



A DIV BOIS

# ETUDE

ESSAIS DE FLUAGE  
SOUS COMPRESSION

## **AVERTISSEMENT**

Cette publication vise à mettre à disposition des acteurs de la construction les résultats d'études menées dans le cadre des travaux de la Commission Technique d'ADIVbois.

ADIVbois ne saurait être tenu pour responsable des omissions, inexactitudes ou erreurs que pourrait contenir cette publication et qui résulteraient de la retranscription de ces études, réalisées sous la responsabilité de leurs auteurs respectifs, et auxquelles le lecteur est invité à se référer directement.

ADIVbois souligne également que les éléments et recommandations retranscrites dans le présent ouvrage présentent un caractère informatif et ne sauraient en aucun cas se substituer, même pour partie, aux études techniques et juridiques, tant au stade de la conception que de l'exécution, qui incombent à chaque acteur de la construction dans le cadre des projets auxquels il pourra être amené à participer.

### **Droits d'auteur - copyright ©**

L'ensemble de ce document relève de la législation française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction sont réservés, y compris pour les documents téléchargeables et les représentations iconographiques et photographiques.

La reproduction de tout ou partie de ce document, y compris sur un support électronique quel qu'il soit est formellement interdite sauf autorisation expresse d'ADIVbois, du Codifab et des réalisateurs de l'étude.

## PRÉAMBULE

Depuis 2016, l'Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois porte un projet innovant reposant sur des immeubles bois de moyenne et grande hauteur, qui se distinguent par des solutions structurelles bois et des aménagements intérieurs faisant appel au bois.

Ce projet innovant va de pair avec un important travail collectif (études, benchmark, prototypages) visant à accompagner la réalisation d'immeubles démonstrateurs.

La Commission Technique d'ADIVbois a lancé, depuis 2016, un nombre conséquent de travaux dans le cadre d'ateliers thématiques (structure, incendie, acoustique, enveloppe, environnement...) et d'études afin d'accompagner la conception et la réalisation des Immeubles à Vivre Bois. L'objectif de ces travaux est de favoriser la levée de freins technico-réglementaires et d'être partagés avec la collectivité.

Le présent document s'inscrit dans cette démarche.

# ESSAIS DE FLUAGE SOUS COMPRESSION

L'association ADIVbois travaille depuis maintenant 4 ans pour accompagner l'émergence de Bâtiments en Bois de Grand Hauteur (BBGH) en France.

Les études de cas, menées en 2017, ont permis d'identifier plusieurs points fondamentaux à prendre en compte dans la démarche de conception d'un BBGH, et le fluage des éléments en bois sous compression est un point critique qui méritait l'attention de l'atelier structures.

En effet, l'augmentation de la hauteur des immeubles bois et le recours à des structures mixtes bois-béton, font que les immeubles deviennent plus sensibles aux déformations différées du bois (planéité des planchers, déformations différentielles de façade...).

L'Eurocode 5 permet d'anticiper les déflexions à long terme des éléments bois via un coefficient majorateur  $k_{def}$ . Cependant ce coefficient ne s'applique qu'aux éléments bois soumis à de la flexion simple ou flexion déviée. En revanche, et en ce qui concerne le fluage en compression axiale, l'Eurocode ne prévoit pas de méthode pour appréhender les déformations différées axiales. La seule option est d'utiliser les coefficients relatifs à la flexion, ce qui, en premier approche, semble très sécuritaire.

La déformation différée d'un élément en bois peut dépendre des facteurs suivants :

- L'évolution de l'humidité dans l'élément bois
- Le taux de contraintes
- L'essence du bois

En conséquence, et pour limiter le nombre d'échantillons à mettre en chargement, l'Atelier Structures a décidé de fixer les hypothèses de l'essai de façon à pouvoir isoler le mieux possible le fluage du bois d'autres phénomènes (prise d'humidité et ou séchage du bois par exemple).

L'étude est réalisée dans des conditions de laboratoire qui diffèrent de la situation d'un projet réel :

- L'humidité dans l'enceinte climatique est fixée à des conditions correspondant à la classe de service 1, soit  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $65\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$
- La taille de l'éprouvette est limitée à 10 x 20 x 75 (hauteur) cm, limitée pour la capacité de la presse. Ces dimensions sont largement inférieures aux dimensions des poteaux prévus dans les projets BBGH
- Le taux de contraintes est fixé au 30 % de la valeur caractéristique en compression (7.2 MPa)
- Les 5 éléments bois sont en Epicéa

La durée de l'essai a été fixée à 1 an, avec des points d'étape à 3 et 6 mois. Cette déformation à 1 an a été retenue pour permettre d'extrapoler une loi de fluage à long terme.

À la suite de l'appel d'offre lancé par ADIVbois, la Plate-forme Technologique Bois-Construction du Limousin a été lauréate pour réaliser cet essai.

L'essai a été lancé le 20 mars 2019 avec la mise en charge des échantillons. Les éléments de mesure dans le banc d'essai étaient :

- Un capteur de force en tête des échantillons
- Deux capteurs de déplacement par échantillon disposés sur deux faces opposées et espacés de 50 cm



Ces capteurs ont permis d'enregistrer les mesures de déplacement et de force tout au long de l'essai. De même, l'enceinte climatique est équipée d'un capteur d'humidité et de température pour assurer le maintien des conditions hygroscopiques.

Ladite mission a été décomposée en trois livrables distincts montrant l'évolution de l'essai :

- **Livrable à 2 mois**, détaillant la mise en charge et les premiers résultats à 2 mois mettant en évidence un gonflement des échantillons.
- **Livrable à 6 mois**, détaillant une première étude du phénomène de gonflement des éprouvettes et une première estimation de la valeur de  $k_{def}$ . Afin de pouvoir analyser plus finement le phénomène de gonflement, il a été décidé de procéder au déchargement d'une des éprouvettes.
- **Livrable final** avec les conclusions globales de l'essai et les résultats sur la reprise d'humidité des échantillons pendant les premiers mois de l'essai.

À l'issue de cette étude, plusieurs constats et recommandations peuvent être tirés :

- Les résultats des essais montrent que l'effet de fluage, spécialement à court terme, est difficilement dissociable d'autres phénomènes comme le retrait/gonflement hydrique ou l'état des contraintes dans la section
- L'essai a été réalisé dans des conditions de laboratoire dites « idéales » ce qui ne correspond pas aux situations réelles de chantier. Dans des conditions réelles, un grand nombre de facteurs doit être pris en compte tels que la répartition des contraintes dans le poteau, l'hétérogénéité du bois dans la section, les variations d'humidité. Tous ces facteurs sont pris en compte de façon forfaitaire par l'Eurocode, mais ne peuvent pas être approchés par l'essai réalisé
- Les essais confirment l'existence d'un fluage des éléments soumis à un effort de compression axiale. En prenant en compte les alertes indiquées précédemment, le fluage des éléments comprimés en bois pourrait être inférieur aux valeurs indiquées dans l'Eurocode 5 (estimation faite lors de l'étude à  $k_{def} = 0.3$ )

Les résultats de cet essai ne sont pas à considérer comme normatifs. Cependant ces résultats permettent de confirmer l'existence d'un phénomène de fluage pour les éléments en bois soumis à un effort de compression axiale et donner des pistes pour l'appréhender.

Les concepteurs doivent définir les hypothèses de fluage les plus adéquates selon les particularités de chaque projet, sur la base d'une analyse de risques et avec l'appui et le conseil des contrôleurs techniques.

**LIVRABLE 1 :**

**RESULTATS PRELIMINAIRES**

**A 2 MOIS**



# Résultats préliminaires à 2 mois

Fait à Egletons, le 14/06/2019

## 1. Contexte et problématique de la prestation technologique

Dans le cadre d'une campagne expérimentale, qui a comme objectif l'émergence et la prolifération de Bâtiments en Bois de Grandes Hauteurs (BBGH), l'association ADIVbois propose l'étude du fluage sous compression des structures en bois. En effet, l'Eurocode 5 permet d'anticiper les déflexions à long terme des éléments fléchis via un coefficient majorateur  $k_{def}$  et une pondération spécifique des charges à l'état limite ultime de service (E.L.S.). Cependant, ce coefficient ne s'applique que pour des éléments porteurs verticaux et/ou horizontaux soumis à de la flexion simple ou déviée. Concernant la déformation de fluage en compression axiale, rien dans l'Eurocode 5, ne permet d'extrapoler des déplacements différés verticaux accentués d'étages en étages. La campagne expérimentale vise donc à étudier le comportement en fluage sous compression de quatre essences (Epicéa, Douglas, Hêtre et Chêne). L'étude concerne uniquement les éléments porteurs verticaux en lamellé-collé homogènes limités à la classe de résistance mécanique GL24h et en classe de service 1. Ainsi, les conditions hygrométriques des échantillons, pendant toute la campagne expérimentale, doivent correspondre à la classe de service 1, à savoir une température et une humidité relative régulées à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $65\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$ , respectivement. Les essais seront réalisés sous contrainte de compression constante égale à 30 % de la valeur caractéristique en compression ( $f_{c0k} = 23,5\text{MPa}$ ), et ce, pendant un an avec une phase de conditionnement climatique.

### 1.1. Rappel de la configuration d'essai

- Les 5 échantillons en épicéa en bois lamellés collés (Epicéa GL24h) sont instrumentés avec deux capteur de déplacement et un capteur de force (Fig. 1).
- Le conditionnement des échantillons se fait dans une chambre climatique régulée en température et humidité.
- Les conditions dans la chambre climatique sont :  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $65\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$  (classe de service 1).
- L'humidité moyenne des échantillons a été estimée à 11,6% avec un écart type de 0,8%.
- La valeur de chargement est de 144kN (valeur égale à 30 % de la valeur caractéristique en compression)



Fig. 1 : Disposition des 5 échantillons



## 2. Mesure du module instantané

Le module instantané a été estimé à partir des mesures réalisées lors de la mise en charge des échantillons.

Le module a été estimé à partir des courbes « déformation instantanée – contrainte ».

La déformation instantanée a été estimée à l'aide des capteurs de déplacement fixés sur chaque échantillon. La méthode de calcul de la déformation a été schématisée sur la Fig. 2.

La déformation a été calculée à partir de la valeur moyenne de déplacements mesurés par les deux capteurs positionnés sur la face avant et arrière.

La contrainte a été calculée à partir de l'effort appliqué et la section transversale des échantillons (Fig. 3). Les dimensions retenues pour le calcul de la section transversale sont : 20x10cm<sup>2</sup>.

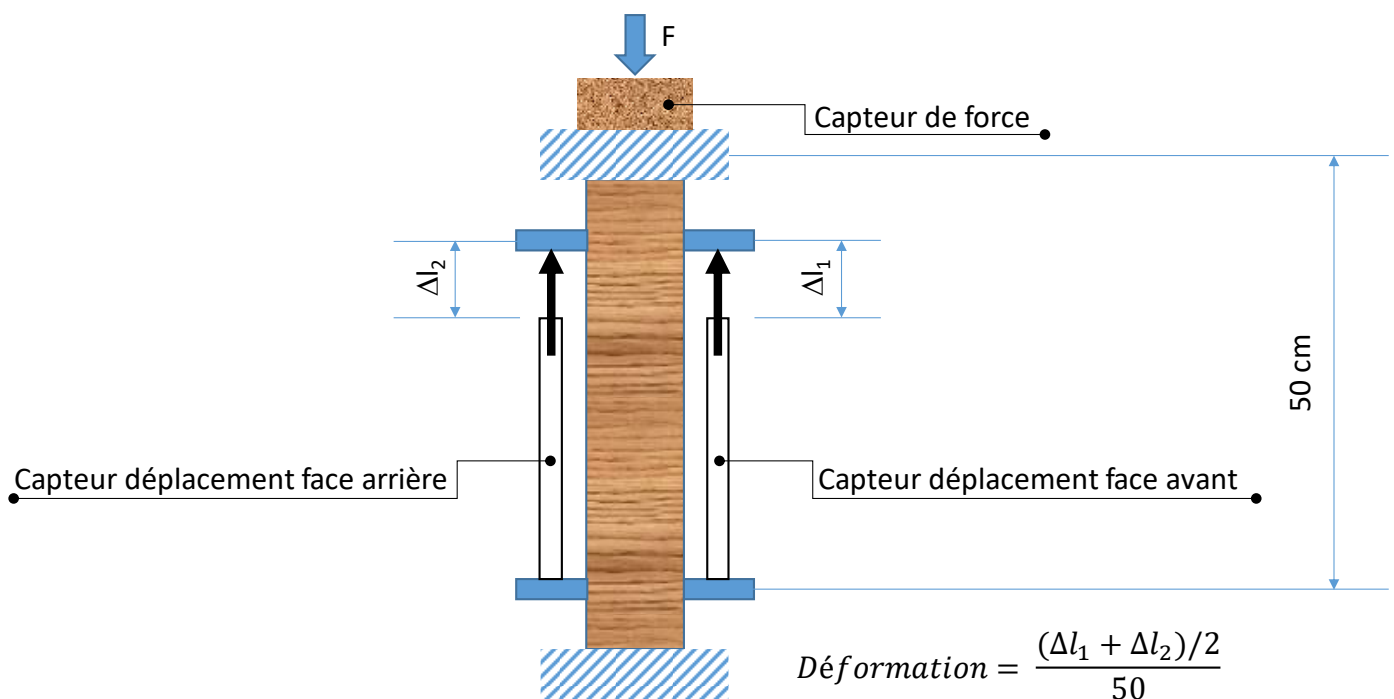


Fig. 2 : Mesure de la déformation

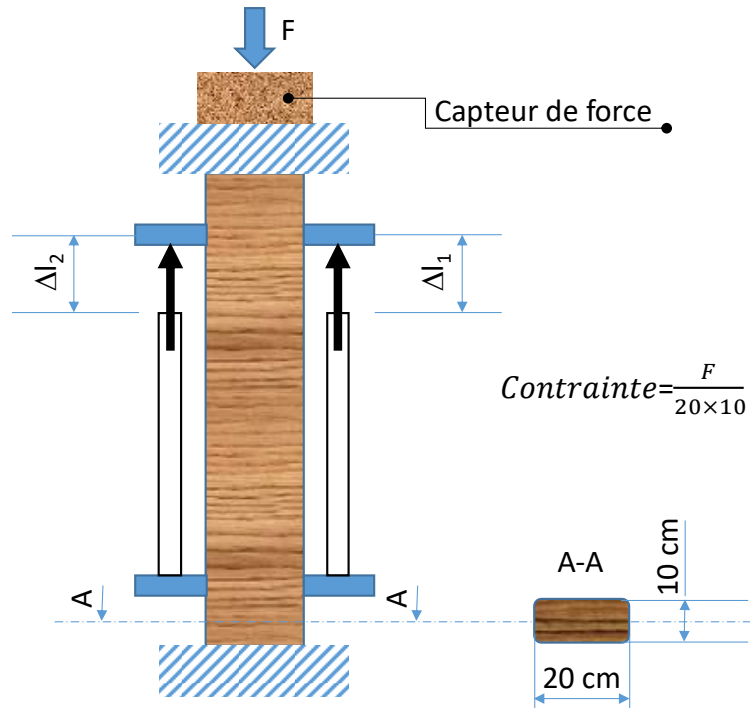


Fig. 3 : Mesure de la contrainte

Les courbes utilisées pour le calcul du module instantané pour chaque échantillon sont données ci-dessous :

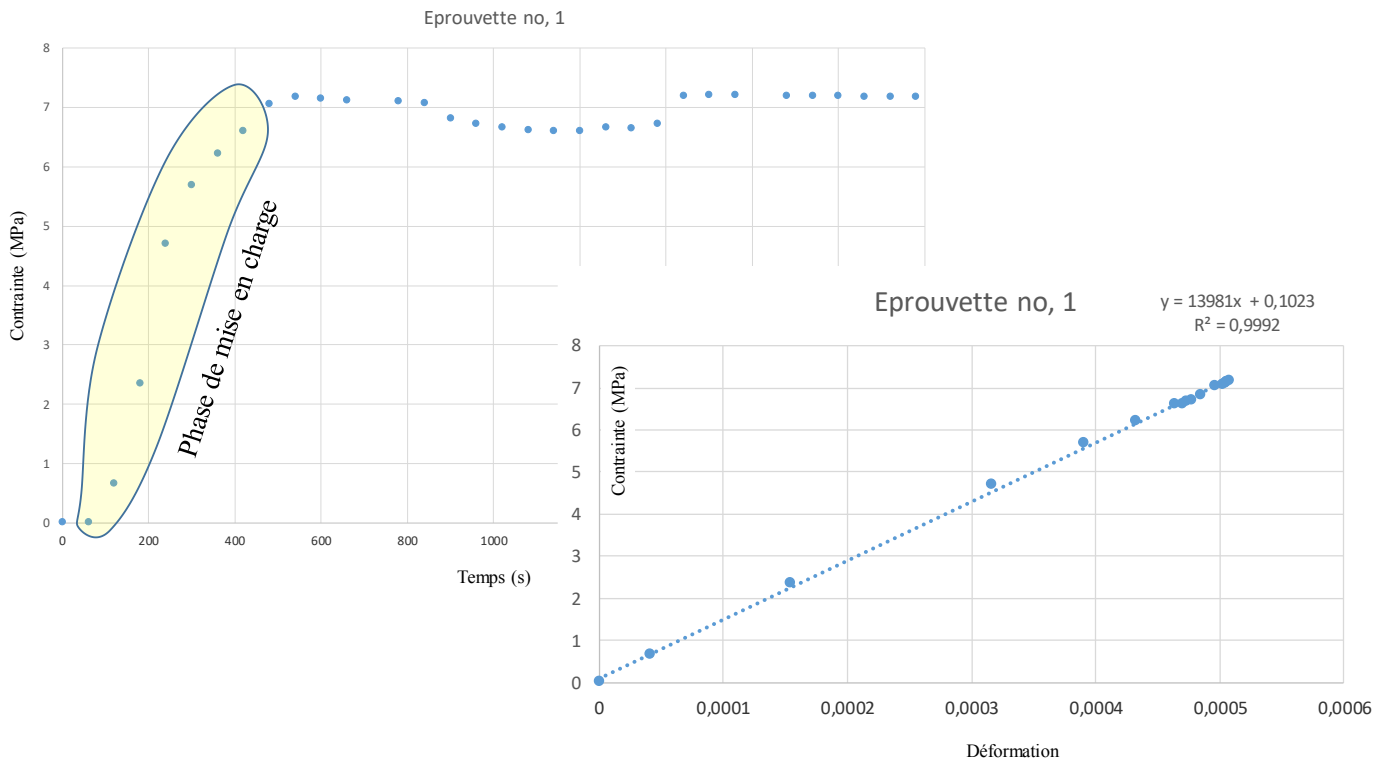


Fig. 4 : Echantillon 1

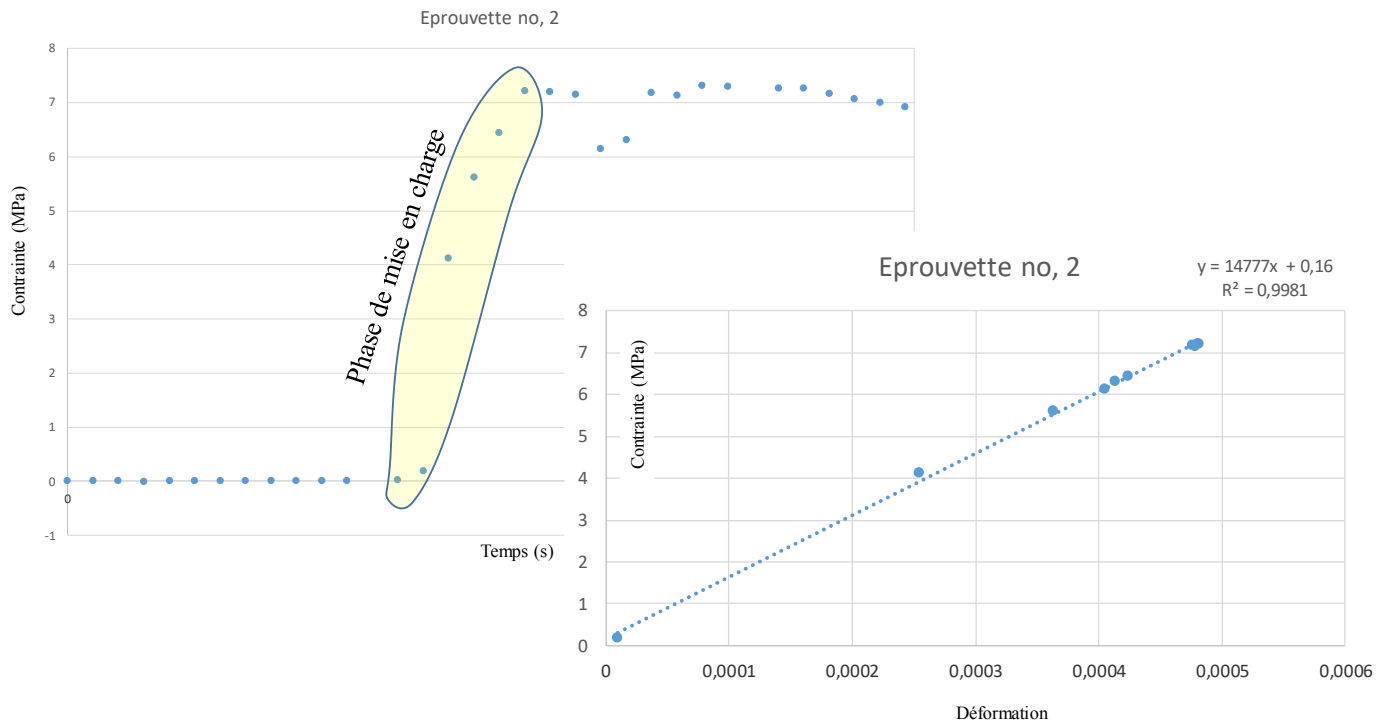


Fig. 5 : Echantillon 2

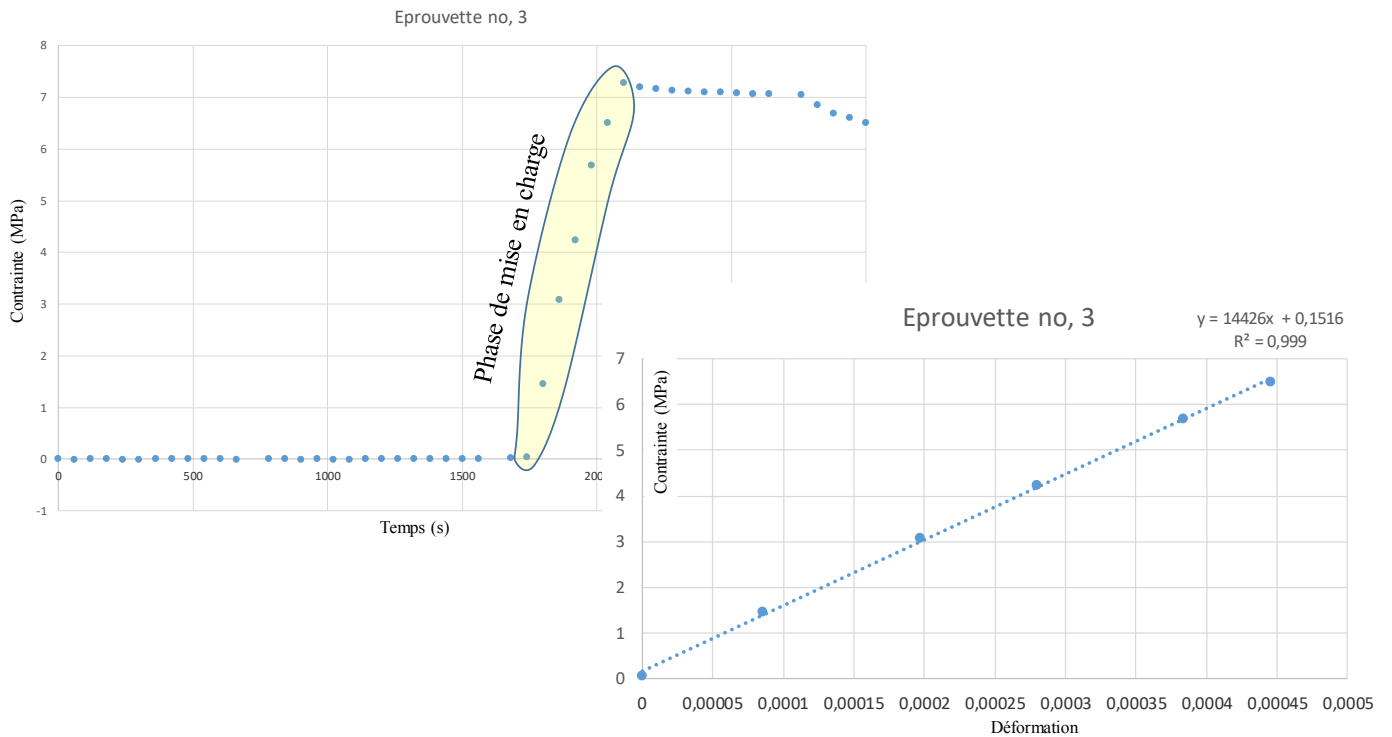


Fig. 6 : Echantillon 3

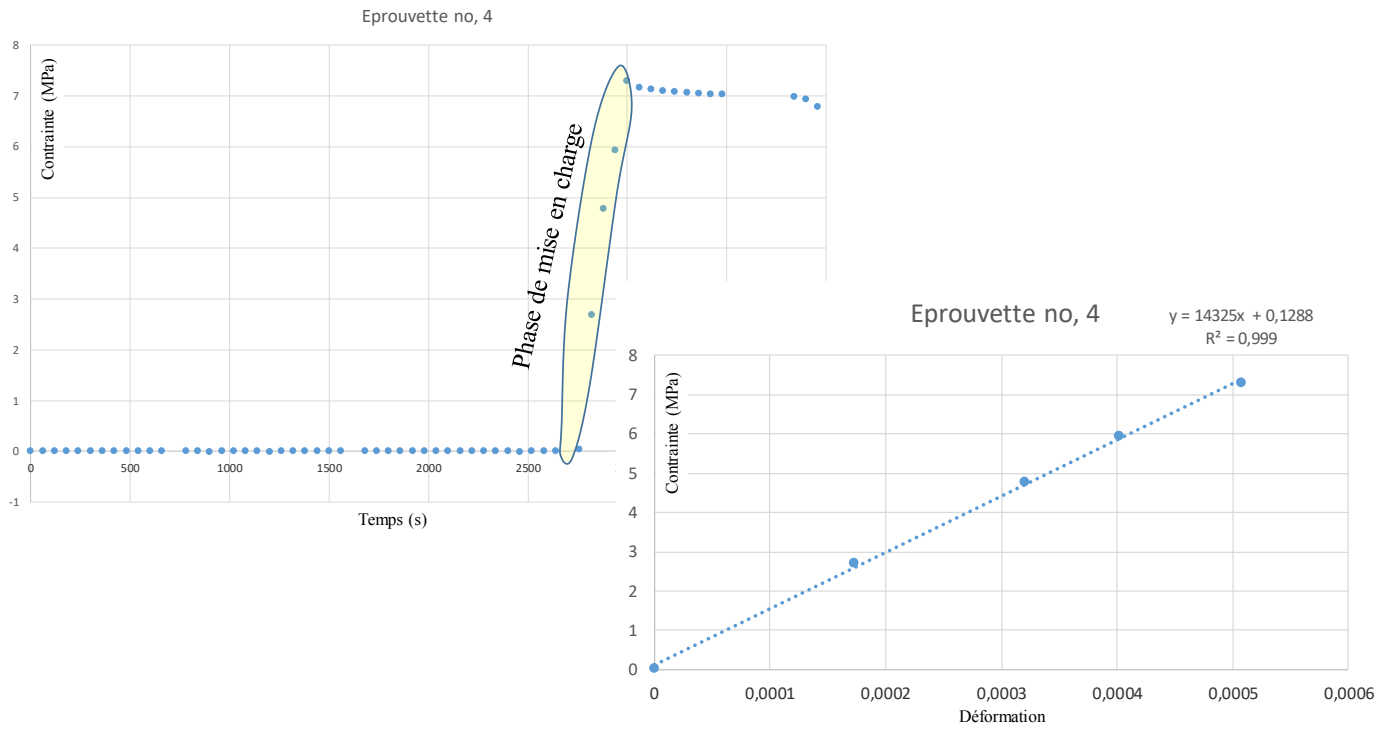


Fig. 7 : Echantillon 4

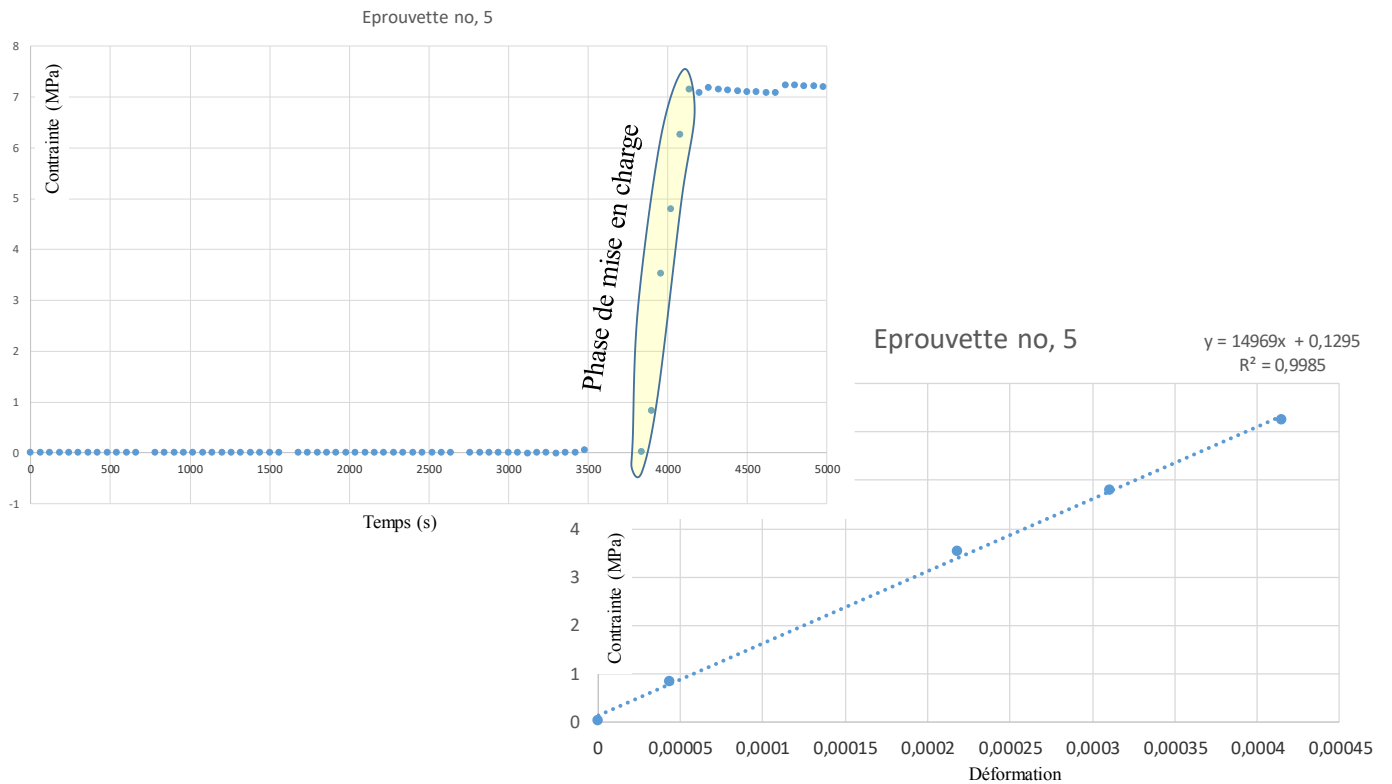


Fig. 8 : Echantillon 5



Les valeurs de modules instantanés obtenus pour les 5 échantillons sont résumées dans le Tableau 1.

	E (MPa)
Echantillon1	13981
Echantillon2	14777
Echantillon3	14426
Echantillon4	14325
Echantillon5	14969
Moyenne (MPa)	14495,6
Ecart type	387,96

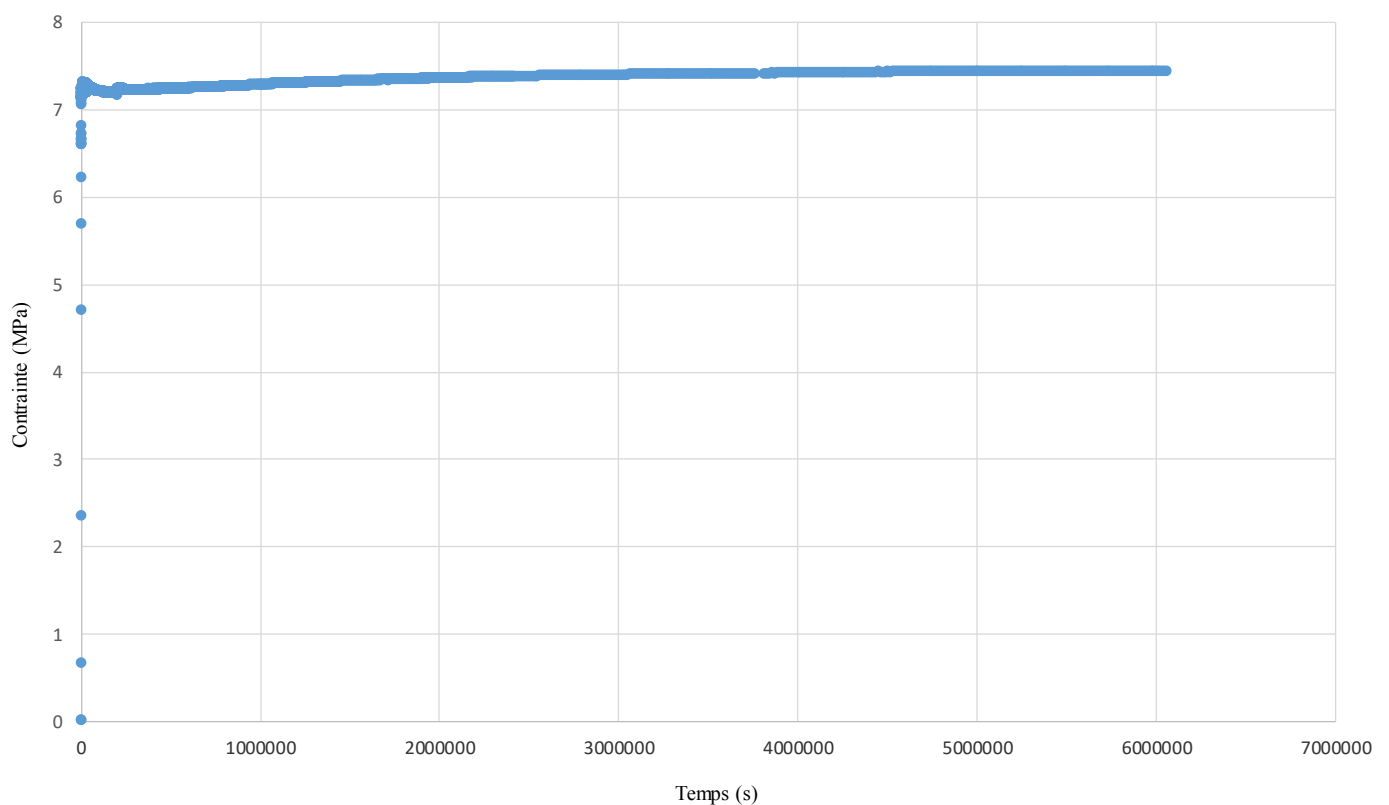
Tableau 1 : Valeurs de modules instantanés

### 3. Comportement des échantillons sur la période : 20 mars – 1 juin 2019

Les graphiques représentés ci-dessous retracent le comportement des 5 échantillons sur la période **20 mars – 1 juin 2019**. Ces graphiques représentent l'évolution du chargement, la déformation et des déplacements mesurés sur la face avant et arrière en fonction du temps.

