Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation

Marion Lambert

▶ **To cite this version:**

Marion Lambert. Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation. Génie civil. Université de Limoges, 2018. Français. NNT : 2018LIMO0113 . tel-02272136

HAL Id: tel-02272136
https://theses.hal.science/tel-02272136

Submitted on 27 Aug 2019

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

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

Thèse de doctorat

Université de Limoges

Université de Limoges

ED 609 - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME)

Laboratoire GC2D et IFSTTAR

Thèse pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Discipline : Génie civil

Présentée et soutenue par

Marion Lambert

Le 27 novembre 2018

Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation

Thèse dirigée par Christophe Petit et Vincent Gaudefroy

JURY :

Rapporteurs :

M. Yves Berthaud, Professeur des Universités, Laboratoire de Mécanique et Technologie, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
M. Alan Carter, Professeur des Universités, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec.

Examinateurs :

M. Vincent Gaudefroy, chargé de recherche, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports et de l'Aménagement, Nantes
Mme. Anne Millien, Maitre de conférences, Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité, Université de Limoges.
M. Christophe Petit, Professeur des Universités, Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité, Université de Limoges.
M. Jean-Michel Piau, Ingénieur, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports et de l'Aménagement, Nantes

Invités
M. Maël Buannic, Docteur, Direction des Affaires Techniques, Routes de France, Paris

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée entre l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux de Bouguenais et le laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité d'Egletons, et a été financée par Routes de France. Je remercie M. Ferhat Hammoum, directeur de l'unité Matériaux pour les Infrastructures de Transport, pour m'avoir accueillie au sein de l'IFSTTAR.

Je tiens tout particulièrement à remercier M. Yves Berthaud et M. Alan Carter pour leurs contributions en tant que rapporteurs de thèse et M. Maël Buannic pour être venu assister à ma soutenance.

Je remercie M. Christophe Petit, directeur du laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité et directeur de cette thèse d'avoir cru en mes capacités pour mener à bien ces travaux de thèse.

Je tiens à remercier M. Vincent Gaudefroy co-directeur de cette thèse pour m'avoir conseillée et soutenue durant ces années de thèse.

Je souhaite remercier M. Frédéric Dubois pour ses conseils et son regard extérieur sur mes travaux qui furent particulièrement enrichissants.

Je remercie vivement Mme. Anne Millien pour sa présence constante malgré l'éloignement, ses conseils toujours avisés et son soutien sans faille.

Mes remerciements vont tout particulièrement à M. Jean-Michel Piau, qui a toujours été disponible quand j'en avais besoin. Merci pour les discutions, les conseils et la bienveillance qui ont permis le bon déroulement de cette thèse.

Je remercie Mme. Christine Leroy d'avoir cru au potentiel de cette thèse et de la confiance placée en moi pour mener à bien ce sujet.

Merci à M. Olivier Burban, M. Stéphane Bouron, M. Sébastien Buisson et tout particulièrement M. Jean-Luc Geffard qui m'ont aidé à la réalisation de mes campagnes d'essais.

Merci à mes collègues de l'IFSTTAR et du GC2D de m'avoir particulièrement bien accueillie dans chaque laboratoire.

Un grand merci à mes parents, ma sœur et mes amis pour leur soutien tout au long de ces années.

Table des matières

Remerciements 2
Introduction 1
Chapitre I. Étude bibliographique 3
I.1. Introduction 3
I.2. Généralités sur les chaussées 3
I.2.1. Structure de chaussée 3
I.2.2. Méthode de dimensionnement des chaussées 4
I.3. Généralités sur les enrobés bitumineux et des matériaux granulaires 6
I.3.1. Différents types d'enrobés bitumineux 6
I.3.2. Composition des enrobés bitumineux 7
I.3.3. Comportement mécanique des enrobés bitumineux 12
I.3.4. Méthode de formulation des enrobés à chaud 18
I.3.5. Comportement mécanique des matériaux non liés 22
I.4. Généralités des graves émulsion 27
I.4.1. Composition des graves émulsion 27
I.4.2. Comportement mécanique des enrobés à l'émulsion 28
I.4.3. Méthode de formulation 31
I.4.4. Méthode de dimensionnement 33
I.5. Conclusion de la partie bibliographique 34
Chapitre II. Loi de comportement 1D pour les enrobés à l'émulsion 37
II.1. Nécessité d'un nouveau modèle à la transition entre ENL et VE 37
II.2. Développement de la loi de comportement en 1D 38
II.3. Modèles rhéologiques constitutifs 38
II.3.1. Comportement élastique non linéaire 38
II.3.2. Décomposition spectrale 38
II.4. Choix d'une loi VEL et représentation spectrale 41
II.4.1. Décomposition de la loi VE en spectre de fluage 41
II.5. Modèle de comportement VENL 1D pour enrobé à l'émulsion 43
II.5.1. Loi de comportement du modèle VENL 1D à historique de contrainte $\boldsymbol{\sigma t}$ donné 44
II.5.2. Algorithme de calcul de la loi VENL 1D et implémentation numérique 47

II.5.3. Validation des modèles ENL et VE 49
II.5.4. Simulation VENL 1D d'un mûrissement 54
II.6. Conclusion 58
Chapitre III. Loi de comportement évolutive 3D pour enrobés à l'émulsion 59
III.1. Introduction 59
III.2. Représentation spectrale 3D du modèle ENL de Boyce 59
III.2.1. Décomposition spectrale 3D d'une loi ENL isotrope 59
III.2.2. Application à la loi de Boyce 62
III.2.3. Interprétation 70
III.2.4. Calcul numérique de la réponse du spectre ENL 3D à efforts $\boldsymbol{p}$ et $\boldsymbol{q}$ donnés 75
III.2.5. Validations des programmes $\boldsymbol{ENLp, q}$ et $\boldsymbol{ENL\varepsilon v, \varepsilon d}$ et de l'équivalence entre le modèle de Boyce et son approche spectrale à partir de la simulation d'un essai triaxial 80
III.2.6. Conclusion sur le modèle ENL 3D 82
III.3. Viscoélasticité 3D 82
III.4. « Fusion » 3D entre ENL et VE 84
III.4.1. Loi de comportement du modèle VENL 3D à historique de contrainte $\boldsymbol{\sigma(t)}$ donné 85
III.4.2. Calcul des déformations $\boldsymbol{\varepsilon v(ti+1)}$ et $\boldsymbol{\varepsilon d(ti+1)}$ à efforts donnés 88
III.4.3. Implémentation numérique à efforts donnés 89
III.4.4. Calcul des contraintes $\boldsymbol{p(ti+1)}$ et $\boldsymbol{q(ti+1)}$ à déformations données 93
III.4.5. Implémentation du code de calcul $\boldsymbol{VENLoedo}$ dans le cas d'une simulation d'un essai œdométrique 96
III.4.6. Auto-vérification des programmes VENL 3D 99
III.4.7. Incidence du paramètre $\boldsymbol{A}$ 101
III.5. Conclusion 102
Chapitre IV. Développement et validation d'un essai de caractérisation du comportement mécanique évolutif des enrobés à l'émulsion 103
IV.1. Nécessité du développement d'un essai de caractérisation du comportement évolutif des enrobés à l'émulsion 103
IV.1.1. Choix de l'essai 103
IV.1.2. Dispositif et moyens expérimentaux 104
IV.2. Essais de faisabilité et modifications du dispositif d'essai 107
IV.2.1. Description du matériau utilisé 107
IV.2.2. Premiers essais de faisabilité 109

IV.2.3. Nouveau dispositif d'essai 112
IV.2.4. Nouvelle acquisition 115
IV.3. Validation du dispositif 122
IV.3.1. Essai sur Delrin® 122
IV.3.2. Essai sur BBSG 124
IV.4. Conclusion 129
Chapitre V. Résultats des différentes campagnes d'essais et mise en œuvre du modèle 131
V.1. Introduction 131
V.2. Description et résultats des campagnes d'essais 1 et 2 sur un enrobé à l'émulsion « classique » 131
V.2.1. Matériau utilisé 131
V.2.2. Essai de mûrissement 133
V.2.3. Résultats de l'essai de mûrissement et de l'essai œdométrique 136
V.3. Description et résultats de la campagne d'essais n°3 sur grave émulsion utilisant des agrégats d'enrobé 150
V.3.1. Matériau utilisé 150
V.3.2. Essai de mûrissement 152
V.3.3. Résultats de l'essais de mûrissement et d'essai œdométrique 153
V.4. Mise en œuvre et calage du modèle VENL 3D 156
V.4.1. Détermination des paramètres élastiques non linéaires 157
V.4.2. Calage des paramètres viscoélastiques valeur $\boldsymbol{\delta}$ fixée 165
V.4.3. Fonction $\boldsymbol{A(\theta actuelle, \mathbf{d}m\hat{u}r)}$ de mûrissement et de sensibilité à la température actuelle - Hypothèses pour sa modélisation 170
V.4.4. Fonction $\boldsymbol{A(\theta actuelle, \mathbf{d}m\hat{u}r)}$ de mûrissement et de sensibilité à la température actuelle – Identification de ses valeurs expérimentales 172
V.4.5. Calage des paramètres viscoélastiques à valeur $\boldsymbol{\delta}$ variable 175
V.5. Fonction $\boldsymbol{\delta(\theta actuelle, \mathbf{d}m\hat{u}r)}$ de mûrissement et de sensibilité à la température actuelle 176
V.6. Conclusion 177
Chapitre VI. Conclusion 180

Introduction

Il existe une préoccupation croissante de la communauté routière française pour promouvoir et développer des solutions techniques plus respectueuses de l'environnement. Dans le domaine des chaussées, les techniques à l'émulsion de bitume sont des solutions plus respectueuses de l'environnement. En effet, ces matériaux sont élaborés et mis en œuvre à température ambiante qui, contrairement aux enrobés à chaud, ils nécessitent moins d'énergie et limitent les rejets de gaz à effet de serre lors de leur fabrication.

La connaissance, la formulation et les performances de ces matériaux s'appuient sur des savoir-faire locaux. Ils ne permettent pas facilement la transposition des règles établies d'une région à une autre ce qui limite le déploiement de la technique à l'échelle nationale. Les acteurs de ce projet regroupant industriels et académiques, souhaitent accompagner la démarche actuelle française pour favoriser le recours aux techniques routières durables à l'émulsion et voir à terme leur domaine d'application s'élargir à des trafics plus élevés que ceux habituellement réservés à ce type de matériau.

Les matériaux à l'émulsion de bitume présentent un caractère fortement évolutif, du fait de l'utilisation de l'émulsion (dispersion de bitume dans de l'eau) qui est un système instable. Lors de l'étape de mélange de l'émulsion et des granulats, un phénomène de rupture de l'émulsion est observé. Il se traduit par une séparation de phase entre l'eau et le bitume. Cette rupture est fortement liée à la formulation de l'émulsion et aux granulats (et agrégats) utilisés. Après la rupture, le matériau continue à évoluer en passant par une cinétique mal connue et généralement non maîtrisée d'un comportement souple, de matériau granulaire faiblement lié, à celui nettement plus rigide d'un enrobé, au cours d'une phase de mûrissement d'une durée variable. Il en résulte dans le même temps de fortes modifications qualitatives et quantitatives du comportement des chaussées sous trafic.

L'objectif de ce travail de thèse consiste à développer un modèle générique évolutif pour enrobé bitumineux à l'émulsion de bitume ainsi qu'un essai de caractérisation pour mesurer, du point de vue mécanique, l'évolution du comportement du matériau en fonction du temps de son état frais à un état muri et alimenter par des résultats expérimentaux la loi de comportement.

Pour cela, ce mémoire de thèse est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique de la structure d'une chaussée et des matériaux routiers liés et non liés. Il décrit également les connaissances sur la grave émulsion, de leur composition à leur dimensionnement et l'importance des recherches qu'il reste encore à mener pour mieux comprendre leur comportement mécanique.

Le deuxième chapitre présente le développement du modèle viscoélastique non linéaire (VENL) à une dimension permettant de reproduire de façon simplifié le comportement évolutif des enrobés à l'émulsion de bitume depuis l'état frais jusqu'à l'état mûri. Pour cela, nous utilisons une fusion entre un modèle élastique non linéaire (ENL) communément utilisé pour traduire le comportement des matériaux granulaires et un modèle viscoélastique (VE) utilisé pour traduire le comportement des enrobés à chaud liés par du bitume.

Le troisième chapitre présente une évolution du modèle VENL à une dimension qui doit permettre de modéliser le comportement mécanique d'un enrobé à l'émulsion en cours de mûrissement en utilisant la décomposition spectrale des lois de comportement isotropes ENL et VE formulées dans un espace tridimensionnel à l'aide de leurs composantes volumique et déviatorique et d'une « variable de mûrissement » A qui permet d'agir sur le poids respectif des composantes ENL et VE du modèle.

Le quatrième chapitre est dédié au développement du nouvel essai de type œdométrique pour caractériser le comportement évolutif des enrobés à l'émulsion. Dans ce chapitre, nous partons du choix des conditions d'essai jusqu'à la conception de l'essai pour finir par la validation de celui-ci au moyen de matériaux étalons dont les caractéristiques et les performances sont connues.

Pour finir, le cinquième chapitre est consacré d'abord à la présentation des résultats des campagnes d'essais réalisées toutes effectuées avec l'essai œdométrique permettant d'avoir une meilleure compréhension du comportement du matériau durant son mûrissement. Pour cela, nous avons donc combiné plusieurs campagnes de mûrissement du matériau (en température et humidité) avec un essai de caractérisation des performances mécaniques réversibles du matériau. La deuxième partie de ce chapitre montre la pertinence du modèle en évaluant la « variable de mûrissement » et en calant les paramètres du modèle grâce à l'utilisation des résultats expérimentaux.

La conclusion synthérisera l'ensemble des principaux résultats du modèle et des résultats expérimentaux et établira le bilan sur la contribution de ce travail de thèse sur la compréhension du comportement mécanique réversible des enrobés à l'émulsion de bitume. Des perspectives de recherche sont proposées pour à terme dimensionner de manière rationnelle les chaussées constituées de couche de matériaux à l'émulsion de bitume.

Chapitre I. Étude bibliographique

I.1. Introduction

La conception d'une chaussée nécessite des connaissances sur la composition et le comportement des matériaux qui la composent ainsi que des règles de dimensionnement en fonction de la densité de trafic visée. Or nous allons voir dans ce chapitre que la méthode française de dimensionnement des chaussées ne repose que sur le dimensionnement de deux matériaux : les matériaux granulaires non liés et les enrobés (matériaux liés). Nous allons voir que les matériaux évolutifs tels que les enrobés à l'émulsion de bitume ne sont pas pris en compte dans ce dimensionnement. Pour remédier à cela et prendre en compte des matériaux évolutifs dans le dimensionnement de chaussée, nous avons besoin de développer de nouveaux modèles et de mettre en place de nouveaux essais de caractérisation.

C'est pourquoi ce chapitre est divisé en trois parties :

- La première présente des généralités sur la composition et le dimensionnement des chaussées.
- La deuxième partie présente la formulation, la composition et le comportement des différents enrobés bitumineux à chaud et des matériaux granulaires.
- La dernière partie présente l'état de l'art concernant la compréhension sur la formulation et le comportement des enrobés à l'émulsion de bitume.

Ces trois parties présentent l'ensemble des matériaux utilisés pour leur construction en partant des matériaux granulaires jusqu'aux différents types d'enrobés dont les comportements et le dimensionnement sont spécifiques.

A la fin de ce chapitre, nous aurons mis en évidence le manque de connaissances du comportement et du dimensionnement des enrobés à l'émulsion. Cette base nous permettra d'établir les points d'amélioration qu'il reste à développer pour une meilleure compréhension du comportement de ces matériaux afin de les intégrer plus généralement comme couche structurante dans une chaussée.

I.2. Généralités sur les chaussées

I.2.1. Structure de chaussée

Pour assurer le confort et la sécurité des automobilistes tout en assurant la pérennité de la chaussée, elle doit être dimensionnée avec des matériaux dont les propriétés et les performances mécaniques seront susceptibles de résister à la charge du trafic qu'elle subira tout au long de sa vie. Il faut savoir qu'une chaussée est composée de plusieurs couches (Figure 1). Le nombre de couches et leur caractéristique dépendent de l'importance du trafic. Une chaussée dont la densité de trafic est très élevée, devrait être composée de trois couches principales construites sur un sol support adapté.

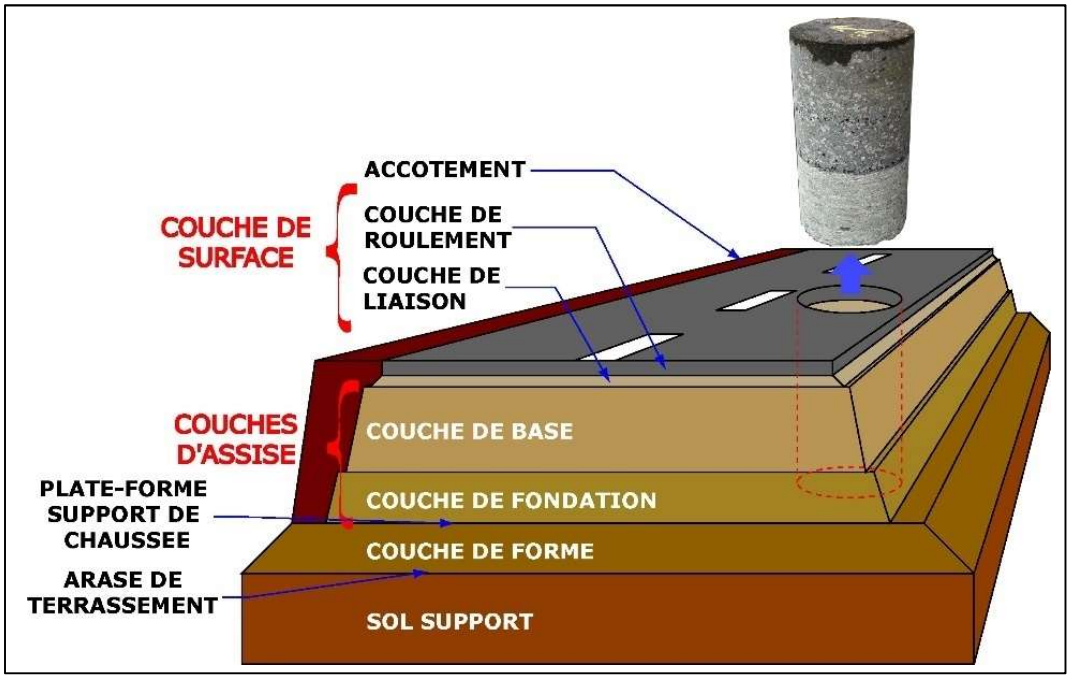


Figure 1 - Structure de chaussée.

La couche de forme est la première étape de construction d'une chaussée, elle est composée de matériau granulaire non lié et selon la portance du sol support, cette couche peut être facultative. Elle sert à limiter les déformations trop importantes de la chaussée et elle sert de plateforme pour le reste de la chaussée. C'est elle qui va définir la pente des couches supérieures.

L'étape suivante consiste à construire la couche d'assise. Elle est composée d'une couche de fondation et d'une couche de base, la composition de ces deux couches varie suivant le besoin en résistance de la chaussée et peut-être réalisée soit en enrobé bitumineux soit en matériau granulaire non lié. Ces deux couches servent à transmettre les efforts au sol sans se déformer pour empêcher la fissuration des couches supérieures. Un soin particulier est pris pour que la couche de base soit plane avant la pose des couches de surface.

La dernière couche de la chaussée se nomme la couche de surface et est composée de la couche de liaison qui est optionnelle et qui sert à protéger la couche de base des infiltrations d'eau et de la couche de roulement sur laquelle roule les usagers. Cette dernière est très importante pour le confort des usagers. Elle doit être à la fois résistante, ne pas se fissurer ou fluer, permettre une bonne adhérence du pneumatique mais également limiter les bruits de roulement.

I.2.2. Méthode de dimensionnement des chaussées

Les bases de la méthode de dimensionnement des chaussées telle qu'on les connait aujourd'hui ont été fondées dans les années 1970 avec la parution d'un catalogue de nouvelles structures de chaussée [1]. Dans ce catalogue, deux critères sont utilisés pour le dimensionnement des chaussées à savoir :

- Une pression limite à ne pas dépasser sur la plateforme.
- Une déformation limite acceptable des couches liées.

Le logiciel Alizé développé en 1964 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a permis les premières vérifications de déformation des couches liées pour ce guide. Il a été par la suite systématiquement utilisé pour les calculs de déformation du nouveau guide [2].

La méthode de dimensionnement actuelle des chaussées [3] repose essentiellement sur les deux précédents guides et prend en compte les critères de durabilité des matériaux utilisés. Elle représente la chaussée comme une structure multicouche avec des conditions aux interfaces qui dépendent des matériaux. Dans un premier temps, il faut calculer les déformations maximales en bas de chacune des couches de chaussée au passage d'une charge de référence à savoir un essieu de 130 kN. Ce calcul est réalisé pour les enrobés bitumineux en prenant en compte une charge circulaire en surface de la structure et le module d'Young du matériau en règle générale à 15 °C, 10 Hz.

La structure choisie pourra alors être mise en œuvre si les sollicitations maximales produites par l'essieu de référence restent inférieures aux sollicitations admissibles des matériaux. Le calcul de la valeur de déformation admissible $\varepsilon_{z,ad}$ du matériau est fonction du critère de fatigue et du nombre de poids lourds qui passera sur cette chaussée tout au long de sa vie. Pour les enrobés bitumineux, il s'écrit :

$$\varepsilon_{z,ad} = \varepsilon_6(\theta_{eq}, f)\left(\frac{NE}{10^6}\right)^b k_r k_c k_s, \qquad \text{Equation 1}$$

avec :

ε_6 est la déformation à appliquer pour avoir une rupture du matériau par fatigue à 10^6 cycles.

b est la pente de la courbe de fatigue.

NE est le nombre équivalent d'essieux.

k_r est un coefficient de sécurité qui prend en compte le risque de variation d'épaisseur et de dispersion de valeurs d'essai de fatigue.

k_s est un coefficient qui rend compte du type de plateforme support.

k_c est un coefficient qui prend en compte les écarts entre les résultats d'essais laboratoire et in situ.

Pour les matériaux granulaires, la valeur de la déformation admissible est :

$$\varepsilon_{z,ad} = A(\mathrm{NE})^{-0{,}222} \qquad \text{Equation 2}$$

Où : A est égale à 0,012 pour un trafic moyen à lourd et 0,016 pour un plus faible trafic.

Le dimensionnement pour un type de chaussée donnée, consiste à définir les épaisseurs des couches de matériaux de façon à satisfaire l'égalité entre les déformations calculées et admissibles.

I.3. Généralités sur les enrobés bitumineux et des matériaux granulaires

I.3.1. Différents types d'enrobés bitumineux

Pour pouvoir réaliser ces différentes couches de chaussée, l'utilisation de granulats est primordiale. Les granulats constituent le squelette d'une chaussée, ils apportent une grande partie de la résistance de la couche de chaussée. Leur utilisation en voiries est tellement importante que la part des granulats destinée à la création de la chaussée représente plus de la moitié de la production totale de granulats. La qualité du granulat est donc primordiale pour la bonne tenue de la chaussée sous trafic.

Le deuxième élément entrant dans la composition de l'enrobé est le bitume. Le bitume est un liant issu du raffinage du pétrole qui permet le collage entre les granulats et confère au matériau sa cohésion, sa thermodépendance et son caractère hydrophobe lui permettant de résister à l'eau. La consistance et la rhéologie du bitume varie selon l'origine du brut, les conditions du raffinage ….

Comme le montre la Figure 2, les différents procédés d'enrobage bitumineux pouvant être utilisés dans ces couches de chaussée sont classés en fonction de leur température de fabrication en quatre familles : les enrobés à froid, les enrobés semi-tièdes, les enrobés tièdes et les enrobés à chaud [4]. La différence entre ces différentes classes provient du type de liant utilisé (émulsion, mousse, anhydre) et de la température des granulats utilisés pour l'étape de fabrication.

La communauté routière tend à promouvoir les techniques à froid et semi-tiède qui comme la Figure 2 le montre, ont l'avantage d'être beaucoup moins consommatrices d'énergie pour être fabriquées. Ces techniques apparaissent plus respectueuses de l'environnement que les solutions de référence à chaud car elles émettent moins de gaz à effet de serre (GES) lors de leur fabrication.

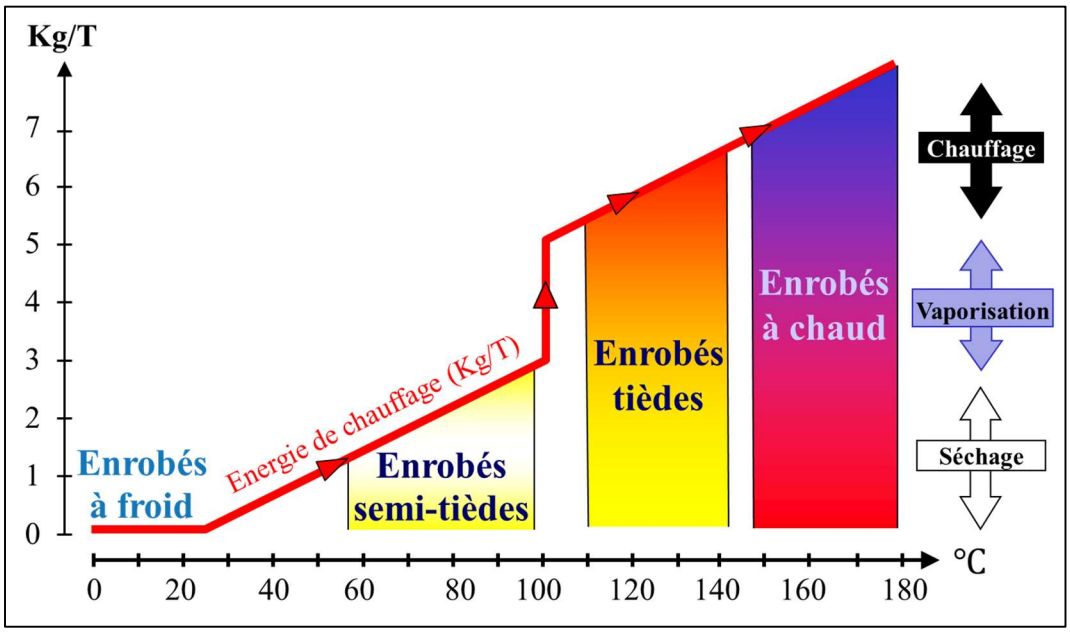


Figure 2 - Température de fabrication des enrobés en fonction de l'énergie de fabrication.

I.3.2. Composition des enrobés bitumineux

I.3.2.1. Matériau granulaire

Pour limiter le transport sur une longue distance (hors besoin très spécifique), les granulats utilisés en construction proviennent des lieux de production les plus proches du chantier. Ils sont obtenus par exploitation de gisements alluvionnaires ou de roches massives (calcaires ou éruptives). Or leur nature, leur forme et leurs caractéristiques sont définies en fonction de leurs lieux de production car souvent, ils ne proposent que des granulats ayant une même nature minéralogique. Chaque granulat a en effet une résistance, une tenue au gel et des propriétés physico-chimiques propres à sa nature pétrographique.

Pour chaque nature minéralogique, le lieu de production propose plusieurs classes granulaires [5] dont les dimensions du plus petit et du plus grand granulats sont désignés par d et D définie dans le Tableau 1. Les classes granulaires se nomment par exemple : 0/2, 0/4, 4/6, 6/10, 10/14…

Tableau 1 - Désignation des classes granulaires. [5]

Désignation des granulats	Classes granulaires (d/D)
Fillers	$D \leq 0{,}063$ mm
Sables	0/D où $D \leq 6{,}3$ mm
Graves	0/D où $D \geq 6{,}3$ mm
Gravillons	d/D où $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm ex : 2/4 ; 4/8 ; 6/8 ; 8/10 ; 10/14

Les caractéristiques intrinsèques au matériau sont définies par :

- Leur masse volumique réelle.
- Leur porosité.
- Leur sensibilité au gel.
- Leur résistance à la fragmentation par l'essai de Los Angeles [6].
- Leur résistance à l'usure par l'essai micro-Deval [7].
- Leur résistance au polissage par l'essai de polissage accéléré [8] ou par projection [9].

Certaines caractéristiques du matériau proviennent de leur fabrication et sont définies par :

- Leur granularité par l'analyse granulométrique par tamisage [10] pour les gravillons, graves et sables et par l'analyse granulométrique par sédimentation [11] pour les fillers. Ces essais permettent de définir la distribution dimensionnelle des grains.
- Leur forme par l'essai d'aplatissement [12] donnant une valeur de coefficient A. Plus le coefficient A est faible plus le granulat est cubique.
- Leur propreté définie par l'essai au bleu de méthylène [13]. Plus le coefficient VBF est faible, plus les fillers sont propres.

Suivant la nature minéralogique et les caractéristiques des granulats, ils ne pourront pas être utilisés dans n'importe quelle couche de chaussée. En effet, des granulats ayant un coefficient LA faible ne pourront pas être utilisés en tant que couche de fondation ou des granulats ayant un faible

coefficient CPA (ou RPA) ne pourront pas être utilisés en couche de roulement. Les caractéristiques intrinsèques des granulats ne sont pas à négliger lors du choix du matériau de chaque couche.

Le mélange des différentes classes granulaires et de fines ($< 63\ \mu m$) dont un exemple est présenté sur la Figure 3 tiré de la référence [14] permet d'obtenir le mélange granulaire désiré pour la formulation de l'enrobé. L'utilisation de ces différentes classes permet d'obtenir une compacité élevée et ainsi obtenir un pourcentage de vides entre 10 et 15 %. Une compacité élevée permet d'augmenter la résistance à la déformation de l'enrobé mais un léger pourcentage de vides permet également de drainer l'eau et de ne pas la laisser stagner en surface. Le squelette granulaire principal composant d'un enrobé bitumineux peut être composé soit d'un mélange granulaire soit de recyclés à 50 % pour les procédés anhydres et jusqu'à 100 % pour les procédés à froid (à la mousse ou à l'émulsion).

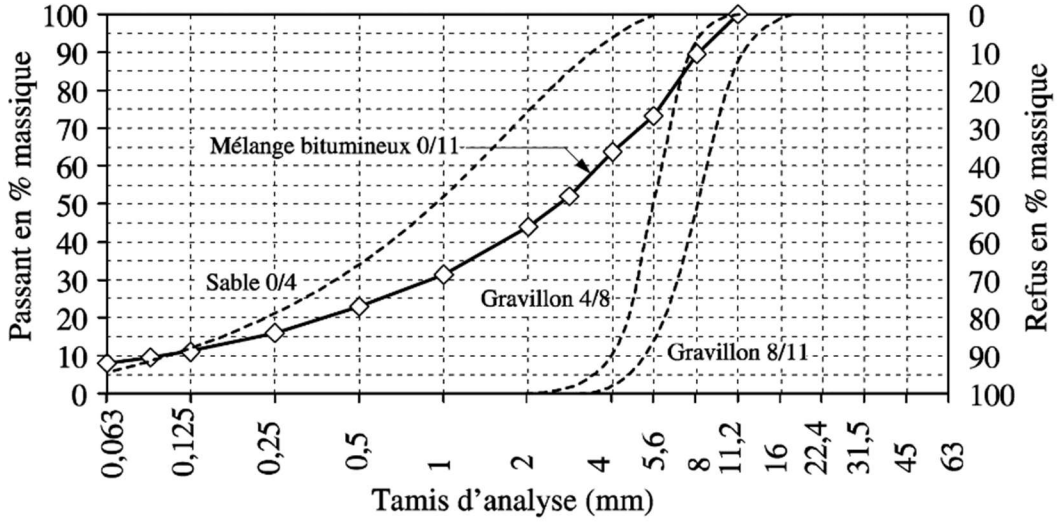


Figure 3 - Mélange granulaire composé de trois classes granulaires.

Lorsqu'une chaussée est trop endommagée, il arrive qu'elle soit entièrement remplacée, pour cela, les entreprises de travaux publics viennent retirer la couche d'enrobé dégradée. Pour des questions de respect de l'environnement, de stockage de ces agrégats et afin de valoriser les ressources naturelles de notre planète, la communauté routière souhaite depuis de nombreuses années réutiliser ces agrégats d'enrobé dans la conception de nouvelles chaussées. Ces agrégats d'enrobé sont concassés, tamisés puis séparés en différentes classes granulaires. De plus, ils sont caractérisés par :

- Leur teneur en liant.
- Les caractéristiques du bitume.
- Leur homogénéité granulométrique.
- Les caractéristiques intrinsèques des granulats.

Ces agrégats recyclés peuvent alors servir de squelette granulaire pour la composition de nouveaux enrobés plus respectueux de l'environnement car ils ont deux avantages principaux :

- La réutilisation de granulat.

- L'enrobage partiel des granulats permet de rajouter moins de liant bitumineux neuf lors de la fabrication du nouvel enrobé incorporant ce matériau recyclé.

I.3.2.2. Liant bitumineux

I.3.2.2.1. Constitution

Le bitume provient du raffinage des pétroles bruts. Il est obtenu par distillation, procédé qui permet d'évaporer les constituants volatils ne laissant dans la cuve que les éléments les plus lourds à savoir le bitume. Le bitume ainsi obtenu est très complexe que ce soit du point de vue de sa composition chimique ou bien de son comportement mécanique.

Le bitume est un hydrocarbure principalement composé de carbone (~80 %), d'hydrogène (~10 %), d'oxygène (~3 %) et quelques traces de soufre, d'azote et divers métaux. Il est composé de tellement de molécules qu'il est impossible de déterminer sa composition exacte mais il est néanmoins possible de regrouper les composants chimiques du bitume en quatre grandes familles « asphaltènes », « saturés », « aromatiques » et « résines », ces trois derniers composants constituent les « maltènes » (Figure 4).

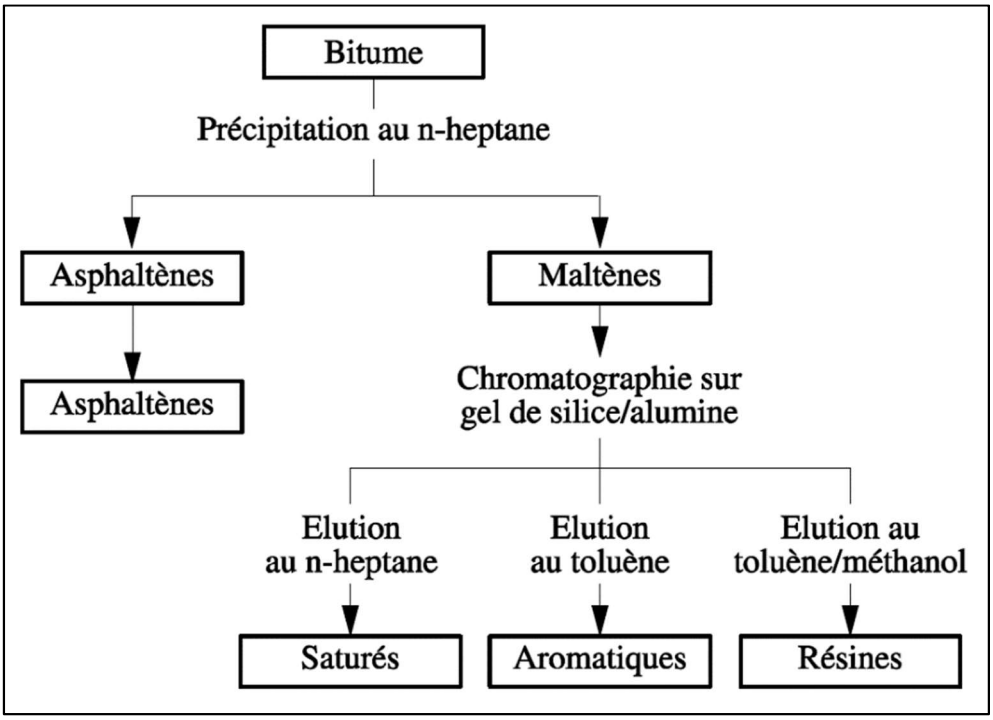


Figure 4 - Schéma de séparation chimique des constituants du bitume.

I.3.2.2.2. Comportement

Les propriétés rhéologiques du bitume dépendent en grande partie du taux d'« asphaltènes ». Plus grande est la teneur en asphaltènes dans le bitume, plus celui-ci sera dur et visqueux. Le bitume est également thermosensible, comme présenté sur la Figure 5 [14], plus on augmente sa température, plus sa viscosité diminue et plus son comportement tend vers celui d'un liquide newtonien ($\geq 80\ °C$) ce qui est un avantage lors de l'enrobage des granulats et du transport de

l'enrobé pour mise en œuvre. Si au contraire, sa température diminue, il devient de plus en plus élastique voire un solide fragile pour des températures négatives.

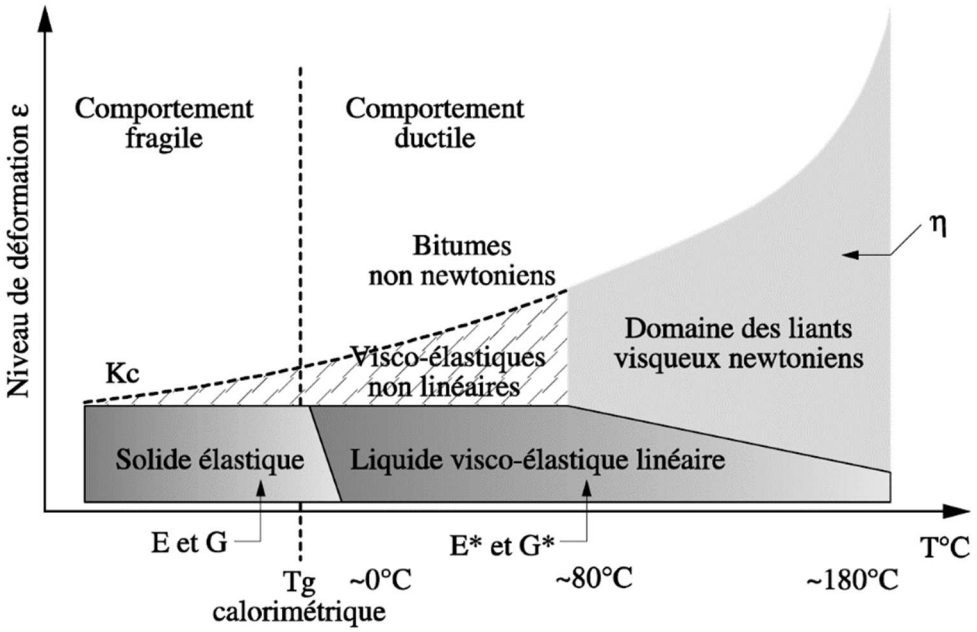


Figure 5 - Classes de comportement du bitume en fonction de |ε| et T [14].

Le bitume va subir tout au long de sa vie et particulièrement au jeune âge des changements physico-chimiques. Lors de la fabrication, du transport et de la mise en œuvre des enrobés élaborés avec des procédés anhydres, il subit un durcissement (Figure 6 d'après [15]) important induit par son chauffage à haute température (en générale entre 140 °C et 180 °C) et son oxydation due à sa surface en contact avec l'air. Il faut savoir que cette oxydation est d'autant plus importante que la température est élevée et que la surface en contact avec l'air est grande. Lors de cette oxydation, on constate une baisse du taux d'aromatiques et une augmentation de la teneur en asphaltènes.

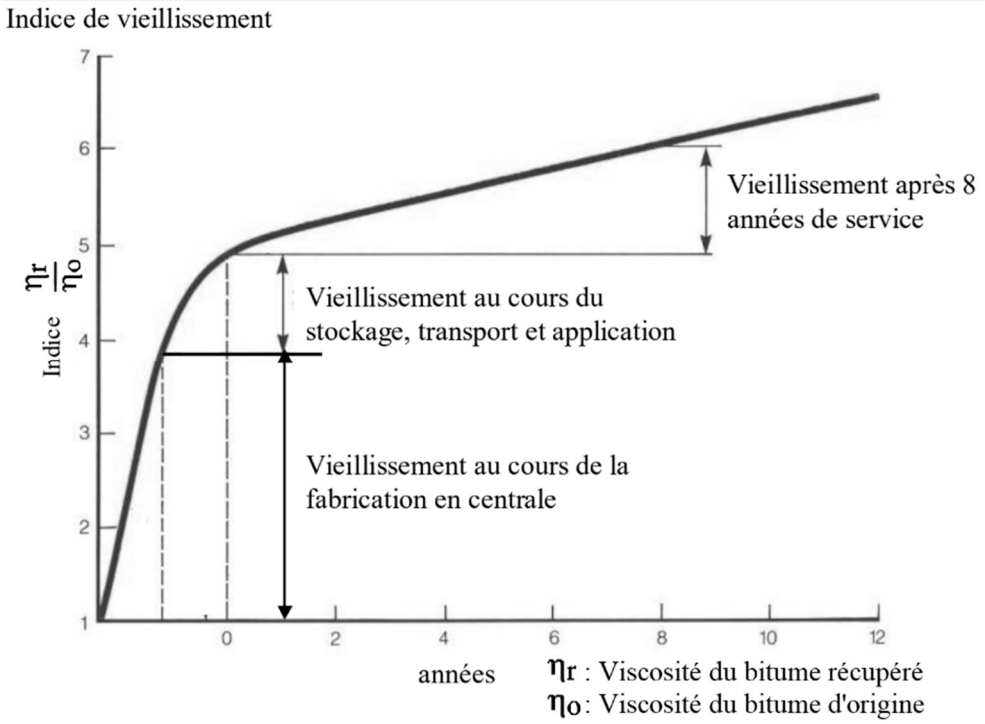


Figure 6 - Vieillissement de l'enrobé bitumineux au cours du temps [15].

I.3.2.2.3. Liants routiers

Le choix du liant est gouverné par l'obtention d'une viscosité d'enrobage et de performances du produit final. Différents grades de bitume sont utilisés en technique routière selon le produit visé et le procédé d'enrobage. Pour les procédés à chaud et tiède, des bitumes de plus fortes consistances sont employés (20/30 au 50/70). Pour les produits à plus faibles trafic, incorporant un fort taux de recyclés ou à froid à l'émulsion, des grades (50/70 à 160/220) sont préférés. Par ailleurs la modification du bitume par des polymères est utile pour accroitre les propriétés des mélanges utilisés en couche de roulement et fortement sollicités (fort trafic, sollicitations importantes…). En mélangeant mécaniquement le bitume chaud avec de l'eau, il est possible de former une émulsion directe huile dans eau. Pour stabiliser la dispersion des gouttes de bitume dans l'eau, un émulsifiant (le plus souvent cationique en France [16]) est utilisé et ajouté à la phase aqueuse acidifiée.

I.3.2.2.4. Essais de caractérisation

La consistance du bitume est généralement de 20 °C à 60 °C et s'obtient au moyen de l'essai de pénétration à l'aiguille et de la méthode bille anneau. La référence [17] permet de caractériser la consistance du bitume à 25 °C. Pour cela, on mesure l'épaisseur d'enfoncement d'une aiguille sous une charge de 100 grammes dans le bitume. La méthode température bille anneau (TBA) définit par la norme [18] permet de déterminer la température de ramollissement à laquelle une bille d'acier entourée d'un film de bitume plongé dans l'eau atteint le fond du support. Cette hauteur de descente est de 25 mm. Pour cela, il faut augmenter la température de l'eau de 5 °C toutes les minutes et chronométrer le temps nécessaire pour que la bille touche le fond.

I.3.3. Comportement mécanique des enrobés bitumineux

I.3.3.1. Comportement in situ des mélanges bitumineux

L'enrobé bitumineux est un matériau dont le comportement varie en fonction de la vitesse et du temps de chargement et de la température.

Le diagramme de la Figure 7 regroupe les différents comportements des enrobés bitumineux en fonction de l'amplitude de déformation ($|\varepsilon|$) et du nombre de cycles de chargement appliqué (N) à l'enrobé [19] :

- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations « faibles » ($< 10^{-4}$) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.
- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, le comportement observé est fortement non linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations de l'ordre de 80 à 150 µm/m, un phénomène de fissuration se développe et endommage le matériau, c'est le phénomène de « fatigue ».

La Figure 7 tirée de la référence [19] a été développée à partir d'ordre de grandeur des différents domaines de comportements types pour une température fixée qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation (compression, cisaillement, ...).

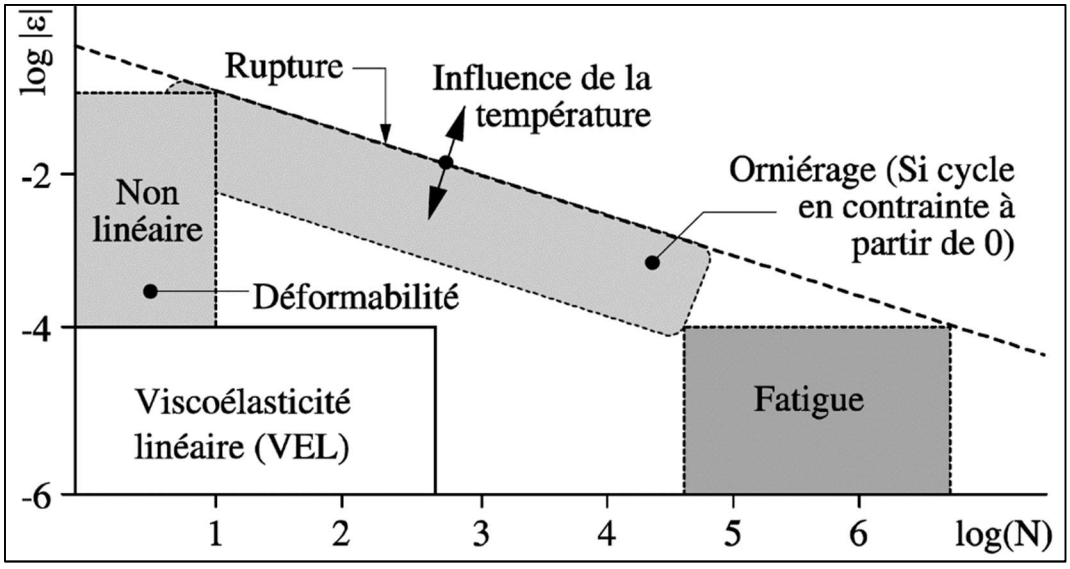


Figure 7 - Comportements "types" des enrobés bitumineux à température fixée [19].

Le comportement réversible aux faibles déformations et à la fatigue des enrobés à chaud est connu. Malheureusement, ce n'est pas le cas des enrobés à l'émulsion de bitume.

I.3.3.2. Modélisation du comportement viscoélastique linéaire

Cette partie va permettre de décrire les lois de comportement réversibles existantes qui servent à traduire le comportement in situ des enrobés à chaud.

I.3.3.2.1. Modèle de Maxwell et Kelvin-Voigt généralisés

Les modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt, sont composés d'un ressort et d'un amortisseur linéaire disposés respectivement en série et en parallèle comme le montre la Figure 8. Ces modèles à eux seuls ne permettent pas de décrire le comportement des enrobés bitumineux c'est pourquoi il faut les généraliser à une infinité d'éléments.

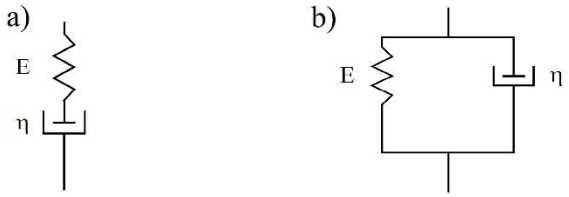


Figure 8- Représentation des modèles de Maxwell a) et Kelvin-Voigt b).

Lorsque l'on ajoute un nombre fini d'élément n viscoélastique linéaire (Figure 9 et Figure 10), les modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt généralisés permettent de reproduire n'importe quelle fonction de relaxation ou de fluage.

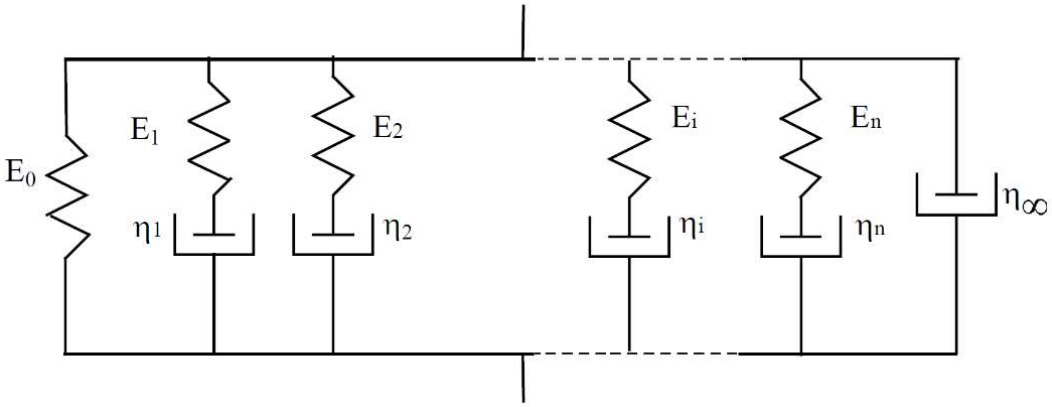


Figure 9 - modèle de Maxwell généralisé (spectre de relaxation).

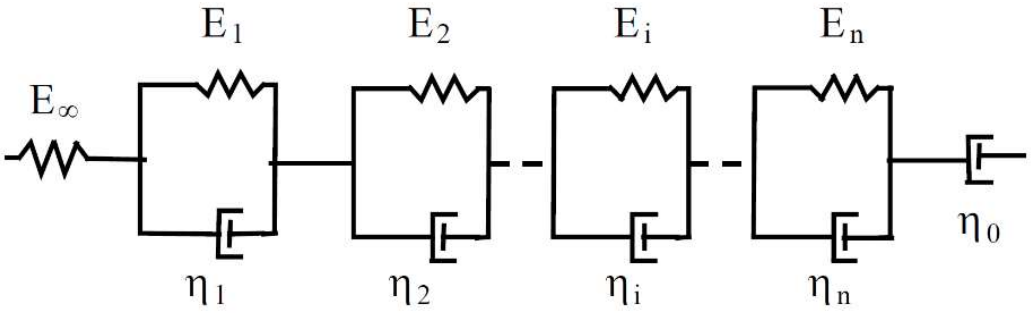


Figure 10 - Modèle de Kelvin-Voigt généralisé (spectre de fluage).

I.3.3.2.2. Amortisseur parabolique

La description de l'amortisseur parabolique est très importante car il sera largement utilisé pour le développement de la loi de comportement pour enrobé à l'émulsion. Il est d'ailleurs déjà utilisé dans le modèle de Huet [20] et de Huet-Sayegh [21] décrit juste après pour décrire le comportement visqueux des enrobés. L'amortisseur parabolique (Figure 11) a été développé pour

rendre compte d'un spectre d'éléments infinis. En effet, ce spectre peut être représenté par une infinité d'élément Maxwell ou bien Kelvin-Voigt.

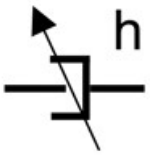


Figure 11 - Représentation de l'amortisseur parabolique.

La fonction de fluage $F(t)$ et le module complexe $E^*(\omega)$ de l'amortisseur parabolique s'écrivent sous la forme :

$$F(t) = \frac{1}{E}\left(\frac{t}{a(\theta)}\right)^h \qquad \text{Equation 3}$$

$$E^*(\omega) = \frac{E(i\omega a(\theta))^h}{\Gamma(h+1)} \qquad \text{Equation 4}$$

Avec : E est le module du modèle quand $\omega a(\theta) \to \infty$.

i est un nombre complexe.

ω est la pulsation.

h est un exposant entre 0 et 1.

Γ est la fonction gamma d'Euler.

I.3.3.2.3. Modèle de Huet

Le modèle de Huet [20] est représenté par un « ressort » et deux « amortisseurs paraboliques » h et k placés en série comme représenté sur la Figure 12. La fonction de fluage $F_H(t)$ et le module complexe $E_H^*(\omega)$ du modèle de Huet s'écrivent sous la forme :

$$F_H(t) = \frac{1}{E_\infty}\left(1 + \frac{\delta}{\Gamma(k+1)}\left(\frac{t}{a(\theta)}\right)^k + \frac{1}{\Gamma(h+1)}\left(\frac{t}{a(\theta)}\right)^h\right) \qquad \text{Equation 5}$$

$$E_H^*(\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega a(\theta))^{-k} + (i\omega a(\theta))^{-h}} \qquad \text{Equation 6}$$

Avec : E_∞ est le module du modèle quand ωa(θ)→∞.

i est le nombre complexe ($i^2 = -1$).

ω est la pulsation.

δ est un paramètre de l'amortisseur k.

k est un paramètre de l'amortisseur k. il est représentatif des enrobés ayant de fortes valeurs de module ou bien testé à de faible température.

h est un paramètre de l'amortisseur h. Il est représentatif des enrobés ayant de faibles valeurs de module ou bien testé à haute température, $(0 < k < h < 1)$.

Γ est la fonction gamma d'Euler.

a(θ) qui a la dimension d'un temps caractéristique, rend compte du principe d'équivalence temps température. Elle rend compte du fait que la viscosité des enrobés bitumineux dépend de la température θ et peut être représentée par exemple par la loi Williams-Landel-Ferry (Ferry, 1980).

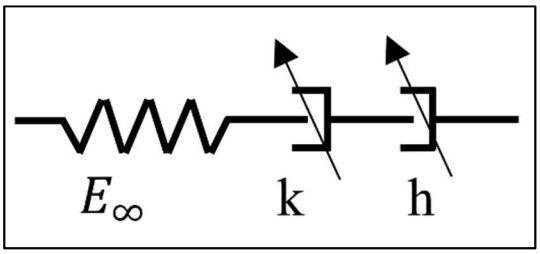


Figure 12 - Représentation du modèle de Huet.

Ce modèle est simple d'utilisation car il n'a que cinq paramètres à caler. À partir des campagnes de mesures de modules complexes à différentes fréquences et température, son calage commence par la détermination de la courbe maitresse du matériau établi par décalage des isothermes à partir du calcul de la valeur a(θ). L'obtention de la courbe maitresse sera expliquée ultérieurement avec la présentation de la Figure 19. Il est possible ensuite d'en déduire le plan de Cole-Cole et l'espace de Black. Une approximation du paramètre a(θ) pour une température θ qui est donnée de la forme : $a(\theta) = e^{(A_0+A_1\theta+A_2\theta^2)}$. Le calage de ces paramètres se fait en superposant la courbe théorique et la courbe expérimentale dans le plan de Cole-Cole (E_2 vs E_1) et dans l'espace de Black (angle de phase vs $|E^*|$).

Une fois créé, le plan Cole-Cole permet de visualiser le comportement d'un enrobé bitumineux. C'est pourquoi on l'utilise pour caler les paramètres des modèles en trouvant les valeurs des paramètres permettant de superposer les courbes : théorique et expérimentale.

La représentation de l'espace de Black consiste à tracer l'angle de phase en fonction du logarithme de la norme du module complexe |E*|. Tout comme le plan de Cole-Cole, l'espace de Black permet de visualiser le comportement de l'enrobé bitumineux en mettant l'accent sur les valeurs de faibles modules.

Un exemple tiré de la référence [19] permet de visualiser la représentation du modèle de Huet dans plan de Cole-Cole (Figure 13) et dans l'espace de Black (Figure 14) paramétré avec les valeurs se trouvant dans le Tableau 2 et le

Tableau 3.

Tableau 2 - Exemple de paramètres du modèle de Huet pour représentation du plan Cole-Cole d'après [19].

E_∞ (MPa)	δ	k	h
$3{,}31.10^4$	1,88	0,193	0,546

La représentation du plan de Cole-Cole consiste à mettre en abscisse la partie réelle du module complexe E1 et en ordonnée la partie imaginaire E2.

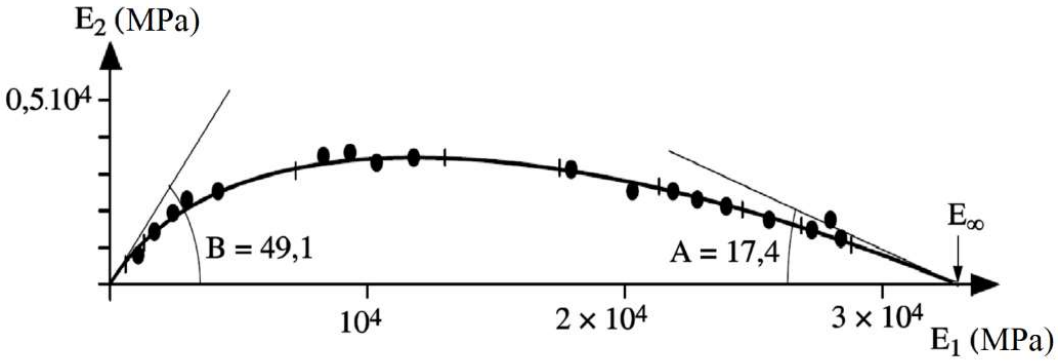


Figure 13 - Détermination graphique des paramètres du modèle de Huet dans le plan Cole-Cole [19].

Tableau 3 - Exemple de paramètres du modèle de Huet pour représentation de l'espace de Black [19].

E_∞ (MPa)	δ	k	h	$a(\theta) = e^{(A_0+A_1\theta+A_2\theta^2)}$		
				A_0	A_1	A_2
$3{,}5.10^4$	2,9	0,215	0,75	-0,342	-0,4007	0,00295

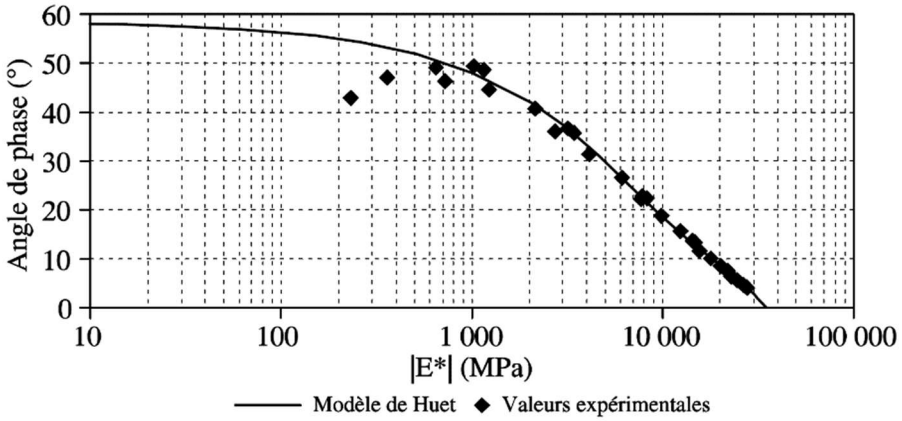


Figure 14 - Modélisation du module complexe dans l'espace de Black en utilisant le modèle de Huet [19].

Le modèle de Huet permet de bien reproduire le plan Cole-Cole mais il n'est pas suffisamment précis pour représenter le comportement de l'enrobé bitumineux à basse fréquence et/ou haute température (à module faible) comme le montre l'espace de Black. C'est pourquoi Sayegh a modifié le modèle de Huet.

I.3.3.2.4. Modèle de Huet-Sayegh

Afin que les valeurs de faibles modules puissent être prises en compte par ce modèle, Sayegh [21] rajouta un ressort E_0 en parallèle au modèle de Huet comme présenté sur la Figure 15. Ce nouveau ressort est considéré avoir une rigidité très faible par rapport au ressort E_∞ du modèle de Huet. Le module complexe du modèle de Huet-Sayegh s'écrit alors sous la forme :

$$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega a(\theta))^{-k} + (i\omega a(\theta))^{-h}} \qquad \text{Equation 7}$$

Avec : Les paramètres restent les mêmes que précédemment et E_0 est le module statique du modèle quand ω a(θ)→0.

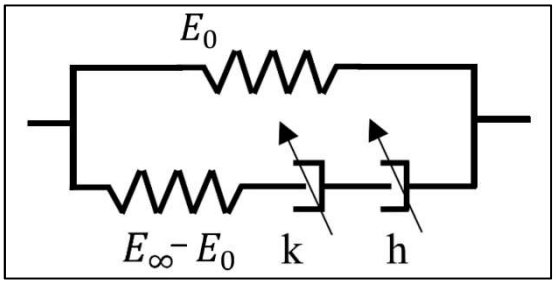


Figure 15 - Représentation du modèle de Huet-Sayegh.

Afin de reproduire le comportement expérimental, il faut caler les 6 paramètres du modèle en utilisant le plan Cole-Cole comme le montre la Figure 16.

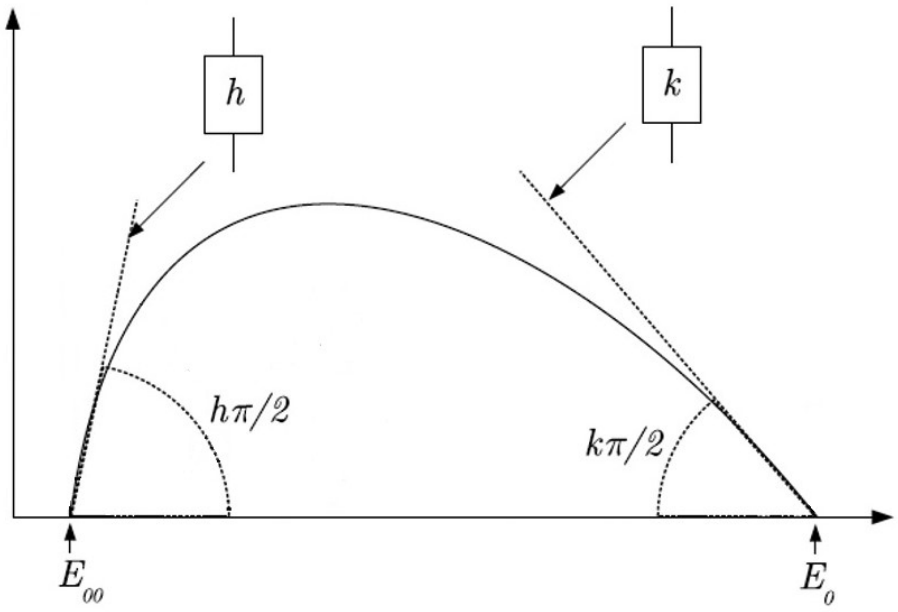


Figure 16 - Calage des paramètres du modèle Huet-Sayegh.

Le modèle de Huet-Sayegh permet de correctement décrire le comportement des enrobés bitumineux traités aux liants purs sur toute la gamme de fréquence et de température en particulier pour les faibles valeurs de module comme nous le montre la représentation de l'espace de Black Figure 17 utilisant les données du Tableau 4 tiré de la référence [19].

Tableau 4 - Exemple de paramètres du modèle de Huet-Sayegh pour représentation de l'espace de Black d'après [19].

E_∞ (MPa)	E_0 (MPa)	δ	k	h	$a(\theta) = e^{(A_0+A_1\theta+A_2\theta^2)}$		
					A_0	A_1	A_2
$2{,}5.10^4$	45	2,9	0,22	0,70	2,6897	-0,3897	0,00202

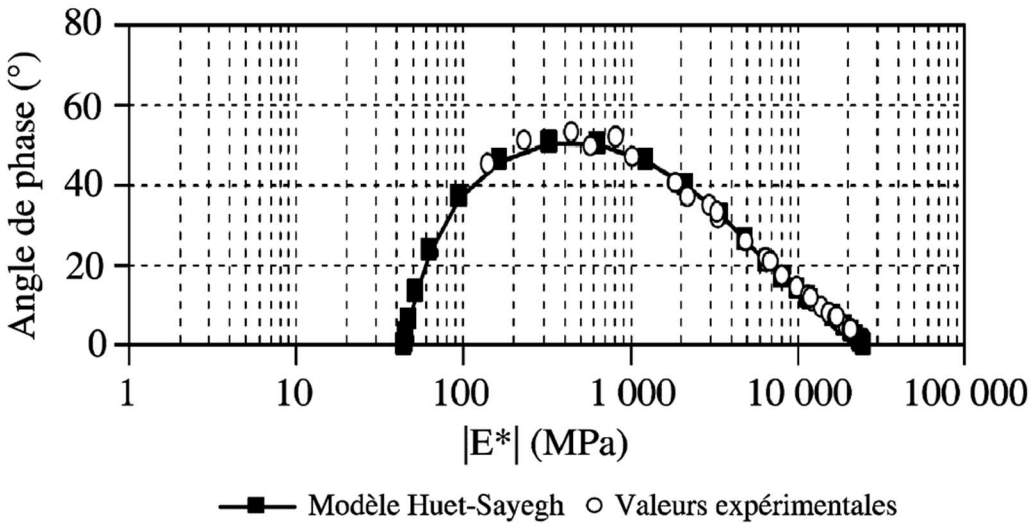


Figure 17 - Modélisation du module complexe dans l'espace de Black en utilisant le modèle de Huet-Sayegh [19].

I.3.4. Méthode de formulation des enrobés à chaud

La méthode de formulation a pour but de définir les dosages des différents constituants de l'enrobé pour que ce nouveau mélange puisse satisfaire les critères de performances qui peuvent être mesurés par des essais normalisés. Quatre niveaux d'épreuve de formulation sont réalisés et présentés dans le Tableau 5 issu de la référence [22].

Tableau 5 - Epreuves de formulation cas général [22].

	Vérification d'une formule déjà étudiée et appliquée	Adaptation d'une formule	Nouvelle formule
Niveau 1	Essai PCG Essai Duriez	Essai PCG Essai Duriez	Essai PCG Essai Duriez
Niveau 2	-	Essai d'orniérage	Essai d'orniérage
Niveau 3	-	-	Essais de caractérisation des performances mécaniques : Module complexe
Niveau 4	-	-	Essai de caractérisation des performances mécaniques : Essai de fatigue

I.3.4.1. Compactage

Une fois le matériau fabriqué, il doit être compacté afin d'avoir environ 6% de vides pour les enrobés à chaud et environ 15% de vides pour les enrobés à froid. Ce pourcentage de vides varie en fonction de la formule d'enrobé utilisée. Il existe plusieurs types de compactage : la Presse à Cisaillement Giratoire [23], La méthode Duriez [24] et le compacteur à plaque. Le compactage

Duriez consiste à remplir de matériau un moule de diamètre 80 mm ou 120 mm puis de le compacter sous une pression statique de 12 MPa. La hauteur du matériau à compacter est définie en fonction de la masse volumique réelle de l'enrobé et du pourcentage de vide visé.

I.3.4.2. Comportement mécanique des mélanges routiers

Le liant bitumineux confère à l'enrobé des propriétés mécaniques qui dépendent de la température et de la vitesse de déformation. Dans la littérature française, le module de rigidité des enrobés est défini pour 15 °C et 10 Hz [25]. Dans les parties suivantes, seront présentés les essais permettant de caractériser le comportement de l'enrobé.

I.3.4.2.1. Essai de module complexe en flexion 2 points

La référence [25] permet de décrire l'essai de module complexe. Les éprouvettes testées sont extraites des plaques précédemment décrites et sont découpées en forme trapézoïdale. Elles sont ensuite fixées sur une base puis placées dans une machine thermorégulée afin de tester les échantillons à 6 températures en moyenne comprises entre -10 et 40 °C (Figure 18 et Figure 19). La partie haute de l'échantillon est fixée sur la machine qui lui impose une déformation pour 4 niveaux de fréquence (1, 3, 10 et 30 Hz).

La mesure de contrainte lors de la sollicitation en déformation permet de définir le module de l'enrobé aux différents couples fréquences/températures comme le présente la Figure 18.

La relation d'équivalence temps-température permet de représenter ces isothermes sous la forme d'une seule et même courbe notée « courbe maîtresse » comme présentée Figure 19 pour une température de référence de 10°C. Elle est construite par translation des isothermes parallèlement à l'axe des fréquences de la valeur $a(\theta)$. Grace à cette représentation, il est possible de caractériser le comportement du matériau pour des valeurs de fréquence impossibles à reproduire expérimentalement.

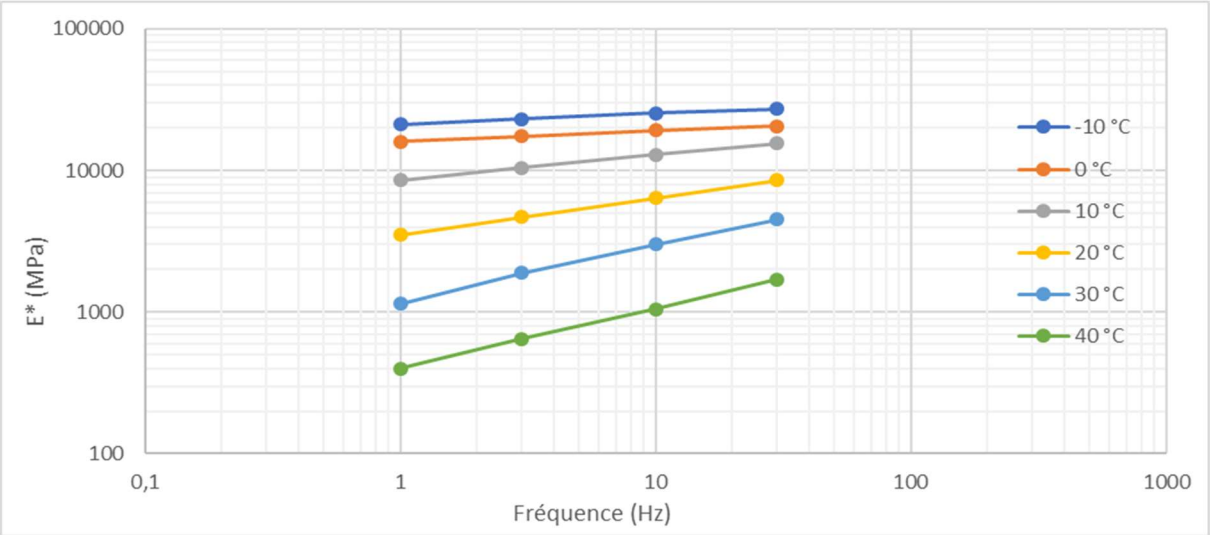


Figure 18 - Isothermes du module complexe d'un enrobé.

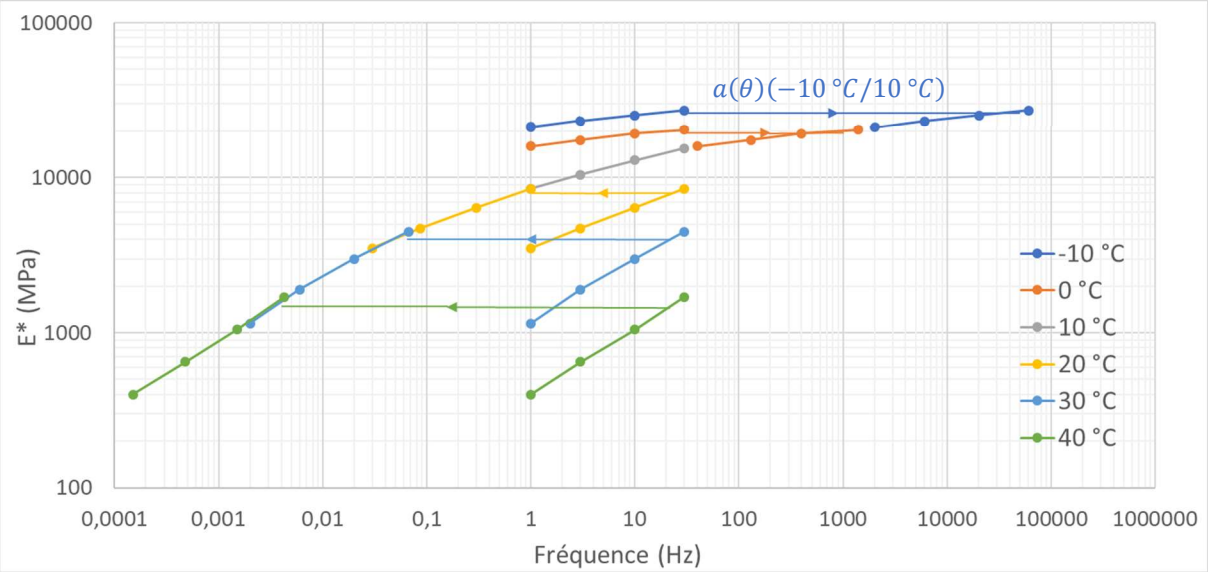


Figure 19 - Construction de la courbe maîtresse à 10°C à partir des résultats d'essai de module.

I.3.4.2.2. Essai de traction direct (norme NF EN 12697-26 [25])

La même norme décrit l'essai de traction direct. Les échantillons carottés dans les plaques d'enrobés doivent avoir un diamètre compris entre 50 et 160 mm et d'élancement 2 ou 3. Les échantillons sont collés de part et d'autre à des plaques parfaitement parallèles puis placées dans une machine de traction thermorégulée (Figure 20). L'essai consiste à mettre en traction l'éprouvette en imposant une contrainte sinusoïdale positive puis de mesurer l'augmentation de hauteur dans l'échantillon (Figure 21). Cet essai est réalisé à plusieurs températures comprises entre -20 et 50 °C.

Figure 20 - Essai de traction direct.

Figure 21 - Dispositif de mesure de l'augmentation de hauteur de l'échantillon.

I.3.4.2.3. Essai de traction indirect (Nat) (norme NF EN 12697-26 [25])

Cet essai appelé également essai de compression diamétrale, utilise des échantillons cylindriques d'élancement faible (extraite de plaque ou carotté sur chantier) soumis à une force de compression

sur leurs tranches (Figure 22 et Figure 23). Leur module est calculé grâce à la force imposée et à la mesure de l'augmentation du diamètre (mesure prise perpendiculairement à la force appliquée).

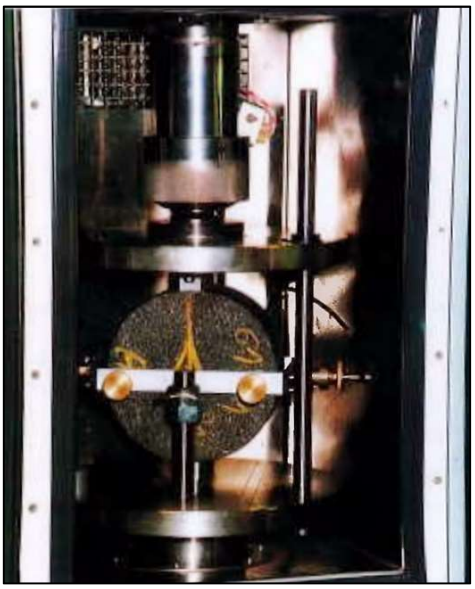


Figure 22 - Essai de compression diamétrale.

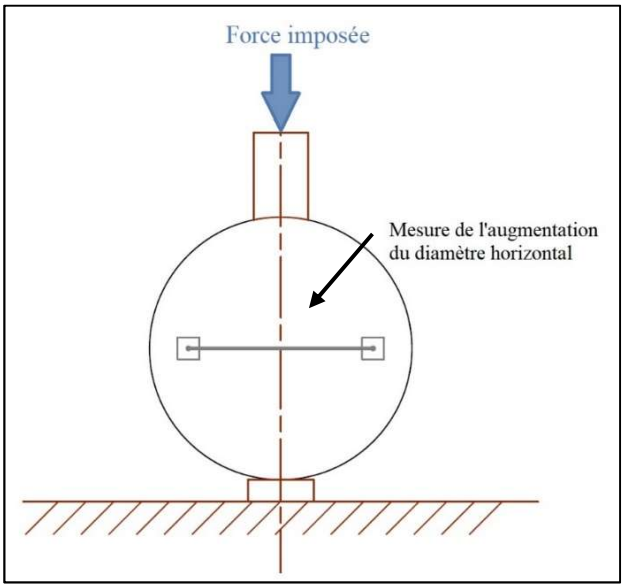


Figure 23 - Schéma de l'essai de compression diamétrale.

I.3.4.2.4. Essai de fatigue (norme NF EN 12697-24 [26])

Le dispositif de l'essai de fatigue est le même que l'essai de module en flexion 2 points. La partie haute de l'éprouvette trapézoïdale est sollicitée en flexion sinusoïdale (25 Hz) à trois niveaux d'amplitude de déformation. L'essai est alors réalisé à la température de 10 °C durant lequel on mesure l'effort résistant et la déformation en tête d'éprouvette. Les cycles endommagent l'éprouvette et continuent jusqu'à ce que l'effort mesuré diminue de moitié ce qui correspond à la ruine de l'éprouvette. Il est alors possible de tracer la courbe de fatigue à savoir la diminution de la déformation en fonction du nombre de cycle (Figure 24). La Figure 25 montre un exemple de résultats tiré d'un essai de fatigue. En traçant la droite de fatigue, il est possible de déterminer les coefficients b et ε_6 utiles pour le dimensionnement de la chaussée (Vu chapitre I, partie 2.2).

Figure 24 - Essai de fatigue.

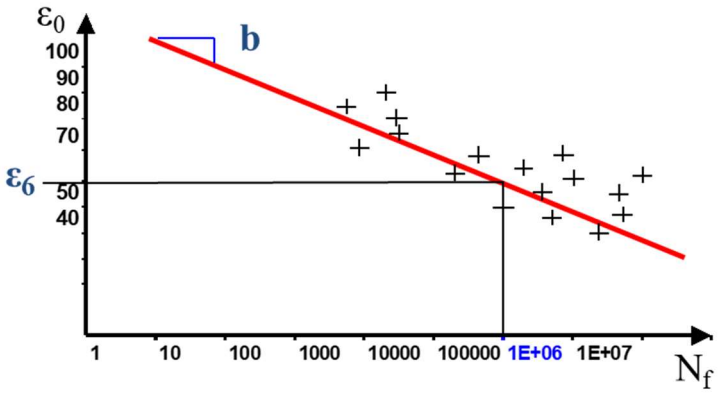


Figure 25 - Représentation typique d'un essai de fatigue.

De par l'utilisation d'éprouvette préalablement sciées à des dimensions spécifiques, les essais de module complexe, de traction indirecte et de fatigue nécessitent un matériau cohésif pouvant être scié. C'est pourquoi ces essais ne peuvent être utilisés sur des matériaux peu ou non cohésif comme les enrobés à l'émulsion à l'état frais et au jeune âge. Pour trouver un essai pouvant être utilisé sur les graves émulsion, il faut plutôt s'inspirer des essais utilisés pour les matériaux granulaires.

I.3.5. Comportement mécanique des matériaux non liés

I.3.5.1. Comportement élastique non linaire

Les matériaux granulaires les plus utilisés en chaussée en tant que couche de fondation ou couche de forme sont les graves non traités, sont composées de gravillons, de graves et de sables, compactées et non liées. L'absence de liant implique qu'il n'existe aucune adhésion entre les grains d'un matériau granulaire, ce matériau non cohésif ne peut travailler qu'en compression. Selon Davalle [27], lorsqu'on sollicite ce matériau en compression il peut y avoir trois mécanismes de déformation :

- La compressibilité et le réarrangement des grains.
- Le glissement et la rotation des grains.
- La rupture par écrasement des grains.

Lors du compactage, plus le matériau est compacté, plus il y a de réarrangements granulaires et moins les grains auront de possibilité de mouvement les uns par rapport aux autres, ce qui donne à ce matériau son comportement rigidifiant. Le comportement de ce matériau est donc dépendant de la force appliquée mais pas à la fréquence de sollicitation.

Dans le domaine des petites déformations, le comportement des matériaux non liés peut être considéré comme réversible et correspondant à une loi de comportement de type élastique non linéaire (ENL). L'une des lois de comportement ENL les plus utilisées est celle de Boyce (voir chapitre III, paragraphe 2).

