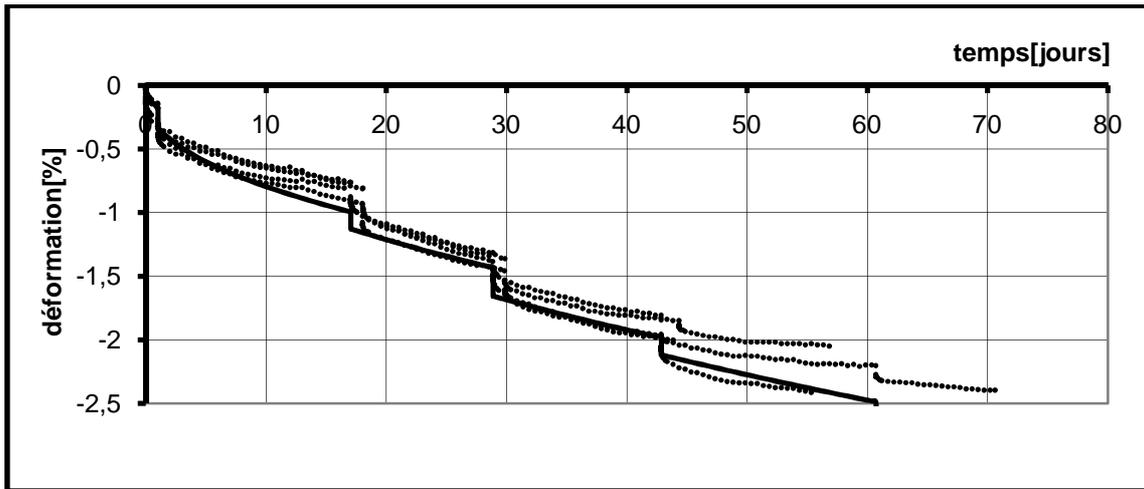


Figure 3. Simulation analytique des essais de fluage multi paliers, suivi par les essais de gonflement.
Evolution de la déformation axiale en fonction du temps.



... : fluage exp — : fluage sim

Figure 4. Simulation analytique des essais de fluage multi paliers avec un jeu de paramètres optimal

. $a=2.96 \cdot 10^{-5} s^{-1}$, $\alpha = 0.46$ et $\beta = 0.26$. Evolution de la déformation axiale en fonction du temps.

4. 2 Gonflement

Pour chaque palier de déchargement sous eau, la partie instantanée de la déformation supposée élastique ϵ_{eg} est retranchée.

L'application de la formule (8) et la détermination des paramètres de gonflement (Tab.5) ont abouti à la simulation du gonflement représentée sur les figures 2 et 3.

Pour les échantillons éch3, éch4 et éch6 au palier d'hydratation, la déformation expérimentale mesurée était assez faible de telle sorte qu'on n'a pas pu déterminer le B correspondant. La simulation était faite à base de la moyenne des autres paliers.

Les résultats ont montré que pour l'ensemble des échantillons, il est possible de substituer le facteur B par un B_{moy} constant valant 125 minutes.

Concernant le facteur G, on remarque que pour l'échantillon éch7, il est négatif à 500 kPa, cela est dû à un effondrement au moment de l'hydratation.

Pour montrer l'influence de la contrainte verticale sur le gonflement, on trace les courbes expérimentales de gonflement dans un repère (contrainte verticale, $\epsilon_g(t)$) (Fig.5).

Une simulation de la forme:

$\epsilon_g(t)_{finpalier} = g \cdot \ln(\sigma) + b$, sur tous les essais réalisés donne des coefficients de corrélation de $R^2 = 0.99$.

En notant la contrainte à la phase de l'hydratation σ_i et la contrainte en chaque palier de déchargement σ_j tels que mentionnés dans les tableaux 2 et 3, il en résulte:

La déformation à la fin du palier d'hydratation

$$\epsilon_0 = g \cdot \ln(\sigma_i) + b \quad (10)$$

La déformation à la fin de chaque palier j est:

$$\epsilon_j = g \cdot \ln(\sigma_j) + b \quad (11)$$

Par substitution de la valeur de b de l'équation 10 dans l'équation 11 on obtient:

$$\epsilon_j = g \cdot \ln\left(\frac{\sigma_j}{\sigma_i}\right) + \epsilon_0 \quad (12)$$

Pour l'ensemble des échantillons, les paramètres sont représentés sur le tableau 6. De façon surprenante, les paramètres de la loi de Lemaitre semblent différents pour les fluages mono et multi paliers.

Les résultats des déformations expérimentales de fluage et de gonflement mesurées dans la présente étude sont comparables aux résultats obtenus par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées LRPC de Aix-en-Provence, France, sur les mêmes marnes [8,9].