#### Echantillon 1

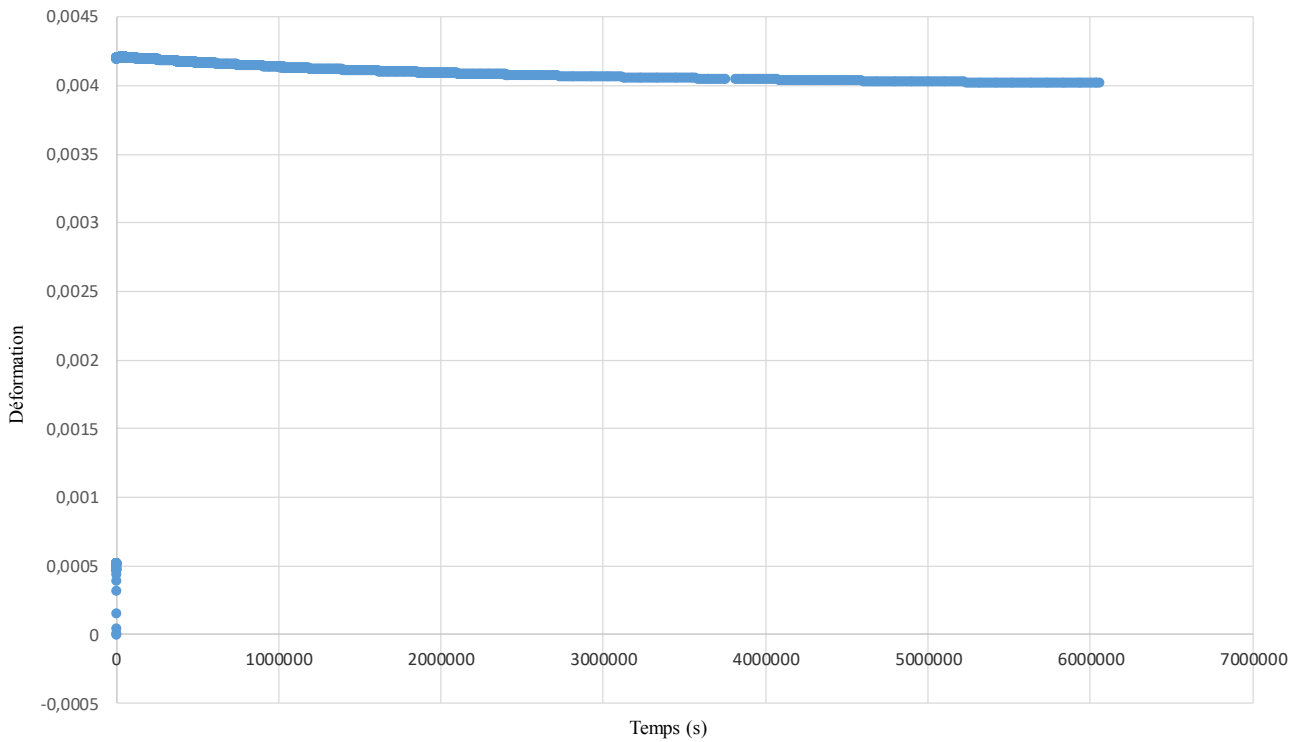
Eprouvette no, 1







Eprouvette no, 1



Eprouvette no, 1

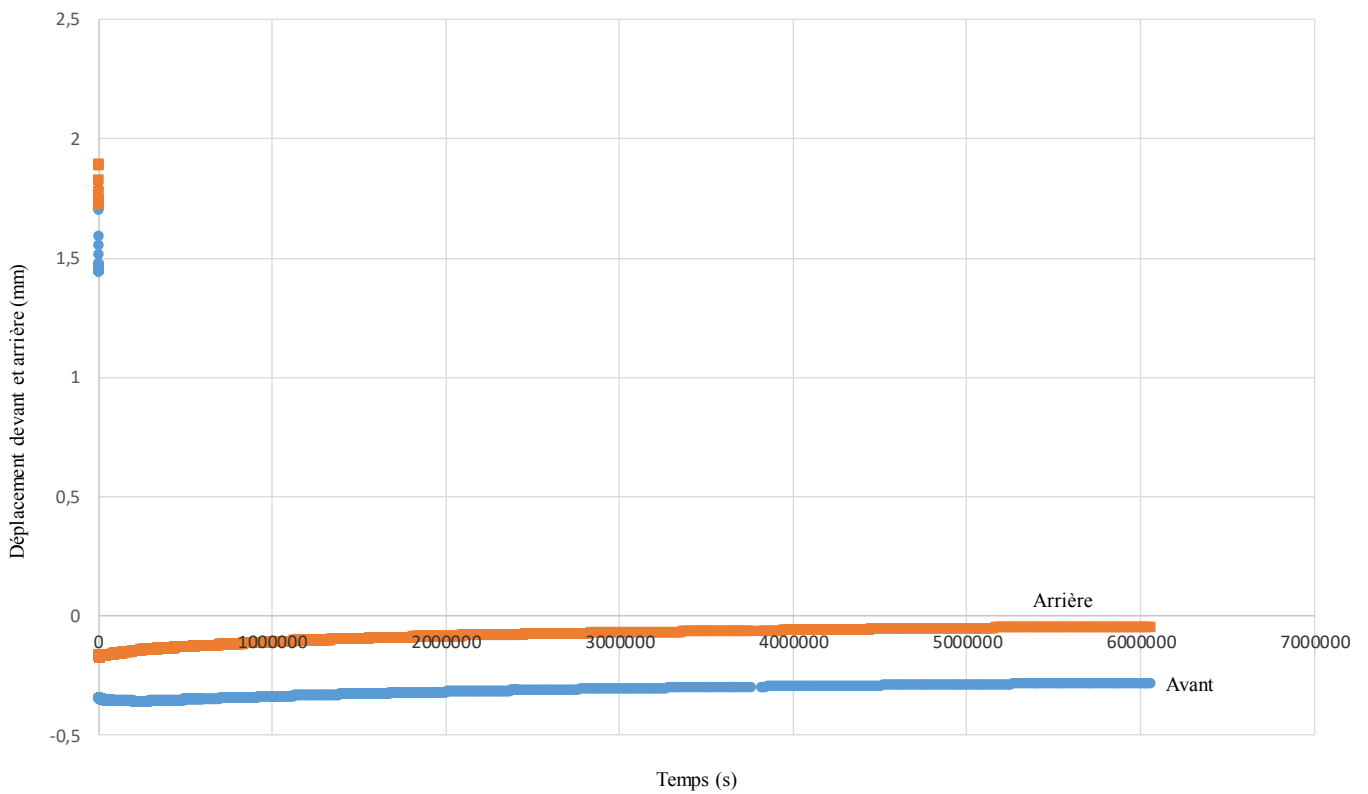
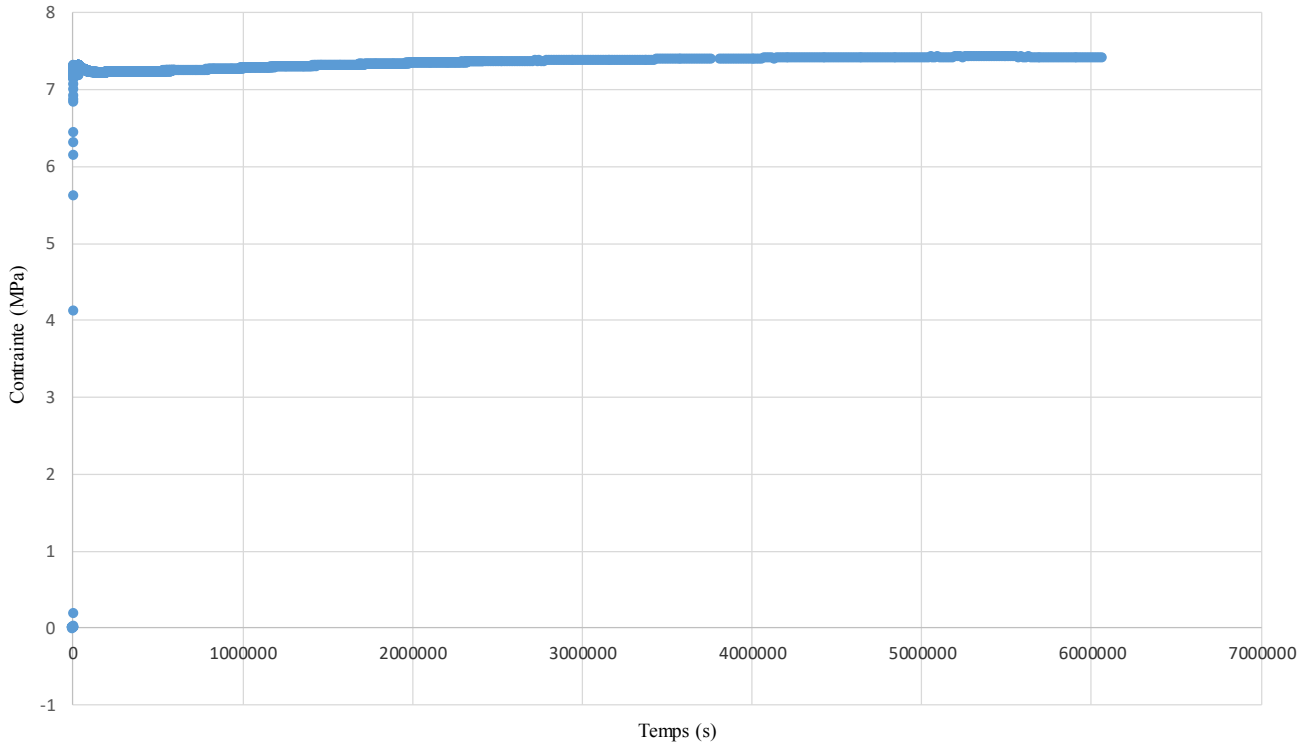


Fig. 9 : Comportement échantillon 1

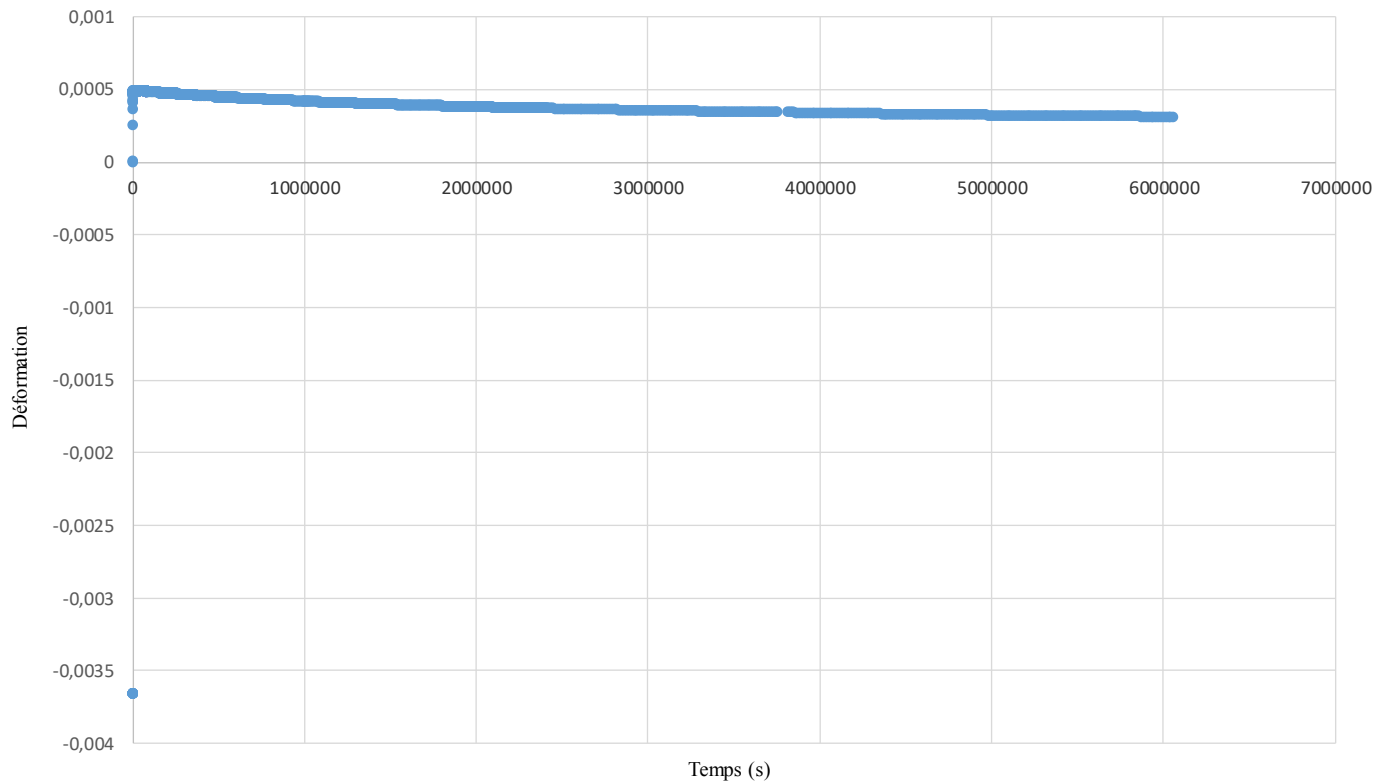


## Echantillon 2

Eprouvette no, 2



Eprouvette no, 2





Eprouvette no, 2

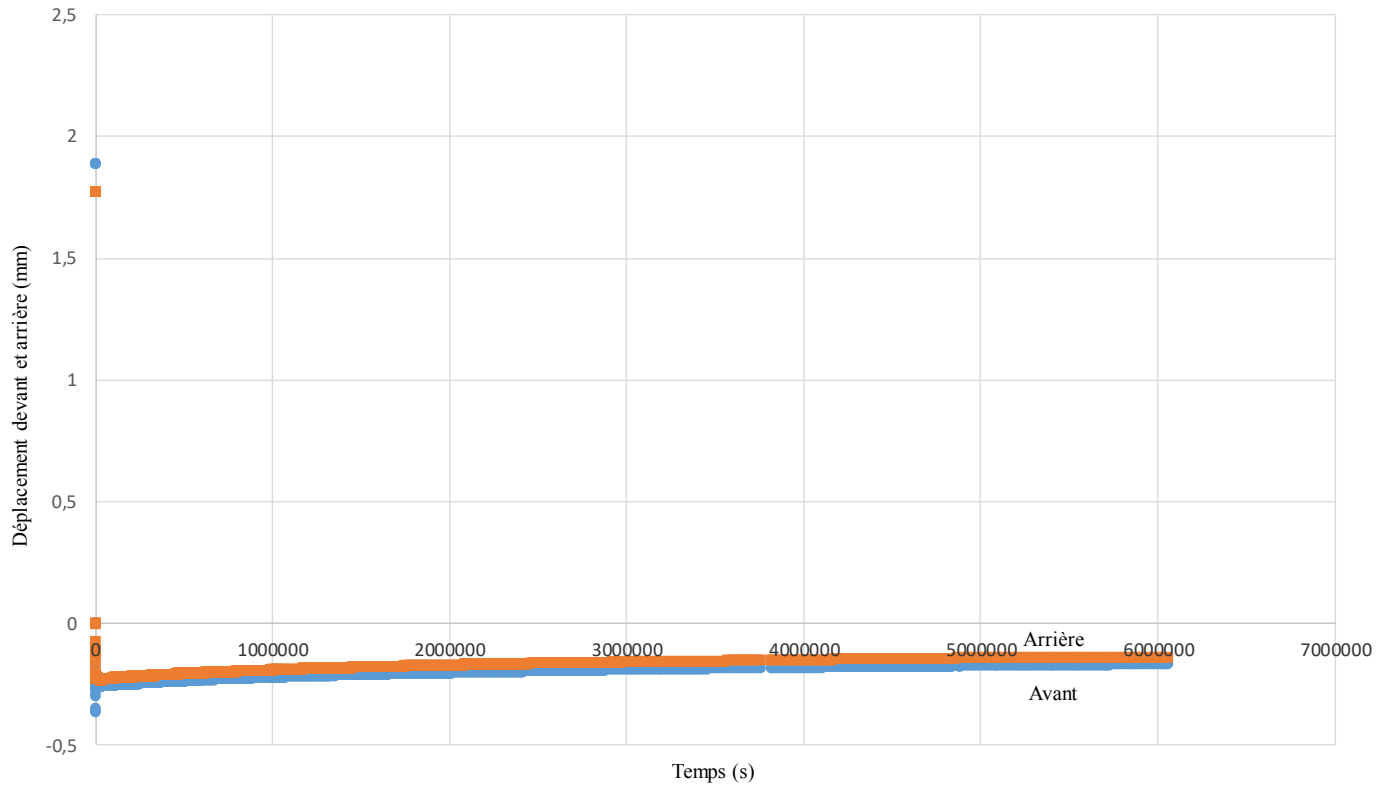
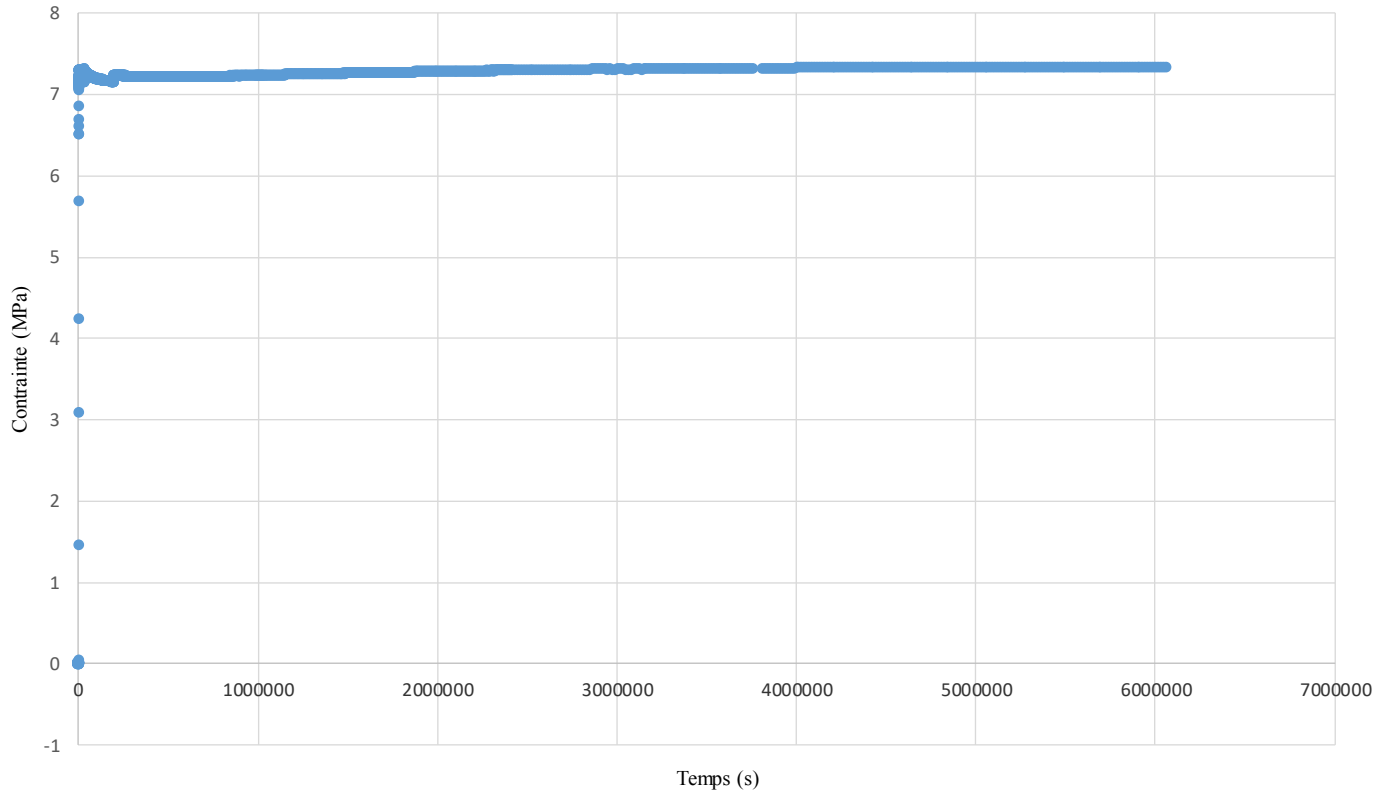


Fig. 10 : Comportement échantillon 2

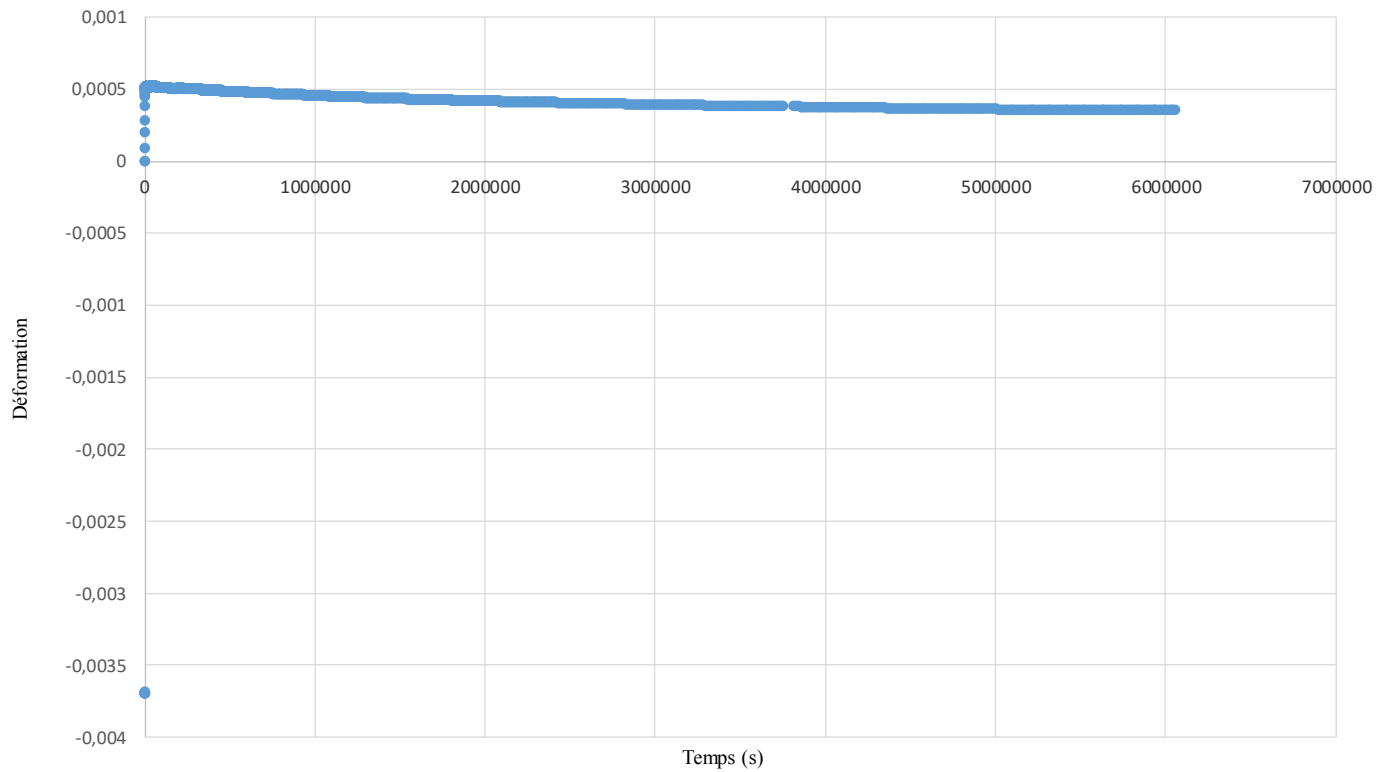
**Echantillon 3**



Eprouvette no, 3



Eprouvette no, 3





Eprouvette no, 3

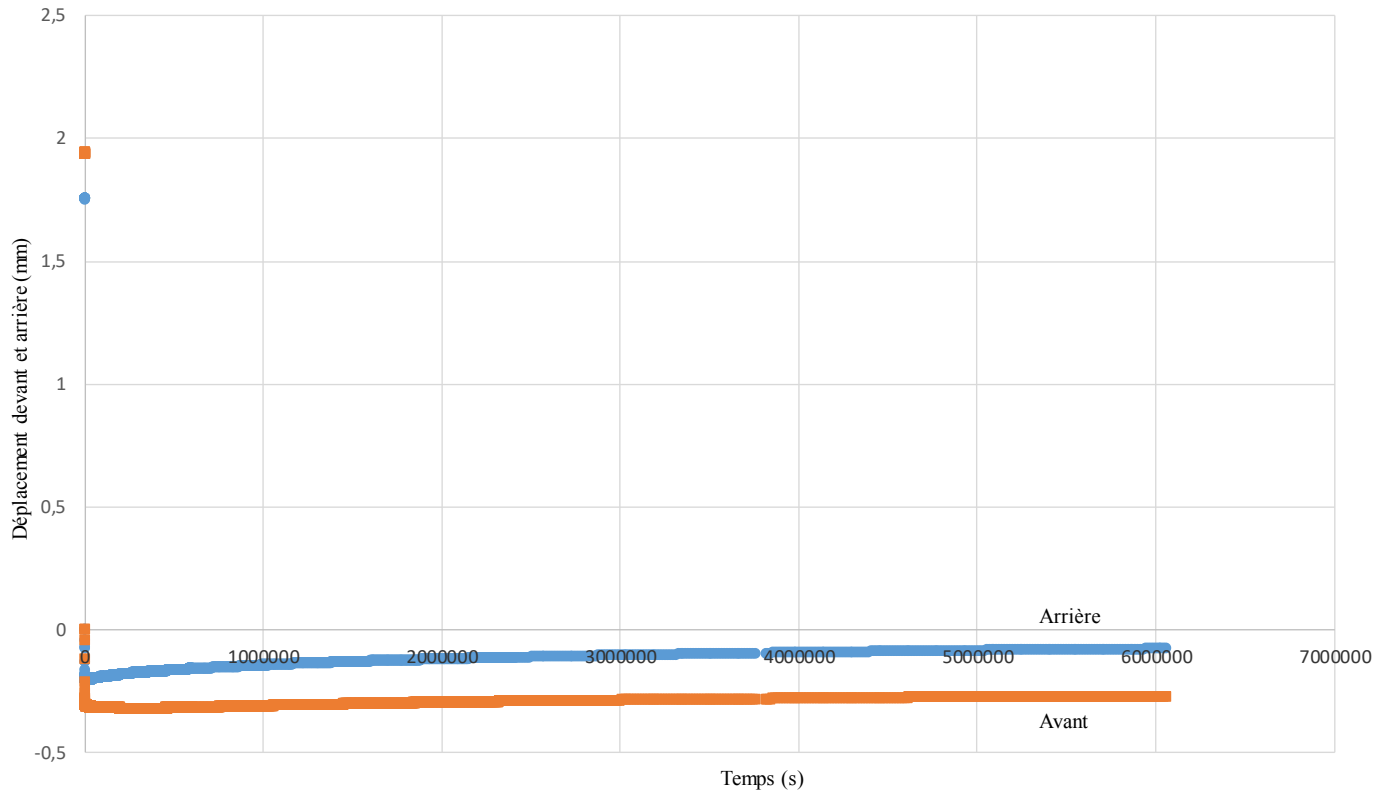


Fig. 11 : Comportement échantillon 3





Eprouvette no, 4

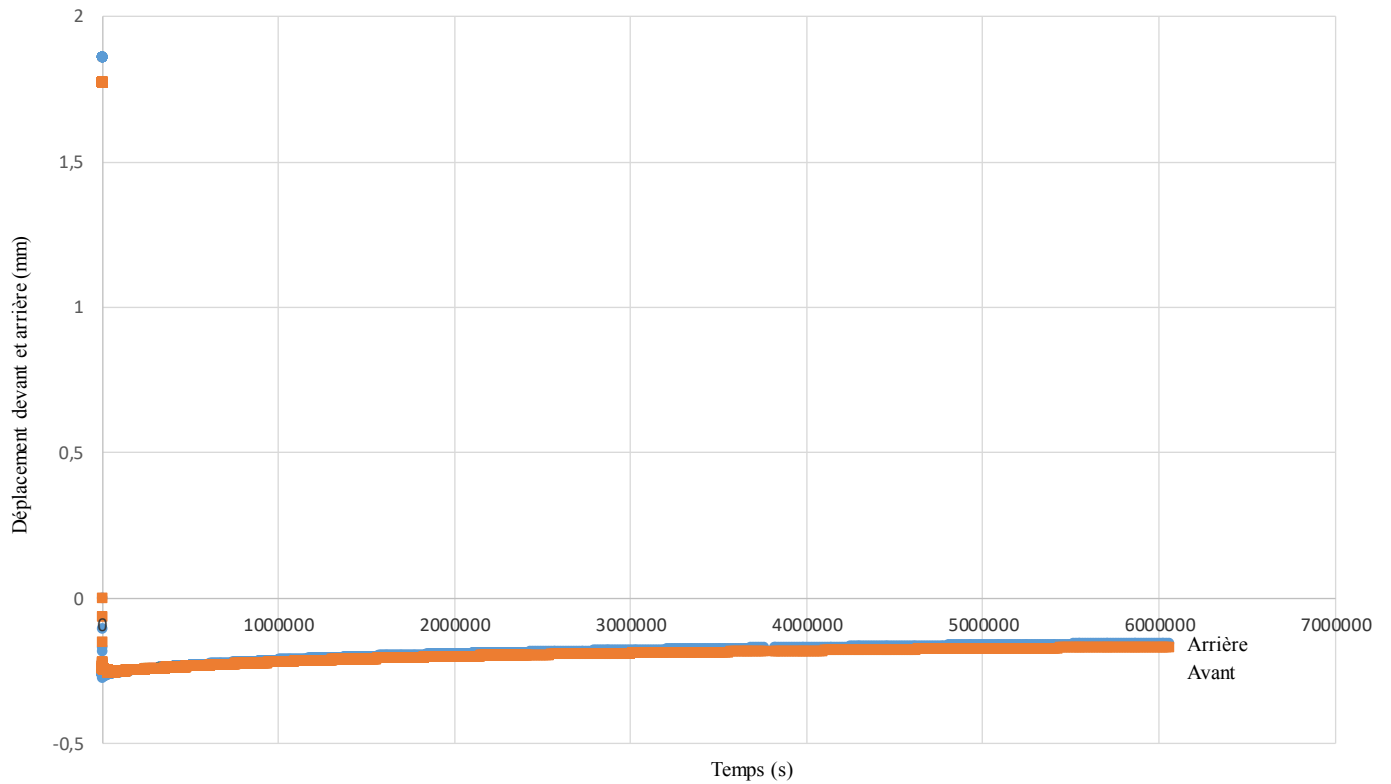
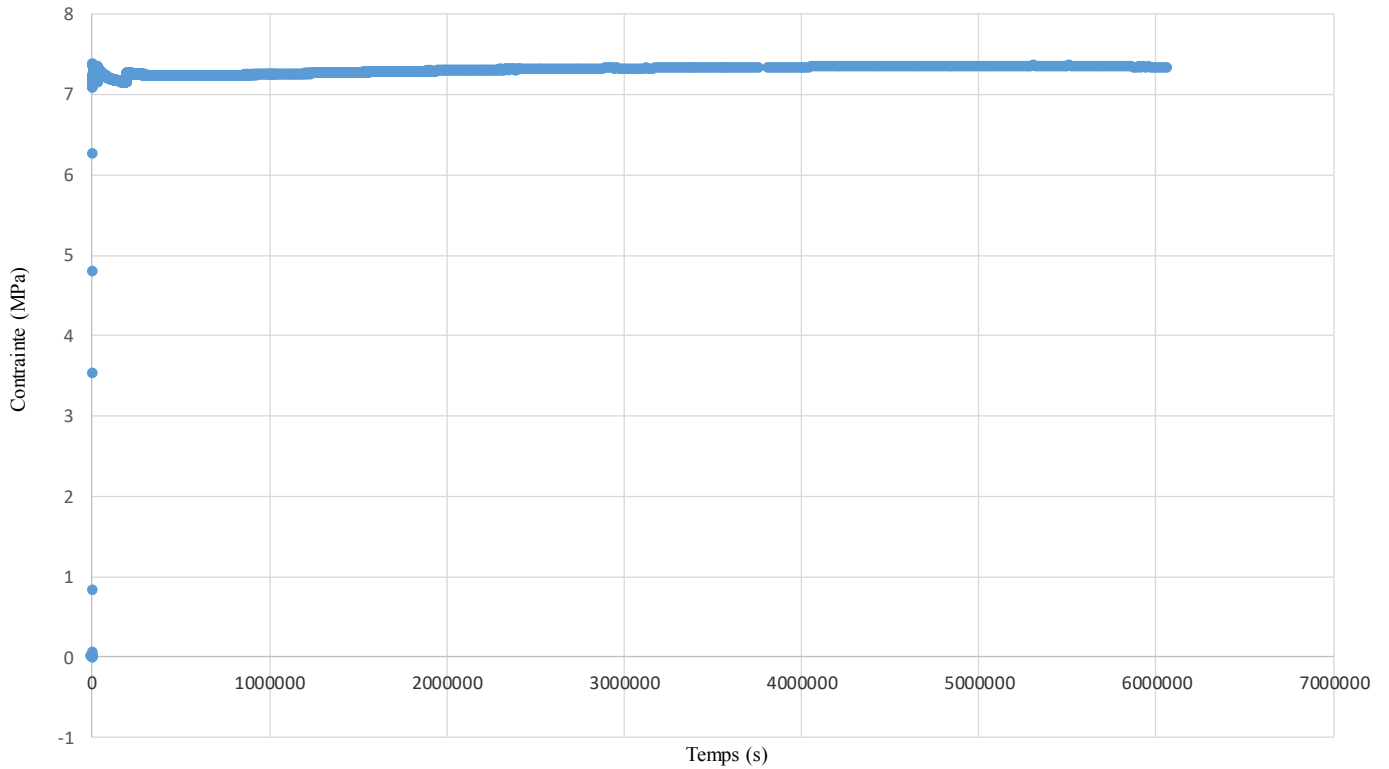


Fig. 12 : Comportement échantillon 4

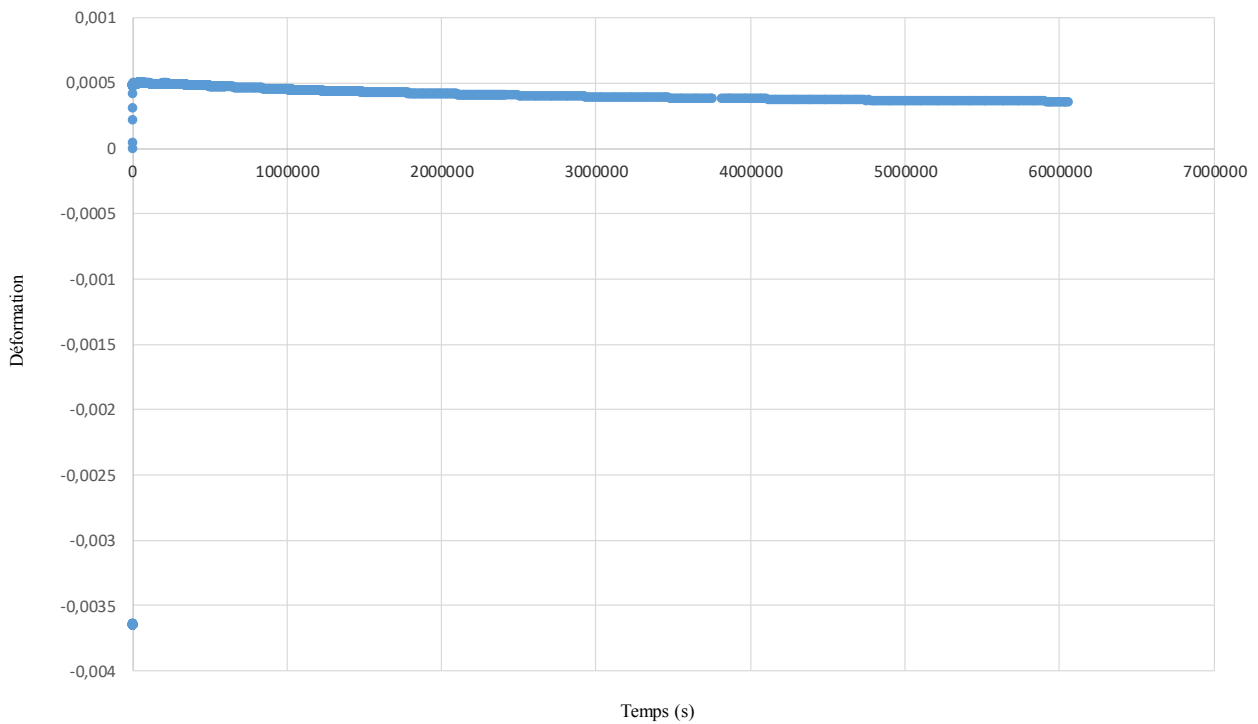


## Echantillon 5

Eprouvette no, 5



Eprouvette no, 5





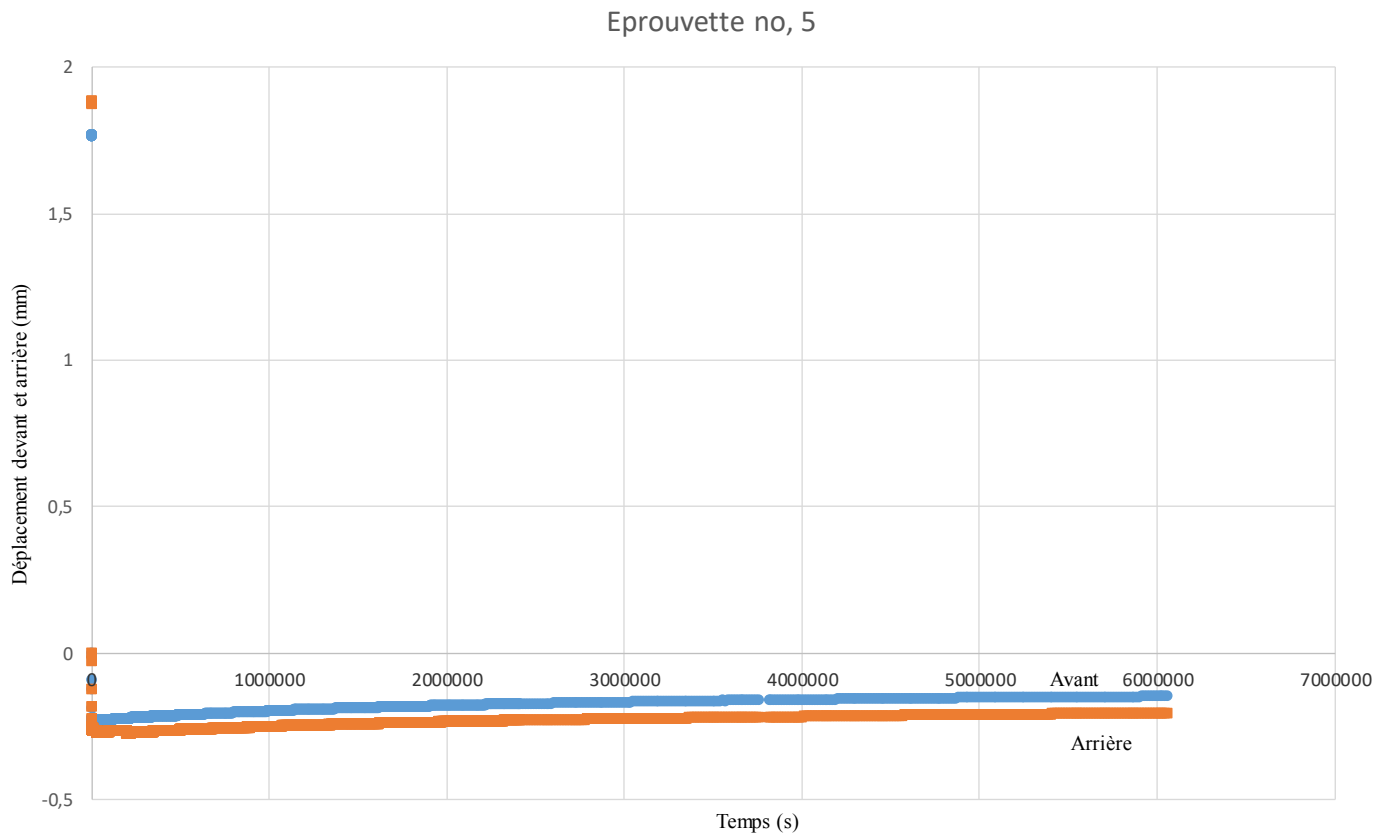


Fig. 13 : Comportement échantillon 5

Les évolutions des 5 échantillons laissent penser à une légère humidification lors de cette première période.