I.3.5.2. Rappels sur les invariants

En mécanique, les tenseurs de contrainte et de déformation servent à exprimer les états de contrainte et de déformation d'un milieu continu et les relations entre eux. En 3D, un tenseur de contrainte se définit sous la forme suivante :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \text{ où } \sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

Quelle que soit l'orientation des axes, il est possible de déterminer des invariants tel que p et q :

où p est la pression moyenne telle que :

$$p = \frac{-(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{3} = \frac{-tr(\bar{\bar{\sigma}})}{3} \qquad \text{Equation 8}$$

Un signe négatif a été rajouté afin d'avoir une pression positive en compression isotrope.

où q est le déviateur de contrainte définit par :

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}\, tr(\bar{\bar{s}}^2)} \qquad \text{Equation 9}$$

où s est le déviateur de $\bar{\bar{\sigma}}$, définit par :

$$\bar{\bar{s}} = \bar{\bar{\sigma}} + p\bar{\bar{I}} \qquad \text{Equation 10}$$

De la même façon, pour le tenseur de déformation, on définit la déformation volumique :

$$\varepsilon_v = tr(\bar{\bar{\varepsilon}}) = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \qquad \text{Equation 11}$$

Et ε_q est le déviateur de déformation définit par :

$$\varepsilon_q = \sqrt{\frac{2}{3} tr(e^2)} \qquad \text{Equation 12}$$

où e est le déviateur de $\bar{\bar{\varepsilon}}$, définit par :

$$\bar{\bar{e}} = \bar{\bar{\varepsilon}} - \frac{\varepsilon_v\, \bar{\bar{I}}}{3} \qquad \text{Equation 13}$$

I.3.5.3. Modèle de représentation : Boyce

La loi de Boyce [28] est particulièrement utilisée pour traduire le comportement des matériaux granulaires non liés. Il résulte d'une généralisation non-linéaire de la loi de Hooke, basée sur une dépendance du module de compressibilité K_B et du module de cisaillement G_B en fonction des contraintes. Il est de plus relativement simple car il n'a que 3 paramètres à caler pour retrouver le comportement du matériau lors des essais triaxiaux. En utilisant la convention de signe et les notations usuelles de la mécanique, le modèle s'écrit sous la forme :

$$\varepsilon_v = -\frac{p}{K_B} \qquad \text{Equation 14}$$

$$\varepsilon_q = \frac{q}{3\, G_B} \qquad \text{Equation 15}$$

$$\text{avec : } K_B = K_a \frac{\left(\frac{p}{Pa}\right)^{1-n}}{1-\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2} \qquad \text{Equation 16}$$

$$\text{et : } G_B = G_a \left(\frac{p}{Pa}\right)^{1-n} \qquad \text{Equation 17}$$

Avec : p est la pression moyenne (> 0 en compression).

q est la contrainte déviatorique.

ε_v est la déformation volumique (< 0 en contraction).

ε_q est la déformation déviatorique.

P_a, K_a, G_a sont des paramètres positifs de dimension égale à celle d'une pression ou d'un module d'élasticité.

χ est un coefficient positif et sans dimension.

n est un exposant compris entre 0 et 1.

Le modèle de Boyce ne fonctionne que pour des valeurs de $p > 0$, celui-ci rend compte du comportement unilatéral rigidifiant des matériaux granulaires non liés en compression.

I.3.5.4. Essais de caractérisations

I.3.5.4.1. Essai œdométrique sur sol (Norme XP P94-090-1 [29])

L'essai œdométrique permet de mesurer le tassement au cours du temps d'une éprouvette cylindrique de sol d'élancement 0,5. Pour cela, on place une éprouvette saturée en eau entre deux pierres poreuses sur un bâti puis on mesure le déplacement vertical de l'éprouvette lors de l'application de différentes charges (Figure 26).

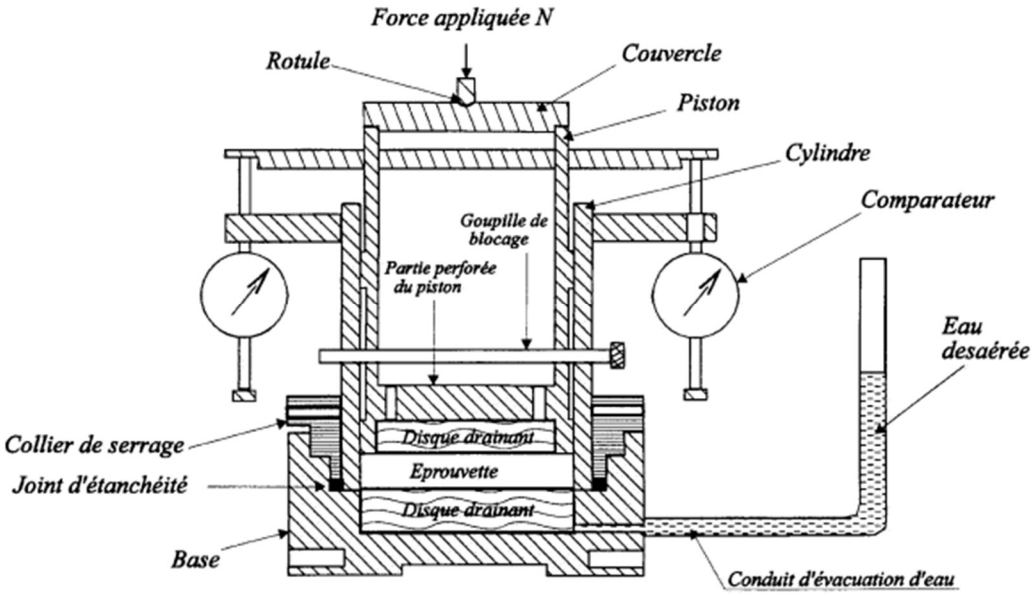


Figure 26 - Appareillage de l'essai œdométrique issu de la norme [29].

Cet essai permet d'obtenir la courbe de consolidation (Figure 27) qui donne le tassement de l'échantillon en fonction du temps et la courbe de compressibilité (Figure 28) qui donne le tassement de l'échantillon (la teneur en vides) en fonction de la charge appliquée. Sur la Figure 28, la courbe se divise en plusieurs parties :

- La première partie de courbe montre le premier chargement.
- La courbe AB montre le déchargement partiel.
- La courbe AN montre le deuxième chargement.
- La dernière courbe montre le déchargement total.

où C correspond à la frontière entre la consolidation du sol et la surconsolidation, il permet d'obtenir la contrainte σ'_p qui est la pression de consolidation du sol.

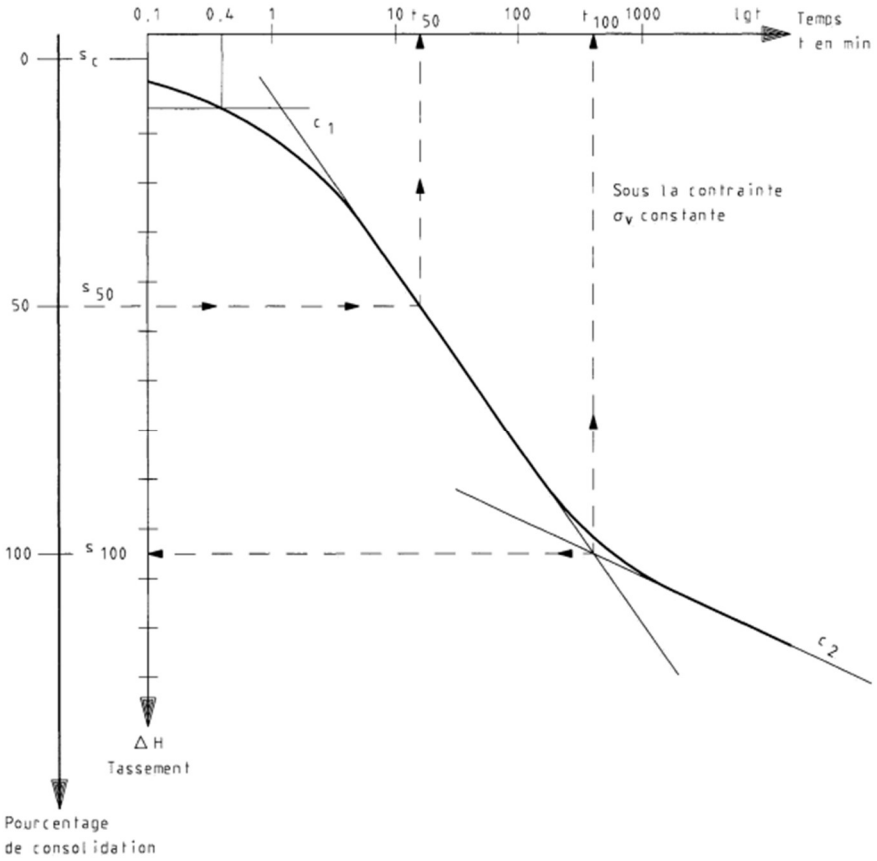


Figure 27 - Courbe de consolidation issue de la norme [29].

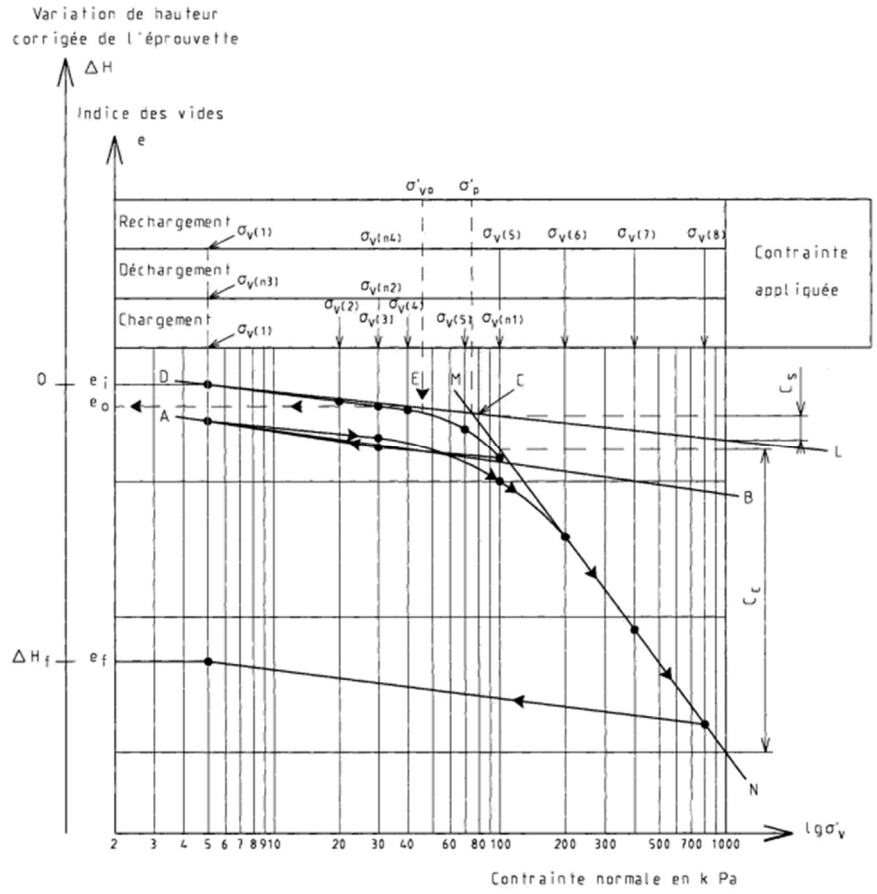


Figure 28 - Courbe de compressibilité issue de la norme [29].

I.3.5.4.2. Essai triaxial (norme NF P94-074 [30])

L'essai triaxial à chargement cyclique permet de reproduire les conditions de chargement des matériaux granulaires dans les chaussées. Il est couramment utilisé pour caractériser les performances mécaniques des matériaux granulaires. La préparation de l'échantillon consiste à fixer une membrane cylindrique de diamètre 160 mm sur une embase, puis de la remplir de matériau granulaire. L'échantillon est alors compacté en une seule couche par vibrocompression jusqu'à ce qu'il ait 320 mm de haut. L'échantillon est alors enfermé par une embase supérieure afin qu'elle soit parfaitement étanche. On place ensuite l'échantillon conditionné dans une cuve placée sur la presse comme le montre la Figure 29. La cuve est ensuite remplie d'eau puis mise sous pression d'au moins 10 kPa pour que l'échantillon ait un confinement latéral. On vient ensuite appliquer une contrainte verticale sinusoïdale. Les déformations axiales et radiales de l'éprouvette sont mesurées à l'aide de capteurs de déplacement. Il est possible d'enregistrer l'évolution de la déformation du matériau suivant le nombre de cycle sur la Figure.30. Sur cette figure, on peut voir la diminution de la déformation jusqu'à stabilisation. La forme des cycles de chargement est très fermée typique d'un comportement de matériau granulaire non lié.

Figure 29 - Essai triaxial.

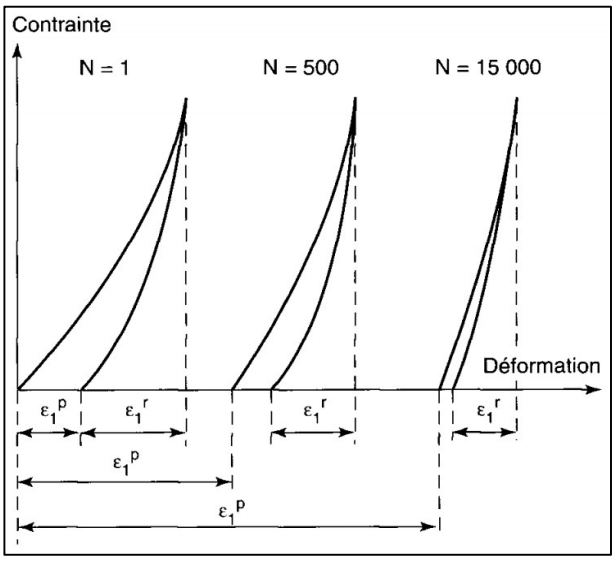


Figure.30 - Evolution des cycles de chargement.

Cet essai est utilisé pour caler les trois paramètres du modèle élastique non linéaire de Boyce, pour cela nous utilisons les résultats de déformations sous différentes contraintes, il suffit alors de trouver le bon jeu de valeurs permettant de retrouver les valeurs de déformation expérimentales avec le modèle de Boyce. Les Figure 31 montrent un exemple de résultats extrait d'essais triaxiaux après stabilisation des cycles de chargement sur lequel est ajouté les résultats théoriques du modèle de Boyce. Les points expérimentaux présentés sur ces figures permettent de visualiser le comportement réversible des matériaux granulaires mais également leurs comportements rigidifiant.

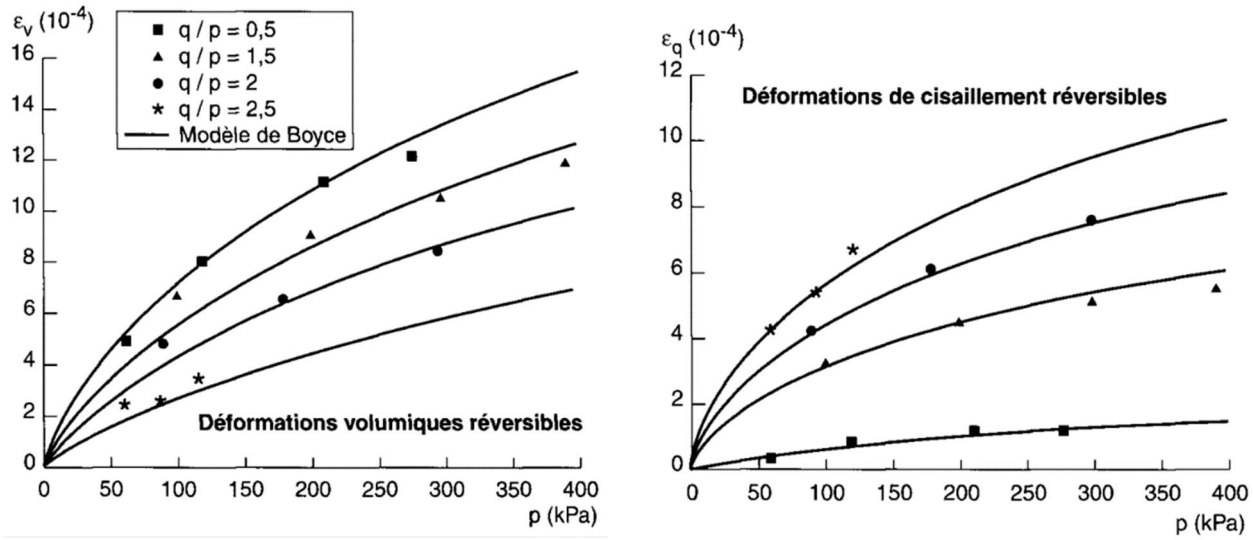


Figure 31 - Ajustement des paramètres du modèle de Boyce sur le comportement réversible d'une grave.

I.4. Généralités des graves émulsion

La grave émulsion (GE) est un enrobé fabriqué à température ambiante à partir d'émulsion et granulats froids et humides. Ce procédé d'enrobage nécessite peu d'énergie pour être fabriqué et produit peu d'émission de gaz à effet de serre (GES) [31], [32]. Il est une alternative adaptée aux enrobés à chaud pour les chaussées à faible et moyen trafic [33].

I.4.1. Composition des graves émulsion

Les graves émulsion sont composées de matériaux granulaires dont les classes sont comprises entre 0/10 et 0/20, d'émulsion et d'eau. Ils sont fabriqués dans des centrales fixes ou mobiles puis stockés. Ils sont actuellement principalement utilisés en réparation de chaussée. L'émulsion utilisée est formulée en fonction de la réactivité des granulats utilisés.

I.4.1.1. Fabrication de l'émulsion

De manière générale, les émulsions sont formées de deux liquides non miscibles, l'un se trouvant sous forme de gouttes dispersées dans l'autre. La Figure 32 présente les différents constituants d'une émulsion de bitume. Pour la fabriquer, il faut dans un premier temps que le bitume soit chauffé pour rendre sa viscosité la plus faible possible. L'autre partie de l'émulsion est la phase aqueuse qui est un mélange d'eau, d'émulsifiant, d'acide (et parfois d'additifs). Le mélange est rendu possible par l'utilisation de moulins colloïdaux générant une forte énergie mécanique pour obtenir de fines gouttelettes de bitume (quelques micromètres de diamètre) dispersées dans la phase aqueuse.

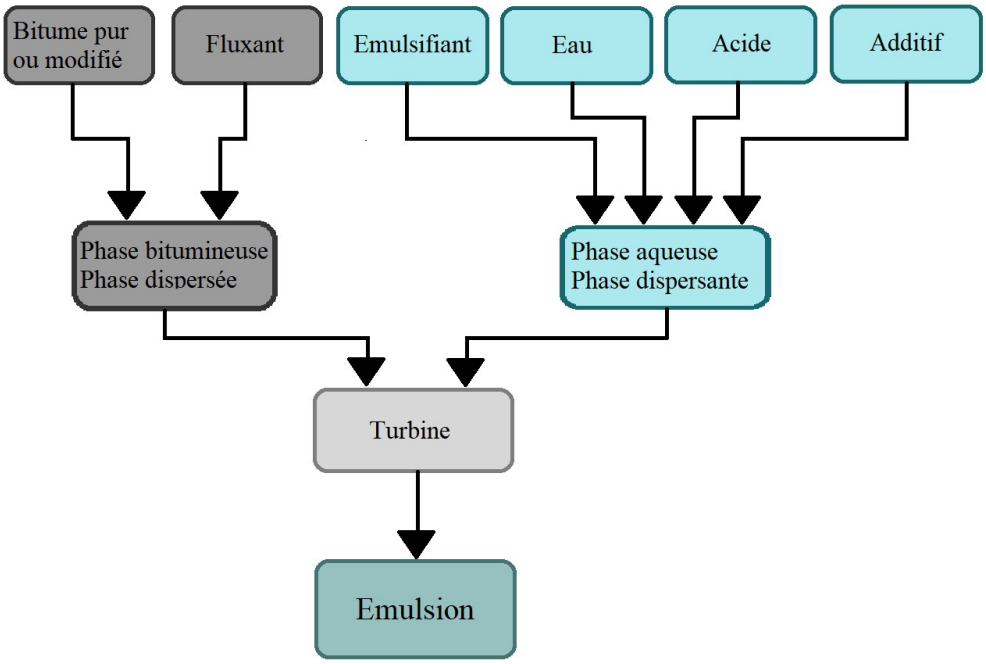


Figure 32 - Diagramme de fabrication d'une émulsion de bitume.

I.4.1.2. Propriétés des émulsions

Une émulsion est formulée de sorte qu'elle reste stable tout le long de son stockage et de son transport. Les propriétés physico-chimiques de l'émulsifiant (cationique basée sur la chimie des amines en France) et sa concentration dans l'émulsion sont garants de cette stabilité.

Il faut au contrainte que l'émulsion rompe lors du compactage de l'enrobé pour extruder l'eau du mélange [34] et obtenir une montée en cohésion rapide et un mélange cohésif capable de supporter un trafic routier.

I.4.2. Comportement mécanique des enrobés à l'émulsion

I.4.2.1. Comportement évolutif

Suite à la rupture de l'émulsion, un phénomène apparait, celui du mûrissement. Le mûrissement de l'enrobé à l'émulsion se traduit par un comportement mécanique fortement évolutif. Au très jeune âge de l'enrobé à l'émulsion (première semaine après sa fabrication), de l'eau se trouve encore dans les porosités du mélange même suite au compactage [35] et les granulats enrobés de liant ne montrent pas encore grande cohésion entre eux. Par conséquence, le comportement mécanique correspond plutôt à celui d'un matériau granulaire non lié [36]. Sa résistance dépend donc entièrement des performances mécaniques des granulats choisis et de la qualité du squelette granulaire.

Avec le temps, la cohésion augmente dans le mélange, l'eau s'écoule par gravité où s'évapore par le réseau poreux. Les performances mécaniques de l'enrobé à l'émulsion augmentent avec une cinétique encore mal connue et continuent leur accroissement même après le départ de l'eau [37].

L'une des explications à cette évolution de l'enrobé vient du départ de l'eau permettant au bitume d'améliorer la structuration du squelette granulaire mais aussi de ses propriétés et de sa composition. En effet le bitume est amené à vieillir au contact de l'oxygène de l'air [38] (Figure 6). Cela se traduit expérimentalement par une augmentation importante de la consistance du liant qui conduit à une augmentation de la TBA et une diminution de la pénétrabilité [39],[40].

Avec le mûrissement du mélange, la cohésion entre les grains augmente, le comportement de l'enrobé à l'émulsion évolue progressivement vers un comportement d'enrobé à chaud. On observe que l'augmentation de la résistance coïncide avec l'augmentation du comportement visqueux du matériau. Cette augmentation de la résistance est observée à la fois sur un matériau mûri en laboratoire [39], [41] ainsi que sur le matériau prélevé in situ [42]–[44]. Cette prise de résistance est souvent constatée sur plusieurs mois.

Quelques travaux montrent que l'historique thermique subie par le matériau influe sur sa vitesse de mûrissement. Plus il subira des températures élevées au jeune âge, plus rapide sera son mûrissement. De plus, il semblerait que les performances mécaniques des graves émulsion soient légèrement moindre que celles d'un enrobé à chaud [45]. Cependant, il reste beaucoup de travail pour comprendre la cinétique de mûrissement de matériau que ce soit du point de vue de la chimie du mélange ou des performances mécaniques [46], [47].

I.4.2.2. Modèle de représentation

Des essais triaxiaux réalisés par Hornych [36] sur une grave émulsion à l'état frais montrent que le comportement du matériau est celui d'un matériau granulaire non lié (Figure 33). On voit bien sur ce graphique que les résultats obtenus sur enrobé à l'émulsion sont similaire aux résultats de l'essai triaxial sur matériau granulaire. Il a même été possible de caler le comportement expérimental du matériau à l'état frais avec la loi de Boyce modifié utilisé pour caractériser le comportement des matériaux granulaires.

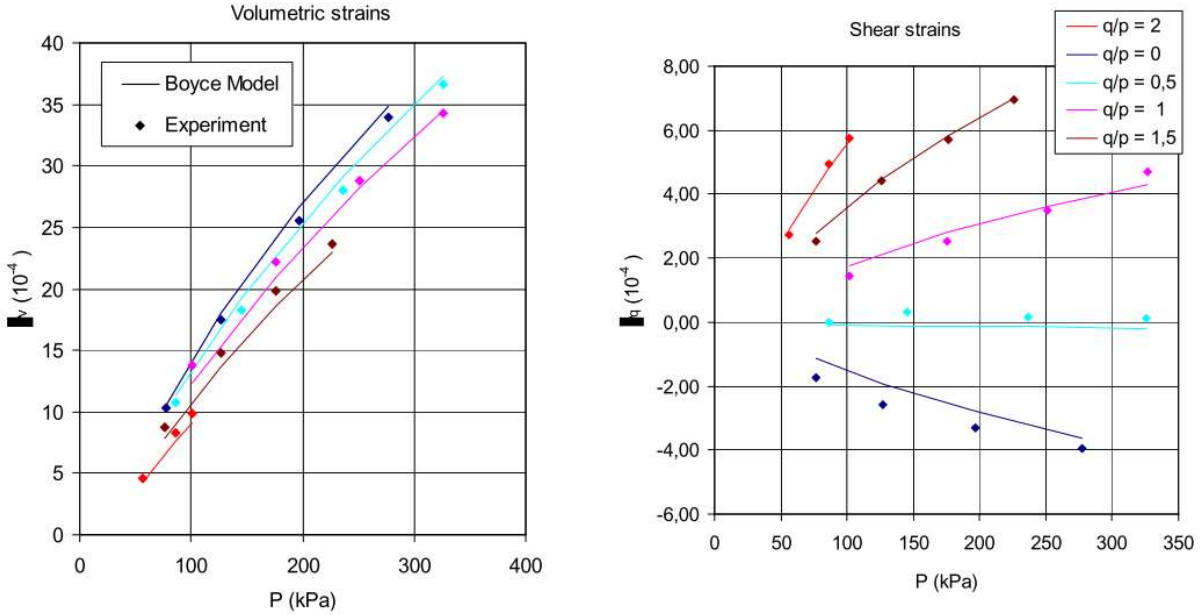


Figure 33 - Résultats d'un test de comportement résilient d'une grave émulsion à l'état frais [36].

Des essais à différentes températures de flexion 2 points et de propagation d'ondes ultrasonores sur une grave émulsion après un mûrissement pendant 14 jours à 35°C et 20 % d'humidité ont été réalisés pour caractériser leur module complexe [49]. La Figure 34 montre la modélisation de la courbe maitresse de la grave émulsion (GE) par le modèle de Huet-Sayegh [21] afin d'être comparée avec les valeurs de modules obtenues par ultrasons. La modélisation du comportement de la grave émulsion mûrie par le modèle d'Huet-Sayegh est particulièrement adaptée tout comme elle l'est pour la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux.

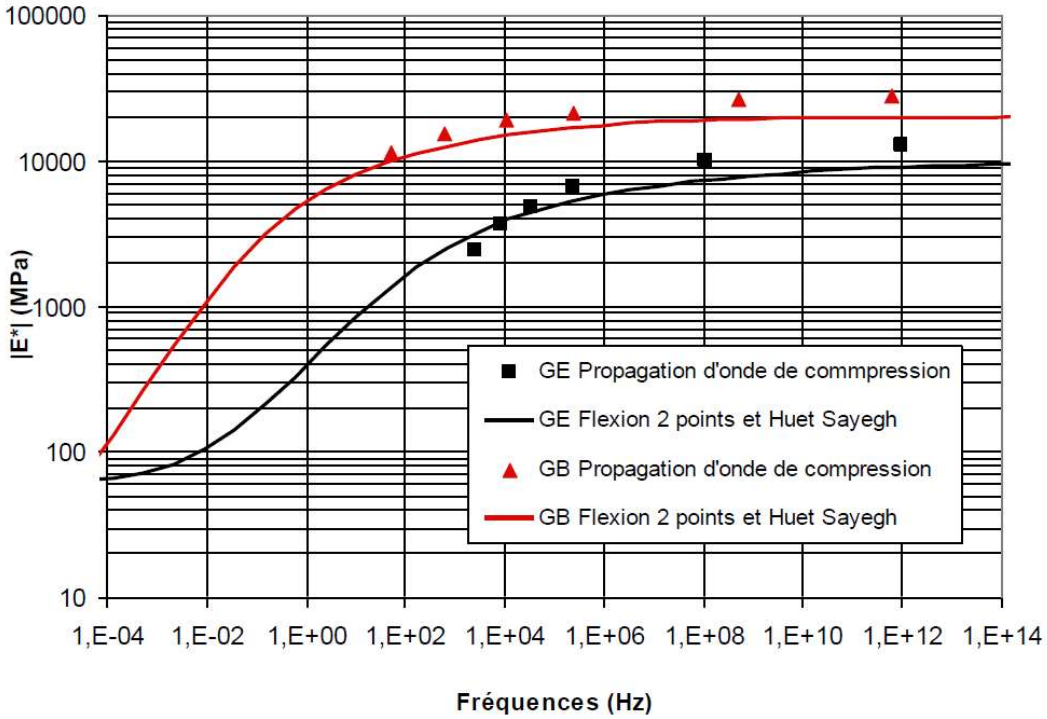


Figure 34 - Comparaison des courbes maîtresses obtenues en flexion deux points modélisées par Huet-Sayegh avec les résultats obtenus par propagation d'onde de compression à une température de référence de 15 °C [49].

D'autres recherches [50] ont permis d'élaborer une fonction de mûrissement permettant de corréler les différentes méthodes de mûrissement en laboratoire et la rigidité des échantillons déterminée à l'aide d'essais compression diamétrale en fonction du temps (Figure 35). Grace à ces essais, une augmentation logarithmique de la rigidité du matériau en fonction de la maturité où la maturité est définie par l'équation suivante inspiré du phénomène de prise du béton :

$$M = \sum_{0}^{t} (T - T_0)\Delta t_e \qquad \text{Equation 18}$$

où t_e est un âge équivalent en jours, T est la température (K) à l'instant t et T_0 est la température initiale.

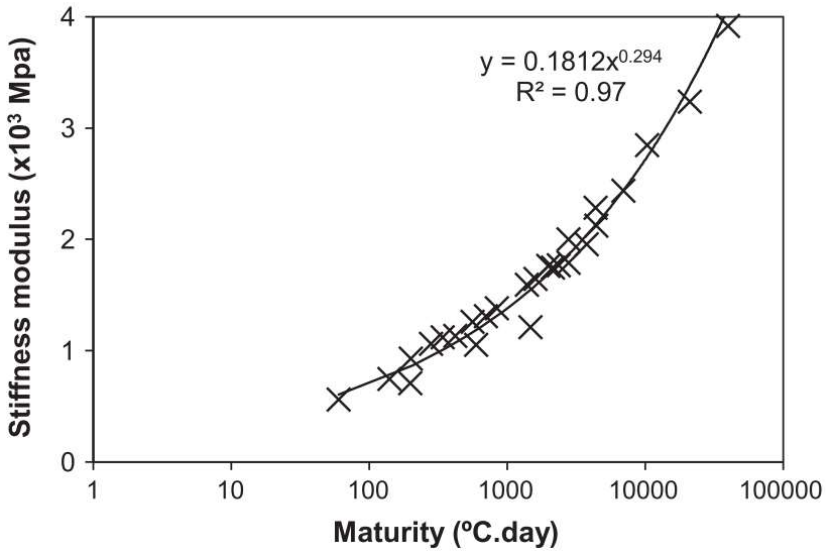


Figure 35 - Relation entre le mûrissement et la rigidité du matériau [50].

I.4.3. Méthode de formulation

La méthode de formulation des mélanges à l'émulsion s'appuyaient jusqu'à maintenant sur une approche basée sur l'expérience locale acquise sur les chantiers et constituait un frein au développement de leur utilisation [51]. Le partenariat mené entre L'IFSTTAR, le CEREMA et Routes de France a conduit à des avancées importantes en définissant un cadre méthodologique pour formuler des enrobés à l'émulsion avec des actions complémentaires à celles utilisées pour les produits élaborés à chaud [47], [52], [53] décrites dans la Figure 36.

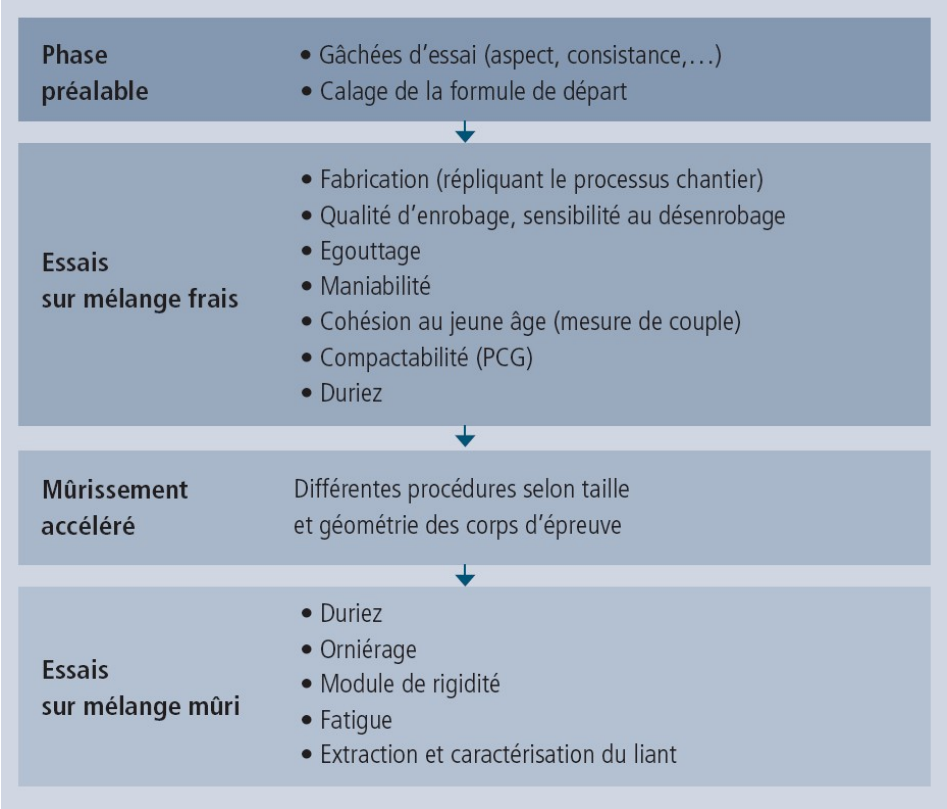


Figure 36 - Etapes de la méthode complète des enrobés à l'émulsion [47].

Il s'agit d'actions menées sur la formulation de l'émulsion et du mélange afin de caler la formule de départ à fabriquer [54], puis d'étudier le comportement à l'état frais par la presse à cisaillement giratoire [35] et l'état muri selon un protocole développé par Serfass [37]. Il propose de faire mûrir en laboratoire des échantillons à 35°C et 20 % d'hygrométrie pendant 15 jours ce qui équivaut à un mûrissement in situ de 1 à 3 ans sous climat tempéré.

Concernant l'état muri, les articles de Beghin [39] et Čížková [41] présentent des résultats de module complexe (référence [37] en flexion 2 points « 2P » avec des géométries prismatiques « PR » et trapézoidales « TR », ou par compression diamétrale « IT » sur échantillon cylindrique « CY » (référence [39] compression diamétrale sur échantillon cylindrique) d'un enrobé à l'émulsion à différents temps de mûrissement en laboratoire et sur site réel. Les échantillons de la première référence proviennent directement d'un chantier expérimental (Figure 37) à différents temps (hiver ou été) ou du même mélange mais compactés en laboratoire (labo) puis muris pendant 14 jours à 35 °C – 20 % d'humidité. Les échantillons du « Mix C » de la deuxième référence qui sont les seuls sans ciment ont été confectionnés en laboratoire puis mûris pendant 28 jours à 20 °C pour une humidité comprise entre 40 et 70 %. Les deux matériaux présentent une augmentation de leurs résistances avec le mûrissement (Figure 38). La Figure 1.48 montre clairement que le mûrissement en laboratoire est insuffisant pour retranscrire le phénomène qui s'opère sur la chaussée même après un hiver et pour les 3 techniques de détermination de module utilisé.

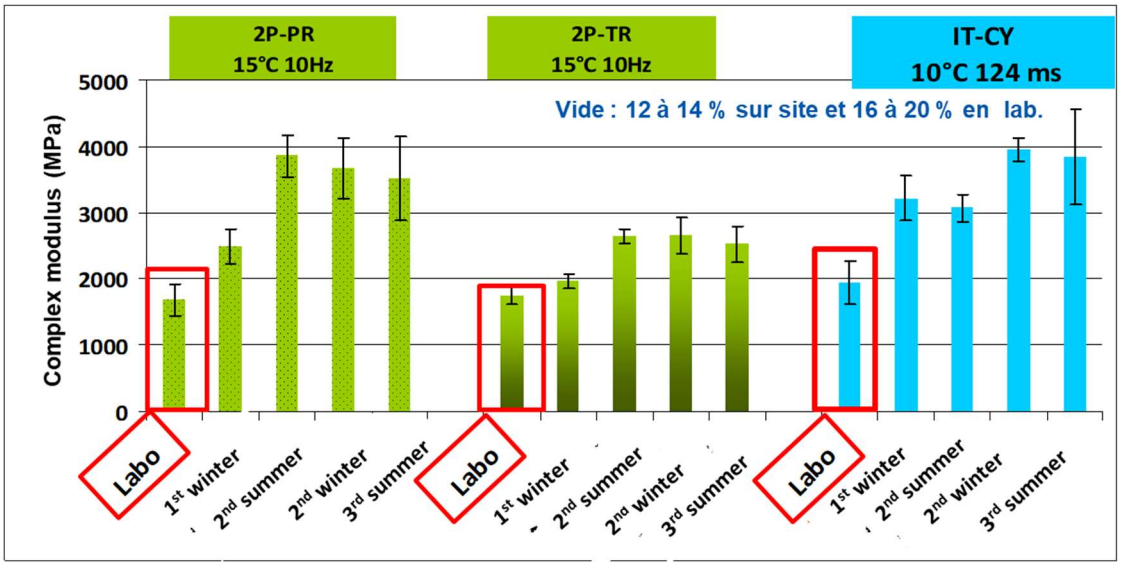


Figure 37 - Comparaison des valeurs de module de rigidité obtenues en laboratoires avec les valeurs de module obtenues sur chantier à différentes échéances [39].

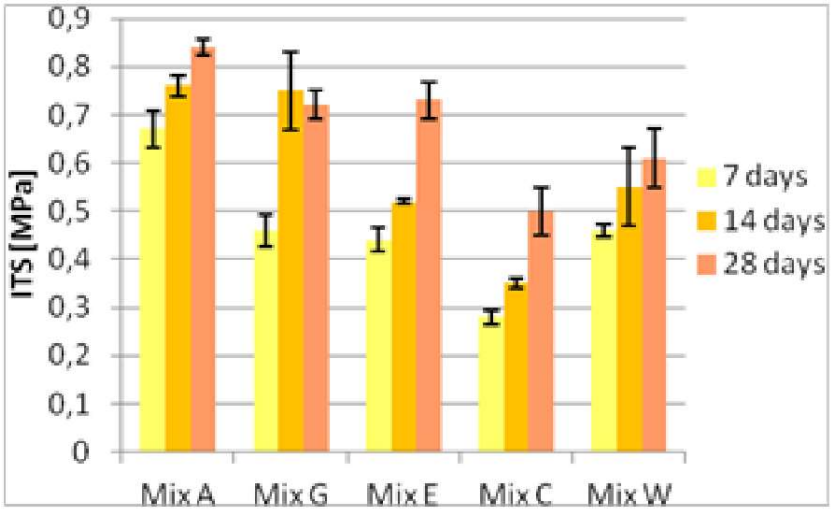


Figure 38 – Evolution du module par compression diamétrale pour différents enrobé à froid [41].

Pour comprendre les raisons du décalage de performances des matériaux entre les mûrissements de laboratoire et sur chantier de la référence [37], une analyse des liants a été menée au moyen d'essais de pénétration à l'aiguille et de TBA. Les résultats montrent que le liant se durcit avec le mûrissement car les valeurs mesurées de pénétrabilité diminuent et les valeurs de TBA augmentent (Figure 38) mais qu'il est moins affecté en laboratoire que sur chantier. De plus les propriétés du liant continuent d'évoluer alors que le module du mélange semble stagner avec le troisième été. Cela indique que la prise en compte du critère de module est nécessaire mais pas suffisant pour caractériser le mûrissement des produits routiers à l'émulsion de bitume.

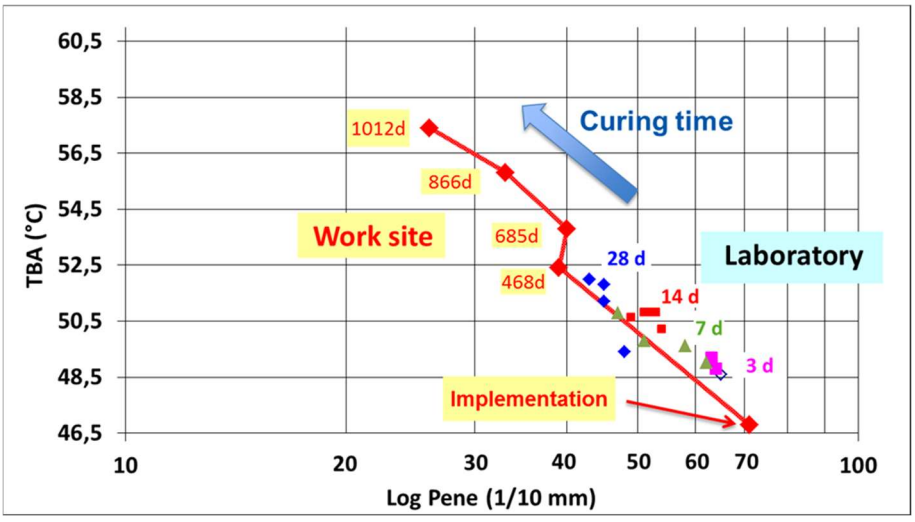


Figure 39 - Cinétiques d'évolution temporelle des caractéristiques des liants extraits des éprouvettes de laboratoire et des prélèvement in situ [39].

I.4.4. Méthode de dimensionnement

De nos jours, il n'existe toujours pas de consensus sur la méthode de dimensionnement des chaussées comprenant une couche d'enrobé à l'émulsion. En France, la conception de ce type de chaussée passe le plus souvent par des guides régionaux [55] qui proposent des épaisseurs minimales d'enrobé à l'émulsion à mettre en place en fonction de la localisation géographique de

la route et de la densité de circulation. Ces structures « pré-faites » sont basées sur des données empiriques extraites des expérimentations sur chantier.

De plus, il arrive qu'une chaussée intégrant une couche d'enrobé à l'émulsion soit dimensionnée à partir du logiciel de dimensionnement Alizé consiste à prendre en compte une épaisseur d'enrobé à l'émulsion et de calculer les sollicitations maximales en fond de couche de la structure de chaussée produites par l'essieu de référence. Ces valeurs doivent rester inférieures aux sollicitations admissibles des matériaux. Sachant que la seule donnée « matériau » prise en compte pour le dimensionnement de l'enrobé à l'émulsion est son module de rigidité qui est non évolutif et fixé à une valeur de 2500 MPa à 15 °C 10 Hz. En effet, la résistance à la fatigue du matériau n'est pas pris en compte pour son dimensionnement. C'est pourquoi la déformation verticale admissible de l'enrobé à l'émulsion s'écrit pour une construction neuve [55] :

$$\varepsilon_{z,ad} = 0{,}012\ \mathrm{NE}^{-0{,}222} \qquad \text{Equation 19}$$

avec : NE est le nombre équivalent d'essieux,

et en renforcement :

$$\varepsilon_{z,ad} = 0{,}0225\ \mathrm{NE}^{-0{,}244} \qquad \text{Equation 20}$$

I.5. Conclusion de la partie bibliographique

L'enrobé à l'émulsion répond à un usage et se positionne comme un produit à fort potentiel environnemental. Cependant il est sous employé dans la construction et l'entretien des routes et ponctuellement utilisé en tant que couche structurante de chaussée. L'un des principaux freins à son développement est que son comportement n'est pas bien connu et non rationalisé. Alors que les matériaux utilisés dans la construction routière ne sont pas évolutifs, la grave émulsion présente des performances mécaniques qui augmentent au cours d'une période dont la durée est variable appelée mûrissement. Cela pose la question suivante : les moyens de dimensionnement et de caractérisations des performances des matériaux bitumineux à chaud sont-ils pertinents pour l'étude de ce type de matériau ? Or à l'heure actuelle, il n'existe toujours pas de modèle pouvant traduire le comportement évolutif des enrobés à l'émulsion et pouvant prendre en compte de son comportement granulaire à l'état frais et de son comportement visqueux à l'état mûri. C'est pourquoi il est nécessaire de développer une loi de comportement évolutive capable de prédire les déformations du matériau aux passages de charges et ainsi participer au futur dimensionnement des chaussées incorporant une couche d'enrobé à l'émulsion.

De plus, la plupart des essais de caractérisation utilisés sur les enrobés à l'émulsion cités précédemment nécessitent un mûrissement préalable en laboratoire avant d'être testés pour assurer la pérennité géométrique des éprouvettes. La période de mûrissement nécessite d'étudier le matériau à l'état frais avec des essais développés pour la caractérisation de grave non traitée et à l'état muri avec des essais de caractérisation d'enrobé à chaud dès que la cohésion du matériau le permet. Actuellement, seul le suivi de module à différents états de mûrissement est étudié mais aucun test n'a été développé ou adapté afin d'évaluer le comportement évolutif de l'enrobé à l'émulsion et de son évolution depuis sa mise en œuvre in situ. Il faudrait développer un essai

pertinent qui serait adapté à ce comportement évolutif et qui puisse suivre l'évolution de ses performances de l'état frais à l'état mûri.

L'objectif de ce travail de thèse est d'apporter une contribution significative au développement de l'utilisation de l'enrobé à l'émulsion en développant une loi de comportement évolutive permettant de traduire le comportement de l'enrobé à l'émulsion depuis son état frais à son état mûri. Ce travail est une première étape vers le dimensionnement des chaussées incorporant des produits à l'émulsion de bitume ; il se limitera aux calculs de contraintes et de déformations réversibles et ne traitera pas les critères de durabilité du matériau. Pour alimenter le modèle, un essai de caractérisation a été développé pouvant suivre l'évolution des performances du matériau tout au long de son mûrissement.

Chapitre II. Loi de comportement 1D pour les enrobés à l'émulsion

II.1. Nécessité d'un nouveau modèle à la transition entre ENL et VE

Comme décrit dans la partie bibliographique, le dimensionnement mécanique d'une chaussée nécessite, dans un premier temps, de connaitre les déformations et contraintes à la base des couches au passage de poids lourds de référence. Dans un second temps, Il faut connaitre les performances du matériau à la fatigue. Maîtriser ces deux aspects du matériau permettra de l'intégrer au logiciel de dimensionnent et ainsi dimensionner une chaussée, dont au moins une des couches sera composée d'enrobé à froid.

Il s'agit ici d'un des premiers travaux sur le développement d'une loi de comportement pour enrobé à froid. Le travail de thèse se limite donc au développement d'une loi de comportement $\sigma \leftrightarrow \varepsilon$ tournée vers la première étape du dimensionnement de chaussée, sans prise en compte d'un critère de durabilité.

Nous cherchons à reproduire le comportement évolutif des enrobés à l'émulsion de bitume depuis l'état frais jusqu'à l'état mûri. En repartant des éléments bibliographiques présentés précédemment, le modèle de Boyce et le modèle de Huet (que nous simplifierons) seront utilisés. Le premier permettra de « capter » les propriétés élastiques non linéaires (ENL) du matériau au jeune âge lorsque celui-ci est encore sous la forme d'un matériau granulaire non lié. Le second permettra de faire converger le modèle vers les propriétés viscoélastiques (VE) d'un enrobé mûri à long terme. À ce stade, deux voies nous sont offertes pour construire le modèle.

Une première possibilité est de mettre directement en parallèle (Figure 40) les deux lois de comportement. Une variable de mûrissement continue $v(t)$ permettra de déplacer la sollicitation du modèle de Boyce vers le modèle d'Huet en ajoutant, par exemple, un effet croissant de la viscosité.

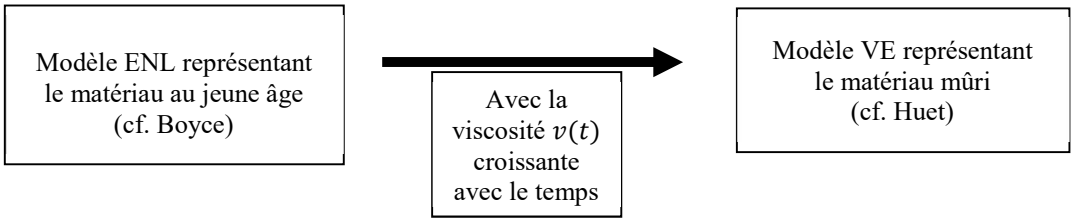


Figure 40 - Mise en parallèle directe de modèles ENL et VE.

Pourtant, cette représentation n'est pas totalement satisfaisante sur le plan « physique » dans la mesure où elle surajoute les composantes élastiques des deux modèles. La seconde méthode, que nous retiendrons par la suite, repose sur une décomposition spectrale conjointe des lois de comportement élastique non linéaire et viscoélastique permettant ainsi d'intégrer dans le modèle une part commune d'élasticité. Afin de bien poser les bases du modèle, et pour un souci de simplicité, nous nous limiterons, dans ce chapitre, à une approche 1D.

II.2. Développement de la loi de comportement en 1D

Dans cette partie, les lois de comportement 1D ENL et VE sont définies et considérées comme le point de départ du développement. Les décompositions spectrales sont développées afin de « fusionner » les modèles ENL et VE permettant ainsi d'obtenir le modèle viscoélastique non linéaire VENL 1D pour grave émulsion. Le paramètre de viscosité du modèle VE est utilisé pour rendre compte du mûrissement du matériau. L'algorithme de résolution numérique de la loi VENL obtenue est présenté. Il donne lieu à l'écriture d'un code programmé sous Visual Basics (VBA). L'équivalence de ce modèle avec chacune des lois ENL (en l'absence de viscoélasticité) et VE (en l'absence d'élasticité non linéaire) est illustrée sur des exemples calculant la réponse contrainte/déformation. La capacité du modèle à décrire les états intermédiaires d'un matériau au cours de mûrissement est décrite en fin ce chapitre.

II.3. Modèles rhéologiques constitutifs

II.3.1. Comportement élastique non linéaire

Pour le développement de la loi de comportement VENL 1D, il est proposé de partir de la loi puissance suivante ($\alpha > 1$) :

$\sigma = -E_s(-\varepsilon)^{\alpha}$, pour un état de compression $\sigma < 0$ et $\varepsilon < 0$ Equation 21

Cette équation peut être vue comme la relation liant la déformation volumique à la pression moyenne définie dans le modèle de Boyce (équation 1.12), et ce, pour une pression moyenne positive (effort de compression) et une contrainte déviatorique nulle ($q = 0$) soit :

$$\varepsilon_v = -\frac{p}{K_a}\ \frac{1}{\left(\frac{p}{Pa}\right)^{1-n}}$$

Ou encore, par inversion :

$p = P_a\ \left(\frac{K_a}{P_a}\right)^{\frac{1}{n}}(-\varepsilon_v)^{\frac{1}{n}}$ qui a bien la même forme compte tenu des signes de p et σ que l'Equation 21. On vérifie aussi que l'exposant $\frac{1}{n}$ équivalent à l'exposant α (Equation 21) est bien supérieur à 1 compte tenu de l'inégalité $0 < n < 1$ supposée (et vérifiée expérimentalement) dans la loi de Boyce.

II.3.2. Décomposition spectrale

La décomposition spectrale, représentée Figure 41, est considérée afin de traduire le comportement rigidifiant caractéristique du modèle de Boyce. Elle est constituée de n éléments « ressort + butée » mis en série et indicés par l'indice l. À chaque instant, tous les éléments partagent la même contrainte mais avec une partition propre de la déformation.

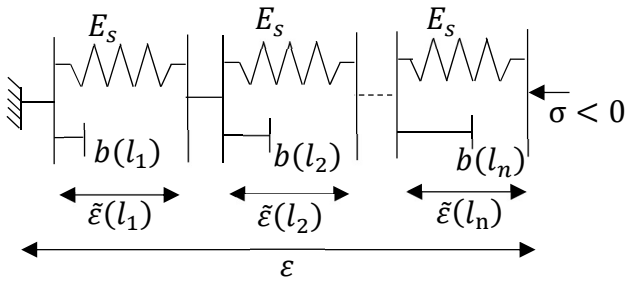


Figure 41 - Décomposition spectrale des lois ENL 1D (cas de série dénombrable).

Le fonctionnement en compression d'un élément « ressort + butée » est illustré sur les Figure 42, Figure 43 et Figure 44.

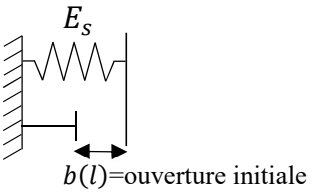


Figure 42 - Elément ouvert à l'état initial.

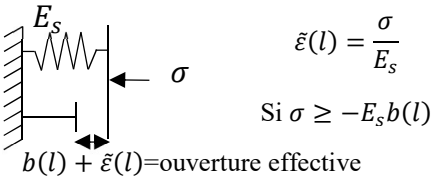


Figure 43 - Déformation de l'élément ouvert pour une contrainte $\sigma \geq -E_s b(l)$.

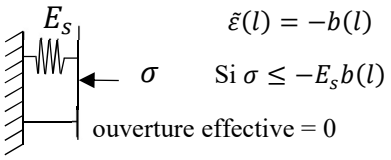


Figure 44 - Déformation de l'élément fermé pour une contrainte $\sigma \leq -E_s b(l)$.

Lors de la mise en compression du spectre, les ouvertures effectives de chaque butée vont diminuer jusqu'à ce que la déformation de certains éléments devienne égale à leur ouverture initiale $b(l)$. Dans ce cas, ces éléments se bloquent et empêchent toute déformation $\tilde{\varepsilon}(l)$ supplémentaire. La fermeture des éléments les uns après les autres entraine donc une rigidification progressive du modèle rhéologique.

Une telle série est donc caractérisée par la rigidité E_s du « ressort » commune à tous les éléments et par la fonction $b(l)$. Celle-ci peut être choisie sans restriction décroissante avec l (Figure 45). Montrons alors que pour un choix arbitraire de E_s, il est possible de choisir la fonction $b(l)$ de façon à retrouver une loi de comportement ENL rigidifiante $\varepsilon(\sigma)$ donnée.

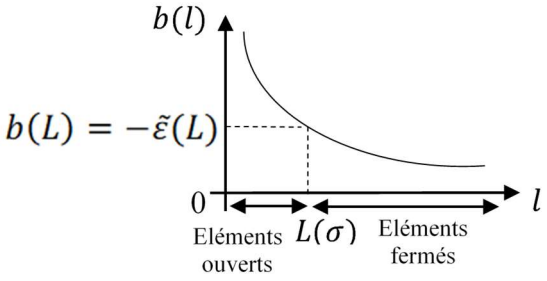


Figure 45 - Evolution de l'ouverture initiale b(l) de chaque élément.

À contrainte imposée σ, la déformation du spectre est donnée par l'intégrale :

$$\varepsilon(\sigma) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}(l,\sigma)\mathrm{d}l \qquad \text{Equation 22}$$

Comme montré sur la Figure 45, cette intégrale peut être divisée en deux parties. Une première est associée aux éléments ouverts pour $0 \leq l \leq L(\sigma)$ où $L(\sigma)$ est solution de l'équation implicite :

$$b(L) = -\frac{\sigma}{E_s} \qquad \text{Equation 23}$$

La seconde est associée aux éléments fermés pour $L(\sigma) \leq l < +\infty$. D'où :

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E_s} L(\sigma) - \int_{L(\sigma)}^{+\infty} b(l)\ \mathrm{d}l \qquad \text{Equation 24}$$

On en déduit par dérivation par rapport à σ :

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{L(\sigma)}{E_s} \qquad \text{Equation 25}$$

Introduisons le module de souplesse tangent S défini par :

$$S(\sigma) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \qquad \text{Equation 26}$$

On en déduit :

$$\sigma = S^{-1}\left(\frac{L}{E_s}\right) \qquad \text{Equation 27}$$

Et donc, compte tenu de l'Equation 23 et revenant à la variable courante l :

$$b(l) = -\frac{1}{E_s} S^{-1}\left(\frac{l}{E_s}\right) \qquad \text{Equation 28}$$

Appliquons cette expression au cas particulier de la loi de comportement Equation 21.

On a pour celle-ci :

$$\varepsilon = -\left(\frac{-\sigma}{E_s}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \qquad \text{Equation 29}$$

et donc pour le module de souplesse :

$$S(\sigma) = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \left(\frac{1}{E_s}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \frac{1}{\alpha} (-\sigma)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \qquad \text{Equation 30}$$

soit :

$$\sigma = -\left(\alpha {E_s}^{\frac{1}{\alpha}}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} S^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \qquad \text{Equation 31}$$

Et donc :

$$b(l) = \left(\frac{1}{\alpha\, l}\right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}$$ Equation 32

On vérifie que l'exposant $\frac{\alpha}{\alpha-1}$ est positif pour $\alpha > 1$. La courbe $b(l)$ obtenue a une forme similaire à celle de la Figure 45; elle décroit de l'infini à zéro pour l variant de zéro à l'infini.

II.4. Choix d'une loi VEL et représentation spectrale

En s'inspirant du modèle de Huet, communément utilisé pour représenter le comportement des enrobés bitumineux à chaud, nous proposons de décrire la composante visqueuse du comportement des enrobés à l'émulsion au moyen d'une unique fonction de fluage parabolique d'équation :

$$F(t) = B\left(\frac{\mathrm{t}}{A}\right)^{\beta}$$ Equation 33

avec $0 < \beta < 1$.

Dans les premières applications numériques (avant calage du modèle), nous supposerons la valeur de β voisine de celle de l'exposant h du modèle de Huet sachant que l'amortisseur parabolique h est représentatif du comportement des enrobés bitumineux dans le domaine des faibles valeurs de modules. Nous aurons ainsi $\beta \approx 0{,}6$.

Le paramètre A joue le rôle d'un temps caractéristique pouvant être utilisé pour rendre compte de l'effet de température et de mûrissement. A mûrissement donné, A sera supposé avoir la même forme que la fonction $a(\theta)$ introduite en bibliographie en équation 1.5 et donc décroitre avec la température. A température fixée, A sera supposée croissant avec le mûrissement.

Sans restreindre le modèle, B peut être pris égal à l'inverse du module E_s retenu pour la composante ENL, en modifiant simplement la valeur du paramètre A par une constante multiplicative.

II.4.1. Décomposition de la loi VE en spectre de fluage

Il est possible d'utiliser les outils classiques de décomposition spectrale des lois VE pour représenter le comportement de l'amortisseur parabolique. De manière générale, les lois de fluage peuvent être représentées par la décomposition en série d'éléments de Kelvin Voigt (spectre de fluage) illustrée en Figure 46 et indicée par l'indice l. Plusieurs variantes d'écriture sont possibles. Dans la suite, nous supposerons les éléments composés de « ressorts » de modules identiques, égaux à $E = \frac{1}{B}$ et d'amortisseurs linéaires à viscosité variable $\eta(l)$. Sans restreindre le modèle, la fonction $\eta(l)$ peut être prise croissante.

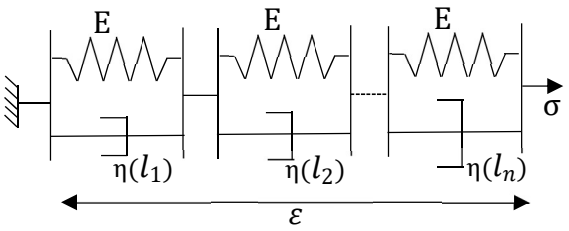


Figure 46 - Spectre de fluage.

La fonction de fluage associée à ce spectre s'écrit sous la forme :

$$F(t) = \frac{1}{E}\int_0^{+\infty}\left(1 - e^{\frac{-t}{\zeta(l)}}\right)dl \qquad \text{Equation 34}$$

$$\text{où } \zeta(l) = \frac{\eta(l)}{E} \qquad \text{Equation 35}$$

Est établi en annexe 1, le calcul général de la fonction $\zeta(l)$ associée à la fonction de fluage $F(t)$. On obtient :

$$\frac{l}{E} = \int_0^{\zeta}\frac{TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)\left(\frac{1}{w}\right)}{w}\,dw \qquad \text{Equation 36}$$

La notation $TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)(.)$ est la transformée inverse de Laplace de la dérivée temporelle de la fonction de fluage. $\zeta(l)$ s'obtient par inversion de l'Equation 48.

Appliquons cette transformation au cas de l'Equation 33 avec $E = \frac{1}{B}$. On a successivement :

$$\dot{F}(t) = \frac{\beta}{EA^{\beta}}\frac{1}{t^{1-\beta}} \qquad \text{Equation 37}$$

$$TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)\left(\frac{1}{w}\right) = \frac{\beta}{E\ A^{\beta}}\frac{w^{\beta}}{\Gamma(1-\beta)} \qquad \text{Equation 38}$$

$$\int_0^{\zeta}\frac{TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)\left(\frac{1}{w}\right)}{w}\,dw = \frac{1}{E\ A^{\beta}\Gamma(1-\beta)}w^{\beta} \qquad \text{Equation 39}$$

Et par conséquent, en égalisant cette expression à $\frac{l}{E}$ et en inversant la relation obtenue, nous avons :

$$\zeta(l) = \mathrm{A}\,\Gamma(1-\beta)^{\frac{1}{\beta}}\,l^{\frac{1}{\beta}} \qquad \text{Equation 40}$$

On vérifie *a posteriori* que cette « fonction puissance » d'exposant $\frac{1}{\beta} > 1$ tend vers 0 en 0 et vers $+\infty$ en $+\infty$. On vérifie également que $\zeta(l)$ étant proportionnelle à A.

Par la suite, le spectre VE ainsi défini sera considéré pour le cas particulier de ressorts de module $E = E_s$.

II.5. Modèle de comportement VENL 1D pour enrobé à l'émulsion

La construction des spectres ENL (Figure 41) et VE (Figure 46) (identiques en termes de paramétrage l et de « ressorts E_s») permet à présent de fusionner « naturellement » ces deux modèles, en vue de simuler le comportement des enrobés à l'émulsion et son mûrissement. Nous sommes en effet conduits à introduire la série d'éléments à trois branches « ressort + amortisseur linéaire + butée » comme présentée Figure 47 qui se comporterait, en l'absence d'amortisseur ($A = 0$), comme la loi ENL et, en l'absence de butée, comme la loi VE. En considérant une croissance de A, le modèle permet de simuler le passage progressif d'un comportement granulaire élastique non linéaire à un comportement viscoélastique non linéaire, caractérisant le phénomène de mûrissement. Ce modèle sera appelé, dans la suite de l'étude, le modèle viscoélastique non linéaire unidimensionnel VENL 1D.

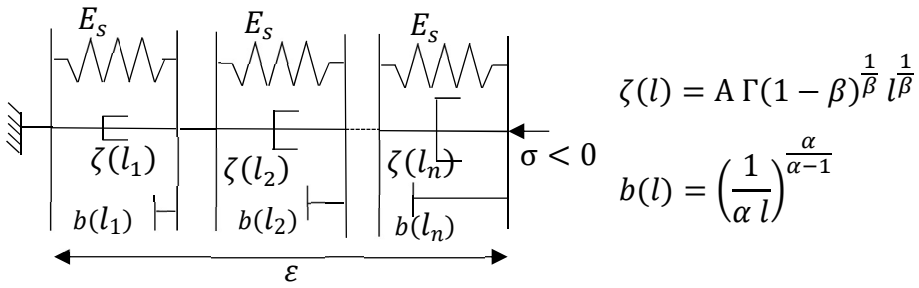


Figure 47 - Spectre à trois branches.

Par la suite, le comportement de cette série sera étudié en considérant les formes des fonctions $b(l)$ et $\zeta(l)$ identiques à celles définies précédemment, en conservant le caractère décroissant de la première et croissant de la seconde avec l. Un essai réalisé avec l'hypothèse inverse consistant à prendre $b(l)$ et $\zeta(l)$ variant dans le même sens (en faisant par exemple dans $b(l)$ la substitution $\rightarrow \frac{1}{l}$) a montré que l'on pouvait perdre le caractère non linéaire de la série d'éléments à trois branches. Dans ce cas, le modèle n'aurait pas la dualité entre l'amortisseur et la « butée », nous aurions toujours eu les mêmes éléments fermés (ceux ayant la plus petite viscosité et la plus petite ouverture de « butée ») et des éléments qui ne se fermeront jamais (ceux avec la plus grande viscosité couplée à la plus grande ouverture de « butée »).

Il aurait été possible, de manière plus générale, de chercher à identifier ces fonctions à partir de la donnée du comportement d'un tel modèle fusionné, mais ceci exigerait de pouvoir disposer sur le matériau censé répondre à ce modèle d'un nombre important de résultats d'essai pour des modalités de chargement variées allant au-delà des essais effectués pendant cette thèse. A l'inverse, la démarche, retenue ici, va permettre de limiter l'identification du modèle aux valeurs de ces quelques paramètres (exposants, coefficients d'« amplitude »).

II.5.1. Loi de comportement du modèle VENL 1D à historique de contrainte $\sigma(t)$ donné

Établissons la réponse du modèle ci-dessus connaissant la fonction $\sigma(t)$. Nous nous limiterons pour ce modèle 1D au passage de $\sigma(t)$ à $\varepsilon(t)$; le passage inverse de $\varepsilon(t)$ à $\sigma(t)$ sera développé en 3D dans le chapitre à venir.

La déformation du spectre est la somme des déformations de chacun des éléments qui le compose :

$$\varepsilon(t) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}(l, \mathrm{t}) dl \qquad \text{Equation 41}$$

Néanmoins, il n'existe pas de solution analytique permettant de relier de façon générale les évolutions de déformation $\tilde{\varepsilon}(l,t)$ et de contrainte. En effet, contrairement au cas du spectre ENL, le fait de mettre en parallèle des « butées » d'ouverture décroissante et des « amortisseurs » de viscosité croissante ne permet plus, pour une fonction $\sigma(t)$ non nécessairement monotone (cf. contrainte engendrée dans une chaussée par un poids lourds tridem), d'assurer l'unicité d'une frontière $l = L$ entre éléments fermés et éléments ouverts permettant de simplifier le problème. Il peut y avoir à un instant t donné, une alternance en fonction de l d'éléments ouverts et fermés. Nous allons donc résoudre le problème du calcul de $\varepsilon(t)$ numériquement en introduisant à la fois une discrétisation sur les variables t (temps) et l.

Nous notons $t_0 = 0, t_1 = \Delta t, \dots, t_i = i\Delta t, \dots, t_n = n\Delta t = t_f$, les instants de discrétisation pris équidistants entre les instants initial et final considérés pour le chargement. Pour simplifier le problème, seules les fonctions de contrainte $\sigma(t)$ continues et affines par morceaux sont utilisées par la suite avec l'hypothèse complémentaire de valeurs nulles aux instants $t \leq 0$ $(\sigma(0) = 0)$, Figure 48. Ceci permet d'éviter tout saut de contrainte à l'origine du chargement qui nécessite un traitement particulier du comportement intégral propre au comportement viscoélastique. Cet espace de fonction contrainte est noté $\mathcal{L}_a$.

Dans la perspective d'une élaboration de méthode de dimensionnement de chaussée avec grave émulsion, l'hypothèse $\sigma(0) = 0$ est peu restrictive vis-à-vis des sollicitations à modéliser associées au passage de poids lourd pris isolément. Dans le cas de nos campagnes d'essai basées sur des mesures de module complexe, nos simulations seront établies à partir de chargements sinusoïdaux à petit nombre de cycles partant d'un état de contrainte nul.

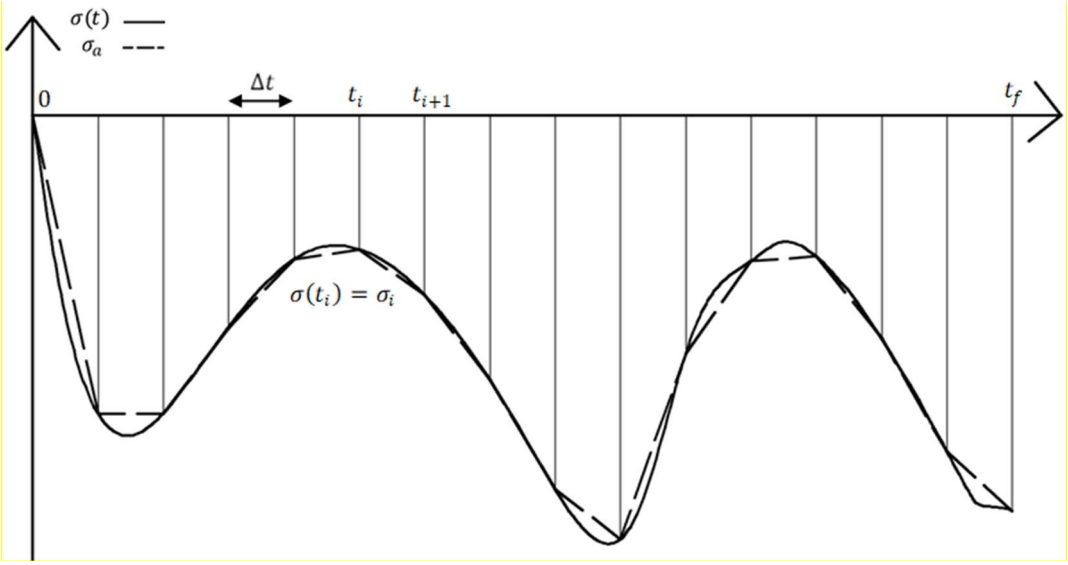


Figure 48 - Approximation de la fonction σ(t) par une fonction $\sigma_a(t) \in \mathcal{L}_a : \sigma_a(t_i) = \sigma(t_i) = \sigma_i$ (Notation σ_a uniquement utilisée pour les besoins de cette figure).

II.5.1.1. Calcul des déformations $\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1})$

Dans un premier temps, considérons connue, à l'instant t_i, la déformation $\tilde{\varepsilon}(l, t_i)$. Il s'agit alors de calculer la déformation $\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1})$.

Cas d'un élément ouvert à l'instant t_i

Considérons, en premier lieux, le cas d'un élément l ouvert à l'instant t_i tel que $\tilde{\varepsilon}(l, t_i) > -b(l)$.

La déformation libre, en l'absence de butée, se calcule, selon l'annexe 2, de la façon suivante :

$$\tilde{\varepsilon}^{\,libre}(l, t_{i+1}) = \frac{\sigma_i}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}_i}{E_s}\left(t_{i+1} - t_i - \zeta(l)\right) + \left(\tilde{\varepsilon}(l, t_i) - \frac{\sigma_i}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}_i}{E_s}\zeta(l)\right) e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta(l)}} \qquad \text{Equation 42}$$

où $\dot{\sigma}_i = \frac{\sigma_{i+1}-\sigma_i}{\Delta t}$ est une quantité connue.

- Si celle-ci est supérieure à la valeur $-b(l)$, l'élément reste ouvert sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est alors égale à :

  $$\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1}) = \tilde{\varepsilon}^{\,libre}(l, t_{i+1}) \qquad \text{Equation 43}$$

- Si celle-ci est inférieure à la valeur $-b(l)$, l'élément se ferme sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} se limite à la valeur de butée telle que :

  $$\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1}) = -b(l) \qquad \text{Equation 44}$$

Cas d'un élément fermé à l'instant t_i :

Si l'élément est fermé à l'instant t_i, soit $\tilde{\varepsilon}(l, t_i) = -b(l)$, la contrainte dans le ressort est égale à :

$$\sigma_{ressort} = -E_s b(l) \qquad \text{Equation 45}$$

- Si la contrainte σ_{i+1} est inférieure (algébriquement) à la valeur $\sigma_{ressort}$, cela signifie que l'élément reste fermé sur tout l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$. Sa déformation, à l'instant t_{i+1}, est égale à :

  $$\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1}) = -b(l) \qquad \text{Equation 46}$$

- Si σ_{i+1} est supérieure à la valeur $\sigma_{ressort}$, l'élément s'ouvre dans l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$, et ce, à l'instant calculé suivant :

  $$t_{F/O} = t_i - \frac{E_s b(l) + \sigma_i}{\dot{\sigma}_i} \qquad \text{Equation 47}$$

  et reste ouvert par la suite.

  Sur la fin de l'intervalle de temps considéré, l'élément reste ouvert. La déformation est alors calculée à l'instant t_{i+1} à l'aide de l'expression Equation 30 mais en substituant t_i par $t_{F/O}$ telle que :

  $$\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1}) = \tilde{\varepsilon}(l, t_i) + \frac{\dot{\sigma}_i}{E_s}\left(t_{i+1} - t_{F/O} - \zeta(l)\right) + \frac{\dot{\sigma}_i}{E_s}\zeta(l)e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta(l)}} \qquad \text{Equation 48}$$

avec : $\tilde{\varepsilon}(l, t_i) = \tilde{\varepsilon}\left(l, t_{F/O}\right) = \frac{\sigma(t_{F/O})}{E_s} = -b(l)$

II.5.1.2. Calcul de la déformation totale $\boldsymbol{\varepsilon(t_{i+1})}$

La déformation totale est alors mise à jour selon l'expression suivante :

$$\varepsilon(t_{i+1}) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1}) dl \qquad \text{Equation 49}$$

Cette intégrale est calculée en considérant une discrétisation du domaine d'intégration et un calcul analytique de l'intégrale selon la méthode des rectangles, Figure 49. Considérons la variable l comme étant une suite finie de valeurs ($l_0 = 0 < l_1 < \cdots < l_j < \cdots < l_p < +\infty$). La dernière valeur l_p est considérée comme suffisamment grande pour pouvoir négliger l'intégrale entre l_p et $+\infty$.

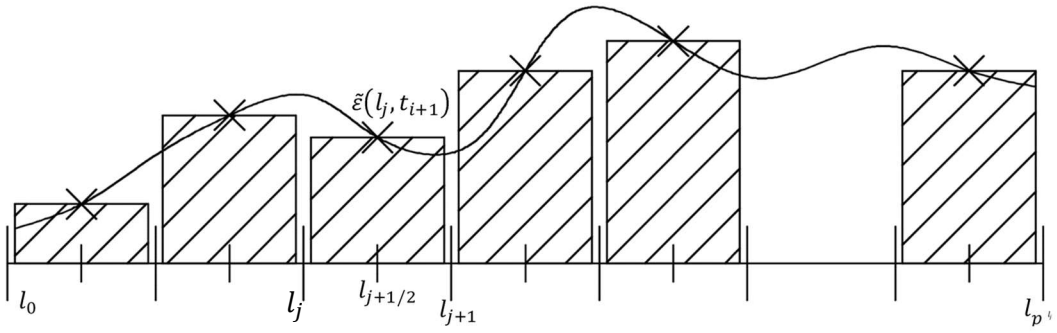


Figure 49 - Schéma de calcul de l'intégrale par la méthode des rectangles.

Sur chaque intervalle $[l_j, l_{j+1}]$, la déformation $\tilde{\varepsilon}(l, t_{i+1})$ est la valeur moyenne dans l'intervalle. En considérant une évolution linéaire de la déformation dans l'intervalle, la valeur moyenne est définie par :

$\tilde{\varepsilon}\left(l_{j+1/2}, \mathrm{t}_{i+1}\right)$ où $l_{j+1/2} = \frac{l_j + l_{j+1}}{2}$

La méthode des rectangles permet d'approximer la déformation comme suit :

$$\varepsilon(\mathrm{t}_{i+1}) \approx \sum_{j=0}^{\mathrm{p}-1} \tilde{\varepsilon}\left(l_{j+1/2}, \mathrm{t}_{i+1}\right)\left(l_{j+1} - l_j\right) \qquad \text{Equation 50}$$

Dans l'implémentation des algorithmes développés dans cette thèse, les fonctions puissances $b(l)$ et $\zeta(l)$, utilisées pour reproduire les fonctions ENL et VE associées aux GNT et enrobés bitumineux, nous conduisent à distribuer les valeurs l_j de façon régulière sur une échelle logarithmique entre l_0 et l_p avec $l_0 = 10^{-8}$ et $l_p = 10^{8}$, soit $l_j = 10^{\log l_0 + \frac{j}{p}\log l_p}$ (log = logarithme décimal). En pratique, la valeur de p est prise égale à 201.

II.5.2. Algorithme de calcul de la loi VENL 1D et implémentation numérique

La démarche de calcul, développée précédemment, nous conduit à proposer l'algorithme de calcul suivant pour le passage de $\sigma(t)$ à $\varepsilon(t)$ (Figure 50).

Les valeurs $E_s, \alpha, A, \beta, t_f, n$ (nombre de pas de temps), l_0, l_p, p sont données. Également, l'histoire des contraintes (σ_i pour $i = 1,..,n$) est connue en considérant un état de contrainte vierge à l'origine ($\sigma_0 = 0$).

De plus, on suppose connues les valeurs $iouvertj\left(l_{j+1/2}\right) = 1$ (éléments ouverts à l'instant 0) et $\tilde{\varepsilon}\left(l_{j+1/2}, t_0\right) = 0$ (déformations initiales des éléments du spectre égales à 0).

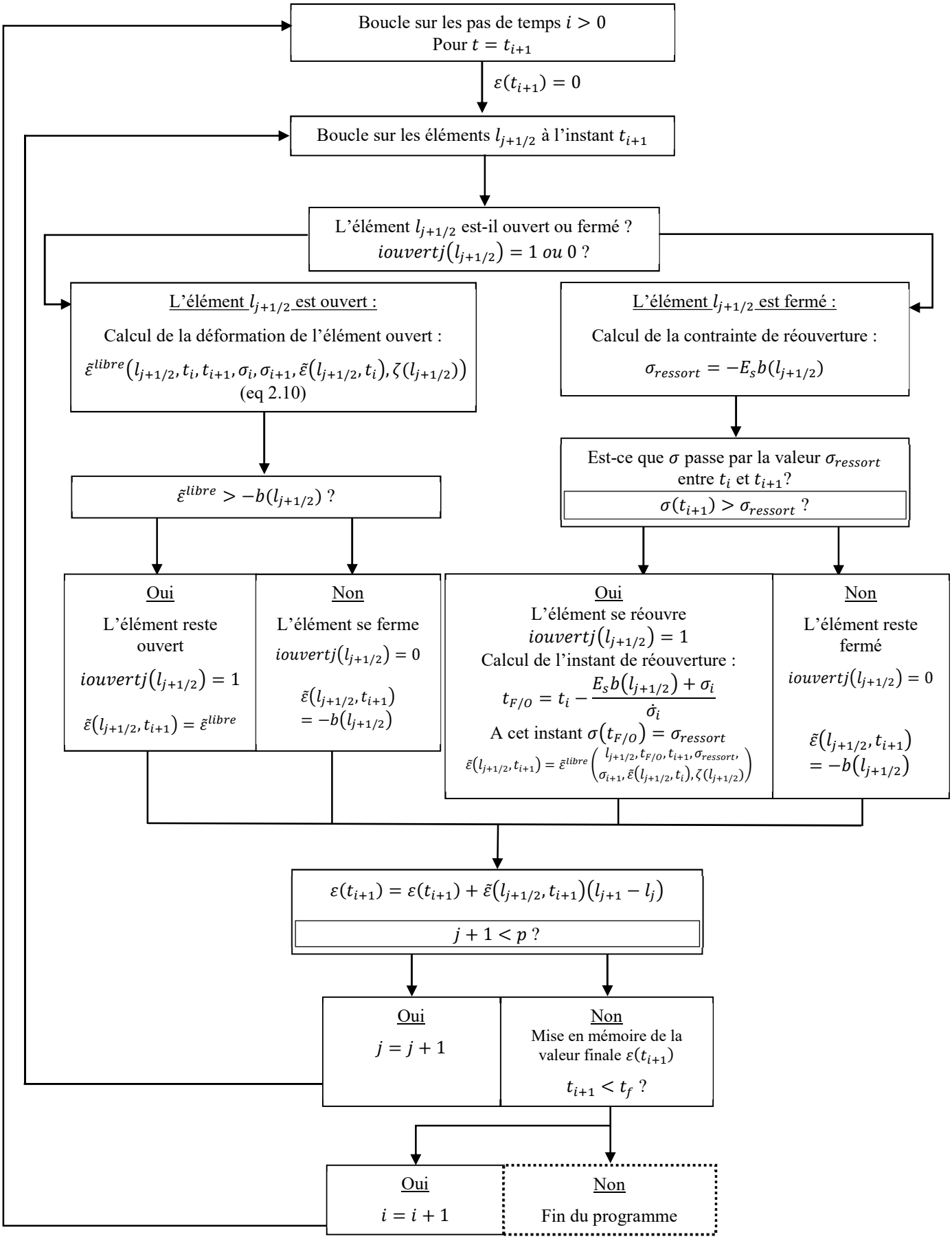


Figure 50 - Diagramme de l'implémentation de la loi 1D.