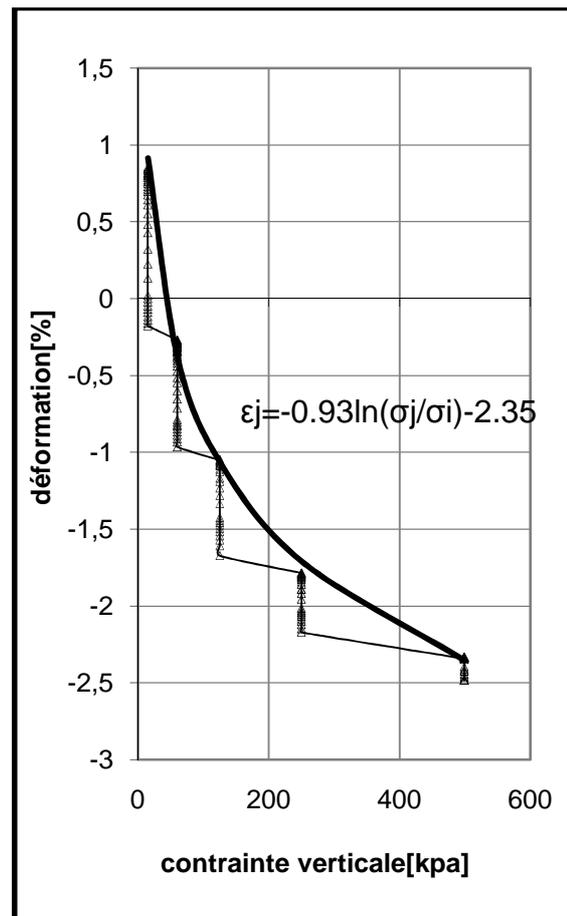
Un exemple de la simulation est représenté sur la figure 5.

Tableau 5. Paramètres de gonflement selon la loi hyperbolique.

Ech	Contrainte au palier de déchargement (kPa)	G (%)	B (min)
éch1	250	0.92	33.63
	125	0.49	63.52
	60	0.52	105.74
	15	1.32	69.74
éch2	500	0.32	12.90
	250	0.26	49.47
	125	0.34	77.88
	60	0.33	162.97
	15	0.70	116.34
éch3	1000	0.11	-
	500	0.31	18.11
	250	0.60	32.5
	125	0.57	57.96
	60	0.60	87.11
	15	1.37	158.57
éch4	500	0.05	-
	250	0.53	59.97
	125	0.67	65.96
	60	0.74	384.05
	15	1.10	193.41
éch5	250	0.70	142.55
	125	0.45	239.94
	60	0.45	246.29
	15	1.29	205.32
éch6	500	0.01	-
	250	0.39	81.60
	125	0.58	86.06
	60	0.77	359.06
	15	1.28	219.32
éch7	500	-0.11	165.22
	250	0.50	43.61
	125	0.64	63.99
	60	0.66	11.36
	15	1.37	118.34

Tableau 6. Paramètres de gonflement.

Ech	g(%)	ϵ_0 (%)	B_{moy} (min)
éch1	-0.86	-0.13	68.16
éch2	-0.49	-0.94	83.91
éch3	-0.89	-4.1	70.85
éch4	-0.93	-2.35	175.84
éch5	-0.81	-1.38	208.52
éch6	-0.93	-2.47	186.51
éch7	-0.96	-2.22	80.50



Δ: gonf exp — : déformation sim

Figure 5. Simulation du gonflement de l'éch4

Parmi les essais effectués au LRPC Aix-en-Provence, il a été considéré deux échantillons soumis au fluage mono axial appartenant au sondage AR4- 06, échantillon G10 qu'on a nommé LRPC éch1 et LRPC éch2 soumis respectivement à 346 kPa et 701 kPa. Les résultats sont représentés sur la figure 6.

Pour le gonflement on a considéré des essais en parallèle réalisés sur un sondage AR4-06, échantillon G15 dont les contraintes appliquées sont respectivement 32 kPa, 97 kPa, et 400 kPa qu'on a nommé respectivement LRPC éch3, LRPC éch4, et LRPC éch5. Les résultats sont représentés sur la figure 7 et donnent un gonflement expérimental respectif de 1.1%, 0.8%, et 0.2%.

Les résultats obtenus et présentés sur les figures 2 et 3 pour le gonflement sont mentionnés dans le tableau 7.

Tableau 7. Comparaison du potentiel de gonflement.