Les évolutions des 5 échantillons montrent également que la stabilité du montage expérimental.

Fait à Egletons, le 14/06/2019

M. Ion Octavian POP

M. Frédéric DUBOIS

M. Jérôme DOPEUX

**LIVRABLE 2 :**  
**FLUAGE BOIS EN**  
**COMPRESSION A 6 MOIS**



## « STR-C Fluage du bois en compression »



M. Ion Octavian POP

M. Frédéric DUBOIS

M. Jérôme DOPEUX



# Essai fluage sous compression à 6 mois

Rapport d'essais sur la période 20/03/2019 - 15/10/2019

Le rapport à 6 mois « STR-C Fluage du bois en compression » reprend des éléments présentés dans les deux précédents rapports (10/05/2019 et 14/06/2019).

## 1. Contexte et problématique de la prestation technologique

Dans le cadre d'une campagne expérimentale, qui a comme objectif l'émergence et la prolifération de Bâtiments en Bois de Grandes Hauteurs (BBGH), l'association ADIVbois propose l'étude du fluage sous compression des structures en bois. En effet, l'Eurocode 5 permet d'anticiper les déflexions à long terme des éléments fléchis via un coefficient majorateur  $k_{def}$  et une pondération spécifique des charges à l'état limite ultime de service (E.L.S.). Cependant, ce coefficient ne s'applique que pour des éléments porteurs verticaux et/ou horizontaux soumis à de la flexion simple ou déviée. Concernant la déformation de fluage en compression axiale, rien dans l'Eurocode 5, ne permet d'extrapoler des déplacements différés verticaux accentués d'étages en étages. La campagne expérimentale vise donc à étudier le comportement en fluage sous compression de quatre essences (Epicéa, Douglas, Hêtre et Chêne). L'étude concerne uniquement les éléments porteurs verticaux en lamellé-collé homogènes limités à la classe de résistance mécanique GL24h et en classe de service 1. Ainsi, les conditions hygrométriques des échantillons, pendant toute la campagne expérimentale, doivent correspondre à la classe de service 1, à savoir une température et une humidité relative régulées à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $65\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$ , respectivement. Les essais seront réalisés sous contrainte de compression constante égale à 30 % de la valeur caractéristique en compression ( $f_{c0k} = 23,5\text{MPa}$ ), et ce, pendant un an avec une phase de conditionnement climatique.

### 1.1. Solution retenue

Pour cette campagne expérimentale l'association ADIVbois a opté pour la réalisation des essais de fluage sous compression sur 5 échantillons en épicea en bois lamellés collés (Epicéa GL24h).

Selon le cahier de charges la valeur de chargement est de 144kN (valeur égale à 30 % de la valeur caractéristique en compression).

Les conditions hygrothermiques de conditionnement des échantillons pendant l'essais :  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $65\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$  (classe de service 1).

Durée de l'essai : 12 mois

Début de l'essai : 20 mars 2019



## 2. Préparation des échantillons

Les 5 échantillons testés ont été usinés à partir d'une poutre d'épicéa en bois lamellés collés (Epicéa GL24h) selon les dimensions indiquées dans l'Annexe technique (dimensions 10cm x 20 cm x 75 cm). Les caractéristiques de la poutre sont données sur la Figure 1.



Figure 1. Caractéristiques de la poutre en Epicéa GL24h

La teneur en eau initiale de la poutre est de 12% (valeur donnée par le fabricant)).

Avant usinage des 5 échantillons, la poutre a été stockée dans l'atelier. La teneur en eau de la poutre a été évaluée avant le début de l'essai.

### 2.1. Mesure de l'humidité initiale des échantillons

Avant le lancement de l'essai l'humidité interne de la poutre d'épicéa en bois lamellés collés a été mesurée. Afin d'avoir une distribution spatiale de l'humidité plusieurs échantillons ont été prélevés dans la section de la poutre utilisée pour la fabrication des 5 échantillons. L'échantillonnage a été réalisé selon la représentation montrée sur la Figure 2. Les échantillons ont une forme cubique (2x2x2 cm<sup>3</sup>).

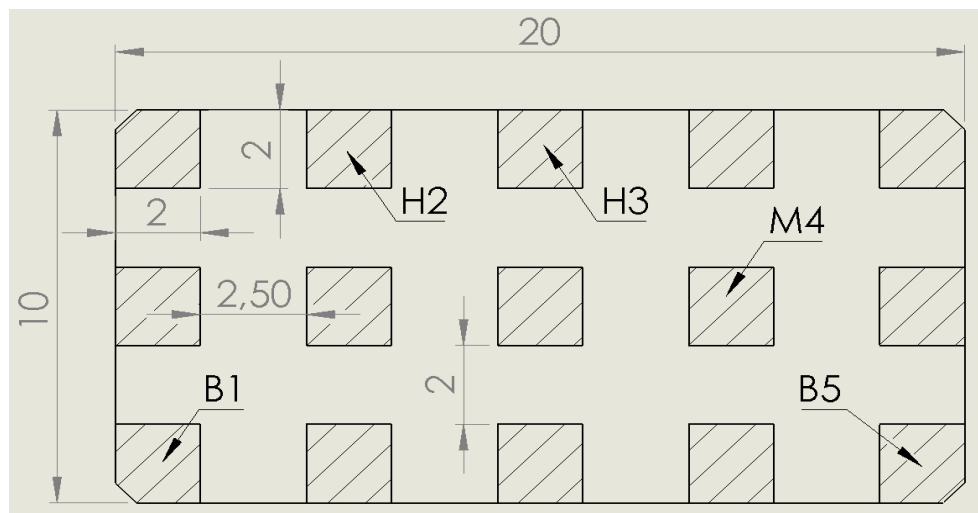


Figure 2 : Echantillonnage pour la mesure de l'humidité



La teneur en eau a été calculée en mesurant la masse de chaque échantillon avant et après passage dans une étuve à 103°C jusqu'à stabilisation de la masse anhydre. Les teneurs en eau mesurées sont présentées dans le Tableau 1. En faisant abstraction de la mesure d'humidité au point B5 (présence d'un nœud), l'échantillonnage présente une humidité moyenne de 11,6% et un écart type de 0,8%.

Eprouvettes	MC %
H1	10,77%
H2	12,13%
H3	11,86%
H4	11,54%
H5	10,56%
B1	10,29%
B2	11,29%
B3	11,29%
B4	10,88%
B5	8,62%
M1	11,27%
M2	12,74%
M3	12,67%
M4	12,63%
M5	11,20%

présence d'un nœud dans l'éprouvette

Tableau 1 : Valeur de la teneur en eau dans une section de la d'épicéa en bois lamellés collés

### 3. Montage expérimental

Le montage expérimental est représenté dans la Figure 3.

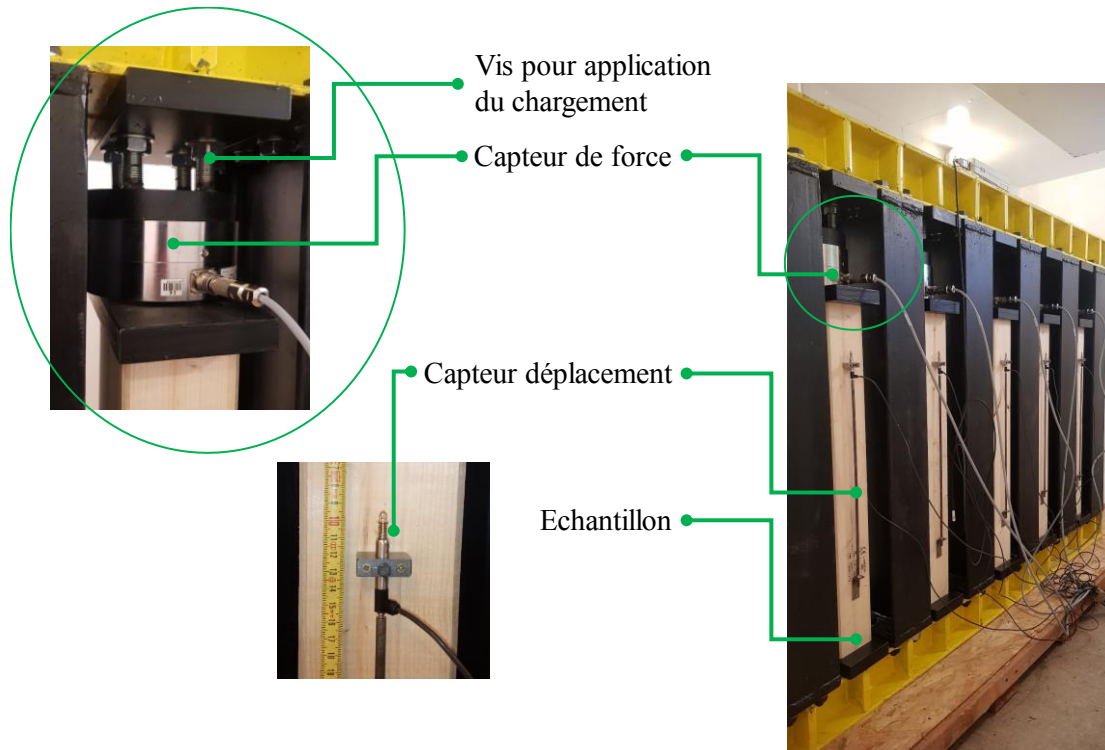


Figure 3 : Montage expérimental

Le calcul concernant la déformabilité du montage expérimental sous chargement est détaillé dans l'Annexe – Calcul banc d'essai (Rapport du 10/05/2019). Cette annexe présente les hypothèses de calcul, les résultats et les conclusions de la simulation. Ce calcul préliminaire a permis la validation des caractéristiques dimensionnelles de notre banc expérimental.

Le montage permet de réaliser le chargement en fluage sous compression de 5 échantillons simultanément (relaxation par palier avec correction de l'effort appliqué durant l'essai). Chaque échantillon est instrumenté par un capteur de force pour mesurer la force appliquée et deux capteurs de déplacement pour mesurer le fluage de l'échantillon. Les capteurs de force sont disposés sur deux faces opposées.

### 3.1. Système d'application de la charge

Le chargement de chaque échantillon est appliqué par l'intermédiaire des 4 vis et une plaque de répartition (Figure 4).

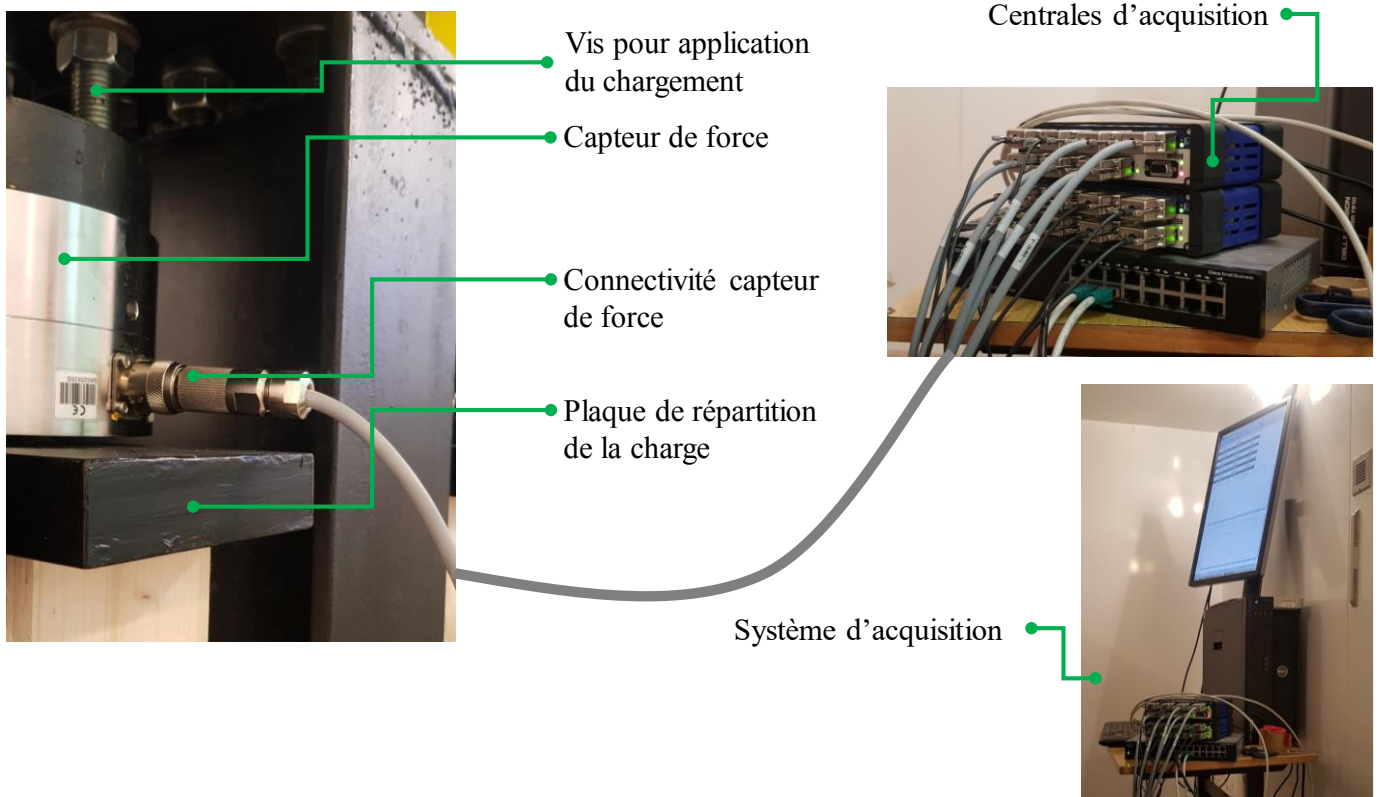


Figure 4 : Zoom sur le système de chargement et la centrale d'acquisition

La valeur du chargement est vérifiée tous les jours. En cas de variation du chargement par rapport à la valeur initiale imposée une correction est réalisée. Le serrage ou le desserrage de vis est réalisée avec une clé dynamométrique (Figure 5). La plage de variation du chargement est fixé entre 140 et 148 kN, soit une variation de  $\pm 4\text{kN}$  par rapport à la valeur de chargement fixée dans le cahier de charges.



Figure 5 : Clé dynamométrique





### 3.2. Mesure du déplacement

Le positionnement des capteurs de déplacement est décrit dans la Figure 6.

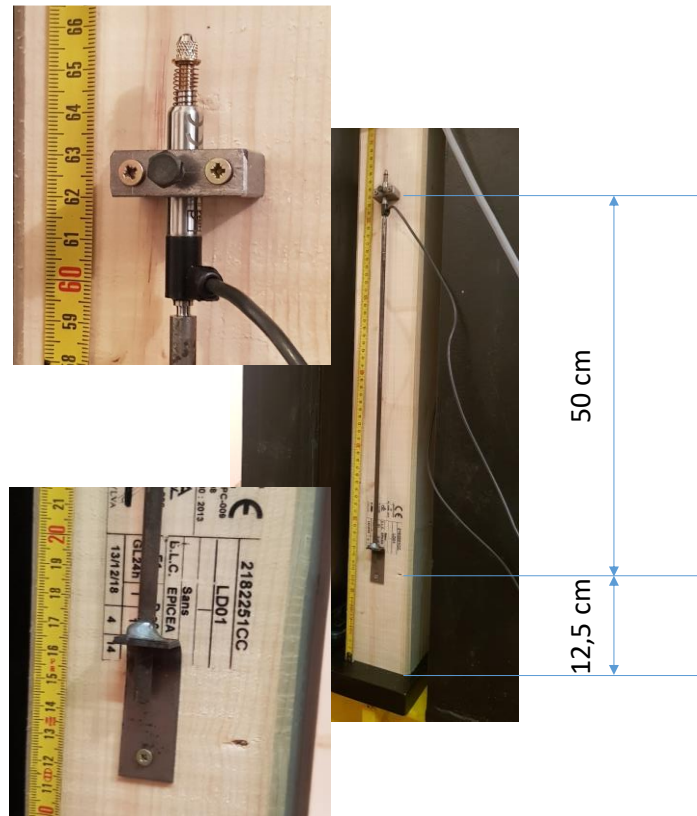


Figure 6 : Positionnement des capteurs de déplacement

Les caractéristiques métrologiques des capteurs utilisés sont données ci-dessous. :

- **Capteur de force HBM (Annexe – Capteur de force, Rapport du 10/05/2019)**  
Force nominale : 250kN
- **Capteur de déplacement HBM (Annexe – Capteur de déplacement, Rapport du 10/05/2019)**  
Déplacement nominal : 2mm



#### 4. Evolution de conditions hygrothermiques de l'essai

Les conditions hygrothermiques dans la chambre climatique dans laquelle sont conditionnés les échantillons sont : 65%HR et 20°C. L'évolution des conditions hygrothermiques sont relevé régulièrement. L'évolution de ces conditions sont donnée en Figure 7. Selon les travaux de Varnier et al., ces conditions hygrothermiques correspondent à une humidité interne d'équilibre voisine de 13,5%, ce qui correspondrait à une augmentation progressive de 1,9% entre l'état hygrothermique à la mise en charge et l'équilibre atteint durant l'essai.

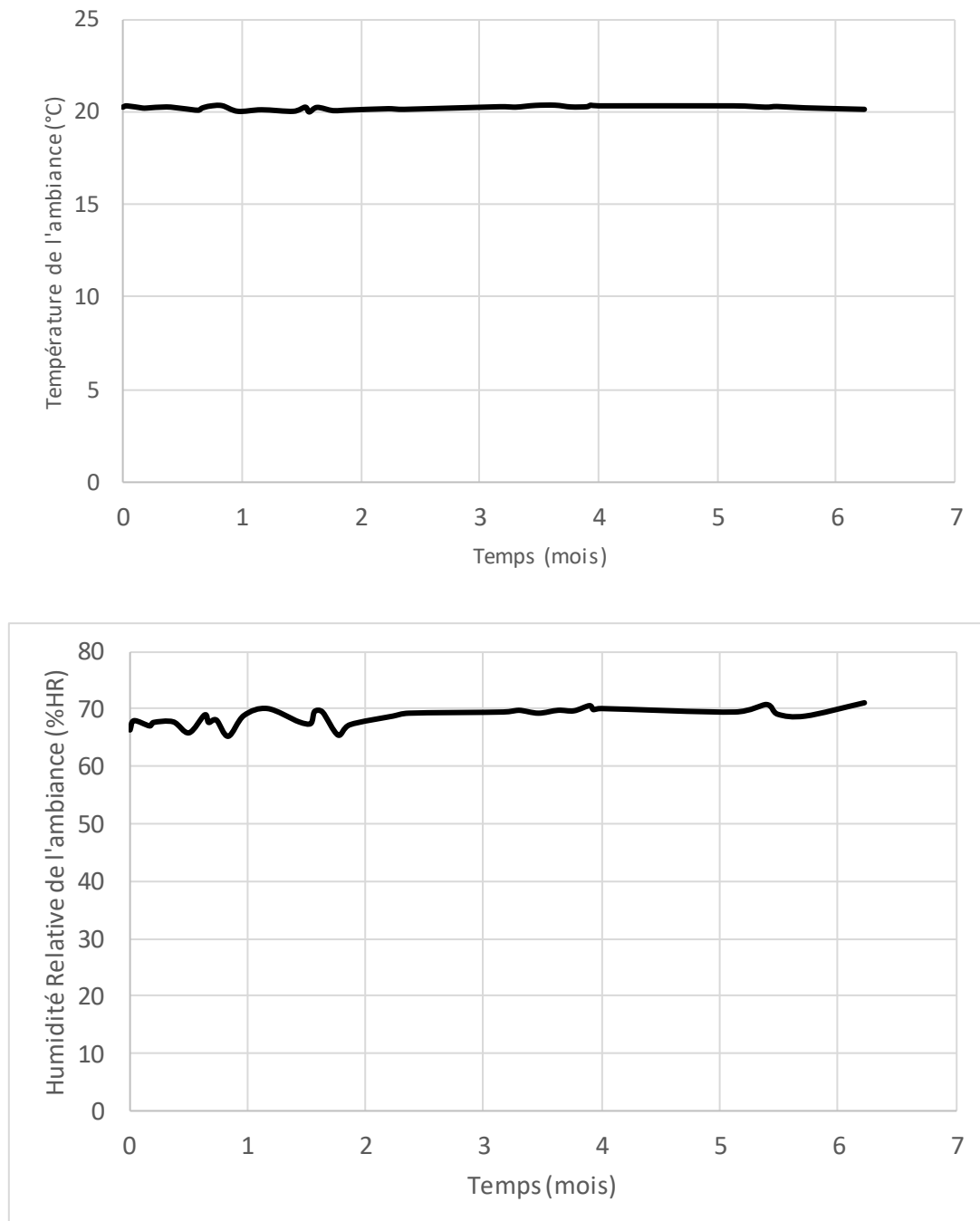


Figure 7 : Evolution des conditions hygrothermiques dans la chambre climatique



## 5. Mesure du module instantané lors de la mise en charge

Le module instantané a été estimé à partir des mesures réalisées lors de la mise en charge des échantillons.

Le module a été estimé à partir des courbes « déformation instantanée – contrainte ».

La déformation instantanée a été estimée à l'aide des capteurs de déplacement fixés sur chaque échantillon. La méthode de calcul de la déformation a été schématisée sur la Figure 8.

La déformation a été calculée à partir de la valeur moyenne des déplacements mesurés par les deux capteurs positionnés sur la face avant et arrière.

La contrainte a été calculée à partir de l'effort appliqué et la section transversale des échantillons (Figure 9). Les dimensions retenues pour le calcul de la section transversale sont : 20x10cm<sup>2</sup>.

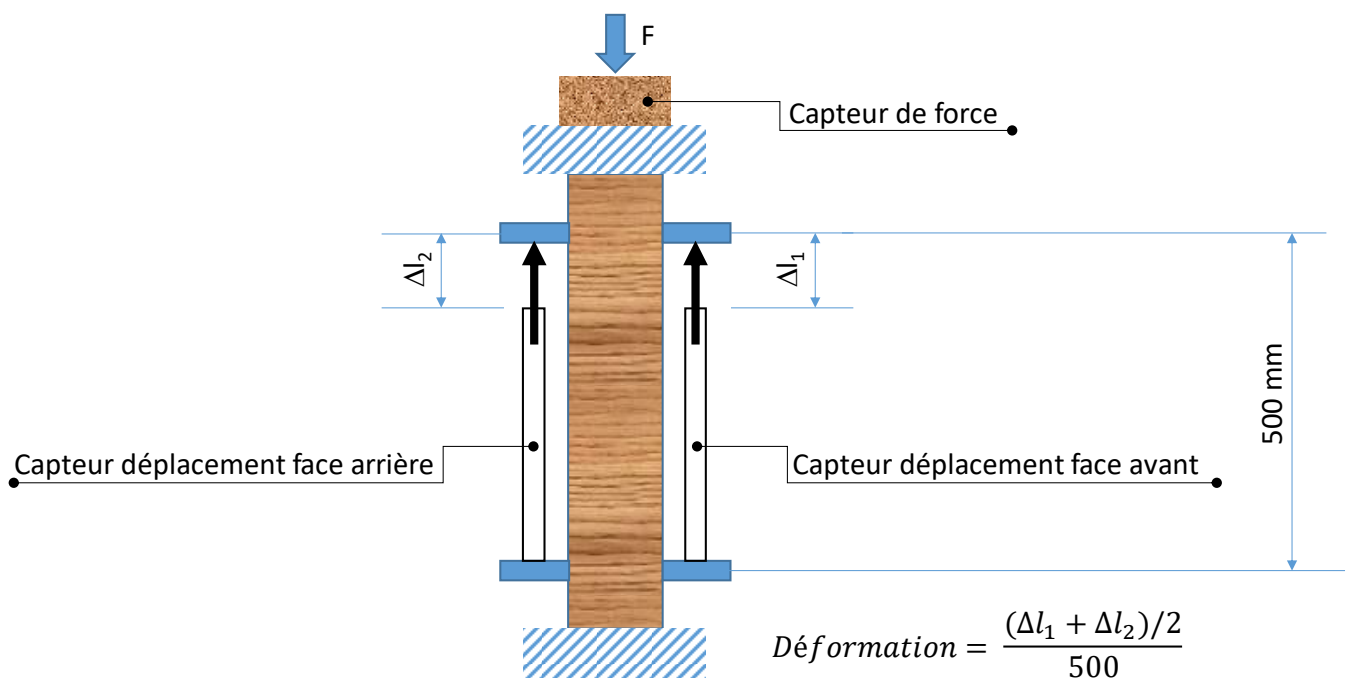


Figure 8 : Mesure de la déformation

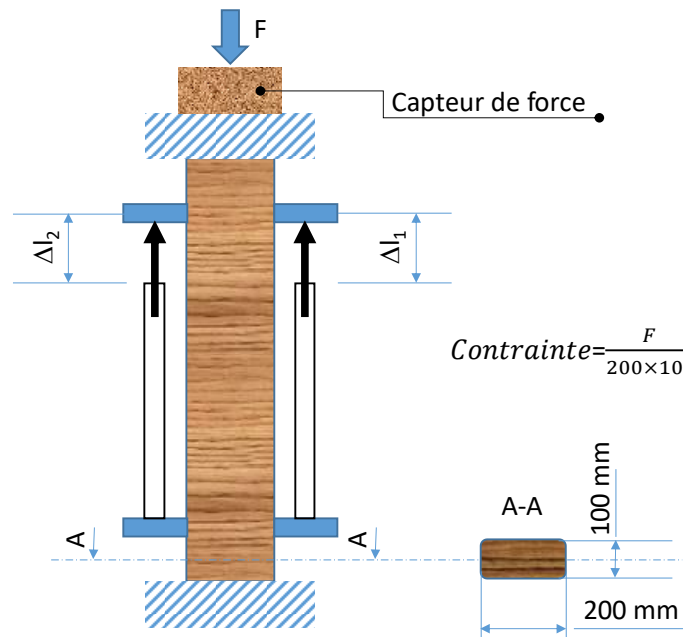


Figure 9 : Mesure de la contrainte

Les courbes utilisées pour le calcul du module instantané pour chaque échantillon sont données ci-dessous :