Cet algorithme est mis en œuvre à travers un codage Visual Basic sous Microsoft Excel (VBA) bénéficiant de l'environnement graphique du tableur. Pour des configurations particulières, l'algorithme peut être intégré dans des procédures de caractérisation des paramètres des modèles ENL ou VE, de façon séparée.

Le modèle ENL est obtenu en faisant tendre la viscosité vers zéro ($\zeta(l) \to 0$) à travers de petites valeurs de A.

Le modèle VE est isolé en faisant tendre E_s vers zéro tout en gardant le produit $E_s A^{\beta}$ très grand.

II.5.3. Validation des modèles ENL et VE

Cette première étape de validation emploie le modèle VENL 1D sans et avec viscosité afin de reproduire séparément les deux comportements de base ENL et VE. Ces calculs de vérification sont notés respectivement VENL 1D (ENL) et VENL 1D (VE).

Pour fixer des valeurs réalistes des paramètres, nous imposons pour les calculs VENL 1D (ENL) une déformation égale à $\varepsilon_0 = -10^{-3}$ pour une contrainte $\sigma_0 = -0{,}4\ MPa$, typique d'une GNT.

L'exposant α est considéré égal à l'inverse de l'exposant n du modèle de Boyce et pris ici égal à $1/0{,}6 = 5/3$. L'exposant β, comme explicité précédemment, est choisi du même ordre de grandeur que l'exposant h du modèle de Huet. Sa valeur est choisie ici à $0{,}68$.

La loi de comportement ENL (eq. 2.1) s'écrit :

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{\alpha}$$

ce qui revient à prendre : $E_s = \sigma_0 {\varepsilon_0}^{-\alpha}$. Pour le choix des valeurs ε_0, α et σ_0 fait ci-dessus, la valeur de E_s est trouvée égale à 40 000 MPa même si celle-ci n'a pas de véritable signification physique.

De façon à minimiser la composante VE des simulations VENL 1D (ENL), la valeur de A est choisie petite, égale à $\frac{t_1}{200\,000}$.

Concernant le modèle VENL 1D (VE), nous optons pour une fonction de fluage qui rend compte d'un module sécant E_1 de 2 000 MPa après un temps t_1 de fluage de 0,02s, correspondant à une valeur typique de GE en cours de mûrissement (cf. chapitre IV). La loi de comportement VE (ep. 2.5) s'écrit, quant à elle, comme suit :

$$F(t) = \frac{1}{E_1}\left(\frac{t}{t_1}\right)^{\beta} = \frac{1}{E_s}\left(\frac{t}{A}\right)^{\beta} \text{ avec } A = \left(\frac{E_1}{E_S}\right)^{\frac{1}{\beta}} t_1.$$

De façon à minimiser la composante ENL des simulations VENL 1D (VE), la valeur de E_S est choisie petite, égale à 1 MPa.

Deux cas de chargement sont considérés, et ce, pour les deux modèles VENL 1D (ENL) et VENL 1D (VE).

Le premier cas de chargement représente un état de fluage précédé d'une rampe linéaire de mise en charge (Figure 51). Il est défini par :

$\sigma(t) = \sigma_0 \frac{t}{t_1}$ pour $0 \leq t \leq 2t_1$ et $\sigma(t) = 2\sigma_0$ pour $2t_1 \leq t$

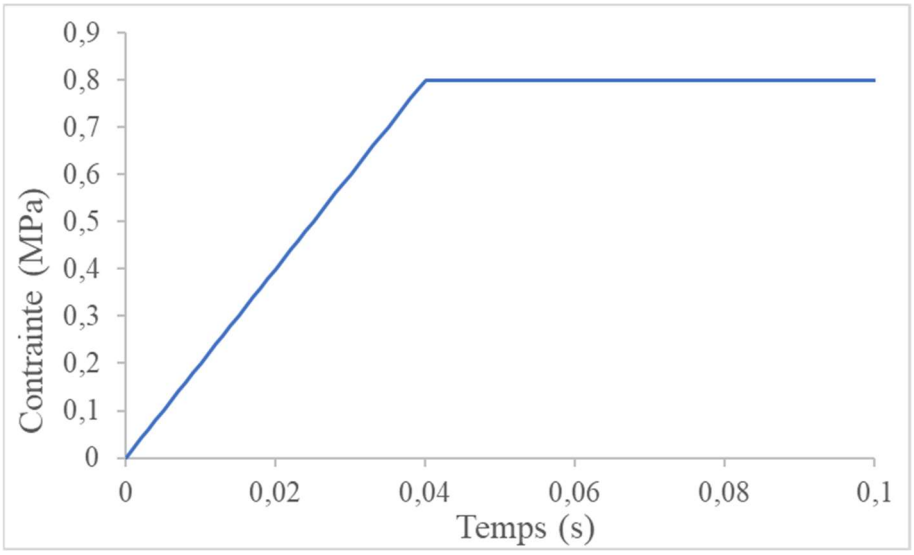


Figure 51 - Contrainte de compression.

Le second est un chargement harmonique, Figure 52. Il est défini par :

$\sigma(t) = \sigma_0\big(1 - cosinus(2\pi ft)\big) = \sigma_0 - Re\big(\sigma_0 e^{i2\pi ft}\big)$ = *« contrainte constante » – « contrainte cyclique »*, pour $0 \leq t \leq 5/f$ avec f = fréquence = $10\ Hz$.

Celle-ci est approximée par la fonction $\sigma(t)$ de $\mathcal{L}_a$ qui lui est associée.

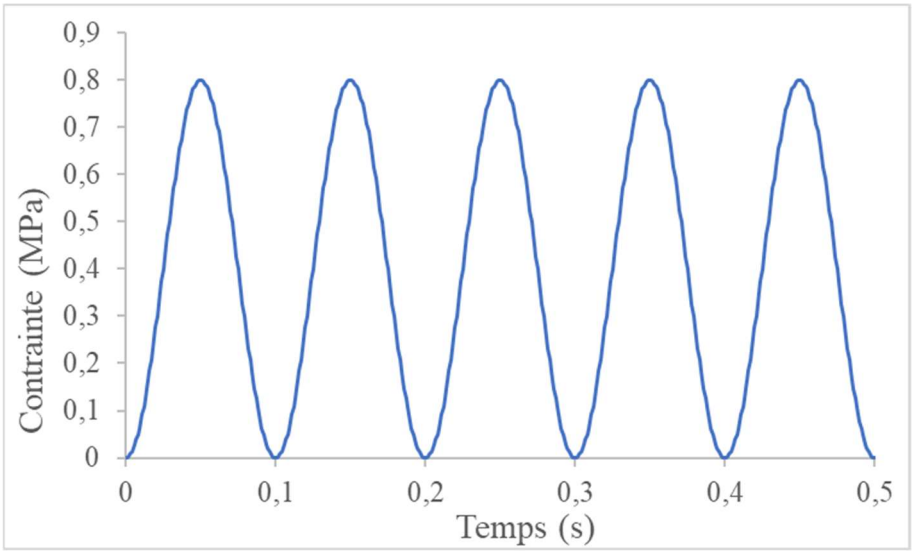


Figure 52 - Contrainte de compression sinusoïdale imposée.

Les calculs VENL 1D (ENL) et VENL 1D (VE) sont comparés aux calculs directs issus des lois ENL (Equation 21) et VE. Pour cette dernière, un court programme annexe a été construit. Il est basé sur la loi de convolution induite de la fonction de fluage (Equation 33) :

$$\varepsilon_{VE}(t) = F(t) \otimes \dot{\sigma}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\mathrm{t} - \tau)\dot{\sigma}(\tau)d\tau$$

soit pour les instants de discrétisation t_i et une fonction contrainte dans $\mathcal{L}_a$:

$$\varepsilon_{VE}(t_i) = \sum_{j=0}^{i-1} \int_{t_j}^{t_{j+1}} F(t_i - \tau) \frac{(\sigma_{j+1} - \sigma_j)}{\Delta t} d\tau$$

où encore pour la fonction puissance $F(t)$ considérée :

$$\varepsilon_{VE}(t_i) = \frac{1}{\Delta t(\beta+1)E_s A^{\beta}} \sum_{j=0}^{i-1} (\sigma_{j+1} - \sigma_j) \left[(t_i - t_j)^{\beta+1} - (t_i - t_{j+1})^{\beta+1} \right] \qquad \text{Equation 51}$$

Les Figure 53 et Figure 54 montrent les réponses du modèle VENL 1D, comparées aux calculs directs pour le premier chargement. La figure de gauche est relative à l'ENL, celle de droite à la VE.

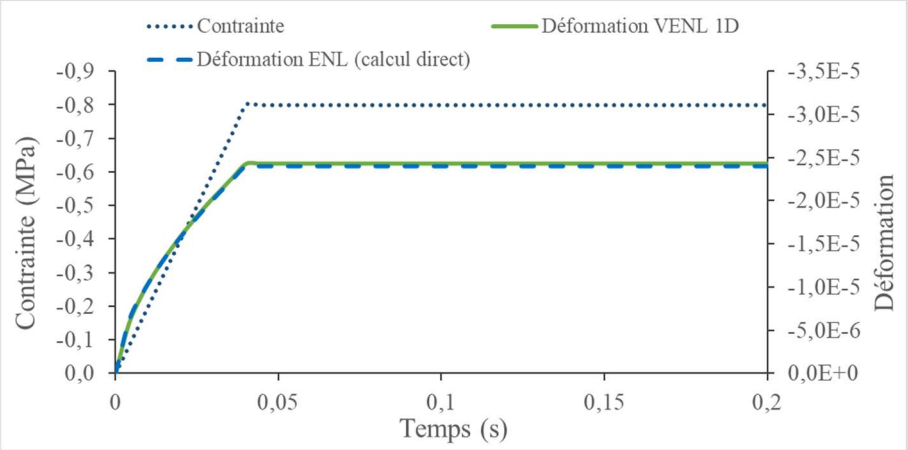


Figure 53 - Modélisations VENL 1D (ENL) vs ENL directe.

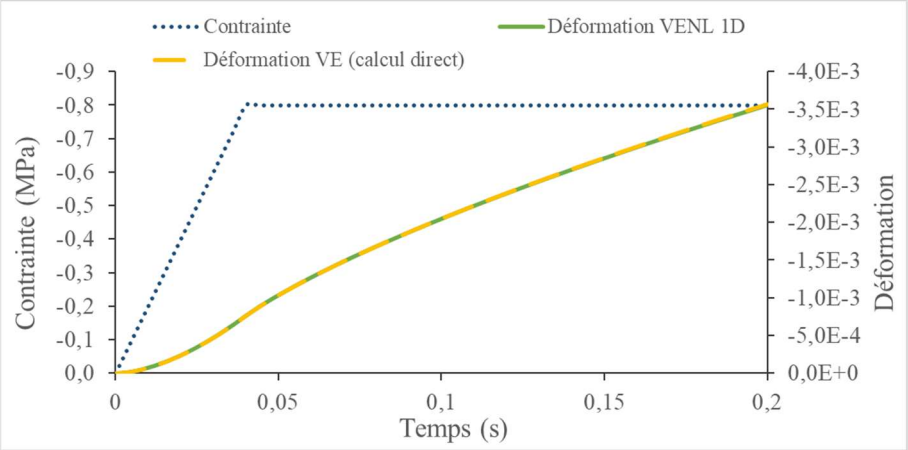


Figure 54 - Modélisations VENL 1D (VE) vs VE directe.

Que ce soit en ENL ou en VE, le modèle spectral VENL 1D reproduit fidèlement les réponses des lois de comportement génériques ENL et VE.

Les Figure 55 (ENL) et Figure 56 (VE) se rapportent au deuxième cas de chargement. Pour les deux modèles, les résultats sont présentés sous la forme de deux graphiques, le premier représentant la déformation en fonction du temps et le second la courbe contrainte déformation.

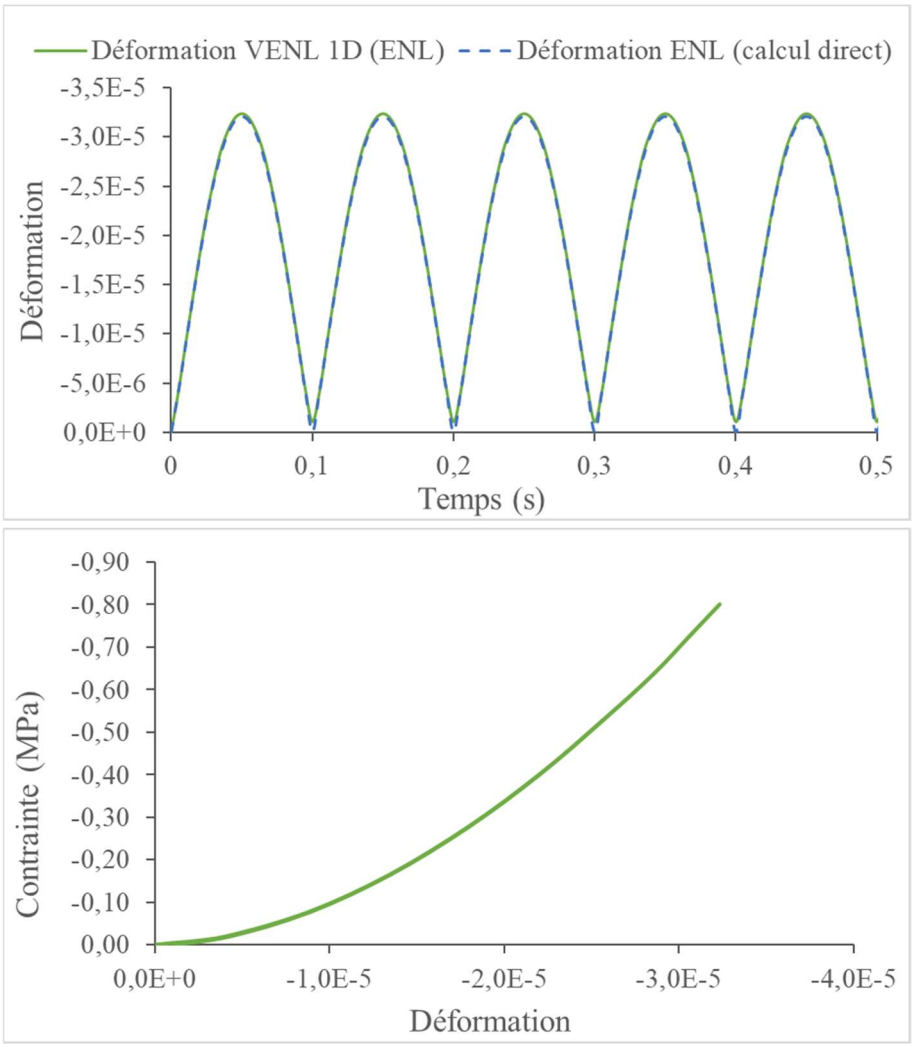
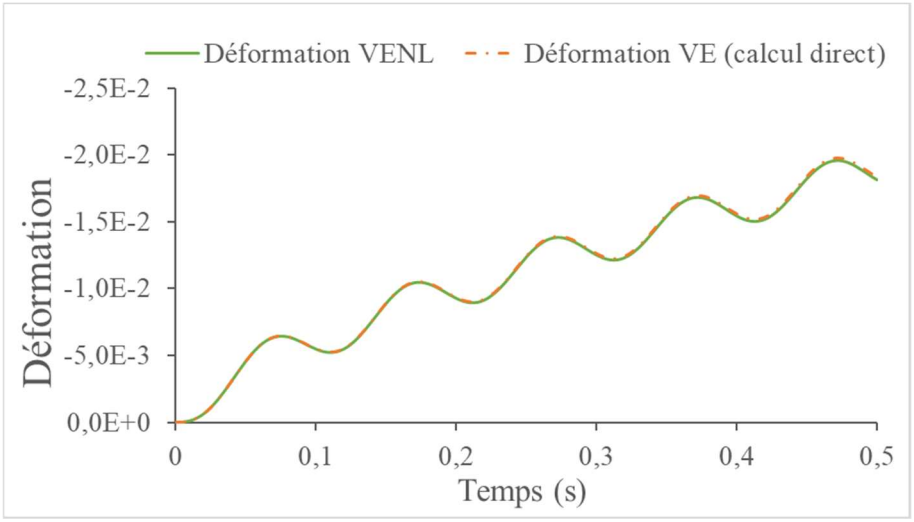


Figure 55 – Modélisations VENL 1D (ENL) vs ENL direct sous chargement cyclique.



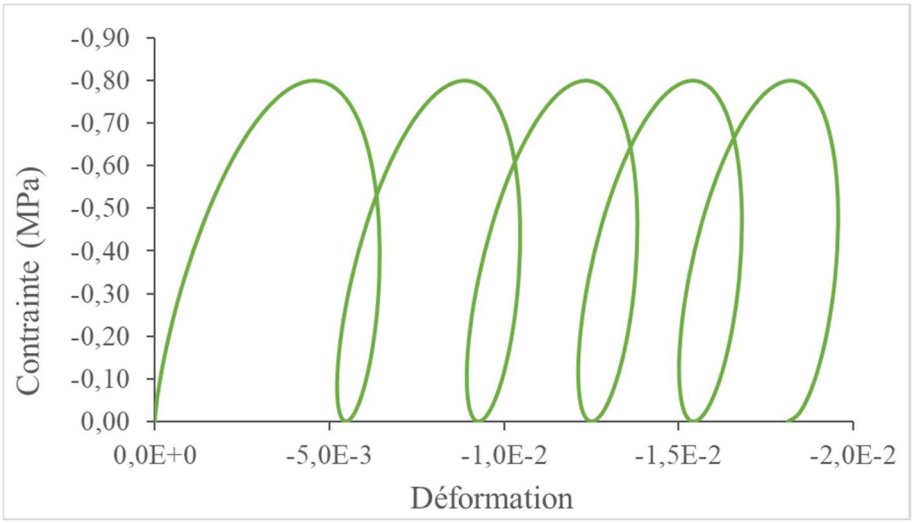


Figure 56 - Modélisations VENL 1D (VE) vs VE direct sous chargement cyclique.

Comme précédemment, on observe une très bonne concordance entre le modèle VENL 1D et les modèles directs, validant ainsi l'algorithmique d'intégration du modèle VENL 1D dans le cas de chargements non monotones.

On observe que le modèle VE montre, comme attendu pour la sollicitation cyclique considérée, une déformation moyennée sur le temps égale à $\varepsilon_m(t) = \frac{\sigma_0}{E_s}\left(\frac{t}{A}\right)^{\beta}$, correspondant à la valeur moyenne de la contrainte $\sigma(t)$ imposée, Figure 57. Quant à la différence $\varepsilon(t) - \varepsilon_m(t)$, elle se stabilise rapidement sur le cycle contrainte-déformation associé à la valeur de module complexe correspondant à la fonction de fluage F, à savoir, Figure 58 :

$$\varepsilon(t) - \varepsilon_m(t) \approx -Re\left(\frac{\sigma_0}{E^*} e^{i2\pi f t}\right) \text{ avec } E^* = \frac{E_s (i\omega A)^{\beta}}{\Gamma(\beta+1)}$$

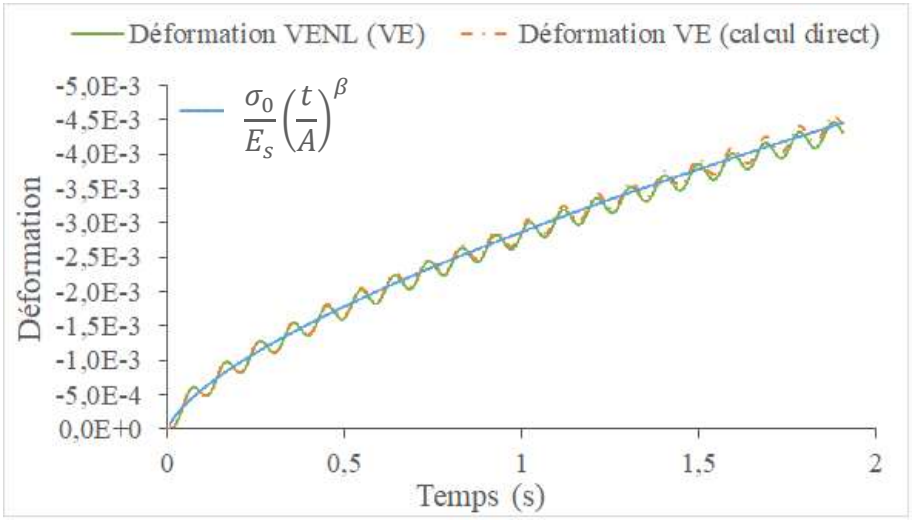


Figure 57 – Comparaison entre modèle VE direct, VENL 1D (VE) et déformation moyenne analytique.

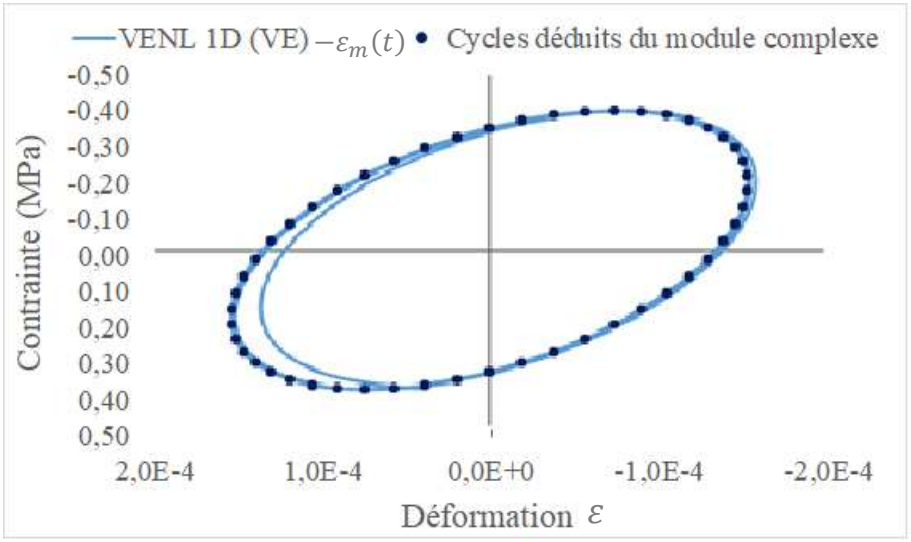


Figure 58 - Comparaison entre déformations cycliques du modèle VENL 1D (VE) et déduites du module complexe.

II.5.4. Simulation VENL 1D d'un mûrissement

Les exemples à suivre illustrent le comportement du modèle VENL 1D, sur la base des deux fonctions $\sigma(t)$ précédentes, en considérant une variable de « mûrissement » A croissante avec l'âge du matériau et donnant de plus en plus de poids à la composante VE. Les valeurs des paramètres $E_s = \sigma_0 {\varepsilon_0}^{-\alpha}$, α , t_1 et β sont reprises des simulations précédentes.

Les valeurs de A sont fixées à travers la relation $A = \left(\frac{E_1}{E_S}\right)^{\frac{1}{\beta}} t_1$ et le choix de la valeur de E_1.

La Figure 59 illustre la réponse du modèle VENL 1D pour $E_1 = 1\,000\ MPa$, pour le premier chargement.

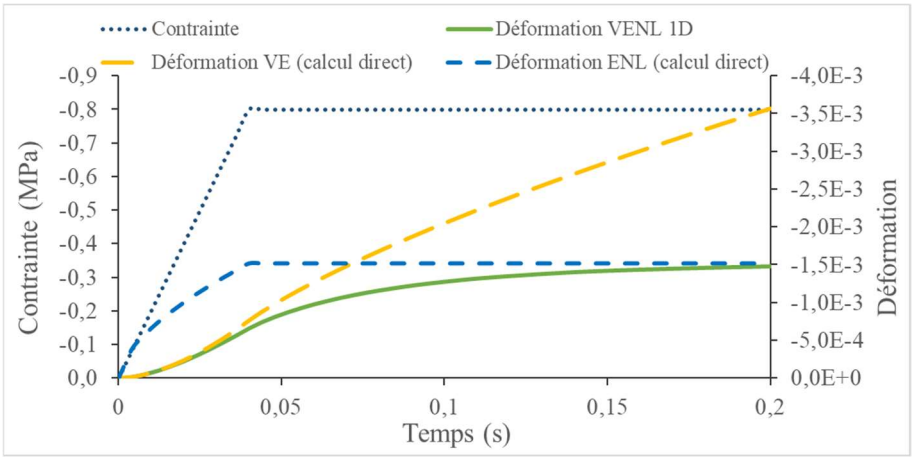


Figure 59 - Modélisation VENL 1D pour $E_1 = 1\,000\ MPa$ et le premier chargement.

La déformation du modèle VENL 1D est voisine à l'origine de la courbe VE et tend asymptotiquement pour les grandes valeurs de temps vers la réponse ENL, traduisant la transition entre les deux types de comportement.

La Figure 60 illustre la réponse du modèle VENL 1D pour la même valeur $E_1 = 1\,000\,MPa$ et pour un unique cycle du second chargement. Celle-ci est comparée aux réponses des modèles ENL et VE directs.

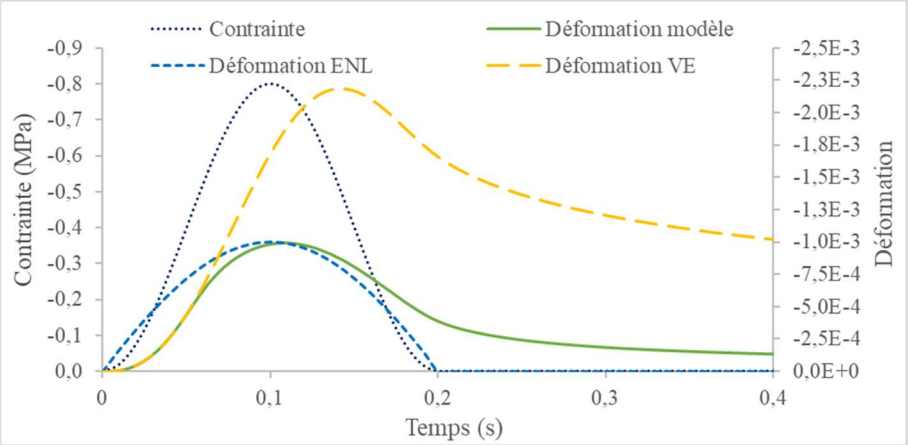
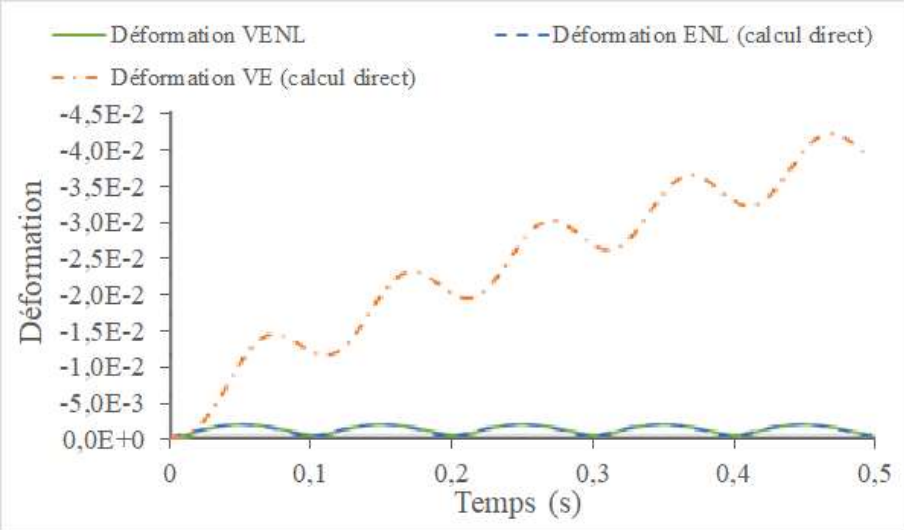


Figure 60 - Modélisation d'un passage de roue sur chaussée.

Comme précédemment, on observe une réponse initiale du modèle VENL 1D similaire à celle du modèle VE. Mais la réponse VENL 1D reste majorée par la valeur pic de la courbe ENL. Au cours de la décharge, la courbe VENL 1D suit une évolution quasi parallèle à la courbe VE tout en restant en-dessous de celle-ci. Elle reste en revanche au-dessus de la courbe ENL qui revient à zéro en même temps que la contrainte.

Pour compléter ces calculs, des premières simulations de mûrissement ont été réalisées pour le second chargement à plusieurs cycles en considérant 3 valeurs de E_1 : $100, 800, 2\,000$ MPa (Figure 61, Figure 62 et Figure 63). Les graphiques sont composés des déformations calculées pour les modèles ENL et VE de référence.



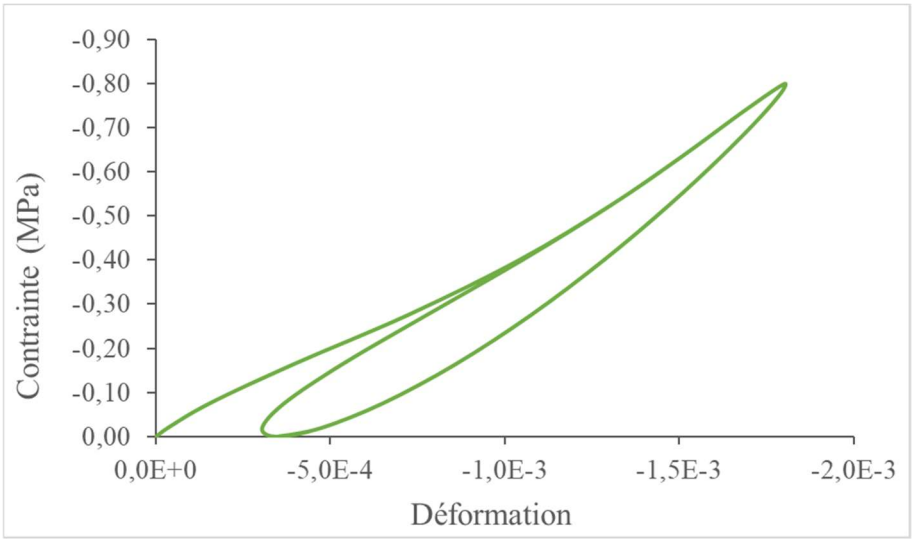


Figure 61 - Modélisation de la réponse sous chargement cyclique pour $E_1 = 100\ MPa$.

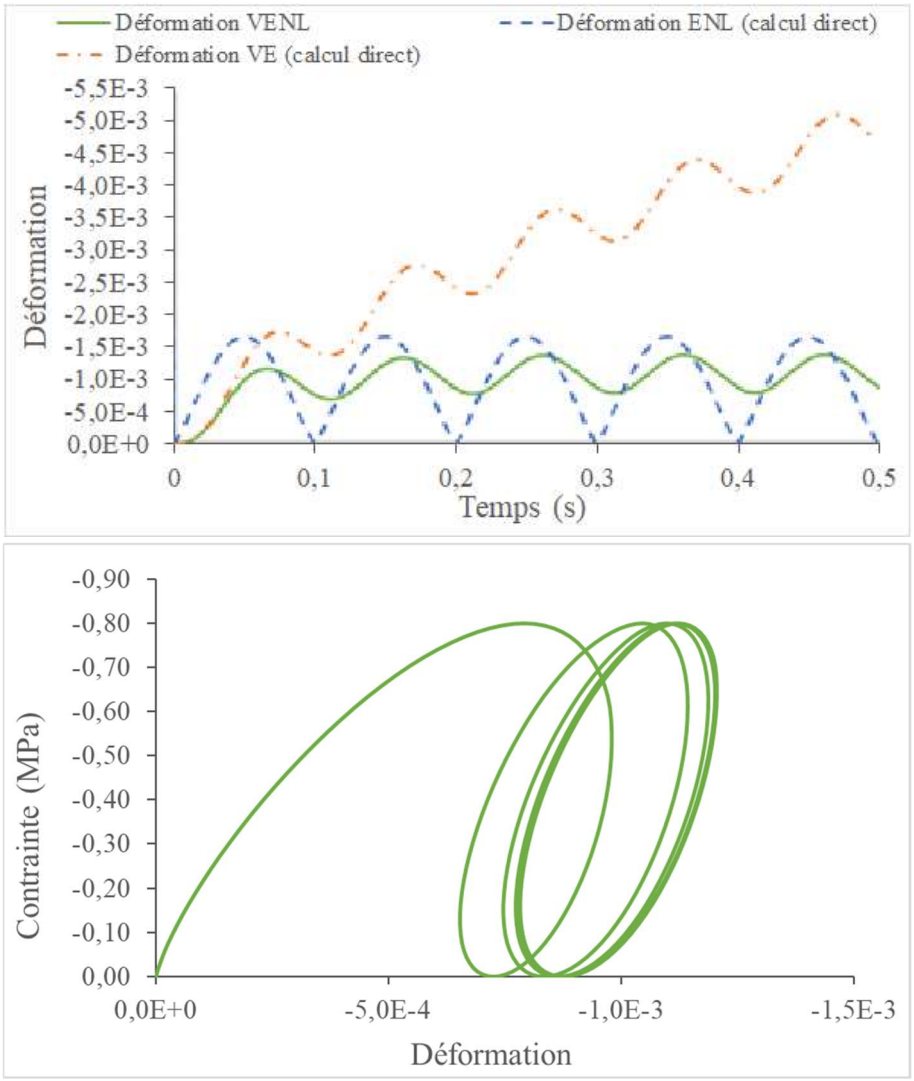


Figure 62 - Modélisation de la réponse sous chargement cyclique pour $E_1 = 800\ MPa$.

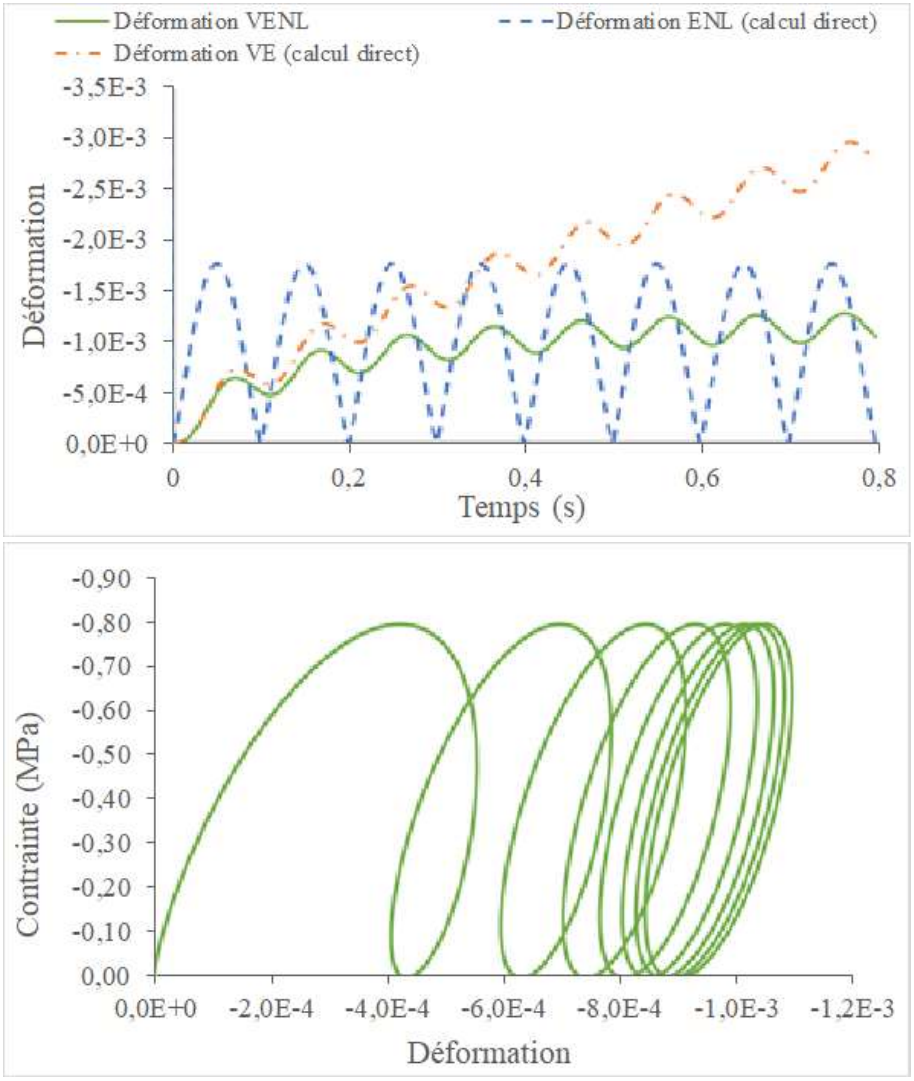


Figure 63 - Modélisation de la réponse sous chargement cyclique pour $E_1 = 2\,000\ MPa$.

L'ensemble des résultats figures illustre bien le poids croissant de la composante viscoélastique dans le modèle VENL avec l'augmentation de la valeur de module sécant E_1 et donc de A.

Les cycles stabilisés des boucles relativement fermées et de forme convexe de la Figure 61 s'ouvrent dans les Figure 62 et Figure 63 en prenant une forme elliptique. En rapportant ces cycles à la même origine (Figure 64), on observe également une rigidification du matériau avec des amplitudes de déformation de plus en plus faibles.

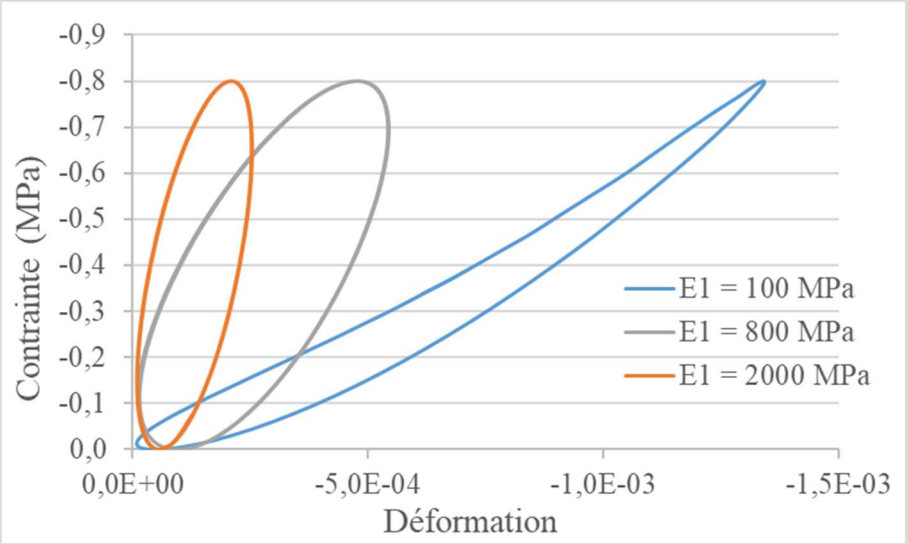


Figure 64 -Comparaison des cycles stabilisés ramenés à la même origine, donnés par le modèle VENL 1D pour 3 « stades de mûrissement ».

II.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire et de poser les bases du modèle VENL 1D construit à partir de l'introduction de série d'éléments à 3 branches composés d'un ressort, d'un amortisseur linéaire et d'une butée. Les simulations, effectuées à partir de l'algorithme de résolution associé, montrent la capacité du modèle à décrire un comportement évolutif entre ENL et VE à travers l'utilisation du paramètre de viscosité *A* que l'on cherchera donc à associer ultérieurement au mûrissement des enrobés à l'émulsion.

Dans l'objectif de proposer un modèle opérationnel pour l'étude du mûrissement des enrobés à l'émulsion à l'échelle du laboratoire et des structures, le modèle unidirectionnel doit être généralisé à une approche tridimensionnelle. Cela fait l'objet des développements proposés dans le chapitre suivant.

Chapitre III. Loi de comportement évolutive 3D pour enrobés à l'émulsion

III.1. Introduction

La démarche de construction du modèle 1D est étendue dans ce chapitre au développement du modèle VENL 3D pour modéliser le comportement des enrobés à l'émulsion. Les développements reposent sur les lois de comportement isotropes ENL et VE formulées dans un espace tridimensionnel à l'aide de leurs composantes volumique et déviatorique. La loi de Boyce est la base du comportement ENL tandis que la loi VE repose sur deux fonctions de fluage paraboliques propres aux composantes volumique et déviatorique avec, en commun, le paramètre de viscosité A. Ces lois sont alors décomposées en deux séries spectrales (volumique et déviatorique) interagissant entre elles dans le cas de la loi ENL 3D.

L'équivalence entre le modèle de Boyce ainsi décomposé en série et sa formulation directe est établie à partir d'un code numérique annexe. Elle est illustrée sur la simulation d'un essai triaxial.

La « fusion » des séries ENL et VE permet alors d'obtenir un modèle viscoélastique non linéaire VENL 3D pour enrobés à l'émulsion. La valeur donnée à A permet d'agir sur le poids respectif des composantes ENL et VE du modèle et, par là même, de rendre compte du mûrissement du matériau. Un modèle d'évolution de A fonction de l'histoire de la température est proposé. Il permet, au-delà du mûrissement physicochimique, de prendre en compte les effets accélérateurs du processus induit par la température.

L'algorithme de résolution numérique de la loi VENL 3D obtenue est présenté. Les applications du modèle à divers jeux de données pilotés en contraintes (cf. essai triaxial) ou en déformations ou en mode mixte (cf. essai œdométrique) sont enfin illustrées. L'incidence du paramètre A sur le comportement mécanique est également mise en évidence.

III.2. Représentation spectrale 3D du modèle ENL de Boyce

Nous proposons de construire la loi VENL 3D visée pour enrobés à l'émulsion sur la base de la loi de Boyce isotrope 3D (cf. Equations 1.12 et 1.13 présentées en bibliographie). Afin de pouvoir « fusionner » ultérieurement celle-ci avec une composante visqueuse, nous prolongeons la démarche de décomposition spectrale de ces lois, vues en une dimension au chapitre II, au cas tridimensionnel.

III.2.1. Décomposition spectrale 3D d'une loi ENL isotrope

Intéressons-nous dans un premier temps à la décomposition spectrale tensorielle d'une loi ENL isotrope. Considérons les équations volumique et déviatorique écrites initialement (comme dans le cas de la loi de Boyce) sous la forme :

$$\begin{cases} \varepsilon_v = \varepsilon_v^*(p,q) \\ \varepsilon_d = \varepsilon_d^*(p,\mathrm{q}) \end{cases}$$

En exprimant q en fonction de ε_d et p à partir de la seconde équation, il est possible de réécrire la première équation sous la forme $\varepsilon_v = \varepsilon_v(p, \varepsilon_d)$.

De façon duale, en exprimant p en fonction de ε_v et q à partir de la première équation, il est possible de réécrire la seconde équation sous la forme $\varepsilon_d = \varepsilon_d(q, \varepsilon_v)$.

Ainsi, la loi ENL, que nous retiendrons pour la suite, peut s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \varepsilon_v = \varepsilon_v(p, \varepsilon_d) \\ \varepsilon_d = \varepsilon_d(q, \varepsilon_v) \end{cases}$$

Focalisons-nous sur la première de ces deux relations. En considérant celle-ci à ε_d fixé, nous retrouvons une équation non linéaire reliant ε_v à p pouvant être interprétée, par analogie avec le cas 1D, comme la réponse d'une série d'éléments $\tilde{\varepsilon}_v$ de type « ressort + butée » pour laquelle s'ajouterait dans un effet de dilatance/contractance lié à ε_d à valeur p fixée. Autrement dit, on peut poser :

$$\varepsilon_v(p, \varepsilon_d) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_v(l_v, p, \varepsilon_d) dl_v + h_v(\varepsilon_d) \qquad \text{Equation 52}$$

où :

- l_v est la variable d'indexation des éléments attachés à la composante volumique du comportement du matériau (spectre dit « volumique » par la suite).
- $\tilde{\varepsilon}_v$ est la déformation de l'élément de type « ressort + butée » d'indexe l_v.
- $h_v(\varepsilon_d)$ est la déformation volumique positive (dilatance) ou négative (contractance) induite par la déformation déviatorique ε_d.

Les ouvertures de butée b_v des éléments $\tilde{\varepsilon}_v$ sont en plus ici fonction *a priori* de la valeur ε_d, soit : $b_v(l_v, \varepsilon_d)$.

Détermination de la fonction $b_v(l_v, \varepsilon_d)$: cas général

Le calcul de la fonction $b_v(l_v, \varepsilon_d)$ est voisin de celui de la fonction $b(l)$ présenté en 1D. Supposons, sans restriction, la fonction $b_v(l_v, \varepsilon_d)$ décroissante en l_v (Figure 65).

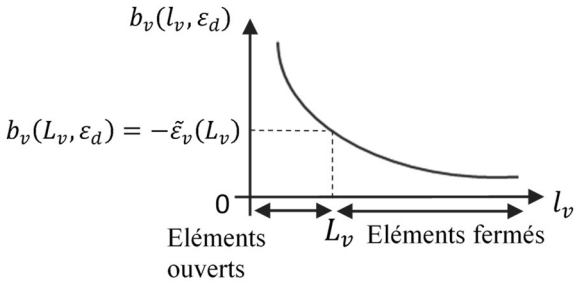


Figure 65 – Valeurs de butée $b_v(l_v, \varepsilon_d)$ des éléments du « spectre volumique ».

En considérant la valeur $L_v(p, \varepsilon_d)$, telle que $b_v(L_v, \varepsilon_d) = \frac{p}{E_s}$ qui délimite les éléments ouverts ($l_v < L_v$) des éléments fermés ($l_v > L_v$), on obtient la relation :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) = \underbrace{\frac{-p\,L_v(p,\varepsilon_d)}{E_s} - \int_{L_v(p,\varepsilon_d)}^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v}_{Déf.\ élastique} + \underbrace{h_v(\varepsilon_d)}_{Effet\ de\ cale} \qquad \text{Equation 53}$$

Après dérivation par rapport à p, on en déduit :

$$\frac{\partial \varepsilon_v(p,\varepsilon_d)}{\partial p} = \frac{-L_v(p,\varepsilon_d)}{E_s} \qquad \text{Equation 54}$$

En considérant le module de souplesse volumique tangent ($S_v(p,\varepsilon_d) = -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p}$), l'équation précédente s'écrit également :

$$S_v(p,\varepsilon_d) = \frac{L_v(p,\varepsilon_d)}{E_s} \qquad \text{Equation 55}$$

Enfin, en remplaçant p par $b_v E_s$ et en revenant à la variable courante l_v, on aboutit à l'équation définissant implicitement la fonction $b_v(l_v,\varepsilon_d)$ telle que :

$$S_v(b_v E_s,\varepsilon_d) = \frac{l_v}{E_s} \qquad \text{Equation 56}$$

De manière explicite, $b_v(l_v,\varepsilon_d)$ peut être exprimée à partir de la fonction réciproque ${S_v}^{-1}$ par l'expression suivante :

$$b_v(l_v,\varepsilon_d) = \frac{1}{E_s}{S_v}^{-1}\left(\frac{l_v}{E_s},\varepsilon_d\right) \qquad \text{Equation 57}$$

Toutefois, dans le cas de la loi de Boyce, b_v sera calculée numériquement à partir de la résolution de l'Equation 56.

Détermination de la fonction $h_v(\varepsilon_d)$: cas général

La détermination de $b_v(L_v,\varepsilon_d)$ permet de calculer la fonction $h_v(\varepsilon_d)$, et ce, pour n'importe quel choix P de p :

$$h_v(\varepsilon_d) = \varepsilon_v(P,\varepsilon_d) + \frac{P\,L_v(P,\varepsilon_d)}{E_s} + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v \qquad \text{Equation 58}$$

Il est cependant plus pratique (comme nous allons le voir dans le cas du modèle de Boyce) d'utiliser soit la limite $P \to 0^+$, soit la limite $P \to +\infty$. L'expression 3.7 devient alors :

$$h_v(\varepsilon_d) = \lim_{\substack{P\to 0^+ \\ \text{ou } P\to+\infty}} \varepsilon_v(P,\varepsilon_d) + \frac{P\,L_v(P,\varepsilon_d)}{E_s} + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v \qquad \text{Equation 59}$$

Il est à noter que les écritures ci-dessus supposent la convergence pour $l_v \to +\infty$ de l'intégrale généralisée $\int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v$ tout en considérant le cas $P \to +\infty$ conduisant à une valeur bornée de $L_v(P,\varepsilon_d)$. On peut alors voir que cette condition n'est pas strictement nécessaire, en notant qu'au final :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) = \frac{-p\,L_v(p,\varepsilon_d)}{E_s} + \lim_{P\to+\infty} \varepsilon_v(P,\varepsilon_d) + \frac{P\,L_v(P,\varepsilon_d)}{E_s} + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v \quad \text{Equation 60}$$

Le traitement de la composante déviatorique s'opère de façon analogue à celui de la composante volumique aux changements de notation près ($p \to q, v \leftrightarrow d$) et au changement de signe près entre ε_v et ε_d. Par analogies, nous retiendrons les expressions à suivre :

$$\varepsilon_d(q,\varepsilon_v) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_d(l_d,\mathrm{q},\varepsilon_v)dl_d + h_d(\varepsilon_v) \quad \text{Equation 61}$$

$$S_d(b_d E_s,\varepsilon_v) = \frac{l_d}{E_s} \text{ avec } S_d(q,\varepsilon_v) = \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial q} \quad \text{Equation 62}$$

$$b_d(L_d,\varepsilon_v) = \frac{1}{E_s} {S_d}^{-1}\left(\frac{l_d}{E_s},\varepsilon_v\right) \quad \text{Equation 63}$$

$$h_d(\varepsilon_v) = \lim_{\substack{Q\to 0^+ \\ \text{ou } Q\to+\infty}} \varepsilon_d(Q,\varepsilon_v) - \frac{Q\,L_d(Q,\varepsilon_v)}{E_s} - \int_{L_d(Q,\varepsilon_v)}^{+\infty} b_d(l_d,\varepsilon_v)\,dl_d \quad \text{Equation 64}$$

$$\varepsilon_d(q,\varepsilon_v) = L_d(q,\varepsilon_v)\frac{\mathrm{q}}{E_s} + \lim_{\substack{Q\to 0 \\ Q\to+\infty}} \varepsilon_d(Q,\varepsilon_v) - \frac{Q\,L_d(Q,\varepsilon_v)}{E_s} - \int_{L_d(Q,\varepsilon_v)}^{L_d(q,\varepsilon_v)} b_d(l_d,\varepsilon_v)\,dl_v \quad \text{Equation 65}$$

où pour rappel, $L_d(q,\varepsilon_v)$ est la solution de $b_d(L_d,\varepsilon_v) = \frac{q}{E_s}$.

III.2.2. Application à la loi de Boyce

Adaptons les formulations précédentes au cas de la loi de Boyce 3D, décrite en bibliographie. Nous obtenons les expressions suivantes :

$$\varepsilon_v^*(p,q) = -\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n\left(1-\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2\right) \quad \text{Equation 66}$$

$$\varepsilon_d^*(p,q) = \frac{q}{3\,G_a}\left(\frac{P_a}{p}\right)^{1-n} \quad \text{Equation 67}$$

avec $0 < n < 1$.

III.2.2.1. Partie volumique

III.2.2.1.1. Détermination de la fonction $b_v(l_v,\varepsilon_d)$

Par élimination de la variable q entre les deux équations 3.16 et 3.17, nous obtenons :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) = -\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n + \chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a P_a}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{p}\right)^n \quad \text{Equation 68}$$

$S_v(p,\varepsilon_d)$ est obtenu en dérivant l'équation 3.18 p tel que :

$$S_v(p,\varepsilon_d) = n\frac{1}{K_a}\left(\frac{P_a}{p}\right)^{1-n} + n\,\chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a{P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{p}\right)^{n+1} \qquad \text{Equation 69}$$

D'où l'équation permettant le calcul implicite de la fonction $b_v(l_v,\varepsilon_d)$, expression 3.6 :

$$\frac{n}{K_a}\left(\frac{P_a}{b_v E_s}\right)^{1-n} + n\,\chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a{P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{b_v E_s}\right)^{n+1} = \frac{l_v}{E_s} \qquad \text{Equation 70}$$

Dans le cas général, l'équation 3.20 ne peut être inversée analytiquement. Par contre, il est facile de voir que l'Equation 70 définit comme souhaité une fonction b_v décroissante en l_v et variant de $+\infty$ à 0 pour l_v allant de 0 à $+\infty$.

Précisons, en prévision de la suite, le comportement de b_v pour $l_v \to +\infty$.

Pour $l_v \to +\infty$, b_v est proche de 0 et par conséquent :

$$n\,\chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a{P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{b_v E_s}\right)^{1+n} \approx \frac{l_v}{E_s} \qquad \text{Equation 71}$$

d'où :

$$b_v \approx \left(n\,\chi\frac{9E_s\,{G_a}^2}{K_a{P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\right)^{\frac{1}{1+n}}\frac{P_a}{E_s}\frac{1}{l_v^{\frac{1}{1+n}}} \qquad \text{Equation 72}$$

Compte tenu de l'inégalité $\frac{1}{1+n} < 1$, on peut alors observer que l'intégrale généralisée $\int^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v$ sera divergente pour $l_v \to +\infty$ (et $\varepsilon_d > 0$).

III.2.2.1.2. Détermination de la fonction $\varepsilon_v(p,\varepsilon_d)$

Utilisons pour ce calcul, le choix $P \to +\infty$ et la relation :

$$\varepsilon_v(P,\varepsilon_d) = \frac{-p\,L_v(p,\varepsilon_d)}{E_s} + \lim_{P\to+\infty}\varepsilon_v(P,\varepsilon_d) + \frac{P\,L_v(P,\varepsilon_d)}{E_s} + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} b_v(l_v,\varepsilon_d)\,dl_v \qquad \text{Equation 73}$$

On obtient :

$$L_v(p,\varepsilon_d) = E_s\,S_v(p,\varepsilon_d) \qquad \text{Equation 74}$$

En considérant la forme $S_v(p,\varepsilon_d)$, exprimée par l'équation 3.19, l'expression 3.24 devient :

$$L_v(p,\varepsilon_d) = E_s\left(\frac{n}{K_a}\left(\frac{P_a}{p}\right)^{1-n} + n\,\chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a{P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{\mathrm{p}}\right)^{n+1}\right) \qquad \text{Equation 75}$$

Intéressons-nous alors à la quantité :

$$L = \lim_{P\to+\infty} \varepsilon_v(P,\varepsilon_d) + \frac{P\, L_v(P,\varepsilon_d)}{E_s} + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} b_v(l_v,\varepsilon_d)\, dl_v \qquad \text{Equation 76}$$

On remarque que $L_v(P,\varepsilon_d)$ tend vers 0 pour P→ +∞ d'après l'Equation 75. Nous obtenons :

$$\begin{aligned} &\varepsilon_v(P,\varepsilon_d) + \frac{P\, L_v(P,\varepsilon_d)}{E_s} + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} b_v(l_v,\varepsilon_d)\, dl_v \\ &\quad = -\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{P}{P_a}\right)^n + \chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a P_a}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{P}\right)^n \\ &\quad + P\left(\frac{n}{K_a}\left(\frac{P_a}{P}\right)^{1-n} + n\,\chi\frac{9\,{G_a}^2}{K_a{P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\left(\frac{P_a}{\mathrm{P}}\right)^{n+1}\right) \\ &\quad + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} b_v(l_v,\varepsilon_d)\, dl_v \end{aligned} \qquad \text{Equation 77}$$

De plus, en rappelant la plage de variation de n ($0 < n < 1$), nous obtenons :

$$L = \lim_{P\to+\infty} -(1-n)\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{P}{P_a}\right)^n + \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} b_v(l_v,\varepsilon_d)\, dl_v \qquad \text{Equation 78}$$

Observons que pour de grandes valeurs de P, nous avons les simplifications suivantes :

$$L_v(P,\varepsilon_d) \approx E_s\frac{n}{K_a}\left(\frac{P_a}{P}\right)^{1-n} \qquad \text{Equation 79}$$

$$(1-n)\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{P}{P_a}\right)^n \approx \int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{+\infty} \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{(1-n)}} dl_v \qquad \text{Equation 80}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \mathrm{L} = \lim_{P\to+\infty} &\int_{L_v(P,\varepsilon_d)}^{L_v(p,\varepsilon_d)} \left(b_v(l_v,\varepsilon_d) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{(1-n)}}\right) dl_v \\ &- \int_{L_v(p,\varepsilon_d)}^{+\infty} \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-\mathrm{n}}} dl_v \end{aligned} \qquad \text{Equation 81}$$

Posons alors les deux changements de variable suivants :

$$X = b_v(l_v,\varepsilon_d) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-n}} \qquad \text{Equation 82}$$

et :

$$Y = \frac{X}{\frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-n}}} \qquad \text{Equation 83}$$

Compte tenu de l'Equation 70, on obtient l'équation en Y :

$$(1+Y)^{1+n} - (1+Y)^{2n} - \chi\left(\frac{3\,G_a\varepsilon_d}{Pa}\right)^2\left(\frac{K_a l_v}{nE_S}\right)^{\frac{2n}{1-n}} = 0 \qquad \text{Equation 84}$$

Lorsque l_v tend vers 0, Y tend également vers 0. L'équation 3.33 s'écrit alors :

$$Y \approx \frac{1}{1-n}\left(\frac{K_a l_v}{nE_S}\right)^{\frac{2n}{1-n}} \chi\left(\frac{3\,G_a\varepsilon_d}{Pa}\right)^2 \qquad \text{Equation 85}$$

Ainsi, l'équation 3.31 permet de redéfinir X comme suit :

$$X \approx \frac{n}{1-n}\left(\frac{K_a}{nE_S}\right)^{\frac{n}{1-n}} \chi \frac{(3\,G_a\varepsilon_d)^2}{P_a K_a} \frac{1}{l_v^{\frac{1-2n}{1-n}}} \qquad \text{Equation 86}$$

Or l'exposant $\frac{1-2n}{1-n}$ étant strictement inférieur à 1, l'intégrale $\int_0 \mathrm{X}\, dl_v$ est intégrable en 0. L peut alors s'écrire selon la forme suivante :

$$\mathrm{L} = \int_0^{L_v(p,\varepsilon_d)} \left(b_v(l_v,\varepsilon_d) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-\mathrm{n}}} \right) dl_v - \int_{L_v(p,\varepsilon_d)}^{+\infty} \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-\mathrm{n}}} dl_v \qquad \text{Equation 87}$$

Finalement, la déformation volumique $\varepsilon_v(p,\varepsilon_d)$ d'écrit comme suit :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) = -L_v(p,\varepsilon_d)\frac{p}{E_S} + \int_0^{L_v(p,\varepsilon_d)} \left(b_v(l_v,\varepsilon_d) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-n}} \right) dl_v - \int_{L_v(p,\varepsilon_d)}^{+\infty} \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-\mathrm{n}}} dl_v \qquad \text{Equation 88}$$

ou encore :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) = -L_v(p,\varepsilon_d)\frac{p}{E_S} - \frac{1-n}{n}\frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a L_v(p,\varepsilon_d)^n}\right)^{\frac{1}{1-n}} + \int_0^{L_v(p,\varepsilon_d)} \left(b_v(l_v,\varepsilon_d) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-n}} \right) dl_v \qquad \text{Equation 89}$$

III.2.2.2. Partie déviatorique

III.2.2.2.1. Détermination de la fonction $b_d(l_d, \varepsilon_v)$

Comme vu précédemment, le formalisme général demande, pour la détermination de la fonction $b_d(l_d, \varepsilon_v)$, de calculer le module sécant $S_d(q, \varepsilon_v)$ défini par $\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial q}$ à déformation volumique ε_v constante. La fonction $\varepsilon_d(q, \varepsilon_v)$ ne peut toutefois être déterminée de façon explicite pour la loi de Boyce. Différentions alors les Equation 66, Equation 67 pour ε_v^* constante. On obtient :

$$-\frac{n\,P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n\left(1-\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2\right)\frac{dp}{p}-2\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2\frac{dp}{p}+2\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2\frac{dq}{q}=0\Longrightarrow \quad \text{Equation 90}$$

$$\frac{dp}{p}\frac{q}{dq}=\frac{2\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2}{n\left(1-\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2\right)+2\chi\left(\frac{q}{p}\right)^2}=\frac{2\,\chi}{n\left(\frac{p}{q}\right)^2+\chi(2-n)} \quad \text{Equation 91}$$

$$d\varepsilon_d^*(p,q)=-(1-n)\frac{q}{3\,P_a\,G_a}\left(\frac{P_a}{p}\right)^{2-n}dp+\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{P_a}{p}\right)^{1-n}dq \quad \text{Equation 92}$$

D'où :

$$S_d(p,q)=\frac{d\varepsilon_d^*(p,q)}{dq}=\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{P_a}{p}\right)^{1-n}\left(1-(1-n)\frac{q}{p}\frac{dp}{dq}\right) \quad \text{Equation 93}$$

Soit :

$$S_d(p,q)=\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{Pa}{p}\right)^{1-n}\left(1-\frac{(1-n)2\chi}{\left(\frac{p}{q}\right)^2 n+\chi(2-n)}\right) \quad \text{Equation 94}$$

Les équations, permettant le calcul implicite de la fonction $b_d(l_d, \varepsilon_v)$ d'après le formalisme général vu précédemment, sont reprises ci-dessous :

$$S_d(p, b_d E_s)=\frac{l_d}{E_s}\Rightarrow\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{Pa}{p}\right)^{1-n}\left(1-\frac{(1-n)2\chi}{\left(\frac{p}{b_d E_s}\right)^2 n+\chi(2-n)}\right)=\frac{l_d}{E_s} \quad \text{Equation 95}$$

$$\varepsilon_v^*(p, b_d E_s)=\varepsilon_v\Rightarrow-\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n\left(1-\chi\left(\frac{b_d E_s}{p}\right)^2\right)=\varepsilon_v \quad \text{Equation 96}$$

Dans le cas général, le système, composé des équations 3.44 et 3.45, ne peut être inversé analytiquement. En pratique, dans les codes de calcul que nous avons développés, b_d est déterminé numériquement à partir de la résolution itérative des Equation 95 et Equation 96, via un algorithme

de résolution de Newton. L'annexe 3 montre qu'en partant des Equation 95 et Equation 96, on retrouve bien que b_d est monotone décroissant avec l_d.

III.2.2.2.2. Discussion

Précisons néanmoins le comportement de b_d pour b_d au voisinage de 0 et de $+\infty$.

Cas n°1 : $\varepsilon_v = 0$.

Pour ce premier cas, l'élimination de p entre les Equation 95 et Equation 96 donne :

$$b_d = \frac{Pa}{\sqrt{\chi}E_s}\left(\frac{n}{3\,G_a}\frac{E_s}{l_d}\right)^{\frac{1}{1-n}} \qquad \text{Equation 97}$$

Cette équation montre que la fonction b_d est définie pour $0 \leq l_d \leq +\infty$ et qu'elle est décroissante avec l_d. En l'occurrence, $b_d(0) = +\infty$, $b_d(+\infty) = 0$.

Cas n°2 : $\varepsilon_v < 0$.

Pour$b_d \to 0$, selon les Equation 95 et Equation 96, l_d est bornée par sa valeur maximale :

$$l_{d\,max} = \frac{E_s}{3\,G_a}\left(\frac{-Pa}{\varepsilon_v K_a}\right)^{\frac{1-n}{n}} \qquad \text{Equation 98}$$

Pour $b_d \to +\infty$, posons la valeur de p solution de l'Equation 96 sous la forme $p = \sqrt{\chi}E_s b_d + y$, en supposant y petit devant b_d. Nous obtenons alors :

$$-\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{\sqrt{\chi}E_s b_d + y}{P_a}\right)^n\left(1-\chi\left(\frac{\sqrt{\chi}E_s b_d + y}{b_d E_s}\right)^{-2}\right) = \varepsilon_v \qquad \text{Equation 99}$$

Soit, par approximation :

$$-\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{\sqrt{\chi}E_s b_d}{P_a}\right)^n\left(1-\left(1+\frac{y}{\sqrt{\chi}E_s b_d}\right)^{-2}\right) \approx \varepsilon_v \qquad \text{Equation 100}$$

$$\text{Ou } -\frac{2\,P_a}{K_a}\left(\frac{\sqrt{\chi}E_s b_d}{P_a}\right)^n\frac{y}{\sqrt{\chi}E_s b_d} \approx \varepsilon_v \qquad \text{Equation 101}$$

Ainsi, p peut s'approximer par :

$$p \approx \sqrt{\chi}E_s b_d - \frac{\varepsilon_v K_a}{2}\left(\frac{\sqrt{\chi}E_s b_d}{P_a}\right)^{1-n} \qquad \text{Equation 102}$$

En reportant 3.51 dans l'Equation 95, nous obtenons :

$$b_d \approx \frac{Pa}{\sqrt{\chi}E_s}\left(\frac{n}{3\,G_a}\frac{E_s}{l_d}\right)^{\frac{1}{1-n}} \qquad \text{Equation 103}$$

Cas n°3 : $\varepsilon_v > 0$.

À partir de l'Equation 96, au voisinage de 0, on obtient l'approximation suivante :

$$b_d \approx \frac{p}{E_s}\sqrt{\frac{1}{\chi}\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v} \qquad \text{Equation 104}$$

Ou encore :

$$\frac{p}{P_a} \approx \left(\frac{E_s}{p_a}\sqrt{\frac{\chi\, p_a}{K_a\varepsilon_v}}\, b_d\right)^{\frac{2}{2-n}} \qquad \text{Equation 105}$$

En considérant 3.54 dans l'Equation 95, nous obtenons :

$$\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{E_s}{p_a}\sqrt{\frac{\chi\, p_a}{K_a\varepsilon_v}}\, b_d\right)^{-\frac{2-2n}{2-n}}\left(1-\frac{(1-n)2\chi}{\left(\frac{p}{b_d E_s}\right)^2 n+\chi(2-n)}\right)\approx\frac{l_d}{E_s} \qquad \text{Equation 106}$$

Or :

Ainsi, au voisinage de 0, nous en déduisons l'expression suivante :

$$\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{E_s}{p_a}\sqrt{\frac{\chi\, p_a}{K_a\varepsilon_v}}\, b_d\right)^{-\frac{2-2n}{2-n}}\frac{n}{2-n}\approx\frac{l_d}{E_s} \qquad \text{Equation 107}$$

Ou encore :

$$b_d \approx \left(\frac{n}{2-n}\frac{E_s}{3\,G_a}\right)^{\frac{2-n}{2-2n}}\frac{p_a}{E_s}\sqrt{\frac{K_a\varepsilon_v}{\chi\, p_a}}\frac{1}{l_d^{\frac{2-n}{2-2n}}} \qquad \text{Equation 108}$$

Par contre, pour de grandes valeurs de b_d, nous pouvons écrire :

$$b_d \approx \frac{p}{E_s}\sqrt{\frac{1}{\chi}} \qquad \text{Equation 109}$$

Soit :

$$p \approx \sqrt{\chi}\, E_s b_d \qquad \text{Equation 110}$$

En considérant l'expression 3.60, l'équation 3.44 se simplifie comme suit :

$$\frac{n}{3\,G_a}\left(\frac{Pa}{\sqrt{\chi}\, E_s b_d}\right)^{1-n}\approx\frac{l_d}{E_s} \qquad \text{Equation 111}$$

Et $b_d \approx \frac{p_a}{\sqrt{\chi}\,E_s}\left(\frac{n}{3\,G_a}\frac{E_s}{l_d}\right)^{\frac{1}{1-n}}$ Equation 112

III.2.2.2.3. Détermination de la fonction $\varepsilon_d(q, \varepsilon_v)$

Utilisons pour ce calcul, le choix $Q \to 0$ dans l'expression de $\varepsilon_d(q, \varepsilon_v)$:

$$\varepsilon_d(q,\varepsilon_v) = L_d(q,\varepsilon_v)\frac{\mathrm{q}}{E_s} + \lim_{Q\to 0} \varepsilon_d(Q,\varepsilon_v) - \frac{Q\, L_d(Q,\varepsilon_v)}{E_s} - \int_{L_d(Q,\varepsilon_v)}^{L_d(q,\varepsilon_v)} b_d(l_d,\varepsilon_v)\, dl_d \qquad \text{Equation 113}$$

Rappelons que :

$$\lim_{Q\to 0} \varepsilon_d(Q,\varepsilon_v) = 0 \text{ et } \lim_{Q\to 0} \varepsilon_d(Q,\varepsilon_v) = \frac{Q}{E_s} \qquad \text{Equation 114}$$

$$\varepsilon_d(q,\varepsilon_v) = L_d(q,\varepsilon_v)\frac{\mathrm{q}}{E_s} - \lim_{Q\to 0}\left(\frac{Q\, L_d(Q,\varepsilon_v)}{E_s} + \int_{L_d(Q,\varepsilon_v)}^{L_d(q,\varepsilon_v)} b_d(l_d,\varepsilon_v)\, dl_d\right) \qquad \text{Equation 115}$$

L'étude précédente de b_d montre que deux cas sont à distinguer : $\varepsilon_v \leq 0$ et $\varepsilon_v > 0$.

Sous cas n°1 : $\varepsilon_v \leq 0$

Dans ce cas, $L_d(Q,\varepsilon_v) \to \frac{E_s}{3\,G_a}\left(\frac{-P}{\varepsilon_v K_a}\right)^{\frac{1-n}{n}}$, d'où $\frac{Q\, L_d(Q,\varepsilon_v)}{E_s} \to 0$

et :

$$\varepsilon_d(q,\varepsilon_v) = L_d(q,\varepsilon_v)\frac{\mathrm{q}}{E_s} + \int_{L_d(q,\varepsilon_v)}^{\frac{E_s}{3\,G_a}\left(\frac{-Pa}{\varepsilon_v K_a}\right)^{\frac{1-n}{n}}} b_d(l_d,\varepsilon_v)\, dl_d \qquad \text{Equation 116}$$

Sous cas n°2 : $\varepsilon_v > 0$

Dans ce cas, $L_d(Q,\varepsilon_v) \to +\infty$. L'Equation 108 montre qu'en remplaçant, dans celle-ci, $b_d E_s$ par Q, nous obtenons :

$$\frac{L_d}{E_s} \approx \frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{\mathrm{Q}}{p_a}\sqrt{\frac{\chi\, p_a}{K_a}\varepsilon_v}\right)^{-\frac{2-2n}{2-n}} \frac{n}{2-n} \qquad \text{Equation 117}$$

d'où :

$$\frac{Q\, L_d}{E_s} \approx \frac{Q^{\frac{n}{2-n}}}{3\,G_a}\left(\frac{1}{p_a}\sqrt{\frac{\chi\, p_a}{K_a}\varepsilon_v}\right)^{-\frac{2-2n}{2-n}} \frac{n}{2-n} \to 0 \text{ pour } Q \to 0 \qquad \text{Equation 118}$$

On peut vérifier par ailleurs que l'intégrale $\int b_d(l_d,\varepsilon_v)\, dl_d$ est convergente en $+\infty$. En effet pour l_d grand, l'Equation 115 montre que b_d est de l'ordre de $\frac{1}{l_d^{\frac{2-n}{2-2n}}}$ pour lequel l'exposant $\frac{2-n}{2-2n}$ est supérieur à 1 compte tenu de l'inégalité $n > 1$. Finalement, $\varepsilon_d(q,\varepsilon_v)$ se simplifie par :

$$\varepsilon_d(q,\varepsilon_v) = L_d(q,\varepsilon_v)\frac{q}{E_s} + \int_{L_d(q,\varepsilon_v)}^{+\infty} b_d(l_d,\varepsilon_v)\, dl_d \qquad \text{Equation 119}$$

Il est à noter que si p et q sont connus (voir plus loin l'algorithme à p et q donnés), il est avantageux de remplacer, dans les Equation 116 et Equation 119, la fonction $L_d(q,\varepsilon_v)$ par la fonction $L_d^*(p,q)$ solution de l'équation :

$$L_d^*(p,q) = E_s S_d(p,q) \qquad \text{Equation 120}$$

Nous obtenons ainsi :

$$L_d^*(p,q) = \frac{E_s}{3\,G_a}\left(\frac{Pa}{p}\right)^{1-n}\left(1 - \frac{(1-n)2\chi}{\left(\frac{p}{q}\right)^2 n + \chi(2-n)}\right) \qquad \text{Equation 121}$$

III.2.3. Interprétation

Les Equation 89, Equation 116 et Equation 119 permettent de compléter l'interprétation « spectrale » vue dans le cas unidimensionnel. Chaque spectre est constitué d'éléments mis en série et en nombre infini indicé par les variables continues l_v et l_q pour la partie volumique et déviatorique, respectivement, définies sur $\mathbb{N}$ ou $\mathbb{R}^+$. L'ensemble des éléments d'un spectre partage la même composante de contrainte mais avec sa propre déformation.

Les ouvertures de butées sont représentées décroissantes avec l_v et l_q comme établi lors de l'étude des fonctions $b_v(l_v,\varepsilon_d)$ et $b_d(l_d,\varepsilon_v)$. L'influence de la déformation déviatorique sur la déformation volumique et inversement de la déformation volumique sur la déformation déviatorique (traduites à travers les dépendances de b_v vis-à-vis de ε_d et b_d vis-à-vis de ε_v) est traduite par l'introduction de cales et de barres rigides venant modifier les ouvertures de butée pour chaque élément spectral. Il y a lieu par ailleurs pour le spectre volumique de complexifier la structure élémentaire « ressort + butée » par l'introduction d'un 'double fond'.

Revenons ainsi dans un premier temps sur la structure des éléments volumique et déviatorique avant de redonner la description complète du modèle basé sur l'interaction des spectres volumique et déviatorique.

III.2.3.1. Partie volumique :

Considérons l'expression Equation 88 de la déformation volumique afin de définir la forme des éléments constituant le spectre volumique (Figure 66). Sa forme est rappelée ci-dessous :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) = \underbrace{\frac{-p\,L_v(p,\varepsilon_d)}{E_s} - \int_{L_v(p,\varepsilon_d)}^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d)\, dl_v}_{Déf.\ élastique} + \underbrace{\int_0^{+\infty} b_v(l_v,\varepsilon_d) - b_v(l_v,0)\, dl_v}_{Effet\ de\ cale} \qquad \text{Equation 122}$$

$$\text{avec} : b_v(l_v, 0) = \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-n}} \qquad \text{Equation 123}$$

Les termes de l'équations 3.71, composant ε_v, conduisent alors à introduire la représentation des éléments constitutifs du spectre volumique vue en Figure 66.

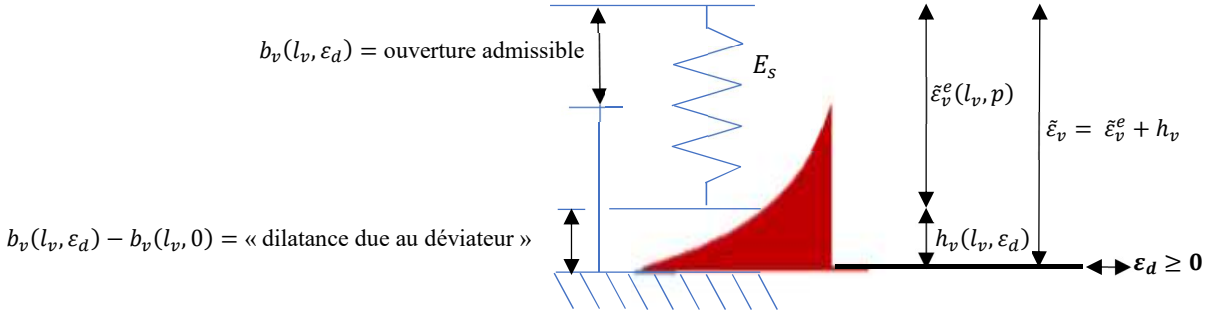


Figure 66 – Représentation d'un élément volumique.

Ces éléments sont à présent constitués de « ressort + butée + double fond + cale ». Les calculs montrent que la forme de la cale est convexe. Les Figure 67, Figure 68, Figure 69 et Figure 70 montrent le fonctionnement en compression d'un tel élément combiné à une translation horizontale de la cale (de forme simplifiée ici) associée à la déformation déviatorique.

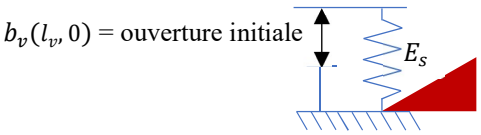


Figure 67 – Elément ouvert à l'état initial. ($p = 0, \varepsilon_d = 0$)

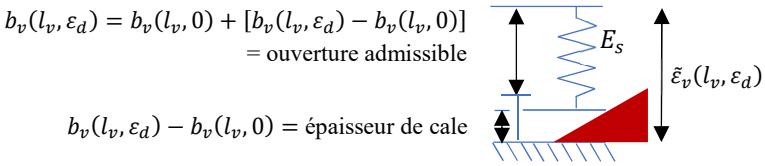


Figure 68 - Déformation de l'élément après déformation du spectre déviatorique seul ($p = 0, \varepsilon_d > 0$).

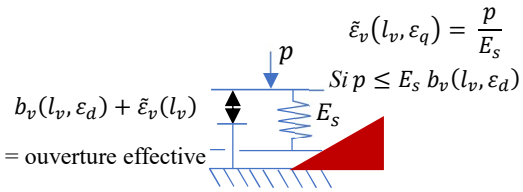


Figure 69 - Déformation de l'élément ouvert après application d'une contrainte volumique $0 \leq p \leq E_s\ b_v(l_v, \varepsilon_d)$ ($\varepsilon_d \geq 0$).

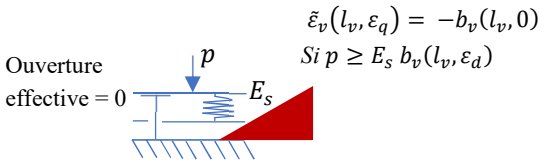


Figure 70 - Déformation de l'élément fermé pour une contrainte volumique $E_s\ b_v(l_v, \varepsilon_d) \leq p$ ($\varepsilon_d \geq 0$).

La Figure 67 illustre qu'en l'absence de déviateur, on obtient le même spectre et le même fonctionnement que le modèle ENL 1D.

Les Figure 66 et Figure 68 montrent qu'à effort de compression nul et en présence de déviateur, les cales rentrent à l'intérieur du « double fond » venant ainsi créer une dilatance $b_v(l_v, \varepsilon_d) - b_v(l_v, 0)$ et augmenter d'autant l'ouverture de butée initiale. Cette ouverture, fonction à la fois de l'ouverture initiale et de l'introduction de la cale, sera appelée, par la suite, « ouverture admissible ».

En présence de déviateur et de contrainte volumique, les Figure 69 et Figure 70 montrent que le fonctionnement de l'élément est identique à celui du spectre ENL 1D et se cumule aux effets de variation de butée et de dilatance décrits précédemment. On constate notamment que les éléments (suffisamment comprimés pour être fermés) ont une déformation insensible au déviateur. Leurs déformations restent égales à $-b_v(l_v, 0)$.

Comme vu dans le cas unidimensionnel, la mise en compression du spectre volumique (à déformation déviatorique constante) fait diminuer les « ouvertures effectives » de chaque élément jusqu'à ce que la déformation de certains devienne égale à leur valeur admissible. Dans ce cas, ces éléments se ferment et empêchent toute déformation $\tilde{\varepsilon}_v$ ultérieure, contribuant à la rigidification progressive de la série.

Il est à noter qu'à effort de compression constant, un accroissement de la déformation déviatorique entraîne une dilatation de l'ensemble de la série et peut donc conduire à des situations pour lesquelles ε_v est positive.