Con éch	15 kPa	60 kPa	125 kPa	250 kPa	500 kPa
éch1	0.8%	0.5%	0.3%	1.0%	-
éch2	0.5%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%
éch3	1.0%	0.3%	0.5%	0.5%	0.3%
éch4	1.2%	0.5%	0.8%	0.5%	0.0%
éch5	1.5%	0.5%	0.5%	0.8%	-
éch6	1.5%	0.8%	0.5%	0.5%	0.0%
éch7	1.5%	0.8%	0.8%	0.8%	0.0%

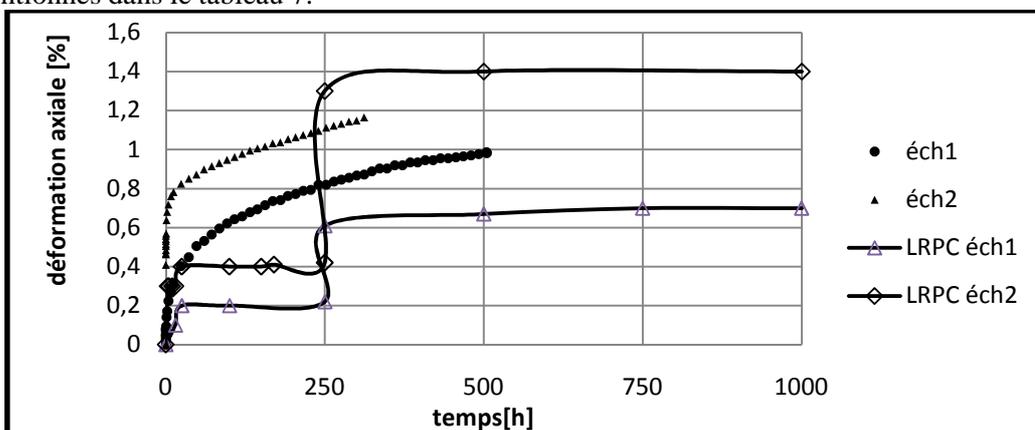


Figure 6. Comparaison des résultats de fluage aux résultats de LRPC de Aix-en-Provence.

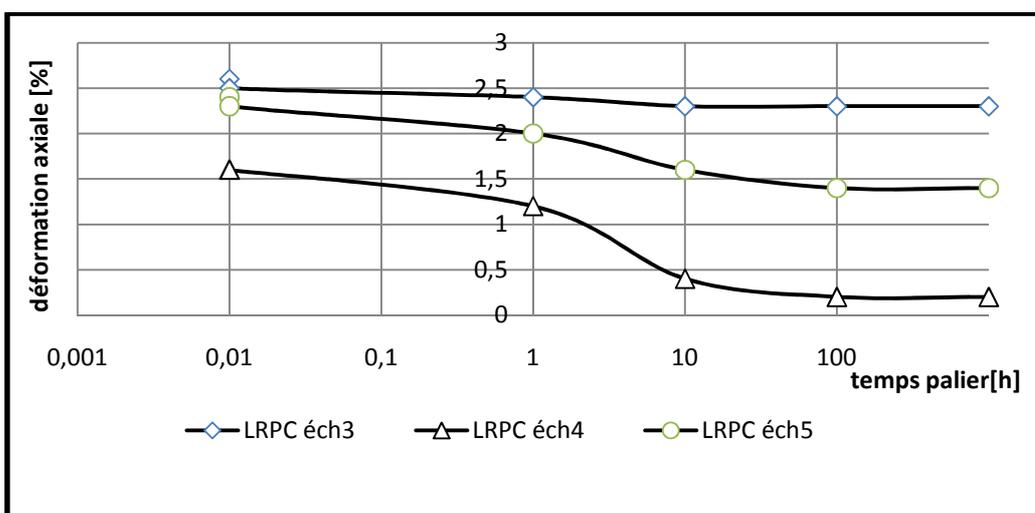


Figure 7. Comparaison des résultats de gonflement aux résultats de LRPC de Aix-en-Provence

5. CONCLUSION

Dans le présent travail, l'effet du temps est pris en compte d'une façon explicite dans l'évaluation de la déformation induite par deux phénomènes complexes : le fluage et le gonflement.

La loi de Lemaitre, utilisée pour ajuster le comportement différé des marnes du tunnel d'Arbus en phase de fluage primaire, est satisfaisante. Les paramètres de la loi de Lemaitre a , α et β semblent différents pour les fluages mono et multi paliers. Cela s'explique par le fait que les microfissures à l'échelle sub-microscopique ont une vitesse de propagation finie. Si la vitesse d'application de la charge dépasse la vitesse de propagation des fissures la résistance du matériau semble augmenter et la déformation diminue.

Pour une vitesse de chargement faible tel que par palier, les microfissures se développent tout le long du chargement donnant une déformation relativement importante comparativement au chargement mono palier qui est suffisamment rapide, dépassant la vitesse de propagation des défauts (microfissures). Par ailleurs, le mode de chargement progressif pour les essais multi paliers et relativement brusque pour les essais mono palier influence la déformation induite. Pour ces essais, le gonflement est simulé par une loi hyperbolique exprimant le temps d'une façon explicite, et ayant deux paramètres, G et B ; on a abouti à un paramètre B commun à ces marnes. Le paramètre G est proche pour les différents essais, il peut être ajusté par une loi logarithmique en fonction de la contrainte à l'hydratation et de la contrainte à chaque palier de déchargement.