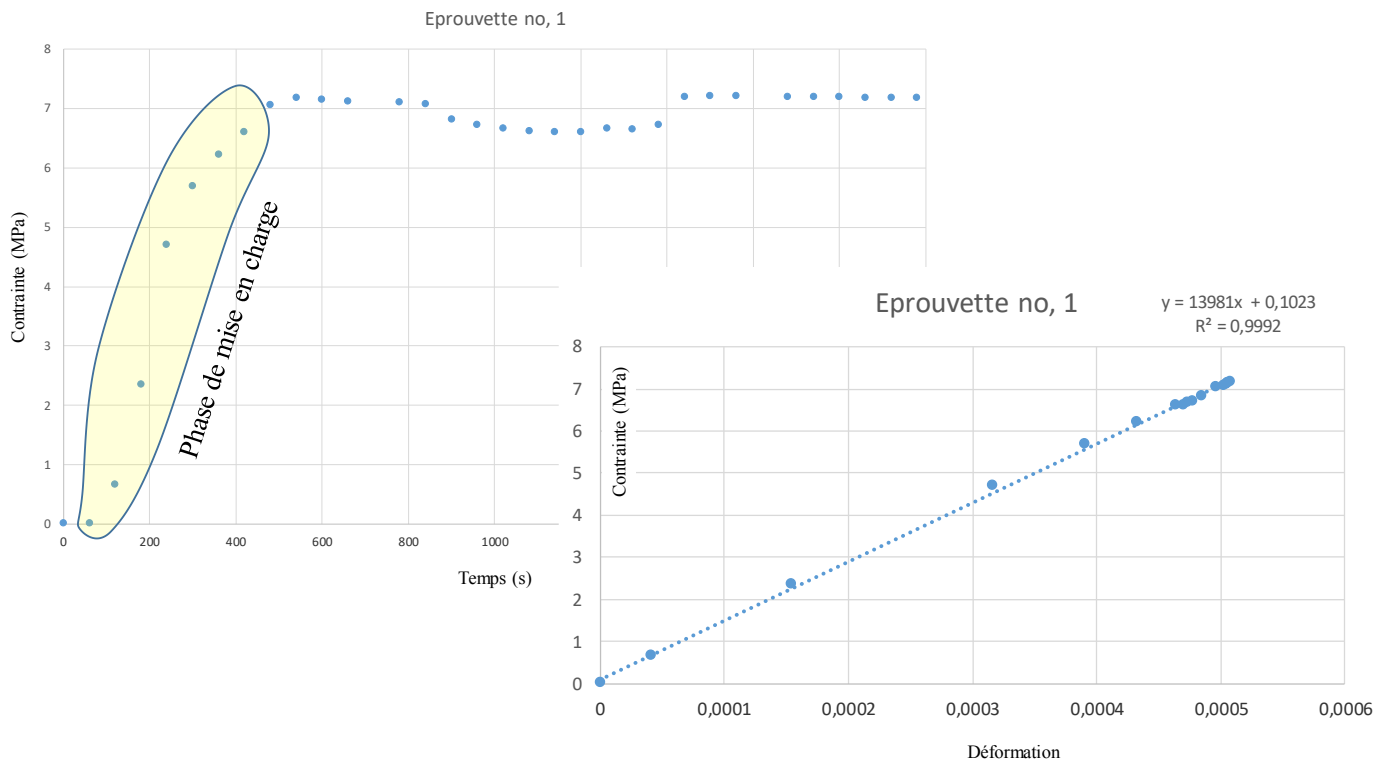


Figure 10 : Echantillon 1

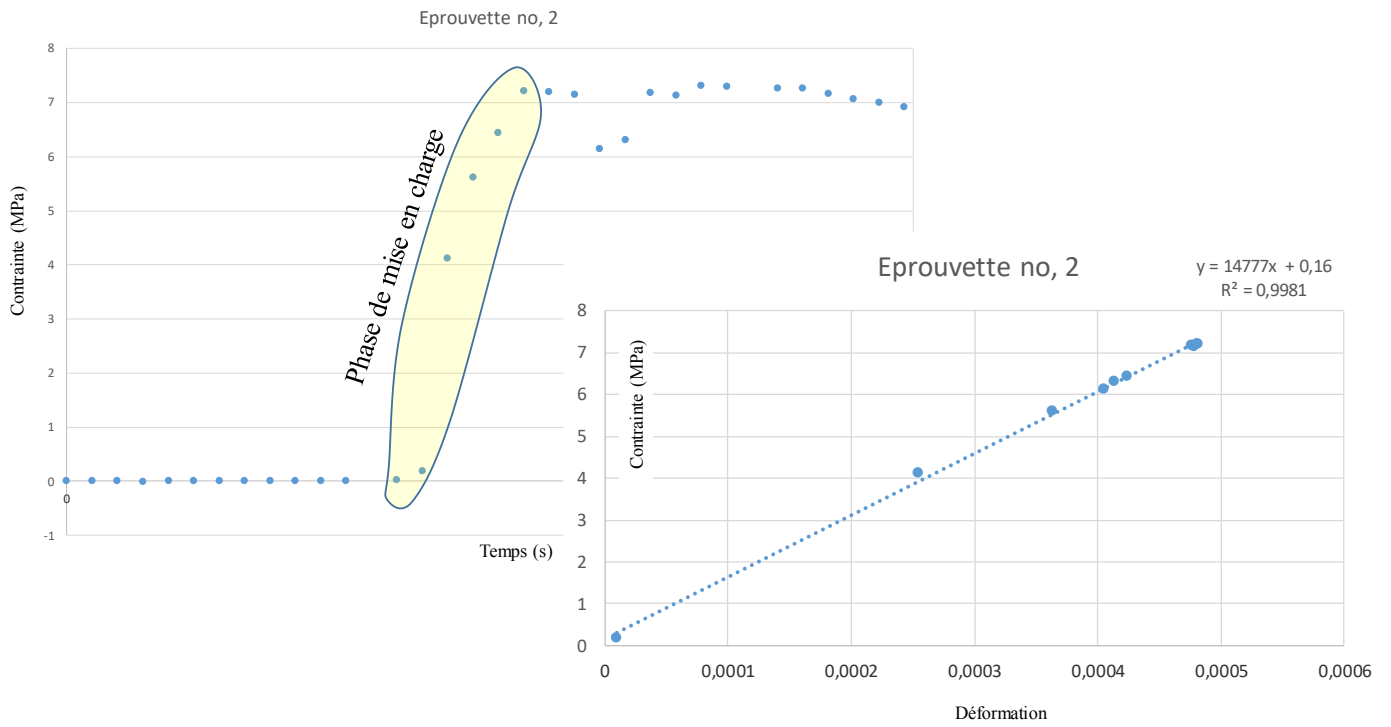


Figure 11 : Echantillon 2

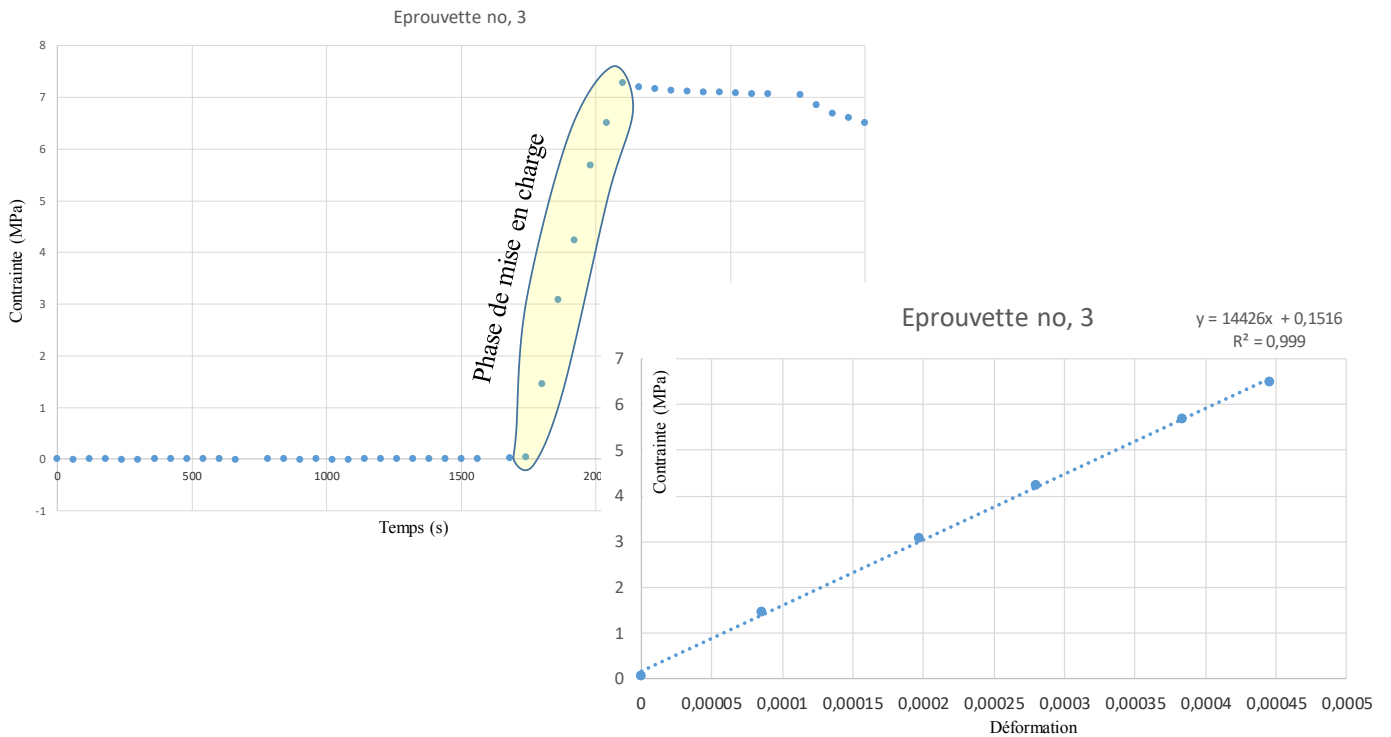


Figure 12 : Echantillon 3

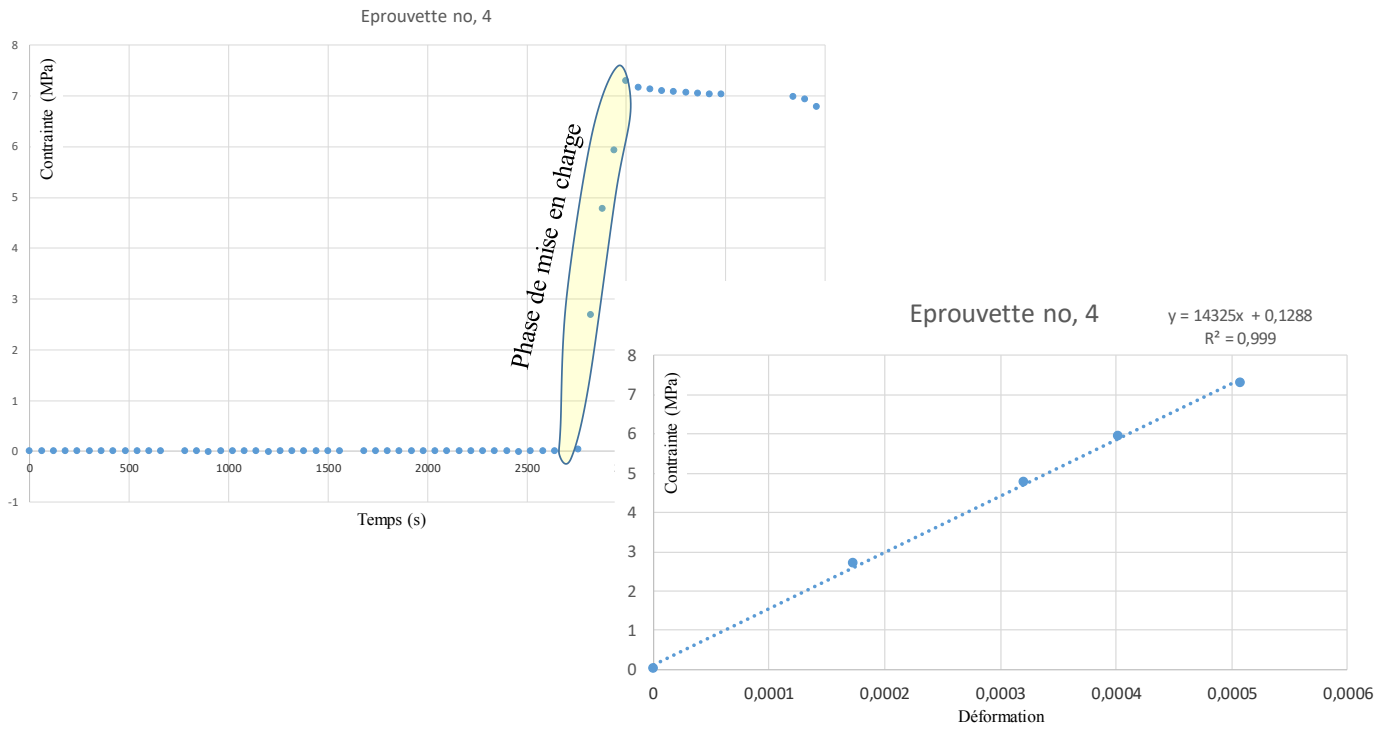


Figure 13 : Echantillon 4

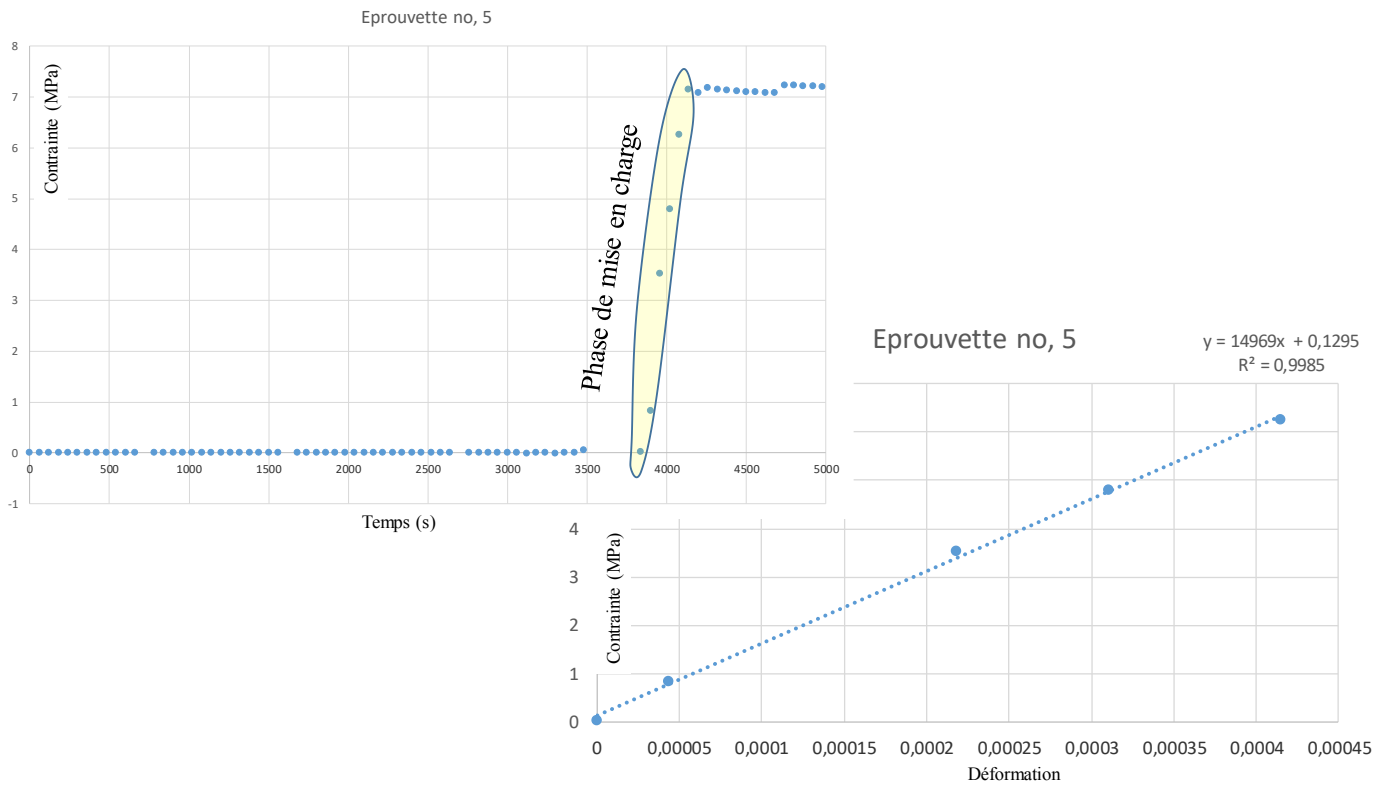


Figure 14 : Echantillon 5



Les valeurs de modules instantanés obtenus pour les 5 échantillons sont résumées dans le Tableau 2.

	E (MPa)	Figure
Echantillon1	13981	10
Echantillon2	14777	11
Echantillon3	14426	12
Echantillon4	14325	13
Echantillon5	14969	14
Moyenne (MPa)	14495,6	
Ecart type	387,96	

Tableau 2 : Valeurs de modules instantanés

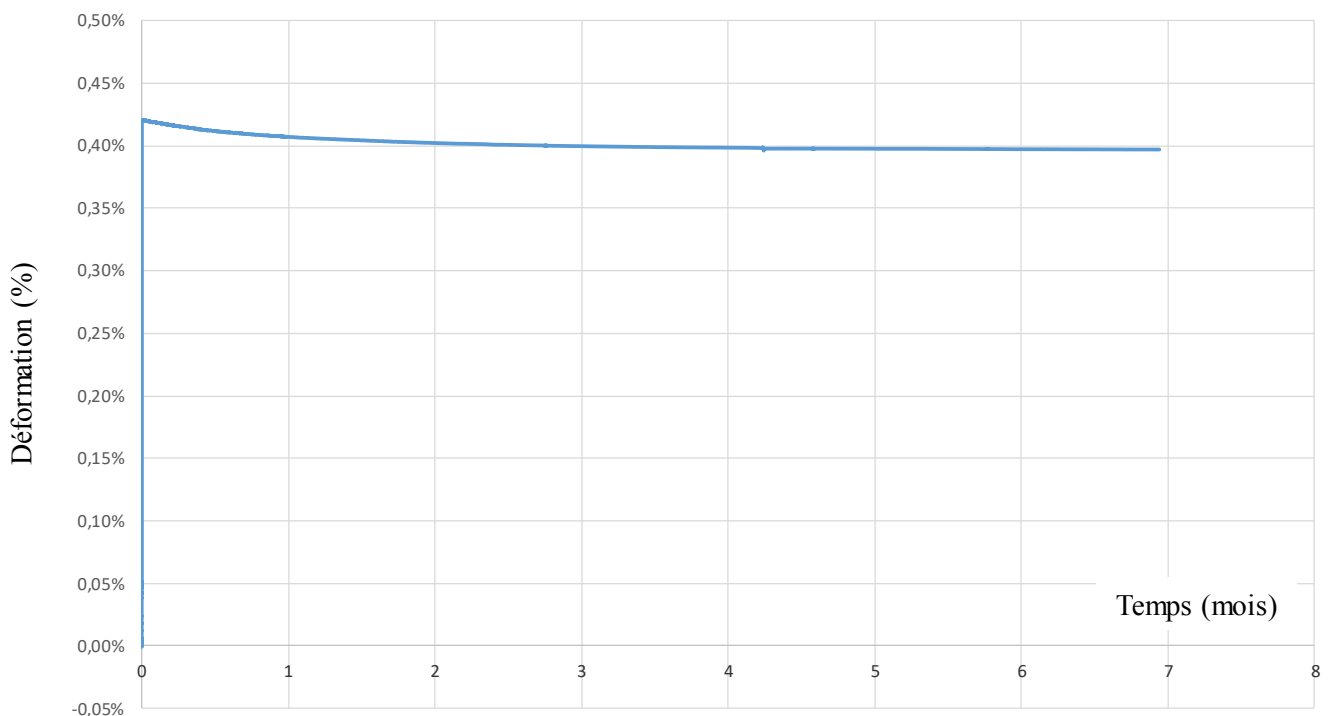
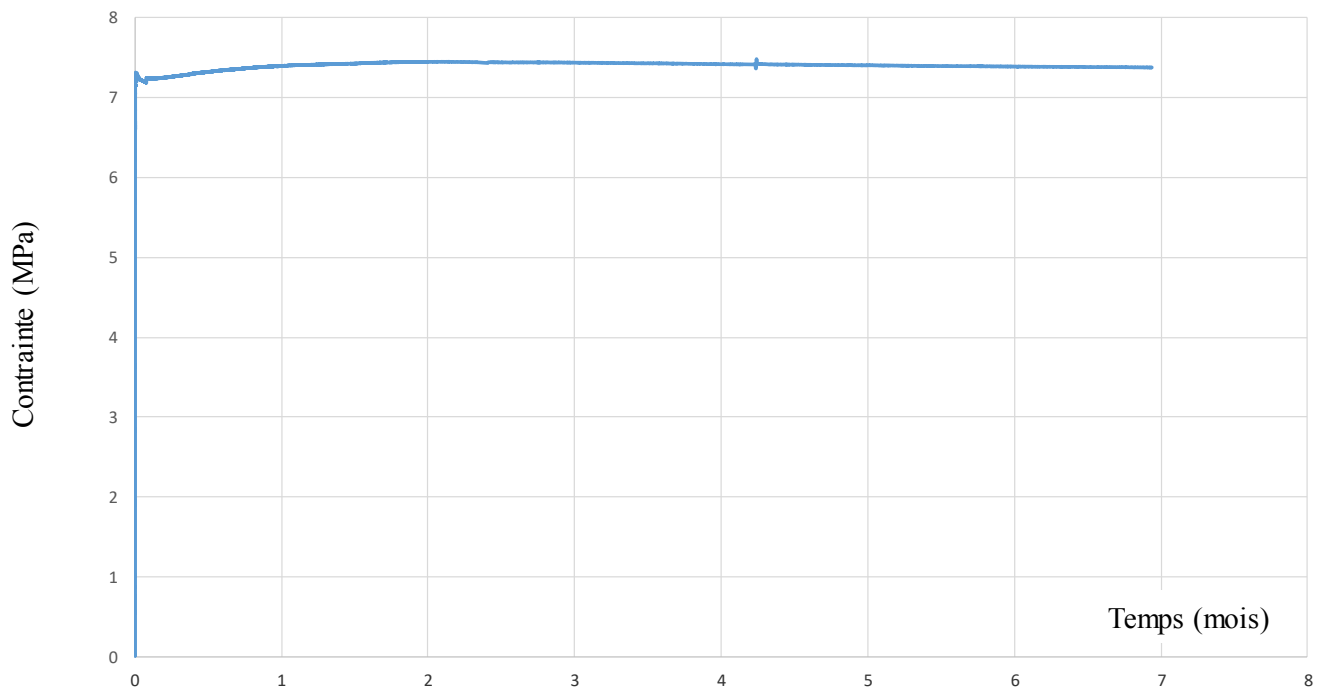


## 6. Comportement des échantillons sur la période : 20 mars – 15 octobre 2019

Les graphiques représentés ci-dessous retracent le comportement des 5 échantillons sur la période **20 mars – 15 octobre 2019**. Ces graphiques représentent l'évolution du chargement, la déformation et des déplacements mesurés sur la face avant et arrière en fonction du temps.

### Echantillon 1

Eprouvette no, 1





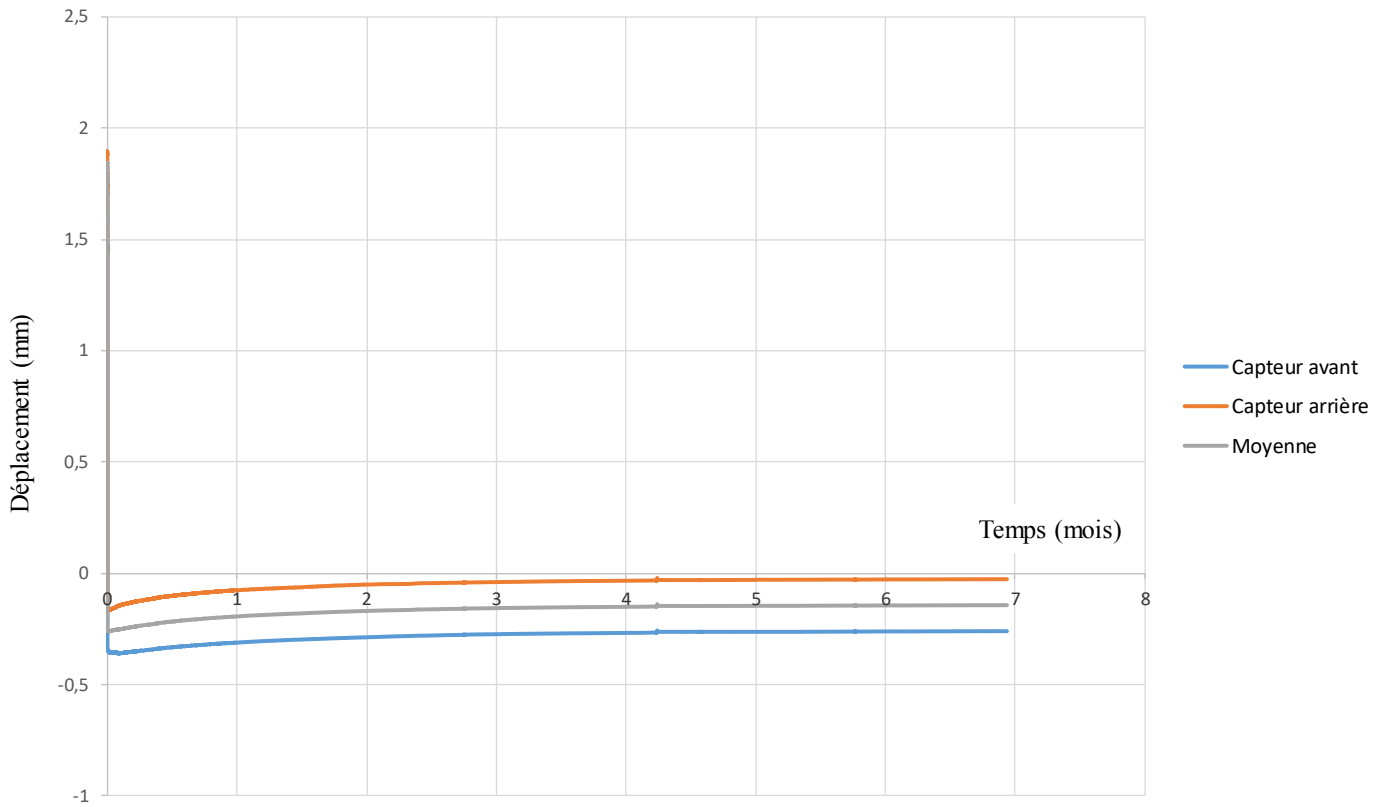
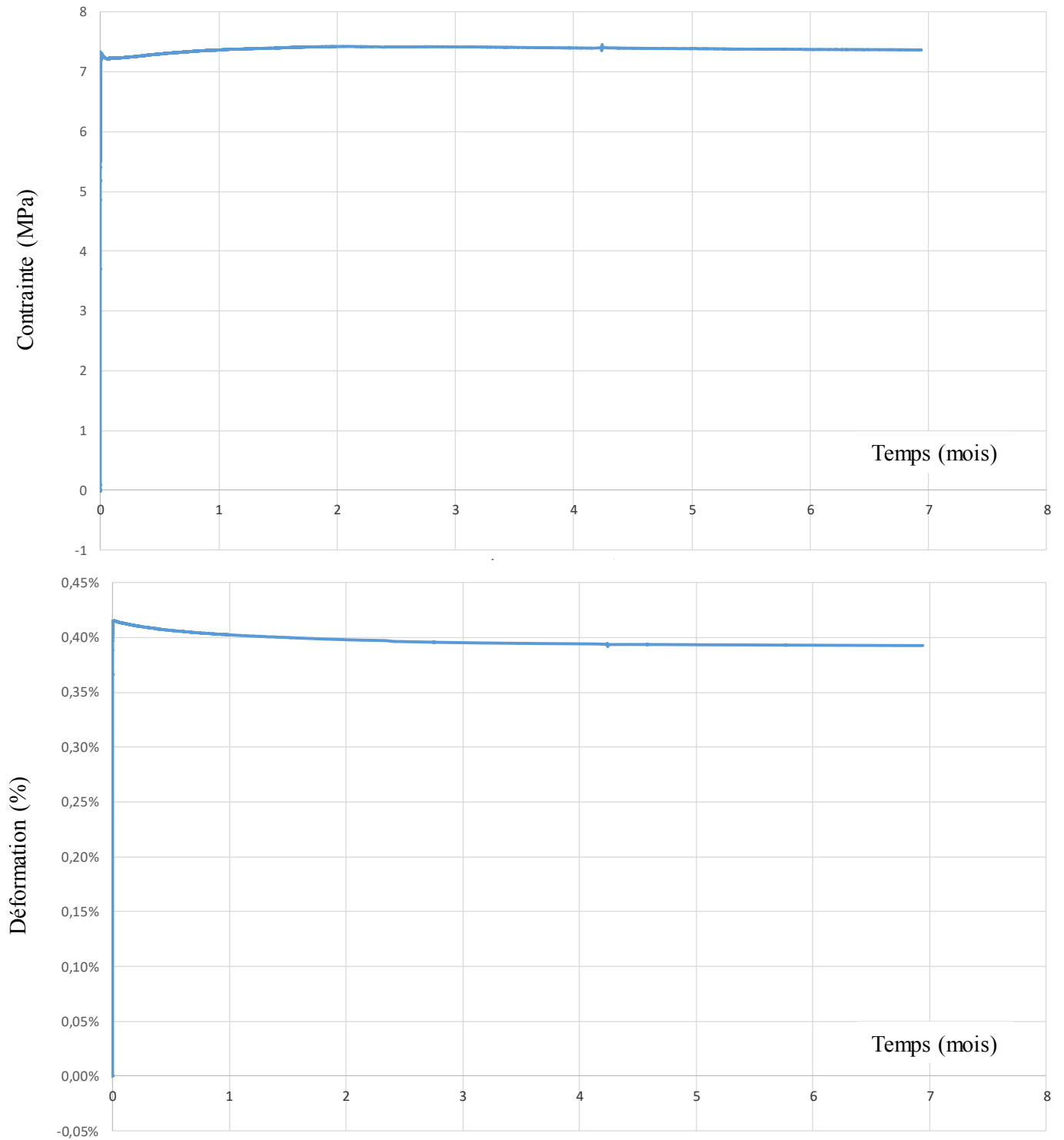


Figure 15 : Comportement échantillon 1



## Echantillon 2

Eprouvette no, 2



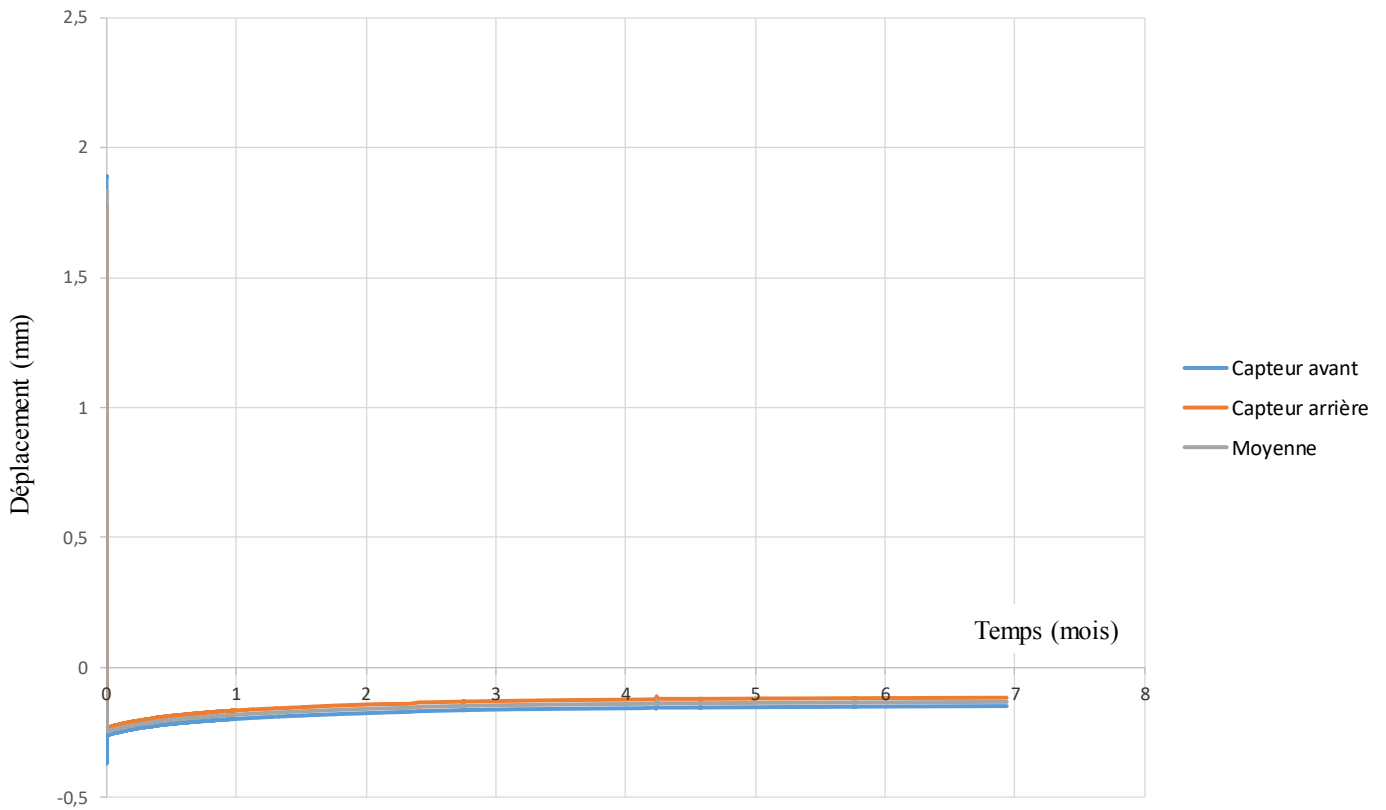
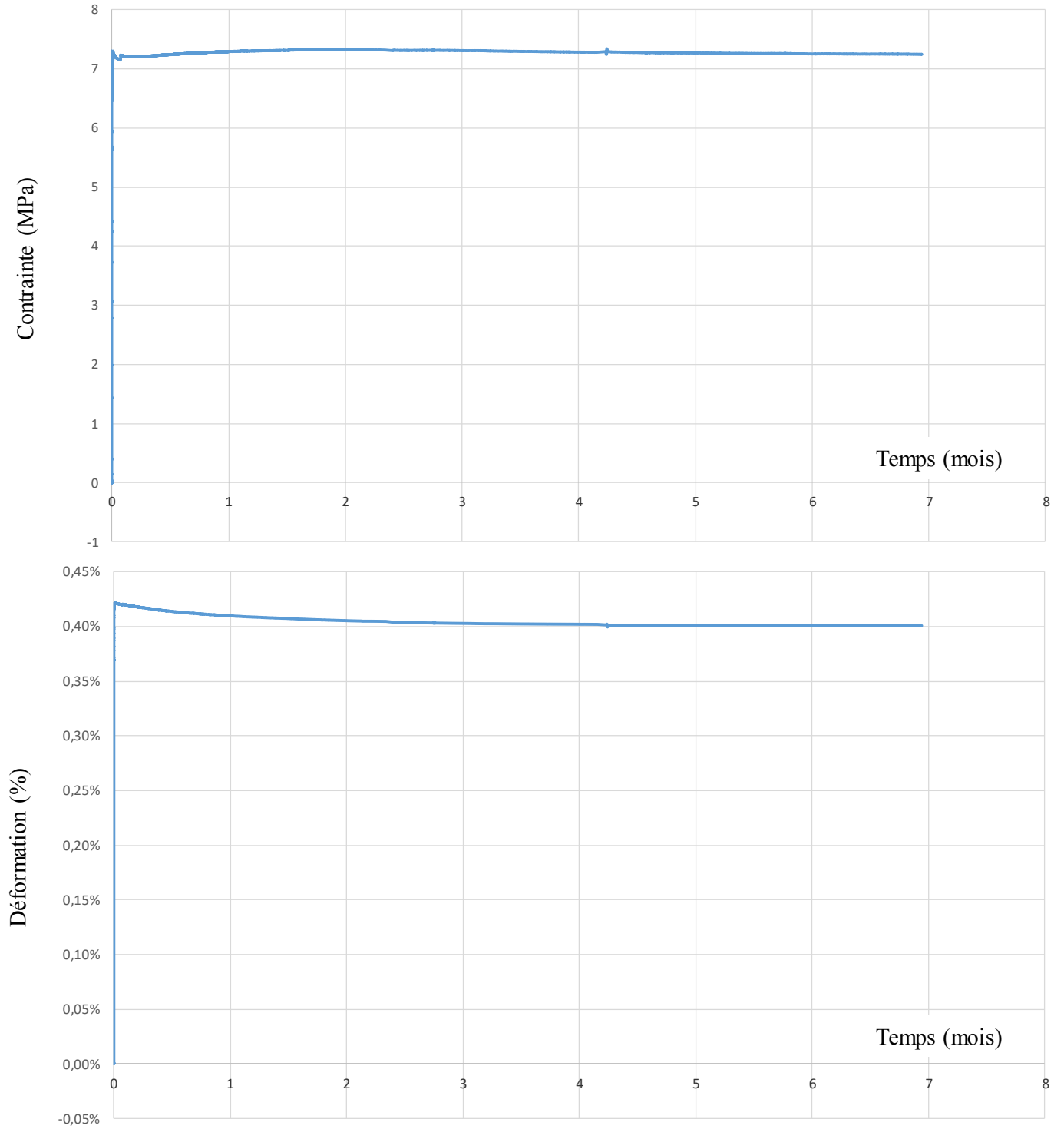


Figure 16 : Comportement échantillon 2



Echantillon 3

Eprouvette no, 3



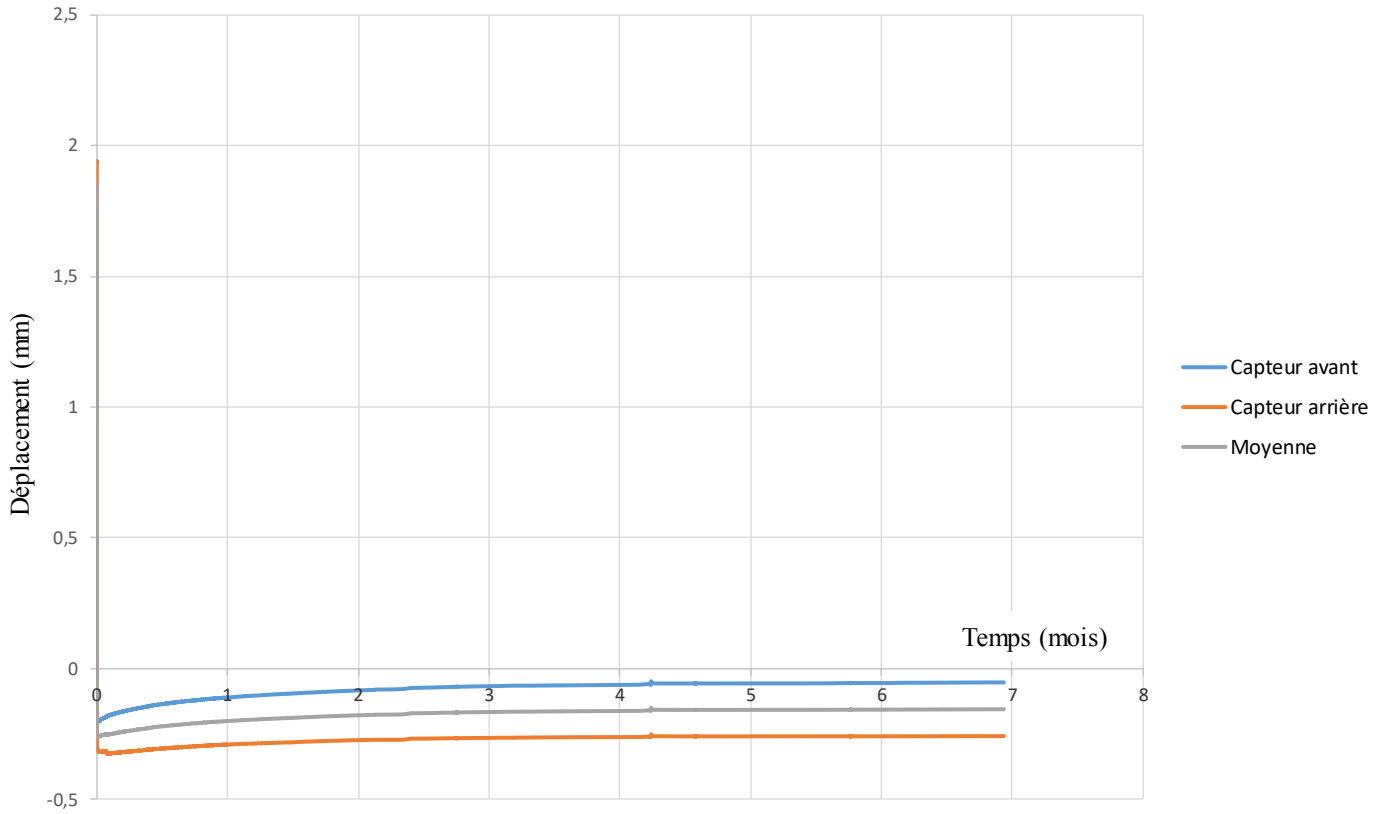
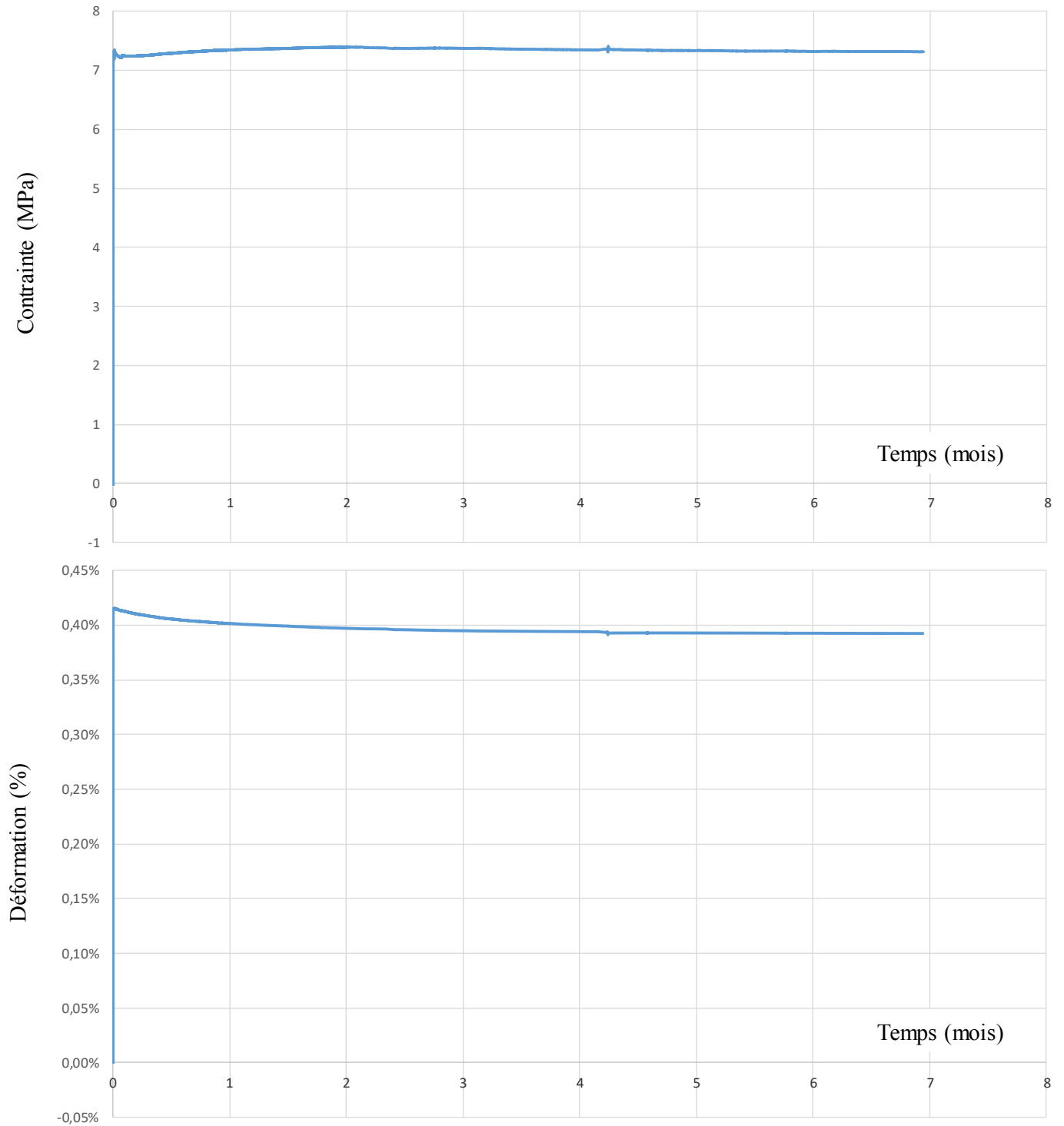