III.2.3.2. Partie déviatorique :

Reprenons à présent l'Equation 116 (pour $\varepsilon_v < 0$) et l'Equation 119 (pour $\varepsilon_v > 0$). Ces deux expressions ne font plus intervenir d'effet similaire à celui de la dilatance vue en volumique. Elles peuvent être traduites par des éléments « ressort + butée + cale ». En revanche, la dissymétrie des cas $\varepsilon_v > 0$ et $\varepsilon_v < 0$ conduit à introduire des formes de cale comme celle montrée en Figure 71, avec méplat à gauche et courbe convexe à droite, et ce, avec une correspondance des côtes du méplat et du sommet de la butée.

Notons $\varepsilon_{v\,coin}$ la valeur de ε_v pour laquelle le coin supérieur droit de la cale est à l'aplomb de la butée. Cette valeur est solution de l'équation $L_d(0, \varepsilon_{v\,coin}) = l_d$ soit :

$$\varepsilon_{v\,coin} = -\frac{Pa}{K_a}\left(\frac{E_s}{3\,G_a l_d}\right)^{\frac{n}{1-n}} \qquad \text{Equation 124}$$

La déformation de tels éléments sera donc nulle pour $\varepsilon_v < \varepsilon_{v\,coin}$ quelle que soit la valeur de q.

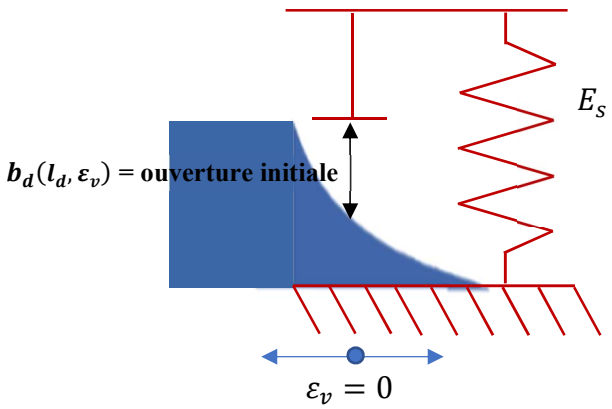


Figure 71 – Représentation d'un élément déviatorique.

Plus précisément, les Figure 72 à Figure 82 illustrent le fonctionnement général de l'élément (avec cale de forme simplifiée ici du côté convexe).

La Figure 72 montre l'élément déviatorique initial. Les Figure 73, Figure 74 et Figure 75 montrent les variations d'ouverture admissible d'un tel élément soumis à l'influence d'une déformation volumique en l'absence de déviateur.

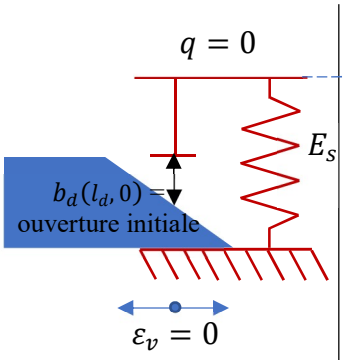


Figure 72 - Elément ouvert à l'état initial ($q = 0, \varepsilon_v = 0$).

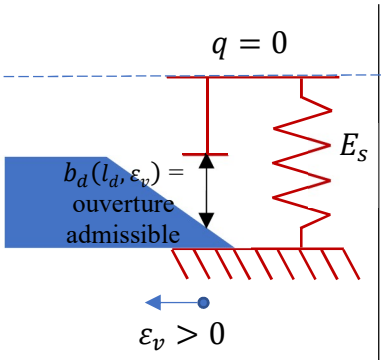


Figure 73 – Ouverture admissible pour $q = 0, \varepsilon_v > 0$.

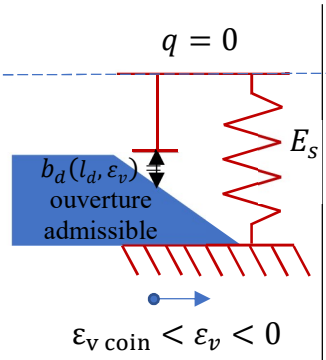


Figure 74 - Ouverture admissible pour $q = 0, \varepsilon_{v\ coin} < \varepsilon_v < 0$.

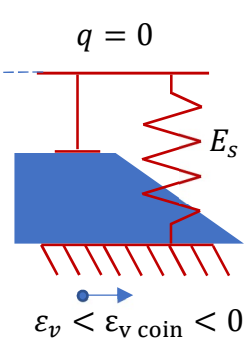


Figure 75 - Elément en butée pour $q = 0, \varepsilon_v < \varepsilon_{v\ coin} < 0$.

Les Figure 77, Figure 78 et Figure 79 montrent le fonctionnement de cet élément déviatorique pour $q > 0$ et $\varepsilon_v < 0$.

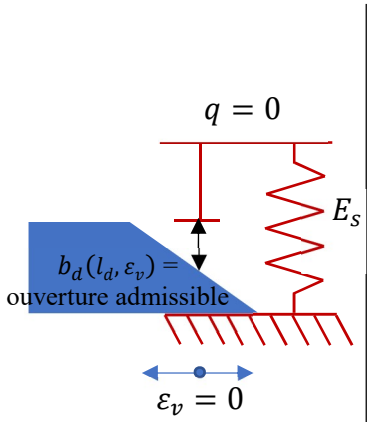


Figure 76 - Elément ouvert à l'état initial ($q = 0$).

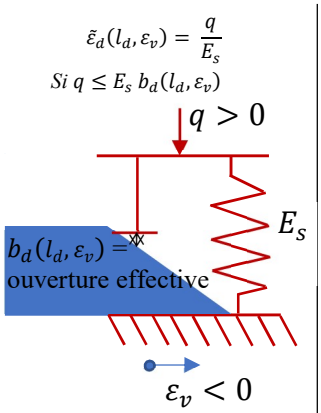


Figure 77 - Elément ouvert pour $0 \leq q \leq E_s\ b_d(l_d, \varepsilon_v)$ ($\varepsilon_{v\ coin} < \varepsilon_v < 0$).

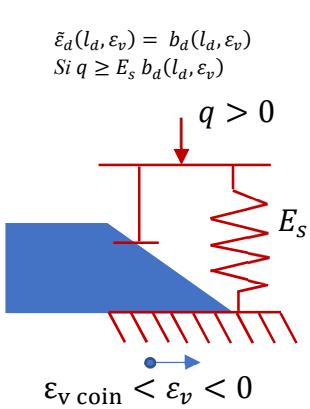


Figure 78 - Elément fermé pour $E_s\ b_d(l_d, \varepsilon_v) \leq q$ ($\varepsilon_{v\ coin} < \varepsilon_v < 0$).

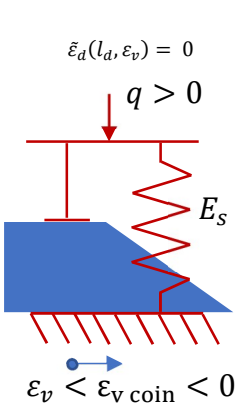


Figure 79 - Elément fermé et à déformation nulle pour $E_s\ b_d(l_d, \varepsilon_v) \leq q$ ($\varepsilon_v < \varepsilon_{v\ coin} < 0$).

Les Figure 80, Figure 81 et Figure 82 montrent le fonctionnement de l'élément pour $\varepsilon_v > 0$.

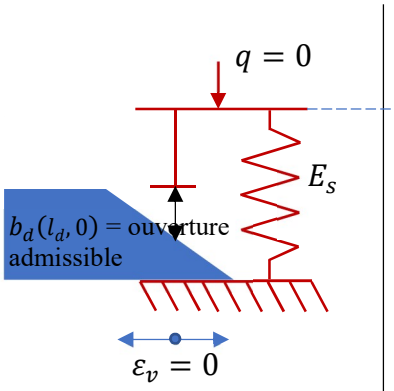


Figure 80 – Elément ouvert pour ($q = 0, \varepsilon_v = 0$).

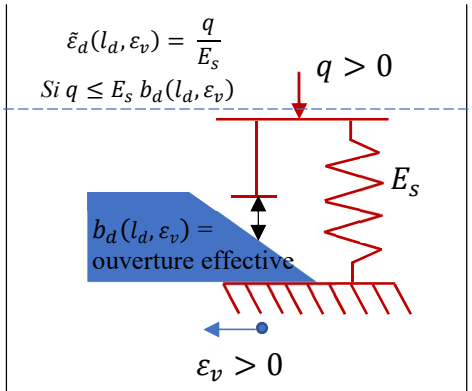


Figure 81 - Elément ouvert pour $0 \leq q \leq E_s\ b_d(l_d, \varepsilon_v)$ ($\varepsilon_v \geq 0$).

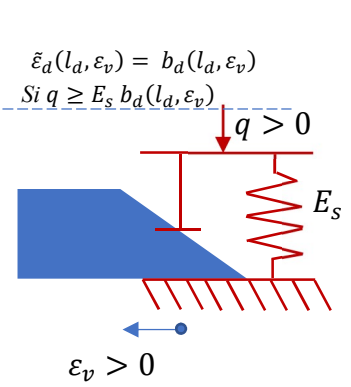


Figure 82 – Elément fermé pour $E_s\ b_d(l_d, \varepsilon_v) \leq q$ ($\varepsilon_v \geq 0$).

III.2.3.3. Combinaison des deux spectres

La Figure 83 représente l'ensemble des spectres volumique et déviatorique ainsi que leur interaction grâce à l'introduction de cales et de barres rigides. Ces dernières permettent de répercuter la même déformation ε_v à l'ensemble des cales déviatoriques et *vice versa*. Finalement, ce modèle est équivalent aux deux équations ENL 3D du modèle de Boyce comme nous le vérifierons numériquement ultérieurement.

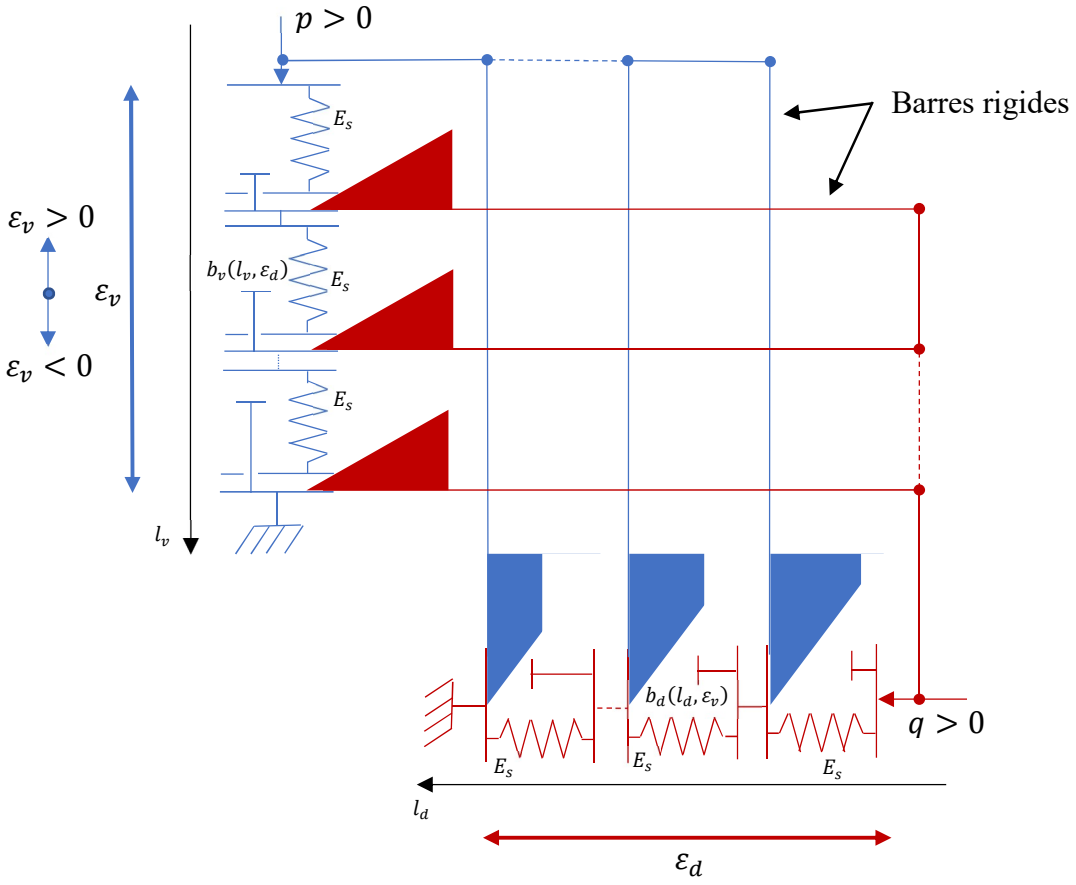


Figure 83 - Représentation spectrale du modèle ENL 3D.

III.2.4. Calcul numérique de la réponse du spectre ENL 3D à efforts p et q donnés

III.2.4.1. Partie volumique

III.2.4.1.1. Calcul de la fonction $b_v(l_v, \varepsilon_d) - b_v(l_v, 0)$ pour l_v et ε_d données

Pour le calcul de cette quantité, à l_v et ε_d données, nous sommes repartis de l'Equation 84 en Y. Ce calcul est effectué numériquement dans le code de calcul ENL 3D que nous avons développé sur la base de l'algorithme itératif de Newton. A chaque itération, nous résolvons les équations suivantes :

$$\left[(1+n)\left(1+Y^{(i)}\right)^n - 2n\left(1+Y^{(i)}\right)^{2n-1}\right]\delta Y^{(i+1)} = \chi\left(\frac{3\,G_a\varepsilon_d}{Pa}\right)^2\left(\frac{K_a l_v}{nE_S}\right)^{\frac{2n}{1-n}} - \left(1+Y^{(i)}\right)^{1+n} - \left(1+Y^{(i)}\right)^{2n} \quad \text{Equation 125}$$

$$Y^{(i+1)} = Y^{(i)} + \delta Y^{(i+1)} \quad \text{Equation 126}$$

où i = indice d'itération, S_v = module de souplesse volumique donné par l'Equation 69.

La dérivée $\frac{\partial S_v(p,\varepsilon_d)}{\partial p}$ est ici calculée analytiquement. L'algorithme est initialisé en imposant :

$$Y^{(0)} = \frac{\chi {\varepsilon_q}^2}{1-n}\left(\frac{K_a}{nE_S}\right)^{\frac{2n}{1-n}}\left(\frac{3G_a}{P_a}\right)^2 {l_v}^{\frac{2n}{1-n}} \quad \text{Equation 127}$$

Le critère d'arrêt est défini par $\left|\delta Y^{(i+1)}\right| > \left|\frac{Y^{(i+1)}}{1000}\right|$

Par la suite, il est facile de trouver la valeur de X en inversant l'Equation 83.

III.2.4.1.2. Calcul de la déformation volumique de spectre $\varepsilon_v(p, \varepsilon_d)$

Le calcul de l'intégrale Equation 89, est effectué numériquement par la méthode des rectangles après discrétisation de la variable l_v en un nombre fini de valeurs $l_{v\,0} = 0 < l_{v\,1} < \cdots < l_{v\,j} < \cdots < l_{v\,N} = L_v(p, \varepsilon_d)$, Equation 75.

En chaque milieu d'intervalle $\left[l_{v\,j}, l_{v\,j+1}\right]$, nous calculons la quantité $b_v\left(l_{v\,j+1/2}, \varepsilon_d\right) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_{v\,j+1/2}}\right)^{\frac{1}{1-n}}$ ($l_{v\,j+1/2} = \frac{l_{v\,j} + l_{v\,j+1}}{2}$). On obtient alors :

$$\varepsilon_v(p,\varepsilon_d) \approx -L_v(p,\varepsilon_d)\frac{p}{E_S} - \frac{1-n}{n}\frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a L_v(p,\varepsilon_d)^n}\right)^{\frac{1}{1-n}} + \sum_{j=0}^{N_v-1}\left(b_v\left(l_{v\,j+1/2},\varepsilon_d\right) - \frac{p_a}{E_S}\left(n\frac{E_S}{K_a}\frac{1}{l_{v\,j+1/2}}\right)^{\frac{1}{1-n}}\right)\left(l_{v\,j+1} - l_{v\,j}\right) \quad \text{Equation 128}$$

Les valeurs $l_{v\,j}$ sont choisies réparties uniformément entre $l_{v\,0}$ et $l_{v\,N}$ sur une échelle logarithmique avec $l_{v\,0} = 10^{-8}$, soit $l_{v\,j} = l_{v\,0}10^{\frac{j}{N}\log(\frac{l_{v\,N}}{l_{v\,0}})}$ (log = logarithme décimal). En pratique, N_v est pris égal à 201.

III.2.4.2. Partie déviatorique

III.2.4.2.1. Calcul effectif de la fonction $b_d(l_d, \varepsilon_v)$

La résolution de b_d (à partir des Equation 95 et Equation 96) ne peut être obtenue que par calcul numérique, et ce, en considérant une résolution itérative par algorithme de Newton, selon les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \varepsilon_v^{**}\left(p^{(i)} + \delta p^{(i)}, {b_d}^{(i)} + \delta {b_d}^{(i)}\right) = \varepsilon_v \\ S_d^{**}\left(p^{(i)} + \delta p^{(i)}, {b_d}^{(i)} + \delta {b_d}^{(i)}\right) = \dfrac{l_d}{E_s} \end{cases} \quad \text{Equation 129}$$

$$\begin{bmatrix} \delta p^{(i)} \\ \delta {b_d}^{(i)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\left(\varepsilon_{v,p}^{**} S_{d,b_d}^{**} - \varepsilon_{v,b_d}^{**} S_{d,p}^{**}\right)} \begin{bmatrix} S_{d,b_d}^{**} & -\varepsilon_{v,b_d}^{**} \\ -S_{d,p}^{**} & \varepsilon_{v,p}^{**} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_v - \varepsilon_v^{**}\left(p^{(i)}, {b_d}^{(i)}\right) \\ \dfrac{l_d}{E_s} - S_d^{**}\left(p^{(i)}, {b_d}^{(i)}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Equation 130}$$

$$\begin{cases} p^{(i+1)} = p^{(i)} + \delta p^{(i)} \\ {b_d}^{(i+1)} = {b_d}^{(i)} + \delta {b_d}^{(i)} \end{cases} \quad \text{Equation 131}$$

$$\varepsilon_v^{**}(p, b_d) = -\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^n \left(1 - \chi\left(\frac{b_d E_s}{p}\right)^2\right) \quad \text{Equation 132}$$

$$S_d^{**}(p, b_d) = \frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{Pa}{p}\right)^{1-n} \left(1 - \frac{(1-n)2\chi}{\left(\frac{p}{b_d E_s}\right)^2 n + \chi(2-n)}\right) \quad \text{Equation 133}$$

Les dérivées des fonctions ε_v^{**} et S_d^{**}, apparaissant dans l'Equation 130, sont analytiques. L'algorithme est initialisé en imposant les valeurs $p^{(1)}$ et ${b_d}^{(1)}$ égales aux valeurs après itération du pas de temps précédent. Les critères d'arrêt sont définis par :

$$\left|\delta p^{(i+1)}\right| > \left|\frac{p^{(i+1)}}{1000}\right| \text{ et } \left|\delta {b_d}^{(i+1)}\right| > \left|\frac{{b_d}^{(i+1)}}{1000}\right| \quad \text{Equation 134}$$

III.2.4.2.2. Calcul de $\varepsilon_d(q, \varepsilon_v)$

Tout comme pour la partie volumique, l'intégrale sur les éléments fermés (intégrales en $b_d(l_d, \varepsilon_v)$) des Equation 116 et Equation 119 est calculée numériquement par discrétisation de la variable l_d en un nombre fini de valeurs. Sur chacun des intervalles $[l_{d\,j}, l_{d\,j+1}]$, $b_d\left(l_{d\,j+1/2}, \varepsilon_v\right)$ est calculée par la méthode des rectangles :

$$\varepsilon_d(\mathrm{q}, \varepsilon_v) = L_d^*(p, q)\frac{q}{E_S} + \sum_{j=0}^{N_d-1} b_d\left(l_{d\,j+1/2}, \varepsilon_v\right)\left(l_{d\,j+1} - l_{d\,j}\right) \quad \text{Equation 135}$$

Pour $\varepsilon_v \leq 0$ *:*

Les valeurs $l_{d\,j}$ sont réparties de façon régulière sur une échelle logarithmique entre $L_d^*(p,q)$ et la borne $L_d(0,\varepsilon_v) = \frac{E_s}{3\,G_a}\left(\frac{-Pa}{\varepsilon_v K_a}\right)^{\frac{1-n}{n}}$ ($l_{d\,j} = 10^{\log L_d^*(p,q) + \frac{j}{N_d}\log L_d(0,\varepsilon_v)}$).

Pour $\varepsilon_v > 0$ *:*

Les valeurs $l_{d\,j}$ sont choisies de façon régulière sur une plage logarithmique entre $L_d^*(p,q)$ et 10^8 suffisamment grande pour que les déformations des éléments entre 10^8 et $+\infty$ soient négligeables ($l_{d\,j} = 10^{\log\ {}_d^*(p,q) + \frac{j}{N_d}\log 10^8}$).

III.2.4.3. Algorithme de calcul de la loi ENL 3D à p et q donnés et implémentation numérique ($ENL_{p,q}$)

L'ensemble numérique est mis en œuvre dans le code Visual Basics $VBA_{p,q}^{ENL}$ selon l'algorithme présenté en Figure 84.

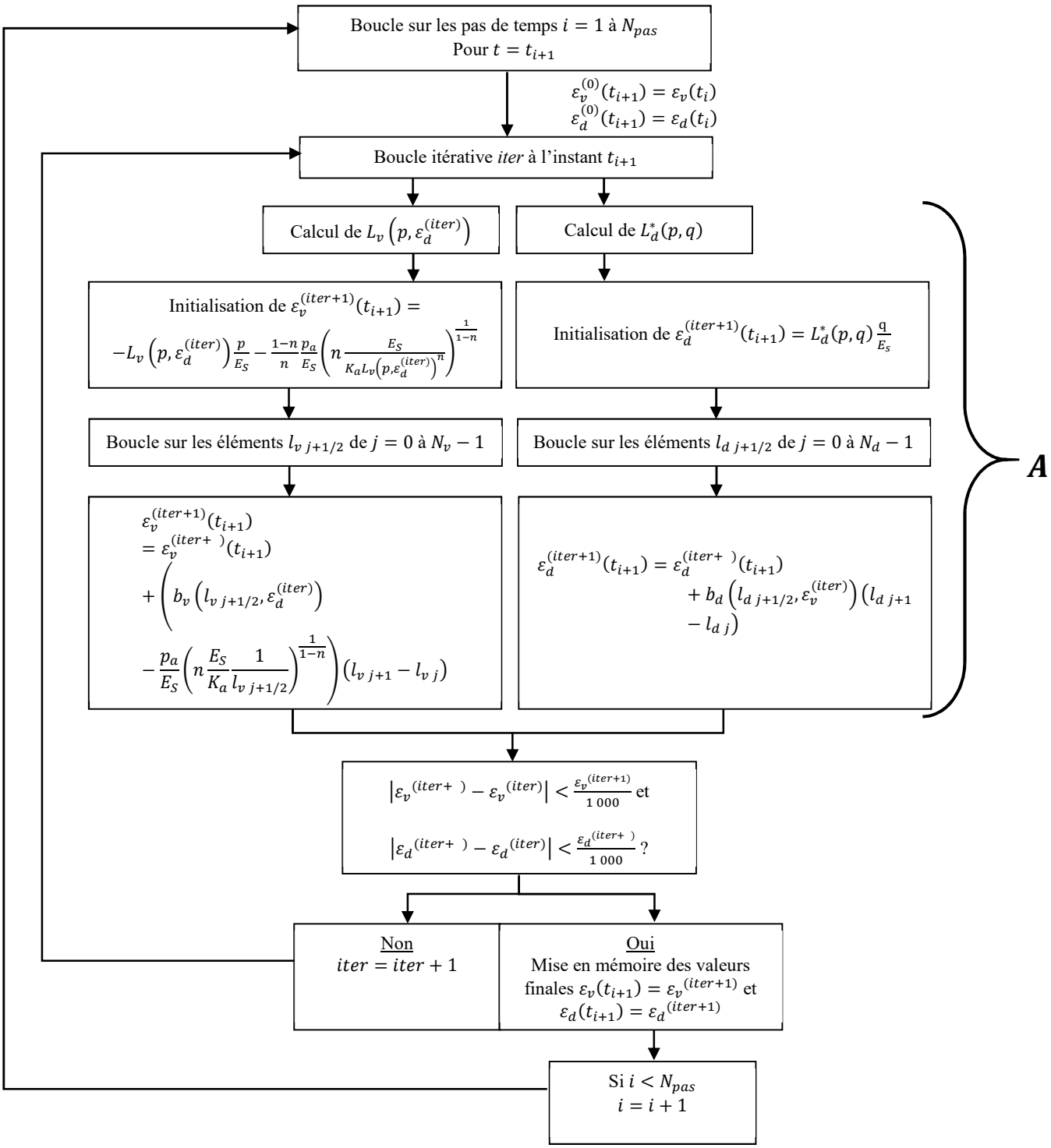


Figure 84 – Diagramme d'implémentation de la loi ENL 3D pour p et q donnés.

III.2.4.4. Algorithme de calcul de la loi ENL 3D à ε_v et ε_d données et implémentation numérique ($ENL_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$)

L'algorithme dual,

Figure 85 a également été implémenté (code $VBA^{ENL}_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$) pour la détermination de p et q à valeurs de déformation ε_v et ε_d données, notées ici $\overline{\varepsilon_v}$ et $\overline{\varepsilon_d}$. Le calcul (à l'intérieur de chaque pas de temps) est basé sur la résolution itérative du système d'équations $\begin{cases}\varepsilon_v(p,\overline{\varepsilon_d}) = \overline{\varepsilon_v} \\ \varepsilon_d(q,\overline{\varepsilon_v}) = \overline{\varepsilon_d}\end{cases}$

par la méthode de Newton, où les fonctions $\varepsilon_v(p,\varepsilon_d)$ et $\varepsilon_d(q,\varepsilon_v)$ sont celles introduites précédemment.

Une grande partie de l'algorithme précédent (cf. cases ***A*** de la Figure 84) est ainsi conservée pour le calcul de ces fonctions $\varepsilon_v(p,\varepsilon_d)$ et $\varepsilon_d(q,\varepsilon_v)$ en cours d'itération. Les dérivées partielles $\frac{\partial\varepsilon_v}{\partial p}$ et $\frac{\partial\varepsilon_d}{\partial q}$ sont calculées numériquement par différences finies.

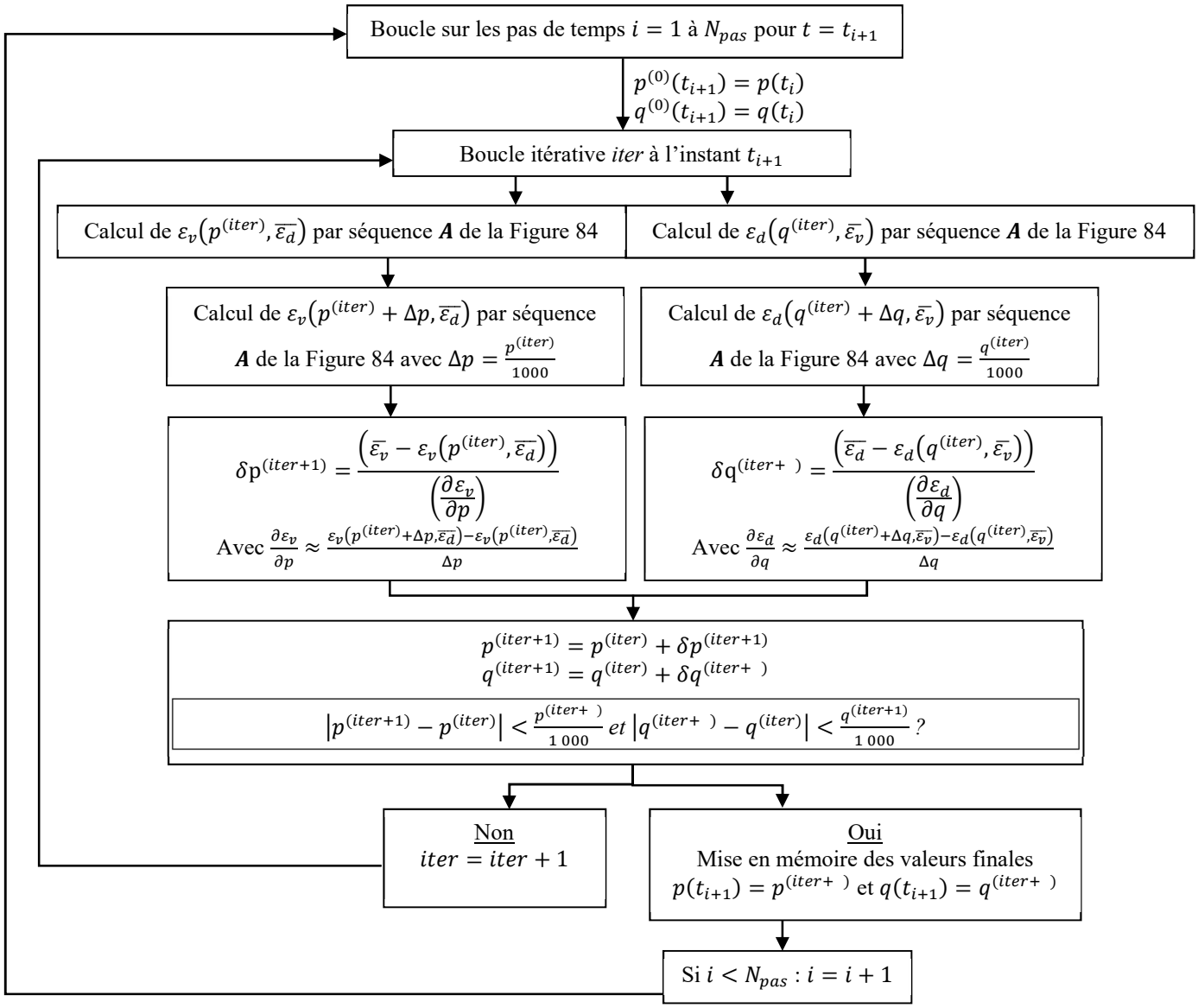


Figure 85 – Diagramme d'implémentation de la loi ENL 3D pour ε_v et ε_d donnés.

III.2.5. Validations des programmes $ENL_{p,q}$ et $ENL_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$ et de l'équivalence entre le modèle de Boyce et son approche spectrale à partir de la simulation d'un essai triaxial

Les deux algorithmes précédents ont été implémentés sur Visual Basics (VBA) et appliqués à la simulation d'un essai triaxial. Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs directement calculées à partir des Equation 66 et Equation 67 originelles du modèle de Boyce. Pour un choix réaliste de valeurs des paramètres, nous utilisons un jeu de données typique d'une GNT soit :

$K_a = 98\ MPa$, $G_a = 118\ MPa$, $n = 0{,}55$ et $\chi = \frac{(1-n)K_a}{6G_a}$.

Par ailleurs, nous utilisons pour E_s la valeur « forfaitaire » $E_s = 100\ MPa$, dont le choix n'a pas d'incidence sur les résultats compte tenu du mode de construction du modèle spectral.

III.2.5.1. Validation du programme $VBA_{p,q}^{ENL}$

Le programme est appliqué à la simulation d'un essai triaxial piloté en force. Dans un premier temps, une mise en pression du fluide de confinement est imposée de façon linéaire (entre t_0 et t_1) jusqu'à une valeur constante ($u = 0.3$ MPa). Suite à cette mise en compression, il est simulé l'effet d'une contrainte verticale sinusoïdale σ_{zz} (fréquence 1 Hz) sur l'éprouvette (Figure 86).

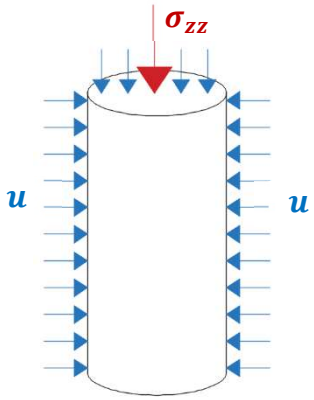


Figure 86 - Schéma de l'essai triaxial.

Le tenseur de contrainte est donné par :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} -u & 0 & 0 \\ 0 & -u & 0 \\ 0 & 0 & -u + \sigma_{zz} \end{pmatrix} \qquad \text{Equation 136}$$

avec :

- $u(t) = 0.3\frac{t}{t_1}$ et $\sigma_{zz}(t) = 0$ entre 0 et $t_1 = 2s$; Equation 137
- $u(t) = 0.3$ et $\sigma_{zz}(t) = \frac{-0.4(1-\cos(2\pi(t-t_1)))}{2}$ entre t_1 et $t_f = 7s$. Equation 138

D'où les valeurs de p et q (Figure 87) :

- $p(t) = 0.3\frac{t}{t_1}$ et $q(t) = 0$ entre 0 et t_1 ; Equation 139

  $p(t) = 0.3 + \frac{0.4(1-\cos(2\pi(t-t_1)))}{6}$; Equation 140

- $q(t) = \frac{0.4(1-\cos(2\pi(t-t_1)))}{2}$ (entre t_1 et t_f). Equation 141

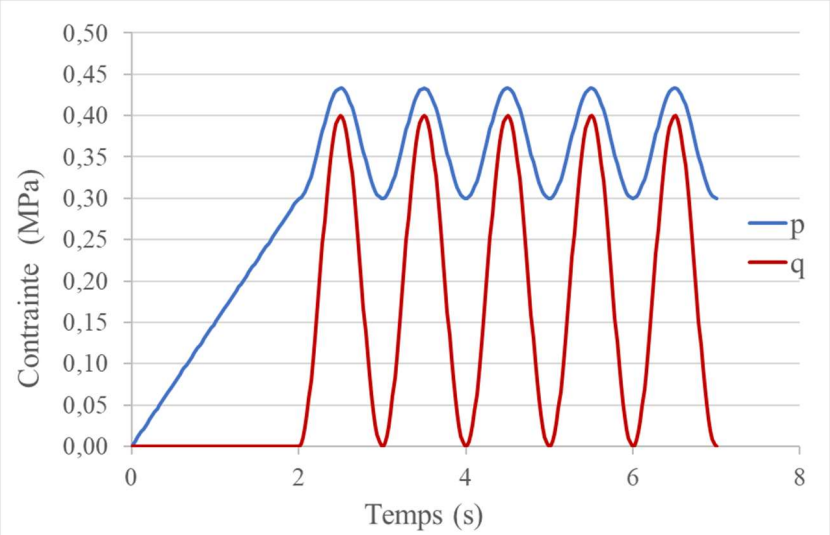


Figure 87 - Contraintes imposées.

La Figure 88 montre les réponses issues des équations originelles du modèle de Boyce et du programme $VBA_{p,q}^{ENL}$.

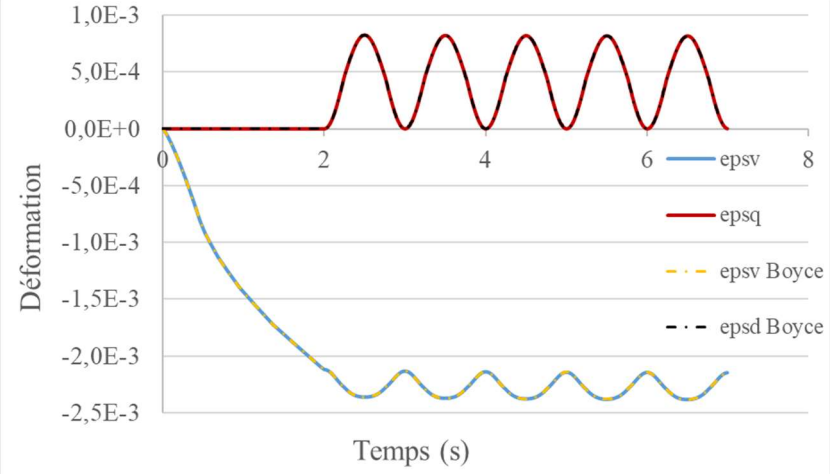


Figure 88 – Modélisation $ENL_{p,q}$ 3D.

On peut observer une reproduction fidèle des calculs directs du modèle de Boyce, ce qui valide l'équivalence entre la loi de Boyce, la représentation spectrale introduite ainsi que l'implémentation de cette dernière dans le code $VBA_{p,q}^{ENL}$.

III.2.5.2. Validation du programme $VBA^{ENL}_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$

Afin de valider l'algorithme dual (à déformations imposées), nous employons, comme données d'entrée du programme $VBA^{ENL}_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$, les réponses en déformation de la simulation précédente (Figure 88). Nous observons que les réponses $p(t)$, $q(t)$, Figure 89, correspondent à la contrainte donnée initialement, ce qui valide la dualité de l'algorithme.

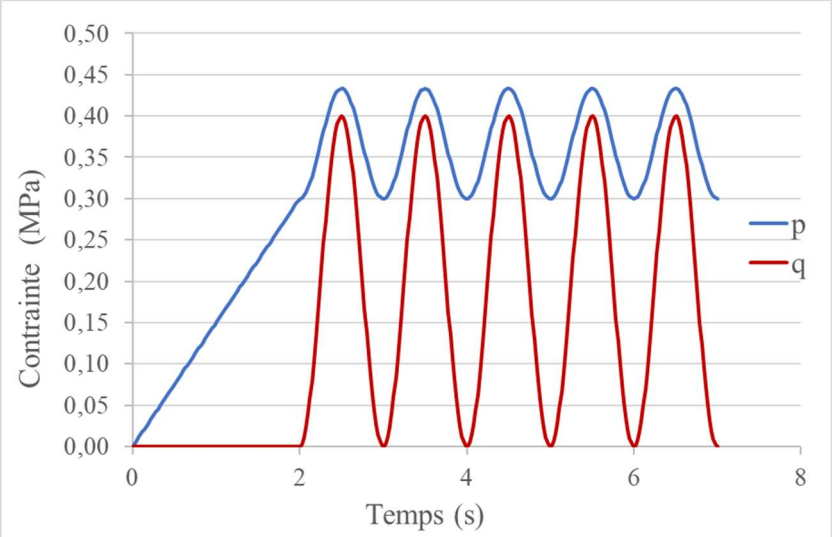


Figure 89 -Réponse en contrainte du modèle $ENL_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$.

III.2.6. Conclusion sur le modèle ENL 3D

Cette partie a permis de décrire en détail le modèle ENL 3D qui nous servira de base au modèle VENL 3D. Les différentes simulations ont permis de vérifier l'équivalence entre le modèle de Boyce et le modèle spectral ENL 3D. Nous pouvons passer maintenant aux étapes suivantes à savoir la représentation spectrale de la viscoélasticité en 3D, puis son introduction dans le modèle ENL 3D.

III.3. Viscoélasticité 3D

La généralisation de l'approche unidimensionnelle est réalisée en considérant une fonction de fluage volumique et déviatorique (F_v reliant ε_v à $-p$.), (F_d reliant ε_d à q), respectivement. La considération de ces relations entre invariants permet de conférer à la loi VE un caractère isotrope. En négligeant l'impact de la viscoélasticité sur le coefficient de Poisson υ (réel et constant), nous obtenons les relations, selon la loi de Hooke, suivantes :

$$\varepsilon_v = \frac{-3(1-2\upsilon)}{E} p \qquad \text{Equation 142}$$

$$\varepsilon_d = \frac{2(1+\upsilon)}{3\,E} q \qquad \text{Equation 143}$$

en accord avec :

$$\frac{\varepsilon_d}{q} / \frac{\varepsilon_v}{(-p)} = \frac{2(1+\upsilon)}{9(1-2\upsilon)} \qquad \text{Equation 144}$$

Cette hypothèse simplificatrice conduit à une proportionnalité entre les fonctions de fluage volumique et déviatorique selon le ratio :

$$F_d = \frac{2(1+\upsilon)}{9(1-2\upsilon)} F_v \qquad \text{Equation 145}$$

Nous supposerons toutefois que ces deux fonctions bénéficient de lois d'évolutions indépendantes et paraboliques telles que :

$$F_v(t) = \frac{\delta}{E}\left(\frac{t}{A}\right)^{\gamma} \qquad \text{Equation 146}$$

$$F_d(t) = \frac{1}{E}\left(\frac{t}{A}\right)^{\beta} \qquad \text{Equation 147}$$

Avec $0 < \gamma < 1$, $0 < \beta < 1$, $\delta > 0$. A est un paramètre temporel. E est un paramètre homogène à une rigidité.

Comme déjà vu dans l'approche unidimensionnelle, chacune de ces fonctions peut être représentée sous une forme spectrale par une série infinie d'éléments de Kelvin-Voigt, Figure 46 et Figure 91.

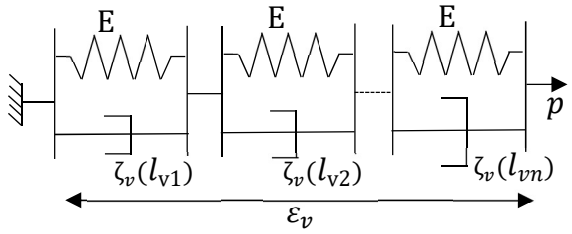


Figure 90 - Spectre de fluage volumique.

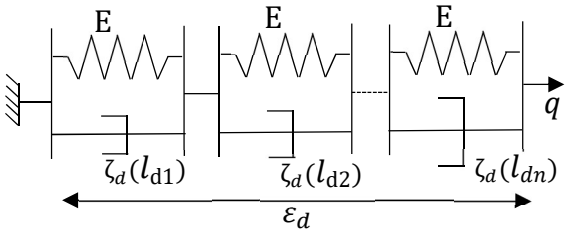


Figure 91 - Spectre de fluage déviatorique.

Dans ce cas, les fonctions de fluages s'écrivent sous la forme :

$$F_v(t) = \frac{1}{E}\int_0^{+\infty}\left(1 - e^{\frac{-t}{\zeta_v(l_v)}}\right) dl_v \qquad \text{Equation 148}$$

$$\text{et } F_d(t) = \frac{1}{E}\int_0^{+\infty}\left(1 - e^{\frac{-t}{\zeta_d(l_d)}}\right) dl_d \qquad \text{Equation 149}$$

où les fonctions de viscosité $\zeta_v(l_v)$ et $\zeta_d(l_d)$ sont données par :

$$\zeta_v(l_v) = A\left(\frac{\Gamma(1-\gamma)}{\delta}\right)^{\frac{1}{\gamma}} l_v^{\frac{1}{\gamma}} \text{ et } \zeta_d(l_d) = A\,\Gamma(1-\beta)^{\frac{1}{\beta}} l_d^{\frac{1}{\beta}} \qquad \text{Equation 150}$$

Nous sommes à présent en mesure de fusionner les spectres ENL et VE dans le but de construire le modèle viscoélastique non linéaire (VENL) 3D recherché, et ce, pour un état de mûrissement donné A constant.

III.4. « Fusion » 3D entre ENL et VE

Comme pour le modèle VENL 1D, nous proposons de fusionner, à l_v (resp. l_d) donné, les éléments des spectres ENL et VE volumique et déviatorique conduisant à introduire des éléments à 3 branches « ressort + amortisseur linéaire + butée ».

Si cette opération ne pose pas de difficulté pour le spectre déviatorique, il reste cependant, pour le spectre volumique, à positionner le « pied » de l'amortisseur linéaire soit en bas de l'élément, soit au niveau de l'ancrage du ressort.

L'annexe 4 montre qu'il est nécessaire de retenir la première option (ancrage en bas d'élément) afin de satisfaire au premier principe de la thermodynamique et éviter ainsi la non convergence de l'intégrale relative à l'effet de cale (dilatance). La représentation spectrale du modèle VENL 3D présentée Figure 92.

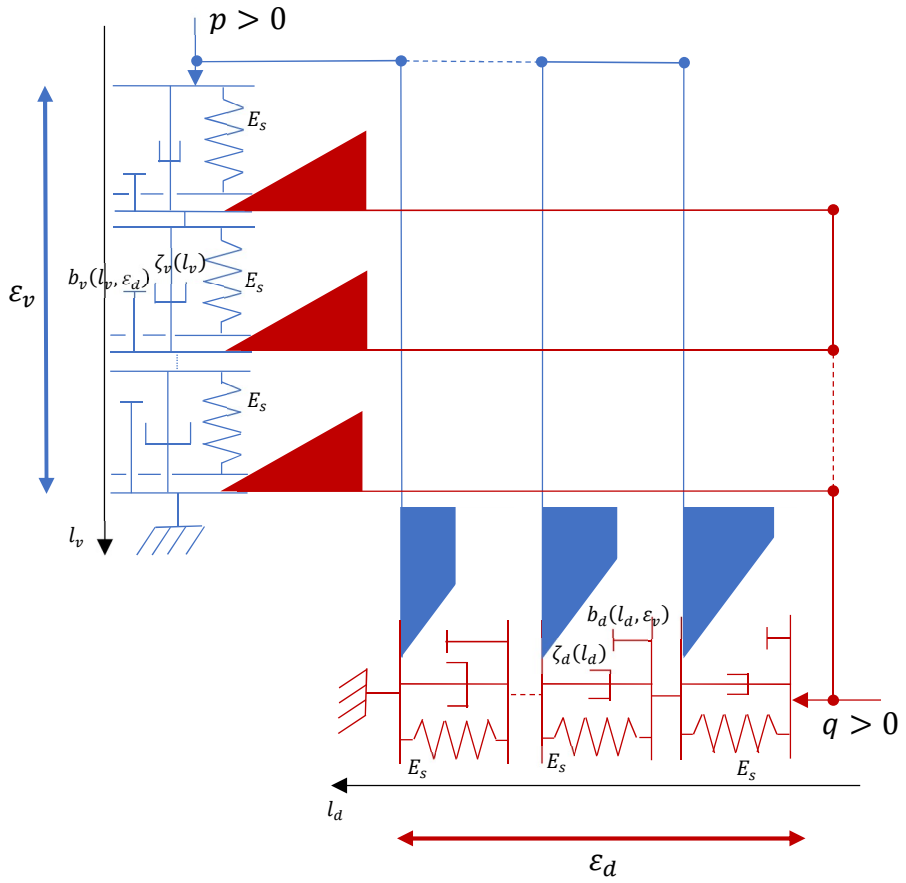


Figure 92 – Représentation spectrale du modèle VENL 3D.

Nous examinons à présent le comportement de ce modèle et son implémentation dans un code numérique pour des sollicitations données en contrainte, en déformation ou mixte. Nous supposons ici les fonctions $b_v(l_v, \varepsilon_d)$, $b_d(l_d, \varepsilon_v)$, $\zeta_v(l_v)$ et $\zeta_d(l_d)$ connues, identiques à celles définies précédemment.

III.4.1. Loi de comportement du modèle VENL 3D à historique de contrainte $\bar{\bar{\sigma}}(t)$ donné

Etablissons la loi de comportement du modèle ci-dessus en supposant le tenseur de contrainte $\bar{\bar{\sigma}}(t)$ connu avant d'étudier le passage inverse à tenseur de déformation $\bar{\bar{\varepsilon}}(t)$ donné. La déformation de chaque spectre est la somme des déformations de chacun des éléments qui le compose :

$$\varepsilon_v(t) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) dl_v \qquad \text{Equation 151}$$

$$\varepsilon_d(t) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) dl_d \qquad \text{Equation 152}$$

Tout comme le modèle VENL 1D, il n'existe pas de relation analytique simple pour un tel modèle permettant de relier de façon générale les évolutions de déformation et de contrainte entre elles.

Nous allons donc résoudre le problème du calcul de $\varepsilon(t)$ numériquement en introduisant à la fois une discrétisation sur les variables t (temps), l_v, l_d et en examinant le comportement de chacun des éléments des spectres volumique et déviatorique.

Regardons ainsi le passage à variations de contrainte p, q données des déformations « élémentaires » $\begin{cases}\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_i, \varepsilon_d(t_i))\\ \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_i, \varepsilon_v(t_i))\end{cases}$ supposées connues à l'instant t_i aux déformations $\begin{cases}\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d)\\ \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v)\end{cases}$ à l'instant t_{i+1} en supposant également connues les valeurs de $\bar{\varepsilon}_v$ et $\bar{\varepsilon}_d$.

III.4.1.1. Calcul des déformations volumiques $\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d)$

III.4.1.1.1. Cas d'un élément ouvert à l'instant t_i

Considérons le cas d'un élément l_v ouvert à l'instant t_i tel que $\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_i, \varepsilon_d(t_i)) > -b_v(l_v, \varepsilon_d(t_i))$.

Calculons, dans un premier temps, la déformation volumique « libre » qu'aurait l'élément à 3 branches avec double fond, en l'absence de butée (Annexe 5) :

$$\begin{aligned}\tilde{\varepsilon}_v^{libre}(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d) &= A\left(1 - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta_v(l_v)}}\right)\\ &- \mathrm{B}\,\zeta_v(l_v)\left(1 - \frac{t_{i+1}-t_i}{\zeta_v(l_v)} - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta_v(l_v)}}\right) + \tilde{\varepsilon}_v(t_i) e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta_v(l_v)}}\end{aligned} \qquad \text{Equation 153}$$

avec :

$$A = -\frac{p(t_i)}{E_s} + b_v(l_v, \varepsilon_d(t_i)) - b_v(l_v, 0) \text{ et } B = -\frac{\dot{p}_i}{E_s} + \frac{b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d) - b_v(l_v, \varepsilon_d(t_i))}{t_{i+1}-t_i} \qquad \text{Equation 154}$$

$$\text{On a noté : } \dot{p}_i = \frac{p(t_{i+1})-p(t_i)}{\Delta t} \qquad \text{Equation 155}$$

- Si celle-ci est supérieure à la valeur $-b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d)$, l'élément reste ouvert sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est alors égale à :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d) = \tilde{\varepsilon}_v^{libre}(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d) \quad \text{Equation 156}$$

- Si celle-ci est inférieure à la valeur $-b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d)$, l'élément se ferme sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est égale à :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d) = -b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d) \quad \text{Equation 157}$$

III.4.1.1.2. Cas d'un élément fermé à l'instant t_i :

Si l'élément est fermé à l'instant t_i, soit $\tilde{\varepsilon}_v\big(l_v, t_i, \varepsilon_d(t_i)\big) = -b_v\big(l_v, \varepsilon_d(t_i)\big)$, on pose :

$$p_{ressort} = E_s b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d) \quad \text{Equation 158}$$

- Si la pression $p(t_{i+1})$ est supérieure à la valeur $p_{ressort}$, l'élément reste fermé sur tout l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est égale à :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d) = -b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d) \quad \text{Equation 159}$$

- Si $p(t_{i+1})$ est inférieure à la valeur $p_{ressort}$, l'élément s'ouvre sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ à l'instant :

$$t_{F/O} = t_i + \frac{E_s b_v(l_v, \bar{\varepsilon}_d) - p(t_i)}{(-\dot{p}_i)} \quad \text{Equation 160}$$

Il est alors possible de calculer la déformation de l'élément à l'instant t_{i+1} par la même expression que la déformation libre en substituant t_i par $t_{F/O}$ et $\tilde{\varepsilon}_v\big(l_v, t_i, \varepsilon_d(t_i)\big)$ par :

$$\tilde{\varepsilon}_v\left(l_v, t_{F/O}, \varepsilon_d(t_i)\right) = -\frac{\mathrm{p}(t_{\mathrm{F/O}})}{E_s} = -b_v\big(l_v, \varepsilon_d(t_i)\big), \quad \text{Equation 161}$$

soit :

$$\begin{aligned}\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_d) = A\left(1 - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta_v(l_v)}}\right) \\ - \mathrm{B}\,\zeta_v(l_v)\left(1 - \frac{t_{i+1} - t_{F/O}}{\zeta_v(l_v)} - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta_v(l_v)}}\right) \\ + \tilde{\varepsilon}_v(t_i) e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta_v(l_v)}}\end{aligned} \quad \text{Equation 162}$$

III.4.1.2. Calcul des déformations déviatoriques $\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v)$

III.4.1.2.1. Cas d'un élément ouvert à l'instant t_i

Considérons le cas d'un élément déviatorique l_d ouvert à l'instant t_i et donc tel que :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_i, \varepsilon_v(t_i)) > b_v\big(l_d, \varepsilon_v(t_i)\big) \quad \text{Equation 163}$$

D'après l'annexe 6, la déformation déviatorique « libre », qu'aurait l'élément en l'absence de butée, se détermine par :

$$\tilde{\varepsilon}_d^{libre}(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v) = \frac{q(t_i)}{E_s}\left(1 - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta_d(l_d)}}\right) - \frac{\dot{q}_i}{E_s}\zeta_d(l_d)\left(1 - \frac{t_{i+1}-t_i}{\zeta_d(l_d)} - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta_d(l_d)}}\right) + \tilde{\varepsilon}_d(t_i)\, e^{\frac{-(t_{i+1}-t_i)}{\zeta_d(l_d)}} \quad \text{Equation 164}$$

avec $\dot{q}_i = \frac{q(t_{i+1})-q(t_i)}{\Delta t}$ Equation 165

- Si la déformation libre est inférieure à la valeur $b_d(l_d, \bar{\varepsilon}_v)$, l'élément reste ouvert sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est alors égale à :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v) = \tilde{\varepsilon}_d^{libre}(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v) \quad \text{Equation 166}$$

- Si celle-ci est supérieure à la valeur $b_d(l_d, \bar{\varepsilon}_v)$, l'élément se ferme sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est égale à :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v) = b_d(l_d, \bar{\varepsilon}_v) \quad \text{Equation 167}$$

III.4.1.2.2. Cas d'un élément fermé à l'instant t_i :

Si l'élément est fermé à l'instant t_i, soit $\tilde{\varepsilon}_d\big(l_d, t_i, \varepsilon_v(t_i)\big) = b_d\big(l_d, \varepsilon_v(t_i)\big)$, on pose :

$$q_{ressort} = E_s b_d(l_d, \bar{\varepsilon}_v) \quad \text{Equation 168}$$

- Si la contrainte déviatorique $q(t_{i+1})$ est supérieure à la valeur $q_{ressort}$, l'élément reste fermé sur tout l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ et sa déformation à l'instant t_{i+1} est égale à :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v) = b_d(l_d, \bar{\varepsilon}_v) \quad \text{Equation 169}$$

- Si q_{i+1} est inférieure à la valeur $q_{ressort}$, l'élément s'ouvre sur l'intervalle de temps $[t_i, t_{i+1}]$ à l'instant :

$$t_{F/O} = t_i + \frac{E_s b_d(l_d, \bar{\varepsilon}_v) - q(t_i)}{(-\dot{q}_i)} \quad \text{Equation 170}$$

Il reste ouvert par la suite.

Il est alors possible de calculer la déformation de l'élément déviatorique à l'instant t_{i+1} par la même expression que la déformation déviatorique libre en substituant t_i par $t_{F/O}$ et $\tilde{\varepsilon}_d\big(l_d, t_i, \varepsilon_v(t_i)\big)$ par :

$$\tilde{\varepsilon}_d\left(l_d, t_{F/O}, \varepsilon_v(t_i)\right) = \frac{q\left(t_{F/O}\right)}{E_s} = b_d\big(l_d, \varepsilon_v(t_i)\big) \quad \text{Equation 171}$$

soit :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{i+1}, \bar{\varepsilon}_v) = \\ = \frac{q(t_i)}{E_s}\left(1 - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta_d(l_d)}}\right) \\ - \frac{\dot{q}_i}{E_s}\zeta_d(l_d)\left(1 - \frac{t_{i+1}-t_{F/O}}{\zeta_d(l_d)} - e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta_d(l_d)}}\right) \\ + \tilde{\varepsilon}_d(t_i)\, e^{\frac{-(t_{i+1}-t_{F/O})}{\zeta_d(l_d)}}$$

Equation 172

Nous avons ainsi établi les relations de passage recherchées pour chacun des éléments l_d du spectre déviatorique.

III.4.2. Calcul des déformations $\varepsilon_v(t_{i+1})$ et $\varepsilon_d(t_{i+1})$ à efforts donnés

Supposons connues les valeurs de $\varepsilon_v(t_i)$ et $\varepsilon_d(t_i)$. Les Equation 151 et Equation 152 définissent implicitement le système (en $\varepsilon_v(t_{i+1})$ et $\varepsilon_d(t_{i+1})$) à résoudre pour le calcul de la solution à l'instant t_{i+1}, soit :

$$\begin{cases} \varepsilon_v(t_{i+1}) = F_v\big(\bar{p}(t_{i+1}), \varepsilon_d(t_{i+1})\big) \\ \varepsilon_d(t_{i+1}) = F_d\big(\bar{q}(t_{i+1}), \varepsilon_v(t_{i+1})\big) \end{cases}$$

Equation 173

Solution pour laquelle nous avons posé :

$$\begin{cases} F_v(\bar{p}, \varepsilon_d) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \bar{p}, \varepsilon_d) dl_v \\ F_d(\bar{q}, \varepsilon_v) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \bar{q}, \varepsilon_v) dl_d \end{cases}$$

Equation 174

Pour se faire, nous proposons d'employer l'algorithme itératif de Newton, en posant à l'itération $n+1$ et en supposant $\varepsilon_v^{(n)}(t_{i+1})$ et $\varepsilon_d^{(n)}(t_{i+1})$ connus :

$$\begin{cases} \varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_v^{(n)}(t_{i+1}) + \delta\varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1}) \\ \varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_d^{(n)}(t_{i+1}) + \delta\varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1}) \end{cases}$$

Equation 175

Pour $n = 1$, nous considérons l'initialisation suivante :

$$\begin{cases} \varepsilon_v^{(1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_v(t_i) \\ \varepsilon_d^{(1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_d(t_i) \end{cases}$$

Equation 176

Par développement limité au premier ordre, $\delta\varepsilon_v^{(n+1)}$ et $\delta\varepsilon_d^{(n+1)}$ vérifient le système ci-dessous :

$$\begin{cases} \varepsilon_v^{(n)} + \delta\varepsilon_v^{(n+1)} = F_v\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right) + \dfrac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d}\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right) \delta\varepsilon_d^{(n+1)} \\ \varepsilon_d^{(n)} + \delta\varepsilon_d^{(n+1)} = F_d\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right) + \dfrac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v}\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right) \delta\varepsilon_v^{(n+1)} \end{cases}$$

Equation 177

Nous obtenons alors l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d}\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right) \\ -\frac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v}\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_v^{(n+1)} \\ \delta\varepsilon_d^{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_v\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right) - \varepsilon_v^{(n)} \\ F_d\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right) - \varepsilon_d^{(n)} \end{bmatrix}$$ Equation 178

On en déduit ainsi :

$$\delta\varepsilon_v^{(n+1)} = \frac{F_v\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right) - \varepsilon_v^{(n)} + \frac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v}\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right)\left(F_d\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right) - \varepsilon_d^{(n)}\right)}{1 - \frac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v}\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right)\frac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d}\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right)}$$ Equation 179

$$\delta\varepsilon_d^{(n+1)} = \frac{\frac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d}\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right)\left(F_v\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right) - \varepsilon_v^{(n)}\right) + F_d\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right) - \varepsilon_d^{(n)}}{1 - \frac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v}\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right)\frac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d}\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right)}$$ Equation 180

La convergence des itérations est décrite par le critère suivant :

$$\left|\delta\varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{\varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right| \text{ et } \left|\delta\varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{\varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$$ Equation 181

Les valeurs des déformations $F_v\left(p(t_{i+1}), \varepsilon_d^{(n)}(t_{i+1})\right)$ et $F_d\left(q(t_{i+1}), \varepsilon_v^{(n)}(t_{i+1})\right)$ sont calculées numériquement en introduisant une discrétisation des variables l_v et l_d et en utilisant par exemple la méthode des rectangles. Les intégrales Equation 151, Equation 152 découlent alors des expressions des déformations « élémentaires » décrites en parties 4.1.1 et 4.1.2. Les dérivées partielles $\frac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v}$ et $\frac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d}$ sont calculées numériquement par différences finies :

$$\frac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d} \approx \frac{\varepsilon_v\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)} + \Delta\varepsilon_d\right) - \varepsilon_v\left(\bar{p}, \varepsilon_d^{(n)}\right)}{\Delta\varepsilon_d}$$ Equation 182

$$\frac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v} \approx \frac{\varepsilon_d\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)} + \Delta\varepsilon_v\right) - \varepsilon_d\left(\bar{q}, \varepsilon_v^{(n)}\right)}{\Delta\varepsilon_v}$$ Equation 183

III.4.3. Implémentation numérique à efforts donnés

Les éléments précédents ont été implémentés dans le code numérique en Visual Basics, constitué d'un programme principal et de deux sous-programmes. Le programme principal contient la résolution de Newton ; les deux sous-programmes correspondent aux calculs des intégrales du système (Equation 174). On suppose en début d'algorithme avoir choisi les valeurs de : K_a, G_a, Pa, χ, n, E_s, δ, γ, β, A (paramètre de la loi viscoélastique) et n_f (nombre de pas de temps).

III.4.3.1. Partie volumique : calcul de $F_v\left(p(t_{i+1}), \varepsilon_d(t_{i+1})\right)$

Pour ce calcul, on suppose connues la déformation déviatorique $\varepsilon_d^{(n)}(\mathrm{t_{i+1}})$, et les contraintes p et q pour tous les pas de temps $i = 1, .., n_f$. Dans le reste de ce chapitre, cet algorithme est noté $\boldsymbol{B}$, Figure 3.29.

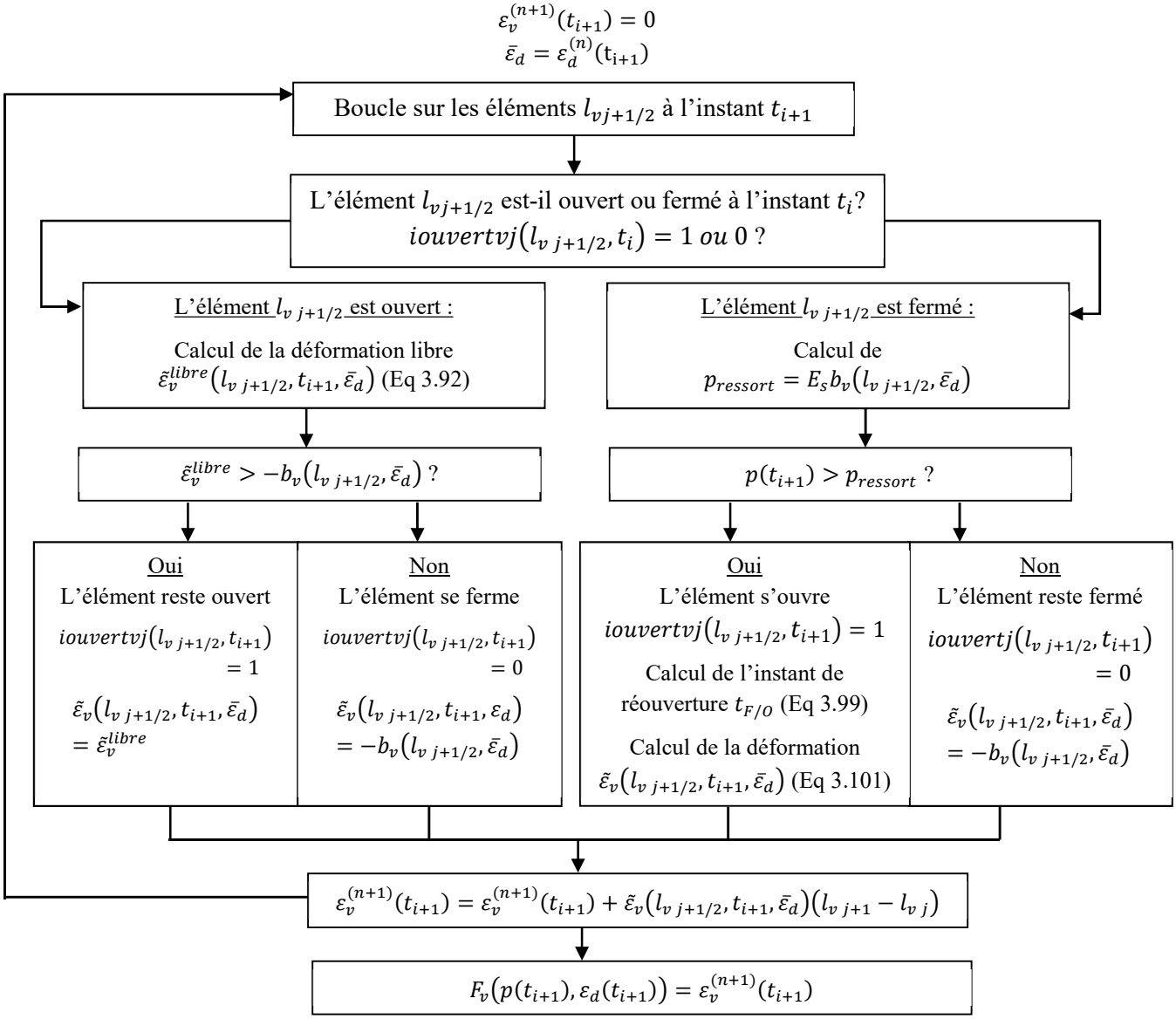


Figure 93 – Diagramme d'implémentation du calcul de la déformation volumique $F_v(p(t_{i+1}), \varepsilon_d(t_{i+1}))$.

III.4.3.2. Partie déviatorique : calcul de $F_d\left(q(t_{i+1}), \varepsilon_v(t_{i+1})\right)$

Pour le calcul de la déformation déviatorique, on suppose connaitre la déformation volumique $\varepsilon_v^{(n)}(\mathrm{t_{i+1}})$. Dans le reste de ce chapitre, cet algorithme sera noté $\boldsymbol{C}$, Figure 3.30.

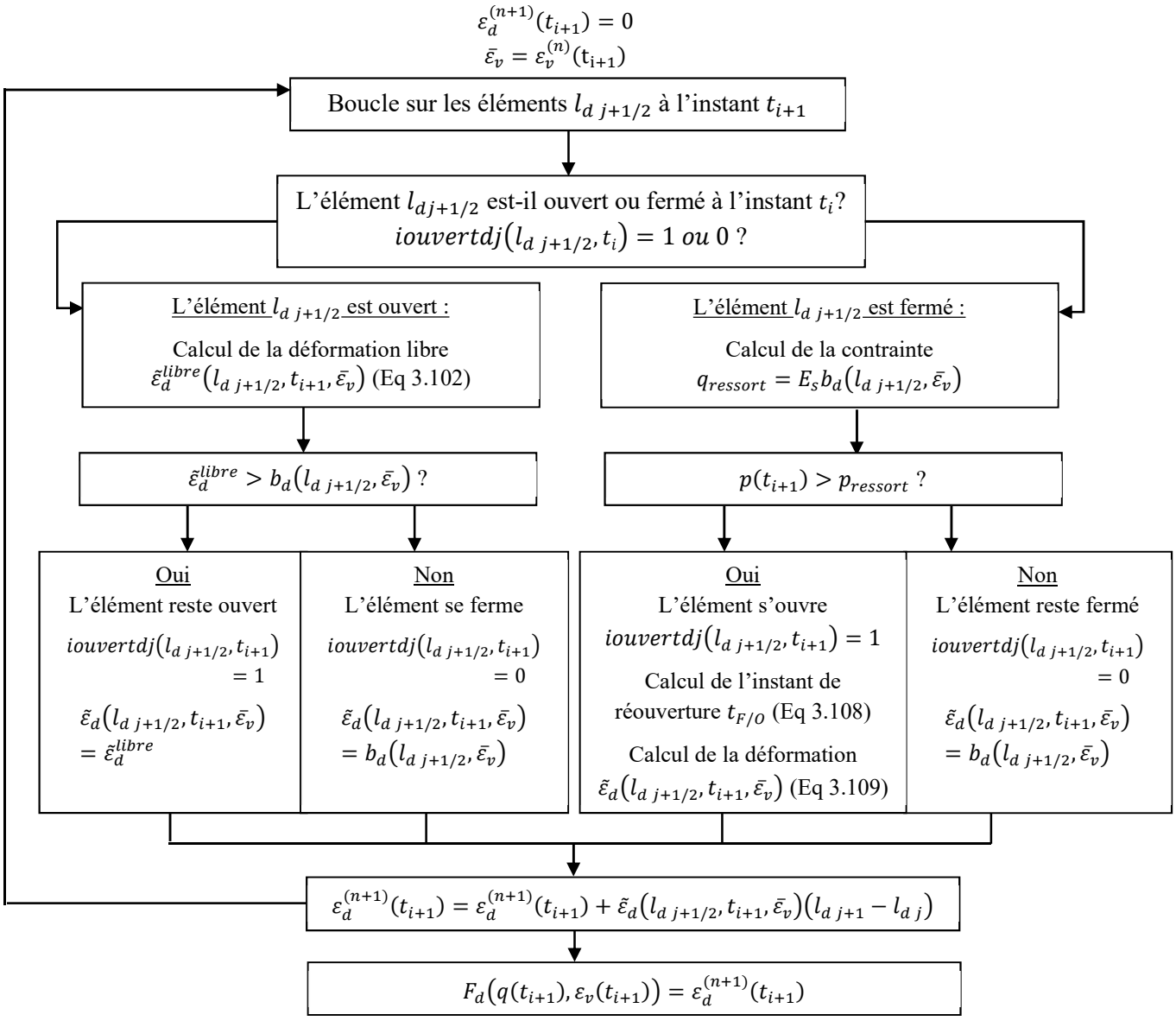


Figure 94 – Diagramme d'implémentation du calcul de la déformation déviatorique $F_d\left(q(t_{i+1}), \varepsilon_v(t_{i+1})\right)$.

III.4.3.3. Implémentation du code de calcul $VENL_{p,q}$ à p et q donnés

L'algorithme présenté en 4.2 et les sous programmes de calcul F_v (algorithme $\boldsymbol{B}$) et F_d (algorithme $\boldsymbol{C}$) ont été implémentés dans un code noté $VENL_{p,q}$, Figure 3.31.

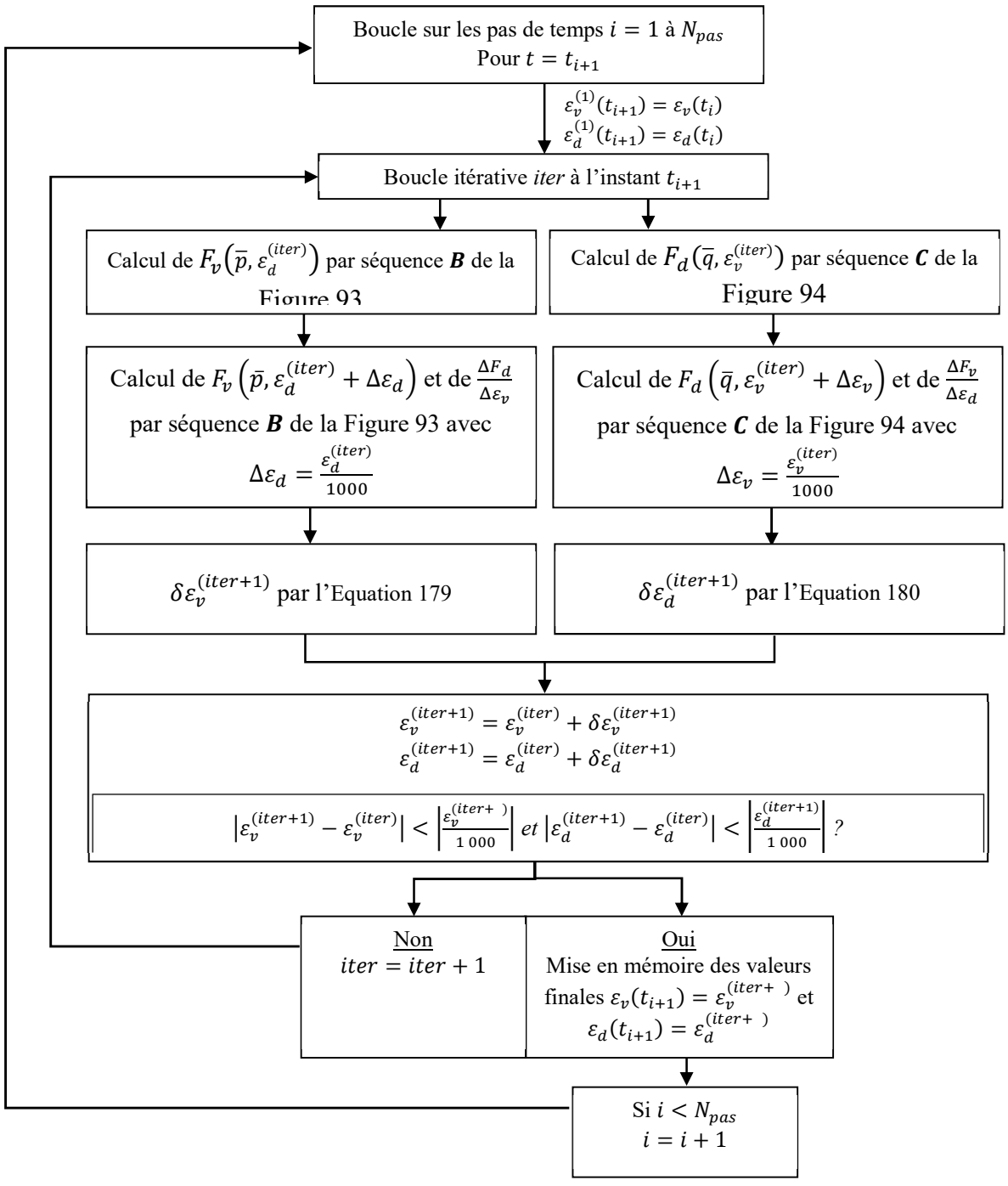


Figure 95 – Diagramme d'implémentation du code $\boldsymbol{VENL_{p,q}}$ pour $\boldsymbol{p}$ et $\boldsymbol{q}$ donnés.

III.4.4. Calcul des contraintes $p(t_{i+1})$ et $q(t_{i+1})$ à déformations données

Supposons à présent connues les valeurs de déformation à l'instant t_{i+1}, notées ici $\overline{\varepsilon_v}$ et $\overline{\varepsilon_d}$ ainsi que les valeurs de contrainte $p(t_i)$ et $q(t_i)$ à l'instant t_i. Le calcul à l'intérieur de chaque pas de temps est basé sur la résolution itérative du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_v(t_{i+1}) = F_v\big(p(t_{i+1}), \bar{\varepsilon}_d(t_{i+1})\big) \\ \bar{\varepsilon}_d(t_{i+1}) = F_d\big(q(t_{i+1}), \bar{\varepsilon}_v(t_{i+1})\big) \end{cases} \quad \text{Equation 184}$$

avec :

$$\begin{cases} F_v(p, \bar{\varepsilon}_d) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, p, \bar{\varepsilon}_d) dl_v \\ F_d(q, \bar{\varepsilon}_v) = \int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \bar{\varepsilon}_v) dl_d \end{cases} \quad \text{Equation 185}$$

La résolution emploie l'algorithme itératif de Newton, en posant à l'itération $n+1$ ($p^{(n)}(t_{i+1})$ et $q^{(n)}(t_{i+1})$ sont supposés connus) :

$$\begin{cases} p^{(n+1)}(t_{i+1}) = p^{(n)}(t_{i+1}) + \delta p^{(n+1)}(t_{i+1}) \\ q^{(n+1)}(t_{i+1}) = q^{(n)}(t_{i+1}) + \delta q^{(n+1)}(t_{i+1}) \end{cases} \quad \text{Equation 186}$$

Pour $n = 1$, on utilise l'initialisation :

$$\begin{cases} p^{(1)}(t_{i+1}) = p(t_i) \\ q^{(1)}(t_{i+1}) = q(t_i) \end{cases} \quad \text{Equation 187}$$

Par développement limité au premier ordre, $\delta p^{(n+1)}$ et $\delta q^{(n+1)}$ vérifient le système :

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_v = F_v\big(p^{(n)}, \bar{\varepsilon}_d\big) + \dfrac{dF_v}{dp}\big(p^{(n)}, \bar{\varepsilon}_d\big)\, \delta p^{(n+1)} \\ \bar{\varepsilon}_d = F_d\big(q^{(n)}, \bar{\varepsilon}_v\big) + \dfrac{dF_d}{dq}\big(q^{(n)}, \bar{\varepsilon}_v\big) \delta q^{(n+1)} \end{cases} \quad \text{Equation 188}$$

L'expression 3.132 conduit au système d'équation matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \dfrac{dF_v}{dp}\big(p^{(n)}, \bar{\varepsilon}_d\big) & 0 \\ 0 & \dfrac{dF_d}{dq}\big(q^{(n)}, \bar{\varepsilon}_v\big) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p^{(n+1)} \\ \delta q^{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_v - F_v\big(p^{(n)}, \bar{\varepsilon}_d\big) \\ \bar{\varepsilon}_d - F_d\big(q^{(n)}, \bar{\varepsilon}_v\big) \end{bmatrix} \quad \text{Equation 189}$$

avec :

$$\delta p^{(n+1)} = \frac{\bar{\varepsilon}_v - F_v\big(p^{(n)}, \bar{\varepsilon}_d\big)}{\dfrac{dF_v}{dp}\big(p^{(n)}, \bar{\varepsilon}_d\big)} \quad \text{Equation 190}$$

$$\delta q^{(n+1)} = \frac{\bar{\varepsilon}_d - F_d\big(q^{(n)}, \bar{\varepsilon}_v\big)}{\dfrac{dF_d}{dq}\big(q^{(n)}, \bar{\varepsilon}_v\big)} \quad \text{Equation 191}$$

Les critères d'arrêt sont définis par $\left|\delta p^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{p^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$ et $\left|\delta q^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{q^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$.

Les valeurs des déformations $F_v\left(p^{(n)}, \varepsilon_d(t_{i+1})\right)$ et $F_d\left(q^{(n)}, \varepsilon_v(t_{i+1})\right)$ sont calculées numériquement en introduisant une discrétisation des variables l_v et l_d et en utilisant la méthode des rectangles. Les intégrales Equation 151, Equation 152 sont déduites des expressions des déformations « élémentaires » décrites en parties 4.1.1 et 4.1.2.

Les dérivées partielles $\frac{\partial \varepsilon_v}{p}$ et $\frac{\partial \varepsilon_d}{q}$ sont calculées numériquement par différences finies comme suit :

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p} \approx \frac{\varepsilon_v\left(p^{(iter)} + \Delta p, \bar{\varepsilon}_d\right) - \varepsilon_v\left(p^{(iter)}, \bar{\varepsilon}_d\right)}{\Delta p} \qquad \text{Equation 192}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial q} \approx \frac{\varepsilon_d\left(q^{(iter)} + \Delta q, \bar{\varepsilon}_v\right) - \varepsilon_d\left(q^{(iter)}, \bar{\varepsilon}_v\right)}{\Delta q} \qquad \text{Equation 193}$$

où Δp et Δq sont choisis petits.

Les éléments précédents ont été implémentés dans un code numérique en Visual Basics que l'on nomme $VENL_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$ contenant la résolution de Newton présentée précédemment utilisant les algorithme $\boldsymbol{B}$ (Figure 93) et $\boldsymbol{C}$ (Figure 94). On suppose en début d'algorithme (Figure 3.32) avoir choisi les valeurs de : K_a, G_a, Pa, χ, n, E_s, δ, γ, β, A (paramètre de la loi viscoélastique) et n_f (nombre de pas de temps).