La loi utilisée pour le gonflement est adéquate pour les matériaux testés.

L'hydratation, puis le déchargement par paliers successifs permet de récupérer la déformation induite par fluage puis le gonflement proprement dit.

La procédure d'expérimentation, visant à soumettre un matériau sous différentes sollicitations (charge, hydratation, décharge par palier) au cours du temps, et la logique de partition des déformations sont en conformité avec le modèle global.

Le modèle global employé pour simuler le fluage (mono palier ou multi palier) et le

gonflement reproduit fidèlement le comportement des marnes du tunnel d'Arbus.

Chacun des deux phénomènes fluage et gonflement est complexe, ils se trouvent souvent combinés et il est délicat de distinguer la part de chacun d'eux

REFERENCES

- [1] Pellet F., Hadju A., Deleruyelle F., & Besnus F., 2005. A viscoplastic model including anisotropic damage for the time dependent behaviour of rock. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29, 941-970.
- [2] Kharchafi M., & Descoedres F., 1995. Comportement différé des roches marnées encaissant les tunnels. Colloque Mandanum Craies et Schistes. Groupement Belge de Mécanique des Roches, Bruxelles, 58-67.
- [3] Fabre G., 2005. Fluage et endommagement des roches argileuses. Evolution de la microstructure et modélisation phénoménologique. Thèse de Doctorat. Grenoble I. 297 p.
- [4] Fabre G. & Frederic P., 2006. Creep and time dependent in argillaceous rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 49, 950-960.
- [5] Yongsheng L. & Caichu X., 2000. Time dependent tests on intact rocks in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 467-475.
- [6] Bultel F., 2001. Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels, Thèse Doctorat ENPC. 289p.
- [7] Abdelkader D., Abdelmalek B. & Sidi Mohamed A.M., 2001. Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, réf 4375, 67-75.
- [8] Merah C., Mathier J.F. & Labiouse V., 2010. Analysis of multi-stage creep and swelling oedometric tests on a French marl. *Proceedings of the European rock mechanic symposium (EUROCK)*, Lausanne, Switzerland, 15-18 June.
- [9] Serratrice J.F., 2006. Rapport RN134 Tunnel d'Arbus. Essais du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Aix en Provence.
- [10] Huder J. & Amberg G., 1970. Quellungim Mergel, Opalinuston und Anhydrit, *Schweiz. Bauzeitung*, Vol. 38 (43), 975-980.
- [11] Lemaitre J. & Chaboche J.L., 1996. *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, 253-341.
- [12] Parceveaux P., 1980. Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI et l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

[13] Al Mukhtar M., Touray J.C. & Bergaya F., 1999. Une argile modèle pour l'étude du gonflement des sols argileux: la laponite-Na de synthèse, C.R.Acad.Sci. Paris. Sciences de la terre et des planètes, *Earth & Planetary Sciences*, 329, 239-242.

[14] Wakim J., 2005. Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses, thèse

de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 154p.

[15] Hadj-Hassen F., Gordine D., Accarie H. & Huter-Taillanter S., 2002. Houillère du bassin de Lorraine. Etude du comportement des schistes sous l'influence de l'eau. Rapport interne, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, CGES.

NOMENCLATURE

ε_{el}	: Déformation élastique
ε_{vp}	: Déformation viscoplastique
$\dot{\varepsilon}_{vp}$: Vitesse de déformation viscoplastique (S^{-1})
A	: Viscosité
q	: Contrainte appliquée (MPa)
q_0	: Paramètre de normalisation (ici $q_0 = 1$ MPa)
n et m	: Paramètres caractéristiques du matériau.
G	: Taux de gonflement final obtenu pour un temps infini
B	: Temps de demi-gonflement (par rapport au gonflement final).
ε_{ef}	: Déformation élastique instantanée consécutive à l'application d'un nouveau palier de charge calculé à l'aide de l'incrément de charge et du module de Young
$\varepsilon_{vp}(t)$: Déformation viscoplastique due au fluage au temps t
ε_{eg}	: Déformation élastique instantanée due au gonflement consécutif au déchargement sous eau, pour une durée comprise entre 1 et 15 secondes
$\varepsilon_g(t)$: Déformation due au gonflement au temps t ; calculée à partir de la différence entre la déformation expérimentale et la déformation élastique ;
t_S	: Temps de la mise en eau de l'échantillon
He	: Fonction de Heaviside ($He(\chi)$ vaut 0 pour $\chi < 0$ et 1 pour $\chi > 0$).