Figure 16 : Comportement échantillon 3



## Echantillon 4

Eprouvette no, 4



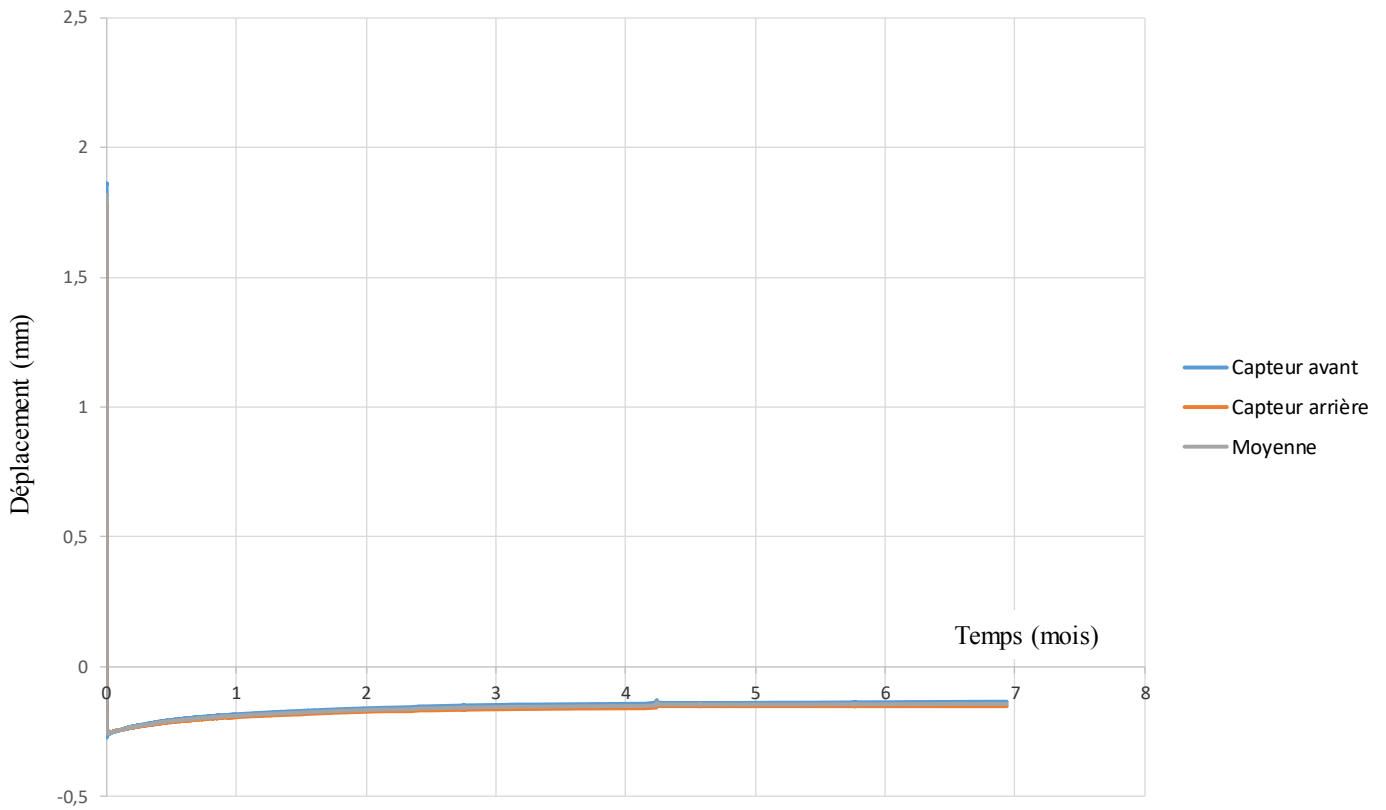
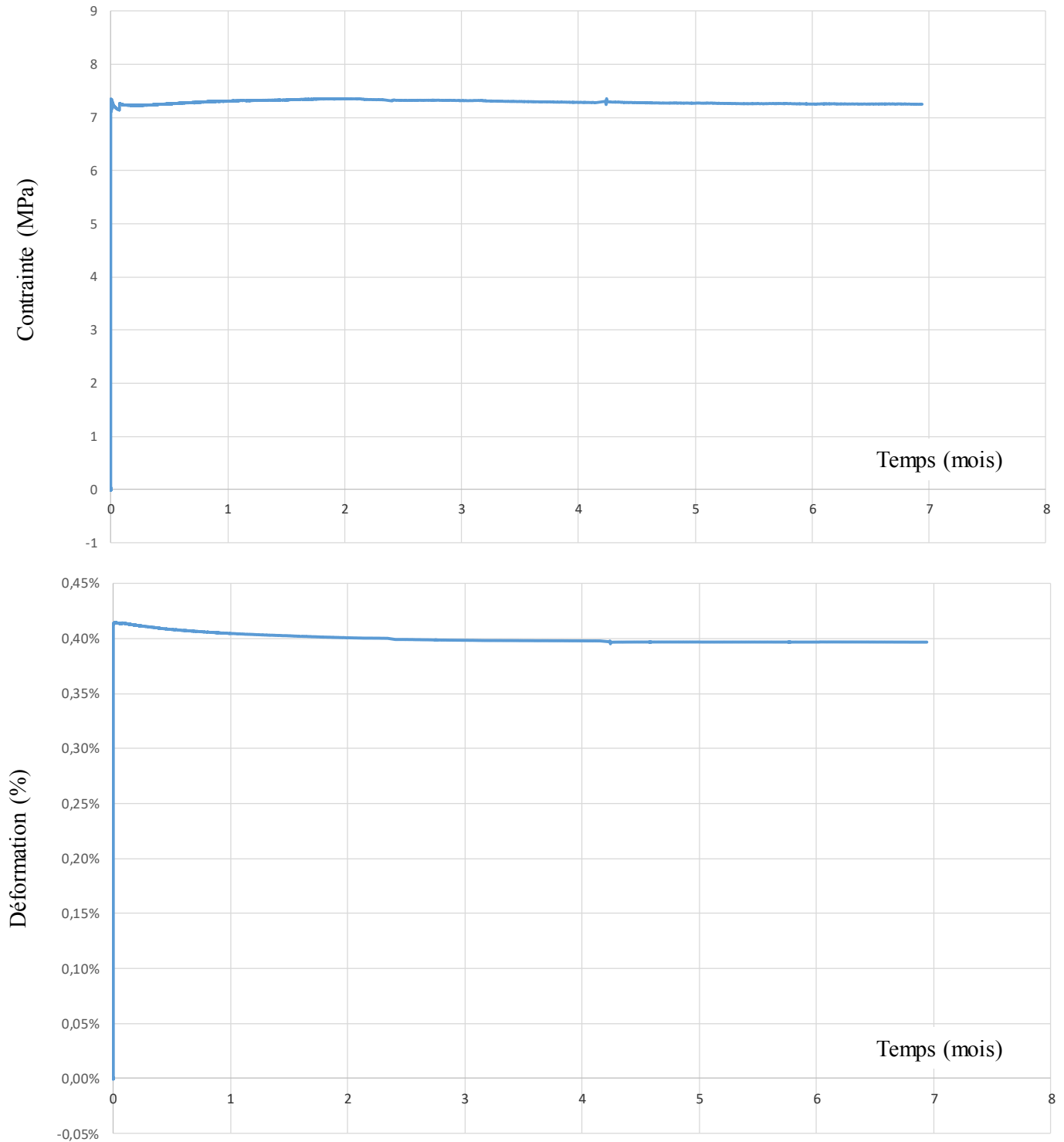


Figure 17 : Comportement échantillon 4



## Echantillon 5

Eprouvette no, 5





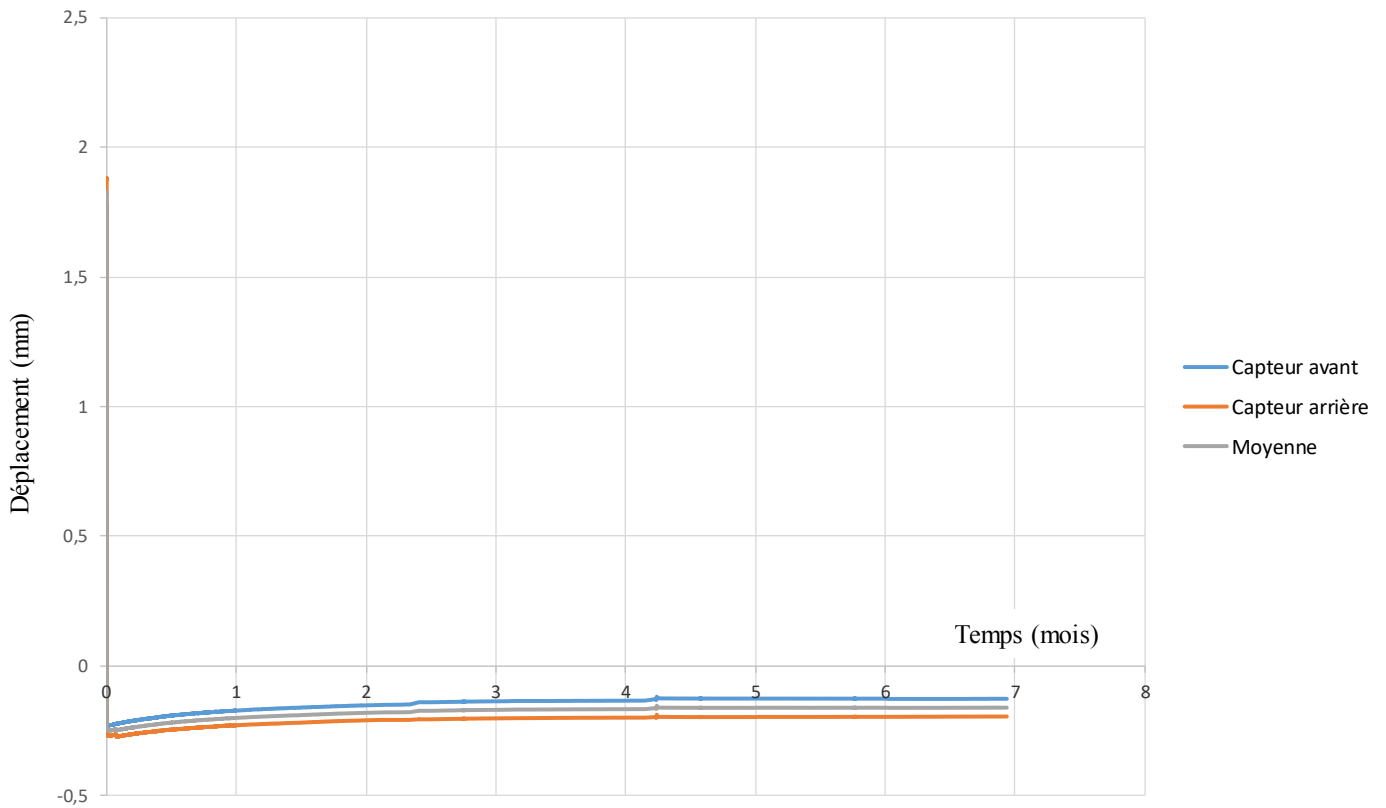


Figure 18 : Comportement échantillon 5



## 7. Analyse des résultats à 6 mois

### 7.1. Synthèse

Les trois graphiques 19 à 21 synthétisent les résultats des 5 échantillons. On remarque une bonne répétabilité des essais pour l'ensemble des 5 échantillons.

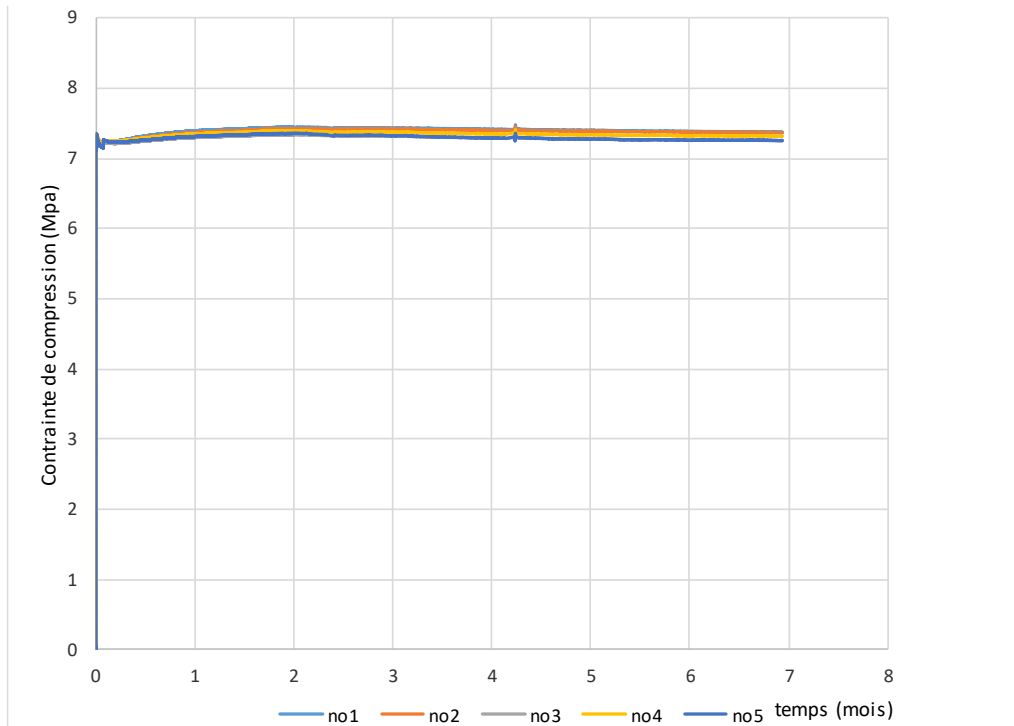


Figure 19 : Contrainte de compression vs. Temps

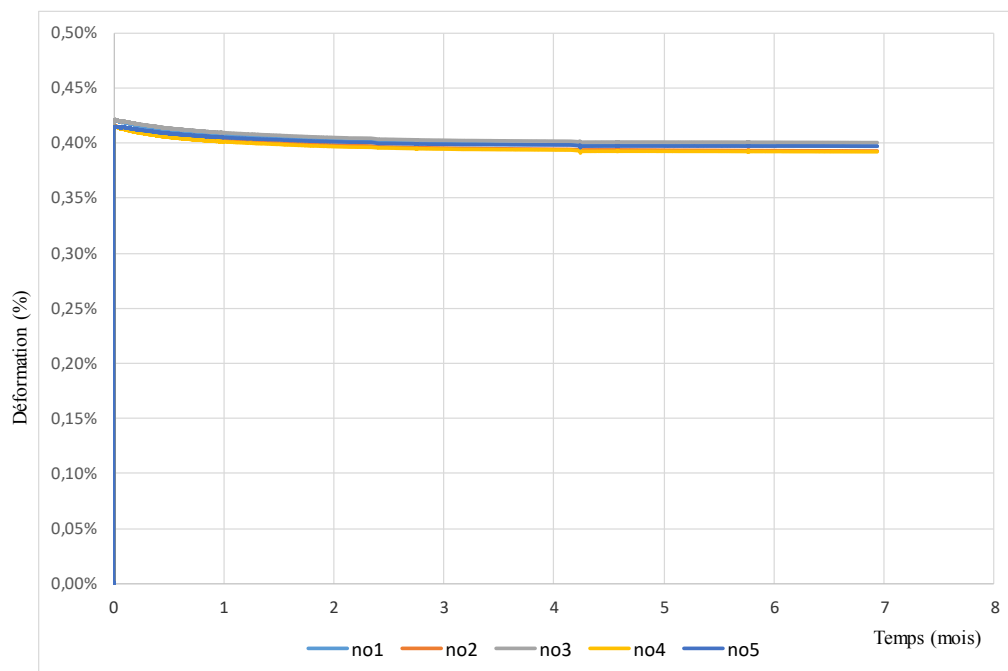


Figure 20 : Déformation vs. Temps

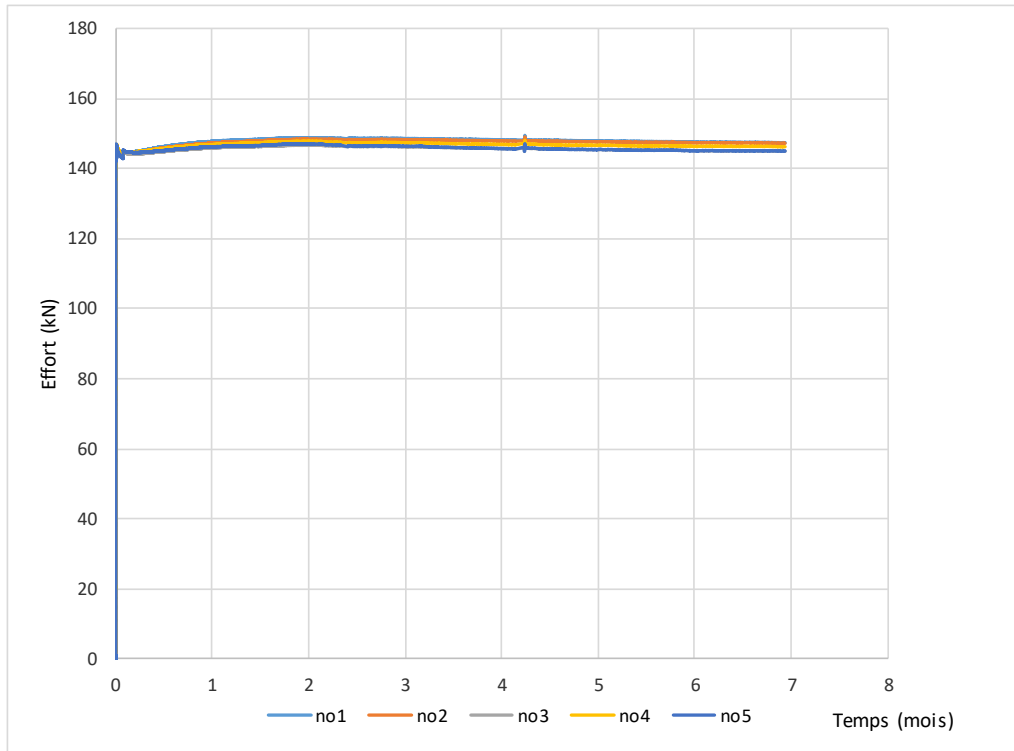


Figure 21 : Chargement appliqué vs. Temps



## 7.2. Gonflement hydrique

Les résultats à 6 mois montrent que malgré une légère augmentation de la contrainte de compression dans le temps, il y a une diminution relative de la déformation de compression. Ceci est dû principalement au gonflement longitudinal induit par une augmentation de l'humidité interne entre le moment de la mise en charge et l'équilibre hydrique atteint au bout de 2 mois d'essai dans la chambre climatique. Il est donc nécessaire de déterminer cette déformation de gonflement afin de la retrancher à la déformation globale.

Comme indiqué précédemment, l'humidité interne, au moment de la mise en charge, était de 11,6%. Les isothermes de sorption montrent que dans l'ambiance imposée dans la chambre climatique, l'humidité dans l'échantillon tend vers une valeur d'équilibre de 13,5%. Ainsi, l'augmentation moyenne de l'humidité est de 1,9%. En considérant les plans de collage dans la section transversale, nous supposons, dans un premier temps, une diffusion unidirectionnelle le long de ces plans de collage. Dans ces conditions, les travaux doctorat de N. Manfoumbi ont montré que l'évolution de l'humidité moyenne pouvait se mettre sous la forme suivante :

$$w(t) = w(0) + [w_{\text{équi}} - w(0)] \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

$w(0)$  désigne l'humidité moyenne mesurée à la mise en charge, soit 11,9%.  $w_{\text{équi}}$  représente l'humidité d'équilibre donnée par les courbes d'isotherme de sorption à 20°C, soit 13,5%.  $\tau$  représente un temps caractéristique représentant la cinétique d'adsorption pour passer d'une humidité homogène de 11,9% à 13,5%. Lors de l'analyse des résultats à 2 mois, nous avons conclu que l'humidité d'équilibre était atteinte. Cette cinétique est reproduite en fixant une valeur de  $\tau$  à 0,434, ce qui donne l'évolution temporelle de l'humidité moyenne présentée en Figure 22.

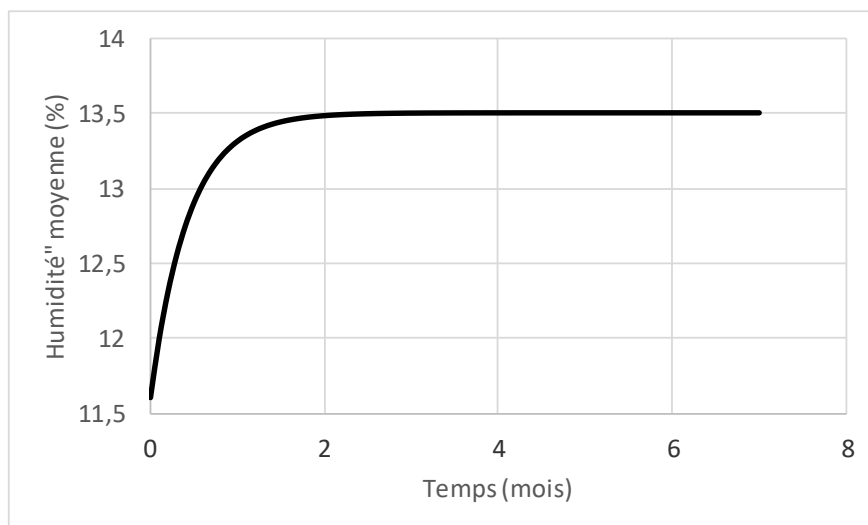


Figure 22 : Evolution de l'humidité interne lors de la phase d'équilibrage hydrique



La déformation différée, corrigée des effets de gonflement s'exprime comme suit :

$$\varepsilon_{vis} = \varepsilon_{exp} - \alpha_L \cdot [w(t) - w(0)]$$

$\alpha_L$  représente le coefficient de retrait-gonflement longitudinal dont la valeur est estimée, selon Guitard, à 0,01%/%, valeur que nous pourrions optimiser à la fin de la campagne d'essai. Sur cette base de calcul, l'évolution de la déformation différée est représentée en Figure 23.

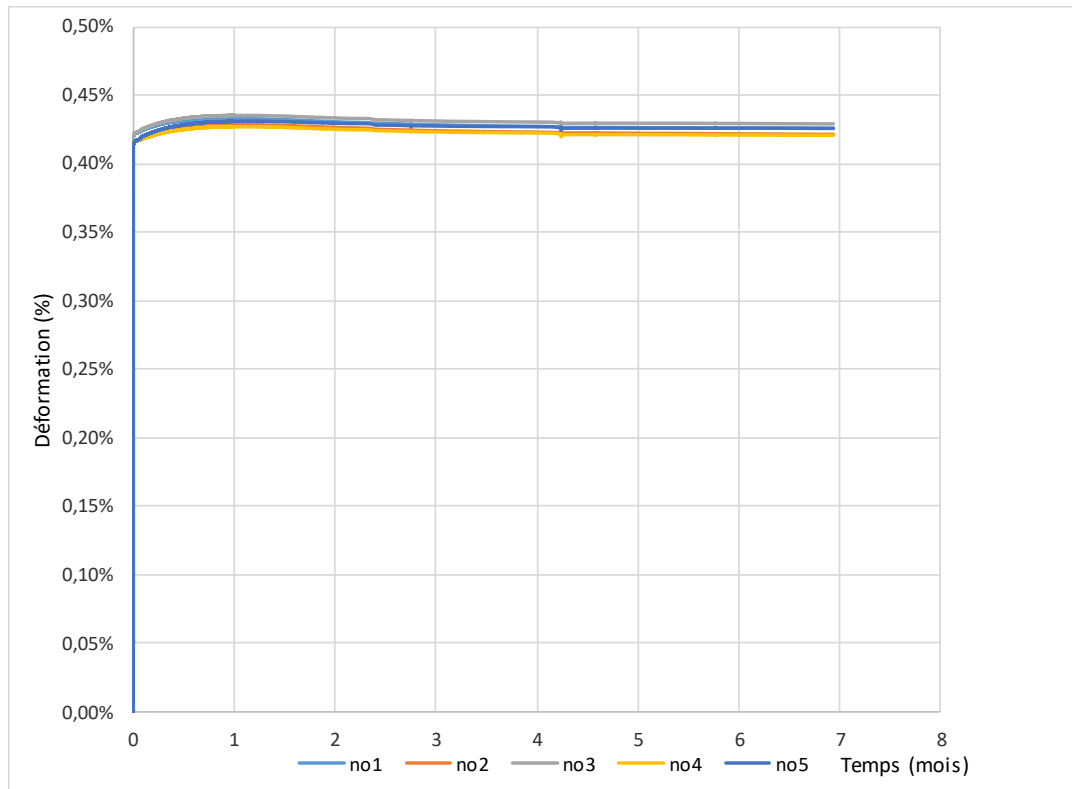


Figure 23 : Déformation viscoélastique vs. Temps

### 7.3. Vers une évaluation de $k_{def}$

Si la détermination du coefficient  $k_{def}$  repose sur une déformée long terme en condition de fluage (contrainte de compression constante et homogène dans le temps), les conditions de mise en charge statique proposée par resserrage de 4 vis de répartition de l'effort ressemble plus à une sollicitation de relaxation pour laquelle on impose un déplacement par créneau de la tête de poteau afin de corriger la déviation de la charge. Ainsi, le traitement des données à terme repose sur un modèle de relaxation dont le modèle de Maxwell généralisé, présenté en Figure 24.

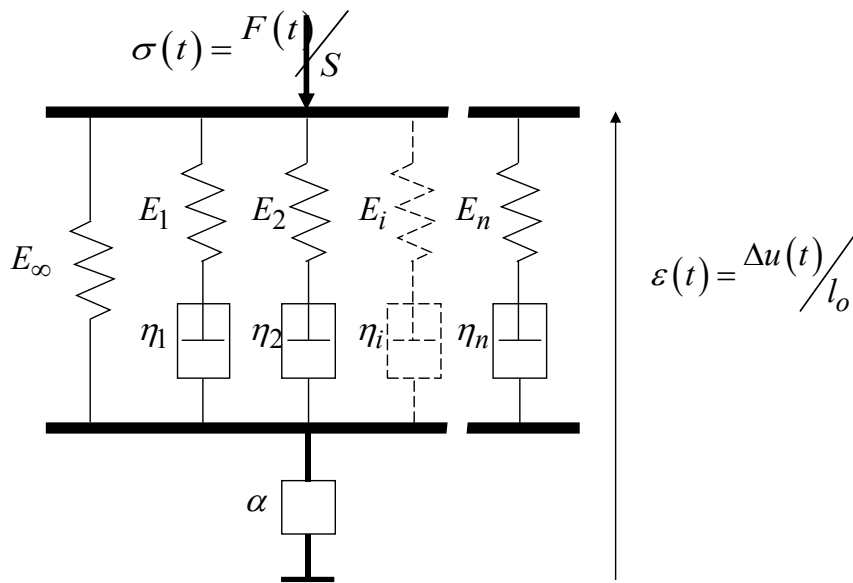


Figure 24 : Modèle de Maxwell généralisé

Le modèle est composé de  $n$  branches de Maxwell, représentant les effets différés à plus ou moins long terme, caractérisées par un module d'élasticité longitudinal  $E_i$  et une viscosité  $\eta_i$  dont la valeur de référence à 12% peut être corrigée de l'humidité interne mesurée durant l'essai (principe d'hygroactivation). Le comportement asymptotique à long terme est caractérisé par le module d'élasticité longitudinal  $E_\infty$ . Enfin, les variations d'humidité durant l'essai génèrent des variations dimensionnelles longitudinales et des contraintes hydriques supplémentaires que le chargement par vis devra éliminer. Ce processus de retrait-gonflement est traité, dans le modèle, par analogie thermique via le coefficient  $\alpha$  et l'écart d'humidité interne  $\Delta mc$  entre le temps de la mesure et le temps de mise en charge (n'excédant pas 2%). La loi de comportement, limitée au sens longitudinal, se traduit par la formulation intégrale de Boltzmann suivante :

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau) \frac{\partial(\varepsilon - \alpha \cdot \Delta mc)}{\partial \tau} d\tau$$

La fonction de relaxation  $R(t)$  est définie comme suit :

$$R(t) = E_\infty - \sum_{i=1}^n E_i \cdot \left( 1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \text{ avec } \tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$$

Les essais expérimentaux donnent accès aux évolutions temporelles de  $\sigma(t)$  (Evolution de l'effort donné par le capteur de force divisé par la surface transversale des échantillons) et de  $\varepsilon(t)$  défini comme suit :



$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta u}{l_0}$$

$l_0$  représente la base de mesure des extensomètres (soit 50cm) et  $\Delta u(t)$  est l'évolution du déplacement moyens  $\tilde{u}(t)$  donnés par les deux extensomètres déduits de la valeur à l'origine  $\tilde{u}(t=0)$  (temps de mise en charge), soit :

$$\Delta u(t) = \tilde{u}(t) - \tilde{u}(t=0)$$

### Traitement des données

A partir des enregistrements de l'effort et des déplacements, une première phase de traitement des données consiste à déterminer les propriétés du modèle de Maxwell généralisé. Dans l'approche Eurocode, il est admis que le comportement différé peut être approché par 4 cellules de Maxwell (n=4) correspondant aux classes de durée de charge. A partir des fichiers de données expérimentales, et pour le temps de calcul  $t_j$ , les propriétés de relaxation de calculent en résolvant, par méthode d'optimisation, l'équation incrémentale suivante :

$$\sigma(t_j) = \sum_{k=1}^j R(t_j - t_k) \cdot (\varepsilon(t_j) - \varepsilon(t_{j-1}))$$

### Déduction de kdef

La fonction de relaxation, peut être considérée, dans le sens de l'Eurocode 5, comme une augmentation de la déformation instantanée correspondant à une diminution apparente du module d'élasticité instantané. D'un point de vue rhéologique, l'évolution temporelle de  $k_{def}$  peut être déduite de l'expression suivante :

$$k_{def}(t) = \frac{R(t=0)}{R(t)} - 1$$

Cependant, la valeur  $k_{def}$  défini dans l'Eurocode 5 correspond à la valeur asymptotique (pour des temps très grands). Dans un premier temps, la fonction de relaxation  $R(t)$  sera déterminée par interpolation sur une période d'une année d'essai. Dans un second temps, un travail d'extrapolation de cette fonction permettra d'atteindre le  $k_{def}$  de long terme.



En première approximation, la valeur de  $k_{def}$  à 6 mois est résumée dans le tableau 3.

Echantillon	$k_{def}$
1	3,1%
2	1,4%
3	2,1%
4	1,9%
5	3,1%
Moyenne	2,4%
Ecart type	0,76%

Tableau 3 : Valeurs approximées de  $k_{def}$  à six mois

#### Observations :

Les dimensions réelles de 5 échantillons ne peuvent pas être mesurées sur le banc d'essai. L'encombrement du montage ne permet pas de mesurer ces dimensions.

La section de l'échantillon utilisée pour le calcul de la contrainte est celle mesurée avant la mise en charge des échantillons.

Fait à Egletons, le 15/10/2019

M. Ion Octavian POP

M. Frédéric DUBOIS

M. Jérôme DOPEUX



**LIVRABLE 3 :**  
**RAPPORT SCIENTIFIQUE**  
**GLOBAL**

**GC2D**

Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité



Plate-Forme Technologique  
**Bois-Construction** Limousin

30/04/2020

# ESSAIS DE FLUAGE SOUS COMPRESSION

## Rapport Scientifique Final



Ion Octavian POP  
Jérôme DOPEUX  
Frédéric DUBOIS

Directeur PFT Bois-Construction du Limousin  
Ingénieur R&D laboratoire GC2D  
Directeur laboratoire GC2D

# Sommaire

---



I-	Contexte et problématique de l'étude	2
II-	Matériels et Méthode	3
II.1	Montage expérimental	3
II.2	Préparation et conditionnement des échantillons	5
II.3	Protocole expérimental	6
II.4	Conditions hydriques durant l'essai	7
II.5	Mesure de l'humidité en fin d'essai	8
III-	Protocole de correction hydrique	9
III.1.1	Equilibre hydrique	9
III.1.2	Cinétique d'adsorption	9
III.2	Essais de fluage recouvrance (Poteau n°3)	11
III.2.1	Comportement instantané	12
III.2.2	Comportement mécanique en fluage recouvrance	13
III.2.3	Effets d'un gonflement hydrique	15
IV-	Essais de fluage	17
IV.1	Comportement élastique instantané	17
IV.2	Sollicitation de fluage	18
IV.3	Déformation de fluage à un an	19
IV.4	Pronostic à 50 ans	19
V-	Transcription Eurocode 5	21
V.1	Comportement au fluage	21
V.2	Extrapolation des fonctions de fluage	22
VI-	Conclusions et Perspectives	23
VII-	Références bibliographiques	24
VIII-	Annexes	25
VIII.1	Humidité d'équilibre	25
VIII.2	Module d'élasticité à 11,6%	28
VIII.3	Evolution temporelle de la contrainte et stabilisation	30
VIII.4	Déformation de fluage	32
VIII.5	Extrapolation à 50 ans	34
VIII.6	Interpolation de fluage	36

## I- Contexte et problématique de l'étude

### I.1 Objectifs

Dans le cadre d'une campagne expérimentale, qui a comme objectif l'émergence et la prolifération de Bâtiments en Bois de Grandes Hauteurs (BBGH), l'association ADIVbois propose l'étude du fluage sous compression des structures porteuses en bois. En effet, l'Eurocode 5 permet d'anticiper les déflexions à long terme des éléments fléchis via un coefficient majorateur  $k_{def}$  et une pondération spécifique des charges à l'état limite ultime de service (E.L.S.). Cependant, ce coefficient ne s'applique que pour des éléments porteurs verticaux et/ou horizontaux soumis à de la flexion simple ou déviée. Concernant la déformation de fluage en compression axiale, rien dans l'Eurocode 5 ne permet d'extrapoler des déplacements différés verticaux accentués d'étages en étages. La campagne expérimentale vise donc à étudier le comportement en fluage sous compression de quatre essences (Epicéa, Douglas, Hêtre et Chêne). L'étude concerne uniquement les éléments porteurs verticaux en lamellé-collé homogènes limités à la classe de résistance mécanique GL24h et en classe de service 1.

Ainsi, les conditions hygrométriques des échantillons, pendant toute la campagne expérimentale, doivent correspondre à la classe de service 1, à savoir une température et une humidité relative régulées à **20°C ± 2°C et 65 %HR ± 5 %HR**, respectivement. Les essais seront réalisés sous contrainte de compression constante égale à **30 % de la valeur caractéristique** en compression ( $f_{c0k} = 23,5\text{MPa}$ ), et ce, pendant un an avec une phase de conditionnement climatique.

Pour cette campagne expérimentale l'association ADIVbois a opté pour la réalisation des essais de fluage sous compression sur 5 poteaux en épicea en bois lamellés collés (Epicéa GL24h), Figure 1. La section retenue est de 10cmx20cm. Pour éviter tout risque d'instabilité, la hauteur des poteaux a été limitée à 75cm.



Figure 1 : Marquage CE des échantillons d'Epicéa

### I.2 Déroulement du projet

Ce projet a débuté en septembre 2018 par le dimensionnement et la réalisation du banc de fluage et l'usinage des 5 poteaux. En parallèle, la stratégie de mesure a été construite pour suivre, de façon synchronisée, les évolutions de la contrainte et de la déformation axiale de compression. L'humidité interne avant mise en charge est mesurée par méthode gravimétrique

Dans un second temps, l'ensemble du dispositif expérimental a été placé dans une chambre climatique avec une mise en charge des échantillons le 20 avril 2019. Trois réunions d'avancements ont été organisées depuis pour étudier l'évolution des déformations. Très vite

s'est greffé la problématique d'une reprise d'humidité des bois dans la chambre climatique. Ces trois réunions ont permis une réflexion sur la méthode à mettre en œuvre afin de dissocier les problématiques de fluage et de gonflement hydrique. Une stratégie basée sur la recouvrance d'un échantillon a été étudiée. A l'automne 2019, dans le cadre des cordées de la recherche mises en place par la Faculté des Sciences et Techniques de Limoges, deux étudiants (inscrits en deuxième année du Master de Génie Civil, Inspection Maintenance et Réparation des Ouvrages) ont travaillé sur ce projet afin de développer une méthode numérique de découplage des effets de gonflement hydrique et de fluage sur le poteau n°3.

Sur la base des éléments rappelés ci-dessus, le présent rapport sera structuré selon la trame suivante :

1. La première partie présente l'ensemble du matériel et des principes expérimentaux mis en œuvre, ainsi que la préparation des échantillons et leur conditionnement. Cette partie intègre aussi une évaluation de l'état hydrique avant leur mise en place dans l'enceinte climatique et la mesure de l'humidité d'équilibre finale d'un échantillon après essais.
2. Au regard de la reprise d'humidité des échantillons placés dans l'enceinte climatique, il est présenté la démarche couplant de la simulation numérique de reprise d'humidité et une phase de recouvrance opérée sur l'échantillon n°3 permettant d'avoir une réponse différée après équilibre hydrique. Cette démarche vise, d'une part, à isoler et séparer la déformation de gonflement due à la reprise d'humidité et, d'autre part, de déterminer les 6 premiers mois de fluage à humidité d'équilibre constante, et ce, allant du comportement instantané au comportement différé.
3. La correction hydrique issue de l'échantillon n°3 est ensuite reportée sur les quatre autres poteaux. Cette troisième partie présente ainsi le protocole qui permet d'obtenir les fonctions de fluage sur une année complète. Par régression logarithmique, il est proposé une approche d'extrapolation permettant, à moindres frais, d'obtenir des valeurs de fluage à très long terme (jusqu'à 50 ans).
4. Une dernière partie présente une mise en application Eurocode 5. Elle repose sur une décomposition spectrale des fonctions de fluage sur 50 ans permettant d'aboutir à une valeur de  $k_{def}$ .

## II- Matériels et Méthode

Selon le cahier de charges la valeur de chargement est de **144kN** correspondant à une contrainte de compression de 7,20MPa (égale à 30 % de la valeur caractéristique en compression).

Afin de répondre à une classe de service 1, la chambre climatique est donc régulée selon une consigne de Température de **20°C ± 2°C** et d'Humidité Relative **65 %HR ± 5 %HR**. La durée totale de l'essai de fluage est fixée à 12 mois.

### II.1 Montage expérimental

Les essais de fluage étant des essais de longue durée, il a été conçu un système de chargement le plus simple possible pour gagner en robustesse et en limitant au maximum tout risque d'arrêts expérimentaux. L'ensemble expérimental étant placé dans une chambre climatique, il a été privilégié un système de chargement passif, Figure 2. Le montage permet de réaliser le chargement en fluage sous compression de 5 échantillons simultanément (relaxation par palier avec correction de l'effort appliqué durant l'essai). L'essai demandant un contrôle de l'effort appliqué sur chaque poteau, la chambre climatique est composée d'un plancher flottant désolidarisé des plots supports en béton, limitant ainsi les perturbations de type vibrations et chocs lors des interventions.



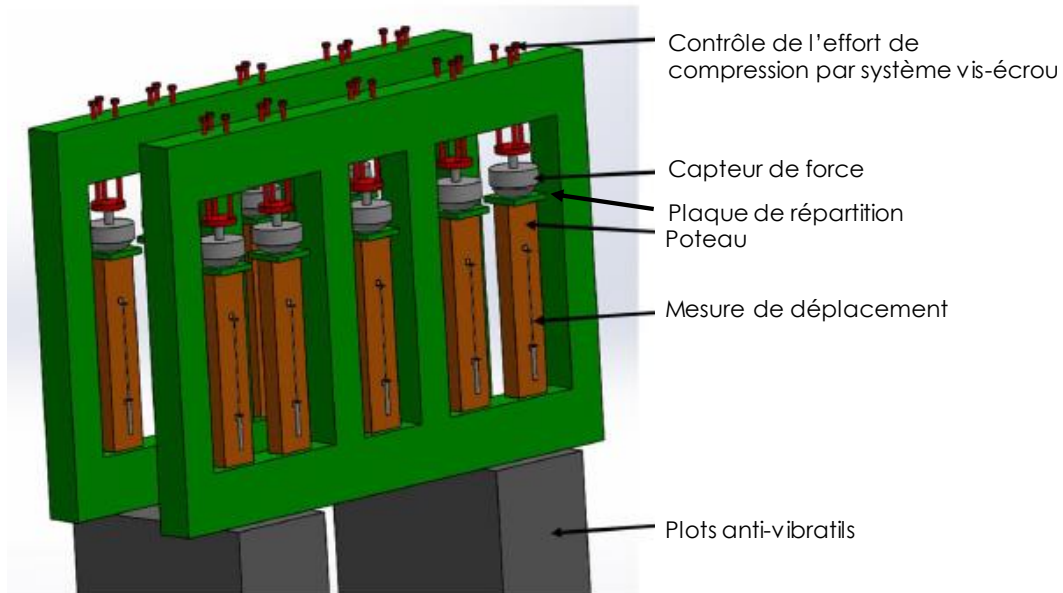


Figure 2 : Principe du montage expérimental

Le dimensionnement du banc d'essai a été réalisé afin de minimiser sa déformabilité (rigidité de l'ensemble) et de répondre aux critères de résistance mécanique. L'ensemble repose sur une modélisation à l'aide du logiciel SolidWorks, Figure 3. Les détails du dimensionnement sont dans l'annexe 'Calcul banc d'essai'.