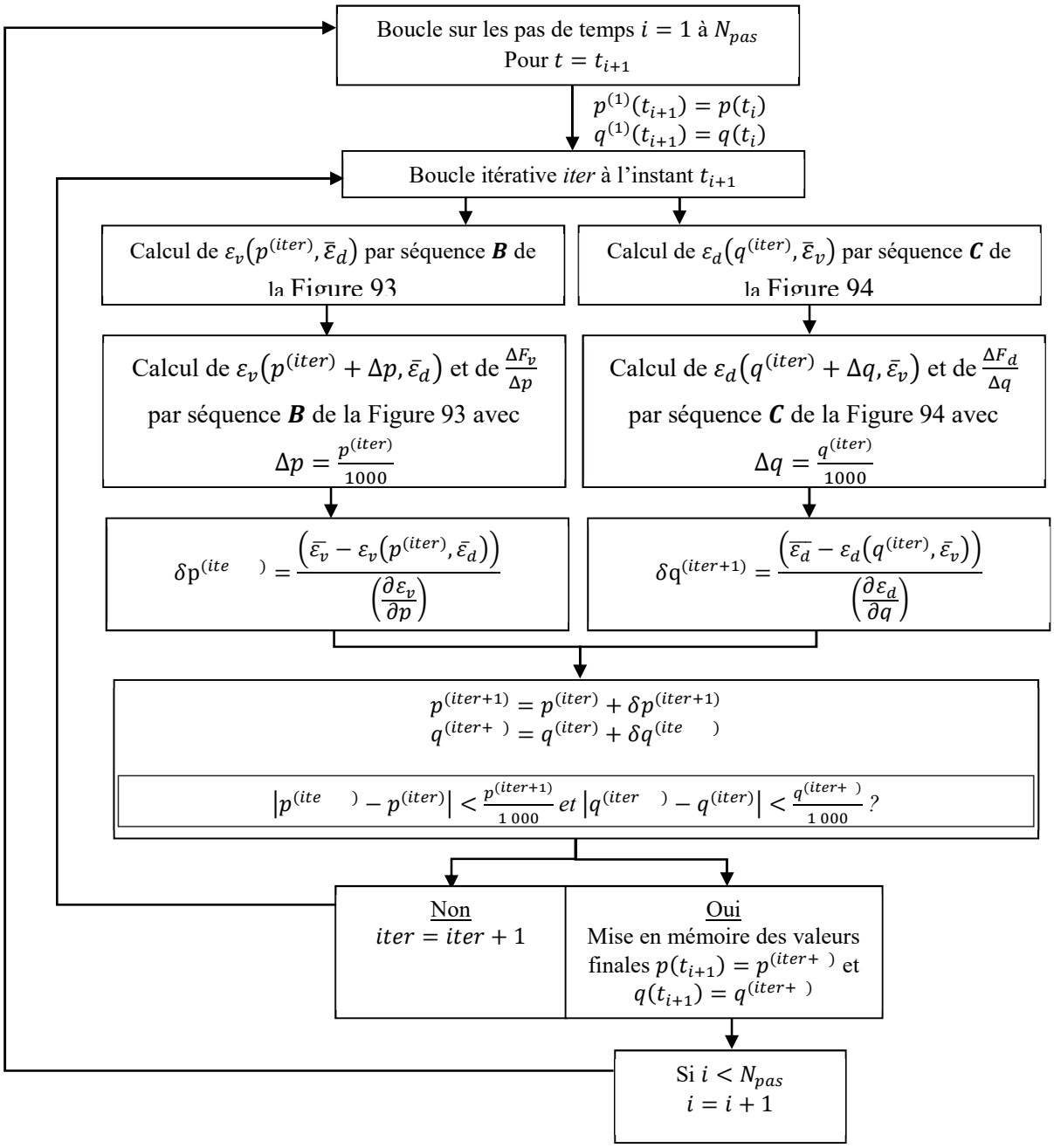


Figure 96 – Diagramme d'implémentation de la loi VENL 3D pour $\boldsymbol{\varepsilon_v}$ et $\boldsymbol{\varepsilon_d}$ donnés.

III.4.5. Implémentation du code de calcul $VENL_{oedo}$ dans le cas d'une simulation d'un essai œdométrique

Lors d'un chargement mixte (en contrainte et/ou en déformation) comme par exemple dans le cas d'un essai œdométrique à déformations radiale et tangentielle nulles et à contrainte longitudinale imposée (Figure 97), il n'est pas possible de déterminer les valeurs de p, q, ε_v et ε_d. Dans ce cas, nous rappelons les expressions à suivre :

$$p = \frac{-(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{3} \quad \text{Equation 194}$$

$$q = \sigma_{xx} - \sigma_{zz} \quad \text{Equation 195}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{zz} \quad \text{Equation 196}$$

$$\varepsilon_q = -\frac{2}{3}\,\varepsilon_v \quad \text{Equation 197}$$

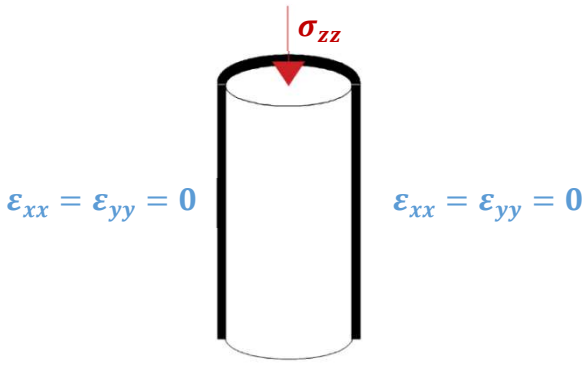


Figure 97 – Schéma de l'essai œdométrique.

Supposons connues les valeurs de contrainte $p(t_i)$ et $q(t_i)$ et de déformation $\varepsilon_v(t_i)$ et $\varepsilon_d(t_i)$ à l'instant t_i. Le calcul (à l'intérieur de chaque pas de temps) est basé sur la résolution itérative du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \varepsilon_v(t_{i+1}) = F_v\big(p(t_{i+1}), \varepsilon_d(t_{i+1})\big) \\ \varepsilon_d(t_{i+1}) = F_d\big(q(t_{i+1}), \varepsilon_v(t_{i+1})\big) \\ \dfrac{2}{3}\varepsilon_v(t_{i+1}) = -\varepsilon_d(t_{i+1}) \\ p(t_{i+1}) + \dfrac{2}{3}q(t_{i+1}) = -\sigma_z(t_{i+1}) \end{cases} \quad \text{Equation 198}$$

En rappelant :

$$\begin{cases} F_v(p, \varepsilon_d) = \displaystyle\int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, p, \varepsilon_d) dl_v \\ F_d(q, \varepsilon_v) = \displaystyle\int_0^{+\infty} \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) dl_d \end{cases} \quad \text{Equation 199}$$

La résolution repose sur l'algorithme itératif de Newton, en supposant $p^{(n)}(t_{i+1})$, $q^{(n)}(t_{i+1})$ $\varepsilon_v^{(n)}(t_{i+1})$ et $\varepsilon_d^{(n)}(t_{i+1})$ connus et en posant à l'itération $n+1$:

$$\begin{cases} p^{(n+1)}(t_{i+1}) = p^{(n)}(t_{i+1}) + \delta p^{(n+1)}(t_{i+1}) \\ q^{(n+1)}(t_{i+1}) = q^{(n)}(t_{i+1}) + \delta q^{(n+1)}(t_{i+1}) \\ \varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_v^{(n)}(t_{i+1}) + \delta\varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1}) \\ \varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_d^{(n)}(t_{i+1}) + \delta\varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1}) \end{cases}$$ Equation 200

Pour $n = 1$, on utilise l'initialisation :

$$\begin{cases} p^{(1)}(t_{i+1}) = p(t_i) \\ q^{(1)}(t_{i+1}) = q(t_i) \\ \varepsilon_v^{(1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_v(t_i) \\ \varepsilon_d^{(1)}(t_{i+1}) = \varepsilon_d(t_i) \end{cases}$$ Equation 201

L'algorithme itératif de Newton est de nouveau employant à l'instant t_{i+1} :

$$\begin{cases} \varepsilon_v^{(n)} - F_v\left(p^{(n)}, \varepsilon_d^{(n)}\right) = \dfrac{dF_v}{dp}\left(p^{(n)}, \varepsilon_d^{(n)}\right)\delta p^{(n+1)} - \delta\varepsilon_v^{(n+1)}\dfrac{dF_v}{d\varepsilon_d}\left(p^{(n)}, \varepsilon_d^{(n)}\right)\delta\varepsilon_d^{(n+1)} \\ \varepsilon_d^{(n)} - F_d\left(q^{(n)}, \varepsilon_v^{(n)}\right) = \dfrac{dF_d}{dq}\left(q^{(n)}, \varepsilon_v^{(n)}\right)\delta q^{(n+1)} + \dfrac{dF_d}{d\varepsilon_v}\left(q^{(n)}, \varepsilon_v^{(n)}\right)\delta\varepsilon_v^{(n+1)} - \delta\varepsilon_d^{(n+1)} \\ \dfrac{2}{3}\varepsilon_v^{(n)} + \dfrac{2}{3}\delta\varepsilon_v^{(n+1)} = -\varepsilon_d^{(n)} - \delta\varepsilon_d^{(n+1)} \\ p^{(n)} + \delta p^{(n+1)} + \dfrac{2}{3}q^{(n)} + \dfrac{2}{3}\delta q^{(n+1)} = -\sigma_{zz} \end{cases}$$ Equation 202

Le système à résoudre s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial F_v}{\partial p} & 0 & -1 & \dfrac{\partial F_v}{\partial \varepsilon_d} \\ 0 & \dfrac{\partial F_d}{\partial q} & \dfrac{\partial F_d}{\partial \varepsilon_v} & -1 \\ 0 & 0 & 2/3 & 1 \\ 1 & 2/3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p^{(n+1)} \\ \delta q^{(n+1)} \\ \delta\varepsilon_v^{(n+1)} \\ \delta\varepsilon_d^{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_v - F_v\left(p^{(n)}, \varepsilon_d^{(n)}\right) \\ \varepsilon_d - F_d\left(q^{(n)}, \varepsilon_v^{(n)}\right) \\ -\dfrac{2}{3}\varepsilon_v - \varepsilon_d \\ -\sigma_z - p - \dfrac{2}{3}q \end{bmatrix}$$ Equation 203

Les critères d'arrêt sont définis par $\left|\delta p^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{p^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$, $\left|\delta q^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{q^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$, $\left|\delta\varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{\varepsilon_v^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$ et $\left|\delta\varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1})\right| > \left|\frac{\varepsilon_d^{(n+1)}(t_{i+1})}{1000}\right|$.

Les dérivées partielles sont calculées numériquement par différences finies :

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p} \approx \frac{\varepsilon_v\left(p^{(iter)} + \Delta p, \varepsilon_d^{(iter)}\right) - \varepsilon_v\left(p^{(iter)}, \varepsilon_d^{(iter)}\right)}{\Delta p}$$ Equation 204

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \varepsilon_d} \approx \frac{\varepsilon_v\left(p^{(iter)}, \varepsilon_d^{(iter)} + \Delta\varepsilon_d^{(iter)}\right) - \varepsilon_v\left(p^{(iter)}, \varepsilon_d^{(iter)}\right)}{\Delta\varepsilon_d}$$ Equation 205

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial q} \approx \frac{\varepsilon_d\left(q^{(iter)} + \Delta q, \varepsilon_v^{(iter)}\right) - \varepsilon_d\left(q^{(iter)}, \varepsilon_v^{(iter)}\right)}{\Delta q} \qquad \text{Equation 206}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial \varepsilon_v} \approx \frac{\varepsilon_d\left(q^{(iter)}, \varepsilon_v^{(iter)} + \Delta\varepsilon_v^{(iter)}\right) - \varepsilon_d\left(q^{(iter)}, \varepsilon_v^{(iter)}\right)}{\Delta\varepsilon_v} \qquad \text{Equation 207}$$

L'ensemble s'insère dans l'algorithme de résolution vu en Figure 3.34.

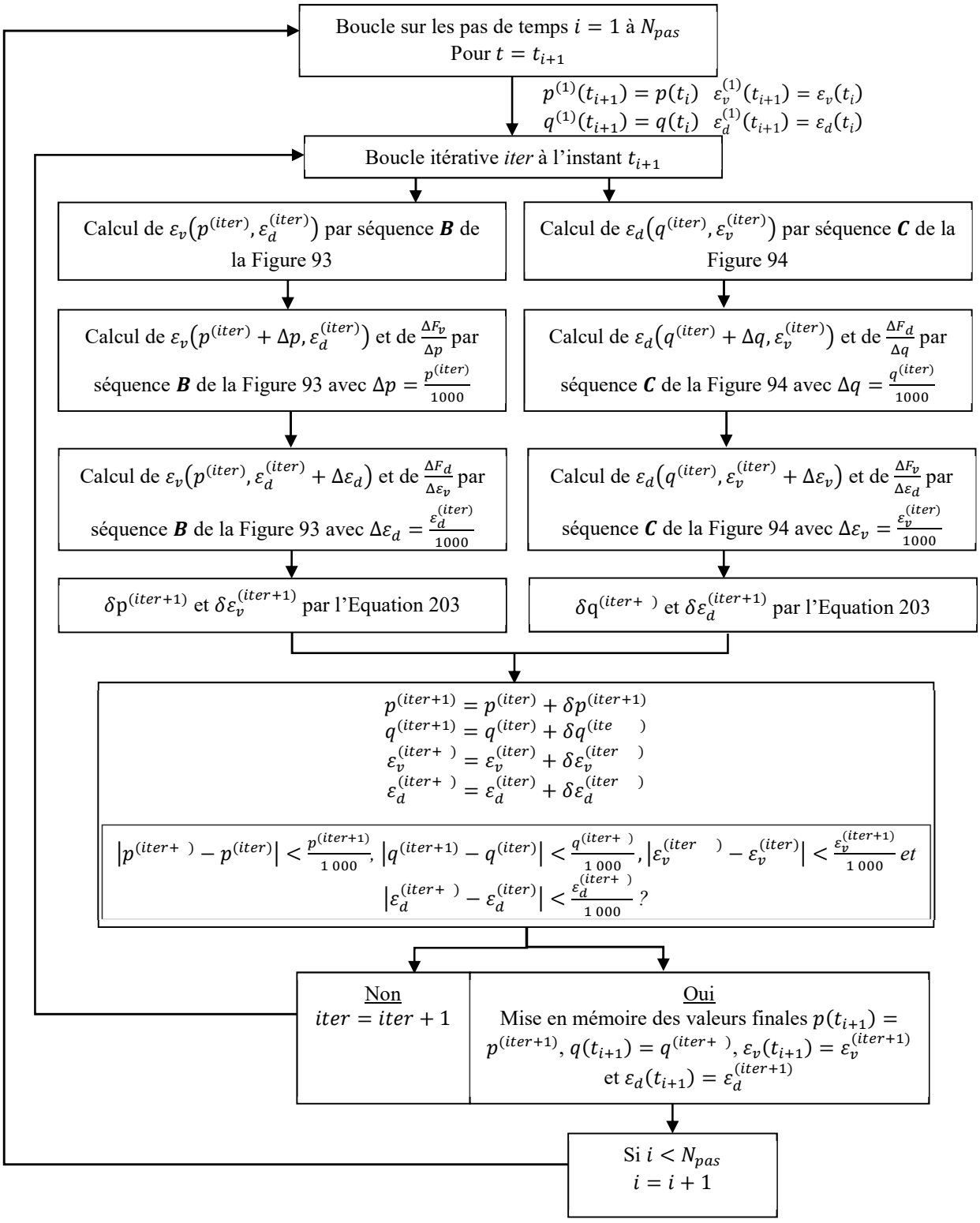


Figure 98 – Diagramme d'implémentation de la loi VENL 3D pour simulation œdométrique.

III.4.6. Auto-vérification des programmes VENL 3D

Afin de vérifier la bonne implémentation des programmes VENL 3D, nous avons fait entre autres le test suivant. Partant de la simulation d'un essai triaxial à efforts donnés $(\bar{p}(t), \bar{q}(t))$, nous utilisons le programme $VBA_{p,q}^{VENL}$ pour déterminer les déformations $\varepsilon_v(t)$ et $\varepsilon_d(t)$. Nous réinjectons alors celles-ci comme données d'entrée du programme $VBA_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}^{ENL}$ pour calculer les contraintes $p(t)$, $q(t)$ résultantes et vérifier leurs similitudes avec les données de départ.

Les valeurs des paramètres élastiques non linéaires utilisées sont les mêmes que celles de la validation du modèle ENL 3D. Pour la partie viscoélastique, on se place dans le cas de composantes volumique et déviatorique reliées entre elles par un coefficient de « Poisson » constant ν et d'un exposant de loi de fluage parabolique représentatif du comportement d'un enrobé dans le domaine de ses faibles valeurs de module. On prend ainsi :

$\nu = 0{,}35$

soit :

$\delta = \frac{9(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = 1$ d'après les Equation 145 et Equation 146

$\gamma = \beta = 0{,}6$.

La valeur de E_s est prise forfaitairement égale à $100\ MPa$.

La valeur de A est choisie égale à $30\ s$ ce qui correspond à une déformation de $100\ \mu déf$ à $0{,}02\ s$ sous une contrainte de $0{,}8\ MPa$ (ordre de grandeur obtenu sur chaussée).

Les efforts $\bar{p}(t), \bar{q}(t)$ sont ceux de la Figure 87, rappelée ci-dessous :

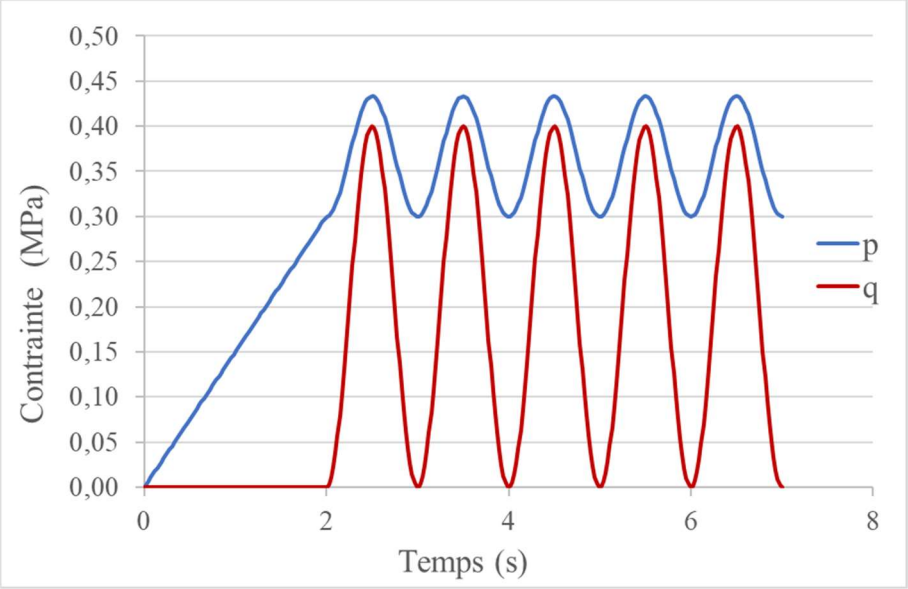


Figure 87 - Contraintes imposées.

III.4.6.1. Résultats du programme $VBA_{p,q}^{VENL}$ à contraintes imposées

Le programme $VBA_{p,q}^{VENL}$ basé sur l'algorithme Figure 95 conduit aux déformations de la Figure 99.

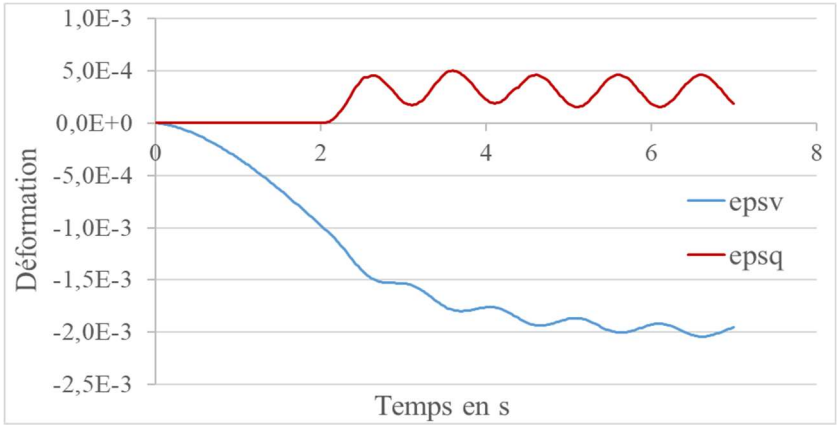


Figure 99 – Modélisation $VENL_{p,q}$ 3D.

Ces courbes peuvent être comparées à celles de la Figure 88. L'effet de viscosité s'observe sur ce graphe à travers :

- La déformation volumique qui continue à évoluer en moyenne, après l'atteinte du régime sinusoïdal de $\bar{p}(t)$;
- Des amplitudes de déformation en régime sinusoïdale moindre qu'en ENL.
- Une absence de retour à zéro des déformations lors du passage à zéro de $\bar{q}(t)$.

III.4.6.2. Résultats du programme $VBA_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}^{VENL}$ à partir des déformations précédentes

L'utilisation du programme $VBA_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}^{ENL}$ à partir des déformations précédentes ($\varepsilon_v(t)$ et $\varepsilon_d(t)$) conduit aux courbes $p(t)$, $q(t)$ de la Figure 100. On observe que l'on retrouve bien les contraintes imposées au départ.

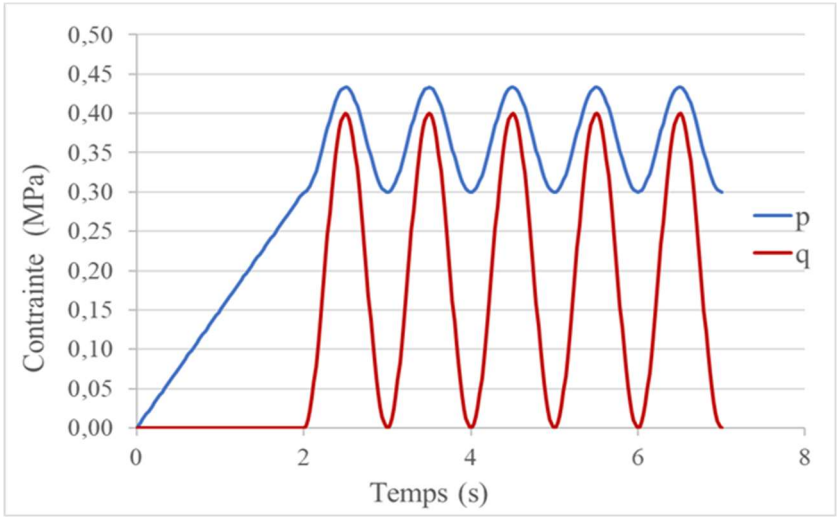


Figure 100 - Modélisation $VENL_{\varepsilon_v,\varepsilon_d}$ 3D.

III.4.7. Incidence du paramètre *A*

Le paramètre A, considéré croissant avec la viscosité du matériau, sera utilisé plus tard pour représenter le caractère thermo-susceptible du matériau et son mûrissement. Les Figure 101 ($A = 0{,}1\ s$), Figure 102 ($A = 30\ s$) et Figure 103 ($A = 65\ s$) permettent d'illustrer directement ici l'influence de ce paramètre sur les courbes contraintes/déformations simulées dans le cas d'un essai œdométrique (Figure 97).

Les résultats sont générés par le programme VBA_{oedo}^{VENL} pour $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0$ et :

- $\sigma_{zz}(t) = -0.05\frac{t}{t_1}$ et $\sigma_{zz}(t) = 0$ entre 0 et $t_1 = 5s$;
- $\sigma_{zz}(t) = -0.05 - \frac{0.4(1-\cos(2\pi(t-t_1)))}{2}$ entre t_1 et $t_f = 19s$.

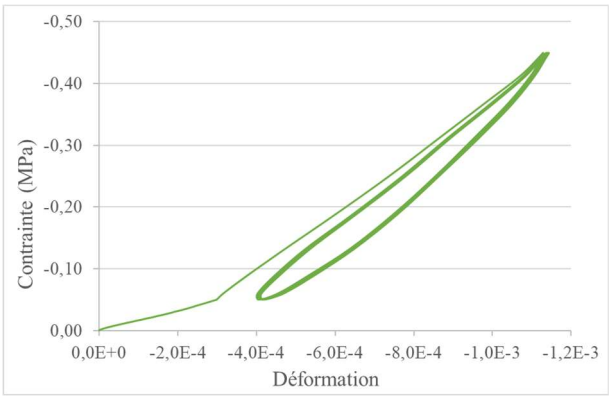


Figure 101 - Cycles de chargement $\varepsilon_{zz} - \sigma_{zz}$ pour $A = 0{,}1$ s.

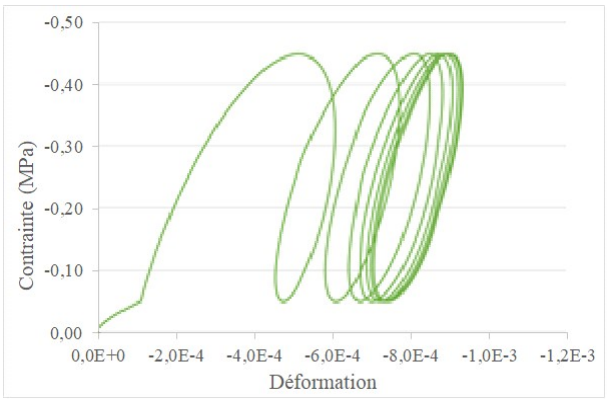


Figure 102 - Cycles de chargement $\varepsilon_{zz} - \sigma_{zz}$ pour $A = 30$ s.

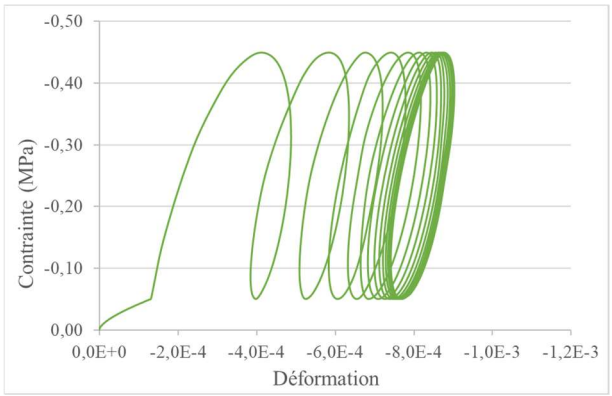


Figure 103 – Cycles de chargement $\varepsilon_{zz} - \sigma_{zz}$ pour $A = 65$ s.

La Figure 101 présente des boucles relativement fermées et de forme convexe. Elles reflètent majoritairement un comportement de type ENL. La Figure 102 présente une boucle plutôt ouverte et de forme elliptique, caractéristique d'un comportement de type VE. La Figure 102 présente un comportement intermédiaire. On observe ainsi une réduction importante d'amplitude de déformation des cycles « stabilisés » coordonné avec une augmentation de la variable A correspondant à une évaluation de la température ou du mûrissement.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire le modèle VENL 3D construit à partir de l'introduction de deux spectres ayant chacun une série d'éléments à 3 branches « ressort, amortisseur linéaire, butée » et un « double fond » pour la composante volumique. Les simulations, effectuées à partir de l'algorithme de résolution associé, montrent la capacité du modèle à décrire un comportement évolutif entre ENL et VE à travers l'utilisation de la fonction de viscosité A que l'on cherchera donc à associer plus loin au mûrissement des enrobés à l'émulsion.

Pour pouvoir utiliser ce modèle, il reste à définir les valeurs des différents paramètres qui le composent : K_a, G_a, n, E_s, δ, γ, β et A.

La détermination de ces différents paramètres doit être effectuée à partir de données expérimentales. Pour cela, nous avons développé un plan d'expérience mettant en jeu des séquences de mûrissement d'éprouvettes à température fixée, entrecoupées de mesures de module œdométrique permettant de suivre l'évolution des propriétés rhéologiques du matériau. Cela fait l'objet du chapitre à venir.

Chapitre IV. Développement et validation d'un essai de caractérisation du comportement mécanique évolutif des enrobés à l'émulsion

IV.1. Nécessité du développement d'un essai de caractérisation du comportement évolutif des enrobés à l'émulsion

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, très peu de travaux traitent de l'évolution des performances mécaniques des enrobés à l'émulsion (sans ajout de liant hydraulique) de leur état frais à leur état mûri, et ceci particulièrement au jeune âge. Dans l'optique d'alimenter et de valider le modèle VENL 3D présenté chapitre III, qui rend compte de leur comportement réversible depuis la mise en œuvre jusqu'à un état mûri, nous avons besoin d'un essai simple, répétable et reproductible, permettant de suivre l'évolution des caractéristiques physiques (teneur en eau, compacité), et mécaniques (module complexe et coefficient de Poisson), au cours du temps. Nous avons donc combiné une campagne de mûrissement du matériau (pour différentes températures et humidités relatives de l'air, constantes lors du protocole de mûrissement) avec un essai de caractérisation des performances mécaniques du matériau, à un état donné de son évolution. Ce chapitre traite du choix, du développement et de la validation de l'essai mis en œuvre aux différents âges.

IV.1.1. Choix de l'essai

Entre les essais de caractérisation mécanique normalisés réalisés sur des GNT (essais triaxiaux de révolution [30], module de résilience [29]) et les essais normalisés réalisés sur enrobés à chaud (module complexe [25]), l'essai retenu doit être compatible avec les contraintes inhérentes au produit, à savoir :

- Tester le même échantillon durant tout son mûrissement et donc avoir un échantillon transportable entre la campagne de mûrissement et l'essai de caractérisation pour suivre son comportement évolutif.
- Ne pas endommager ou déformer de façon irréversible l'échantillon lors des essais afin de rester dans le domaine du comportement viscoélastique non linéaire réversible du matériau.
- Permettre le séchage de l'échantillon durant la campagne de mûrissement, dans des conditions proches de conditions de chantier.
- Permettre le drainage éventuel de l'eau lors des essais.

Les enrobés à l'émulsion étant non cohérents à l'état frais (juste après la mise en œuvre), il faut un essai permettant de contenir le matériau durant cette phase, il nous est donc impossible d'utiliser les essais « classiques » des enrobés à chaud (flexion 2, 3 ou 4 points, compression diamétrale, essai de traction/compression). Il est, en revanche, possible d'utiliser soit l'essai triaxial de révolution soit un essai de compressibilité avec une cellule de type œdométrique légèrement modifiée afin de respecter toutes ces contraintes.

L'essai triaxial a été rapidement éliminé car trop contraignant. Outre le fait qu'une cellule triaxiale doit être immobilisée par éprouvette dans la mesure où, à l'état frais, les éprouvettes, non

cohésives, nécessitent un soutien latéral pour éviter une déformation sous poids propre, le confinement dans une cellule triaxiale drainée peut provoquer des déformations irréversibles et un surcompactage. De surcroit, l'obtention d'une modalité de mûrissement à T et HR contrôlées est, dans cette configuration d'essai, très difficile voire impossible à réaliser.

C'est pourquoi, nous choisissons de nous inspirer de l'essai de compressibilité afin de créer un essai triaxial cyclique en conditions œdométriques (Figure 104). Les œdomètres, utilisés pour réaliser des essais de compressibilité en laboratoire sur des sols fins, se caractérisent par une enceinte cylindrique indéformable, dont la paroi interne est au contact direct avec l'éprouvette, laquelle est soumise à un effort axial connu (constant par palier pour les sols, cyclique dans cette application) et à une déformation radiale nulle, en conditions de drainage haut et bas.

Dans notre cas, après malaxage, la grave émulsion sera directement mise en œuvre et compactée à l'intérieur du moule. Elle est ensuite conditionnée en ambiance contrôlée, avec une surface d'échange supérieure libre et un disque drainant en partie inférieure. Elle est testée régulièrement, lors de sa prise et son mûrissement, en compression cyclique à fréquences et températures variables pour des temps de mûrissement donnés.

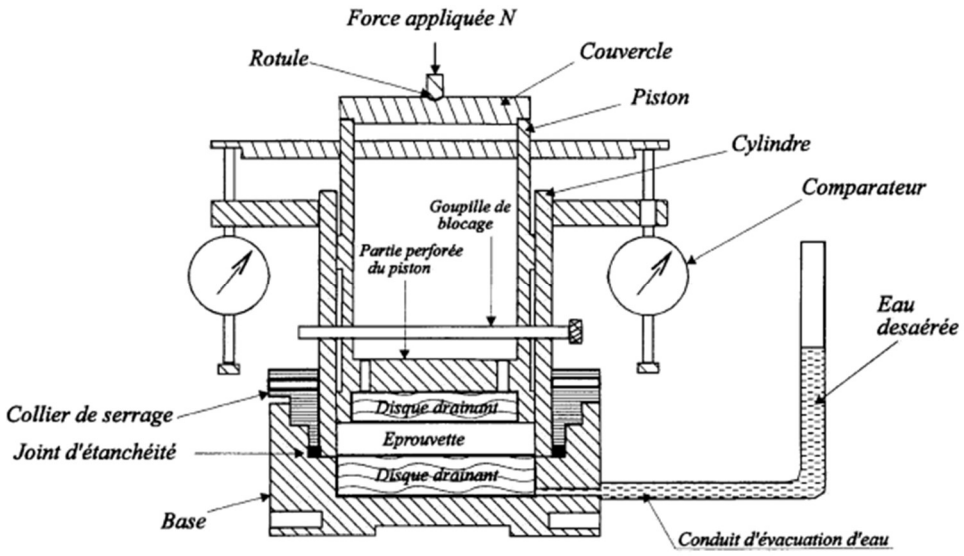


Figure 104 – Schéma de principe de l'essai œdométrique.

IV.1.2. Dispositif et moyens expérimentaux

IV.1.2.1. Cellule œdométrique

En ce qui concerne le choix du moule et de ses dimensions, il nous faut un moule cylindrique en métal assez épais ou renforcé par frettes afin de ne pas se déformer lors du compactage de l'éprouvette et des essais de compression cyclique, la première modalité étant la plus sévère. Pour cela, nous avons le choix entre deux types de moule de compactage pour enrobés à chaud de type moules Duriez de diamètre nominal 80 et 120 mm ([24]) et un moule PCG de diamètre nominal 180 mm ([23]). Comme nos formules d'enrobé à l'émulsion sont composées de granulats 0/14 mm, pour éviter les effets d'échelle, le diamètre du moule doit être supérieur à 8 à 10 fois le plus

gros diamètre des granulats. Les moules Duriez dilatés et les moules PCG sont donc utilisables. Compte-tenu des disponibilités des matériels et sachant que les campagnes de mûrissement nécessitent d'immobiliser les moules pendant plusieurs semaines, nous avons fait le choix d'utiliser les moules Duriez de 120 mm de diamètre.

L'utilisation d'un moule Duriez pour cet essai nous conduit à choisir également la méthode normative associée pour le compactage de notre matériau. Ce compactage est réalisé en appliquant un effort de compression simple de 180 kN sur le matériau jusqu'à ce que la hauteur souhaitée (et donc la compacité) de l'éprouvette soit atteinte et se termine après avoir appliqué la force cinq minutes.

Lors du compactage et des essais, le moule Duriez est muni en partie basse et en partie haute de deux disques drainant rainurés sur quatre endroits du disque (Figure 105) qui permettent l'écoulement de l'eau en dehors du moule.

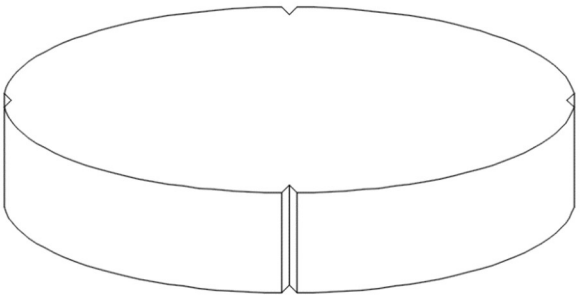


Figure 105 - Disque drainant utilisé.

En conditions de mûrissement, les échantillons sont stockés en conditions T et HR régulées, sur disque drainant et surface supérieure libre.

Des essais de faisabilité ont porté sur l'élancement (rapport hauteur/diamètre) optimal de l'échantillon dans ces moules. Entre un élancement de 0,2, couramment utilisé pour les essais de compressibilité des sols fins et pouvant être considéré comme une limite inférieure, et un élancement de 2, préconisé en essais triaxiaux mais générant des gradients potentiels de compacité à la mise en œuvre ainsi que de mûrissement, tant en augmentant les frottements latéraux en cours d'essai, une étude préliminaire a permis de déterminer un élancement optimal, compte tenu des contraintes préalablement identifiées.

IV.1.2.2. Machine et protocole d'essai

La machine d'essai utilisée est une presse servo-hydraulique Schenck®, composée d'un vérin de capacité 100 kN et d'un capteur de déplacement de course de 100 mm incorporé dans le vérin.

Dans une première phase, cette presse est utilisée pour compacter les éprouvettes, par compactage statique double effet, jusqu'à une valeur de compacité requise.

Dans une deuxième phase, elle est utilisée pour réaliser les essais œdométriques cycliques. L'asservissement est réalisé en force, avec un chargement sinusoïdal, entre deux seuils de

compression. Après une rampe de précompression de 0,5 kN (0,04 MPa) à 1 kN (0,09 MPa)., obtenue en 5 s, le protocole comprend :

- Trois niveaux de chargement (identification de la composante élastique non linéaire).
- Cinq fréquences de sollicitations : 0,1 – 1 – 3 – 6 et 10 Hz et trois températures d'essai à savoir 15, 20 et 35 °C (identification de la composante viscoélastique linéaire).

Le logiciel dédié à la presse (Tema concept®) et un module d'alimentation pilotant la presse pour n'importe quel signal de force permettent l'asservissement des essais. Le module dispose d'un système d'acquisition de 16 voies avec une résolution de 16 bits.

IV.1.2.3. Instrumentation

Un essai œdométrique nécessite la mesure de la force (ou contrainte axiale) appliquée ainsi que du tassement (ou déformation axiale) de l'éprouvette. La déformation radiale est supposée nulle et la contrainte radiale, non mesurée, évolue avec la contrainte axiale.

Dans notre cas, le choix du niveau maximal de chargement a été défini de sorte de ne pas excéder une déformation axiale du matériau frais de l'ordre de 1000 µdéf. Après quelques tests sur éprouvette à l'état frais, nous avons choisi des amplitudes de force (contrainte axiale) de 2,3 kN (0,2 MPa), 4,6 kN (0,41 MPa) et 10 kN (0,88 MPa) sachant qu'il existe toujours lors de l'essai une force initiale minimale de 0,5 (0,04 MPa) (lors de la première semaine d'essais) à 1 kN (0,09 MPa) (pour le reste de la période d'essais). La force maximale étant de 11 kN, nous avons choisi d'utiliser un capteur de force additionnel (Les fiches techniques du capteur sont ajoutées annexes 7) : un capteur en S, en pont complet d'extensomètre, d'amplitude de mesure de 25 kN et dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 6 :

Tableau 6 - Caractéristiques métrologiques du capteur de force 25 kN.

Sensibilité	Non-linéarité	Hystérésis
1,7133 mV/V	± 0,036 % EM	0,023 % EM

Pour la mesure des déplacements, trois capteurs LVDT GT22 HP ± 0,2 mm TESA® dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 7 sont disposés à 120° les uns des autres au-dessus du casque (Figure 106). Ils permettent d'apprécier d'éventuels effets parasites (défauts de parallélisme, excentricité du chargement). Une dérive notable d'un de ces capteurs peut conduire à rejeter l'essai (Les fiches techniques des trois capteurs sont ajoutées annexes 8, 9 et 10).

Tableau 7 - Caractéristiques métrologiques des capteurs LVDT GT22 Tesa®.

Etendue de mesure	Répétabilité	Hystérésis	Erreur max. L en mm ; erreur en µm	Fréquence de coupure à -3 dB
± 1 mm PE / ± 0,2 mm	0,01 µm	0,01 µm	$0,07 + 0,4.L^3$	60 Hz

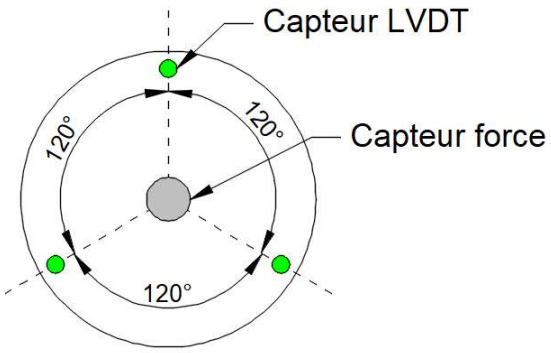


Figure 106 - Disposition des capteurs LVDT.

IV.2. Essais de faisabilité et modifications du dispositif d'essai

L'essai œdométrique cyclique ayant été choisi, ainsi que son instrumentation, il convient d'adapter le protocole au matériau testé, ainsi qu'aux contraintes environnementales choisies. Dans un premier temps, des essais sur une grave émulsion permettent d'apprécier les difficultés associées aux mesures et aux observables, en prenant en compte l'élancement de l'éprouvette, les conditions aux limites et les déformations à vide de l'ensemble du montage et en proposant des corrections adaptées.

IV.2.1. Description du matériau utilisé

Les essais de faisabilité ont été réalisés à partir d'une seule formulation : granulats 0/14 et émulsion 40/60 [16]. Le bitume de base utilisé dans l'émulsion est de grade 160/220, et de teneur en liant 4,2 ppc (parties pour cent en masse de liant anhydre par rapport à la masse des granulats).

Caractéristiques des granulats :

Les granulats 0/14 sont de nature basaltique et proviennent de la carrière de Saint Julien du Pinet (43). Ce mélange utilise les fractions granulaires suivantes : 0/4, 4/10 et 10/14 mm dans les proportions massiques suivantes :

- Granulats 0/4 : 60 %
- Granulats 4/10 : 20 %
- Granulats 10/14 : 20 %

L'analyse granulométrique de chacune des fractions est faite conformément à la norme NF EN 933-1 [56].

La recomposition granulaire obtenue est présentée dans le Tableau 8.

Tableau 8 - Analyses granulométriques.

	Pourcentage passants			
Tamis (mm)	0/4	4/10	10/14	Mélange
16,00	100	100	100	100

14,00	100	100	96	99
12,50	100	100	67	93
10,00	100	92	13	81
8,00	100	61	3	73
6,30	100	32	2	67
5,00	97	15	2	62
4,00	92	4	1	56
3,15	82	-	-	50
2,00	58	1	-	35
1,00	37	1	-	23
0,50	24	-	-	15
0,25	16	-	-	9,9
0,125	11	-	-	6,9
0,063	8,4	0,6	0,5	5,3

Obtention de la compacité :

La masse volumique réelles du mélange est de 2,502 g/cm^3, elle est déterminée grace à l'essai de caractérisation de la masse volumique réelle [57] qui est en fait le rapport entre la masse et le volume or eau et or vide du matériau. Pour les éprouvettes expérimentales, nous cherchons un pourcentage de vides dans le matériau de 15%, nous avons donc besoin d'une masse volumique apparente de 2,944 g/cm^3. Connaissant le diamètre de notre moule Duriez (120 mm) et la hauteur d'échantillon que l'on souhaite, nous pouvons calculer la masse de mélange nécessaire à la confection d'une éprouvette.

Fabrication :

Chaque granulat sec est pesé puis placé dans le malaxeur avec l'eau d'ajout puis mélangé dans le malaxeur pendant 30 secondes. On ajoute alors la quantité désirée d'émulsion avant de malaxer encore pendant 2 minutes. La masse d'enrobé désirée est alors placée dans chacun des moules, puis compactée, par un compactage double effet afin d'obtenir la hauteur désirée et donc une compacité visée soit 15 % de vides.

Mûrissement :

Les conditions de mûrissement en température et humidité pour ces essais de faisabilité sur cet enrobé à l'émulsion a été de 20°C et de 45% d'HR.

IV.2.2. Premiers essais de faisabilité

Lors de nos premiers essais œdométriques, le corps du moule Duriez a été placé sur un élastomère afin d'obtenir conformément à la norme [29] un effort axial double effet (Figure 107). Le diamètre de ce casque (115 mm) est très légèrement inférieur au diamètre du moule Duriez (120 mm) afin d'éviter tout frottement. Les capteurs LVDT sont positionnés au-dessus du casque et maintenus par des supports aimantés au bâti de la presse. Deux cales métalliques de hauteurs différentes sont placées en dessous du disque drainant inférieur pour maintenir le matériau en partie haute (Figure 108).

Figure 107 – Montage du premier essai œdométrique.

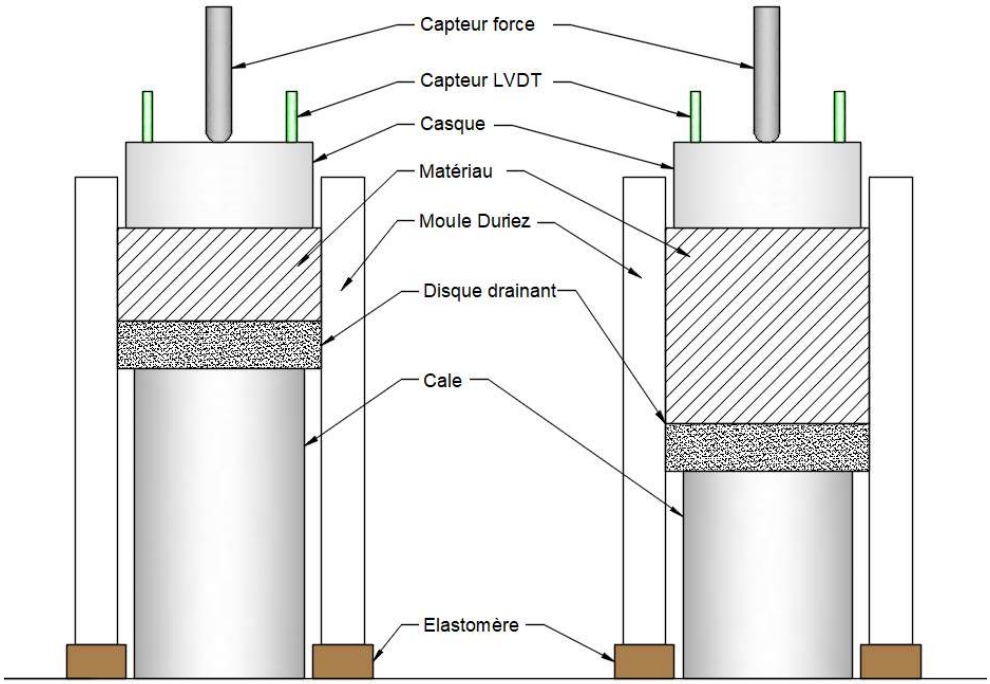


Figure 108 – Dispositif œdométrique pour le choix de l'élancement : 0,5 (h = 60 mm) à gauche et 1 (h = 120 mm) à droite.

IV.2.2.1. Choix de l'élancement

Pour minimiser les frottements entre le matériau et le moule, et avant l'essai, le matériau compacté et le disque drainant inférieur sont préalablement déplacés à l'intérieur du moule puis les parois du moule sont enduites d'une fine couche de produit décoffrant pour permettre à l'échantillon de coulisser facilement dans le moule. Pour un élancement de 0,5, cette manipulation est très facile. En revanche, l'échantillon d'élancement 1, le déplacement manuel devient difficile.

Lors des essais, pour un élancement 1, malgré le déplacement opéré, les frottements entre éprouvette et moule empêchent une sollicitation homogène du matériau sur toute sa hauteur et tendent à diminuer la valeur de déformation axiale mesurée, ce qui a pour conséquence (Tableau 9) de majorer la valeur de module apparent obtenu.

Tableau 9- Mesures lors de l'essai œdométrique.

	Déplacement (mm)	Déformation	Contrainte (MPa)	Module (MPa)
Elancement 0,5	-0,102	$-1{,}85\ 10^{-3}$	-0,794	446
Elancement 1	-0,154	$-1{,}44\ 10^{-3}$	-0,794	554

De plus, lors du démoulage de ces toutes premières éprouvettes, après les avoir sollicitées trois fois par semaine pendant 1 mois, celles-ci ont été testées au banc gammadensimétrique afin de mesurer leur densité sur leur hauteur. Cet essai, normalisé par la norme NF P 98-250-5 [58] utilise l'absorption de rayons gamma par le matériau pour en déduire sa densité locale. Le déplacement du faisceau d'ondes permet d'obtenir, connaissant la masse volumique spécifique du produit, et l'absorption, un profil de compacité sur toute la hauteur de l'éprouvette. La Figure 109 présente l'évolution de la teneur en vide (ou porosité) des échantillons pour les deux élancements testés.

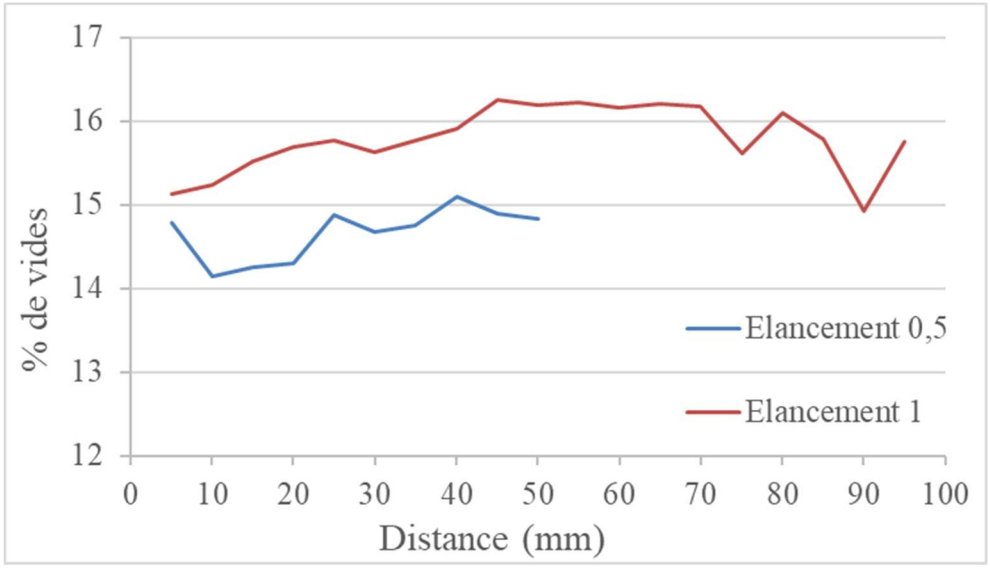


Figure 109 - Teneur en vides en fonction de la hauteur de l'éprouvette (après 12 essais œdométriques).

Nous pouvons voir sur ce graphique après essais que lors du compactage, nous ne réussissons pas à obtenir la compacité désirée lors du compactage des éprouvettes d'élancement 1. Nous pouvons

observer que l'éprouvette d'élancement 1, même après 1 mois d'essai, montre des gradients de compacité plus élevés que l'éprouvette d'élancement 0,5. Pour l'élancement 0,5, la teneur en vides moyenne est de 14,6 % ce qui semble cohérent avec une teneur en vides initiales de 15% et un mois d'essais œdométriques. De plus, la variation de compacité sur toute l'épaisseur du matériau est plus faible pour un élancement 0,5.

Au vu de ces constatations, un élancement de 0,5 est choisi. Bien que le volume élémentaire représentatif du matériau soit réduit, les gradients de mûrissement (hors essais) seront ainsi minimisés.

IV.2.2.2. Problèmes rencontrés lors de la première étude

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 110, le dispositif, empilant des cales de liaison, et le montage des capteurs de déplacement sur la table de la machine d'essai entrainent des vibrations parasites, ainsi qu'une surestimation des déplacements, associée au rattrapage de jeux mécaniques et aux déformations propres des cales

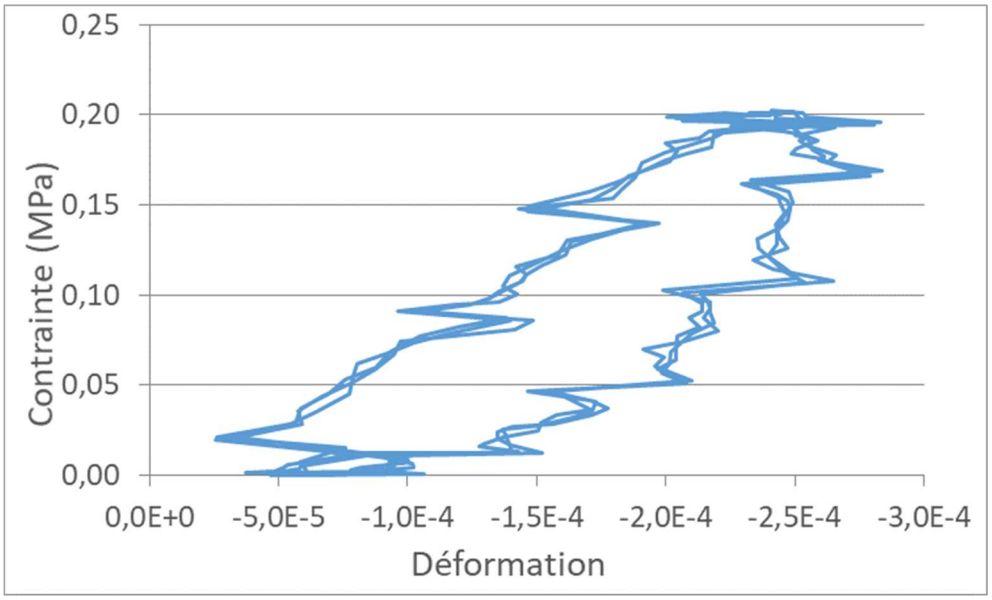


Figure 110 - Cycles de chargement stabilisés - Essais à 15 °C, 10 Hz et 2,3 kN.

Pour une fréquence d'acquisition de 10 Hz, le système d'acquisition associé à la machine d'essai présente un signal bruité avec des sauts de déplacement toutes les 0,01 secondes. De plus, les mesures sont effectuées par deux cartes d'acquisition multiplexées ce qui peut introduire un décalage temporel entre les différents signaux.

Ce problème est bien d'ordre électronique car nous observons ce disfonctionnement lors d'une simple mesure de déplacements sans chargement comme nous le montre la Figure 111.

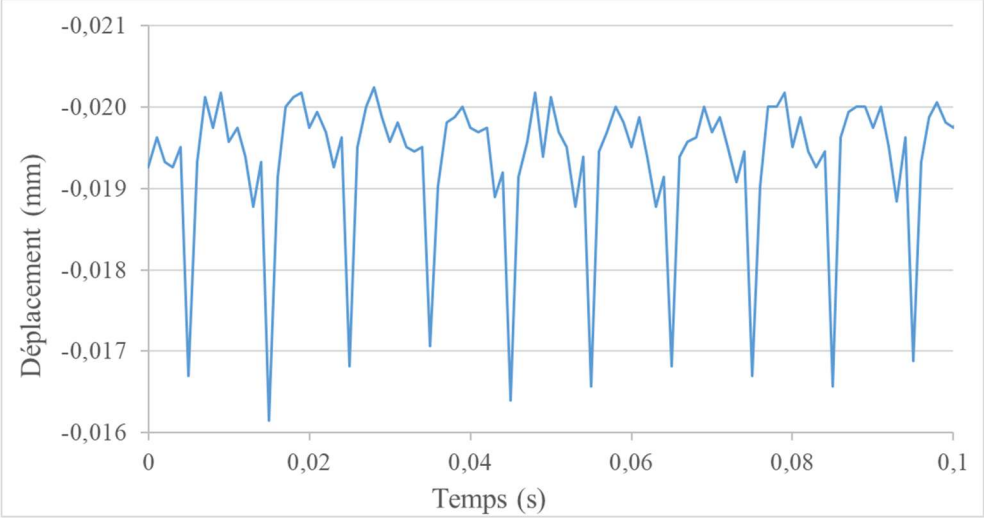


Figure 111 – Mesure de déplacement sans chargement.

Ces deux problèmes ne nous permettent pas d'avoir un signal clair nous permettant de lire la valeur de déplacement. Dans le but d'améliorer les mesures force/déplacement, un nouveau dispositif d'essai œdométrique et un nouveau système d'acquisition ont été développés et mis en œuvre.

IV.2.3. Nouveau dispositif d'essai

Pour ce nouveau dispositif permettant d'obtenir une mesure de déplacement plus fiable et corrigeable des effets parasites, les contacts entre éléments métalliques doivent être minimisés et la fixation des capteurs de déplacement doit être au plus près du montage. Une cale inférieure rectifiée a été usinée, afin de s'affranchir de l'empilage préliminaire. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 112, nous avons également créé un support permettant de relier directement les capteurs de déplacement à la cale inférieure, sous le disque drainant et le matériau, en s'affranchissant du bâti de la machine d'essai. Ce support est divisé en deux parties (Figure 113) que nous nommerons support supérieur et support inférieur et qui, une fois réunis, seront maintenus ensembles par trois vis, lors du montage initial et permettront un positionnement fiable et répétable des 3 capteurs LVDT, aux angles de 120° choisis.

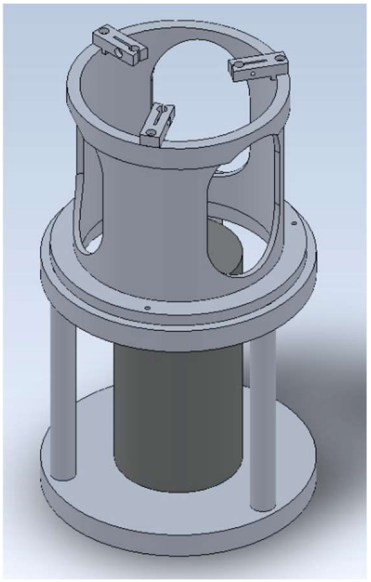


Figure 112- Dessin technique du support d'essai.

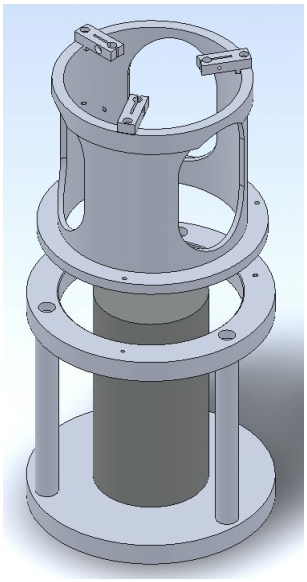


Figure 113 -Vue éclatée du support d'essai.

La cale et le support inférieur du moule œdométrique sont fixés entre eux afin de n'avoir aucun mouvement possible entre les deux pièces (Figure 114).

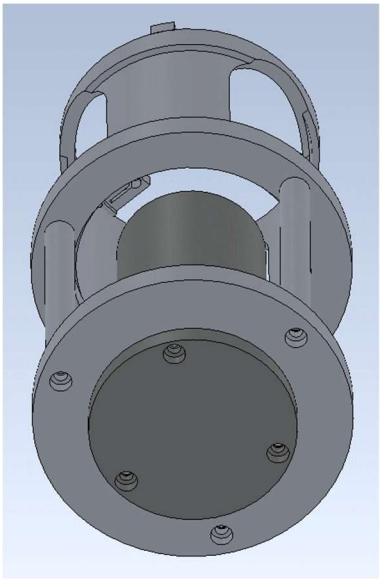


Figure 114 - Vue de dessous du support.

IV.2.3.1. Montage de l'essai

Les figures suivantes présentent étape par étape, le montage de l'essai œdométrique entre l'échantillon, le support de l'essai et les capteurs de déplacement :

Figure 115 - Etape 1 : Mise en place du support inférieur sur le bâti de la presse.

Figure 116 -Etape 2 : Mise en place de l'élastomère autour de la cale.

Figure 117 - Etape 3 : Mise en place de l'éprouvette et du cylindre sur le support inférieur.

Figure 118 - Etape 4 : Mise en place du casque sur le matériau.

Figure 119 - Etape 5 - Mise en place et fixation du support supérieur.

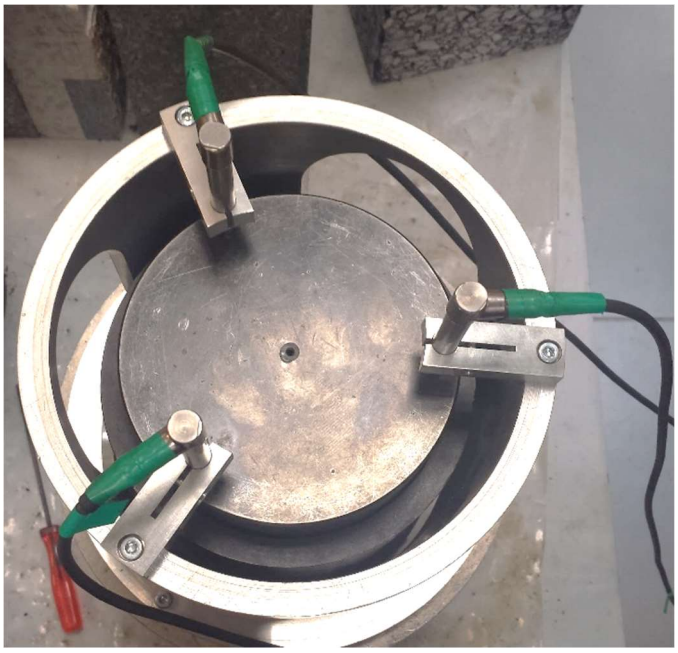


Figure 120 - Etape 6 – Mise en place et réglage des capteurs de déplacement en position initiale.

Figure 121 - Etape 7 - Démarrage de l'essai avec application de l'effort cyclique souhaité.

IV.2.4. Nouvelle acquisition

En plus du nouveau support, le système d'acquisition a été modifié (Figure 122). Au lieu de passer par l'acquisition du logiciel associé à la presse, nous avons mis en place une nouvelle centrale d'acquisition via un Spider8® HBM (8 voies synchrones échantillonnées-bloquées, fréquence maximale d'acquisition 9600 Hz, CAN 16 bits), pour les 4 voies de déplacements et de force, associé au logiciel Catman® HBM.

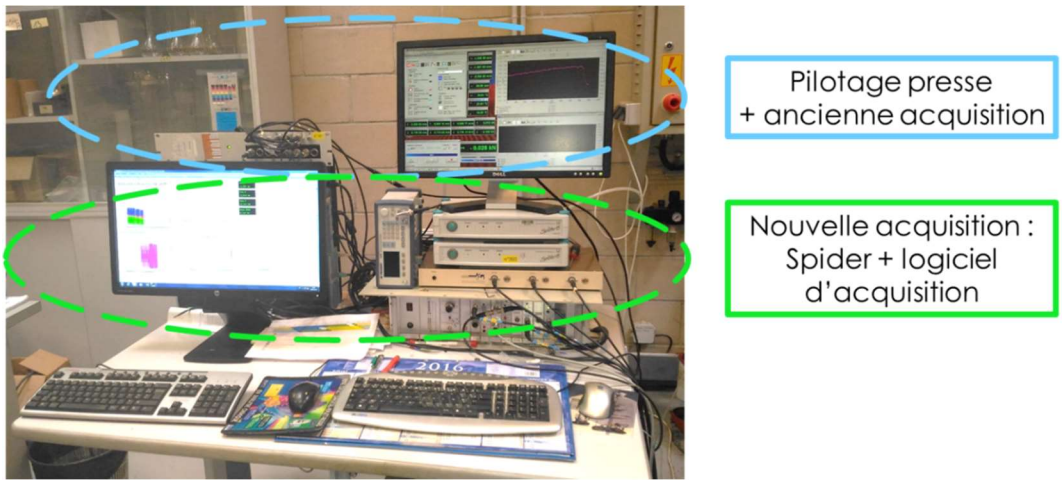


Figure 122 - Système de pilotage et nouvelle acquisition.

Ce type d'acquisition est très simple d'utilisation et n'induit plus aucun saut dans le signal de déplacement.

IV.2.4.1. Correction des déplacements « à vide »

Lors des premiers essais de faisabilité, nous savons que le déplacement mesuré est de l'ordre de quelques dizaines de micron et peut être faussé par la déformation des cales métalliques inférieures et supérieures. Nous avons donc décidé de mesurer les déplacements du support inférieur, du disque drainant et du casque sous chargement à la température constante de 20 °C. Nous nommerons, par la suite, ce protocole de mesure, l'essai « à vide ». Pour cela, un cylindre métallique rectifié de faible épaisseur (28 mm) est interposé entre le casque supérieur et le disque drainant. Pour obtenir des données de reproductibilité, le protocole de mesures comprend onze chargements et déchargements en démontant et remontant le support entre chaque test. La Figure 123 présente le résultat de ces tests.

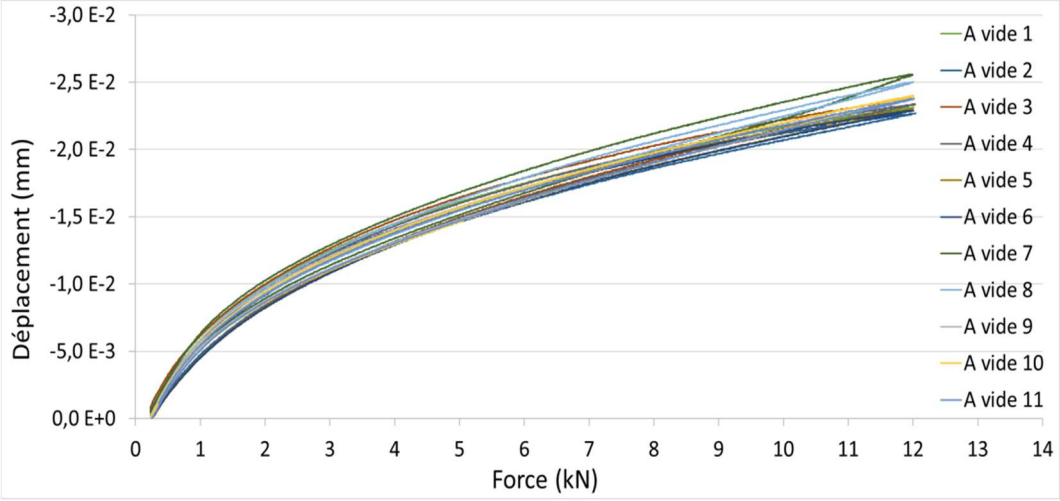


Figure 123 - Mesure du déplacement "à vide".

Les tableaux montrent la mesure de force et de déplacement moyen de tous ces essais ainsi que leurs écarts types.

Tableau 10 – Valeurs de force et déplacement moyen avec ecart type lors du chargement.

Force moy (kN)	Ecart type force	Dépl moy (mm)	Ecart type dépl
0,25	1,1E-03	0,0E+00	0,0E+00
0,50	1,0E-01	-1,7E-03	9,7E-04
0,90	9,3E-02	-4,2E-03	8,0E-04
1,29	9,2E-02	-6,0E-03	6,2E-04
1,68	9,2E-02	-7,5E-03	4,9E-04
2,08	9,3E-02	-8,7E-03	4,4E-04
2,47	9,4E-02	-9,7E-03	3,9E-04
2,86	9,1E-02	-1,1E-02	3,7E-04
3,25	9,1E-02	-1,2E-02	3,4E-04
3,64	9,2E-02	-1,2E-02	3,3E-04
4,03	9,0E-02	-1,3E-02	3,2E-04
4,43	9,0E-02	-1,4E-02	3,2E-04
4,82	8,8E-02	-1,4E-02	3,2E-04
5,21	9,1E-02	-1,5E-02	3,4E-04
5,60	9,3E-02	-1,6E-02	3,5E-04
5,99	9,4E-02	-1,6E-02	3,5E-04
6,39	9,5E-02	-1,7E-02	3,6E-04
6,78	9,7E-02	-1,7E-02	3,7E-04
7,17	9,0E-02	-1,8E-02	3,9E-04
7,57	9,4E-02	-1,8E-02	4,1E-04
7,95	1,1E-01	-1,9E-02	4,1E-04
8,36	1,0E-01	-1,9E-02	4,3E-04
8,73	8,8E-02	-2,0E-02	4,6E-04
9,13	8,9E-02	-2,0E-02	4,7E-04
9,33	8,7E-02	-2,1E-02	4,9E-04
9,52	1,0E-01	-2,1E-02	5,0E-04
9,93	9,2E-02	-2,1E-02	5,4E-04
10,31	8,6E-02	-2,2E-02	5,9E-04
10,70	9,8E-02	-2,2E-02	6,4E-04
11,08	8,8E-02	-2,3E-02	7,1E-04
11,47	9,6E-02	-2,3E-02	7,9E-04
11,85	8,5E-02	-2,4E-02	8,6E-04
11,92	6,6E-02	-2,4E-02	9,4E-04

Tableau 11 - Valeurs de force et déplacement moyen avec ecart type lors du déchargement.

Force moy (kN)	Ecart type force	Dépl moy (mm)	Ecart type dépl
11,75	1,1E-01	-2,4E-02	9,0E-04
11,34	8,6E-02	-2,3E-02	8,5E-04
10,96	1,0E-01	-2,3E-02	8,1E-04
10,58	8,9E-02	-2,3E-02	7,8E-04
10,18	8,5E-02	-2,2E-02	7,2E-04
9,79	9,7E-02	-2,2E-02	7,1E-04
9,40	8,8E-02	-2,1E-02	6,7E-04
9,00	9,2E-02	-2,1E-02	6,4E-04
8,61	1,0E-01	-2,1E-02	6,2E-04
8,22	8,7E-02	-2,0E-02	6,0E-04
7,83	9,1E-02	-2,0E-02	5,7E-04
7,43	1,0E-01	-1,9E-02	5,6E-04
7,04	9,3E-02	-1,9E-02	5,5E-04
6,66	9,6E-02	-1,8E-02	5,3E-04
6,27	8,5E-02	-1,8E-02	5,1E-04
5,87	9,3E-02	-1,7E-02	4,9E-04
5,48	9,0E-02	-1,7E-02	4,7E-04
5,08	9,0E-02	-1,6E-02	4,6E-04
4,69	9,5E-02	-1,5E-02	4,5E-04
4,30	9,1E-02	-1,5E-02	4,3E-04
3,90	8,8E-02	-1,4E-02	4,3E-04
3,52	9,4E-02	-1,3E-02	4,5E-04
3,13	8,9E-02	-1,3E-02	4,5E-04
2,74	9,3E-02	-1,2E-02	4,8E-04
2,54	9,0E-02	-1,1E-02	4,8E-04
2,34	9,1E-02	-1,1E-02	5,0E-04
1,95	9,3E-02	-9,5E-03	5,4E-04
1,56	9,2E-02	-8,2E-03	5,9E-04
1,17	9,1E-02	-6,7E-03	6,7E-04
0,78	9,2E-02	-4,7E-03	8,0E-04
0,39	9,3E-02	-1,9E-03	1,1E-03
0,26	5,4E-02	-7,5E-04	8,2E-04

La Figure 124 présente l'évolution, en fonction de la force, de la moyenne des mesures des déplacements, de la fonction polynomiale utilisée, ainsi que les valeurs du coefficient de corrélation obtenu et des incertitudes de déplacements moyens associées à chaque palier de force imposé.

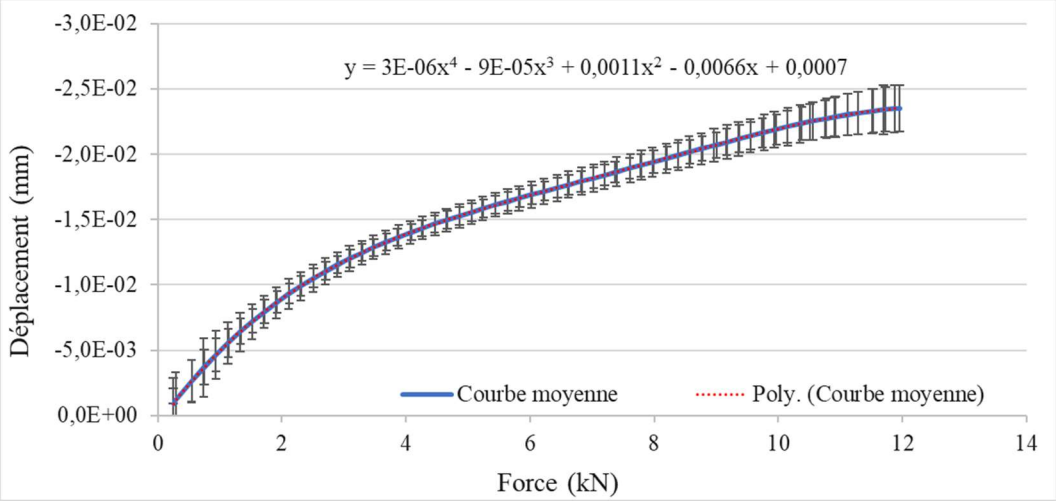


Figure 124 – Déplacement « à vide » et calage d'une fonction polynomiale.

Un calage polynomial est effectué sur la valeur moyenne du déplacement à vide en fonction de l'effort axial, la fonction obtenue est :

$$d(f) = 3.10^{-6}f^4 + 9.10^{-5}f^3 + 1.10^{-3}f^2 + 7.10^{-3}f + 7.10^{-4}$$ Equation 208

où :

f est la valeur de la force en kN

et $d(f)$ est la valeur de déplacement « à vide », en mm

Lors des essais sur matériau, il est maintenant possible de déduire aux valeurs mesurées les valeurs du déplacement à vide du dispositif pour une force donnée et donc de corriger le déplacement total afin d'obtenir la mesure de déplacement du matériau seul.

IV.2.4.2. Correction des déphasages

Pour quantifier le déphasage que l'ensemble (capteurs/conditionneurs/chaine de mesure) peut induire sur une mesure d'angle de phase pour un comportement viscoélastique, nous avons placé un ressort d'étalonnage à portées rectifiées MTS®, de comportement purement élastique entre le disque drainant et le casque. Ce ressort a été sollicité, en compression cyclique, à différentes fréquences afin d'estimer le déphasage inhérent au système à retrancher aux valeurs mesurées (Figure 125).

Figure 125 – Mesure du déphasage induit par toute la chaine de mesure.

Le déphasage est mesuré entre la force (considérée comme référence) et la moyenne des 3 signaux de déplacement. Des exemples de résultats sont présentés en annexe 11. Comme, en théorie, ce déphasage devrait être nul, le déphasage calculé, présenté Tableau 12, est celui de l'ensemble de la chaine de mesures (principalement associé aux capteurs LVDT). Il sera nommé déphasage « à vide » et déduit des valeurs mesurées, dans la suite de cette étude.

Tableau 12 - Mesure de déphasage « à vide ».

Fréquence de sollicitation	0,1 Hz	1 Hz	3 Hz	6 Hz	10 Hz
Déphasage moyen (°)	0	1,25	2,23	3,72	6,36

IV.2.4.3. Champs de température

Après quelques essais initiaux sur le matériau à l'état frais, les éprouvettes ont été sollicitées, en compression cyclique à valeur initiale donnée, sur 10 cycles à 0,1 Hz, 50 cycles à 1 Hz, 75 cycles à 3 Hz et 6 Hz et 100 cycles à 10 Hz. Ce nombre de cycles de sollicitation permet d'obtenir, peu ou prou, une stabilisation des déformations quels que soient la fréquence de sollicitation, la température ou l'état de mûrissement du matériau. Dans ces conditions, pour une température d'essai et un niveau de force donnés, l'essai dure 3 minutes et 18 secondes soit un total de 9 minutes et 54 secondes pour un essai complet, à température d'essai dite constante, pour les 3 niveaux de chargement et les 5 fréquences préalablement définies.

Au vu du nombre important d'essais à effectuer, et de l'absence d'une enceinte climatique environnant le système d'essai, le choix a été d'extraire les moules de leurs conditionnements (T, HR) juste avant l'essai. Le local d'essai étant thermorégulé à 20 °C, la stabilisation des éprouvettes à cette température d'essai, pour un mûrissement à 20 °C ne pose donc aucun problème. En revanche, l'évolution de la température à la surface et au cœur de l'éprouvette lorsqu'on la sort

d'une enceinte climatique à 35 °C (et 15 °C), deux conditions choisies par la suite pour l'étude du mûrissement, afin de réaliser l'essai dans la salle climatisée à 20°C lors de ces 13 minutes d'essai (mise en place de l'éprouvette + durée de l'essai) doit être quantifiée.

Pour cela nous avons utilisé deux sondes de températures PT100 de 3 mm de diamètre et 30 mm de longueur. La première est placée à la surface supérieure du matériau et l'autre est placée au cœur de l'éprouvette comme représenté Figure 126. Lors de leur sortie de l'enceinte climatique, le moule et l'éprouvette sont placés sur les cales (cale et disque drainant) et l'éprouvette est recouverte du casque (cales et casques étant dans la salle thermorégulée à 20°C), afin de simuler les transferts thermiques par conduction lors de l'essai œdométrique (Figure 127).

Figure 126 - Mise en place des sondes de température.

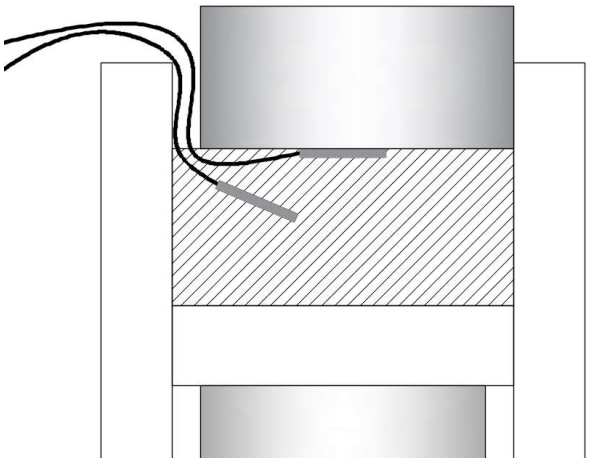


Figure 127 - Mesure de l'évolution de la température dans l'éprouvette une fois mise dans la salle thermorégulée à 20°C.

La Figure 128 présente l'évolution de la température à la surface et au cœur de l'éprouvette lors de ce test pour une température initiale de 15 °C.

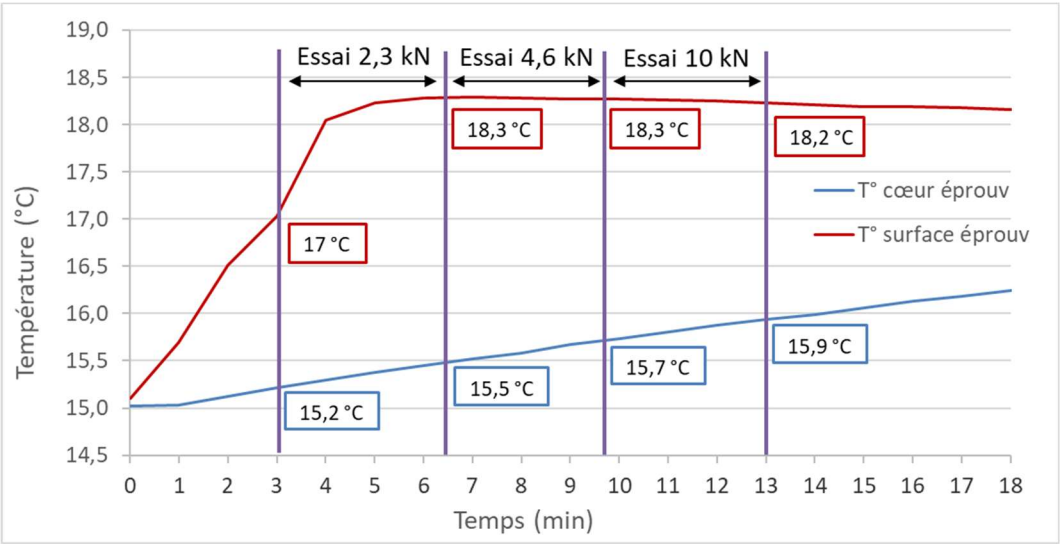


Figure 128 - Evolution de la température au cœur de l'éprouvette (essai dit à la température nominale de 15 °C).

On observe une augmentation de 0,9 °C au cœur de l'éprouvette entre la sortie de l'enceinte climatique et la fin de l'essai. Cette variation de température est négligeable par rapport aux 13 minutes d'essai. Le test commence toujours par la mise en place, le test à 2,3 kN, le test à 4 ,6 kN et enfin le test à 10 kN. On peut donc calculer la température moyenne réelle de l'éprouvette au cours de l'essai pour chacun des niveaux de force (Tableau 13). Pour cela, on utilise les valeurs de températures au cœur et en surface du graphique précédent durant l'intervalle de temps de chaque essai. En faisant l'hypothèse d'un champ bilinéaire, il est possible de déterminer la température moyenne de l'éprouvette durant chaque niveau d'essai en calculant la moyenne entre la température en surface et au cœur de l'éprouvette.

Tableau 13 - Température réelle d'essai à 15 °C.