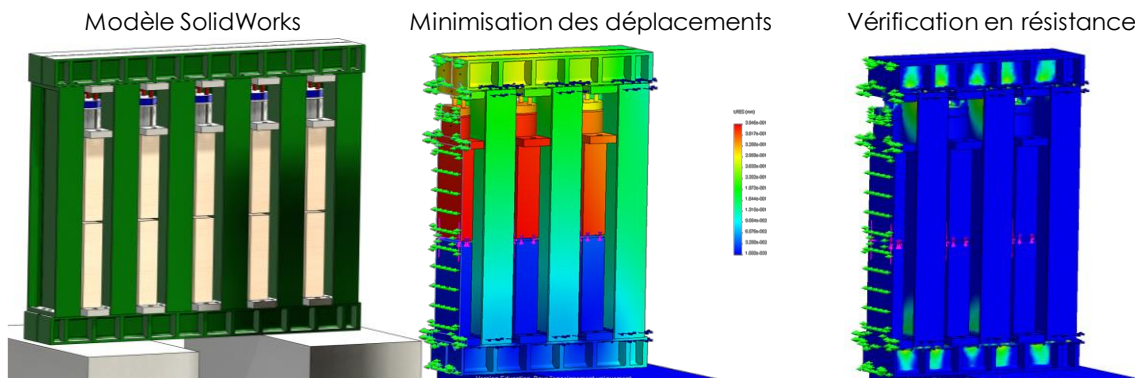


Figure 3 : Modélisation par éléments finis du banc de fluage

Celui-ci est contrôlé en force en ajustant le niveau à l'aide d'un système vis-écrou, d'un capteur de force et d'une plaque de répartition, Figure 4. Le serrage du système vis-écrou est réalisé à l'aide d'une clé dynamométrique. Chaque capteur d'effort de marque HBM a une force nominale de 250kN assurant une bonne définition de la mesure pour un chargement donné à 144kN. La définition des fonctions de fluage nécessite de 'calculer' la fonction de fluage par le biais de la mesure de la déformation en tout point du poteau. Dans un état de compression homogène, nous supposons que la déformation l'est également, et ce, à condition de se placer à une distance minimale des points d'application des efforts. Ainsi, la déformation axiale de la zone centrale est mesurée via la moyenne de deux extensomètres. Ils sont composés de capteurs de déplacement de type LVDT permettant la mesure d'un déplacements moyen relatif au deux tiers central sur une base de longueur de référence de 50cm. Selon la Figure 5, la déformation est calculée selon l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2 \cdot 500}, \text{ donnée métriques exprimées en millimètre} \quad (1)$$

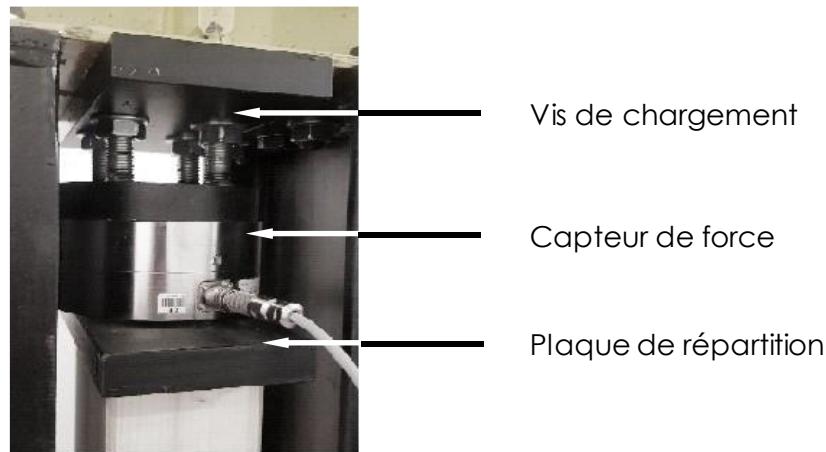


Figure 4 : Système de mise en charge

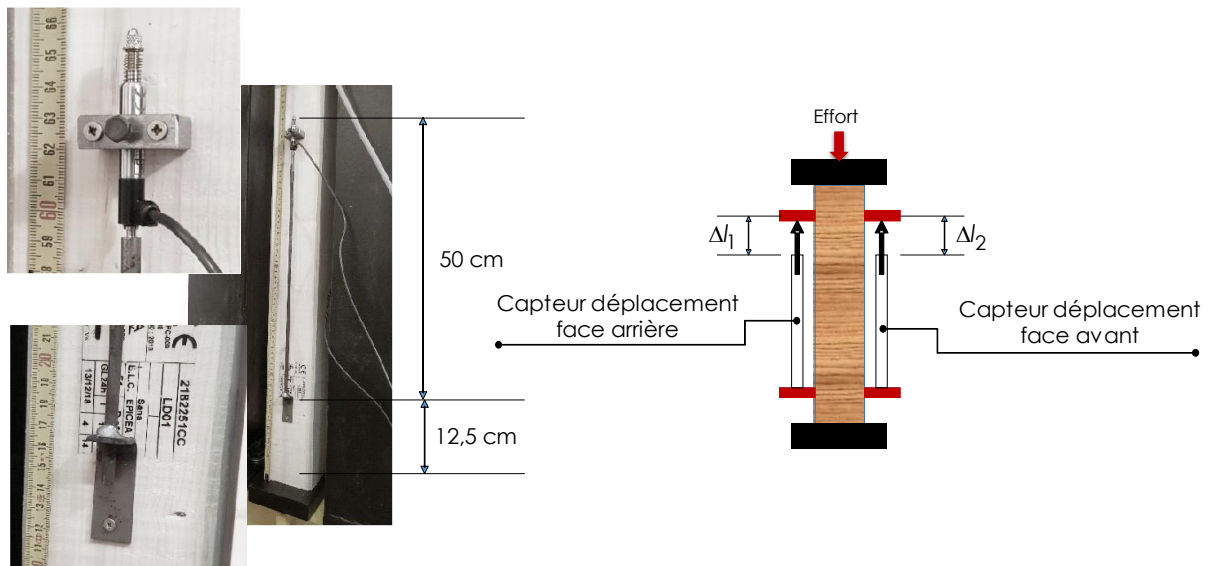


Figure 5 : Mesure de la déformation moyenne axiale

## II.2 Préparation et conditionnement des échantillons

Les 5 échantillons testés (dimensions 10cm x 20cm x 75cm) ont été usinés à partir d'une poutre d'épicéa en bois lamellé collé (Epicéa GL24h). Selon le fournisseur, la teneur en eau de la poutre, en fabrication, est de 12%. Avant usinage des 5 échantillons, la poutre a été stockée dans l'atelier. La teneur en eau de la poutre a été évaluée avant le début de l'essai. Afin d'avoir une distribution de l'humidité dans la section transversale, un échantillonnage a été prélevé sur une section de 20 mm d'épaisseur selon le calepinage présenté Figure 6. Chaque cube est pesé avant d'être placé dans une étuve thermiquement (masse  $M_h$ ) régulée à 103°C dans le but de sécher les échantillons. Une pesée régulière des échantillons a permis d'identifier le temps de stabilisation des masses permettant d'estimer la masse anhydre ( $M_{anh}$ ). Selon le principe gravimétrique ou de double pesée, l'humidité  $w_{ini}$  avant séchage est calculée selon l'expression suivante :

$$w_{ini} = \frac{M_h - M_{anh}}{M_{anh}} \quad (2)$$

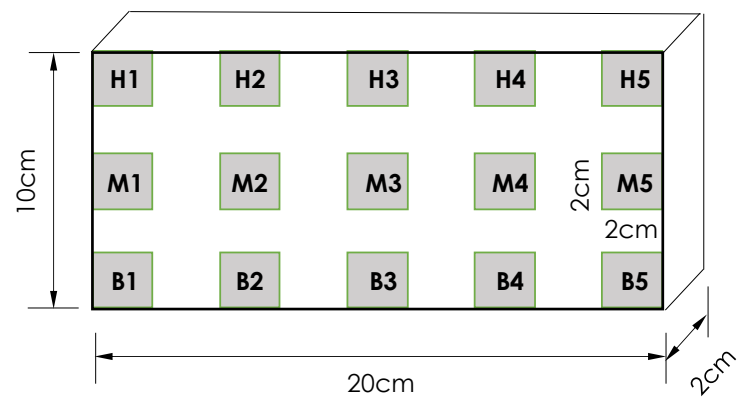


Figure 6 : Calepinage des échantillons pour mesure de l'humidité

Pour chaque cube, l'humidité  $W_{ini}$  est reportée dans le Tableau 1

H1	H2	H3	H4	H5
10,77%	12,13%	11,86%	11,54%	10,56%
M1	M2	M3	M4	M5
11,27%	12,74%	12,67%	12,63%	11,20%
B1	B2	B3	B4	B5
10,29%	11,29%	11,29%	10,88%	8,62%

Tableau 1 : Répartition de l'humidité interne  $w_{ini}$  avant mise en charge

Les résultats mettent en évidence plusieurs observations. L'humidité à cœur étant légèrement supérieure qu'en périphérie, on peut en conclure qu'un léger séchage s'est opéré entre la fabrication des poutres, le transport sur site et le stockage avant mise en charge. Le cube B5 présente une humidité basse, valeur pouvant s'expliquer par la présence d'un nœud dans l'élément prélevé. Dans ces conditions, afin d'avoir une représentation plus générale de l'état hydrique de l'ensemble des échantillons, l'humidité du cube B5 est remplacé par le barycentre des humidités mesurées entre B4, M4 et M5 correspondant à une humidité de 10,90%. Dans ces conditions, la répartition surfacique de l'humidité peut être représentée sous la forme d'iso valeurs présentées Figure 7, avec une valeur moyenne de 11,60% et un écart type de 0,8%

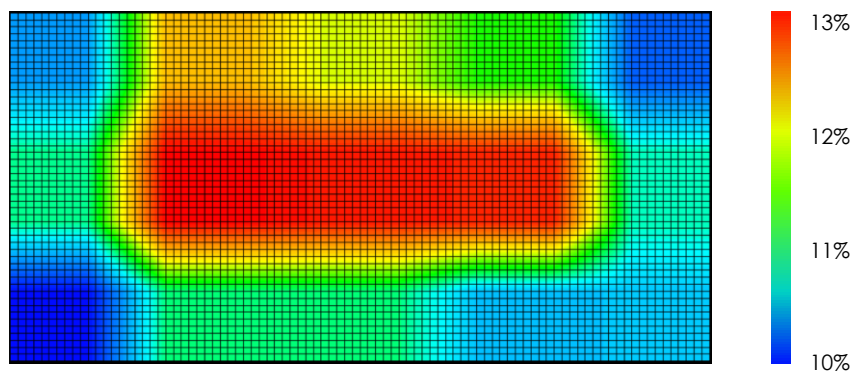


Figure 7 : Répartition surfacique de l'humidité interne avant mise en charge

### II.3 Protocol expérimental

5 poteaux sont placés dans le bâti de fluage, Figure 8. 4 poteaux seront employés pour obtenir une courbe de fluage sur une année complète. Le poteau n°3 sera employé afin d'isoler ou d'éliminer les effets de gonflements induits par la reprise d'humidité dans l'enceinte climatique. Une configuration de fluage recouvrance est retenue pour cet effet. Les 5 poteaux sont mis en



charge l'un après l'autre avec la chaîne d'acquisition en marche pour contrôler les équilibres de force d'un poteau à l'autre.

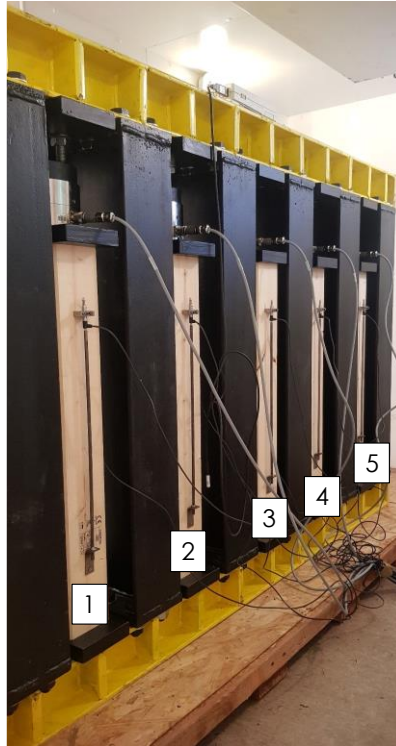


Figure 8 : Disposition des 5 poteaux

#### II.4 Conditions hydriques durant l'essai

L'ensemble du dispositif expérimental est placé dans une chambre climatique dans le but d'obtenir un climat constant de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  en température et une Humidité Relative  $65\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$ , Figure 9.

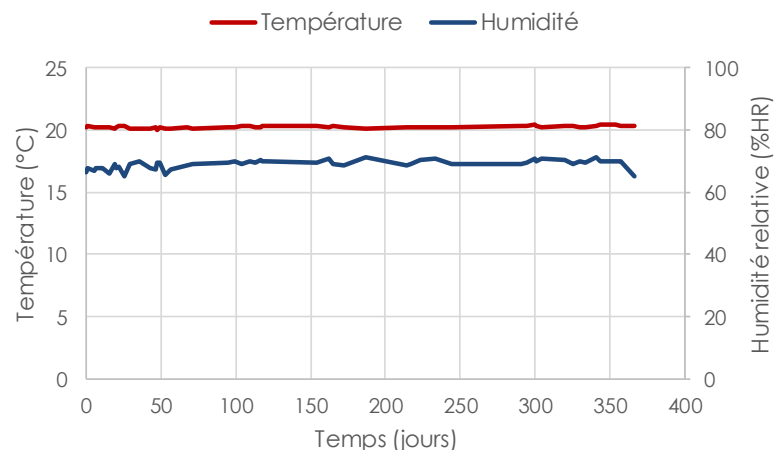


Figure 9 : Climat régulé en chambre climatique

Selon l'Eurocode 5, cette ambiance doit amener les échantillons vers un équilibre hydrique de 12%. Au regard des mesures d'humidité avant mise en charge, l'analyse des résultats va devoir intégrer une reprise d'humidité se traduisant par une déformation libre de gonflement à corriger.

## II.5 Mesure de l'humidité en fin d'essai

A la fin de la période de recouvrance, le poteau n°3 est démonté du banc de fluage. 3 sections de 2cm d'épaisseur sont découpées, deux aux extrémités et un en partie centrale afin de mesurer l'équilibre hydrique après une année d'essai. Chaque section est découpée selon le calepinage défini en Figure 10.

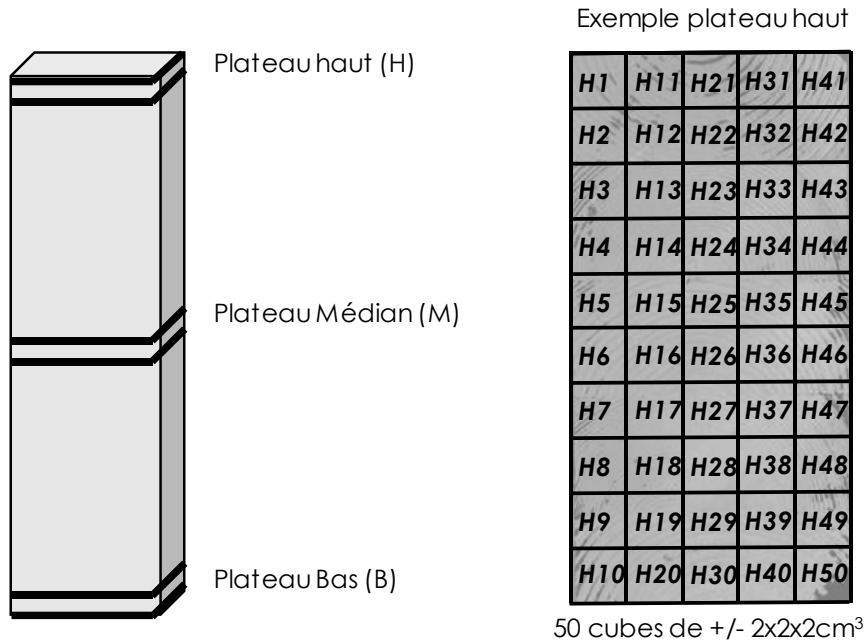


Figure 10 : Débit des plateaux et calepinage

Chaque cube est pesé dans la chambre climatique avant d'être séché (déshydratés) dans une étuve réglée à une température de 103°C. Ils sont pesés de façon quotidienne jusqu'à stabilisation de la masse (5 jours), Figure 11. L'ensemble des résultats sont reportés dans le Tableau 2. L'humidité interne d'équilibre tend vers **13,9%**. C'est cette valeur qui sera prise en compte par la suite dans le procédé de correction.



Figure 11 : Séchage des échantillons en étuve

	Plateau haut	Plateau médian	Plateau Bas
Humidité moyenne	13,89%	13,89	13,78%
Ecart type	0,40%	0,43%	0,47%

Tableau 2 : Humidité interne en fin d'essai

### III- Protocole de correction hydrique

#### III.1.1 Equilibre hydrique

Dans un premier temps, il est nécessaire de déterminer l'équilibre hydrique atteint. Cela passe par l'utilisation d'une courbe de sorption. Dans ce travail, nous employons le modèle de Merakeb *et al.* (2009) développé au laboratoire GC2D. L'équilibre hygroscopique  $w_{\text{éq}}$  est exprimé par l'expression suivante :

$$\ln\left(\frac{w_{\text{éq}}}{w_s(T)}\right) = \phi \cdot \ln(RH) \cdot \exp(\alpha \cdot RH) \quad (3)$$

$RH$  désigne l'humidité relative du milieu supposée constante et régulée à 65%.  $\phi$  et  $\alpha$  sont deux paramètres intrinsèques au matériau bois considéré représentant la cinétique énergétique (chaleur latente de fixation des molécules d'eau liées) en phase d'adsorption.  $w_s(T)$  représente l'humidité à 100% d'humidité relative, valeur dépendant de la température  $T$  selon l'expression suivante :

$$w_s(T) = \left( w_s^0 + \frac{C_{\text{anh}}}{C_{\text{pv}}} \right) \cdot \exp\left( -\frac{C_{\text{pv}}}{L} \cdot T \right) - \frac{C_{\text{anh}}}{C_{\text{pv}}}, \quad T \text{ exprimée en } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

Pour l'épicéa, les travaux de Varnier *et al.* (2018) ont permis de fixer les différentes grandeurs physiques regroupées dans le Tableau 3.

$\phi$	$\alpha$	$w_s^0$	$L$	$C_{\text{pv}}$	$C_{\text{anh}}$
0,82	1,435	35,36%	2500kJ·kg <sup>-1</sup>	4180J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	1160J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

Tableau 3 : Données thermodynamiques pour la courbe de sorption

En combinant les expressions (3) et (4) et les propriétés matériau du Tableau 3, le modèle donne un équilibre hydrique à **13,9%**, ce qui confirme les mesures expérimentales.

#### III.1.2 Cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption a pour objectif d'estimer le temps nécessaire pour passer d'une humidité moyenne initiale de 11,6% à une humidité d'équilibre asymptotique à 13,9%. Nous nous limiterons ici à exprimer la cinétique d'adsorption par le biais du processus de diffusion hydrique dans la section transverse, en supposant que les plaques de réparation aux deux extrémités des poteaux bloquent toute arrivée et tout départ d'eau dans le sens longitudinal. Le processus de diffusion est piloté par la seconde loi de Fick s'écrivant, dans le plan RT, de la façon suivante :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}\left(\underline{D_w} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(w)\right) \quad (5)$$

$\underline{\underline{D_w}}$  désigne le tenseur de diffusion hydrique. Dans le repère principal d'orthotropie  $(\vec{R}, \vec{T})$ , il prend la forme diagonale suivante :

$$\underline{\underline{D_w}} = \begin{bmatrix} D_R^0 \cdot \exp(k_R \cdot w) & 0 \\ 0 & D_T^0 \cdot \exp(k_T \cdot w) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$D_R^0$  et  $D_T^0$  désignent les coefficients de diffusion anhydre dans les directions radiale et tangentielle.  $k_R$  et  $k_T$  sont deux paramètres de non-linéarité représentant la dépendance des coefficients de diffusion avec le niveau d'humidité. Une campagne expérimentale a été menée en 2012 par Manfoumbi pour établir les paramètres de diffusion de l'épicéa. Les paramètres sont reportés dans le Tableau 4.

$D_R^0$	$D_T^0$	$k_R$	$k_T$
$2,48 \cdot 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$	0,25	0,25

Tableau 4 : Propriétés de diffusion dans la section transverse

Le processus de diffusion est implémenté dans le code aux éléments finis Castem (algorithme GC2D). Le calcul intègre, à la fois, le caractère non linéaire du comportement ainsi que l'orthotropie matérielle (orthotropie cylindrique dans le plan Radial-Tangentiel). Reste à fixer le coefficient de convection hydrique  $h_w$ . En accord avec les travaux de thèse de Varnier (2019) et en considérant un flux laminaire d'air dans la chambre climatique, le coefficient  $h_w$  est fixé à  $3,3 \cdot 10^{-8} s \cdot m^{-1}$ . Le champ hydrique initial est fixé selon la cartographie issue des mesures initiales et visualisée en Figure 7. L'humidité convective est imposée en surface à la valeur de 13,9%. La simulation est menée à une température isotherme constante de 20°C. Le maillage éléments finis et les directions d'orthotropie sont précisées en Figure 12. Les éléments quadratiques ont une taille de 2mm garantissant une bonne convergence (spatiale et temporelle) des calculs numériques.

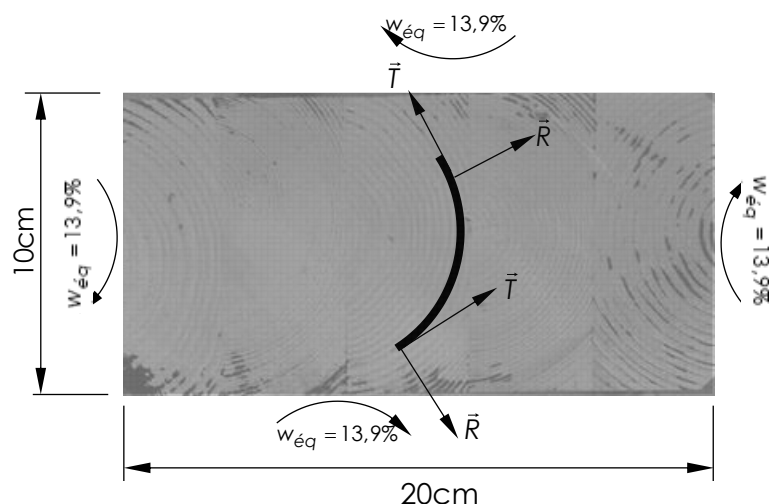


Figure 12 : Maillage éléments finis, directions d'orthotropie et conditions aux limites hydriques

Dans ces conditions, la simulation de transfert hydrique isotherme se traduit par une évolution de l'humidité moyenne, par intégration surfacique du champ d'humidité, visualisée en Figure 13. La simulation prévoit une stabilisation de l'humidité à 13,9% (à 1% d'erreur près) après 140 jours d'essais.

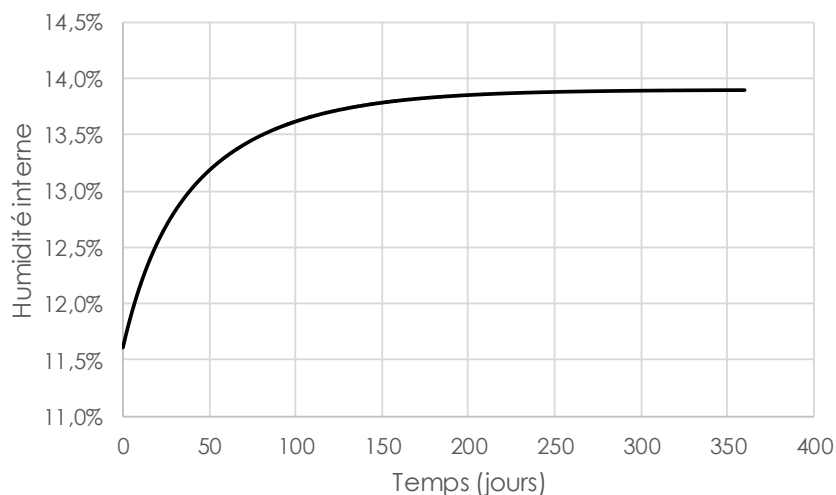


Figure 13 : Evolution temporelle de l'humidité moyenne dans une section transversale

L'évolution temporelle du champ hydrique est représentée Figure 14.

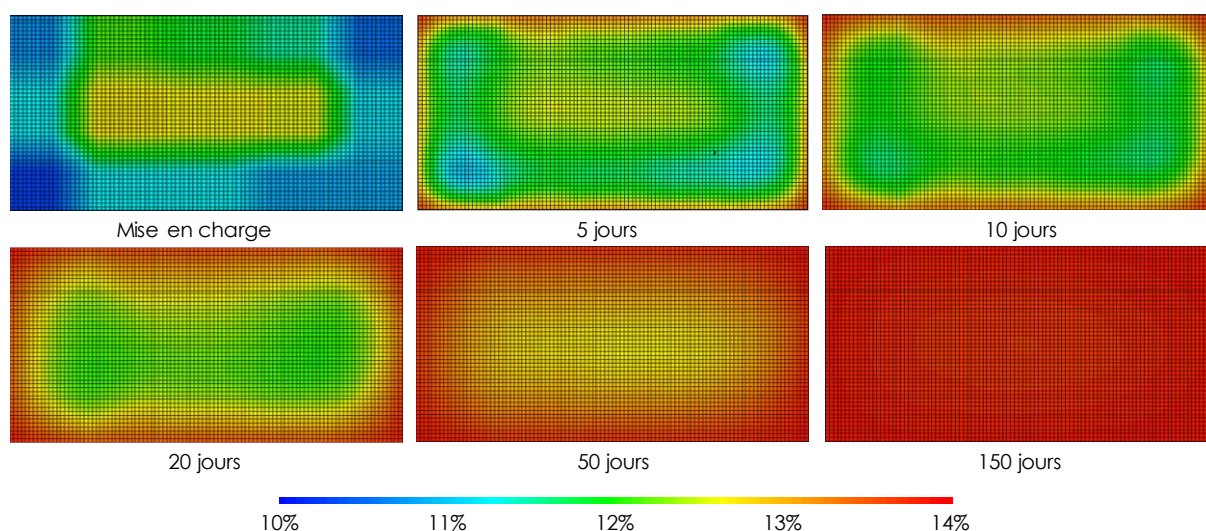


Figure 14 : Evolution temporelle du champ hydrique

### III.2 Essais de fluage recouvrance (Poteau n°3)

Les essais expérimentaux reposent donc sur 5 essais de fluage en compression axiale. Nous avons vu précédemment que les échantillons ont été mis en charge avant que l'équilibre hydrique soit atteint. Cet état de fait, contraint par le 'temps' expérimental nécessite de mettre en place un protocole pour isoler l'effet d'une reprise d'humidité. Cette reprise d'humidité a plusieurs impacts sur le comportement long terme, à savoir :

- Gonflement axial et contraintes hydriques longitudinales
- Gonflement transverse
- Diminution du module d'élasticité instantané
- Accélération des effets différés

Afin d'isoler et d'éliminer ces effets, il est proposé, pour un des échantillons (poteau n°3), d'effectuer un chargement de type fluage recouvrance, avec un temps de recouvrance au-delà de l'équilibre hydrique (au-delà de 140 jours d'essais). La Figure 15 illustre ce chargement appliqué au poteau n°3.

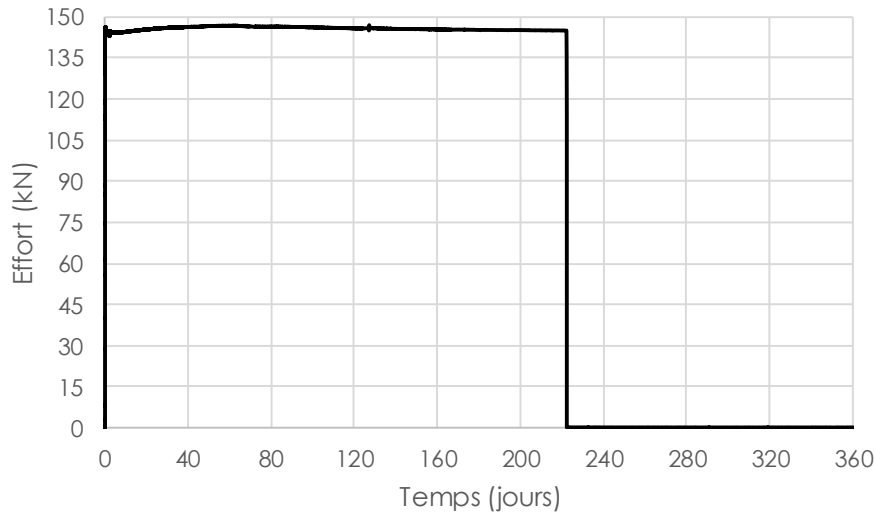


Figure 15 : Protocole de chargement de type fluage-recouvrance, poteau n°3

L'évolution en force met d'ailleurs en évidence les effets de gonflement en début de chargement se traduisant par une légère augmentation de l'effort durant les 120 premiers jours, et ce, malgré la correction apportée par l'expérimentateur. La phase de recouvrance est programmée après 220 jours. Ce protocole expérimental permet de définir, Figure 16 :

- Comportement instantané initial (à 11,6% d'humidité moyenne)
- Comportement en fluage avec effets de gonflement durant les 220 premiers jours d'essai
- Comportement instantané à décharge (à 13,9% d'humidité d'équilibre)
- Comportement en recouvrance à humidité constante d'équilibre durant les 140 derniers jours

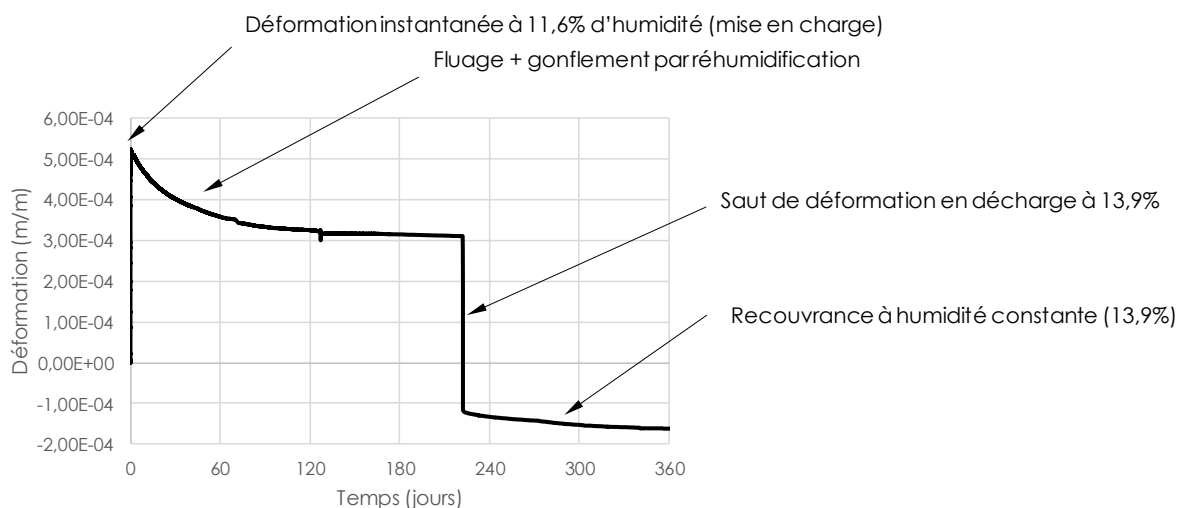


Figure 16 : Déformation sous fluage / recouvrance (Poteau n°3)

### III.2.1 Comportement instantané

Les phases de mise en charge de fluage et de déchargement de recouvrance permettent d'identifier les modules d'élasticité longitudinaux. Ils sont obtenus par régression linéaire de la relation contrainte-déformation lors de ces deux phases. Pour le poteau n°3, la Figure 17 met en exergue cette régression avec, au final, un module d'élasticité de 14,46GPa à la mise en charge ( $w = 11,6\%$ ) et un module d'élasticité de 13,90GPa lors du déchargement ( $w = 13,9\%$ ).



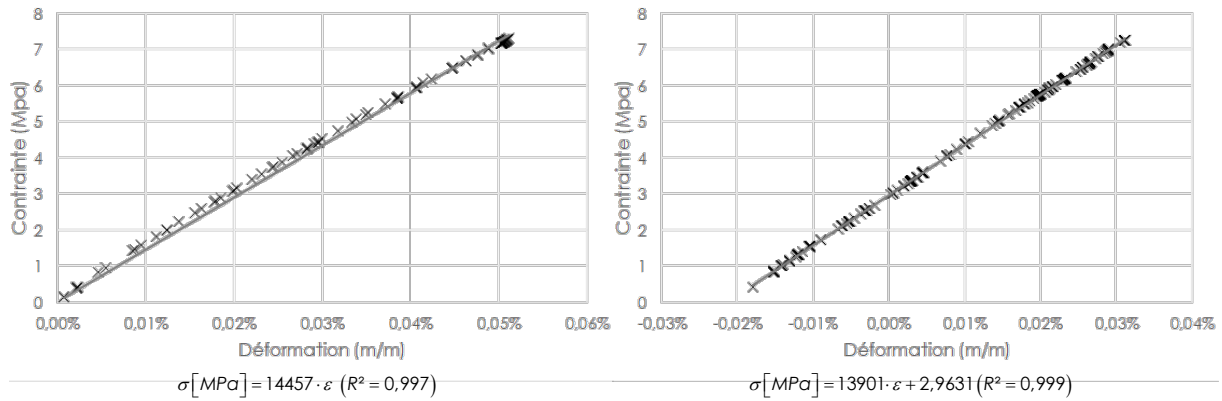


Figure 17 : Régression linéaire du comportement instantané à la mise en charge et au déchargement

A partir d'une base de données expérimentale multi-essence, Guitard (1987) a montré que le module d'élasticité  $E_L^W$  répondait à une fonction linéaire avec l'humidité, et ce, avec une référence  $E_L^{12}$  à 12% d'humidité. Cette relation linéaire prend la forme suivante :

$$E_L^W = E_L^{12} \cdot (1 - \beta \cdot (w - 12)) \quad \text{avec } \beta = 0,015 \quad (7)$$

Concernant le poteau n°3, les deux modules calculés à 11,6% et 13,9% permettent de calculer la constante  $\beta$  égale à 0,0152 et un module de référence  $E_L^{12}$  de 14,3GPa.

### III.2.2 Comportement mécanique en fluage recouvrance

Le comportement mécanique en fluage recouvrance repose sur le formalisme de Boltzmann qui permet de relier, dans une vision uniaxiale, la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$  selon l'expression suivante :

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t J(t-\tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (8)$$

$J(t)$  représente la fonction de fluage.  $t_0$  désigne le temps 'théorique' de début de chargement.

Cette loi de comportement suppose un comportement linéaire et des conditions environnementales stables. Dans le cas d'une sollicitation idéale de fluage recouvrance, l'expression (8) se transforme comme ci-dessous :

$$\varepsilon(t) = J(t-t_0) \cdot \sigma_0 - J(t-t_1) \cdot \sigma_0 \quad (9)$$

$t_1$  est le temps de déchargement en accord avec les restrictions suivantes :

$$J(t-t_1) = 0 \quad \text{si } t \leq t_1 \quad (10)$$

La modélisation par décomposition spectrale est bien adaptée pour représenter un essai de fluage recouvrance. Cette décomposition permet de représenter une fonction de fluage par l'expression suivante :

$$J(t) = \frac{1}{E_L^W} \cdot \left[ 1 + \sum_{m=1}^M A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (11)$$

Pour une humidité  $w$  donnée,  $\lambda_m$  sont des constantes qui permettent de décomposer la fonction de fluage en un spectre temporel identifié. Pour rejoindre la notion de classe de durée de charge de l'Eurocode 5 (4 classes fixant la valeur de  $M$ ) :

- 1 semaine
- 6 mois
- 10 ans
- 50 ans

$A_m$  représente le poids de chaque classe de durée de charge avec, comme particularité, la définition de  $k_{def}$  suivante :

$$k_{def} = \sum_{m=1}^4 A_m \quad (12)$$

Dans la phase de fluage, la déformation s'exprime en considérant, d'une part,  $t_o = 0$  (origine du temps expérimental) et, d'autre part, l'intégration des expressions (9), (10) et (11) telle que:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_o}{E_L^w} \cdot \left[ 1 + \sum_{m=1}^M A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (13)$$

Dans la phase de recouvrance, en regroupant les expressions (9) à (11), la déformation s'exprime par :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_o}{E_L^w} \cdot \left[ \sum_{m=1}^M A_m \cdot (\exp(-\lambda_m \cdot (t - t_1)) - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (14)$$

Dans le cas de l'essai de recouvrance réalisé sur le poteau n°3, le temps expérimental global est limité à 360 jours. Nous allons donc éliminer le spectre correspondant à la durée de charge de 50 ans ( $M+3$ ). De plus, les expressions (13) et (14) n'étant valables qu'à humidité constante, nous nous placerons à l'humidité de l'expérience, à savoir, 13,9%, et ce, en considérant un module d'élasticité à la mise en charge égale à 13,9GPa au lieu de 14,46GPa. La méthode d'optimisation du spectre de fluage repose sur les travaux de Dubois (1997). Cette méthode suppose à isoler chaque élément de la somme, présente dans les expressions (13) et (14), en rapport avec les temps correspondants à la durée de charge. Cette démarche permet d'exprimer  $\lambda_m$  sous la forme:

$$\lambda_m = -\frac{\ln(\xi_m)}{t_m} \quad (15)$$

Où  $\xi_m$  représente un écart (erreur) entre chaque terme de la somme (11) calculé au temps  $t_m$  tel que :

$$1 - \exp(-\lambda_m \cdot t_m) \geq 1 - \xi_m \quad (16)$$

Dans ces conditions, l'équation (16) permet de déterminer les valeurs de  $\lambda_m$  en imposant  $\xi_m$  égale à 1% d'erreur. Il reste à déterminer les coefficients  $A_m$  en construisant un système d'équations linéaires basé sur trois temps choisis sur la courbe expérimentale, Figure 18.