Force appliquée	2,3 kN	4,6 kN	9 kN
Température au cœur	15,3 °C	15,6 °C	15,8 °C
Température en surface	17,8 °C	18,3 °C	18,3 °C
Température réelle d'essai	16,5 °C	17 °C	17 °C

La Figure 129 présente l'évolution de la température à la surface (courbe rouge) et au cœur de l'éprouvette (courbe bleue) dans le cas d'une température initiale de 35 °C.

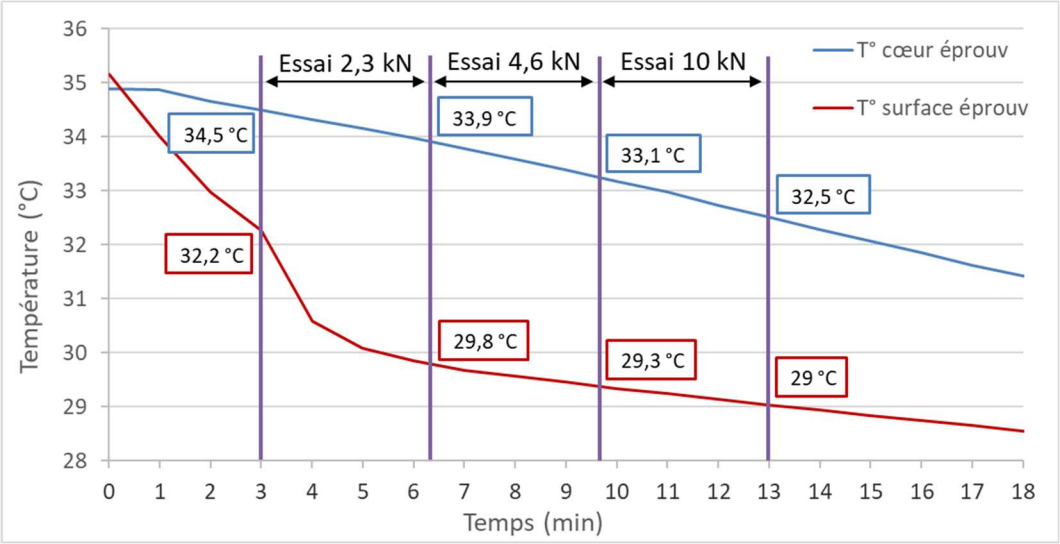


Figure 129 - Evolution de la température au cœur de l'éprouvette pour une température imposée de 20°C partant de 35 °C.

Pour la seconde éprouvette stabilisée initialement à 35 °C, une diminution de température de 6 °C est observée, cœur, pour la même durée d'essai. Dans le chapitre V, lorsque nous traiterons les essais effectués à la température nominale de 35 °C comme présenté précédemment pour la température de 15°C, la véritable température des éprouvettes sera dépendante du niveau de force (Tableau 14).

Tableau 14 - Température réelle d'essai à 35 °C.

Force appliquée	2,3 kN	4,6 kN	9 kN
Température au cœur	34,2 °C	33,5 °C	32,8 °C
Température en surface	30,6 °C	29,6 °C	29,5 °C
Température réelle d'essai	32,4 °C	31,6 °C	31,2 °C

Cette variation de température fait que nous privilégierons les essais à 20°C, parfaitement stabilisés, pour l'identification du modèle VENL.

IV.3. Validation du dispositif

Nous avons pu, grâce à ce nouveau dispositif et au changement du système d'acquisition, obtenir un essai œdométrique fiable nous permettant de mesurer les déformations réversibles des enrobés à froid. Dans le but de valider l'ensemble du système (cellule et chaine de mesures), des essais ont été réalisés sur deux matériaux et dans deux configurations : un matériau polymère (un polyoxyméthylène ou Delrin®) dont le module se rapproche d'une GE murie, testé en compression simple (non confinée) et un enrobé à chaud (BBSG), testé en conditions œdométriques. Les caractéristiques viscoélastiques de l'enrobé ont été déterminées par des essais de module et de coefficient de Poisson complexes antérieurs (Juliette SOHM [59]). Les composants (granulats, bitume) étaient tous encore disponibles, afin de faire une fabrication à l'identique.

Pour rappel, la valeur de module complexe œdométrique E^*_{oedo} peut être calculée à partir de la valeur du module complexe E^* utilisé pour la caractérisation des performances mécaniques des enrobés à chaud en utilisant la relation suivante :

$$|E^*_{oedo}| = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}|E^*| \qquad \text{Equation 209}$$

ν, souvent pris comme égal à 0,35, pouvant être aussi un coefficient complexe, dépendant de la fréquence et de la température.

IV.3.1. Essai sur Delrin®

Le Delrin® ou polyoxyméthylène (POM) est un matériau polymère élastique dont le module est proche de celui des enrobés à froid mûris, à savoir environ 4100 MPa. L'essai est réalisé dans le local thermo régulé soit à la température nominale de 20°C.

Dans le but de valider notre dispositif, une éprouvette de Delrin® parallélépipédique de dimensions LxlxH 50x50x100 mm^3 a été usinée. Deux jauges de déformations axiales ont été collées sur les deux faces latérales opposées de hauteur 100 mm et de largeur 50 mm (Figure 130 et Figure 131), en partie centrale d'éprouvette. Les jauges ont une longueur active de 10 mm et

sont connectées en demi-pont. La mesure de la déformation axiale moyenne est directement retranscrite par le Spider, après configuration de la voie de mesure.

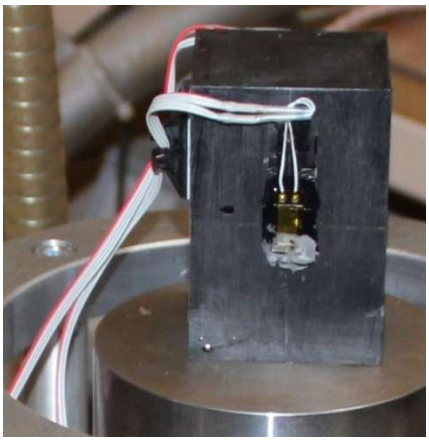


Figure 130 - Jauge 1 sur Delrin®.

Figure 131 - Jauge 2 sur Delrin®.

Pour les essais, le Delrin® est posé sur le support inférieur, le casque puis le support supérieur sont placés au-dessus. La mesure de déplacement par notre dispositif modifié avec les LVDT se fait simultanément avec la mesure de déformation par jauges, par l'intermédiaire du Spider.

Figure 132 - Mesure en compression simple sur Delrin®.

Les essais ont été réalisés à quatre niveaux de force (2,3 kN, 4,6 kN, 9 kN, et 13,6 kN) et trois fréquences (0,1 Hz, 1 Hz et 3 Hz). De plus, ces modalités d'essais ont été répétées sur la même éprouvette en lui faisant faire une rotation de 90° sur la cale support.

Le calcul du module à partir de la mesure par les LVDT, après application de la correction des déplacements à vide, aboutit à un module moyen de 4117 MPa, avec un écart-type de 250 MPa, pour les trois derniers niveaux de chargement ce qui est tout à fait satisfaisant. Cette valeur moyenne de module ne prend pas en compte les valeurs mesurées à 2,3 kN pour lesquelles la mesure de déplacement, bien que corrigée, semble surévaluée et conduit à une valeur moyenne de 2420 MPa.

En parallèle, les mesures par jauges d'extensométrie conduisent à un module moyen de 4110 MPa avec une très bonne répétabilité puisque l'écart type est de seulement 37 MPa. Les résultats d'essais sont présentés en annexe 12.

Lors de la présentation de nos résultats sur grave émulsion, chapitre V, seuls les résultats des essais effectués à 4,6 kN et 9 kN seront exploités, car les essais à 2,3 kN semblent être affectés d'une trop grande incertitude de mesure des déplacements à l'état mûri. Pour rappel, nous n'avons pas réalisé d'essai à 13,6 kN afin de ne pas excéder, au jeune âge, le niveau de déformation axiale de mille microdéformations, posé comme la limite à ne pas franchir.

IV.3.2. Essai sur BBSG

IV.3.2.1. Description du matériau

Le BBSG est composé de bitume 50/70 et de granulats 0/10 semi-concassés de diorite « La Noubleau ». Sa teneur en liant externe est de 5,50 ppc (parties pour cent en masse de liant par rapport à la masse des granulats).

Caractéristiques des granulats :

Ce mélange granulaire utilise les fractions granulaires suivantes : 0/2, 2/4, 4/6 et 6/10 mm et des fines calcaire dont les proportions massiques sont :

- Fines : 2,5 %
- Granulats 0/2 : 27,0 %
- Granulats 2/4 : 10,0 %
- Granulats 4/6 : 25,0 %
- Granulats 6/10 : 35,5 %

L'analyse granulométrique de chacune des fractions est faite conformément à la norme NF EN 933-1 [56], la recomposition granulaire obtenue est présentée dans le Tableau 15.

Tableau 15 - Analyses granulométriques.

Tamis (mm)	Pourcentage de passants					
	Fines	0/2	2/4	4/6	6/10	Mélange
12,50	100	100	100	100	100	100
10,00	100	100	100	100	87	95
8,00	100	100	100	100	42	79
6,30	100	100	100	87	12	66
5,00	100	100	93	47	2,5	51
4,00	100	100	88	14	1,3	42
3,15	100	100	58	9,8	1,0	38

2,00	100	96	7,1	6,3	0,9	31
1,00	100	64	1,1	5,0	0,7	21
0,50	100	45	0,7	3,8	0,7	16
0,25	100	32	0,2	2,4	0,6	12
0,125	97	23	0,2	1,6	0,5	9,2
0,063	84	17	0,2	1,1	0,3	7,1

Fabrication :

Les granulats sont pesés, chauffés à 150°C +/ 5 °C puis placés dans le malaxeur et mélangés dans le malaxeur pendant 30 secondes. On ajoute alors la quantité désirée de bitume préalablement chauffé à 150°C +/ 5 °C avant de malaxer encore pendant 2 minutes.

La masse d'enrobé désiré est alors placée dans deux moules Duriez préalablement chauffés, l'ensemble étant remis en étuve à 150°C +/ 5 °C pendant au moins une demi-heure. Le matériau est alors compacté en compression double effet (comme les éprouvettes d'enrobé à froid) afin d'obtenir la compacité visée de 95 % (teneur en vides de 5 %).

En plus de ces deux éprouvettes, nous avons également réalisé une plaque d'enrobés L 500 x l 180 x H 150 mm^3 compactée au compacteur de plaques, à la même compacité visée.

IV.3.2.2. Résultats des essais de flexion 2 points

Des essais de module complexe, conformément à la norme NF EN 12697-26 [25] ont été réalisés sur quatre éprouvettes trapézoïdales sciées à partir de la plaque après mûrissement à 20 °C et 45 % d'HR. Cet essai est réalisé en flexion 2 points (2PBT) à la température de 20 °C et à trois fréquences (3, 6 et 10 Hz). La formule du BBSG et les résultats d'essais sont présentés en annexe 13.

Tableau 16 - Mesure de module par l'essai de flexion 2 points.

Fréquences	3 Hz	6 Hz	10 Hz
Module mesuré (MPa)	5 186	6 400	7 255

Les résultats sur ce même BBSG lors de la fabrication antérieure, issus des travaux de Juliette Sohm, sont présentés sous la forme d'une courbe maitresse à 20 °C, Figure 133 et Tableau 17.

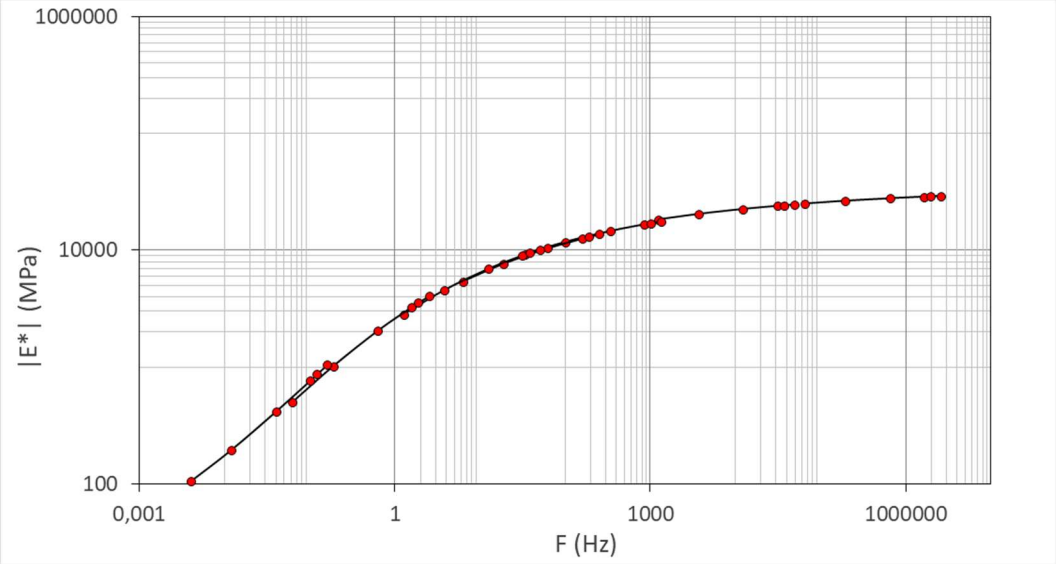


Figure 133 – Courbe maitresse du BBSG à 20°C (d'après Juliette Sohm).

Tableau 17 - Données sur le module complexe (d'après Juliette Sohm).

Fréquences	0,1 Hz	1 Hz	3 Hz	6 Hz	10 Hz
Norme du module mesuré (MPa)	871	2 830	4 560	5 800	6 954
Ecart type	13	25	29	42	55

En comparant les résultats obtenus pour les deux fabrications, nous pouvons constater des valeurs moyennes de norme de module supérieures pour notre recomposition, l'augmentation n'excédant néanmoins plus de 5 %.

Sachant que notre formulation est similaire à celle du matériau utilisé dans les travaux de Juliette Sohm, nous supposerons que le coefficient de Poisson de notre formulation peut, en première approximation, être confondu avec celui du BBSG de référence, sans mettre en œuvre des essais supplémentaires. Dans la thèse de Sohm [59], l'un de ses graphiques présente l'évolution du coefficient de Poisson avec le nombre de cycle de chargement lors d'essais de compression cyclique à 20 °C. La valeur moyenne du coefficient de Poisson trouvé lors de cet essai est de 0,51 avec un écart type de 10,4 %. Hors dans notre cas, nous ne faisons subir à notre matériau qu'une centaines de cycles c'est pourquoi nous avons pris la valeur de coefficient de Poisson de ce graphique pour 100 cycles et nous trouvons un coefficient de Poisson de 0,4. Par conséquent, les valeurs de module œdométrique théorique que nous devons retrouver lors de nos essais en utilisant les valeurs de module complexe et de coefficient de Poisson de la thèse de Sohm sont alors calculées à partir de l'Equation 209 et sont présentées Tableau 18.

Tableau 18 - Module œdométrique théorique (à partir des résultats de Juliette Sohm).

Fréquences	0,1 Hz	1 Hz	3 Hz	6 Hz	10 Hz
Module œdométrique théorique (MPa)	1 866	6 064	9 771	12 429	14 901

IV.3.2.3. Résultats des essais œdométriques

Dans un deuxième temps, nous avons testé le BBSG en configuration œdométrique à 20 °C pour deux amplitudes de force de compression, initialement fixées à 10 kN et 20 kN afin d'obtenir des déformations du même ordre de grandeur que celui de l'enrobé à froid mûri. En effet, à 10 kN, nous obtenons une déformation du BBSG de l'ordre de 180 µm/m. En revanche, à 20 kN, la valeur visée de 360 µm/m dépasse très nettement le seuil du comportement viscoélastique linéaire et les effets de non linéarité conduisent à une déformation de l'ordre de 200 µm/m. Pour comparer les résultats obtenus lors des essais 2PBT et les essais œdométriques, seuls les essais effectués à 10 kN seront pris en compte.

Les essais sont réalisés à différentes fréquences et les valeurs de norme de module sont calculées à partir des cycles de chargement stabilisés. Les résultats en termes de déplacement et de module sont présentés Figure 134 et Figure 135. Les valeurs de déplacement et de module théoriques, issues des travaux de Sohm sont représentées en orange. Les valeurs de déplacement et de module avant de déduire les mesures de déplacement « à vide » sont représentées en bleu. Et enfin, en gris, sont reportées les valeurs de déplacement et de module une fois les valeurs de déplacement corrigées, au sens du paragraphe 2.4.1.

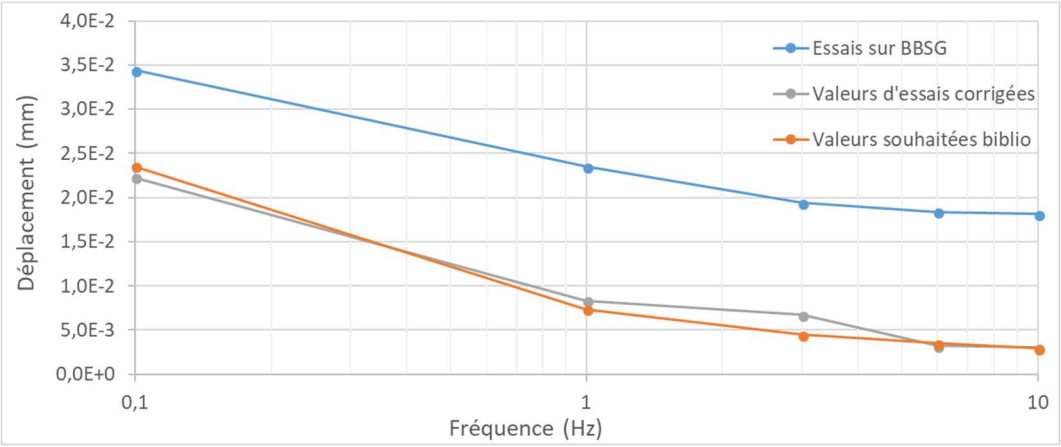


Figure 134 -Mesure de l'amplitude de déplacement du BBSG.

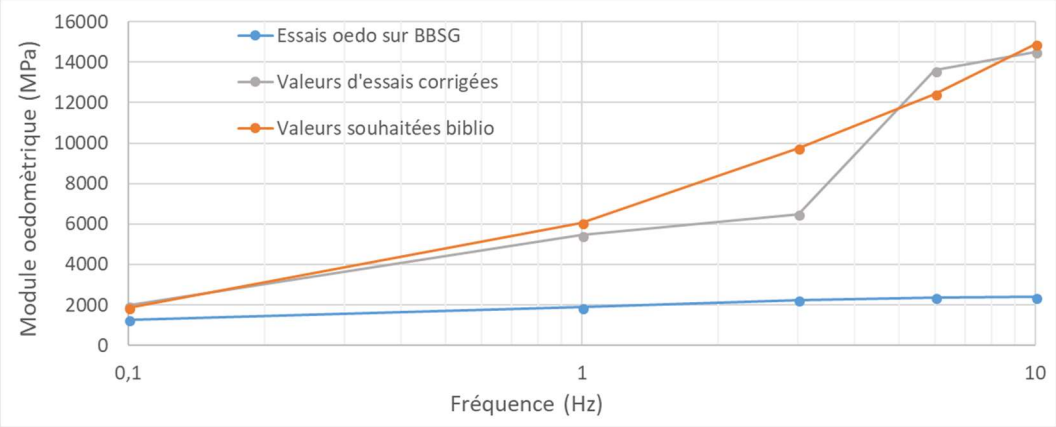


Figure 135 -Module œdométrique $|E^*_{oedo}|$ du BBSG.

Du point de vue déplacement, nous pouvons voir que les résultats obtenus à partir de l'essai œdométrique sont très proches des valeurs souhaitées. En effet nous avons 0,1 à 2 micromètres d'écart entre les valeurs obtenues par l'essai œdométrique et les valeurs de référence, ce qui est plus que satisfaisant. En ce qui concerne les valeurs de module d'un matériau comme un BBSG, un écart ne serait-ce que d'un micromètre implique une erreur significative sur le calcul du module. Cet effet est beaucoup moins préjudiciable pour un matériau tel qu'un enrobé à l'émulsion, dont le module reste toujours plus faible. En effet, dans le cas d'un BBSG testé à 10 Hz, un micromètre d'écart sur la mesure du déplacement induit, dans la configuration testée (élancement ½), une erreur de 1 200 MPa. Un micron d'écart sur la mesure de déplacement sur un enrobé à l'émulsion mûri n'induit qu'une erreur de 60 MPa. Il convient aussi de se référer, paragraphe 2.4.1, à la correction proposée et à ses incertitudes. L'essai sur BBSG est un cas limite, il peut mettre en évidence les limites de mesure et l'influence de leurs incertitudes.

En plus de la norme du module œdométrique, nous avons mesuré le déphasage entre le signal de la contrainte axiale imposée (qui sera notre référence) et sa réponse en déformation. La Figure 136 montre l'évolution de ce déphasage avec la fréquence, à 20 °C.

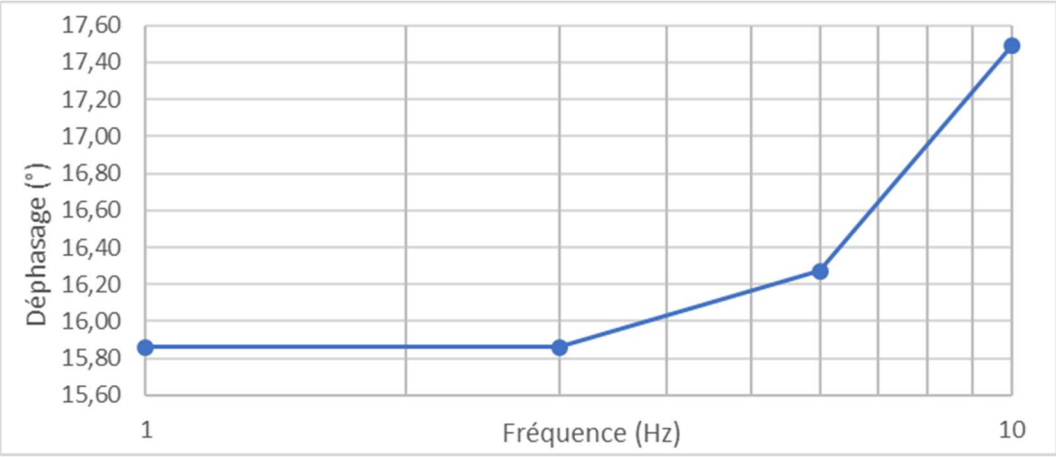


Figure 136 – Evolution de déphasage avec la fréquence – Essais œdométrique à 20 °C, 10 kN.

Nous pouvons voir sur ce graphe que le déphasage augmente avec la fréquence alors que nous sommes habitués à une évolution décroissante de l'angle de phase avec la fréquence lors d'un essai en condition uniaxiale. Il s'agit là d'un effet de l'essai œdométrique sur la mesure du déphasage. Effet que l'on retrouvera bien sûr également sur les résultats d'essai sur enrobé à l'émulsion.

IV.4. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de valider l'utilisation de l'essai œdométrique et de son dispositif. Comme nous avons pu le voir sur le test sur des matériaux connus comme le BBSG et le Delrin®, les mesures de déplacement par les LVDT sont celles attendues pour chacun des matériaux. Au vu des valeurs de module qu'atteignent les enrobés à l'émulsion, nous considérons que l'erreur de mesure de déplacement est négligeable et n'influence que très peu les résultats de module.

Passons maintenant au chapitre suivant traitant de l'essai de mûrissement et des résultats d'essais œdométriques lors de campagne de mûrissement en température et en humidité. Ce chapitre sera également consacré au calage et à la validation du modèle utilisant les résultats de la première campagne d'essais.

Chapitre V. Résultats des différentes campagnes d'essais et mise en œuvre du modèle

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats d'essais des trois campagnes expérimentales sont présentés. Lors de ces campagnes, deux matériaux différents ont été testés. Par matériau, nous allons décrire les essais de mûrissement propres à chaque campagne. Nous présenterons ensuite les résultats d'essais de ces campagnes. Une partie de ces résultats a servi au calage des paramètres du modèle VENL 3D que nous présenterons en fin de chapitre afin de vérifier la pertinence de notre modèle.

V.2. Description et résultats des campagnes d'essais 1 et 2 sur un enrobé à l'émulsion « classique »

V.2.1. Matériau utilisé

Les campagnes d'essais 1 et 2 utilisent la même formulation d'enrobé à l'émulsion basée sur le mélange d'une émulsion 40/60 et de granulats 0/14 dont la formulation est explicitée en annexe 14. Ces derniers sont de nature silico calcaire et proviennent de la carrière de Mauzac (44). Ce mélange utilise les fractions granulaires suivantes : 0/2, 2/6.3, 6.3/10 et 10/14 mm dont les proportions sont :

- Granulats 0/2 : 45 %
- Granulats 2/6.3 : 15 %
- Granulats 6.3/10 : 20 %
- Granulats 10/14 : 20 %

L'analyse granulométrique permet à l'aide de tamis de déterminer la composition d'un matériau et de connaitre le pourcentage de chacune des fractions. Cet essai est fait conformément à la norme NF EN 933-1 [56], la recomposition granulaire obtenue est présentée dans le Tableau 8 et Figure 137. La recomposition est le mélange des différentes classes granulaires permettant d'obtenir la courbe granulaire souhaitée.

Tableau 19 - Analyses granulométriques.

Tamis (mm)	Pourcentages passants				
	0/2	2/6,3	6,3/10	10/14	Recompo
20,00	100	100	100	100	100
16,00	100	100	100	99	99,8
14,00	100	100	100	82	96,4
12,50	100	100	100	48	89,6

10,00	100	100	85	9	78,8
8,00	100	99	43	5	69,5
6,30	100	89	14	3	61,7
5,00	100	63	8	1	56,2
4,00	100	43	4	0,2	52,3
3,15	100	21	1	0,2	48,4
2,00	87	4	0,2	0,2	39,8
1,00	59	2	0,2	0,2	26,9
0,50	40	1,3	0,2	0,2	18,3
0,25	27	1,3	0,2	0,2	12,4
0,125	20	1,3	0,2	0,2	9,3
0,063	12,7	1,3	0,2	0,2	6

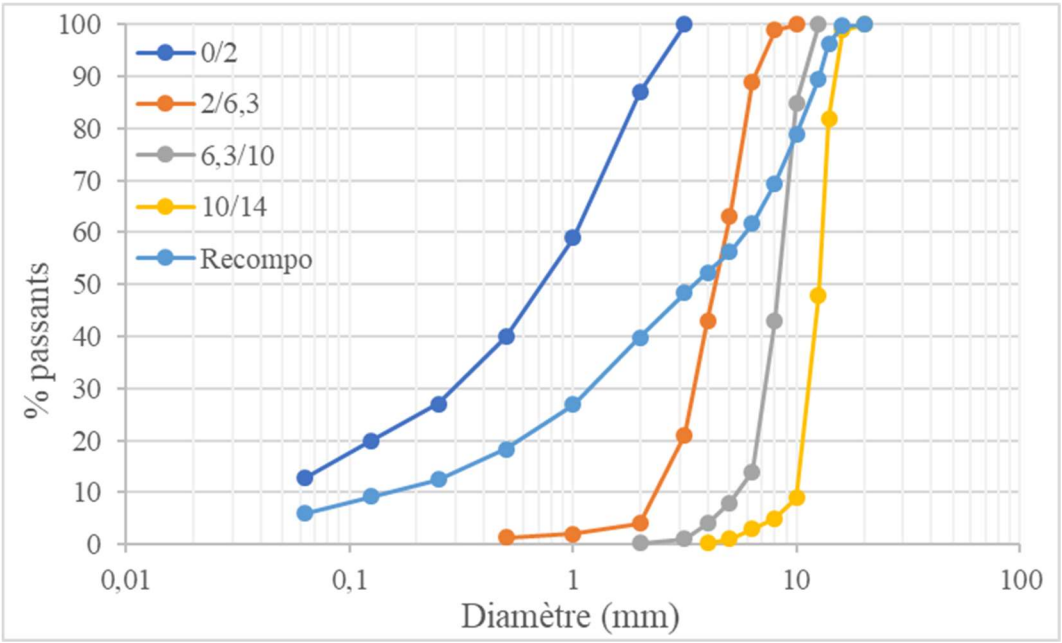


Figure 137 - Courbes granulométriques.

Les granulats sont pesés, placés dans le malaxeur avec l'eau d'ajout avant d'être malaxés pendant 30 secondes. On ajoute alors la quantité désirée d'émulsion avec un temps de malaxage de 2 minutes.

La quantité d'enrobé désirée est alors placée dans chacun des moules œdométriques de 0,5 d'élancement pour obtenir une compacité visée de 15 % de vides.

V.2.2. Essai de mûrissement

V.2.2.1. Principe général des campagnes d'essais

Pour comprendre le comportement des enrobés à l'émulsion, nous avons combiné deux essais : l'essai de mûrissement et l'essai œdométrique. L'essai de mûrissement consiste à faire murir des éprouvettes de matériau à une température et une hygrométrie choisie dans des enceintes thermo et hygro-régulées. Cette phase permet de reproduire le mûrissement que subit le matériau sur chaussée.

En plus de cet essai de mûrissement, les éprouvettes sont ponctuellement et à diverses reprises, soustraites à leurs conditions de mûrissement, afin de les soumettre à l'essai œdométrique et mesurer ainsi l'évolution de leur rigidité en fonction du temps. Les essais œdométriques sont effectués pour leur part à différentes fréquences et températures d'essai, non nécessairement égales aux températures de mûrissement. (cf. chapitre IV).

V.2.2.2. Campagne d'essais 1 : mûrissement à différentes températures

Dans un premier temps, l'effet de la température de mûrissement sur l'évolution des performances mécaniques de l'enrobé à l'émulsion est évaluée. Trois températures ont été testées, à savoir 15°C, 20°C et 35°C. Pour chaque température, cet essai consiste à faire mûrir deux éprouvettes d'enrobé à l'émulsion dans des enceintes climatiques thermorégulées sous une humidité relative constante de 45%. Les éprouvettes ont été régulièrement testées sous conditions œdométriques, dont l'essai a été présenté en chapitre IV.

Les deux éprouvettes mûries à 20°C sont placées en mûrissement à l'intérieur de boites hermétiques avec une solution de carbonate de potassium permettant de contrôler l'humidité relative et de la stabiliser à 43 %. Ces boîtes sont alors placées dans la salle d'essais thermorégulée à 20°C. Ces éprouvettes sont conservées en mûrissement dans ces boites et sont juste sorties afin d'être testées sous conditions œdométriques aux trois températures d'essai.

Le mûrissement étant plus rapide les premières semaines, la fréquence d'essais est de 3 fois par semaine pour les trois premières semaines puis sera de moins en moins fréquente par la suite, et ce, selon le planning présenté Figure 138.

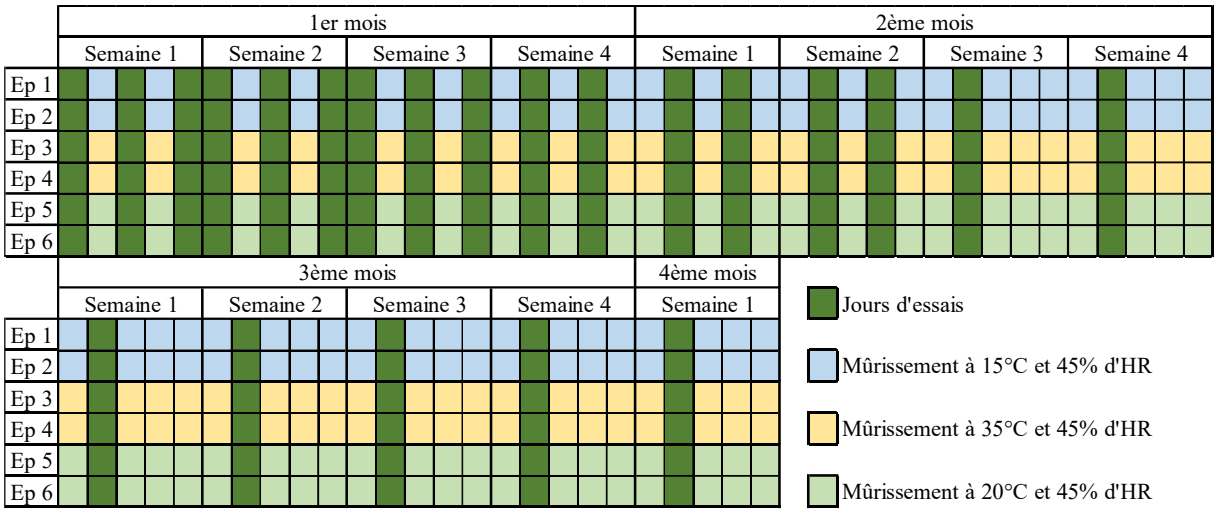


Figure 138 - Planning d'essais durant le mûrissement en température.

Au final, les quatre premières éprouvettes ont été mûries pendant 84 jours, les deux dernières ont été mûries un peu plus longtemps à savoir 112 jours et ont toutes été testées à intervalle régulier avant de passer à la campagne suivante de mûrissement en hygrométrie.

La Figure 139 montre l'enchaînement des essais œdométriques aux températures de 15°C, 20°C et 35°C. Des mesures de la température au cœur de l'éprouvette (en plus de celles présentées chapitre IV partie 2.2.2) ont permis de déterminer qu'en partant de 15 °C, il fallait 2 heures pour que la température au cœur de l'éprouvette se stabilise à 20°C. Par le même procédé, 3 heures sont nécessaires pour passer de 20 °C à 35 °C et 3 heures pour redescendre de 35 °C à 15 °C à cœur. Comme présenté sur ce graphique, chaque éprouvette est testé une fois par températures durant la journée d'essais. La répétabilité des mesures se fait grâce à l'utilisation de deux éprouvettes par condition de mûrissement.

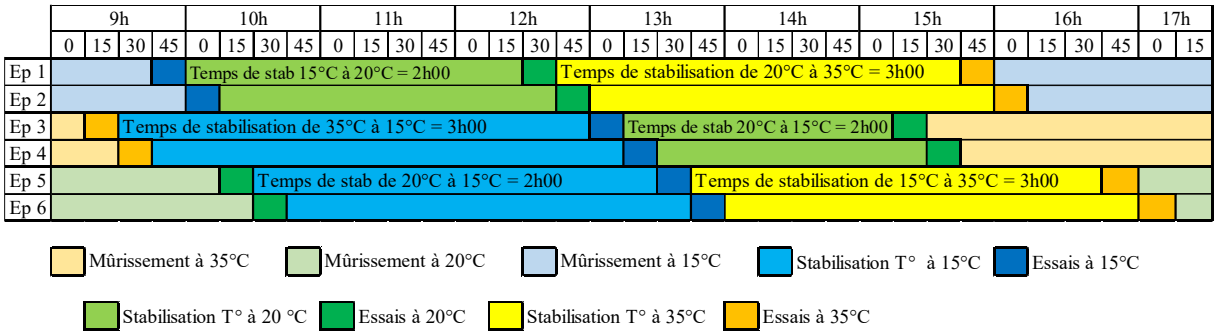


Figure 139 - Planning d'un jour d'essais lors de la première campagne.

En fin d'essais, la teneur en vides mesurée au banc gammadensimétrique pour chacune des éprouvettes permet de vérifier une valeur moyenne visée de 15%. Les valeurs sont présentées Tableau 20. La teneur en vides de l'éprouvette 3 n'a pas pu être mesurée car écrasée après 18 jours d'essais par une erreur de fonctionnement du dispositif de mise en charge.

Tableau 20 - Teneurs en vides éprouvettes campagne 1.

Éprouvette	1	2	3	4	5	6
Teneur en vides	14,5 %	13,2 %	-	15,3 %	14,7 %	13,4 %

V.2.2.3. Campagne d'essais n°2 : mûrissement à différentes hygrométries

La deuxième campagne d'essai concerne l'effet de l'humidité sur la cinétique de mûrissement et sur l'évolution des performances mécaniques des enrobés. Lors de la première campagne d'essai, nous avions déjà la montée en résistante de l'enrobé à l'émulsion à 35°C et 45 % d'HR. À 35 °C, quatre éprouvettes sont conditionnées au mûrissement à deux humidités relatives distinctes, à savoir, deux à 20 % d'HR et deux à 70 % d'HR. Le planning de mûrissement est similaire à celui présenté pour la première campagne d'essais, Figure 140.

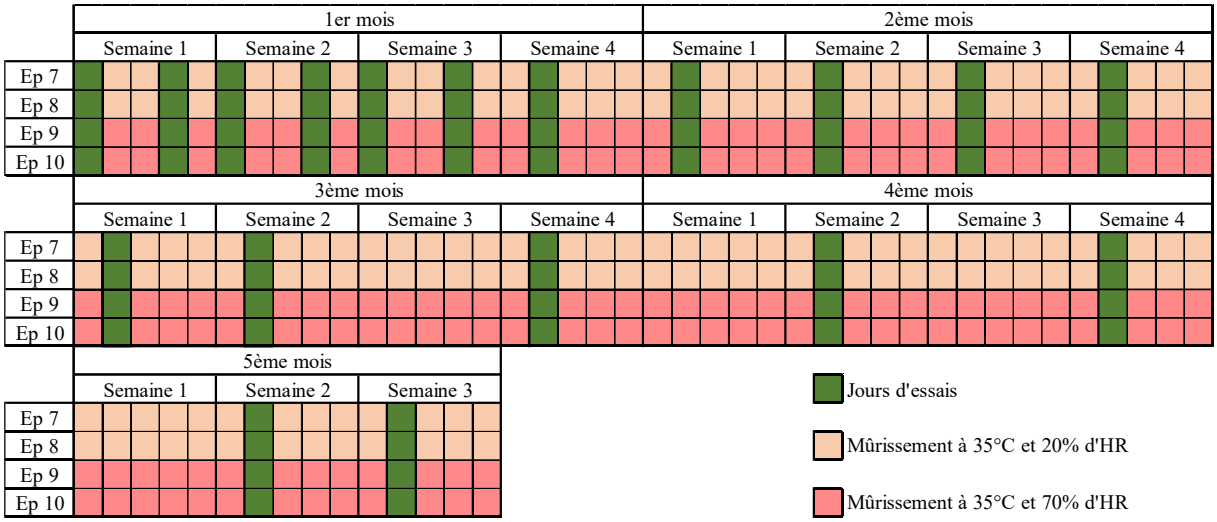


Figure 140 - Planning d'essais durant la campagne en hygrométrie.

La Figure 141 montre l'enchaînement au cours d'une journée des essais œdométriques aux températures de 15, 20 et 35 °C. Celui-ci tient compte des temps nécessaires à l'homogénéisation de la température au sein des éprouvettes. Des mesures complémentaires à celles présentées chapitre IV partie 2.2.2, ont ainsi permis de déterminer qu'en partant de 35 °C, il faut trois heures pour que la température au cœur de l'éprouvette se stabilise à 20 °C et qu'il fallait également 2h pour aller de 20 °C à 15 °C.

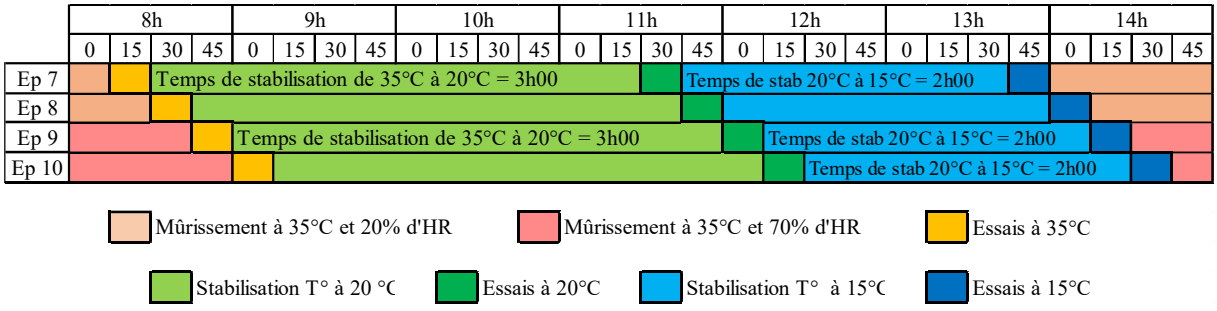


Figure 141 - Planning d'un jour d'essais lors de la deuxième campagne.

Les éprouvettes de cette campagne ont mûri durant 132 jours et ont également été testées au banc gammadensimétrique ; les teneurs en vides mesurées après mûrissement sont présentées Tableau 21.

Tableau 21 - Teneurs en vides éprouvettes campagne 2.

Éprouvette	7	8	9	10
Teneur en vides	12,1 %	15,0 %	14,1 %	14,9 %

La teneur en vides de l'éprouvette 7 est bien plus faible que les autres ; nous en verrons clairement l'impact sur les résultats de module œdométrique.

V.2.3. Résultats de l'essai de mûrissement et de l'essai œdométrique

Les annexes 15 à 23 présentent l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, en termes de déformation, contrainte moyenne, module et déphasage pour les éprouvettes 1 à 6. Ces résultats pour les éprouvettes 7 à 10 sont présentés annexe 24 à 29.

Dans cette partie, nous allons présenter dans un premier lieu les effets de la température de mûrissement puis dans un deuxième temps des différentes modalités de l'essai œdométrique et enfin l'effet de l'humidité de mûrissement. Pour présenter les effets des modalités d'essai, nous allons voir les effets de la température d'essai, l'effet de la fréquence et l'effet de la force appliqué durant l'essai. Ces trois modalités vont nous permettre de voir le comportement évolutif du matériau de son comportement élastique non linéaire de matériau granulaire et de l'augmentation progressive de la viscosité dans son comportement.

V.2.3.1. Effet de la température de mûrissement

Regardons dans un premier temps l'évolution dans le temps du module œdométrique en fonction de la température de mûrissement et des températures (ponctuelles) d'essais. Pour rappel, il est attendu de façon générale, quelle que soit la loi de comportement d'un matériau, qu'un module mesuré en conditions œdométriques soit supérieur au module « classique » mesuré sous état de contrainte uniaxiale. Les résultats montrés Figure 142 sont tirés de la première campagne d'essais. Les figures a), b) et c) illustrent respectivement les valeurs de module œdométrique mesurées à 35, 20 et 15 °C.

Dans tout le manuscrit, nous parlons de module œdométrique qui est en réalité la norme du module œdométrique (= module de module œdométrique). Il est calculé en utilisant les amplitudes de déformation et de contrainte des derniers cycles stabilisés.

Des barres d'incertitudes ont été rajoutées à ces courbes afin de se rendre compte de la répétabilité des essais œdométriques. Quel que soit le graphe présenté, ces barres d'incertitudes représentent les valeurs minimum et maximum des résultats d'essais mesurés.

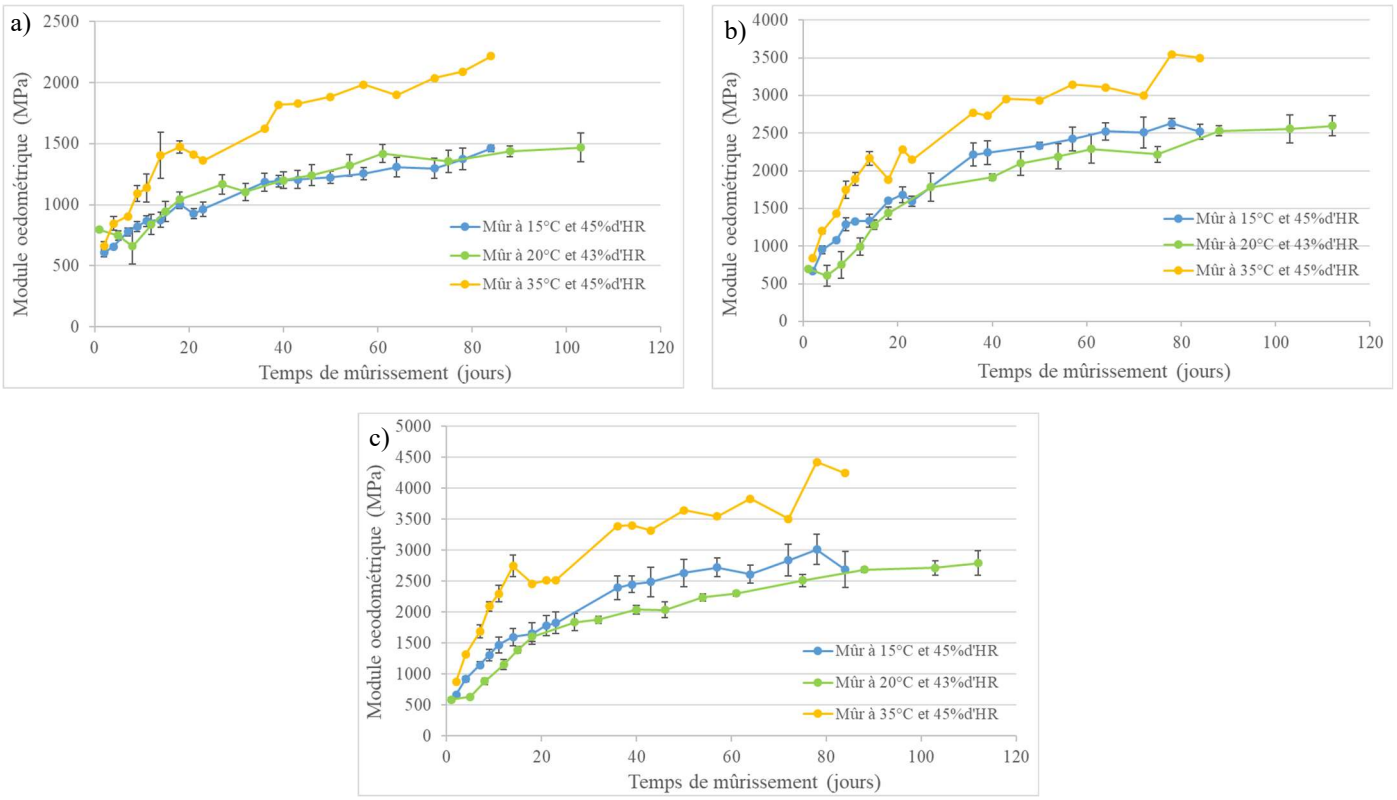


Figure 142 - Evolution du module en fonction de la température de mûrissement - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Essais à 35°C b) Essais à 20°C c) Essais à 15°C.

Tel qu'attendu, nous pouvons voir sur ces trois graphiques que le module œdométrique augmente avec le temps de mûrissement. Nous pouvons également observer que plus la température de mûrissement est élevée, plus le module œdométrique est grand.

Les éprouvettes mûries à 20°C n'ont pas mûri aussi vite que les autres éprouvettes. Il semblerait que l'absence de ventilation à l'intérieur des boites a certainement gêné les transferts hydriques et généré, au moins à court terme, une diminution du séchage de l'émulsion.

En ce qui concerne l'évolution du module des autres éprouvettes, plus la température de mûrissement est basse, plus grandes sont les performances de l'enrobé à l'émulsion. Bien que retardé, la courbe de mûrissement à 20°C va continuer d'évoluer pour atteindre, à long terme, des modules plus importants que ceux obtenus lors du mûrissement à 15°C. De plus, la température de mûrissement semble influencer la valeur finale de module. En effet, un enrobé à froid qui aurait mûri à 15°C toute sa vie, ne pourrait apparemment jamais atteindre des valeurs de module d'un même enrobé mûri à 35°C.

La Figure 143 montre l'évolution de déphasage dans le temps en fonction de la température de la température de mûrissement pour les 3 températures d'essais.

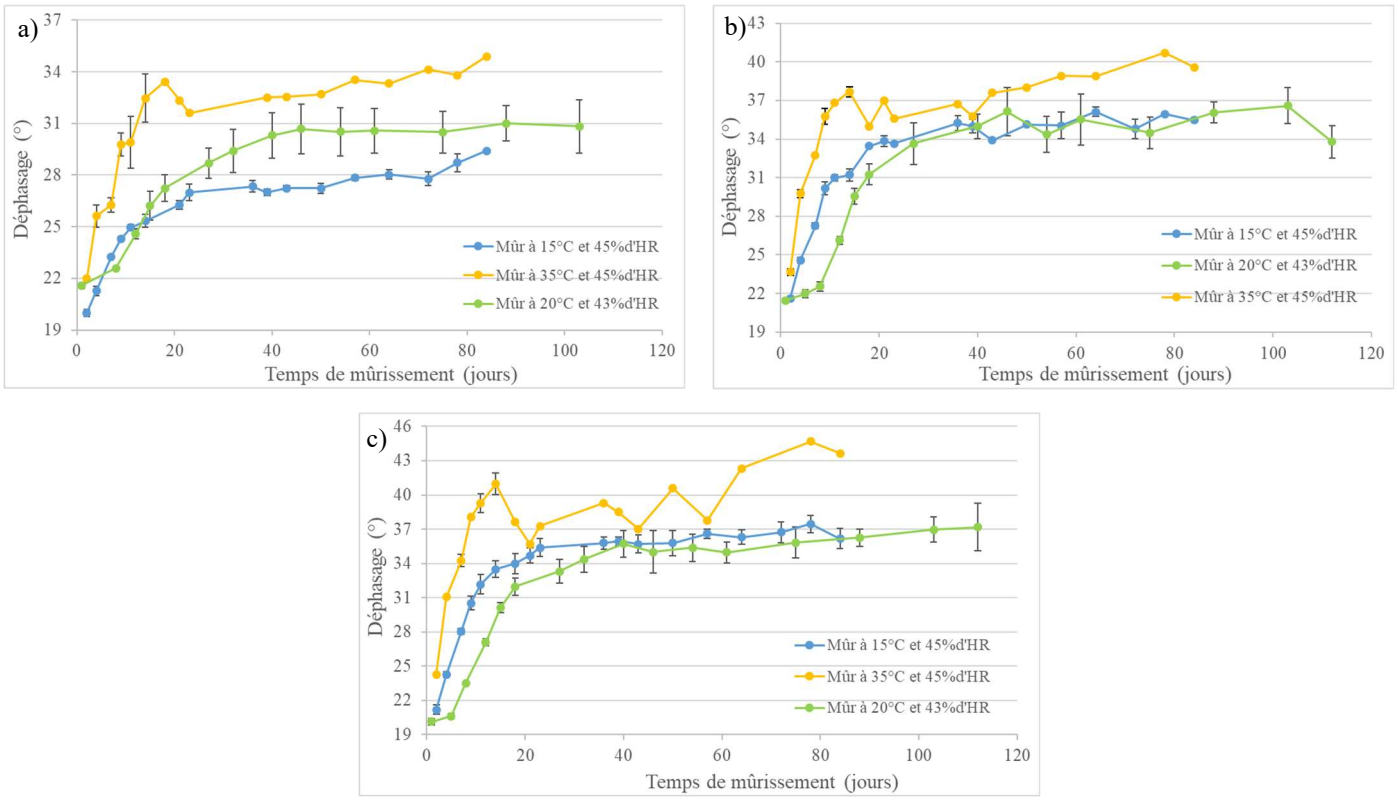


Figure 143 - Evolution du déphasage en fonction de la température de mûrissement - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Essais à 35°C b) Essais à 20°C c) Essais à 15°C.

Les résultats mettent en évidence que la cinétique d'évolution du déphasage est d'autant plus élevée que la température de mûrissement est grande. De plus, les asymptotes des courbes de mûrissement sont différentes. La température de mûrissement influerait donc sur la valeur de module et le déphasage final de l'enrobé à froid.

V.2.3.2. Effet de la température d'essai œdométrique

La Figure 144 montre l'évolution du module dans le temps pour chacune des températures d'essais et pour chaque température de mûrissement à savoir la figure a) mûrissement à 35°C, b) mûrissement à 15°C.

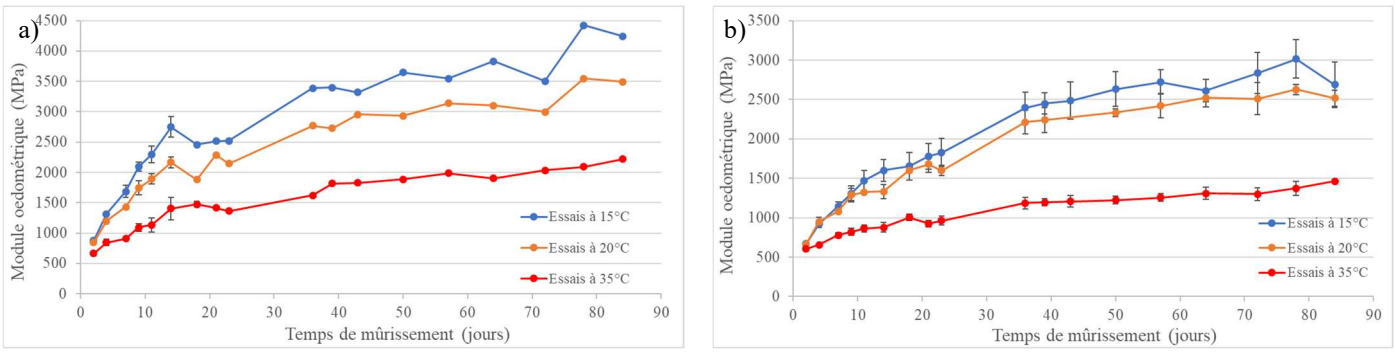


Figure 144 - Evolution du module en fonction de la température d'essai - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Mûrissement à 35°C et 45% d'HR b) Mûrissement à 15°C et 45% d'HR.

Le module augmente avec le mûrissement. De plus, le module est d'autant plus élevé que la température d'essai est basse.

Lors du premier jour d'essais œdométriques, correspondant à 2 jours de mûrissement, nous observons que les tous les graphes partent de la même valeur de module quelque soit la température d'essais. Le fait qu'il n'y ait pas d'effet de la température montre l'absence de viscosité dans le matériau ; viscosité qui devient de plus en plus présente avec le mûrissement traduisant l'influence croissante de la température d'essai sur les valeurs de module.

Les résultats sont complétés par l'évolution du déphasage, Figure 145. Au même titre que l'évolution des modules, plus la température d'essais est basse plus le déphasage est grand.

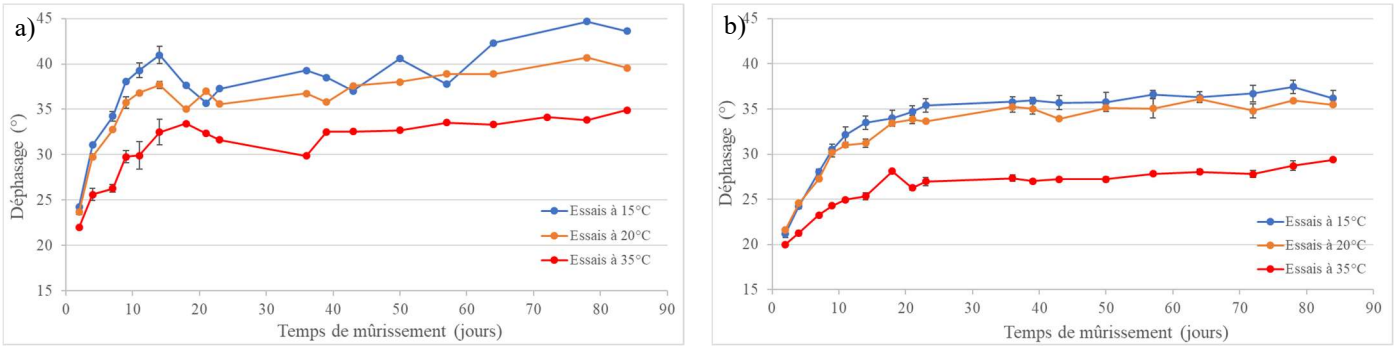


Figure 145 - Evolution du déphasage en fonction de la température d'essai - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR b) Mûrissement à 15 °C et 45 % d'HR.

Nous observons que plus la température d'essai œdométrique est basse plus le déphasage est grand.

V.2.3.3. Effet de la fréquence

Les éprouvettes mûries à 20 °C n'ayant pas les mêmes conditions de mûrissement que les autres à cause du problème de séchage, nous ne présenterons par la suite que les résultats d'essai sur les éprouvettes mûries à 15 °C et à 35 °C et 45 % d'HR.

Résultats du mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR :

Les Figure 146 et Figure 147 montrent l'effet de la fréquence sur le comportement du matériau à différents moments de mûrissement. Parce qu'il est assez difficile de quantifier cet effet, nous avons choisi de normaliser les valeurs de module en prenant comme référence le module à 10 Hz, Figure 147.

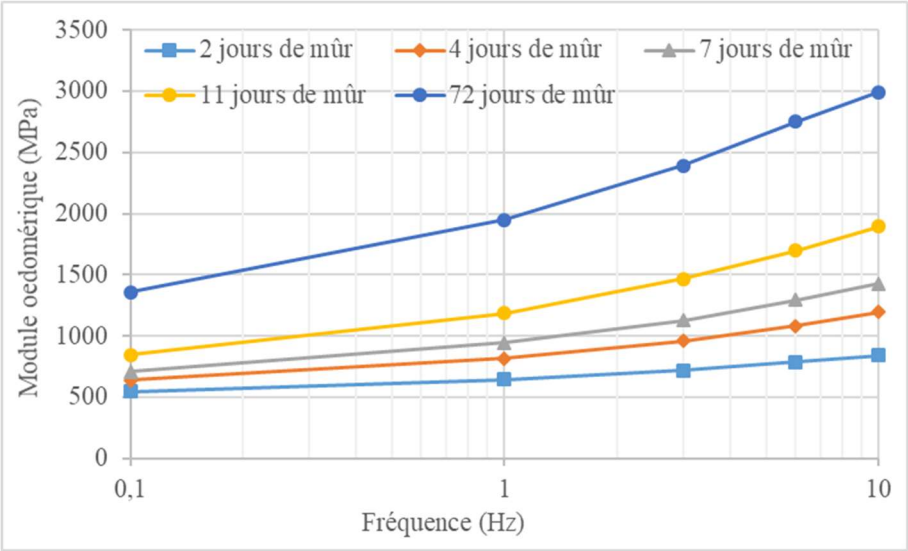


Figure 146 – Effet de la fréquence – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

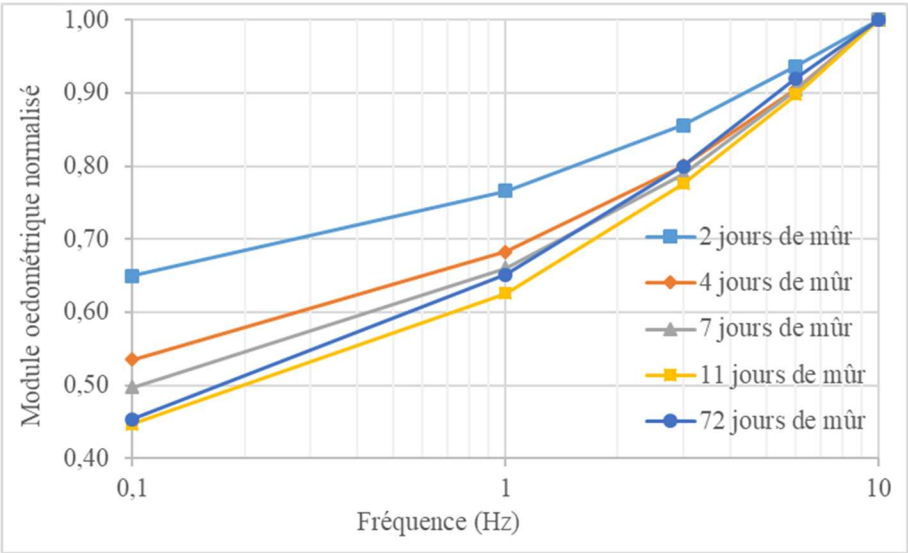


Figure 147 – Représentation normalisée de l'effet de la fréquence – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

Nous pouvons voir de façon très claire que la dépendance de la fréquence sur le module du matériau augmente avec le mûrissement. En effet, plus la pente de chaque courbe est grande, plus l'écart entre les valeurs de module, aux différentes fréquences pour un stade de mûrissement donné, est important. Le faible écart entre modules visible à 2 jours de mûrissement est représentatif d'un comportement élastique non linéaire d'un matériau granulaire.

Les Figure 148 et Figure 149 représentent l'effet de la fréquence sur les valeurs de déphasage et ceux à plusieurs stades de mûrissement. Tout comme pour le module, la Figure 149 représente l'effet de la fréquence en normalisant les valeurs de déphasage et en prenant en référence la valeur à 10 Hz.

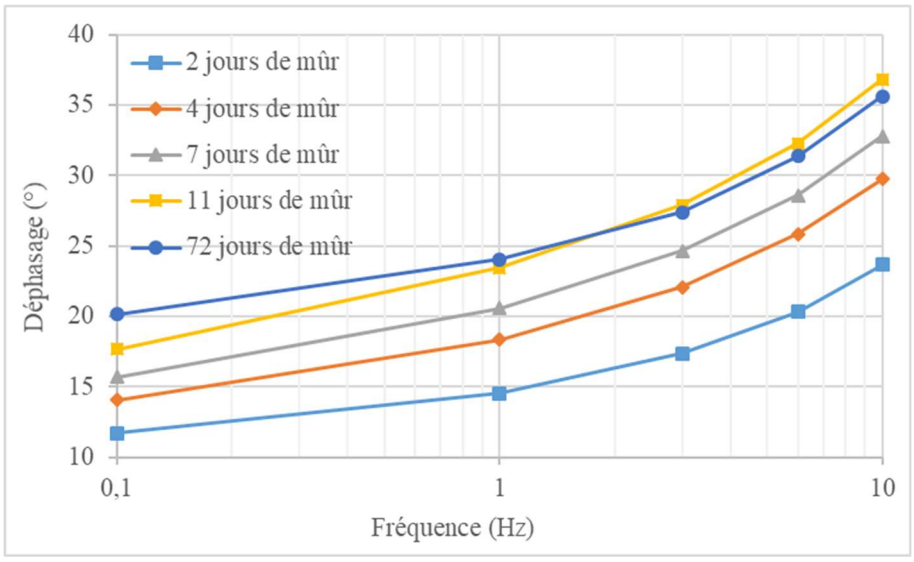


Figure 148 - Effet de la fréquence sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

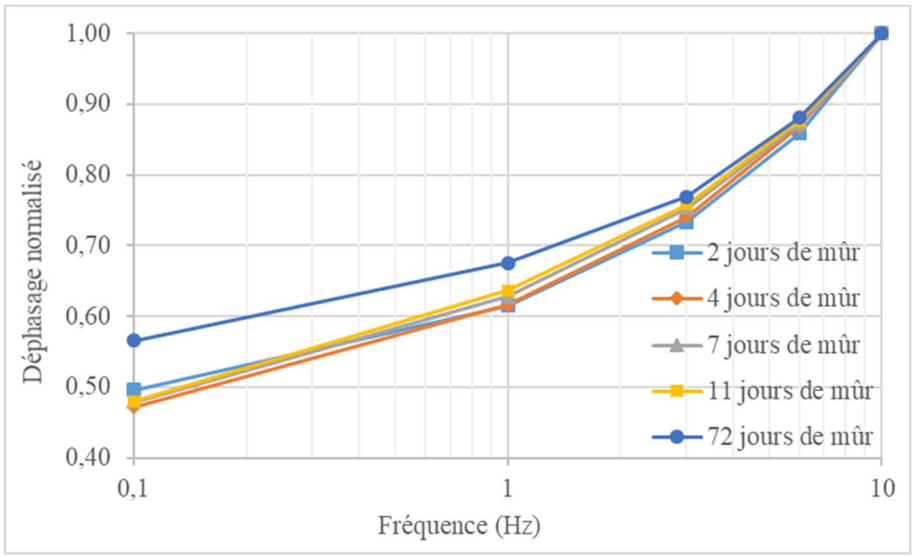


Figure 149 - Représentation normalisée de l'effet de la fréquence sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

Les résultats montrent qu'il y a très peu de variation de l'angle de phase pour les différents temps de mûrissements et que s'il y a une faible diminution, elle s'opère les tous premiers jours de mûrissement.

Résultats du mûrissement à 15 °C et 45 % d'HR :

Les Figure 150 et Figure 151 montrent l'effet de la fréquence sur les valeurs de module des éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

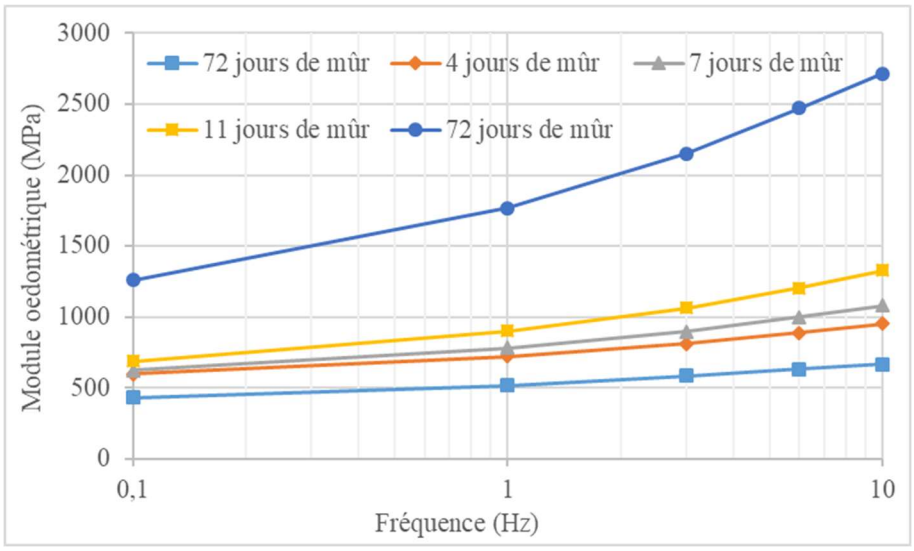


Figure 150 - Effet de la fréquence – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

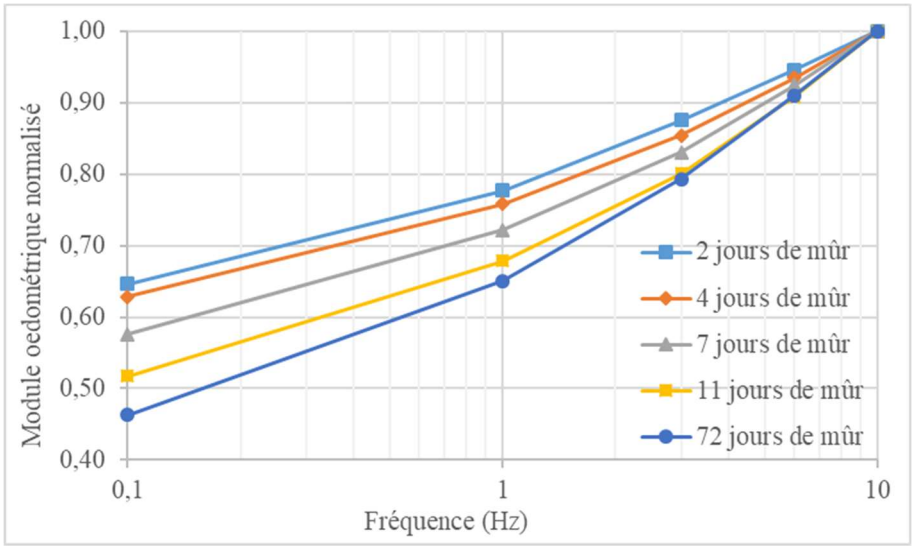


Figure 151 - Représentation normalisée de l'effet de la fréquence – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

Comme nous avons pu le voir sur les éprouvettes mûries à 35 °C, l'effet de la fréquence sur le matériau augmente avec le mûrissement. De plus, nous pouvons voir que cet effet est moins rapide sur pour les éprouvettes précédentes.

Les Figure 152 et Figure 153 représentent l'effet de la fréquence sur les valeurs de déphasage et ceux à plusieurs stades de mûrissement pour les éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

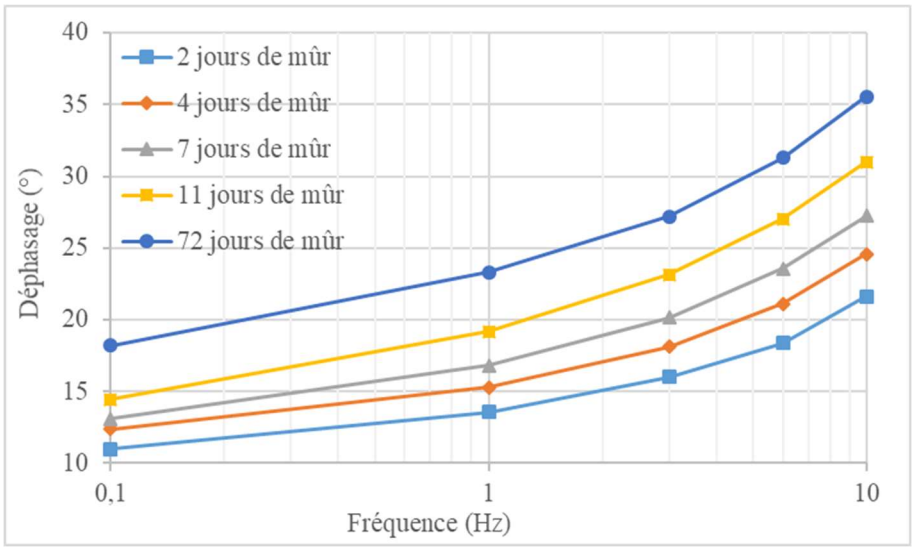


Figure 152 - Effet de la fréquence sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

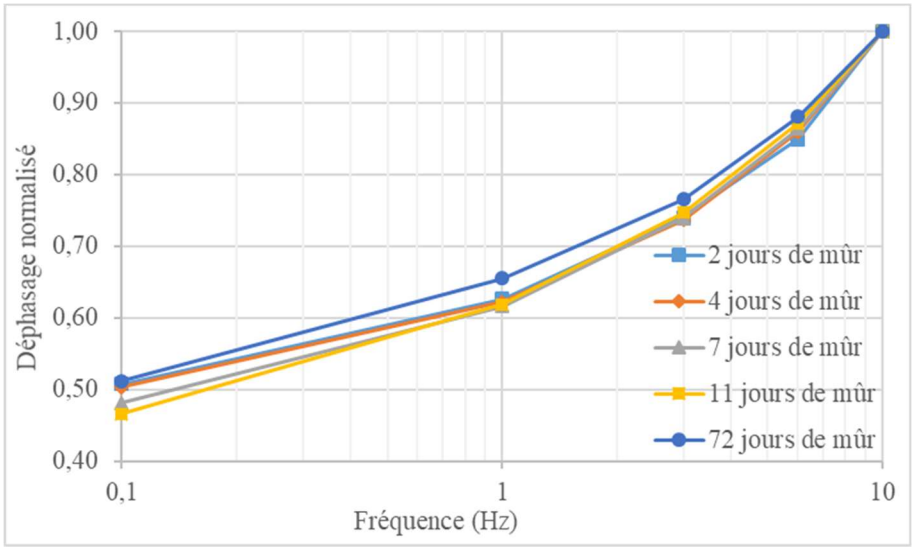


Figure 153 - Représentation normalisée de l'effet de la fréquence sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

Comme nous avons pu le voir sur les éprouvettes mûries à 35 °C, l'effet de la fréquence sur le déphasage n'évolue pas beaucoup et évolue encore moins rapidement.

V.2.3.4. Effet de la force appliquée durant l'essai œdométrique

Nous regardons ici, l'effet de la force sur le comportement du matériau dont le comportement au jeune âge est élastique non linéaire. De ce fait, le matériau devrait montrer une dépendance à la force au tout début de son mûrissement. Dépendance qui devrait diminuer avec le mûrissement car nous savons que les matériaux dont le comportement est viscoélastique comme les enrobés à chaud ne sont pas impacté par le niveau de force de sollicitation.

Résultats du mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR :

Les Figure 154 et Figure 155 montrent l'effet de la force de sollicitation sur le comportement du matériau à différents stade de mûrissement. Comme pour la dépendance en fréquence, nous avons présenté deux graphes, l'un avec les valeurs de module réelles et l'autre avec les valeurs de module normalisées ayant pour référence la valeur à 9 kN.

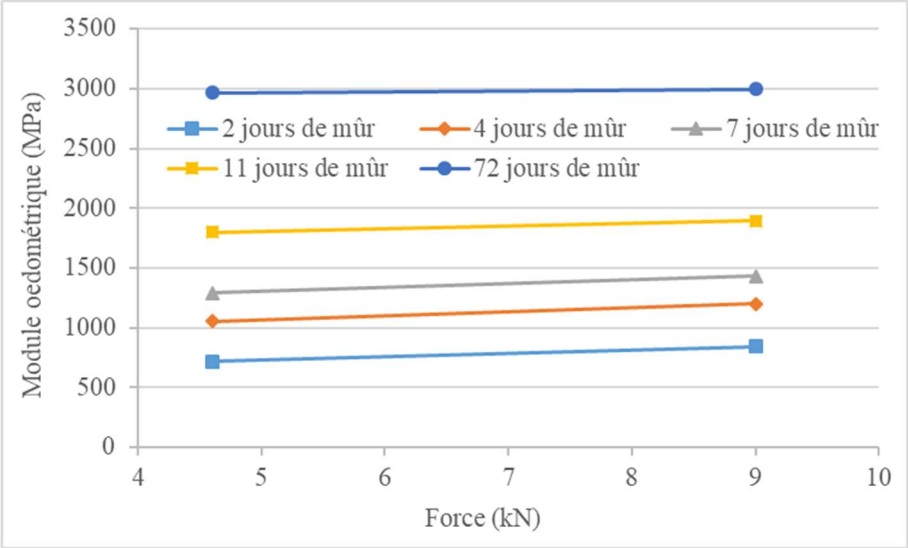


Figure 154 - Effet de la force – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

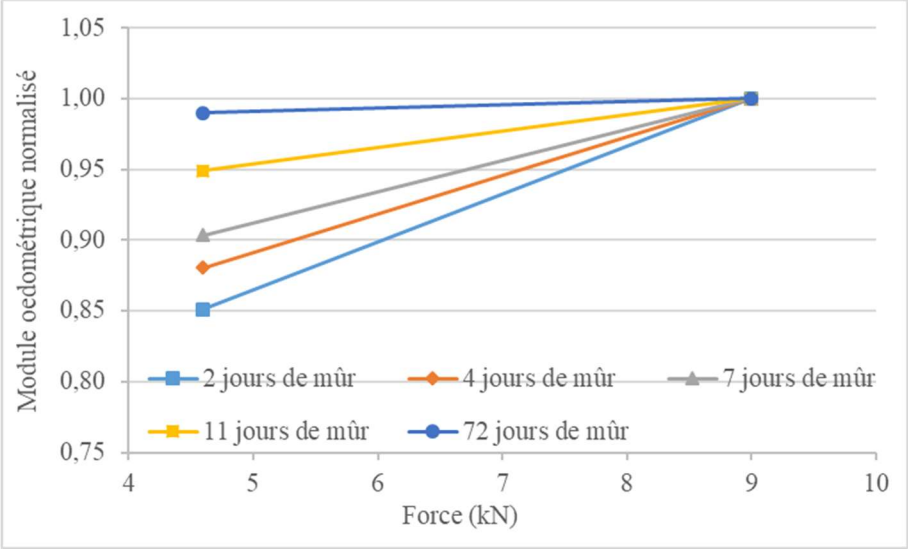


Figure 155 - Représentation normalisée de l'effet de la force – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

Plus le mûrissement augmente, moins l'effet de la force sur le comportement du matériau est marqué. Cette observation est cohérente avec le fait que le comportement du matériau au jeune âge est élastique non linéaire (dépendant donc de la force) et que cette composante ENL diminue avec l'augmentation avec le mûrissement et l'apparition du comportement viscoélastique.

Les Figure 156 et Figure 157 représentent l'effet de la force sur le déphasage à différents stades de mûrissement.

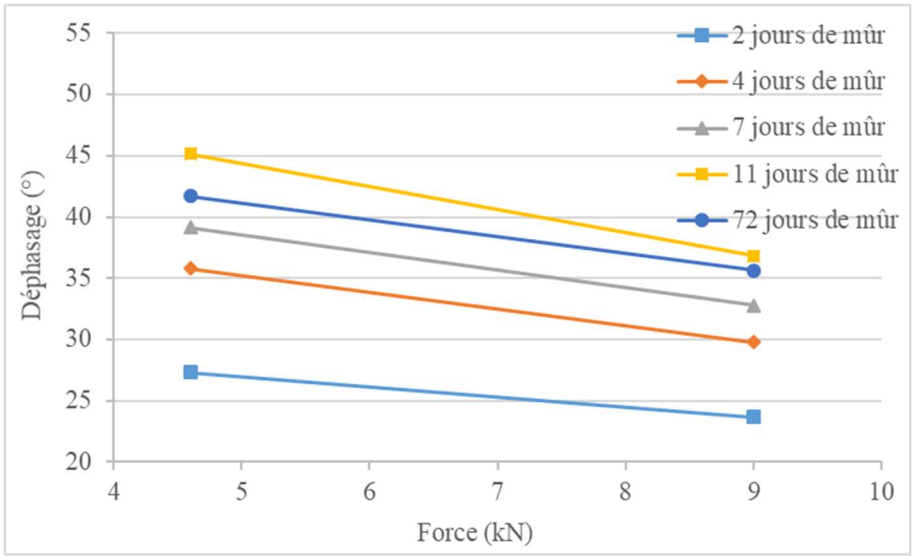


Figure 156 - Effet de la force sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

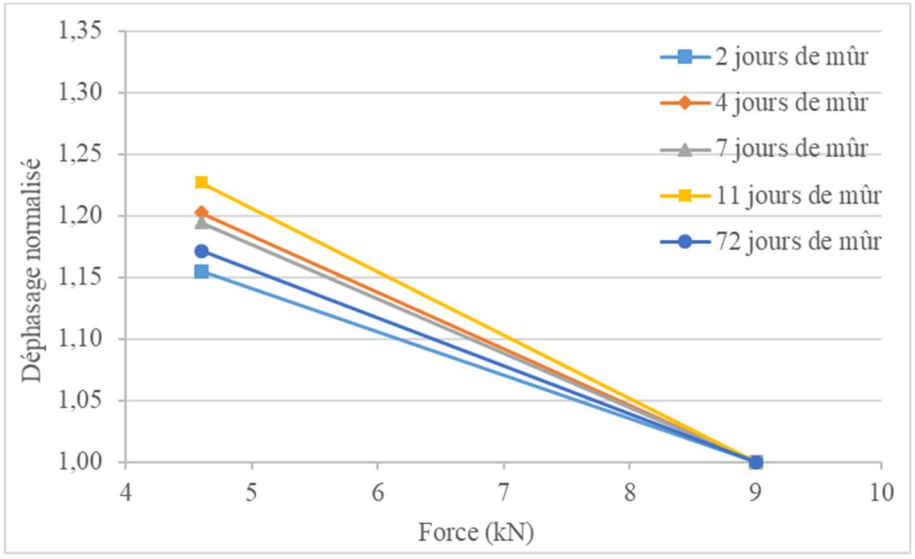


Figure 157 - Représentation normalisée de l'effet de la fréquence sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

Concernant la fréquence peu de variation de l'angle de phase entre mûrissements est à noter avec cependant, une légère augmentation.

Résultats du mûrissement à 15 °C et 45 % d'HR :

Les Figure 158 et Figure 159 montrent de nouveau l'effet de la force mais cette fois sur les éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR. Les observations sont strictement les mêmes que pour les résultats sur les éprouvettes mûries à 35 °C, idem pour l'évolution de l'angle de phase, Figure 160 et Figure 161.