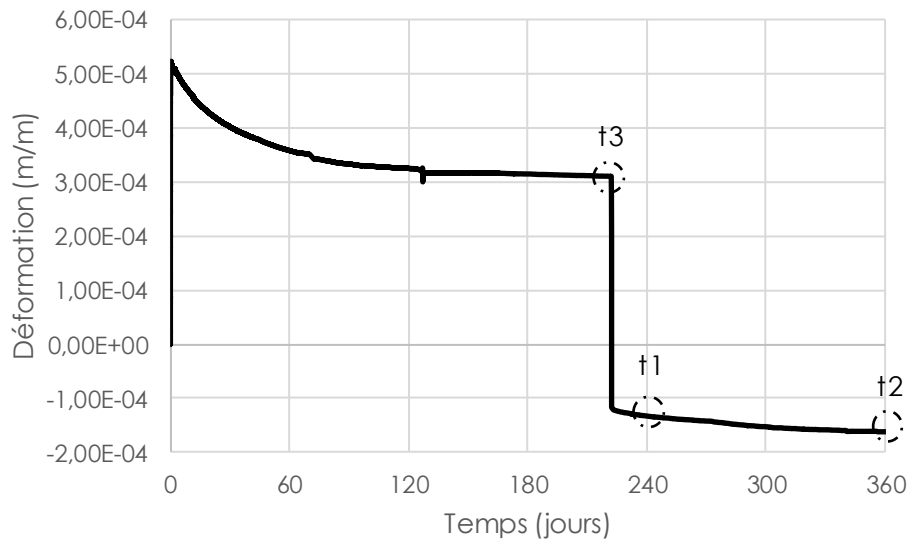


Figure 18 : Choix des temps  $t_m$  pour optimiser le spectre de fluage

- Le temps  $t_1$  correspond à une durée de 7 jours après le début de la recouvrance,
- Le temps  $t_2$  est le dernier enregistrement avant l'arrêt de l'essai, soit 368 jours,
- Le temps  $t_3$  est l'instant précédant le déchargement (début de la recouvrance).

Les simulations de réhumidification montrent que le gonflement hydrique est terminé après 222 jours de la mise en charge. Cependant, afin de fixer ce dernier point, il est nécessaire de caractériser les effets dus au gonflement hydrique.

### III.2.3 Effets d'un gonflement hydrique

Comme précisé précédemment, les effets du gonflement hydriques sont de trois natures, à savoir, une déformation libre de gonflement  $\varepsilon_w$ , une diminution du module d'élasticité axial  $E_0$  et une accélération des cinétiques de fluage. Finalement, ces effets permettent de réécrire l'équation de Boltzmann (8) comme suit :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau + \varepsilon_w \quad (17)$$

La déformation additionnelle  $\varepsilon_w$ , due au gonflement hydrique s'exprime via le coefficient de retrait-gonflement longitudinal  $\alpha_L$  tel que :

$$\varepsilon_w = \alpha_L \cdot (w(t) - w_{ini}) \quad (18)$$

Dans la procédure d'optimisation du spectre de fluage, vu précédemment, les expressions (13) et (14) doivent être complétées de la déformation de gonflement, équation (18), et ce, en accord avec (17). Le système d'équation à résoudre repose finalement sur les deux égalités suivantes :

$$\sum_{m=1}^M A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) = \left[ \varepsilon(t) - \alpha_L \cdot (w(t) - w_{ini}) \right] \cdot \frac{E_L^W}{\sigma_o} - 1 \text{ (en phase de fluage)} \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^M A_m \cdot (\exp(-\lambda_m \cdot (t - t_1)) - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \quad (\text{en phase recouvrance}) \quad (20)$$

$$= [\varepsilon(t) - \alpha_L \cdot (w(t) - w_{ini})] \cdot \frac{E_L^W}{\sigma_o}$$

Il reste à ce stade à optimiser le coefficient de retrait-gonflement  $\alpha_L$ . Pour cela, on est contraint d'admettre une égalité entre l'évolution de la déformation lors de la phase de fluage et l'évolution de la déformation de la phase de recouvrance, et ce, sur un temps correspondant au temps de recouvrance, à savoir, 140 jours, Figure 19.

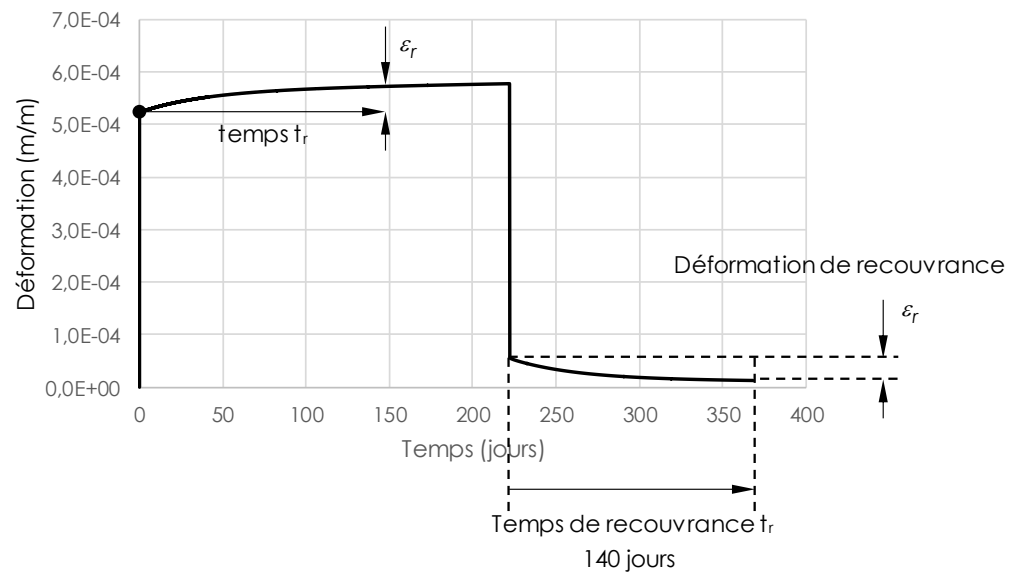


Figure 19 : Optimisation de  $\alpha_L$

Un calcul d'optimisation est effectué par la méthode de Newton-Raphson afin d'évaluer la valeur optimale de  $\alpha_L$ . La Figure 20 représente l'évolution temporelle de la déformation due au gonflement hydrique.

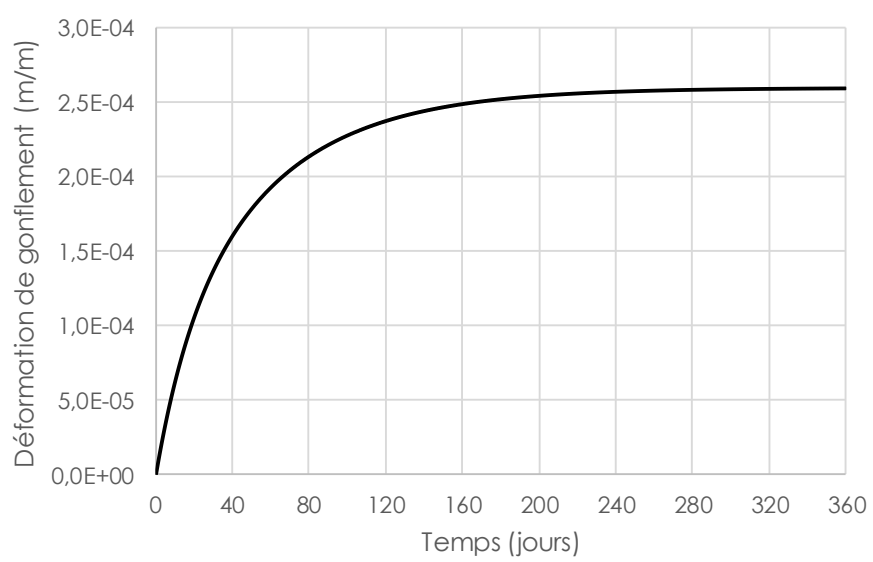


Figure 20 : Déformation due au gonflement hydrique

Dans notre cas, pour une valeur de 1,13%/%, la Figure 21 met en évidence, d'une part, une bonne optimisation du coefficient de retrait-gonflement permettant ainsi d'isoler le gonflement de début d'essai. D'autre part, en raison des propriétés du spectre de fluage précisé dans le Tableau 5, nous observons une bonne interpolation de la courbe de fluage-recouvrance.

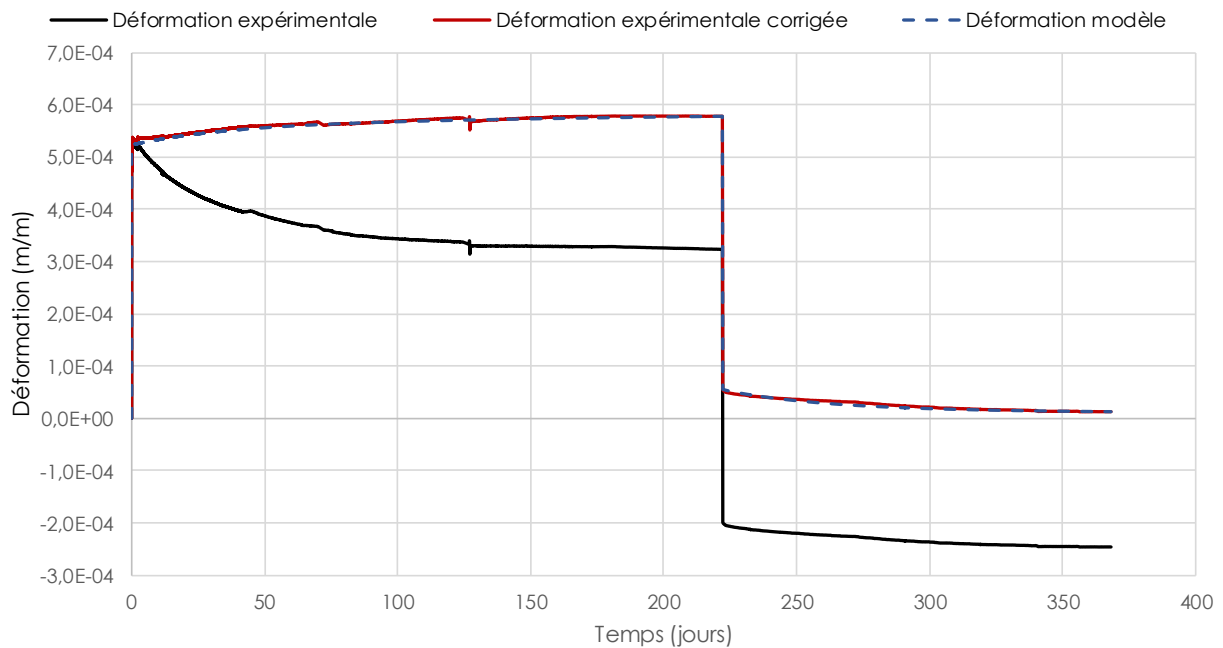


Figure 21 : Résultat de l'optimisation entre modèle et données expérimentales

$\lambda_1$ (jour <sup>-1</sup> )	$\lambda_2$ (jour <sup>-1</sup> )	$\lambda_3$ (jour <sup>-1</sup> )	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$6,58 \cdot 10^{-1}$	$2,56 \cdot 10^{-2}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$7,60 \cdot 10^{-2}$	$9,48 \cdot 10^{-2}$

Tableau 5 : Propriétés spectrales de fluage

#### IV- Essais de fluage

L'ensemble de ce paragraphe se basera sur les illustrations du poteau N°1.

L'ensemble des résultats sous forme de graphique pour l'ensemble des échantillons sont placés en annexe.

##### IV.1 Comportement élastique instantané

Lors de la mise en charge successive des poteaux, il est mesuré le module d'élasticité instantané en effectuant une régression linéaire de la courbe contrainte/déformation. Le procédé de mise en charge en imposant un déplacement par vissage des plaques de répartition ne permet pas d'avoir un chargement instantané. Ce temps de mise en charge sera pris en compte, ultérieurement, pour corriger le module instantané. Cependant, à ce stade, nous considérerons que le module d'élasticité est le coefficient de régression linéaire de la courbe contrainte/déformation dont la plage de temps est limitée au temps de mise en charge. La Figure 22 montre le résultat obtenu pour le poteau n°1. De plus, nous devons également apporter la correction de module induit par l'augmentation d'humidité interne durant l'essai. Pour cela, nous utilisons les résultats obtenus sur le poteau n°3 en apportant la correction de module donnée par l'expression (7). Les résultats sont regroupés dans le Tableau 6.

	Poteau n°1	Poteau n°2	Poteau n°3	Poteau n°4	Poteau n°5
Temps de mise en charge (s)	430	235	500	245	270
$E_L^{1,6}$ (GPa)	14,1	14,8	14,4	14,3	15,0
$E_L^{1,2}$ (GPa)	13,9	14,7	14,3	14,2	14,9
$E_L^{1,3,9}$ (GPa)	13,5	14,3	13,9	13,8	14,5

Tableau 6 : Modules d'élasticité corrigés de l'humidité interne

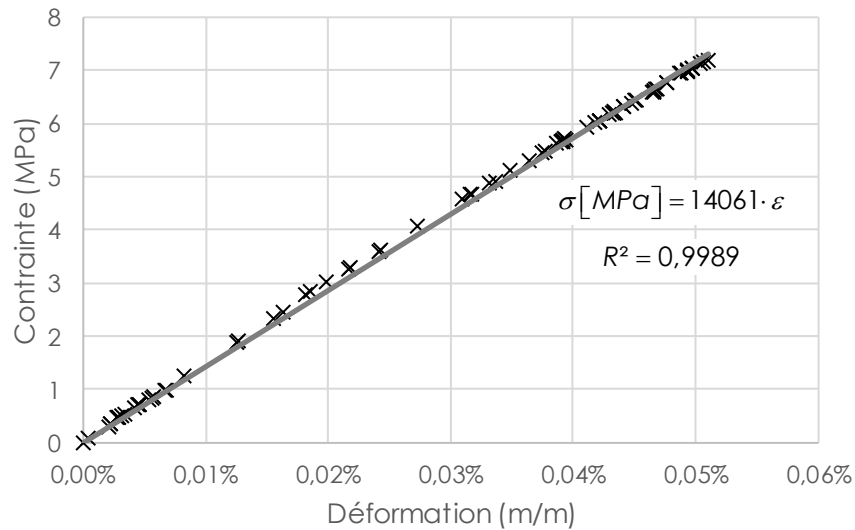


Figure 22 : Courbe contrainte/déformation lors de la mise en charge (Poteau n°1) et régression linéaire

#### IV.2 Sollicitation de fluage

Le comportement en fluage repose sur une sollicitation constante en contrainte. Pour chaque échantillon, il est donc nécessaire de donner l'état de contrainte correspondant. Ainsi, la Figure 23 met en évidence l'évolution temporelle de la contrainte pour le poteau n°1. Les effets de gonflement induisent une contrainte hydrique supplémentaire qui s'annule après 150 jours d'essais (temps de réhumidification mis en exergue avec l'étude du poteau n°3). Après ce temps de réhumidification, la contrainte est stabilisée à 7,3MPa. L'ensemble des valeurs de contrainte de fluage est reporté dans le Tableau 7

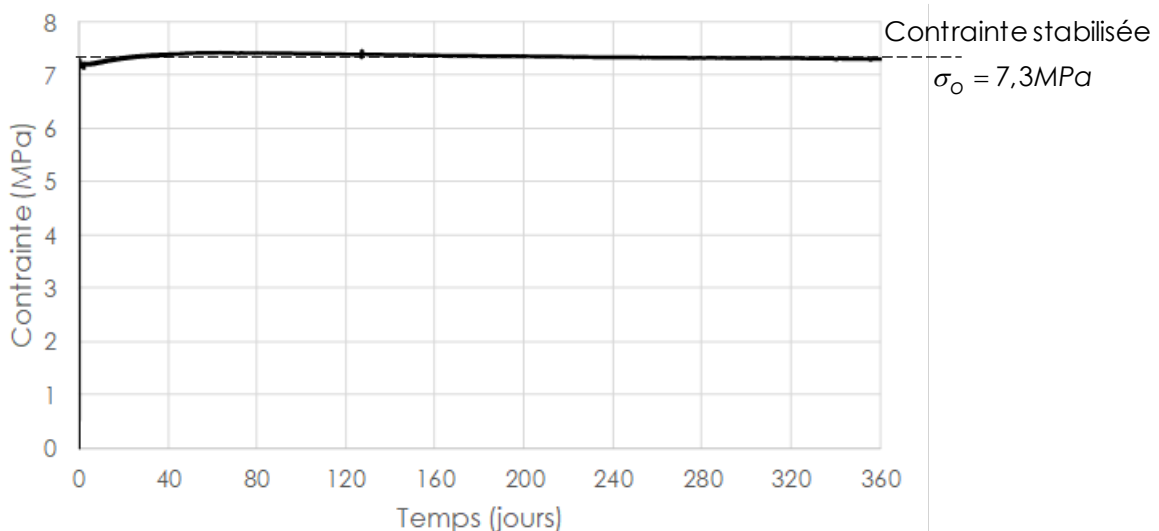


Figure 23 : Variation de la contrainte en fonction du temps expérimental (Poteau n°1)

	Poteau n°1	Poteau n°2	Poteau n°4	Poteau n°5
Contrainte de fluage $\sigma_o$ (MPa)	7,296	7,25	7,23	7,22

Tableau 7 : Contrainte de fluage

### IV.3 Déformation de fluage à un an

Comme nous l'avons vu pour le poteau 3, l'exploitation de la déformation nécessite de retrancher la déformation due au gonflement hydrique. Nous proposons de retrancher la déformation de gonflement déduite de l'essai de fluage recouvrance pour le poteau n°3, Figure 20.

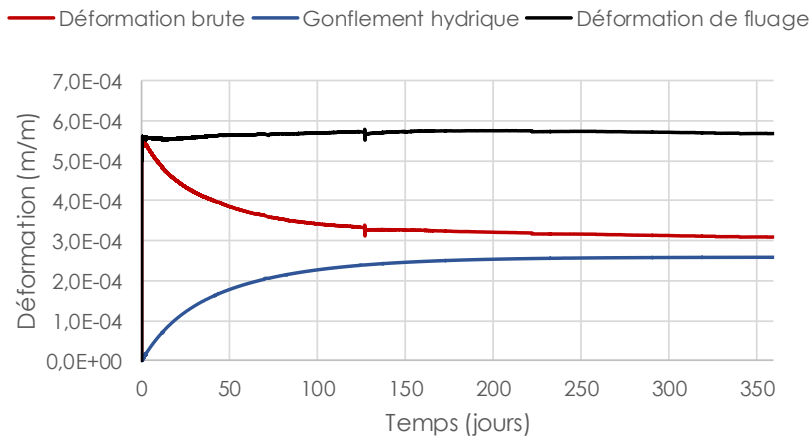


Figure 24 : Déformation de fluage

Concernant le poteau n°1, il est déjà possible d'estimer l'amplification de fluage après un an de charge constante. En effet, le rapport entre la déformation long terme ( $\varepsilon = 5,79 \cdot 10^{-4} m/m$  à un an) sur la déformation instantanée ( $\varepsilon = 5,40 \cdot 10^{-4} m/m$ ) est de 1,05 qui correspondrait à un  $k_{def}^{1an}$  Eurocode de **0,07**. Le Tableau 8 complète cette étude avec l'ensemble des échantillons testés.

	Poteau n°1	Poteau n°2	Poteau n°3	Poteau n°4	Poteau n°5
$\varepsilon_{inst}(m/m)$	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$4,98 \cdot 10^{-4}$
$\varepsilon_{1an}(m/m)$	$5,79 \cdot 10^{-4}$	$5,53 \cdot 10^{-4}$	$5,78 \cdot 10^{-4}$	$5,65 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$
$k_{def}^{1an}$	0,07	0,09	0,11	0,08	0,05

Tableau 8 : Effets différés et amplification de fluage à un an

### IV.4 Pronostic à 50 ans

Pour atteindre un comportement à très long terme (50 ans), il est nécessaire d'extrapoler à 50 ans les déformations mesurées sur une année. Pour cela, nous proposons d'utiliser une particularité du comportement viscoélastique linéaire. Pour des temps longs, au-delà du fluage primaire, l'évolution de la déformation en fonction du temps, dans une représentation Log/Log, tend vers une forme linéaire, telle que (Dubois 2012) :

$$\ln(\varepsilon(t)) = a \cdot \ln(t) - b \tag{21}$$

Dans un premier temps, il revient de définir la zone de linéarité comme il l'est montré en Figure 25. Ce graphique permet de mettre en évidence les limites de faisabilité du fait d'un essai contraint à une durée d'une année. Cependant, cette linéarisation permet d'agrandir

l'échelle du temps en supposant que cette linéarité perdure jusqu'à 50 ans. Les pronostics en termes de déformation de long terme sont donnés dans le Tableau 9.

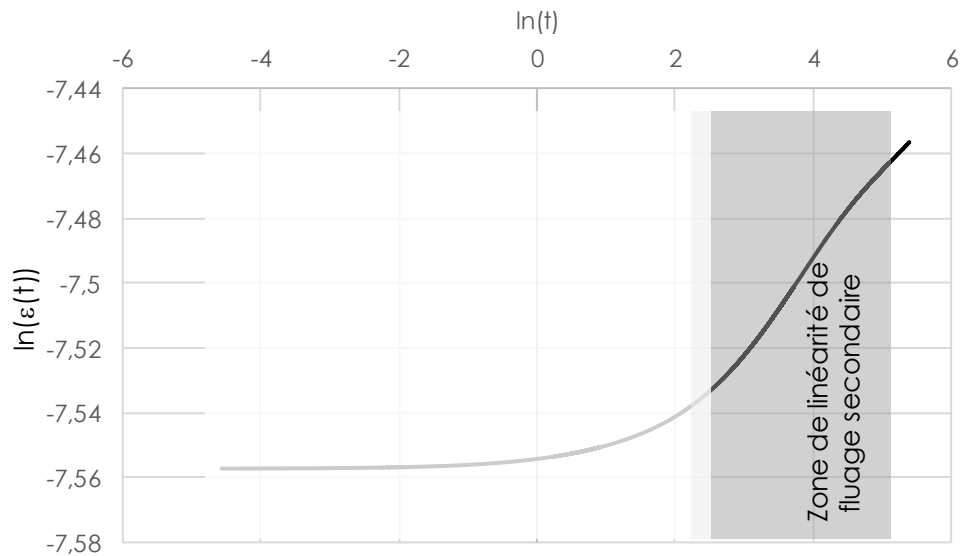


Figure 25 : Zone de linéarité en phase de fluage secondaire

	Poteau n°1	Poteau n°2	Poteau n°3	Poteau n°4	Poteau n°5
$a$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$3,2710^{-2}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	$3,32 \cdot 10^{-2}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$
$b$	7,51	7,66	7,61	7,65	7,60
$\epsilon_{inst}(m/m)$	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$5,33 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_{1an}(m/m)$	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	$5,89 \cdot 10^{-4}$	$5,78 \cdot 10^{-4}$	$6,02 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_{10\text{ ans}}$	$6,07 \cdot 10^{-4}$	$6,16 \cdot 10^{-4}$	$6,31 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_{50\text{ ans}}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$6,62 \cdot 10^{-4}$	$6,58 \cdot 10^{-4}$	$6,84 \cdot 10^{-4}$

Tableau 9 : Projection des déformations à long terme

Cette procédure de linéarisation logarithmique permet également d'atténuer les effets du gonflement hydrique corrigés sur la base d'un essai de fluage recouvrance sur le poteau n°3 mais généralisé sur les 4 autres échantillons. La Figure 26 met en évidence ce processus pour le poteau n°3 avec une projection de fluage jusqu'à un an, sachant qu'un déchargement avait été imposé après 222 jours de fluage.

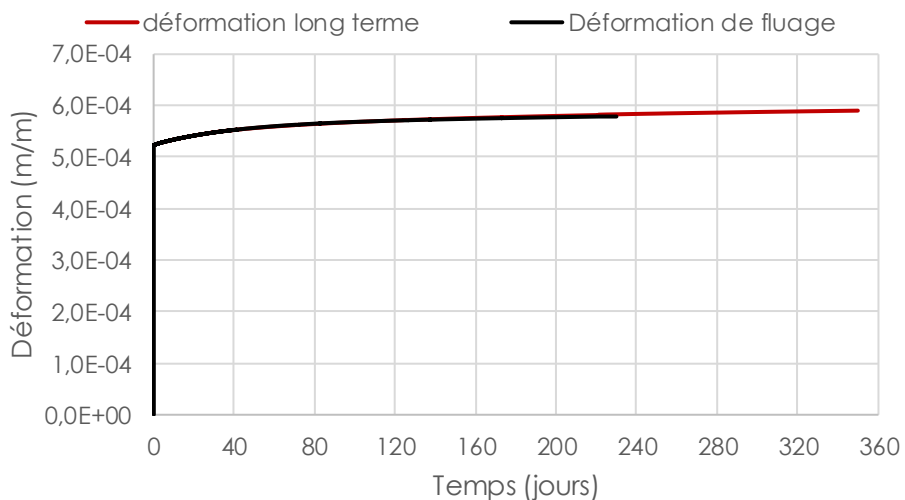


Figure 26 : Projection des déformations de fluage sur une année pour le poteau n°3

Cette figure montre l'efficacité de la méthode d'extrapolation lorsque l'histoire hydrique est maîtrisée. La Figure 27 montre les effets de la linéarisation logarithmique avec la capacité à affiner la correction de gonflement hydrique. Cependant, ces résultats se basent sur une transposition des effets de gonflement déterminés sur le poteau n°3. Ceci explique le décalage de courbe en fin de fluage.

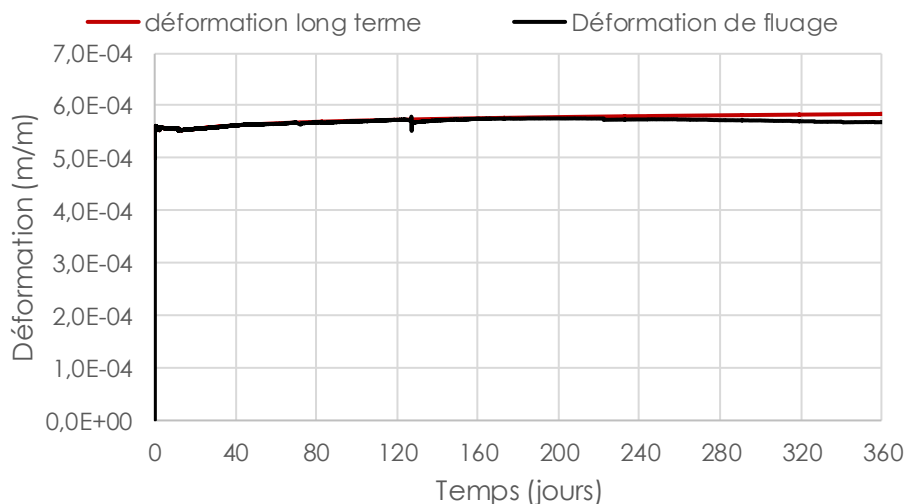


Figure 27 : Correction des déformations de long terme pour le poteau n°1

## V- Transcription Eurocode 5

### V.1 Comportement au fluage

La transcription de ces résultats vers l'Eurocode 5 repose sur une représentation de la fonction de fluage en accord avec l'expressions ci-dessous :

$$J(t) = \frac{1}{E_{o,m}} \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^4 A_i \cdot (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t)) \right) \quad (22)$$

Chaque terme de la somme représente les effets d'une classe de durée de charge rappelés dans le Tableau 10.

Indice	Classe de durée de charge	Durée de charge	Exemples
0	Instantanée	Quelques minutes	Action accidentelle, neige exceptionnelle
1	Court terme	< 1 semaine	Occupation et neige < 1000m
2	Moyen terme	< 6 mois	Occupation et neige > 1000m
3	Long terme	< 10 ans	Stockage
4	Permanente	< 50 ans	Poids propre

Tableau 10 : Classes de durée de charge

Dans le cas d'une poutre en flexion, le fluage est pris en compte en calculant la flèche différée  $u_{net,fin}$  à l'état limite de service de la façon suivante :

$$u_{net,fin} = u_{G,inst} \cdot (1 + k_{def}) + u_{Q_1,inst} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) + \sum_{i>1} u_{Q_i,inst} \cdot (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}) \quad (23)$$

$u_{G,inst}$  et  $u_{Q_i,inst}$  représentent, respectivement les charges de poids propre et d'exploitation instantanée.  $\psi_{0,i}$  désigne les coefficients de pondération des charges d'exploitation.  $k_{def}$

représente le coefficient d'amplification dû au fluage correspondant à une charge permanente (de 50 ans).  $\psi_{2,i}$  sont les coefficients minorant les effets de fluage en fonction de la classe de durée de la charge d'exploitation considérée. En réalité, il y a un lien direct entre les expressions (22) et (23) dans le sens où  $k_{def}$  peut être défini par :

$$k_{def} = \sum_{i=1}^4 A_i \cdot (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_{50 \text{ ans}})) \approx \sum_{i=1}^4 A_i \quad (24)$$

$\lambda_i$  représente la cinétique d'évolution en fonction de la classe de durée de charge. Ils sont calculés suivant l'expression suivante :

$$\lambda_i = -\frac{\ln(\xi)}{t_i} \quad (25)$$

$\xi$  est une constante adimensionnelle égale à 0,01 (Dubois (1997)).  $t_i$  sont les durées de charge rappelés dans le Tableau 10.  $A_i$  représentent l'évolution du fluage au temps  $t_i$ .

## V.2 Extrapolation des fonctions de fluage

A partir de l'évolution des déformations extrapolées de cette campagne expérimentale, les fonctions de fluage sont obtenues de la façon suivante :

$$J(t) = \frac{\varepsilon_{fluage}(t)}{\sigma_0} \quad (26)$$

La déformation de fluage  $\varepsilon_{fluage}(t)$  est la déformation extrapolée que nous avons vu dans les Figure 26 et Figure 27. La contrainte  $\sigma_0$  est la contrainte de chargement rappelée dans le Tableau 7. L'extrapolation de la fonction de fluage consiste à optimiser les paramètres de l'équation (22) afin d'obtenir une correspondance aux temps  $t_i$  de classe de durée de charge. Pour chaque échantillon, les paramètres d'optimisation sont rappelés dans le Tableau 12 avec, en Figure 28, une visualisation graphique des fonctions de fluage expérimentale et modélisée, et ce pour le poteau n°1. Le Tableau 12 précise également la valeur de  $k_{def}$  en accord avec l'expression (24)

	Poteau 1	Poteau 2	Poteau 3	Poteau 4	Poteau 5
1 semaine	$7,61 \cdot 10^{-5}$	$7,07 \cdot 10^{-5}$	$7,31 \cdot 10^{-5}$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	$7,44 \cdot 10^{-5}$
6 mois	$7,90 \cdot 10^{-5}$	$7,70 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-5}$	$8,16 \cdot 10^{-5}$
10 ans	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$8,50 \cdot 10^{-5}$	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$8,99 \cdot 10^{-5}$
50 ans	$8,56 \cdot 10^{-5}$	$8,95 \cdot 10^{-5}$	$9,12 \cdot 10^{-5}$	$9,10 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-5}$

Tableau 11 : Valeurs de fluage données en MPa-1 selon le temps  $t_i$

	Poteau 1	Poteau 2	Poteau 3	Poteau 4	Poteau 5
$A_1$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$5,64 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$6,95 \cdot 10^{-3}$
$A_2$	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$9,24 \cdot 10^{-2}$	$9,32 \cdot 10^{-2}$	$8,36 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-2}$
$A_3$	$3,65 \cdot 10^{-2}$	$6,93 \cdot 10^{-2}$	$6,32 \cdot 10^{-2}$	$6,95 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-2}$
$A_4$	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-1}$
$k_{def}$	0,16	0,29	0,27	0,28	0,28

Tableau 12 : Paramètres d'optimisation



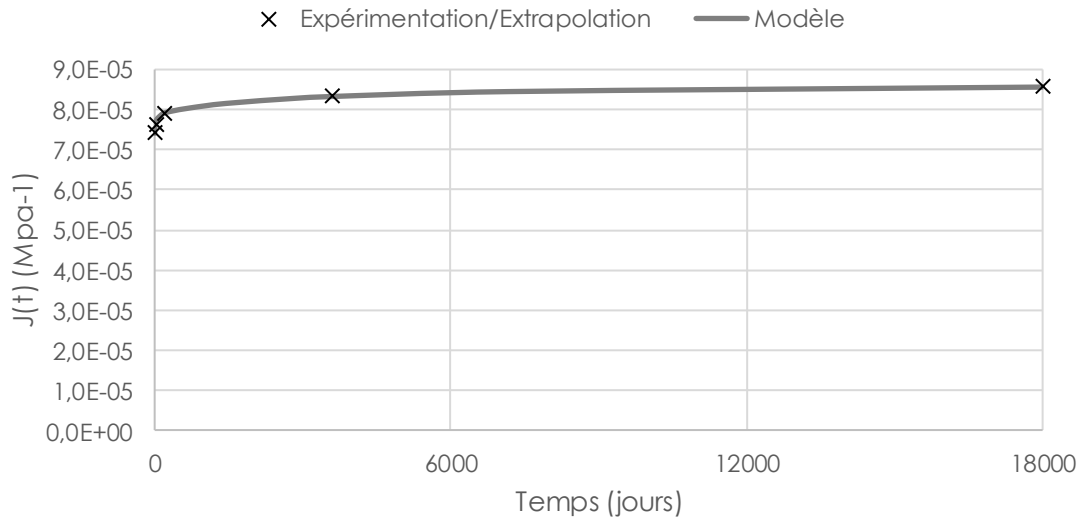


Figure 28 : Résultat d'optimisation (Poteau n°1)

## VI- Conclusions et Perspectives

Ce travail a permis d'identifier, après un an d'essais de fluage, le comportement à long terme des éléments en bois sous sollicitation de compression axiale. Les effets de reprise d'humidité incontournables par la dimension temporelle du projet ont été partiellement contournés en proposant pour le poteau n°3 une recouvrance après plus de 6 mois de chargement en fluage. Ceci a permis, en lien avec, d'une part, une simulation de transfert hydrique et, d'autre part, une mesure précise des cartographes hydriques avant et après essais, d'extraire la déformation de gonflement. **Nous avons montré et observé un temps de stabilisation hydrique de 6 mois.** De plus, nous avons pu effectuer une correction de la déformation instantanée dépendant elle-même de l'état hydrique lors du chargement. La phase de déchargement étant rapide, elle permet de mieux cerner le module d'élasticité instantané (la phase de chargement étant plus complexe pour contrôler l'état de contrainte sans perturber les échantillons voisins).

Nous avons également montré le potentiel de l'approche modèle et expérimentale dans l'opération d'extrapolation du comportement différé à 50 ans. Sur l'ensemble des échantillons (à l'exception de l'échantillon n°1 pour lequel le temps de mise en charge a été plus long), nous trouvons un coefficient  $k_{def}$  de **0,3** contre **0,6 pour les éléments fléchis**. En effet, un temps de mise en charge trop long peut générer une mesure de module d'élasticité instantané sous-estimée car intégrant déjà une partie de fluage en minorant ainsi le surplus de déformation différée. Une phase de recouvrance pourra, dans ces conditions, corriger ce fait.

Pour compléter et enrichir cette étude, nous pouvons proposer plusieurs levées de verrous scientifiques :

- Enrichir le processus d'élimination des effets de gonflement sur l'ensemble des poteaux en proposant une phase de recouvrance après un an de fluage.
- Travailler sur les coefficients de pondération des actions  $\psi_2$  pour leur donner une meilleure cohérence entre la valeur de  $k_{def}$  et la cinétique de fluage en compression axiale différente qu'en sollicitation de flexion.
- Apporter une correction du coefficient  $k_{mod}$  à l'état limite ultime qui est corrélé au coefficient  $k_{def}$  et à la cinétique de fluage en compression axiale.

## VII- Références bibliographiques

Dubois F. (1997), Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés : Application au matériau bois, thèse de doctorat de l'Université de Limoges

Dubois F., Husson J. M., Sauvat N., Manfoumbi N. (2012), Modeling of the viscoelastic, mechano-sorptive behavior in wood, *Mechanics of Time Dependent Materials*, 16:4, pp. 439-460.

Guitard D., *Mécanique du matériau bois et composites*, éd. Cépaudes, 1987

Manfoumbi N. (2012), Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges

Merakeb S., Dubois F., Petit C. (2009), Modelling of the sorption hysteresis for wood, *Wood Sci. Technol.*, vol. 43: 7-8, pp. 575-589.