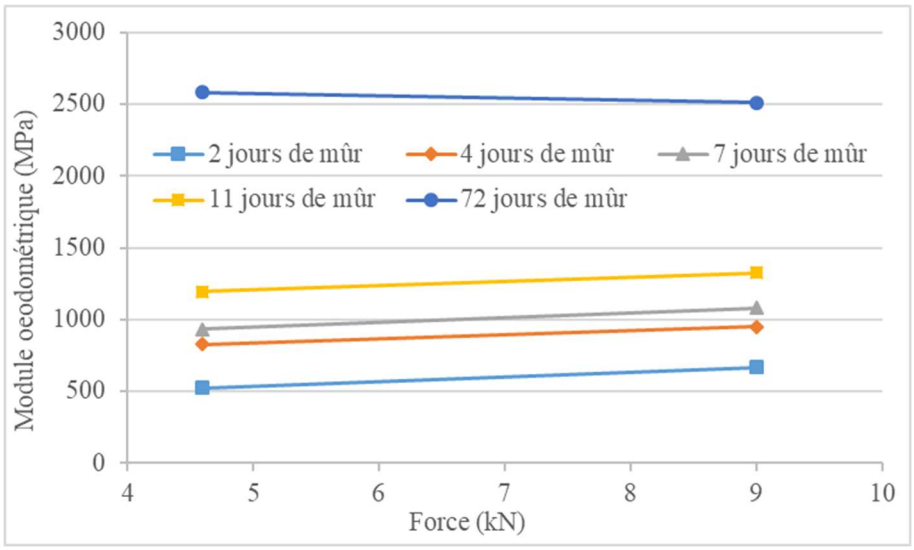


Figure 158 - Effet de la force – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

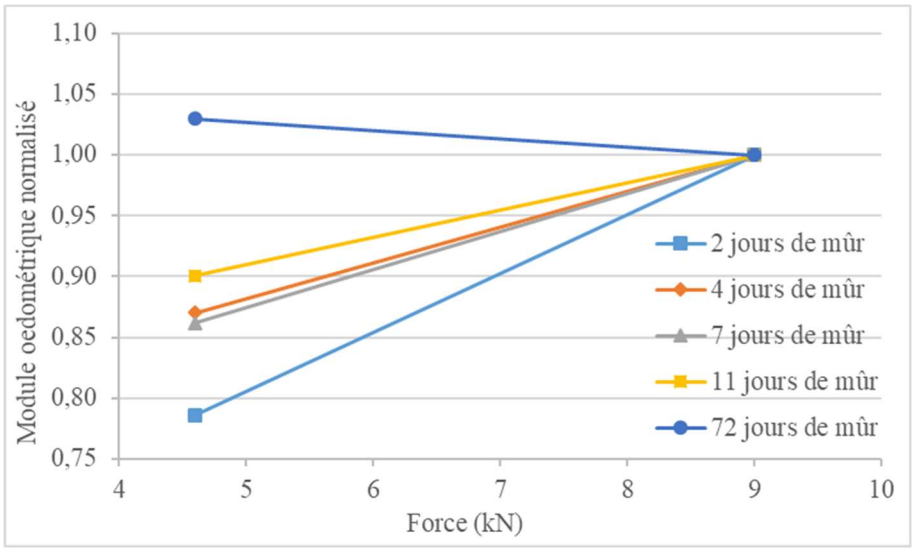


Figure 159 - Représentation normalisée de l'effet de la force – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

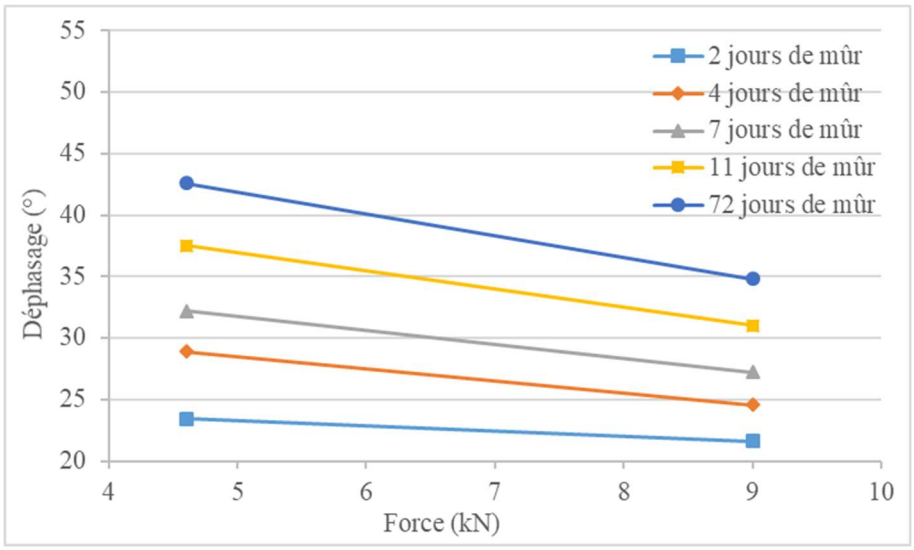


Figure 160 - Effet de la force sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

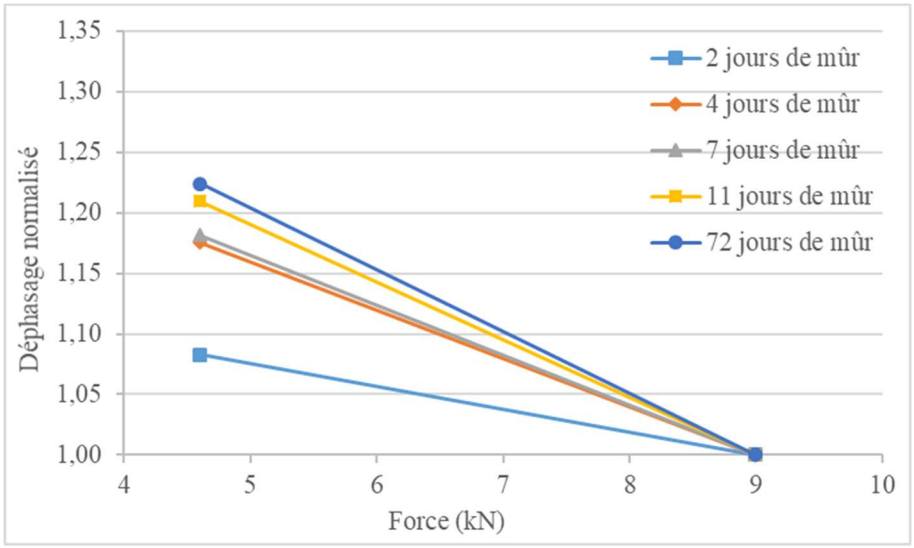


Figure 161 - Représentation normalisée de l'effet de la fréquence sur le déphasage – Essais réalisés à 20 °C, 10 Hz et 9 kN sur éprouvettes mûries à 15 °C et 45 % d'HR.

V.2.3.5. Effet de l'hygrométrie

Regardons à présent l'effet de l'hygrométrie sur le mûrissement. La Figure 162 montre l'évolution du module en fonction des conditions de mûrissement à 35 °C mais à trois hygrométries différentes à savoir 20 % d'HR, 45 % d'HR et 70 % d'HR.

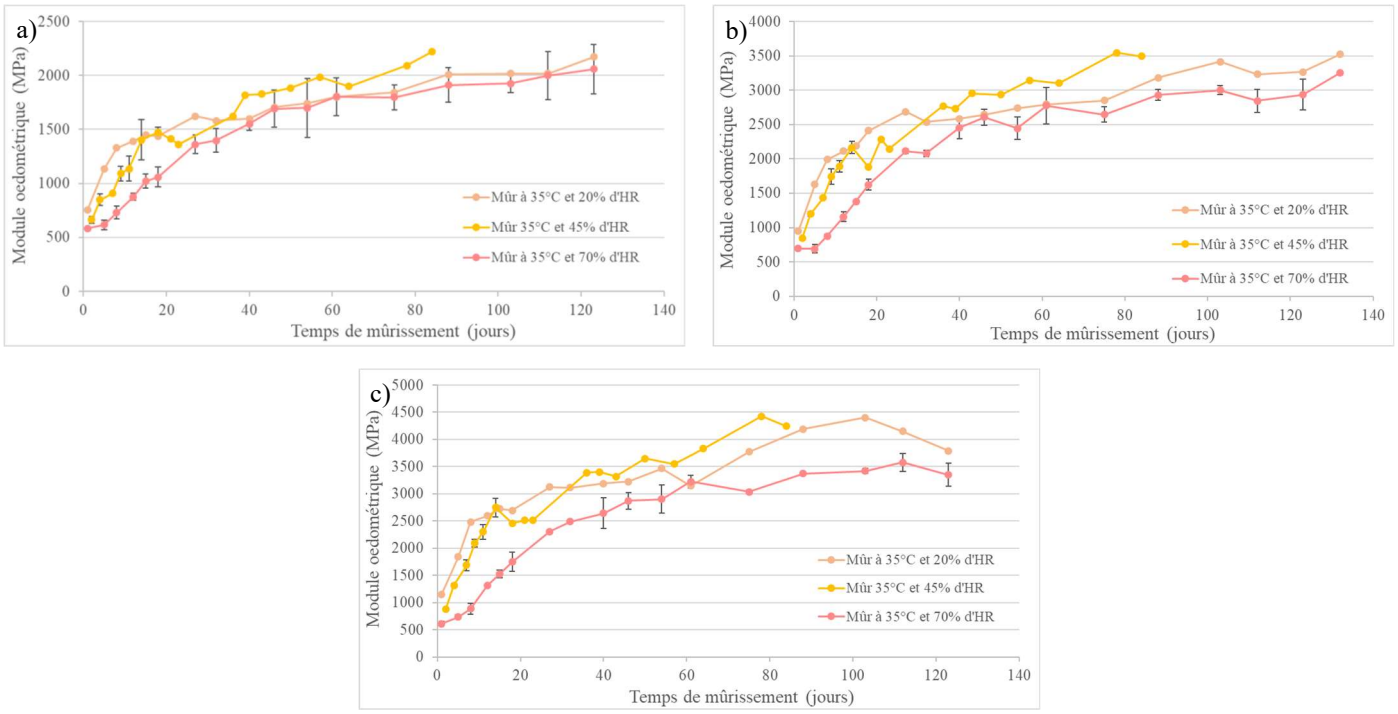
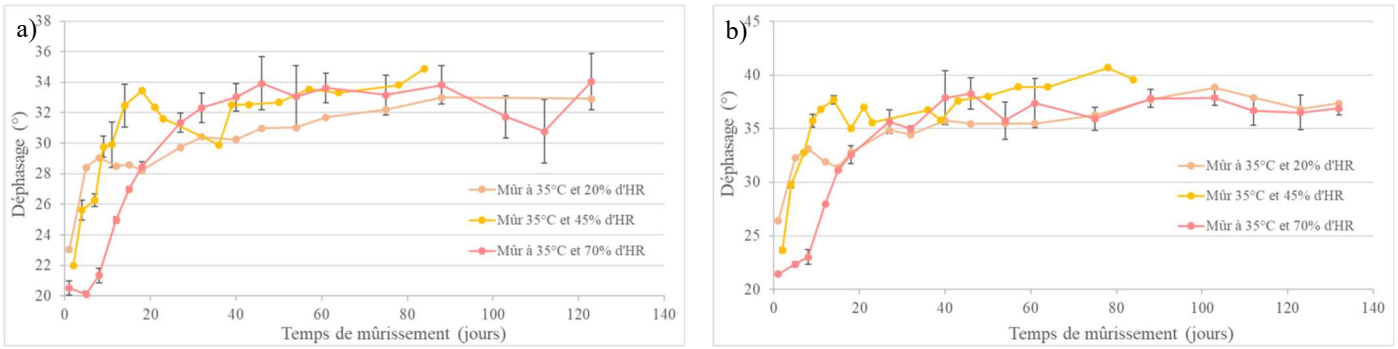


Figure 162 - Evolution du module en fonction de l'hygrométrie de mûrissement - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Essais à 35 °C b) Essais à 20 °C c) Essais à 15 °C.

L'ensemble des résultats met en évidence que le module évolue avec le mûrissement et que, plus l'hygrométrie est grande, plus ce mûrissement est ralenti. La différence d'hygrométrie lors du mûrissement influence la cinétique de mûrissement mais n'impacte pas la valeur finale de module contrairement aux effets de la température de mûrissement.

Dans les mêmes conditions de mûrissement, la Figure 166 montre l'évolution du déphasage.



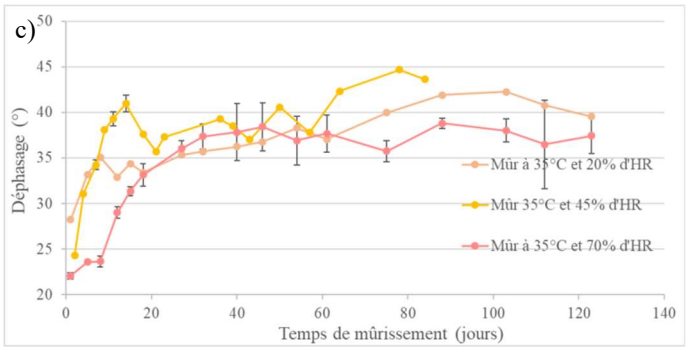


Figure 163 - Evolution du déphasage en fonction de l'hygrométrie de mûrissement - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Essais à 35 °C b) Essais à 20 °C c) Essais à 15 °C.

Le déphasage augmente avec le mûrissement. Les éprouvettes mûries à 35 °C et 70 % d'HR mettent toutefois plus de temps à atteindre les valeurs de déphasage des autres éprouvettes. Cette fois encore, l'hygrométrie influe sur la cinétique des courbes de déphasage sans impacter la valeur asymptotique finale.

V.2.3.6. Cycles de chargement expérimentaux

La Figure 164 montre l'évolution des cycles de chargement stabilisés à différents stades de mûrissement. Les cycles présentés sont les cycles mesurés lors de l'essai après stabilisation des déformations. Leurs origines sont alors remises à zéro pour pouvoir comparer ces différentes courbes. La figure présente trois cycles, le premier récupéré d'un essai effectué à 2 jours de mûrissement, un deuxième à 11 jours de mûrissement et un dernier à 84 jours de mûrissement.

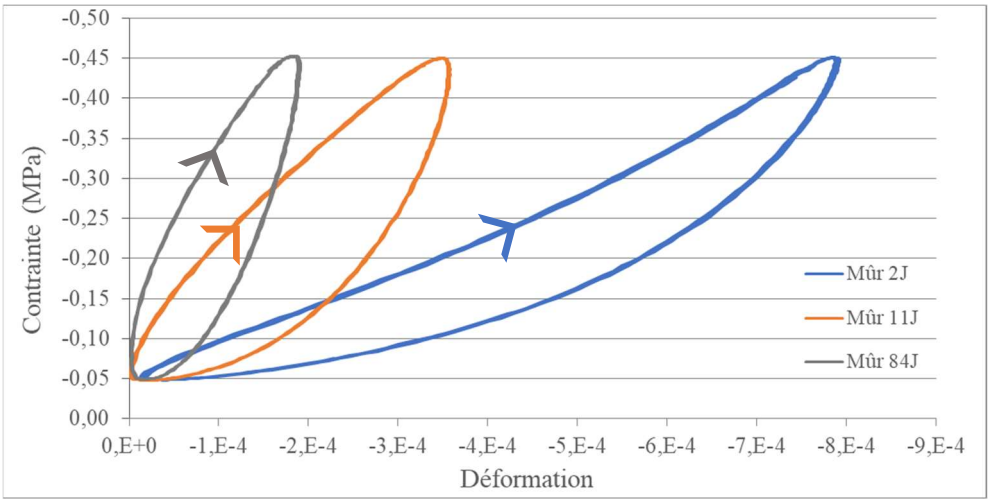


Figure 164 – Cycles de chargement stabilisés à différents temps de mûrissement – Essais réalisés à 20 °C, 1 Hz et 0,4 MPa sur des éprouvettes mûries à 35 °C et 45 % d'HR.

Comme attendu à partir des valeurs de module œdométrique extraites de ces données, nous pouvons voir que les amplitudes de déformation décroissent rapidement et fortement avec le temps de mûrissement.

Mais on voit également une évolution sensible de la forme de ces courbes. La courbe à 2 jours de mûrissement présente une boucle relativement fermée et de forme convexe, qui reflète un comportement essentiellement élastique non linéaire.

Les courbes à 11 et 84 jours se rapprochent en revanche d'une forme elliptique, caractéristique d'un comportement viscoélastique.

La forme de ces cycles expérimentaux nous conforte quant à la pertinence du modèle VENL 3D car des boucles similaires ont été obtenues à la fin du chapitre III sans aucun calage préalable du modèle.

V.3. Description et résultats de la campagne d'essais n°3 sur grave émulsion utilisant des agrégats d'enrobé

V.3.1. Matériau utilisé

La campagne d'essais n°3 est basée sur une formulation utilisant l'émulsion utilisée lors des campagnes n°1 et 2, mais avec un squelette granulaire incorporant des agrégats d'enrobé. Ces agrégats d'enrobés proviennent d'enrobés recyclés qui ont été concassés puis tamisés et séparés en deux classes granulaires, 0/8 et 8/12. Le léger concassage de cet enrobé recyclé permet d'éviter l'agglomération de mastic (mélange de bitume et de fines) qui pourrait être confondu avec des granulats ce qui nous permet d'obtenir des classes granulaires plus fiables. Lors de la fabrication, nous avons mis la même quantité d'émulsion que dans la formulation des campagnes d'essais 1 et 2 en considérant qu'en l'absence de chauffage du mélange lors de la fabrication, le bitume déjà présent dans les recyclés n'était pas remobilisé et que par conséquent, il était sans effet sur la liaison entre granulats ou agrégats.

Caractéristiques des agrégats :

Les agrégats proviennent de la carrière de Chauvon (49) et les granulats sont de nature basaltique. Pour le mélange, le pourcentage de chaque fraction granulaire a été choisi afin que la courbe granulaire des recyclés soit au plus proche du mélange granulaire des campagnes d'essais 1 et 2. Ces pourcentages sont :

- Agrégats 0/8 : 37 %
- Agrégats 8/12 : 63 %

L'analyse granulométrique de chacune des fractions est faite conformément à la norme NF EN 933-1 [56], la recomposition granulaire obtenue est présentée dans le Tableau 22 et la Figure 165.

Tableau 22 - Analyses granulométriques.

Tamis (mm)	Pourcentages passants		
	0/8	8/12	Recompo
12,50	100	100	100
10,00	100	99	99,4
8,00	100	72	82,4
6,30	99	45	65
5,00	93,5	34,5	56,3
4,00	88	24	47,7
3,15	78	21,5	42,4
2,00	68	19	37,1
1,00	47	15	26,8
0,50	32	12	19,4
0,25	22	9	13,8
0,125	17,2	7,2	10,9
0,063	12,4	5,4	8

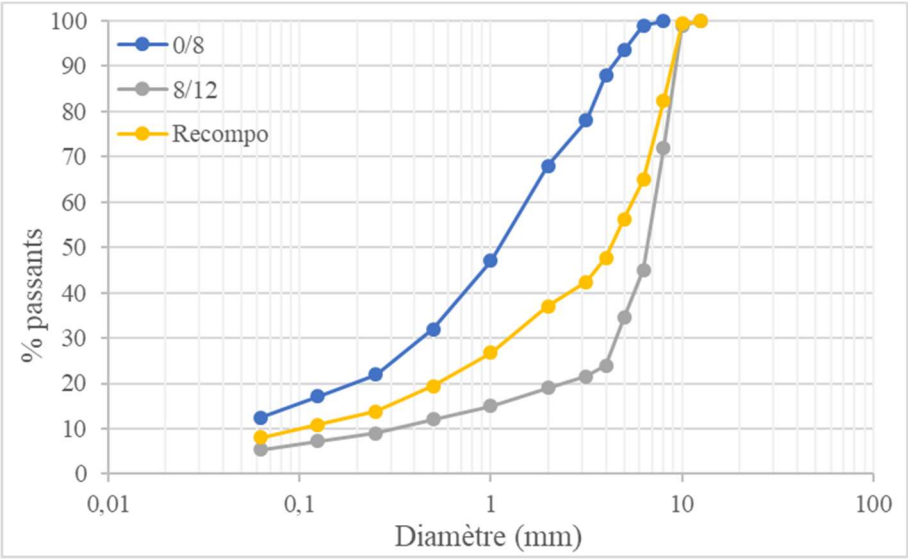


Figure 165 - Courbes granulométriques.

Fabrication :

Les agrégats sont pesés puis placés dans le malaxeur avec l'eau d'ajout puis mélangés dans le malaxeur pendant 30 secondes. On ajoute alors la quantité désirée d'émulsion avant de malaxer encore pendant 2 minutes.

La quantité d'enrobé à froid désirée (mesurée par son poids) est alors placée dans chacun des moules afin d'obtenir des éprouvettes d'élancement 0,5 et une compacité visée correspondant à 15 % de vides.

V.3.2. Essai de mûrissement

Comme nous l'avons vu lors des deux campagnes précédentes, c'est la température qui influence le plus les performances de l'enrobé à froid. C'est pourquoi, pour cette campagne, nous avons décidé d'évaluer seulement l'effet de la température de mûrissement.

Pour cela, nous avons mis en place un essai de mûrissement à trois températures, à savoir 15 °C, 20 °C et 35 °C pour une hygrométrie de 43 % d'HR. Deux éprouvettes de notre matériau par température de mûrissement sont préparées. L'ensemble est conservé en mûrissement en enceinte climatique et ponctuellement sorti pour être testé selon les trois températures. Le planning des essais est présenté Figure 166.

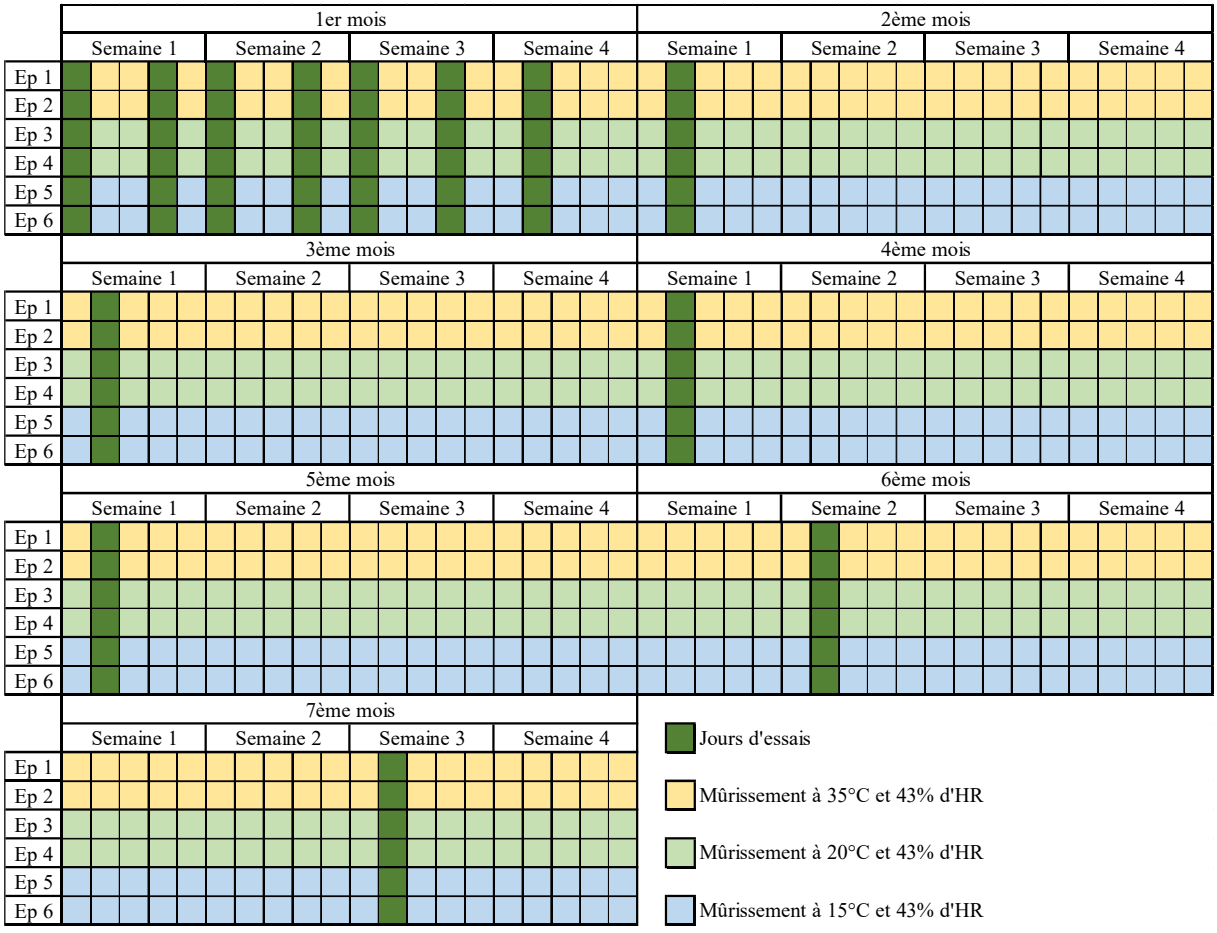


Figure 166 - Planning d'essais durant le mûrissement en température.

La Figure 167 montre l'enchaînement des essais œdométriques aux températures de 15 °C, 20 °C et 35 °C.

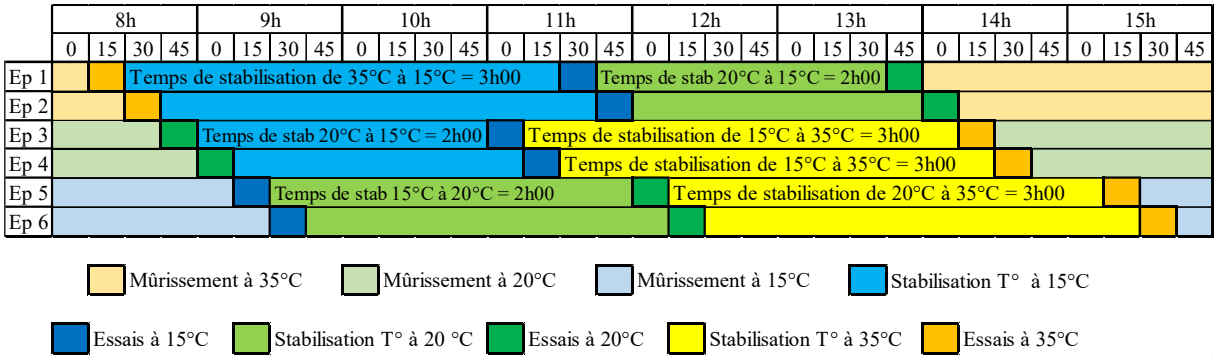


Figure 167 - Planning d'un jour d'essais lors de la première campagne.

Toutes les éprouvettes sont donc mûries pendant 184 jours avant d'être démoulées. Chaque teneur en vides est mesurée au banc gammadensimétrique, Tableau 23.

Tableau 23 - Teneurs en vides éprouvettes campagne 3.

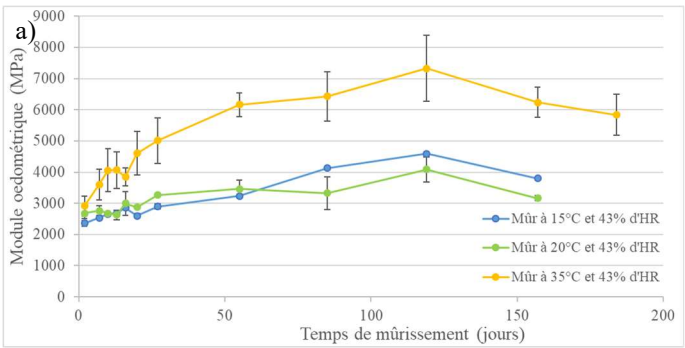
Éprouvette	1	2	3	4	5	6
Teneur en vides	5,5 %	7,4 %	7,1 %	7,6 %	8,0 %	6,9 %

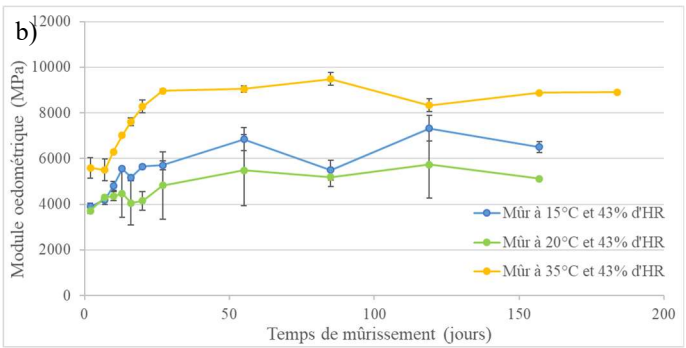
V.3.3. Résultats de l'essais de mûrissement et d'essai œdométrique

Les annexes 30 à 39 présentent l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, en termes de déformation, contrainte moyenne, module et déphasage de chacune des éprouvettes.

V.3.3.1. Effet de la température de mûrissement

Regardons dans un premier temps l'évolution du module avec le temps en fonction de la température de mûrissement et de la température d'essai, Figure 168. Pour rappel, les valeurs de module œdométrique lues sur les figures suivantes sont supérieures aux valeurs de module « classique » utilisées pour la caractérisation des enrobés à chaud.





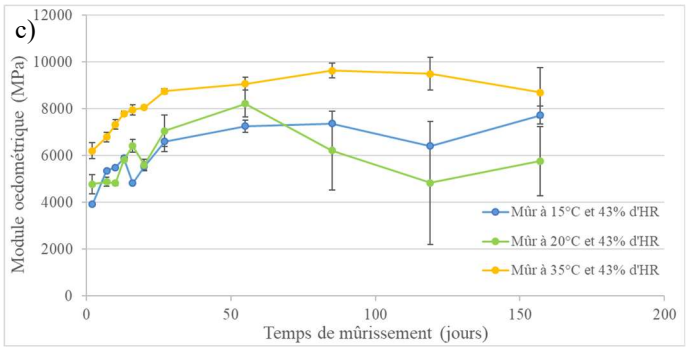


Figure 168 - Evolution du module en fonction de la température de mûrissement - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Essais à 35 °C b) Essais à 20 °C c) Essais à 15 °C.

Les résultats montrent que les évolutions temporelles des modules des éprouvettes mûries à 15°C et 20°C sont assez proches ; ce qui est logique étant donné qu'il n'y a que 5 °C d'écart entre elles. Les éprouvettes mûries à 35 °C, quant à elles, passent par des valeurs de module bien plus importantes pour atteindre 9 635 MPa. Des performances mécaniques aussi grandes sont, il nous semble, à la limite de ce que nos capteurs peuvent mesurer. En effet, la mesure de déplacement correspondant à une valeur de module si élevé est de 4,5 µm. Nous avons tout de même une très bonne répétabilité sur les valeurs de module des éprouvettes mûries à 15 °C et à 35 °C. Tout comme le matériau précédent, la température de mûrissement semble influer sur la valeur finale de module.

Comme pour l'évolution des modules, plus la température de mûrissement est élevée, plus le déphasage augmente rapidement et devient grand, Figure 169. De plus, les asymptotes des courbes de mûrissement ne se stabilisent pas à la même valeur. La température de mûrissement aurait donc une influence sur la valeur de module et le déphasage finale de l'enrobé à froid.

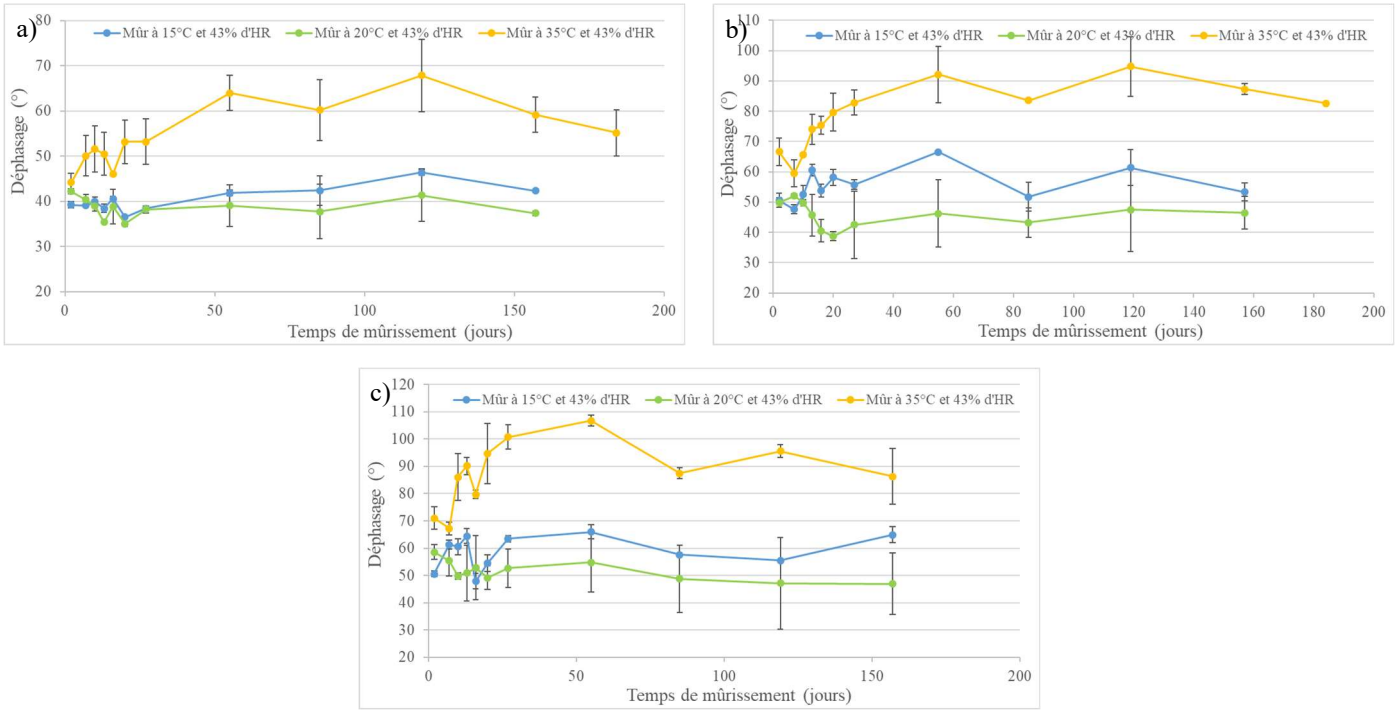


Figure 169 - Evolution du déphasage en fonction de la température de mûrissement - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Essais à 35 °C b) Essais à 20 °C c) Essais à 15 °C.

V.3.3.2. Effet de la température d'essai

La Figure 170 montre l'évolution du module dans le temps pour chacune des températures d'essais œdométriques et pour chaque température de mûrissement (figure a), mûrissement à 35 °C, b) mûrissement à 20 °C , c) mûrissement à 15 °C).

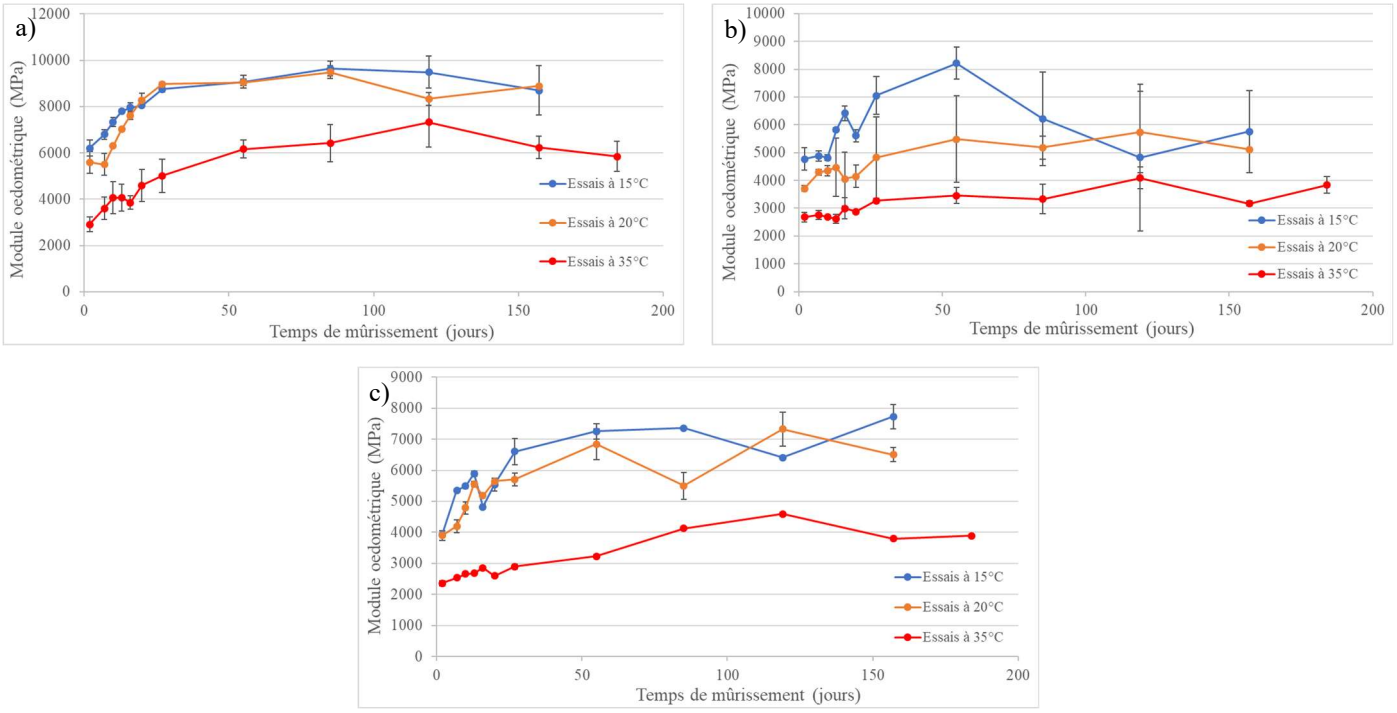


Figure 170 - Evolution du module en fonction de la température d'essais - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Mûrissement à 35 °C 43 % d'HR b) Mûrissement à 20 °C 43 % d'HR c) Mûrissement à 15 °C 43 % d'HR.

Les modules augmentent avec le mûrissement. Nous observons également que plus la température d'essai est basse plus le module sera élevé.

Lors du premier jour d'essais œdométriques (à 2 jours de mûrissement), nous pouvons voir que, contrairement au matériau précédent, les neuf courbes de ces trois graphes ne partent pas de la même valeur de module quelle que soit la température d'essai, ce qui implique un comportement viscoélastique déjà très présent dans le matériau.

Comme indiqué en Figure 171, plus la température d'essais est basse plus le déphasage est grand. Comme pour l'enrobé à froid précédent, nous observons une légère augmentation de la dépendance à la fréquence ainsi qu'une légère diminution de l'effet de la force sur le matériau. Ce matériau utilisant des recyclés, il présente, dès son jeune âge, un comportement viscoélastique marqué lors des premiers essais à 2 jours de mûrissement. C'est pour cette raison que nous ne pouvons pas représenter l'évolution d'un comportement élasticité non linéaire vers un comportement viscoélastique.

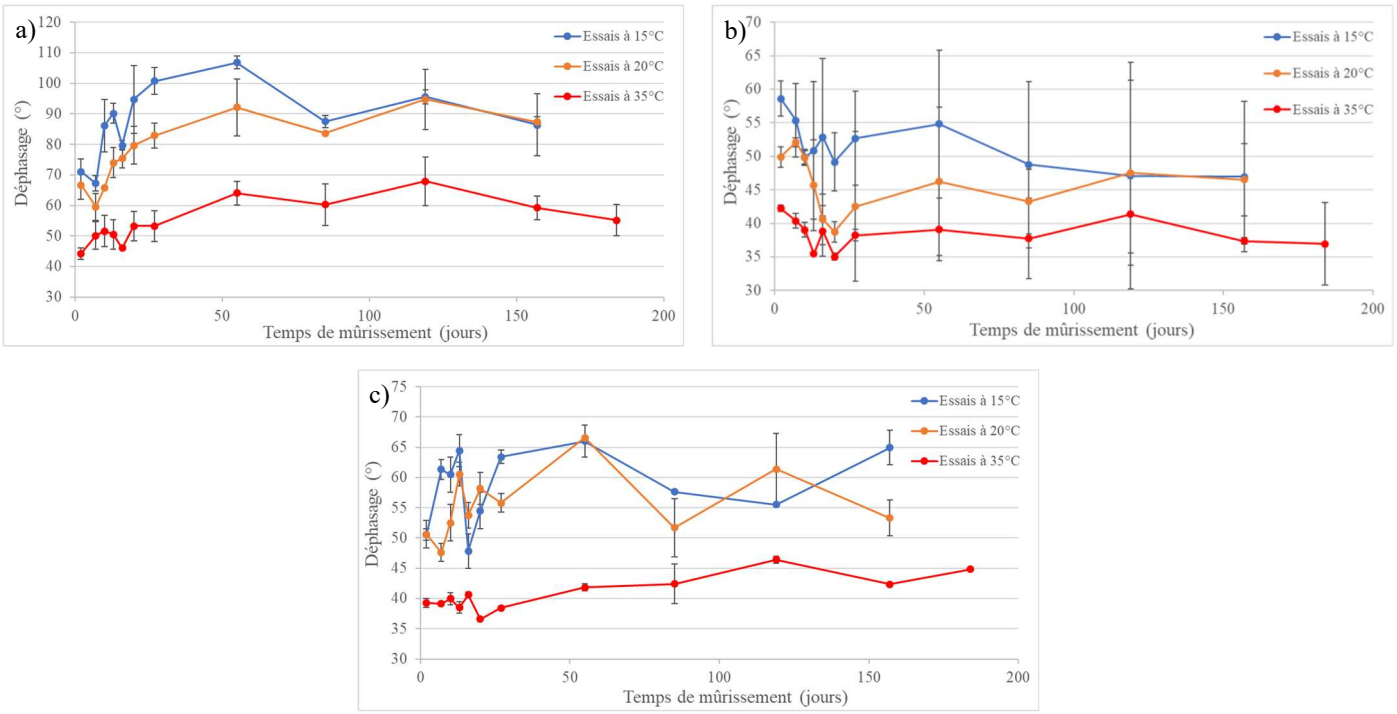


Figure 171 - Evolution du déphasage en fonction de la température d'essais - Essais réalisés à 10 Hz et 9 kN - a) Mûrissement à 35 °C 43 % d'HR b) Mûrissement à 20 °C 43 % d'HR c) Mûrissement à 15 °C 43 % d'HR.

L'ensemble des résultats expérimentaux nous permet d'envisager la mise en œuvre et l'optimisation des paramètres du modèle VENL 3D.

V.4. Mise en œuvre et calage du modèle VENL 3D

Essayons à présent de caler le modèle et d'évaluer sa pertinence à partir des résultats des campagnes de mûrissement pratiquées au cours de cette thèse. Nous utiliserons principalement pour ce faire les mesures œdométriques pratiquées à 20 °C, que nous jugeons comme les plus fiables et les plus répétables grâce à leur bonne stabilisation en température. Par ailleurs, parmi ceux-ci, nous privilégions ceux réalisés à 9 kN et 10Hz, qui mettent le mieux en exergue les effets d'élasticité non linéaire et qui correspondent à la fréquence de mesure la plus usitée sur les enrobés, tout en permettant de converger rapidement vers des cycles stabilisés. Les Tableau 24 et Tableau 25 récapitulent l'ensemble des modalités d'essais œdométriques réalisées au cours des mûrissements à 15 et 35 °C; les essais entrant dans la procédure de calage sont indiqués en vert.

Tableau 24 - Modalités d'essais œdométriques utilisées au cours de la campagne de mûrissement à 15 °C et 45 % d'HR.

Mûrissement	15 °C					
T° d'essais (°C)	15 °C		20 °C		35 °C	
Force (kN)	4,6 kN	9 kN	4,6 kN	9 kN	4,6 kN	9 kN
Fréquences (Hz)	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10

Tableau 25 - Modalités d'essais œdométriques utilisées au cours de la campagne de mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR.

Mûrissement	35 °C					
T° d'essais (°C)	15 °C		20 °C		35 °C	
Force (kN)	4,6 kN	9 kN	4,6 kN	9 kN	4,6 kN	9 kN
Fréquences (Hz)	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10	0,1/1/3/6/10

La procédure de calage du modèle est séparée en deux parties :

- Dans un premier temps, nous utilisons les résultats de mûrissement à 15 °C et 2 jours de maturité correspondant à l'état le moins mûri du matériau afin de fixer les seuls paramètres élastiques non linéaires, à partir du modèle ENL 3D. On suppose que la température du liant a peu d'effet sur la réponse du matériau à ce stade précoce de son existence.
- Dans un second temps, connaissant les valeurs de ces paramètres, nous calons les paramètres viscoélastiques du modèle VENL 3D à partir des mesures réalisées sur le matériau dans son état le plus mûri, à l'issue donc des 84 jours de la campagne de mûrissement à 35 °C.

V.4.1. Détermination des paramètres élastiques non linéaires

Il s'agit de déterminer les paramètres n, K_a *et* G_a du modèle ENL seul, qui pour rappel n'est autre que le modèle de Boyce. Nous nous proposons pour cela de confronter les courbes des essais œdométriques réalisées sur les échantillons mûris à 15°C pendant 2 jours, avec les réponses théoriques du modèle lorsque l'on fait varier ces paramètres. Pour cette étude, nous faisons abstraction des déformations transitoires et utilisons les cycles quasi-stabilisés obtenus en fin de chacune des séquences d'essais œdométriques (après environ 150 cycles).

Les Tableau 26, Tableau 27 et Tableau 28 présentent les résultats de l'analyse paramétrique effectuée à partir du modèle ENL 3D utilisé en mode œdométrique. Chacun des tableaux présente la courbe élastique non linéaire "contrainte/déformation" obtenue en fonction de K_a , G_a pour une valeur de n donnée. Pour faciliter la comparaison avec les résultats expérimentaux, on indique en particulier les valeurs des modules œdométriques sécants, atteints au maximum des cycles sous la charge verticale de 9 kN ($\sigma_{zz} = -0{,}82MPa$). La valeur de E_s (sans incidence sur les résultats) est fixée à 100 MPa.

Tableau 26 - Etude paramétrique du modèle ENL 3D pour $n = 0{,}3$: courbes oedométriques simulées et modules sécants théoriques.

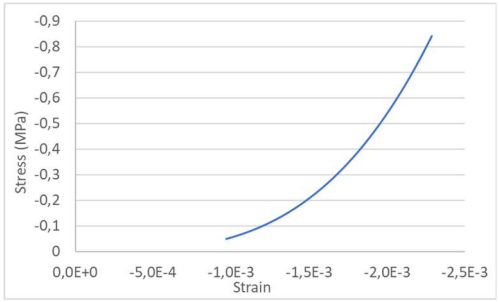
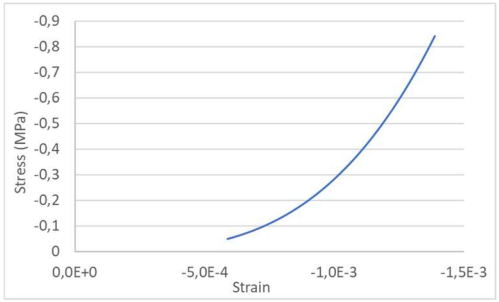
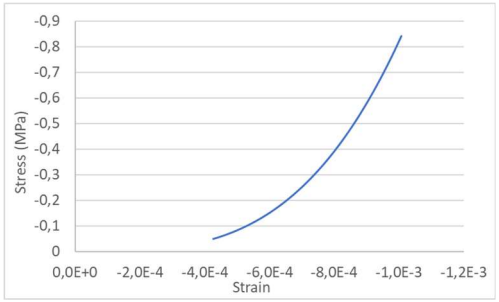
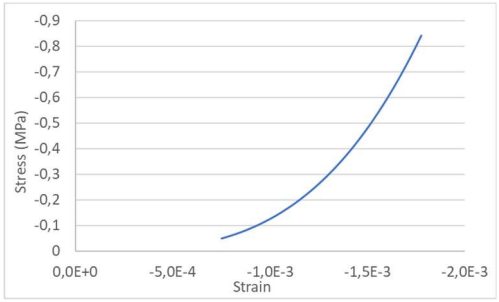
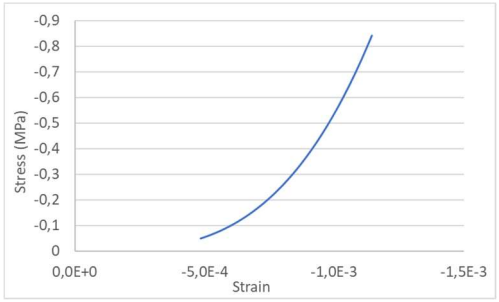
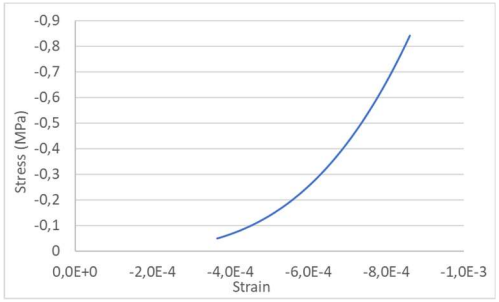
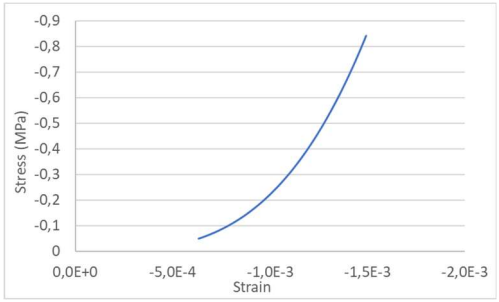
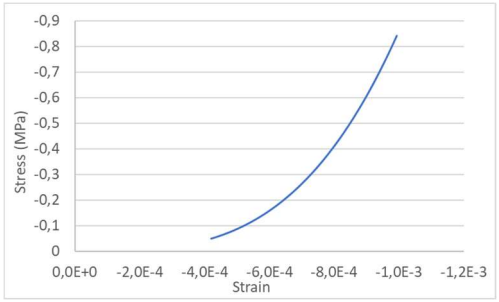
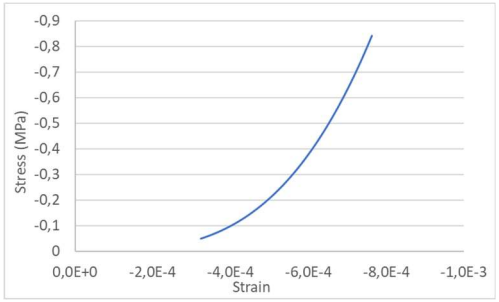
	$k_a = 50$ MPa	$k_a = 100$ MPa	$k_a = 150$ MPa
$G_a = 50$ MPa	Module œdométrique = 602 MPa 	Module œdométrique = 992 MPa 	Module œdométrique = 1 368 MPa 
$G_a = 100$ MPa	Module œdométrique = 775 MPa 	Module œdométrique = 1 203 MPa 	Module œdométrique = 1 600 MPa 
$G_a = 150$ MPa	Module œdométrique = 923 MPa 	Module œdométrique = 1 386 MPa 	Module œdométrique = 1 805 MPa 

Tableau 27 - Etude paramétrique du modèle ENL 3D pour $n = 0{,}4$: courbes oedométriques simulées et modules sécants théoriques.

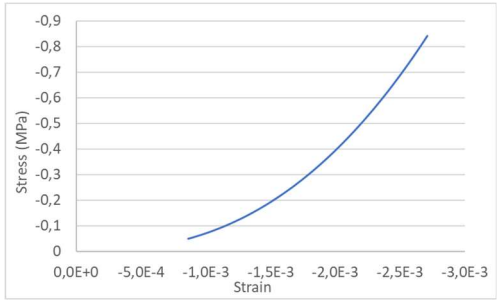
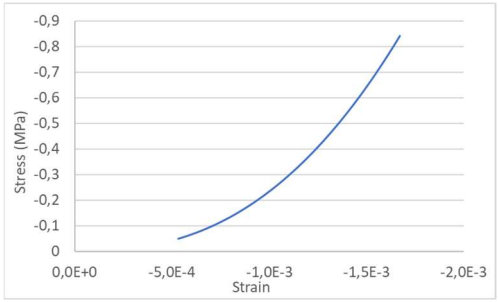
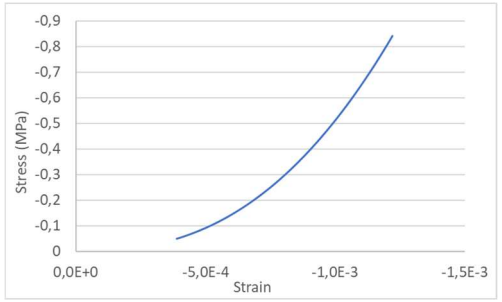
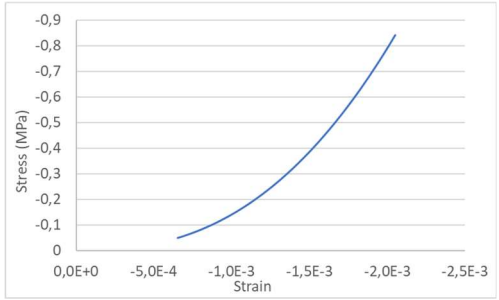
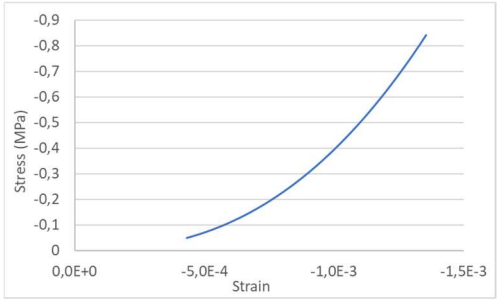
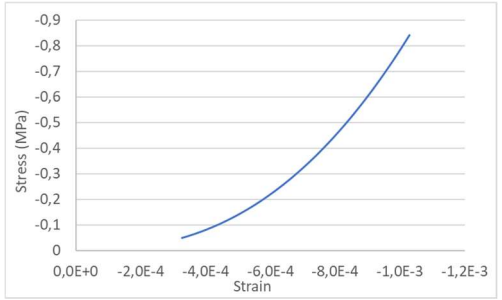
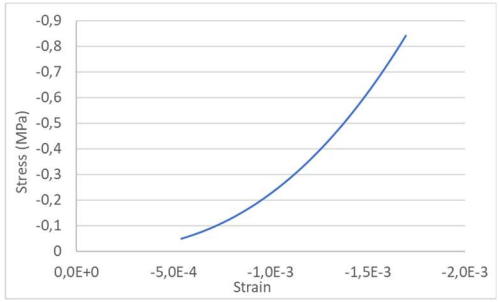
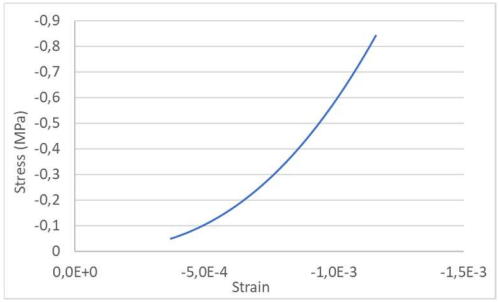
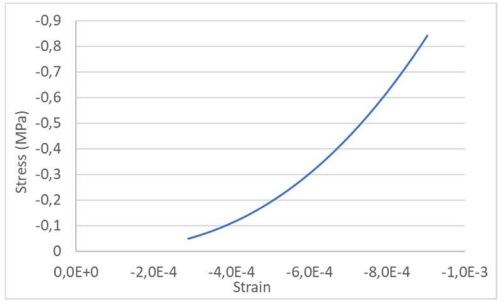
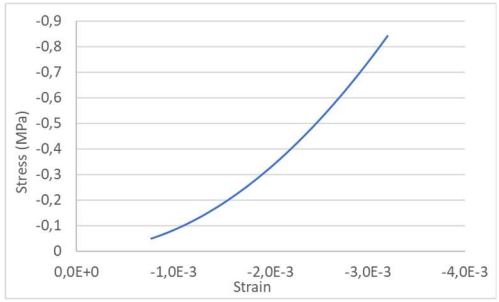
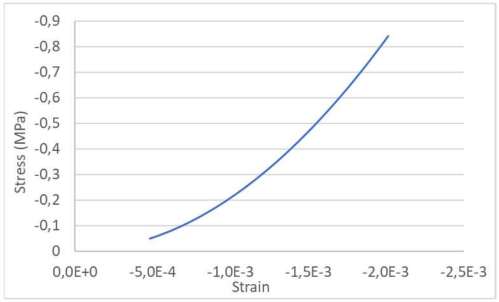
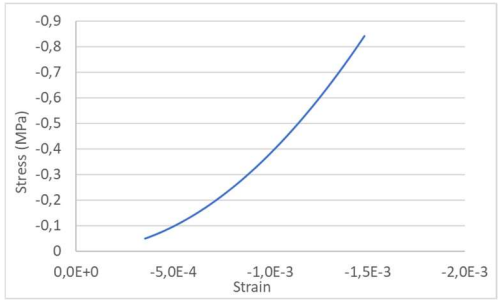
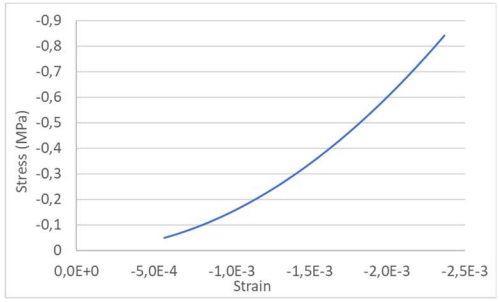
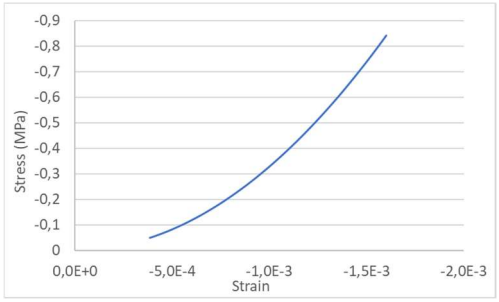
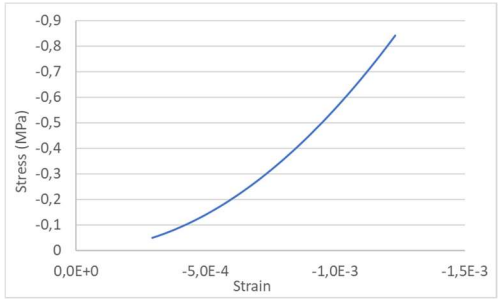
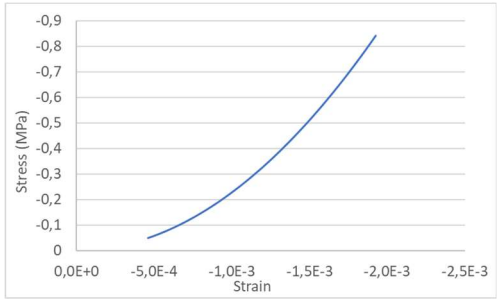
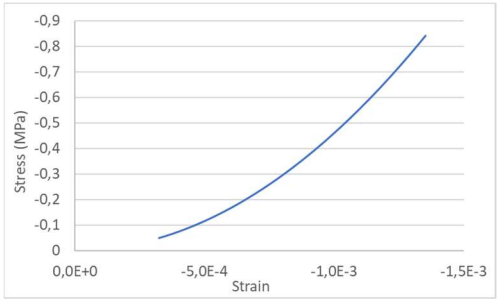
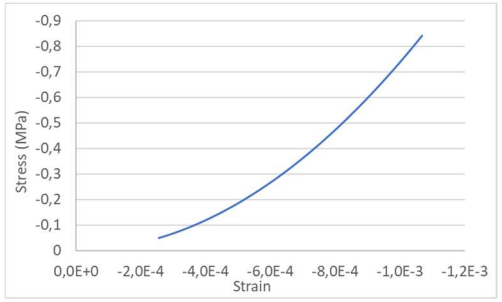
	$k_a = 50$ MPa	$k_a = 100$ MPa	$k_a = 150$ MPa
$G_a = 50$ MPa	Module œdométrique = 430 MPa 	Module œdométrique = 696 MPa 	Module œdométrique = 953 MPa 
$G_a = 100$ MPa	Module œdométrique = 567 MPa 	Module œdométrique = 859 MPa 	Module œdométrique = 1 130 MPa 
$G_a = 150$ MPa	Module œdométrique = 686 MPa 	Module œdométrique = 1 003 MPa 	Module œdométrique = 1 289 MPa 

Tableau 28 - Etude paramétrique du modèle ENL 3D pour $n = 0{,}5$: courbes oedométriques simulées et modules sécants théoriques.

	$k_a = 50$ MPa	$k_a = 100$ MPa	$k_a = 150$ MPa
$G_a = 50$ MPa	Module œdométrique = 326 MPa 	Module œdométrique = 518 MPa 	Module œdométrique = 703 MPa 
$G_a = 100$ MPa	Module œdométrique = 441 MPa 	Module œdométrique = 651 MPa 	Module œdométrique = 846MPa 
$G_a = 150$ MPa	Module œdométrique = 542 MPa 	Module œdométrique = 771 MPa 	Module œdométrique = 977 MPa 

Sur la base de ces courbes, il est possible à présent de rechercher les paramètres ENL calant au mieux avec les mesures œdométriques réalisées sur l'enrobé à l'émulsion dans son état le moins mûri.

Comme nous avons pu le voir, les essais œdométriques sur grave émulsion à 2 jours de mûrissement donnent bien des courbes de chargement et de déchargement convexes, mais formant des cycles d'aires non nulles et non pas une unique courbe comme traditionnellement montré lors des essais sur matériau granulaire non lié, typique d'un comportement ENL quasi pur. Cette représentation « classique » et stabilisée des essais sur GNT n'est toutefois obtenue que pour un nombre relativement important de cycles de chargement, de l'ordre de 10 000, alors que dans notre cas nous n'imposons à nos éprouvettes qu'une totalité de 310 cycles, toutes fréquences confondues. Mais l'expérience montre que si l'on se limite également à ce nombre de cycles dans les essais sur GNT, on retrouve également pour celles-ci un comportement expérimental voisin de celui observé sur grave émulsion. A titre d'exemple, la Figure 172 montre la courbe expérimentale que nous avons obtenue à petit nombre de cycles, dans un essai œdométrique à 9 kN, 0,1 Hz conduit sur une GNT ayant la courbe granulaire de notre enrobé à l'émulsion. On peut vérifier

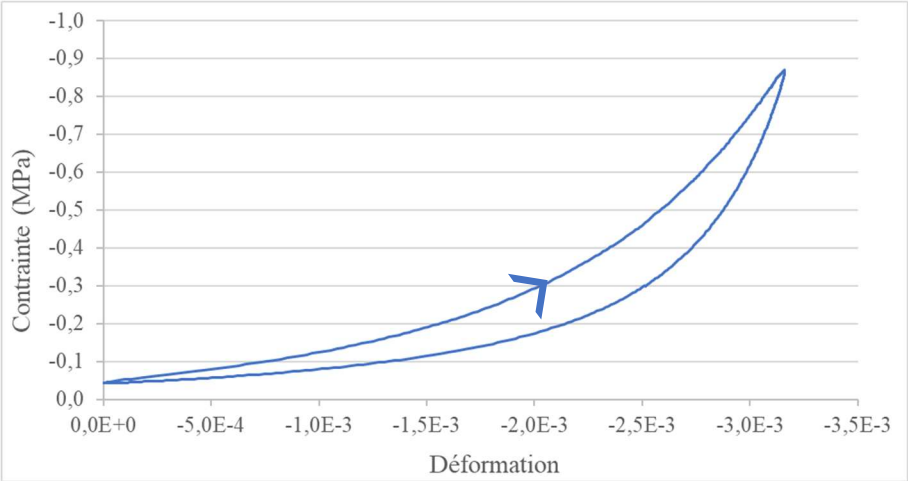


Figure 172 - Courbe expérimentale de chargement/déchargement obtenue à 310 cycles sur une GNT ayant même composition granulaire que la GE de notre étude.

Nous pouvons voir que l'allure de cette courbe est similaire à celle de notre enrobé à l'émulsion à l'état frais, présentée Figure 164.

Pour caler le modèle ENL, nous allons donc utiliser au final les 4 courbes expérimentales obtenues pour un mûrissement de 2 jours à 15 °C 45 % d'HR, lors des 4 essais œdométriques effectués à 20°C, 10 Hz pour les deux niveaux de force et les deux éprouvettes testés (Figure 173).

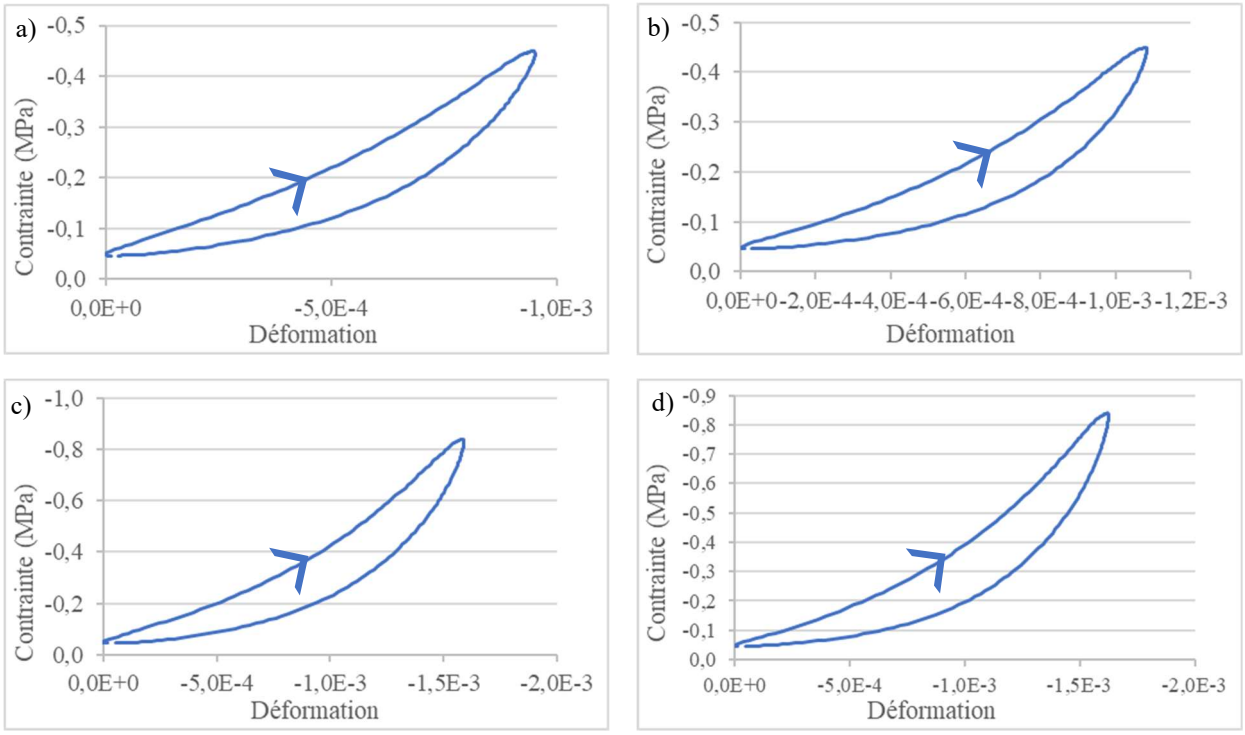


Figure 173 - Cycles expérimentaux obtenus sur GE de 2 jours, mûrie à 15 °C et 45 % d'HR.. Essais œdométriques à 20 °C , 10Hz : a) Éprouvette 1 à 0,41 MPa b) Éprouvette 2 à 0,41 MPa c) Éprouvette 1 à 0,88 MPa d) Éprouvette 2 à 0,88 MPa.

Pour pouvoir caler le modèle ENL 3D sur ces cycles, nous avons donc besoin de déterminer quelle courbe expérimentale (courbe de chargement, de déchargement ou courbe moyenne) faire coïncider avec les courbes théoriques.

Dans un premier temps, nous optons pour la courbe moyenne du cycle de chargement du graphique a) de la Figure 173. Après optimisation des paramètres, la comparaison modèle expérience est proposée en Figure 174 avec les paramètres du Tableau 29.

Tableau 29 - Valeurs des paramètres de Boyce de la loi ENL 3D pour calage de la courbe moyenne.

n	K_a (MPa)	G_a (MPa)
0,1	13	13

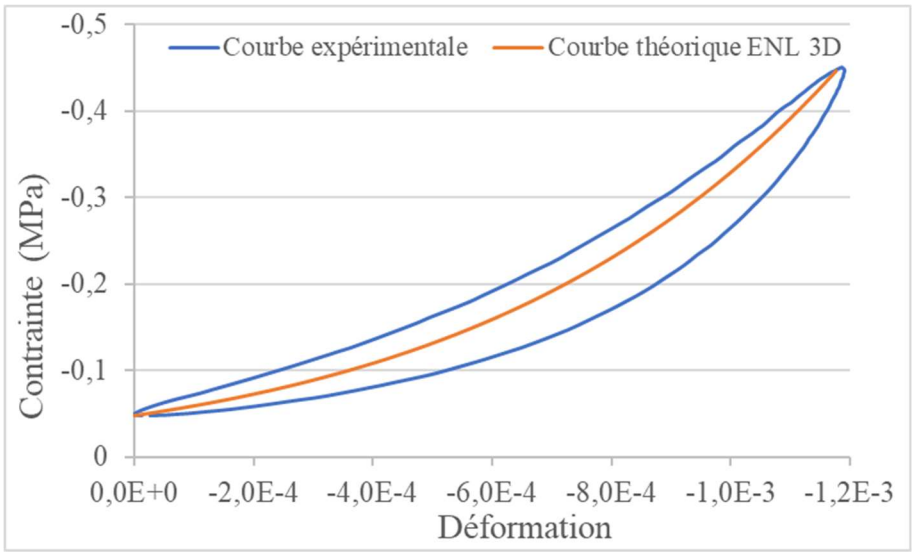


Figure 174 - Calage de la courbe moyenne à 2 jours de mûrissement.

Comme nous pouvons le voir, il est possible d'obtenir un bon accord. Par contre, le jeu de paramètres propre au modèle de Boyce permettant d'obtenir cette courbe, ne nous semble pas réaliste car conduisant à des valeurs trop faibles de l'ensemble des paramètres par rapport à ceux généralement obtenus sur cycles stabilisés de GNT.

Dans un second temps, nous optons donc pour la phase de chargement du cycle, plus proche des conditions qui importent sous le passage d'un trafic routier. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 175, le modèle permet de bien reproduire les 4 cycles de chargement sélectionnés pour des jeux de paramètres assez voisins entre eux, précisés dans le Tableau 30.

Tableau 30 - Valeurs des paramètres de Boyce de la loi ENL 3D pour calage des phases de chargement.

Éprouvette	Contrainte (MPa)	n	K_a (MPa)	G_a (MPa)
Éprouvette 1	0,41	0,5	83	85
Éprouvette 2	0,41	0,5	78	78
Éprouvette 1	0,88	0,5	74	75
Éprouvette 2	0,88	0,49	73	75

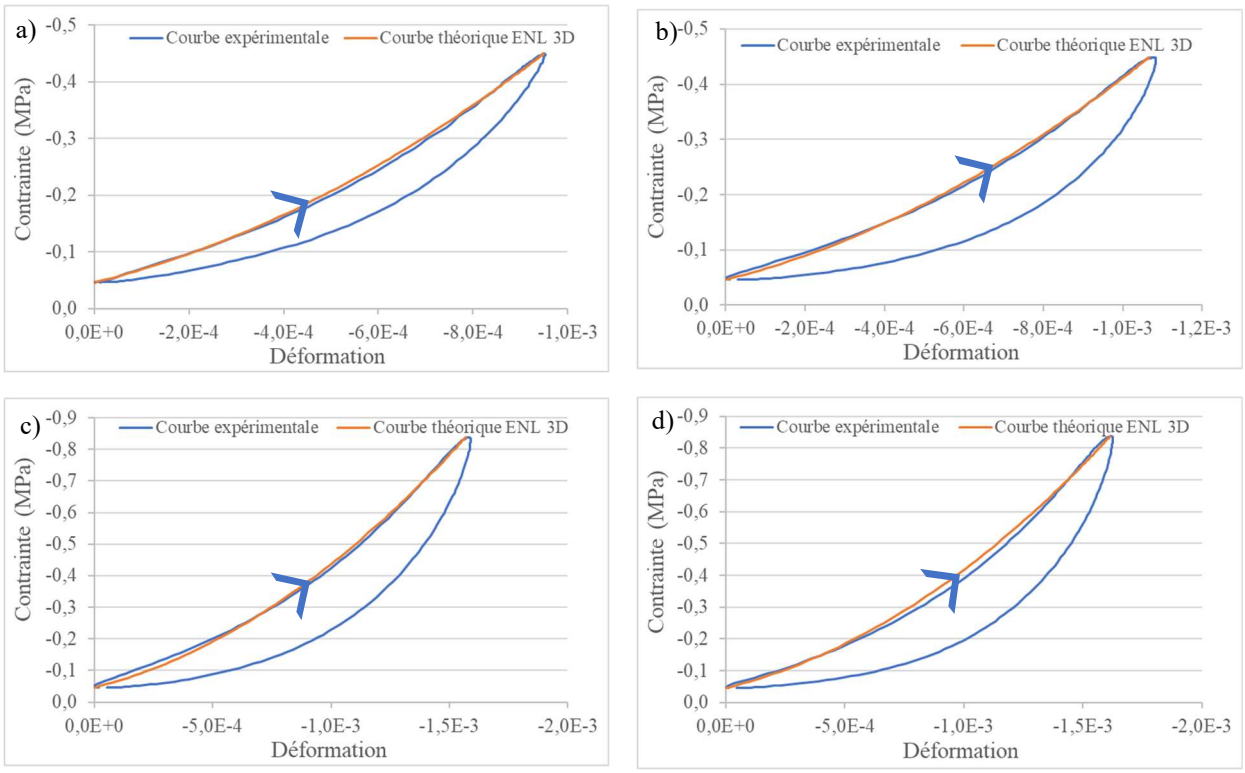


Figure 175 – Calage des phases de chargement pour un mûrissement de 2 jours à 15 °C et 45 % d'HR. Essais œdométriques à 20 °C et 10 Hz a) Éprouvette 1 à 0,41 MPa b) Éprouvette 2 à 0,41 MPa c) Éprouvette 1 à 0,88 MPa d) Éprouvette 2 à 0,88 MPa. Données de calage Tableau 30.

Nous allons ainsi retenir dans la suite les valeurs $n = 0{,}5$, $K_a = 80\ MPa$, $G_a = 80\ MPa$ qui permettent d'obtenir, comme le montre la Figure 176, une bonne approximation de nos quatre courbes expérimentales.

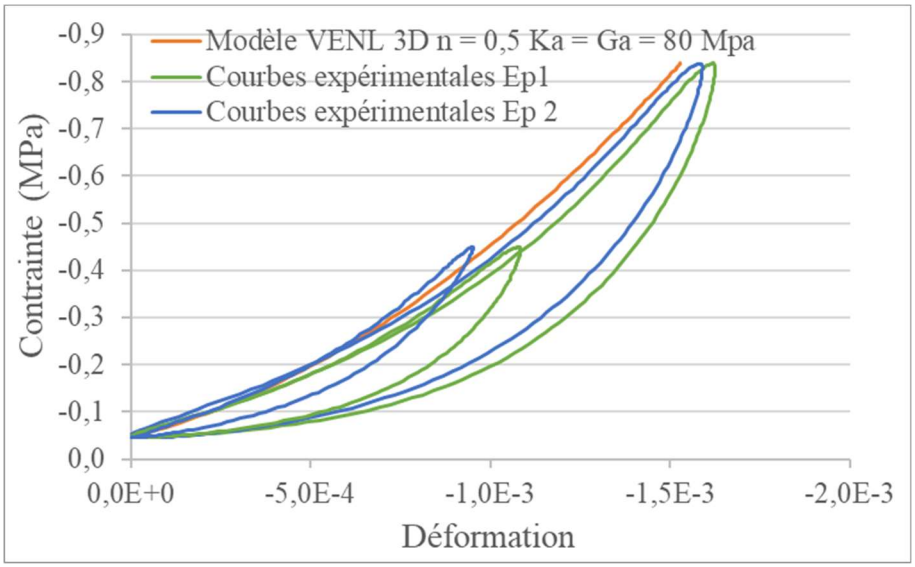


Figure 176 - Calage des phases de chargement œdométrique en ENL. Comparaison expériences/modèle.

Ces paramètres sont considérés fixés et indépendants du niveau de mûrissement. Reste à caractériser les propriétés viscoélastiques du modèle VENL 3D.

V.4.2. Calage des paramètres viscoélastiques valeur δ fixée

Concernant le calage des paramètres δ, γ, β, A, nous utilisons les résultats expérimentaux de l'enrobé à l'émulsion dans l'état le plus mûri dont nous disposons, à savoir celui obtenu sur les éprouvettes conservées (hors phases d'essais œdométriques) à 35°C pendant 84 jours. Par contre, comme déjà mentionné, nous utilisons préférentiellement pour ces échantillons les résultats œdométriques mesurés à 20°C, 9kN . La valeur de E_s dont le choix est arbitraire, mais qui joue d'après la définition des équations 3.145 et 3.146 sur les valeurs absolues de $\boldsymbol{A}$, reste fixée, égale à $100\ MPa$.

Afin de restreindre dans un premier temps le nombre de paramètres à déterminer, nous avons choisi de fixer la valeur du coefficient δ, prise égale à 1, qui dans le cas d'exposants γ, β **égaux**, correspondrait à un coefficient de « Poisson » $\nu = 0{,}35$, d'après l'équation vue au chapitre III: $\delta = \frac{9(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = 1$.

Il reste donc à caractériser γ, β et A.

Comme précédemment, nous effectuons d'abord une analyse paramétrique de la réponse théorique du modèle VENL 3D sur la base de ces trois paramètres (plan d'essais numériques complet). Les Tableau 31, Tableau 32 et Tableau 33 présentent ainsi les courbes œdométriques simulées pour différents jeux de valeurs, A à valeur γ fixée. On représente spécialement ici les derniers cycles simulés (pas toujours stabilisés), après multi-cyclage du modèle VENL3D.

Tableau 31 - Etude paramétrique du modèle VENL 3D pour $\gamma = 0{,}2$.