Varnier M., Sauvat N., Monterro C., Dubois F., Gril J. (2018), Adaptation of Eurocode 5 standard to French hardwoods - Proposal of new hygroscopic equilibrium charts, 5th INTER meeting Tallinn, Estonia

Varnier M. (2019), Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges

## VIII.1 Humidité d'équilibre

Eprouvettes	22/04/2020 - 10h00	23/04/2020 - 10h30	27/04/2020 - 10h30	Humidité
1	3,81	3,36	3,350	0,137
2	3,64	3,19	3,190	0,141
3	4,34	3,85	3,840	0,130
4	3,98	3,52	3,490	0,140
5	4,93	4,36	4,360	0,131
6	3,98	3,52	3,510	0,134
7	4,62	4,09	4,070	0,135
8	4,81	4,23	4,230	0,137
9	3,85	3,41	3,400	0,132
10	4	3,54	3,530	0,133
11	3,34	2,93	2,930	0,140
12	3,58	3,15	3,130	0,144
13	4,27	3,75	3,730	0,145
14	3,65	3,19	3,190	0,144
15	4,33	3,82	3,810	0,136
16	3,29	2,89	2,880	0,142
17	4,1	3,61	3,610	0,136
18	4,05	3,57	3,560	0,138
19	3,16	2,79	2,780	0,137
20	3,22	2,83	2,820	0,142
21	3,09	2,72	2,720	0,136
22	3,14	2,76	2,760	0,138
23	3,36	2,96	2,940	0,143
24	3,26	2,86	2,850	0,144
25	4,08	3,59	3,590	0,136
26	2,99	2,61	2,610	0,146
27	3,72	3,26	3,260	0,141
28	4,5	3,96	3,940	0,142
29	3,17	2,8	2,790	0,136
30	3,46	3,05	3,030	0,142
31	3,38	2,98	2,970	0,138
32	3,92	3,43	3,430	0,143
33	3,61	3,18	3,160	0,142
34	3,69	3,24	3,230	0,142
35	4,42	3,89	3,890	0,136
36	3,36	2,93	2,930	0,147
37	3,93	3,46	3,440	0,142
38	4,14	3,62	3,620	0,144
39	3,31	2,94	2,910	0,137
40	3,52	3,09	3,080	0,143
41	3,4	3,01	2,990	0,137
42	3,94	3,48	3,470	0,135
43	3,93	3,48	3,450	0,139
44	4,37	3,85	3,830	0,141
45	4,31	3,81	3,800	0,134
46	3,43	3,03	3,020	0,136
47	4,47	3,96	3,930	0,137
48	4,24	3,75	3,730	0,137
49	3,55	3,16	3,130	0,134
50	3,22	2,85	2,830	0,138

Plateau Haut

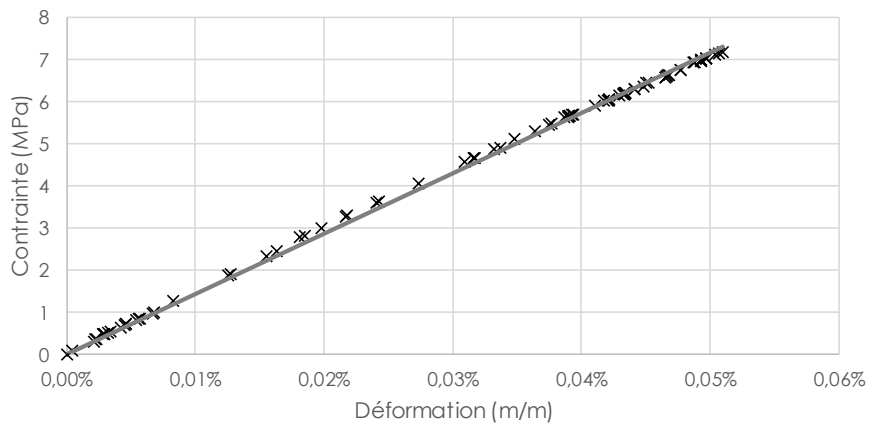
Eprouvettes	22/04/2020 - 10h20	23/04/2020 - 10h50	27/04/2020 - 10h54	Humidité
1	3,42	3,01	3,000	14,0%
2	4,49	3,94	3,940	14,0%
3	4,19	3,71	3,710	12,9%
4	3,75	3,3	3,310	13,3%
5	4,73	4,18	4,160	13,7%
6	4,19	3,69	3,680	13,9%
7	3,79	3,34	3,320	14,2%
8	4,57	4,02	4,020	13,7%
9	3,63	3,21	3,200	13,4%
10	3,46	3,05	3,050	13,4%
11	3,61	3,16	3,160	14,2%
12	3,98	3,49	3,490	14,0%
13	3,6	3,15	3,150	14,3%
14	3,27	2,86	2,860	14,3%
15	4,3	3,76	3,760	14,4%
16	3,4	2,99	2,970	14,5%
17	4,02	3,53	3,530	13,9%
18	4,24	3,71	3,710	14,3%
19	3,14	2,78	2,780	12,9%
20	3,31	2,9	2,900	14,1%
21	3,7	3,26	3,260	13,5%
22	3,56	3,12	3,120	14,1%
23	3,58	3,15	3,140	14,0%
24	3,22	2,82	2,820	14,2%
25	3,74	3,28	3,280	14,0%
26	3,46	3,03	3,020	14,6%
27	3,89	3,41	3,410	14,1%
28	4,38	3,83	3,830	14,4%
29	3,19	2,82	2,800	13,9%
30	3,46	3,04	3,030	14,2%
31	3,84	3,37	3,370	13,9%
32	3,26	2,86	2,850	14,4%
33	3,61	3,18	3,190	13,2%
34	3,86	3,43	3,410	13,2%
35	3,86	3,42	3,410	13,2%
36	3,42	3	3,000	14,0%
37	4,8	4,23	4,230	13,5%
38	3,54	3,1	3,100	14,2%
39	3,09	2,7	2,700	14,4%
40	3,3	2,91	2,900	13,8%
41	4,19	3,69	3,690	13,6%
42	3,91	3,45	3,440	13,7%
43	4,43	3,93	3,920	13,0%
44	3,54	3,13	3,130	13,1%
45	4,7	4,16	4,160	13,0%
46	4,43	3,91	3,910	13,3%
47	4,72	4,17	4,170	13,2%
48	4,33	3,81	3,810	13,6%
49	3,45	3,06	3,050	13,1%
50	3,56	3,15	3,140	13,4%

Plateau Bas

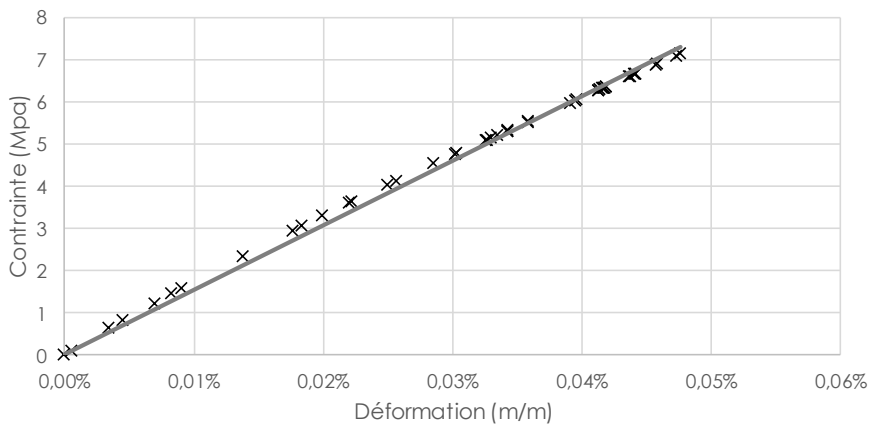
Eprouvettes	22/04/2020 - 10h40	23/04/2020 - 11h06	27/04/2020 - 11h08	Humidité
1	4,71	4,15	4,15	13,91%
2	4,51	3,99	3,99	13,44%
3	5,24	4,63	4,63	13,58%
4	5,17	4,57	4,57	13,54%
5	5,04	4,43	4,43	14,20%
6	4,17	3,69	3,68	13,73%
7	5,32	4,72	4,71	13,35%
8	5,48	4,85	4,83	13,87%
9	3,61	3,2	3,19	13,57%
10	4,04	3,57	3,57	13,57%
11	4,61	4,06	4,04	14,55%
12	4,09	3,61	3,61	13,71%
13	5,02	4,41	4,41	14,26%
14	4,2	3,71	3,71	13,62%
15	4,34	3,79	3,79	14,96%
16	5,03	4,43	4,42	14,23%
17	5,14	4,57	4,55	13,37%
18	5,03	4,46	4,45	13,44%
19	4,28	3,76	3,76	14,26%
20	5,25	4,62	4,62	14,06%
21	4,04	3,54	3,54	14,56%
22	3,63	3,2	3,20	13,85%
23	4,49	3,94	3,94	14,39%
24	4,16	3,66	3,66	14,08%
25	4,09	3,59	3,59	14,36%
26	4,29	3,77	3,76	14,53%
27	4,44	3,94	3,94	13,08%
28	5,17	4,58	4,58	13,28%
29	4,12	3,63	3,63	13,92%
30	3,47	3,05	3,05	14,20%
31	4,38	3,86	3,86	13,89%
32	4,38	3,88	3,87	13,59%
33	5,3	4,66	4,65	14,41%
34	4,45	3,92	3,92	13,94%
35	4,35	3,82	3,82	14,30%
36	4,35	3,82	3,82	14,30%
37	4,41	3,91	3,88	14,08%
38	4,07	3,6	3,60	13,46%
39	4,3	3,77	3,77	14,49%
40	3,39	2,98	2,98	14,18%
41	3,69	3,27	3,26	13,60%
42	3,13	2,77	2,77	13,40%
43	4,35	3,83	3,83	14,00%
44	4,45	3,94	3,94	13,35%
45	4,36	3,86	3,85	13,66%
46	5,05	4,46	4,46	13,64%
47	4,67	4,14	4,14	13,20%
48	5,08	4,5	4,49	13,55%
49	4,47	3,95	3,94	13,87%
50	3,84	3,38	3,38	14,03%

Plateau Médian

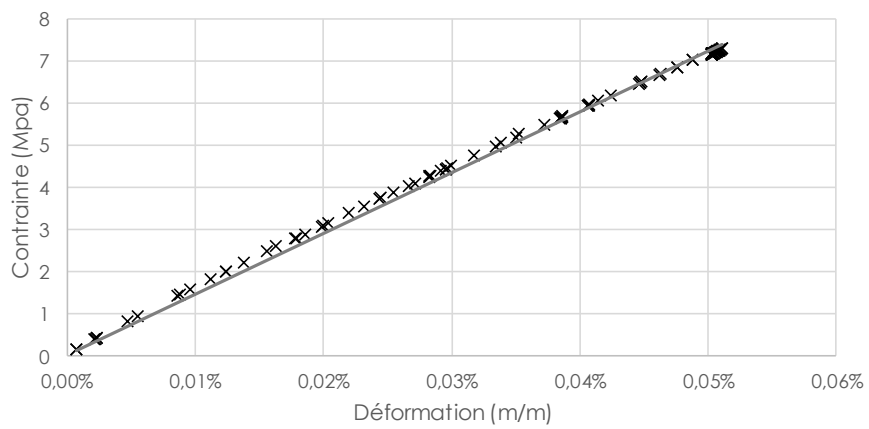
## VIII.2 Module d'élasticité à 11,6%



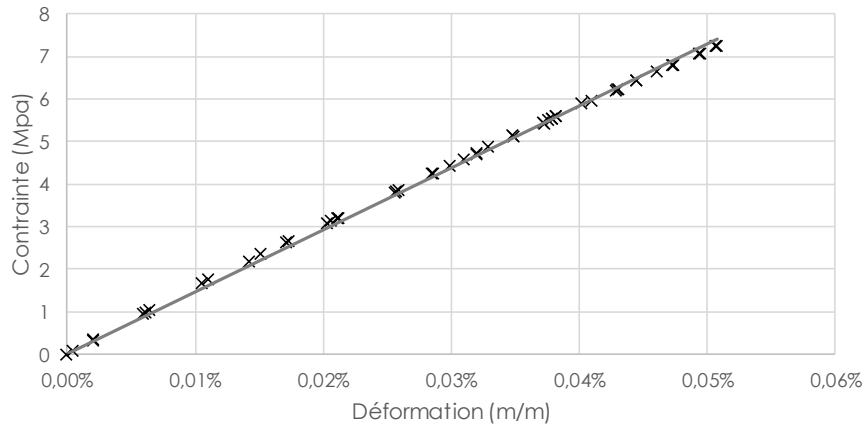
Poteau n°1 :  $E_L^{1,6} = 14,1 \text{ GPa}$ ,  $R^2 = 0,999$



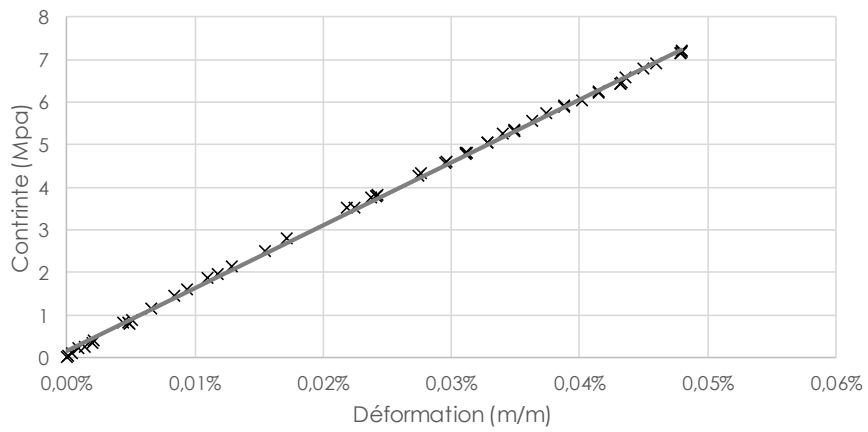
Poteau n°2 :  $E_L^{1,6} = 14,8 \text{ GPa}$ ,  $R^2 = 0,996$



Poteau n°3 :  $E_L^{1,6} = 14,4 \text{ GPa}$ ,  $R^2 = 0,996$

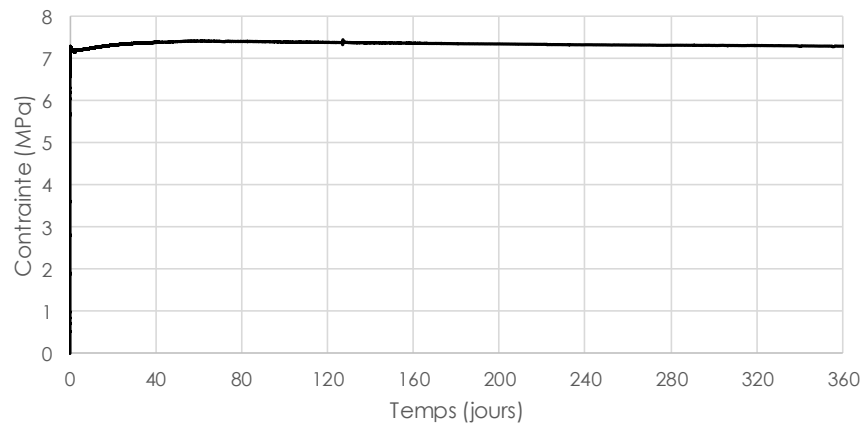


Poteau n°4 :  $E_L^{1,6} = 14,3GPa, R^2=0,998$

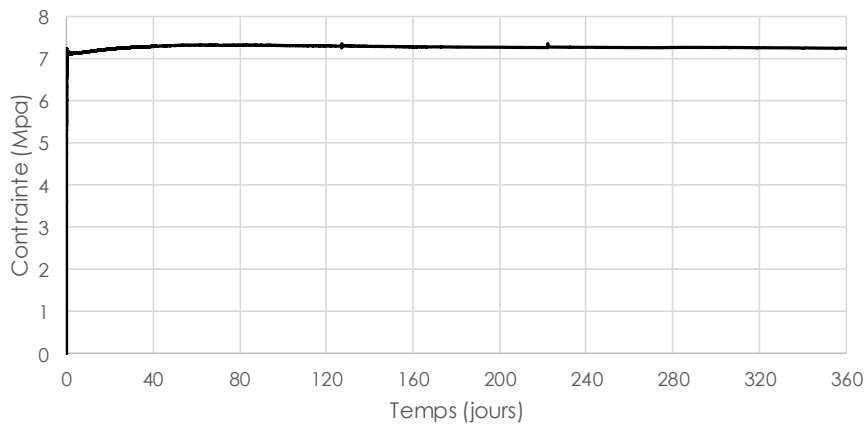


Poteau n°4 :  $E_L^{1,6} = 15,0GPa, R^2=0,999$

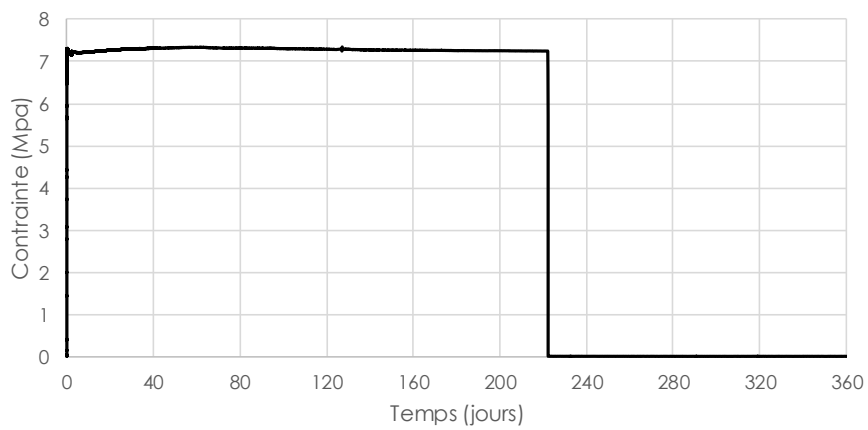
VIII.3 Evolution temporelle de la contrainte et stabilisation



Poteau n°1 :  $\sigma_o = 7,30MPa$

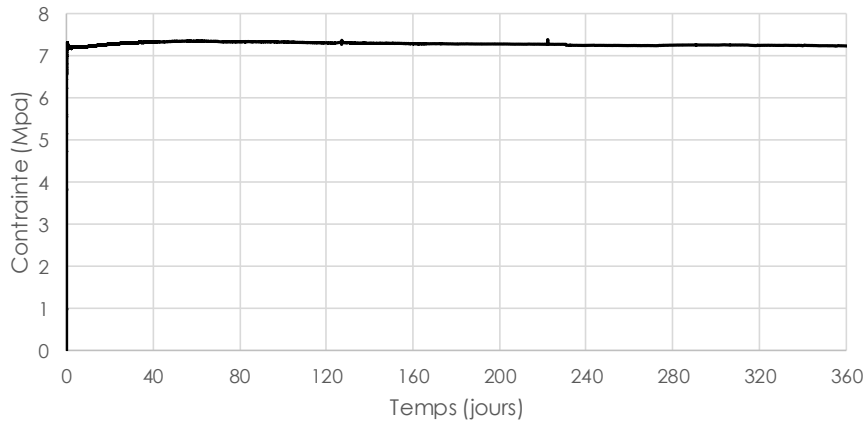


Poteau n°2 :  $\sigma_o = 7,25MPa$

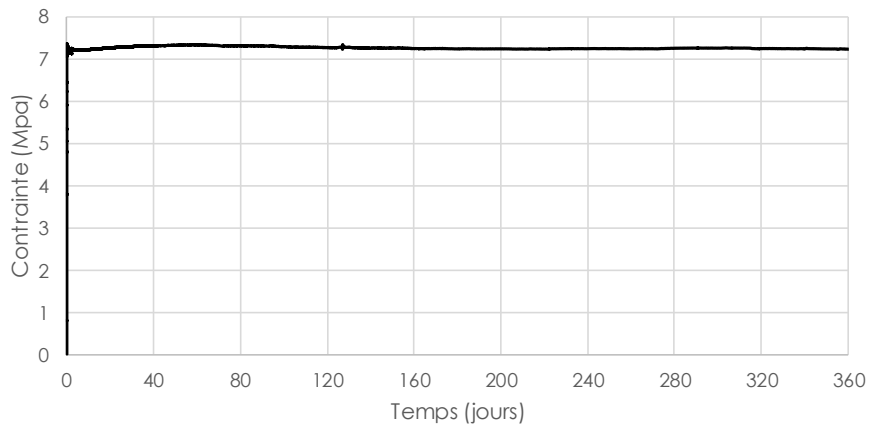


Poteau n°3 :  $\sigma_o = 7,26MPa$



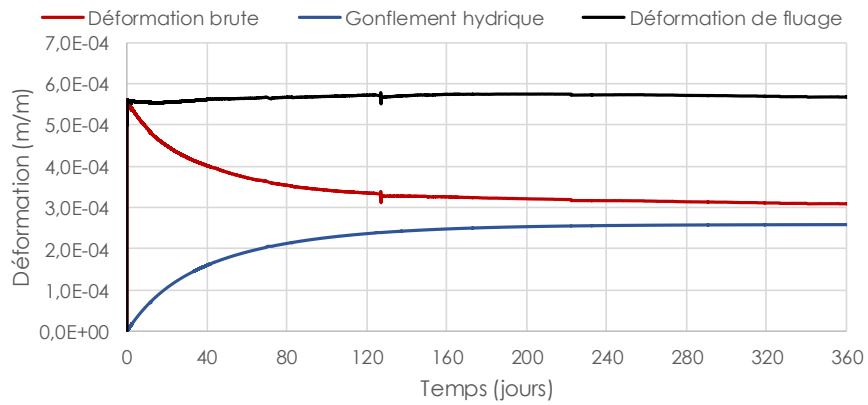


Poteau n°4 :  $\sigma_0 = 7,23MPa$

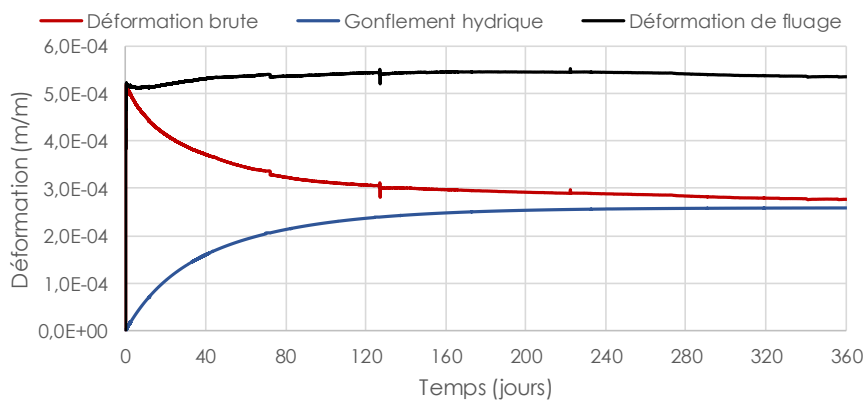


Poteau n°5 :  $\sigma_0 = 7,22MPa$

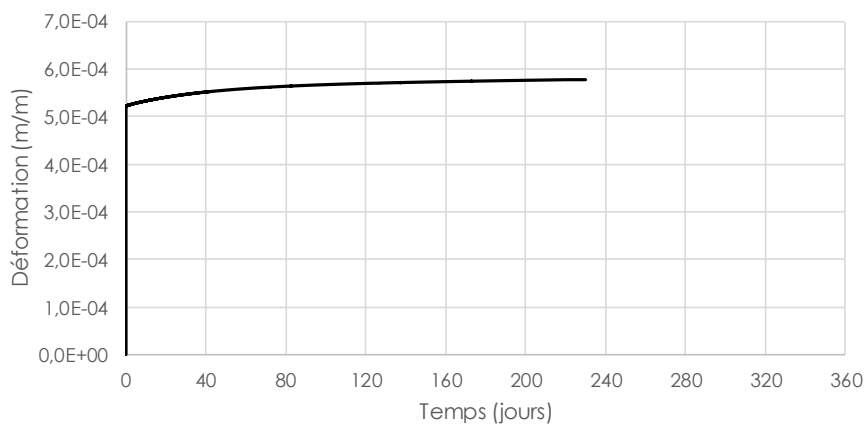
## VIII.4 Déformation de fluage



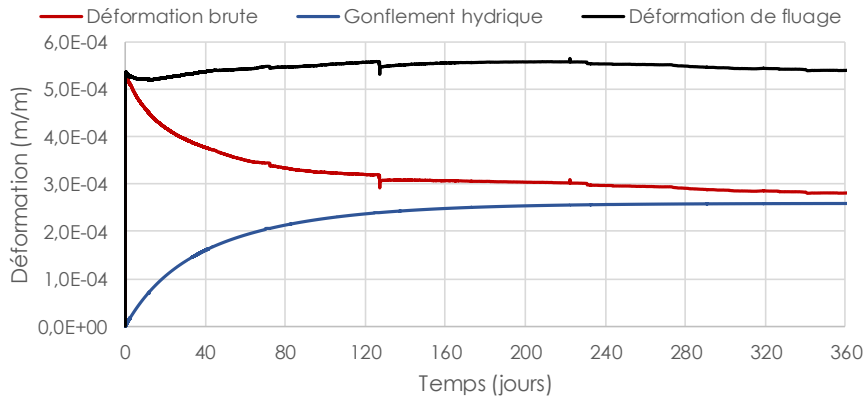
Poteau n°1



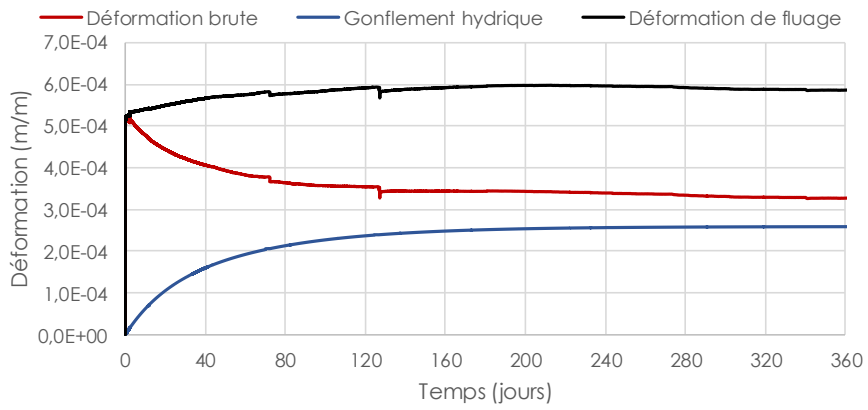
Poteau n°2



Poteau n°3

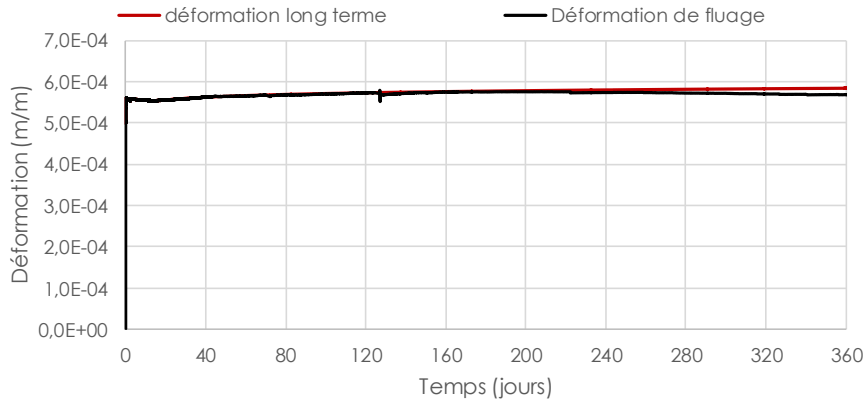


Poteau n°4

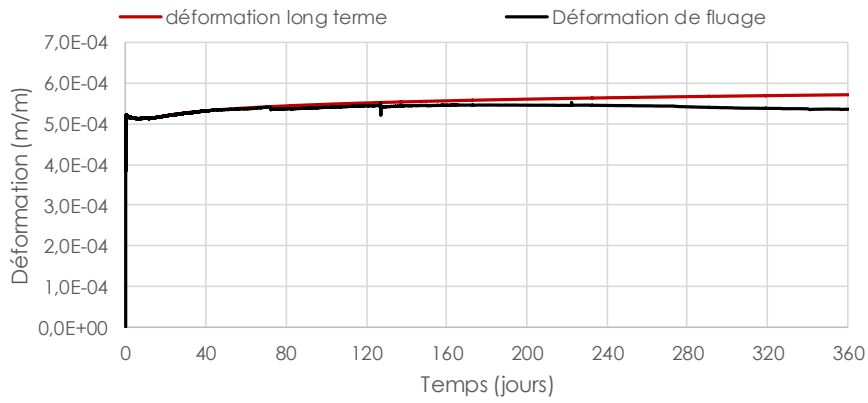


Poteau n°5

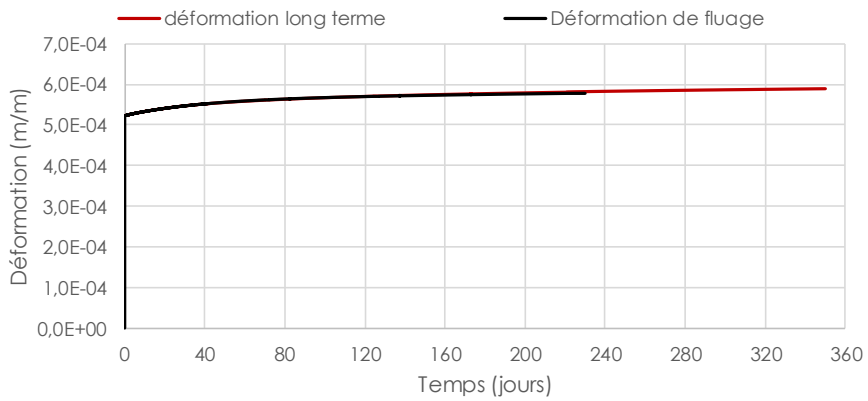
## VIII.5 Extrapolation à 50 ans



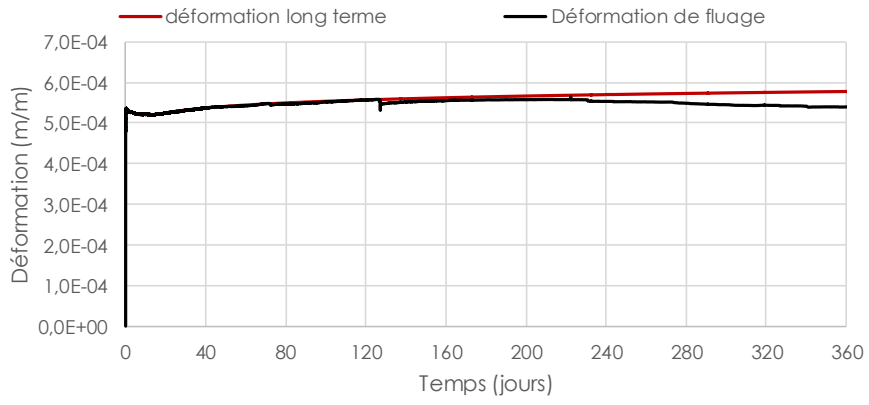
*Poteau n°1*



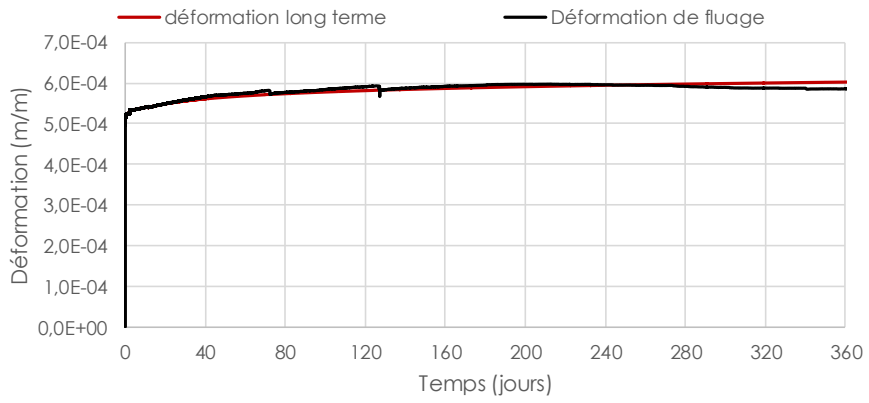
*Poteau n°2*



*Poteau n°3*

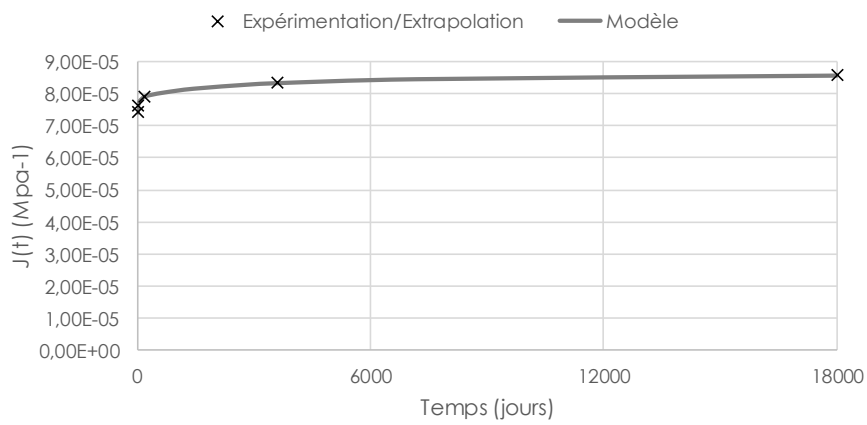


Poteau n°4

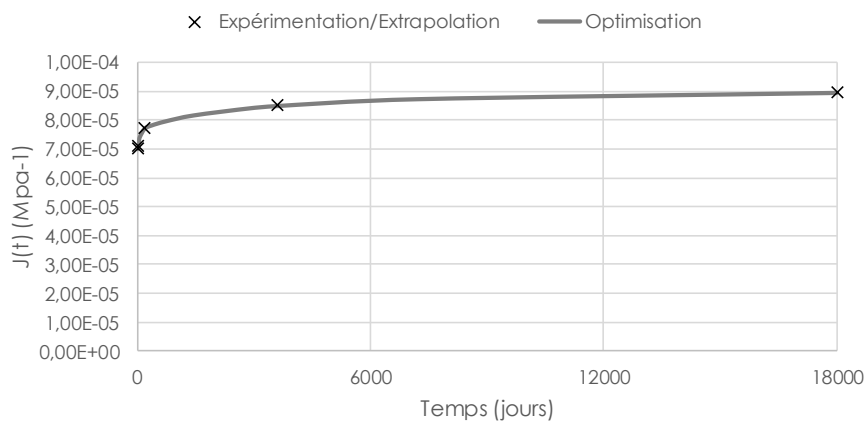


Poteau n°5

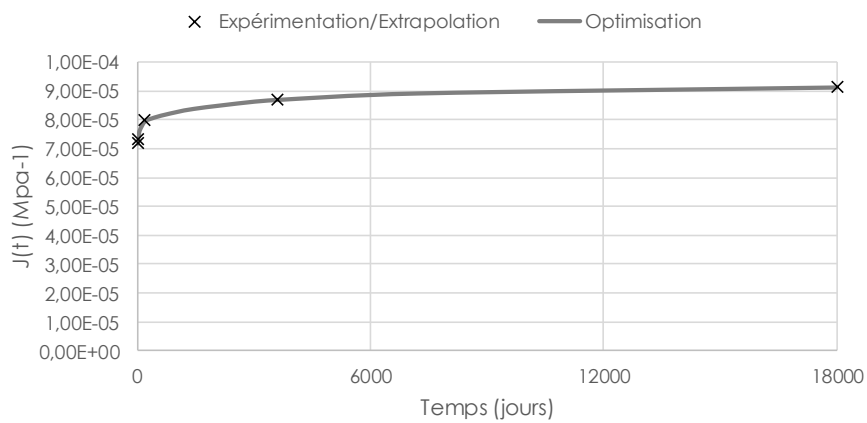
## VIII.6 Interpolation de fluage



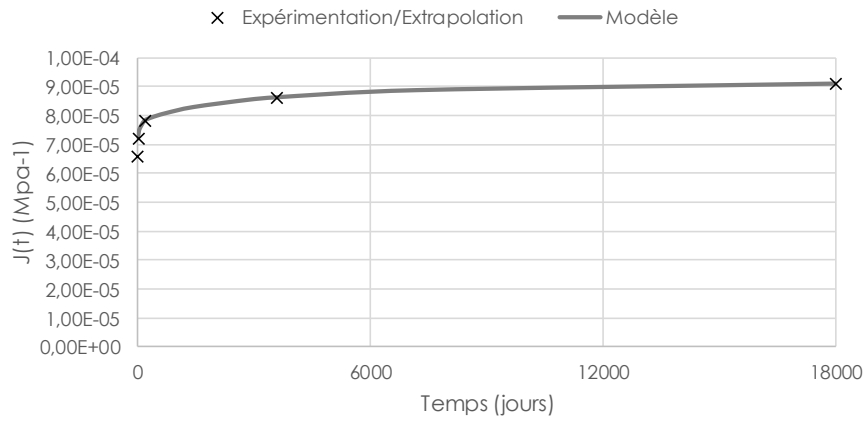
Poteau n°1



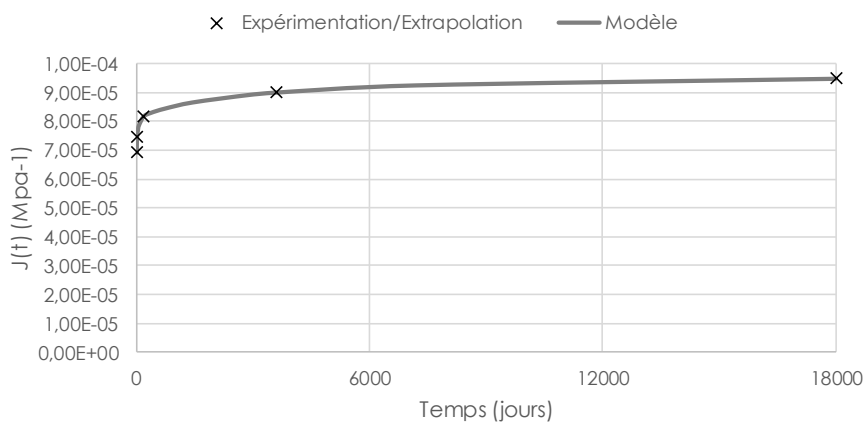
Poteau n°2



Poteau n°3



Poteau n°4



Poteau n°5



A D I V B O I S  
[www.ativbois.org](http://www.ativbois.org)