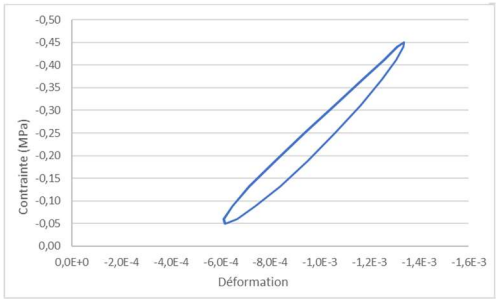
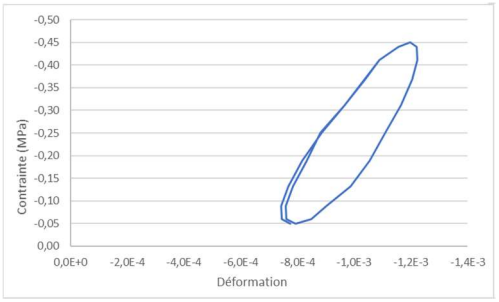
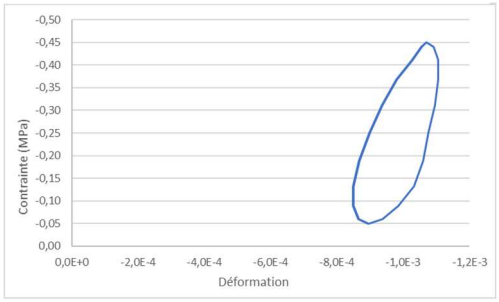
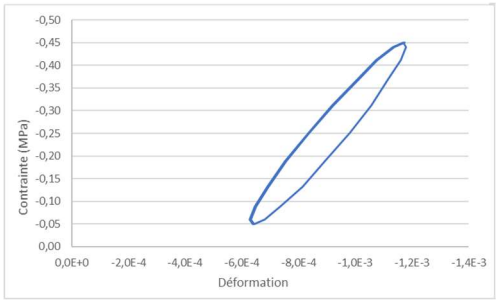
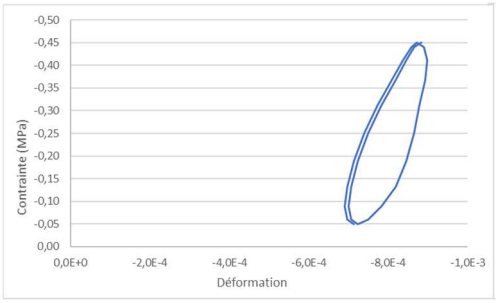
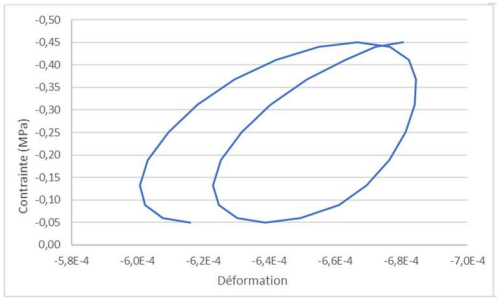
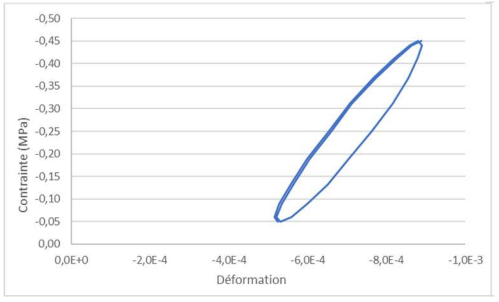
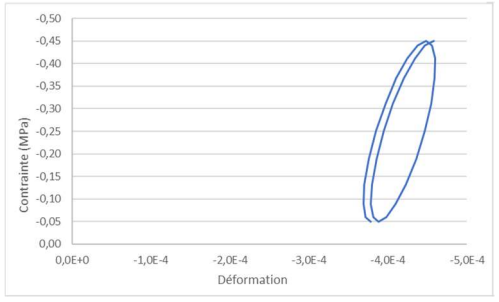
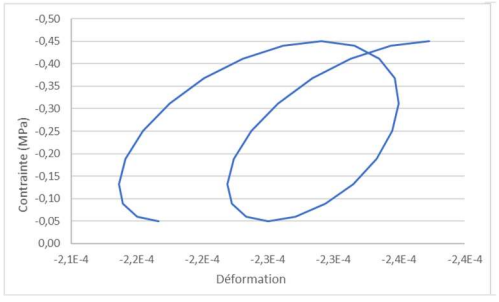
	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}7$
$A = 1$ (seconde)	Module œdométrique = 550 MPa 	Module œdométrique = 836 MPa 	1 545 MPa 
$A = 10$	Module œdométrique = 725 MPa 	Module œdométrique = 1 931 MPa 	4 777 MPa 
$A = 100$	Module œdométrique = 1 068 MPa 	Module œdométrique = 4 396 MPa 	18 730 MPa 

Tableau 32 - Etude paramétrique du modèle VENL 3D pour $\gamma = 0{,}5$.

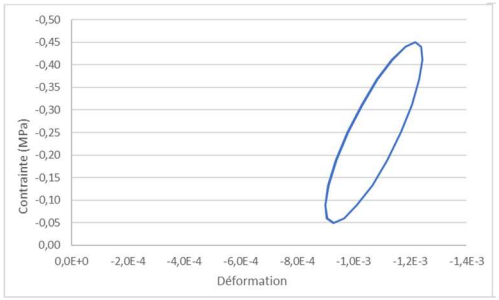
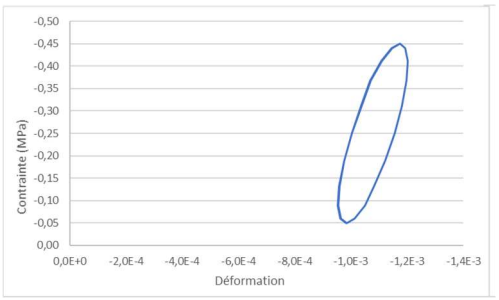
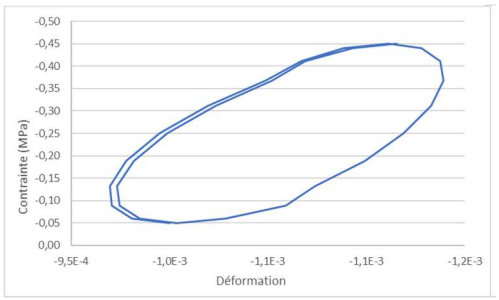
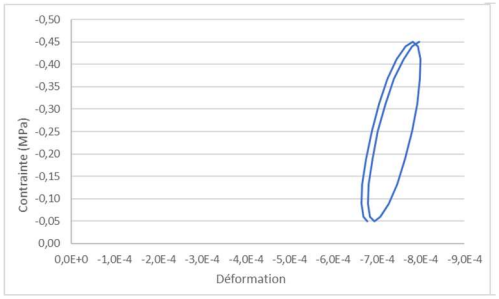
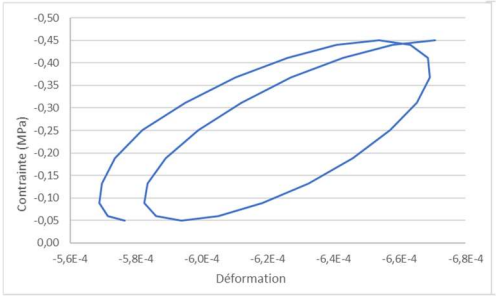
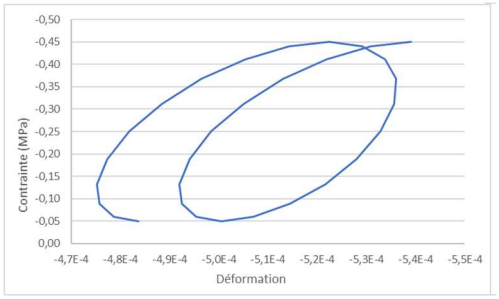
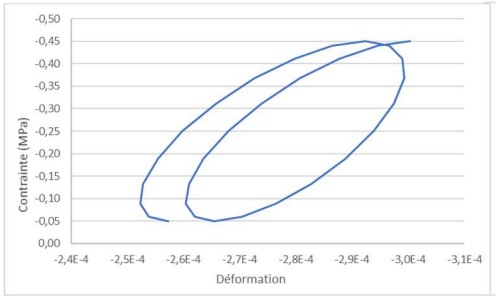
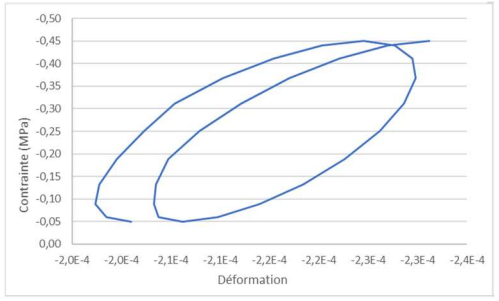
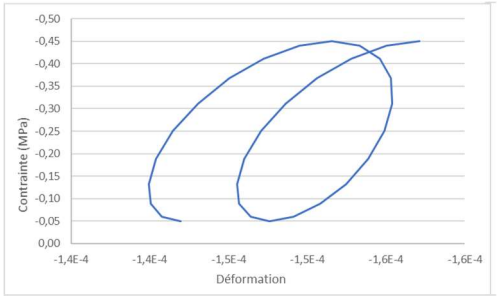
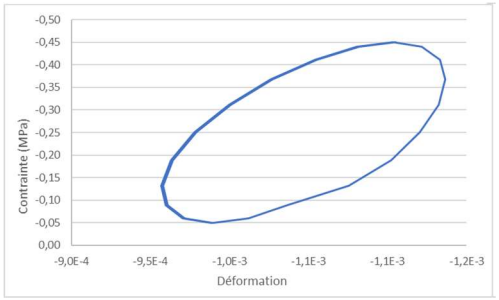
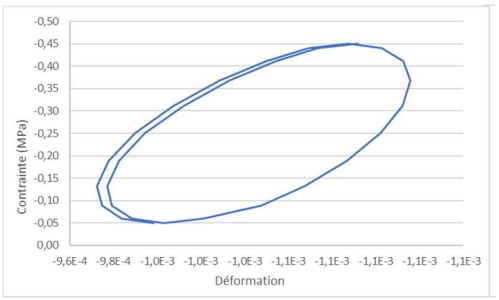
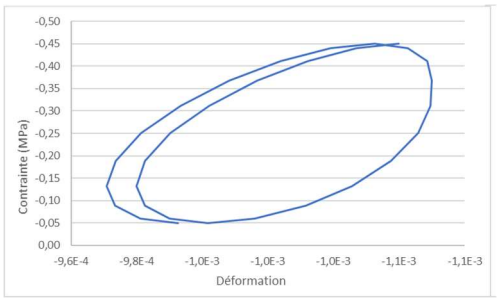
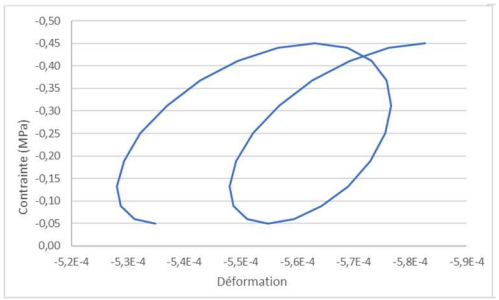
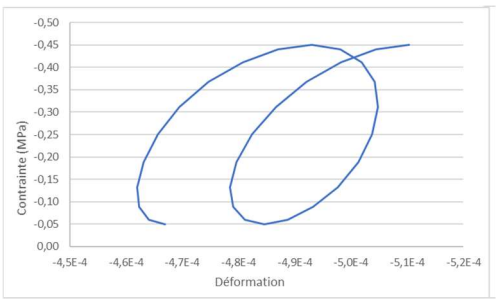
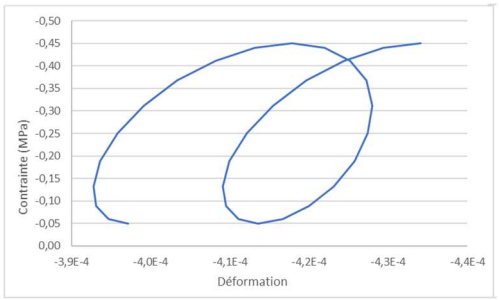
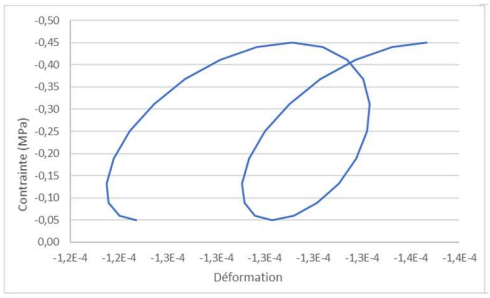
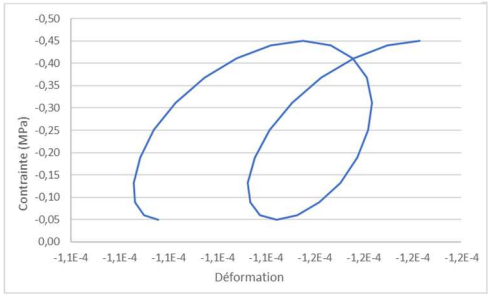
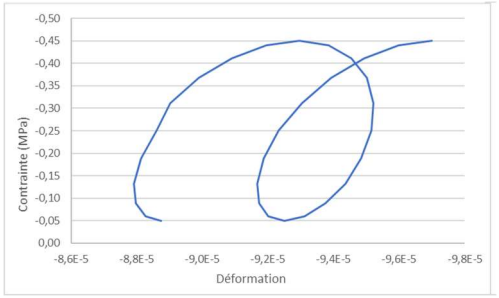
	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}7$
$A = 1$	Module œdométrique = 1 161 MPa 	Module œdométrique = 1 614 MPa 	Module œdométrique = 2 357MPa 
$A = 10$	Module œdométrique = 2 973 MPa 	Module œdométrique = 3 956 MPa 	Module œdométrique = 6 582 MPa 
$A = 100$	Module œdométrique = 8 519 MPa 	Module œdométrique = 12 338 MPa 	Module œdométrique = 25 835 MPa 

Tableau 33 - Etude paramétrique du modèle VENL 3D pour $\gamma = 0{,}7$.

	$\beta = 0{,}2$	$\beta = 0{,}5$	$\beta = 0{,}7$
$A = 1$	Module œdométrique = 2 223 MPa 	Module œdométrique = 2 790 MPa 	Module œdométrique = 4 036 MPa 
$A = 10$	Module œdométrique = 8 245 MPa 	Module œdométrique = 9 324 MPa 	Module œdométrique = 11 357 MPa 
$A = 100$	Module œdométrique = 36 936 MPa 	Module œdométrique = 40 979 MPa 	Module œdométrique = 54 854 MPa 

Il est alors possible de comparer ces courbes aux courbes œdométriques expérimentales obtenues à 20°C, 9 kN et à 1, 3 et 10 Hz sur les éprouvettes mûries à 35 °C , 45 % d'HR pendant 84 jours.

Le travail d'optimisation réalisé a ainsi permis d'obtenir un unique jeu de trois paramètres, indépendant de la fréquence de sollicitation (Tableau 5.34). Les résultats du calage sont illustrés sur la Figure 177, qui montre une assez bonne approximation d'ensemble du comportement viscoélastique du matériau.

Tableau 34 - Valeurs des paramètres du modèle VENL 3D obtenues après calage avec coefficient δ imposé, égal à 1.

A (s)	γ (MPa)	β (MPa)
160	0,25	0,4

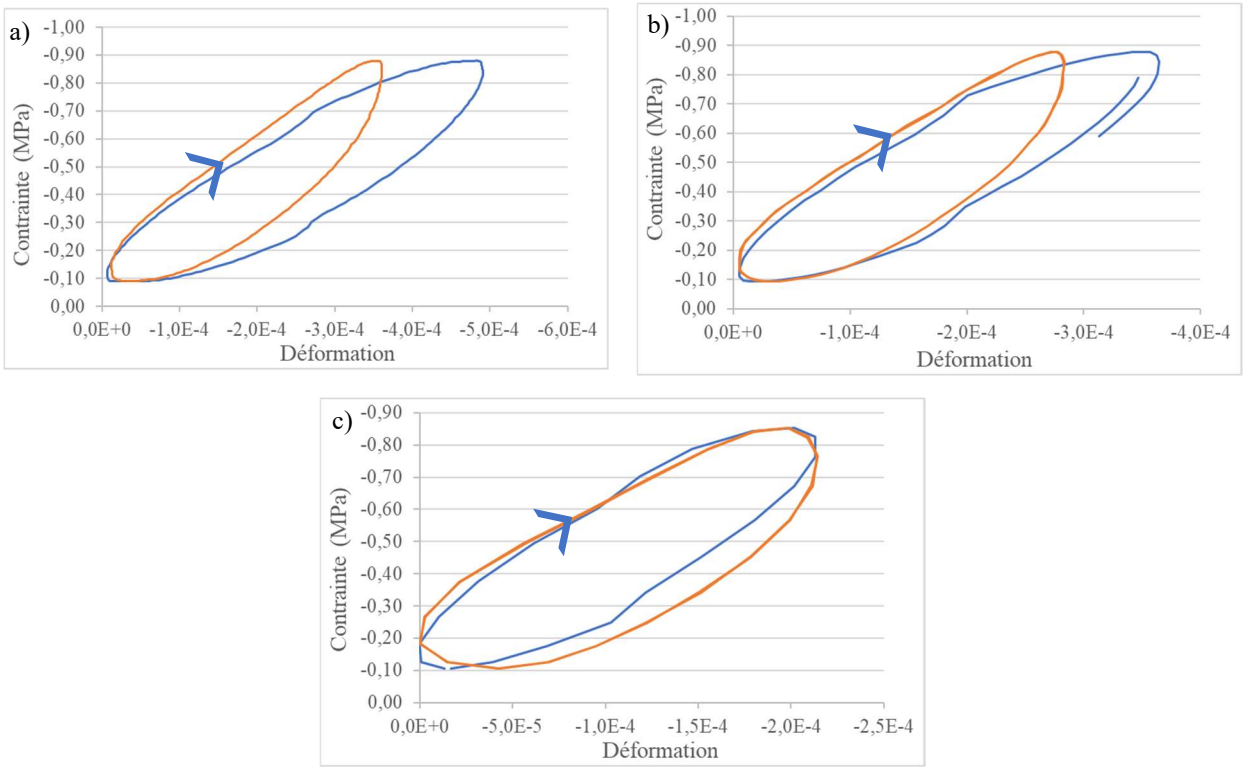


Figure 177 – Calage des cycles de chargement pour un mûrissement de 84 jours à 35 °C et 45 % d'HR. Essais œdométriques à 20 °C et 9 kN a) Eprouvette 4 à 1 Hz b) Eprouvette 4 à 3 Hz c) Eprouvette 4 à 10 Hz. Données de calage Tableau 5.34.

On observe *a posteriori* que l'on obtient deux exposants γ, δ distincts pour les fonctions de fluage volumique et déviatorique, qui traduisent de façon non surprenante un comportement relatif du matériau plus élastique en déformation (contraction) isotrope qu'en déformation de glissement. (Pour rappel, plus l'exposant de fluage est petit, plus le matériau se rapproche d'un comportement élastique, associé à un exposant nul). Ceci remet donc en question la valeur de δ choisie et sa constance ; on y revient plus loin.

En restant dans le présent cadre d'interprétation des essais, intéressons-nous plus particulièrement pour l'instant aux valeurs A obtenues, lorsque la procédure de calage précédente est appliquée plus

largement à l'ensemble des mesures œdométriques réalisé aux différents stades de mûrissement du matériau. On dispose déjà de la valeur A = 160 s pour l'éprouvette mûrie à 35 °C pendant 84 jours et testée à 20 °C.

V.4.3. Fonction $A(\theta_{actuelle}, \mathrm{d}_{mûr})$ de mûrissement et de sensibilité à la température actuelle - Hypothèses pour sa modélisation

L'introduction de la fonction A dans les fonctions de fluage du matériau généralise le principe d'équivalence temps-température utilisé avec succès dans le cas des enrobés à chaud, afin de rendre compte de la forte sensibilité à la température de la viscosité des liant bitumineux. Dans le domaine temporel, ce principe consiste à dire que le comportement en fluage des enrobés bitumineux est globalement fonction de la variable $t/a(\theta)$ avec :

- $t =$ temps physique.
- $a(\theta)$ = fonction de « translation en température » (actuelle) du matériau.

Les fonctions $a(\theta)$ identifiées expérimentalement (sur la base par exemple de campagnes de mesures de module complexe sur EB réalisées à différentes températures et fréquences) sont trouvées fortement décroissantes avec la température, traduisant par là-même la forte diminution de viscosité des liants avec la température. Ces fonctions sont ainsi généralement proches de la forme d'une exponentielle décroissante et peuvent être représentées, par exemple, par la loi de Williams-Landel-Ferry [60] :

$$\log\ a(\theta) = \frac{-C_1(\theta-\theta_{ref})}{C_2+(\theta-\theta_{ref})} \qquad \text{Equation 210}$$

avec θ_{ref}= température de référence pour laquelle on souhaite imposer $a(\theta_{ref}) = 1$, C_1, C_2 constantes réelles (de signes, fonction du choix de la température de référence).

A nature de liant fixée, il a par ailleurs été observé que les fonctions $a(\theta)$ identifiées sur liant seul ou sur les EB constitués de ce liant étaient quasi-identiques, montrant le caractère fortement héréditaire entre liant et EB des propriétés de thermo-susceptibilité [61].

Dans notre étude, cette approche est étendue à 2 variables, l'une étant la température actuelle $\theta_{actuelle}$, l'autre la variable $d_{mûr}$ que nous appellerons « degré de mûrissement » , afin de rendre non seulement de la thermo-susceptibilité de la phase bitumineuse des liants d'émulsion, mais aussi du mûrissement des graves émulsion. On note ainsi $A(\theta_{actuelle}, d_{mûr})$ la fonction obtenue, en s'attendant à ce que celle-ci décroisse avec la température, mais augmente avec $d_{mûr}$.

De ce fait, nous allons tester dans le cadre de cette thèse, l'hypothèse d'une factorisation de A sous la forme :

$$A(\theta_{actuelle}, \mathrm{d}_{mûr}) = a(\theta_{actuelle})\ \mathrm{d}_{mûr}(t_{âge}, \theta_{mûrissement}) \qquad \text{Equation 211}$$

avec :

- $a(\theta_{actuelle})$ = fonction « temps-température » au sens usuel des liants ou enrobés bitumineux à chaud.
- $t_{âge} = t - t_{fab}$ = âge actuel du matériau, défini à partir de sa date de fabrication.

Cette équation fournit alors sous réserve de sa validation expérimentale, une définition précise de $d_{mûr}$, qui n'est rien d'autre que le ratio A/a , ces 2 quantités étant elles mesurables.

A priori $d_{mûr}$ peut elle-même être considérée de manière générale comme une fonctionnelle

- $d_{mûr}(t_{âge}, \{\theta\}, \{w\})$.

de l'âge du matériau et des historiques de température et d'humidité relative

- $\{\theta\}: t_{âge} \rightarrow \theta(t_{âge})$ et $\{w\}: t_{âge} \rightarrow w(t_{âge})$.

entre les instants $t = t_{fab}$ et $t = t_{âge}$.

L'expression d'une telle fonctionnelle $d_{mûr}(t_{âge}, \{\theta\}, \{w\})$ pourrait être recherchée en s'inspirant par exemple du travail de Doyle [50] qui rend compte de l'accélération du processus de mûrissement avec la température.

Toutefois dans le cadre de cette première étude, en « négligeant » l'effet d'humidité relative et en profitant du fait que les campagnes de mûrissements ont été réalisées à température constante :

- $\{\theta\}: t_{âge} \rightarrow \theta(t_{âge}) = \theta_{mûrissement}, \forall\, t_{âge}$.

il est possible de simplifier le problème et de se ramener à la recherche de la fonction moins générale à deux variables $d_{mûr}(t_{âge}, \theta_{mûrissement})$ figurant dans l'équation 5.210 .

En supposant A nulle à l'instant initial et croissante à la fois avec le temps et la température de mûrissement (à température actuelle donnée), on déduit les propriétés suivantes attendues pour une telle fonction $d_{mûr}$:

- $d_{mûr}(t_{âge} = 0, \theta_{mûrissement}) = 0$, $\forall \theta_{mûrissement}$.
- $\frac{\partial d_{mûr}}{\partial t_{âge}} \geq 0$.
- $\frac{\partial d_{mûr}}{\partial \theta_{mûrissement}} \geq 0$.

Dans la section suivante, nous allons donc chercher à identifier plus largement les valeurs expérimentales de A et à tester à partir de celles-ci les hypothèses émises ici.

V.4.4. Fonction $A(\theta_{actuelle}, d_{mûr})$ de mûrissement et de sensibilité à la température actuelle – Identification de ses valeurs expérimentales

Intéressons-nous en premier aux valeurs de A obtenues aux différents âges du matériau mûri à 35°C et 45% d'HR, en nous limitant aux résultats des essais œdométriques effectués à 20°C. Du reste, nous choisissons dans la suite cette valeur de 20°C comme température de référence de la fonction $a(\theta_{actuelle})$, si bien que par construction et sans restriction particulière, $a(20\,°C) = 1$, soit encore $A(20°C, d_{mûr}) = d_{mûr}(t_{âge}, \theta_{mûrissement})$.

L'identification des différentes valeurs de A en fonction des temps de mûrissement est effectuée comme montré dans le cas des essais à 84 jours en recherchant le meilleur ajustement en termes de module et déphasage entre les cycles œdométriques contrainte/déformation simulés et les cycles expérimentaux.

Le Tableau 35 présente les résultats ainsi obtenus pour la fonction $A(20°C, d_{mûr})$ ou ce qui revient au même ici pour la fonction « degré de mûrissement » $d_{mûr}(t_{âge}, 35°C)$, aux dix âges de mûrissement sondés au cours de cette campagne.

Tableau 35 - Evolution du paramètre A pour le mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR.

Mûrissement (jour)	2	4	7	9	11	21	43	64	78	84
$d_{mûr}(t_{âge}, 35°C) = A(20°C, d_{mûr})$	0,95	3,7	7	12	21	40	80	130	160	160

Le même travail a été effectué sur la campagne de mûrissement effectuée à 15°C et 45% d'HR et les essais œdométriques à 20°C.

Le Tableau 36 présente l'évolution de A obtenue dans ce cas.

Tableau 36 - Evolution du paramètre A pour le mûrissement à 15 °C et 45 % d'HR.

Mûrissement (jour)	2	4	7	9	21	43	64	78	84
$d_{mûr}(t_{âge}, 15°C) = A(20°C, d_{mûr})$	0,45	2,3	2,9	6,5	17	42	56	63	62

L'ensemble des résultats est présenté sur la Figure 178 sous forme de courbes d'évolution temporelle de $d_{mûr}$. Celles-ci revêtent une croissance quasi-linéaire se terminant par des paliers horizontaux, indiquant *a priori* la fin des processus de mûrissement pour les conditions expérimentales testées. Comme attendu, la cinétique de mûrissement est plus élevée à 35 qu'à 15°C. De façon moins intuitive par contre, on observe des valeurs paliers atteintes à 35 et 15°C fortement différentes l'une de l'autre, pouvant indiquer que la température de mûrissement ne joue pas seulement sur la cinétique d'évolution des liants des GE, mais aussi sur la nature même des réactions physico-chimiques ou leur nombre, activées au sein de ces matériaux.

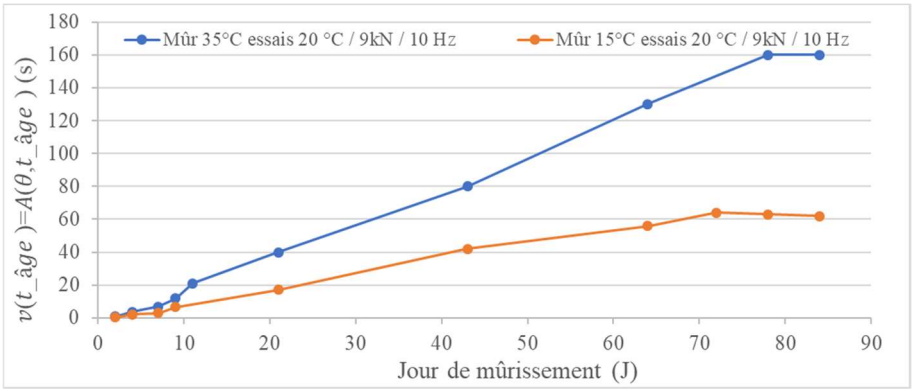


Figure 178 - Evolutions des degrés de mûrissement $d_{mûr}(t_{âge}, 35\ °C)$ et $d_{mûr}(t_{âge}, 15\ °C)$ en fonction de l'âge du matériau.

V.4.4.1. Identification de la fonction $a(\theta_{actuelle})$

Toujours dans l'hypothèse de factorisation de la fonction A, déterminons à présent les valeurs et l'évolution de la fonction $a(\theta_{actuelle})$ en élargissant la base de résultats aux différentes températures d'essais œdométriques et aux différents âges et températures de mûrissement.

A température et âge de mûrissement donnés et donc à valeur $d_{mûr}$ fixée, nous avons d'après notre hypothèse de factorisation :

$$a(\theta_{essai}) = A(\theta_{essai}, d_{mûr})/A(20\ °C, d_{mûr}) = A(\theta_{essai}, d_{mûr})/d_{mûr}$$

en notant θ_{essai} la température des essais œdométriques.

Les Tableau 37 et Tableau 38 présentent les valeurs expérimentales de $a(\theta_{essai})$ ainsi déterminées par comparaison des essais œdométriques réalisés aux températures de 15, 20 et 35 °C aux divers âges de mûrissement des échantillons mûris à 35 et 15 °C. Les tableaux sont complétés de la valeur de référence $a(\theta_{essai}) = 1$ à 20 °C.

Tableau 37 – Valeurs expérimentales de $a(\theta_{essai})$ en fonction de la température d'essai œdométrique pour un mûrissement à 35 °C.

Age mûrissement $t_{âge}$ (Jour)	Température d'essai œdométrique θ_{essai}(°C)	A (s)	$a(\theta_{essai}) = A(\theta_{essai}, t_{âge})/A(20°C, t_{âge})$
7	20	7	1,0
7	35	1,4	0,2
21	15	52	1,3
21	20	40	1,0
21	35	7	0,2
72	15	150	1,4
72	20	110	1,0
72	35	25	0,2

Tableau 38 - Valeurs expérimentales de $a(\theta_{essai})$ en fonction de la température d'essai œdométrique pour mûrissement à 15 °C.

Age mûrissement $t_{âge}$ (jour)	Température d'essai œdométrique θ_{essai}(°C)	A (s)	$a(\theta_{essai}) = A(\theta_{essai}, t_{âge})/A(20°C, t_{âge})$
7	15	3,8	1,3
7	20	2,9	1,0
7	35	0,9	0,3
21	15	24	1,4
21	20	17	1,0
21	35	1,9	0,1
72	15	83	1,3
72	20	64	1,0
72	35	6	0,1

La Figure 179 représente l'ensemble des valeurs a obtenues en fonction de la variable θ_{essai}.

Nous observons alors que celles-ci sont quasi indépendantes des valeurs $t_{âge}$ et $\theta_{mûrissement}$, ce qui vient confirmer avec une bonne approximation notre hypothèse de factorisation de A et d'indépendance des propriétés de thermo-susceptibilité des liants de GE vis-à-vis de leur degré de mûrissement.

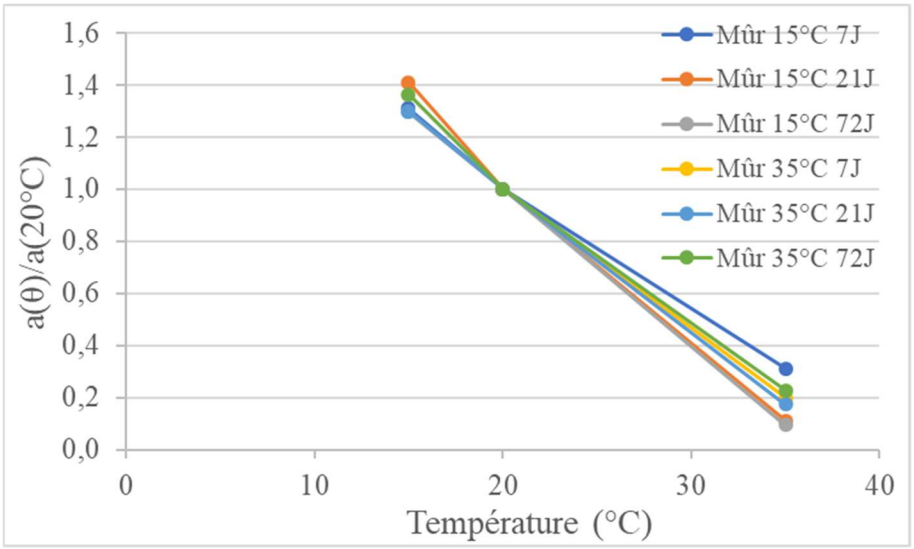


Figure 179 - Evolution du paramètre A en fonction de la température d'essai.

La Figure 180 montre qu'il est possible par ailleurs de trouver un bon ajustement de la fonction $a(\theta)$ par la loi WLF [60] :

$$\log a(\theta) = \frac{-C_1(\theta-20)}{C_2+(\theta-20)} \text{ avec } C_1 = -1{,}05 \text{ et } C_2 = -36{,}49 \qquad \text{Equation 212}$$

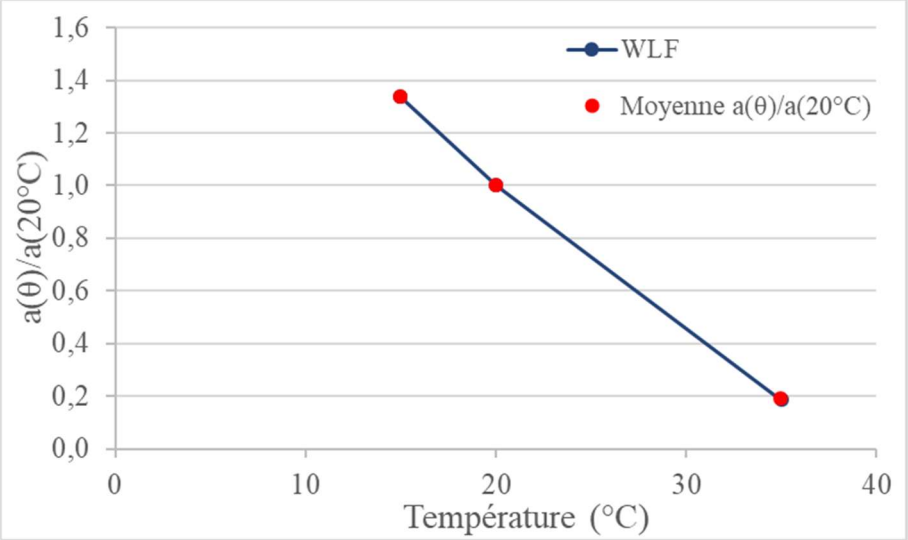


Figure 180 – Calage de la variation de $a(\theta)$ normalisé avec la température d'essai.

Nous venons de caler dans cette partie les différents paramètres du modèle VENL 3D avec l'hypothèse $\delta = 1$.

Nous reprenons dans la partie suivante cette étude en permettant au paramètre δ de varier, sachant que ce coefficient joue le rôle d'un pseudo-coefficient de Poisson intervenant dans la « répartition » des effets volumiques et déviatoriques, connus dans le cas des enrobés à chaud comme étant variables en fonction des conditions d'essai (ex : sous sollicitation cyclique, le coefficient de Poisson des EB à chaud est trouvé variable en fonction de la température et de la fréquence d'essai). On traite donc dans la suite δ comme un paramètre de calage variable, à déterminer expérimentalement, au même titre que A.

V.4.5. Calage des paramètres viscoélastiques à valeur δ variable

La démarche d'étude et notamment d'identification des paramètres est la même que précédemment. Elle s'appuie sur la constitution d'un nouvel ensemble de courbes œdométriques simulées, calculées par VENL 3D, où sont variées A et δ, tout en fixant les valeurs des exposants des fonctions de fluage à celles trouvées précédemment ($\gamma = 0{,}25$ $\beta = 0{,}4$). On étend par ailleurs cette étude paramétrique et l'examen détaillé des courbes expérimentales, à la prise en compte de l'effet « fréquence » des essais œdométriques, qui précédemment avait été gardé constant en ne regardant que les essais effectués à 10 Hz.

On détermine alors les valeurs expérimentales de A et δ à partir des meilleurs ajustements trouvés entre cycles œdométriques calculés et mesurés.

A titre d'exemple la Figure 181 illustre le meilleur calage obtenu sur les cycles œdométriques expérimentaux, effectués à 20 °C, 9kN, à 1, 3 et 10Hz sur les éprouvettes mûries à 35 °C, 45% d'HR, 84 jours. On observe un bon accord essais/modèle pour les 3 fréquences. Le jeu de paramètres correspondant est celui du Tableau 39. En particulier la valeur de δ est trouvée ici égale

à 0,54, ce qui entraine aussi une modification de la valeur de A par rapport à celle obtenue précédemment pour $\delta = 1$.

Tableau 39 – Exemple de valeurs des paramètres du modèle VENL 3D incluant le calage de δ.

A	δ	γ (MPa)	β (MPa)
59	0,54	0,25	0,4

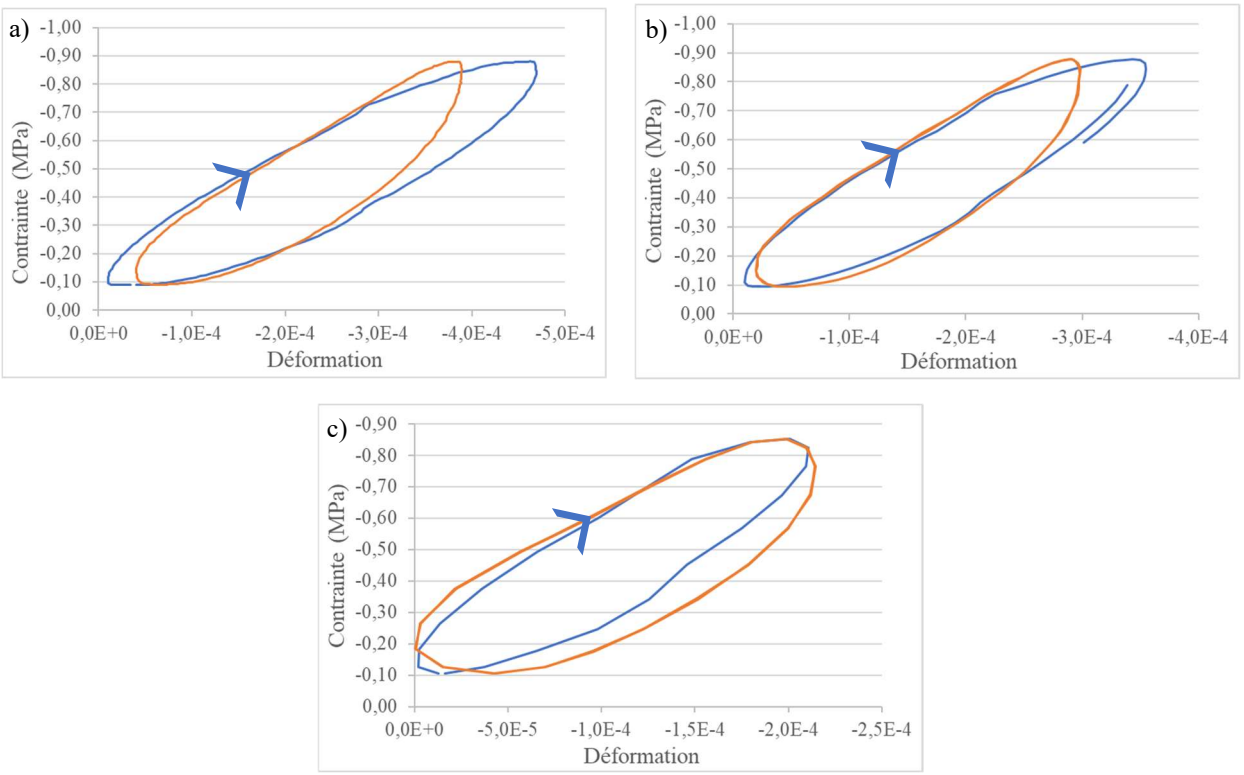


Figure 181 – Calage à δ libre des cycles de chargement pour un mûrissement de 84 jours à 35 °C et 45 % d'HR. Essais œdométriques à 20 °C et 9 kN a) Eprouvette 4 à 1 Hz b) Eprouvette 4 à 3 Hz c) Eprouvette 4 à 10 Hz. Données de calage Tableau 39.

V.5. Fonction $\delta(\theta_{actuelle}, \mathrm{d}_{mûr})$ de mûrissement et de sensibilité à la température actuelle

Réappliquons à δ l'hypothèse de factorisation utilisée pour A, en utilisant la même fonction $a(\theta_{actuelle})$ de thermo-susceptibilité du liant, mais en introduisant une nouvelle variable « degré de mûrissement » notée $\delta_{mûr}$, soit :

$$\delta(\theta_{actuelle}, \delta_{mûr}) = a(\theta_{actuelle})\ \delta_{mûr}(t_{âge}, \theta_{mûrissement}) \qquad \text{Equation 213}$$

Les résultats expérimentaux utilisés pour ce calage proviennent d'essais réalisés à 9 kN, 10 Hz et 20 °C avec un mûrissement réalisé à 35 °C et 45 % d'HR. Les Tableau 40, Tableau 40 présentent les valeurs $\delta_{mûr}$ et les nouvelles valeurs $d_{mûr}$ obtenues par calage des campagnes de mûrissement effectuées à 35 °C et 45 % d'HR et 15 °C et 45 % d'HR.

Tableau 40 - Evolution de $d_{mûr}$ et $\delta_{mûr}$ pour le mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR.

Mûrissement (jour)	2	4	7	9	21	43	64	78	84
$d_{mûr}$	0,95	2,85	4,98	8,47	23,74	45,38	51,80	53,15	58,74
$\delta_{mûr}$	1,00	0,85	0,79	0,73	0,62	0,56	0,55	0,55	0,54

Tableau 41 - Evolution de $d_{mûr}$ et $\delta_{mûr}$ pour le mûrissement à 15 °C et 45 % d'HR.

Mûrissement (jour)	2	4	7	9	21	43	64	72	84
$d_{mûr}$	0,49	1,75	2,58	4,66	9,88	11,43	21,32	29,08	31,01
$\delta_{mûr}$	1,11	0,92	0,87	0,79	0,71	0,69	0,63	0,60	0,59

Les évolutions temporelles correspondantes de la fonction $\delta_{mûr}$ sont représentées sur la Figure 182. Celles-ci sont croissantes avec le temps et montrent une cinétique plus élevée à 35 qu'à 15 °C. Les effets de palier aux alentours des 84 jours sont moins marqués que sur $d_{mûr}$ et il est donc plus difficile de se prononcer sur une différence d'asymptote à long terme.

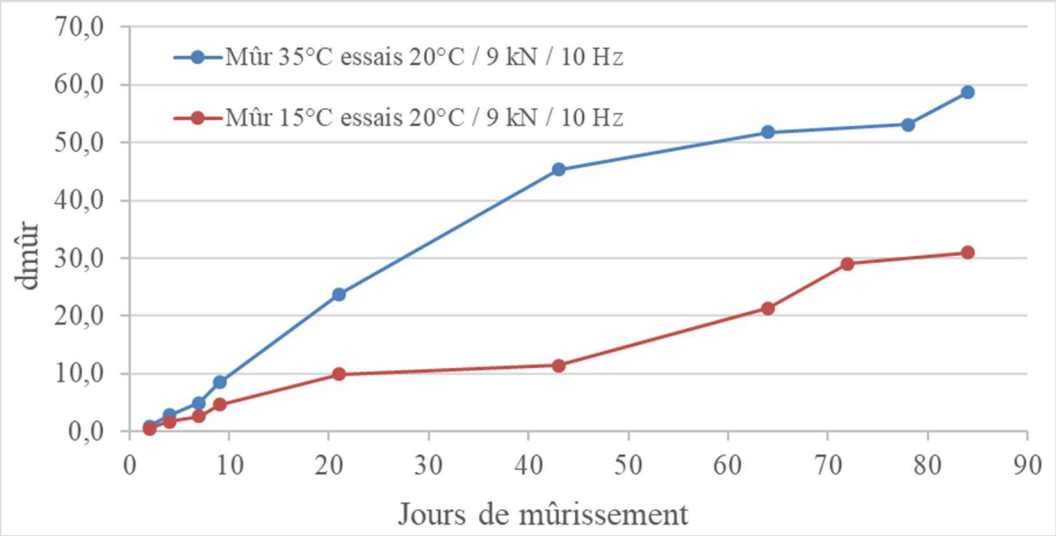


Figure 182 - Evolution de $\delta_{mût}$ avec le mûrissement.

V.6. Conclusion

Ce chapitre a permis d'exposer les principaux résultats expérimentaux tirés de nos campagnes de mûrissement et de les confronter, plutôt avec succès, aux propriétés du modèle VENL 3D, confortant par là même la phénoménologie sous-tendue dans sa construction.

Les stratégies de calage des paramètres adoptées ici ont montré leur efficacité, même si des voies d'amélioration restent possibles.

Nous avons ainsi observé que la réponse du matériau au jeune âge était essentiellement caractérisée par un comportement élastique non linéaire (forme convexe des courbes de montée en charge des

cycles œdométriques, comportement peu dépendant de la fréquence mais dépendant de la force) pour évoluer vers un comportement principalement viscoélastique (cycles de chargement elliptiques, dépendant de la fréquence et de la température).

Nous avons vu que les propriétés évolutives du matériau en fonction de son âge (mûrissement) et que ses propriétés thermo-susceptibles étaient factorisables, ce qui est source de simplifications intéressantes pour l'étude de ces matériaux.

L'identification de la fonction de mûrissement $d_{mûr}$ montre un fait important : l'existence à long terme de seuils de maturité, fonction des conditions de mûrissement. Ainsi un matériau mûri à 20°C ne pourra jamais, même à long terme, réussir à atteindre les niveaux de performance (en rigidité) d'un matériau mûri à 35 °C (cf. Figure 142). Il conviendra dans le futur d'approfondir ce point et de rechercher des modèles généraux d'évolution du mûrissement, permettant de tenir compte non seulement d'historiques de température non nécessairement constants (cf. périodes été/hiver), mais aussi d'intégrer la variable « humidité » également hautement variable en conditions *in situ*.

Chapitre VI. Conclusion

Les graves émulsions sont des matériaux largement utilisés en France en technique routière, pour l'entretien des chaussées à faible trafic, car elles font preuve d'un bon comportement mécanique, résistant au temps. Leur mode de fabrication à froid leur confère de surcroit d'intéressantes propriétés environnementales, particulièrement recherchées aujourd'hui. Ceci conduit à se poser la question de la possibilité d'étendre le domaine d'emploi des graves émulsions aux chaussées à moyen ou fort trafics, sous forme de couches structurelles introduites dès la conception. Le cas échéant, des règles de dimensionnement de telles structures devront être édictées en fonction des trafics à supporter.

Cette thèse, l'une des premières avec cette finalité, a comme premiers objectifs la caractérisation en laboratoire du comportement mécanique évolutif des graves émulsions et l'élaboration d'un modèle, susceptible, tel quel ou sous forme simplifiée, d'être introduit plus tard au sein d'une méthode de dimensionnement des chaussées.

Compte tenu du faible nombre de travaux trouvés dans la bibliographie sur le sujet, notre étude s'est focalisée sur les effets mécaniques de premier ordre, à savoir les déformations réversibles.

La première partie de la thèse (chapitres II et III) porte sur le développement du modèle, initié dès le début de thèse, en l'absence des résultats expérimentaux obtenus par la suite.

De manière générale le modèle a été conçu pour rendre compte d'une évolution continue entre :

- Un comportement de type élastique non linaire, caractéristique des graves non traitées et donc représentatif *a priori* des graves émulsions au très jeune âge.
- Et un comportement de type thermo-viscoélastique linéaire, représentatif du comportement des enrobés et donc des graves émulsions à l'état mûri.

La « synthèse » entre les deux types de comportement est effectuée au travers de leurs décompositions spectrales respectives, qui conduisent à introduire des spectres d'éléments à trois branches constituées de ressorts, butées et amortisseurs linéaires. Dans ce modèle, le mûrissement et la thermo-sensibilité du matériau sont considérés comme uniquement liés à des variations proportionnelles entre elles, de viscosité des amortisseurs.

Dans un premier temps (chapitre II), le modèle a été développé et numérisé en 1D afin de mieux en asseoir ses bases et son potentiel. Le modèle (chapitre III) a ensuite été tensorialisé en hypothèse isotrope, en considérant ses deux composantes volumique et déviatorique. La construction du modèle s'appuie sur la loi de Boyce pour la partie élastique non linéaire et sur la donnée de deux fonctions de fluage volumique et déviatorique, indépendantes et à évolution parabolique pour la partie viscoélastique. Le modèle obtenu (VENL3D) se compose au final de deux spectres volumique et déviatorique d'éléments en série, à trois branches, construits suivant les principes du modèle 1D. Le caractère non linéaire de la loi de Boyce entraine toutefois un couplage des deux composantes. Le modèle a été numérisé pour son utilisation pratique.

La seconde partie (chapitres IV et V) de la thèse est dédiée à la partie expérimentale du travail.

Un protocole d'essais a été défini, consistant à faire mûrir des éprouvettes de grave émulsion pendant plusieurs semaines, à différentes températures, maintenues constantes et à intercaler en des petits pas de temps au début, plus grands vers la fin, de courtes campagnes de mesures de type « module complexe », effectuées en condition œdométrique et pour différents jeux de fréquences, températures et amplitudes de sollicitation.

Ceci nous a conduit dans une première étape du volet expérimental à concevoir et mettre au point l'essai œdométrique (chapitre IV), qui présente l'intérêt de pouvoir tester les graves émulsions dès leur plus jeune âge, à leur état non encore ou peu cohésif. Les tests de validation du dispositif sur des matériaux connus comme le BBSG et le Delrin® ont montré la pertinence et le degré de précision des résultats mesurés.

Nous avons alors pu mettre en œuvre le protocole expérimental d'ensemble, visé, sur des éprouvettes de grave émulsion conservées, muries et testées tout du long de la campagne d'essais, dans leurs moules œdométriques afin d'éviter des remaniements de matériau.

Nous avons ainsi pu dresser une vaste base de données de valeurs de module œdométrique, fonction :

- De la formulation des graves émulsions testées.
- Des températures, humidités et temps de mûrissement des matériaux.
- Des fréquences, températures et amplitudes de sollicitation des essais œdométriques eux-mêmes.

L'analyse de ces mesures, réalisée dans le dernier chapitre (chapitre V), confirme *a posteriori* le bien-fondé des hypothèses considérées dans la construction de la loi de comportement des graves émulsions.

On constate ainsi au jeune âge, comme attendu, un comportement essentiellement de type élastique non linéaire (accompagné d'une certaine hystérésis due au petit nombre de cycles de chargement), avec des valeurs de module relativement faibles et peu sensibles aux changements de fréquence et température des essais œdométriques.

On mesure par la suite une augmentation régulière du module des éprouvettes en fonction du temps de mûrissement, avec une dépendance de plus en plus forte aux conditions d'essais œdométriques, identique en grande part à celle observée sur les enrobés bitumineux fabriqués à chaud. Le mûrissement des graves émulsions se traduit donc bien essentiellement, comme anticipé, par une augmentation de viscosité du liant (à température donnée).

La comparaison entre les diverses éprouvettes de la campagne d'essais montre par ailleurs que cet accroissement des propriétés mécaniques des graves émulsions croit avec la température de mûrissement. En même temps, il est intéressant d'observer que les valeurs « asymptotiques » dans le temps du module des enrobé à l'émulsion (sous conditions de fréquences et températures fixées) dépendent de la température de mûrissement. Plus celle-ci est élevée, plus les valeurs asymptotiques de module sont élevées. Ceci pourrait signifier non seulement une accélération des vitesses de réaction chimique s'opérant dans le liant avec la température, mais aussi l'activation d'un plus grand nombre de ces réactions avec la température.

Au contraire, l'influence de l'humidité de mûrissement semble influer sur la cinétique de mûrissement, mais pas sur l'asymptote finale des valeurs de module.

En plus de l'enrobé à l'émulsion, nous avons voulu voir les résultats d'essais œdométriques sur un matériau à l'émulsion de bitume intégrant 100% d'agrégats d'enrobé. Ce matériau a seulement été étudié lors d'un essai de mûrissement en température. Nous avons pu constater que son module œdométrique évoluait mais de façon moins importante que pour un enrobé à l'émulsion « classique ». En revanche, ses performances mécaniques étaient bien plus élevées.

En dernière partie de thèse (fin du chapitre V), nous avons confronté le modèle VENL3D à l'ensemble des résultats expérimentaux.

Nous avons réussi à identifier facilement les paramètres du modèle ENL 3D à partir des résultats expérimentaux au jeune âge du matériau ainsi que les paramètres complémentaires du modèle VENL 3D à partir des essais sur matériau fortement mûri. A partir de ces paramètres, nous avons pu vérifier que les résultats expérimentaux obtenus aux états intermédiaires de mûrissement pouvaient être convenablement calés à partir de la seule détermination des variables A et δ. Nous avons présenté différents types de calage possible de ces deux paramètres en factorisant A soit par un seul paramètre prenant en compte l'effet couplé de l'humidité et de la température soit en utilisant deux facteurs, l'un dépendant de l'humidité et l'autre de la température. Un autre facteur de la fonction A est la dépendance à la température d'essai $a(\theta)$ que nous avons réussi à identifier grâce à la loi Williams Landel Ferry.

A mûrissement donné, l'une des preuves de pertinence du modèle est de rendre correctement compte du déphasage expérimental entre contrainte et déformation, trouvé croissant en fonction de la fréquence au cours des essais œdométriques.

Nos travaux ont donc permis d'atteindre en grande partie les objectifs assignés initialement au sujet de thèse, en débouchant sur la construction d'une loi de comportement évolutive des graves émulsions et un jeu de paramètres numériques associé, en bonne adéquation avec la réponse réelle de ces matériaux sous sollicitation mécanique et les phénomènes physiques macroscopiques qui gouvernent leur comportement.

Il reste toutefois un certain nombre d'étapes à franchir pour aller vers un dimensionnement de chaussée intégrant des couches structurelles d'enrobé à l'émulsion.

La première est sans doute d'intégrer la loi VENL3D, sous sa forme présente ou sous une forme simplifiée à définir, au sein d'un code aux éléments finis de façon à déterminer les champs et les chemins de déformation (réversible) et de contrainte, susceptibles de se développer dans une chaussée avec grave émulsion structurante, soumise aux effets d'un trafic routier et de conditions environnementales variables. Ces calculs seront à effectuer à différents stades de mûrissement du matériau, afin d'évaluer les modifications de fonctionnement de la chaussée en fonction de son âge.

Dans un second temps, ces champs seront à analyser afin de déterminer les risques d'endommagement à long terme de telles chaussées. On examinera au sein de celles-ci :

- Le cas des matériaux usuels (sol, GNT, EB à chaud...) pour lesquels les mécanismes de dégradation, sous l'effet de contraintes ou déformations répétées sont déjà identifiés et quantifiés au travers de critères connus,
- Le cas des couches de grave émulsion elles-mêmes, pour lesquelles on ignore encore le(s) mode(s) de fatigue.

Pour ces dernières, on pourra notamment représenter les chemins de déformation ou de contrainte dans les plans usuels de la Mécanique des Milieux Continus, connus comme permettant de cerner le fonctionnement local de la matière au sein d'une structure (ex : plans $(p, q), (\varepsilon_v, \varepsilon_q)$ largement utilisés dans cette thèse, plans de Mohr en déformations ou en contraintes, etc.).

En troisième étape, on pourra alors revenir à un travail expérimental, destiné à étudier le(s) mode(s) d'endommagement des enrobés à l'émulsion sous sollicitations répétées et à formuler pour ceux-ci des critères de « fin de vie ». Pour ce faire, les résultats de l'étape 2 décrite ci-dessus permettront de préciser les besoins ou non de développer un nouvel essai et permettront dans tous les cas (reprise d'un essai existant ou développement de nouvel essai) de déterminer les sollicitations mécaniques à exercer, les plus appropriées, en relation avec le comportement attendu des infrastructures à construire.

La réalisation d'ensemble d'un tel programme devrait au final permettre de déboucher sur une méthode de dimensionnement pour chaussée avec grave émulsion structurante, accompagnée d'une méthode de caractérisation de ces matériaux en laboratoire, en 2 volets : l'un portant sur leur comportement réversible évolutif, l'autre sur leur critère d'endommagement sous charges répétées.

Bibliographie

[1] DRCR, SETRA, and LCPC, “Catalogue des nouvelles structures de chaussée,” 1971.

[2] SETRA and LCPC, “Catalogue des nouvelles structures de chaussée,” 1977.

[3] SETRA and LCPC, “Conception et dimensionnement des structures de chaussée,” 1994.

[4] Y. Brosseaux, “Warm asphalt - overview in France,” *Warm-mix Asph. Int. Conf. Nashville, USA*, 2008.

[5] AFNOR, “Norme XP P 18-540 : Granulats - définitions, conformité, spécifications,” 1997.

[6] AFNOR, “Norme NF P 18-573 - Granulats - essai Los Angeles,” 1990.

[7] AFNOR, “Norme NF P 18-572 : Granulats - essai d’usure micro-Deval,” 1990.

[8] AFNOR, “Norme NF P 18-575 : Granulats - mesure de la rugosité d’une surface à l’aide du pendule de frottement,” 1990.

[9] AFNOR, “Norme XP P 18-580 : Granulats - détermination de la résistance au polissage accéléré des gravillons,” 1997.

[10] AFNOR, “Norme NF P 18-560 : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage,” 1990.

[11] AFNOR, “Norme NF P 94-057 : Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation,” 1992.

[12] AFNOR, “Norme NF P 18-561 : Granulats - Mesure du coefficient d’aplatissement,” 1990.

[13] AFNOR, “Norme NF EN 933-9 : Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène,” 2009.

[14] H. Di Benedetto and J.-F. Corté, “Matériaux routiers bitumineux: description et propriétés des constituants, tome 1,” 2004.

[15] D. Whiteoak, “The shell bitumen Handbook,” *Publ. by Shell Bitum. U.K*, 1990.

[16] AFNOR, “Norme NF EN 13808 : Bitumes et liants bitumineux - Cadre de spécifications pour les émulsions cationiques de liants bitumineux,” 2013.

[17] AFNOR, “Norme NF EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l’aiguille,” 2007.

[18] AFNOR, “Norme NF EN 1427 : Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau,” 2007.

[19] H. Di Benedetto and J.-F. Corté, “Matériaux routiers bitumineux: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges, tome 2,” *Hermés Lavoisier*, pp. 286–288, 2004.

[20] C. Huet, “Comportement viscoélastique d’un matériau hydrocarboné,” *C.R. Acad, Sci. Paris*, vol. 257, pp. 1438–1442, 1963.

[21] G. Sayegh, “Contribution à l’étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et bétons bitumineux,” *Thèse Dr. Fac. des Sci. Paris*, 1965.

[22] USIRF, “Les enrobés bitumineux Tome 1,” 2001.

[23] AFNOR, “Norme NF P 98-252 : Détermination du comportement au compactage des mélanges hydrocarbonés – Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG),” 1999.

[24] AFNOR, “Norme NF P 98-251-1 : Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Essai DURIEZ,” 2002.

[25] AFNOR, “Norme NF EN 12697-26 : Méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud : module de rigidité,” 2012.

[26] AFNOR, “Norme NF EN 12697-24 : Méthodes d’essai pour mélange hydrocarboné à chaud : résistance à la fatigue,” 2012.

[27] E. M. Davalle, “Modèle numérique du comportement d’un sol liquéfiable sous sollicitations dynamiques,” *Thèse Dr. Ec. Polytech. fédérale Lausanne, EPFL*, 1991.

[28] J. R. Boyce, “A non linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading,” *, Int. Symp. Soils under Cycl. Transient Loading, Swansea, U.K.*, p. p 285-294., 1980.

[29] AFNOR, “XP P94-090-1 Sols : Essai oedométrique : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers,” 1997.

[30] AFNOR, “Norme NF P94-074 Sols : reconnaissance et essais - Essais à l’appareil triaxial de révolution,” 1994.

[31] S. Goyer, M. Dauvergne, L. Wendling, J. c. Fabre, C. De La Roche, and V. Gaudefroy, “Environmental evaluation of gravel emulsion,” *Int. Symp. Life Cycle Assess. Constr.*, no. 2, pp. 170–178, 2012.

[32] J. Valentin, V. Snížek, J. Hradil, and M. Engels, “Guide for using suitable eco-balance tools to evaluate the environmental compatibility of cold recycling CEDR Call2012 : Recycling : Road construction in a,” pp. 1–30, 2015.

[33] S. Maccarrone, G. Holleran, and A. Ky, “Cold asphalt systems as an alternative to hot mix,” *Proceedings of the 9th AAPA international Asphalt conference. Australia: AAPA*. 1994.

[34] L. Wendling, V. Gaudefroy, J. Gaschet, S. Ollier, and S. Gallier, “Evaluation of the compactability of bituminous emulsion mixes : experimental device and methodology,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 8436, no. November 2014, pp. 37–41, 2014.

[35] L. Wendling *et al.*, “Comportement et étude des graves-émulsion - Coopération public-privé - Compactabilité des enrobés à l’émulsion de bitume,” *R.G.R.A.*, no. n°901, pp. 39–44, 2012.

[36] P. Hornych, V. Gaudefroy, J. L. Geffard, and S. Goyer, “Study of the mechanical behaviour of gravel-emulsions using triaxial tests,” *Proc. 7th Int. RILEM Symp. Adv. Test. Charact. Bitum. Mater. Rhodes, Greece*, no. March, pp. 639–650, 2009.

[37] J. P. Serfass, J. E. Poirier, J. P. Henrat, and X. Carbonneau, “Influence of curing on cold mix mechanical performance,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 37, no. 269, pp. 365–368, 2004.

[38] P. Redelius, J. Östlund, and H. Soenen, “Field experience of cold mix asphalt during 15 years,” vol. 629, no. August, 2015.

[39] A. Béghin *et al.*, “Comportement et étude des graves-émulsion - Coopération public-privé - Mûrissement et évolution temporelle des propriétés de l’enrobé et des caractéristiques du

liant," *R.G.R.A.*, no. n°902, pp. 54–62, 2012.

[40] J. P. Triquigneaux, L. Wendling, L. Odie, D. Claudel, and V. Gaudefroy, "Comportement et étude des graves-émulsion - Coopération public-privé - Essai Duriez : teneurs en vides, performances mécaniques, sensibilité à l'eau et caractérisation du liant extraits," *R.G.R.A.*, no. n°901, 2012.

[41] Z. Čížková, J. Valentin, J. Suda, O. Krpálek, D. Simnofske, and F. Batista, "Report on Durability of cold-recycled mixes : Test procedures for stiffness determination," no. September, 2014.

[42] L. Wendling *et al.*, "Comportement et étude des graves-émulsion - Coopération public-privé - Chantier expérimental de la RD44 ; Suivi du comportement dans le temps," *R.G.R.A.*, no. n°899, pp. 18–21, 2012.

[43] J. Valentin, P. Mondschein, J. Fiedler, K. Mollenhauer, F. Batista, and A. C. Freire, "Report on incorporation of cold- recycled pavement layers in empirical and mechanistic pavement design procedures," pp. 1–40, 2014.

[44] I. N. A. Thanaya, S. E. Zoorob, and J. P. Forth, "A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Transp.*, vol. 162, no. 1, pp. 47–55, 2009.

[45] P. Leandri, M. Losa, and A. Di Natale, "Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 75, pp. 275–282, 2015.

[46] D. R. Salomon, "Asphalt emulsion technology," *ransportation Res. Board, Washington, D.C*, no. August, pp. 1–24, 2006.

[47] J. P. Serfass, C. De La Roche, L. Wendling, V. Gaudefroy, and F. Verhée, "Comportement et étude des grave émulsion : Coopération public-privé," *R.G.R.A.*, no. n°896, pp. 1–4, 2011.

[48] P. Hornych, A. Kazai, and J. M. Piau, "Study of the resilient behaviour of unbound granular materials," *proc. 5th Conf. Bear. Capacit. Roads Airfields, Trondheim, Norw.*, 1998.

[49] V. Gaudefroy, A. Gros, E. Chailleux, S. Bouron, and L. Laguerre, "Utilisation de la propagation d'ondes ultrasonores pour l'évaluation de la rigidité de matériaux bitumineux routiers," *Rev. des Compos. des Mater. Av.*, vol. 23, no. 1, pp. 139–153, 2013.

[50] T. Doyle, C. McNally, A. Gibney, and A. Tabaković, "Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 524–529, Jan. 2013.

[51] A. James, "Cold Mix Design In North America," *Symp. Emuls. cold Mix. - 3rd world Congr. Emuls.*, pp. 63–70, 2002.

[52] J. P. Serfass, "Emulsion cold mixes : specific features and a new design method," *Symp. Emuls. - based cold Mix. 3rd world Congr. Emuls. Lyon, Fr.*, p. p 93-111, 2002.

[53] C. De La Roche and J. P. Serfass, "Comportement et étude des graves-émulsion - Acquis, perspectives et suites proposées," *R.G.R.A.*, no. N°902, 2012.

[54] AFNOR, "Norme NF P 98-121 : Assises de chaussées - Grave émulsion - Définition - Classification - Caractéristiques - Fabrication - Mise en oeuvre," 2014.

[55] Club d'échange d'experiences sur les routes départementales, "Guide pour la construction des chaussées à faible trafic Bretagne - Pays de Loire," 2002.

[56] AFNOR, "Norme NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les propriétés géométriques des

granulats - Détermination de la granularité, analyse granulométrique par tamisage," 2012.

[57] AFNOR, "Norme NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle," 2014.

[58] AFNOR, "Norme NF EN 12697-7 : Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud : détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses par les rayons gamma," 2003.

[59] J. Sohm, "Prédiction des déformations permanantes des matériaux bitumineux," 2011.

[60] J. D. Ferry, "Viscoelastic properties of polymers," *John Wiley, New York*, vol. 3rd ed., 1980.

[61] C. Boutin, C. De La Roche, H. Di Benedetto, and G. Ramond, "De la rhéologie du liant à celle de l'enrobé bitumineux, théorie de l'homogénéisation et validation expérimentale," *Eurobitume Work. Bruxelles,* 1995.

Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation

Dans un contexte politique où les enjeux énergétiques et environnementaux sont de plus en plus importants, il faut favoriser les techniques économes en énergie et plus respectueuse de l'environnement. Parmi ces pratiques, l'utilisation d'enrobés à l'émulsion de bitume s'est révélée être prometteuse. La fabrication et la conception d'une chaussée comprenant une couche d'enrobé à l'émulsion sont très empiriques et reposent sur des compétences locales qui tendent à en limiter le développement. La première étape pour concevoir une chaussée consiste à connaître le comportement mécanique réversible engendrées par de lourd trafic de chaque matériau qui la compose. Lors d'une deuxième étape, ces valeurs doivent être comparées aux critères de durabilité mécanique des matériaux. Dans le cas de l'enrobé à l'émulsion, aucune loi de comportement mécanique n'a été établie pour tenir compte à la fois de son états frais et durcis. Ce travail de thèse vise donc à pallier à ce manque et à améliorer les connaissances acquises sur ce matériau. Pour cela, un modèle évolutif pour l'enrobé à l'émulsion intégrant l'évolution du matériau de son état frais à l'état durci a été développé. De plus, un nouvel essai de caractérisation a été développé et mis en place pour permettre de suivre l'évolution des performances mécaniques réversibles du matériau. Les résultats obtenus à partir des différentes campagnes d'essais ont permis de caler le modèle et de montrer la pertinence du modèle.

Mots-clés : Enrobé à froid, émulsion de bitume, comportement mécanique, essai œdométrique

Evolutive mechanical behaviour of cold mix asphalt : experimental study and modelling

Given a political context in which energy and environmental stakes have become increasingly dominant, road engineering practices have favoured saving energy and protecting the environment. Among these practices, the use of cold mixes treated with bitumen emulsion has proven to be a suitable technique. Cold mix design however, as well as the design of pavements including cold mix asphalt layers, is highly empirical and based on local skills. From prior experience, the transposition of established local rules from one site to another and their application to medium or heavy traffic pavements are not simple steps and tend to limit the development of this environmentally-friendly pavement technique. The first step in designing a pavement consists of knowing the stress-strain relationship of its constitutive materials in order to determine the stresses and strains generated by heavy lorry traffic. During a second step, these values must be compared with the mechanical durability of materials by reliance on damage tests comprising large numbers of load cycles. In the case of CMA, no mechanical behaviour law has been established to take into account both the fresh and cured states. This work aims to improve the knowledge acquired on this material. For this, an evolutiv model for the cold mix asphalt with bitumen emulsion incorporating the evolution of the material from its fresh state to its cured state has been developed. In addition, a new characterization test was developed and put in place to monitor the evolution of the reversible mechanical performance of the material. The results obtained from the test campaigns helped to calibrate the model and show the relevance of the model.

Keywords : Cold mix asphalt, bitumen emulsion, mechanical behaviour, oedometric test

Annexe 1 - Calcul de fonction $\zeta(l)$ pour la représentation 1D d'un amortisseur parabolique

Pour déterminer la fonction $\zeta(l)$, partons de la fonction de fluage :

$$F(t) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{E}\left(1 - e^{\frac{-t}{\zeta(l)}}\right) dl$$

On suppose $\zeta(l)$ croissante tendant, comme on le montrera en fin de calcul, vers 0 en 0 et vers $+\infty$ en $+\infty$.

Par dérivation temporelle :

$$\dot{F}(t) = \frac{1}{E}\int_0^{+\infty} \frac{1}{\zeta(l)} e^{\frac{-t}{\zeta(l)}} dl$$

Posons : $\frac{1}{\zeta(l)} = u$

Compte-tenu des conditions $\zeta(l) \to 0$ et donc $u \to +\infty$ pour $l \to 0$ d'une part et $\zeta(l) \to +\infty$ et donc $u \to 0$ pour $l \to +\infty$ d'autre part, on a :

$$\dot{F}(t) = -\frac{1}{E}\int_{+\infty}^{0} u e^{-\mathrm{ut}} \frac{1}{u^2} \frac{d\zeta^{-1}\left(\frac{1}{u}\right)}{du} du$$

$$\dot{F}(t) = \frac{1}{E}\int_0^{+\infty} \frac{e^{-\mathrm{ut}}}{u} \frac{d\zeta^{-1}\left(\frac{1}{u}\right)}{du} du$$

Or cette relation peut s'apparenter à une transformée de Laplace en u :

$$\dot{F}(t) = TL[f(u)](\mathrm{t}) = \int_0^{+\infty} e^{-ut} f(u) du$$

à condition de poser :

$$f(u) = \frac{1}{E\,u} \frac{d\zeta^{-1}\left(\frac{1}{u}\right)}{du}$$

On en déduit par transformée de Laplace inverse :

$$\frac{1}{E\,u} \frac{d\zeta^{-1}\left(\frac{1}{u}\right)}{du} = TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)(u)$$

soit :

$$\frac{d\zeta^{-1}(v)}{dv} = \frac{E}{v}\, TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)\left(\frac{1}{v}\right)$$

Et donc :

$$l = E\int_0^{\zeta} \frac{TL^{-1}\left(\dot{F}(t)\right)\left(\frac{1}{v}\right)}{v}\, dv$$

Cette expression tient compte de la condition $\zeta(v) \to 0$ pour $l \to 0$.

La fonction $\zeta(l)$ s'obtient au final par inversion de cette relation.

Annexe 2 – Modèle VENL 1D - Calcul de la déformation libre d'un élément ouvert pour $\sigma(t)$ affine

L'algorithme de résolution du modèle VENL 1D repose sur le calcul de la déformation libre de l'élément à 3 branches sur un intervalle de temps pour lequel la contrainte $\sigma(t)$ est affine.

Notons :

- t_{ini} = instant initial de l'intervalle de temps considéré,
- t_{fin} = instant final de cet intervalle,
- $\tilde{\varepsilon}(l, t_{ini})$ = valeur de déformation de l'élément à 3 branches l supposée connue à l'instant t_{ini},
- σ_{ini} = valeur de contrainte supposée connue à l'instant t_{ini},
- σ_{fin} = valeur de contrainte supposée connue à l'instant t_{fin},
- $\dot{\sigma} = \frac{\sigma_{fin} - \sigma_{ini}}{t_{fin} - t_{ini}}$

La relation contrainte-déformation de l'élément libre vérifie l'équation :

$$\sigma(t) = \sigma_{ini} + \dot{\sigma}(t - t_{ini}) = E_s\left(\tilde{\varepsilon}(l,t) + \zeta(l)\dot{\tilde{\varepsilon}}(l,t)\right)$$

Recherchons une solution particulière sous la forme :

$$\tilde{\varepsilon}(l,t) = \alpha + \beta t$$

Alors :

$$E_s\left(\tilde{\varepsilon}(l,t) + \zeta(l)\dot{\tilde{\varepsilon}}(l,t)\right) = E_s(\alpha + \beta t + \zeta(l)\beta)$$

soit par identification :

$$\begin{cases} E_s(\alpha + \zeta(l)\beta) = \sigma_{ini} - \dot{\sigma}\, t_{ini} \\ E_s\beta = \dot{\sigma} \end{cases}$$

et donc :

$$\tilde{\varepsilon}(l,t) = \frac{\sigma_{ini} - \dot{\sigma}\, t_{ini} - \dot{\sigma}\zeta(l)}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}}{E_s}t$$

La solution générale est de la forme :

$$\tilde{\varepsilon}(l,t) = A\, e^{\frac{-t}{\zeta(l)}}$$

D'où :

$$\tilde{\varepsilon}(l,t) = \frac{\sigma_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}}{E_s}\left(t - t_{ini} - \zeta(l)\right) + Ae^{\frac{-t}{\zeta(l)}}$$

Or à l'instant t_{ini}, $\tilde{\varepsilon}(l,t) = \tilde{\varepsilon}(l, t_{ini})$.

On en déduit :

$$\tilde{\varepsilon}(l,t) = \frac{\sigma_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}}{E_s}\left(t - t_{ini} - \zeta(l)\right) + \left(\tilde{\varepsilon}(l,t_{ini}) - \frac{\sigma_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}}{E_s}\zeta(l)\right) e^{\frac{-(t-t_{ini})}{\zeta(l)}}$$

En particulier pour $t = t_{fin}$:

$$\tilde{\varepsilon}\left(l,t_{fin}\right) = \frac{\sigma_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}}{E_s}\left(t_{fin} - t_{ini} - \zeta(l)\right) + \left(\tilde{\varepsilon}(l,t_{ini}) - \frac{\sigma_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{\sigma}}{E_s}\zeta(l)\right) e^{\frac{-(t_{fin}-t_{ini})}{\zeta(l)}}$$

On observe que pour une viscosité $\zeta(l) \to 0$, $\tilde{\varepsilon}^{\,libre}\left(l,t_{fin}\right)$ tend vers $\frac{\sigma_{fin}}{E_s}$ comme attendu (comportement élastique seul).

Annexe 3 – Variation de la fonction b_d en fonction de l_d

Montrons de manière générale qu'à valeur ε_v constante, la fonction b_d est décroissante avec l_d.

Partons de l'équation Equation 96, on obtient :

$$b_d = \frac{p}{E_s}\sqrt{\frac{1}{\chi}\left(1+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v\right)} = \frac{p_a}{E_s\sqrt{\chi}}\sqrt{\left(\frac{p}{P_a}\right)^{2}+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{2-n}\varepsilon_v}$$

Cette équation montre qu'à ε_v constant, on obtient après dérivation :

$$db_d = \frac{p_a}{E_s\sqrt{\chi}}\frac{2\left(\frac{p}{P_a}\right)+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{1-n}\varepsilon_v}{2\sqrt{\left(\frac{p}{P_a}\right)^{2}+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{2-n}\varepsilon_v}}d\left(\frac{p}{P_a}\right)$$

Intéressons-nous au signe du numérateur :

$$N_1 = 2\left(\frac{p}{P_a}\right)+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{1-n}\varepsilon_v \equiv 2+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v$$

Où le symbole ≡ désigne une relation de proportionnalité à travers un coefficient multiplicatif positif.

Or, l'Equation 96 montre que :

$$\varepsilon_v = \chi\left(\frac{b_d E_s}{p}\right)^{2}\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n}-\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n} > -\frac{P_a}{K_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n}$$

Soit :

$$\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v > -1$$

D'où :

$$2+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v > 2-(2-n) = n$$

Autrement dit, N_1 est toujours positif et donc b_d est une fonction croissante de p.

Regardons maintenant à partir de l'Equation 95, la variation de p en fonction de l_d. Il est possible de réécrire l'Equation 96 sous la forme :

$$\left(\frac{p}{b_d E_s}\right)^{2} = \frac{\chi}{1+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v}$$

On a par report dans l'Equation 95 :

$$\frac{1}{3\,G_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n-1}\left(1-\frac{2-2\mathrm{n}}{\frac{n}{1+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v}+2-n}\right) = \frac{l_d}{E_s}$$

$$\frac{n}{3\,G_a}\frac{2\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n-1}+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-1}\varepsilon_v}{2+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v}=\frac{l_d}{E_s}$$

D'où par différentiation à ε_v constante :

$$\frac{n}{3\,G_a}\frac{\left(2(n-1)\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n-2}-\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-2}\varepsilon_v\right)\left(2+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v\right)+\left(2\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n-1}+\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-1}\varepsilon_v\right)n(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n-1}\varepsilon_v}{\left(2+(2-n)\frac{K_a}{p_a}\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_v\right)^2}d\left(\frac{p}{P_a}\right)=\frac{dl_d}{E_s}$$

Soit après développement, en ne s'intéressant qu'au numérateur N de cette expression :

$$N=-\left(\frac{p}{P_a}\right)^{-2-n}\left[4(1-n)\left(\frac{p}{P_a}\right)^{2n}+2(1-n)(3-2n)\frac{K_a}{p_a}\varepsilon_v\left(\frac{p}{P_a}\right)^{n}+(2-n)(1-n)\left(\frac{K_a}{p_a}\varepsilon_v\right)^2\right]$$

Le terme entre crochet est un polynôme du second degré en $\left(\frac{p}{P_a}\right)^n$. Compte tenu de l'inégalité $n<1$, son premier terme est positif. Le polynôme sera donc toujours positif si son discriminant (réduit) est négatif, soit si :

$$4(1-n)^2(3-2n)^2\left(\frac{K_a}{p_a}\varepsilon_v\right)^2-16(1-n)(2-n)(1-n)\left(\frac{K_a}{p_a}\varepsilon_v\right)^2<0\ ?$$

$$\left((3-2n)^2-4(2-n)\right)4(1-n)^2\left(\frac{K_a}{p_a}\varepsilon_v\right)^2<0\ ?$$

Soit :

$(3-2n)^2-4(2-n)<0$?

$4n^2-8n+4<0$?

Cette condition est remplie pour $1-\frac{\sqrt{3}}{2}<n<1$, sachant que $1-\frac{\sqrt{3}}{2}\approx 0{,}134$.

C'est donc le cas des jeux de données considérés dans la thèse pour lesquels n est pris avec des valeurs supérieures à cette limite basse.

Au final, ces calculs montrent que $\frac{p}{P_a}$ est une fonction décroissante de l_d pour $1>n>1-\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Annexe 4 – Ancrage des amortisseurs linéaires du spectre volumique du modèle VENL 3D

Considérons le modèle VENL 3D constitué d'éléments spectraux volumiques avec cale et « double fond » où l'amortisseur linéaire serait ancré à la même barre que le ressort. Pour simplifier l'exposé, on supposera ici le spectre déviatorique dénué d'amortisseurs.

Considérons alors une première phase de sollicitation infiniment lente en $\dot{p}$ et $\dot{q}$ ayant amené à l'instant $t = \bar{t}$ le spectre dans l'état statique $(p, q, \varepsilon_v, \varepsilon_q)$ correspondant au modèle de Boyce.

On a alors à l'instant $t = \bar{t}^-$:

$$\varepsilon_v = \underbrace{\lim_{L\to+\infty}}_{} \underbrace{-\frac{p}{E}L_v - \int_{L_v}^{L} b_v(l_v, \varepsilon_d)\, dl_v}_{déf.\ élastique} + \underbrace{\int_{0}^{L} \big(b_v(l_v, \varepsilon_d) - b_v(l_v, 0)\big) dl_v}_{effet\ cale}$$

Et, en se posant dans le cas $\varepsilon_v > 0$:

$$\varepsilon_d = \frac{q}{E}L_d + \int_{L_d}^{+\infty} b_d(l_d, \varepsilon_v)\, dl_d$$

Les énergies élastiques emmagasinées dans les 2 spectres valent :

$$w^e = \frac{p^2}{2E}L_v + \int_{L_v}^{+\infty} \frac{E}{2} {b_v}^2\, dl_v + \frac{q^2}{2E}L_d + \int_{L_v}^{+\infty} \frac{E}{2} {b_d}^2\, dl_d$$

Pour rappel, on a :

$$b_v \approx \left(n\,\chi \frac{9E_s\,{G_a}^2}{K_a {P_a}^2}{\varepsilon_d}^2\right)^{\frac{1}{1+n}} \frac{P_a}{E_s} \frac{1}{{l_v}^{\frac{1}{1+n}}} \text{ pour } l_v \text{ grand}$$

et :

$$b_d \approx \left(\frac{n}{2-n}\frac{E_s}{3\,G_a}\right)^{\frac{2-n}{2-2n}} \frac{p_a}{E_s} \sqrt{\frac{K_a\varepsilon_v}{\chi\, p_a}} \frac{1}{{l_d}^{\frac{2-n}{2-2n}}} \text{ pour } l_d \text{ grand.}$$

L'intégrale $\int_{L_v}^{L} b_v\, dl_v$, dont l'intégrande est en $1/{l_v}^{\frac{1}{1+n}}$ est donc divergente pour $\to +\infty$, mais on vérifie que l'intégrale $\int_{L_v}^{+\infty} {b_v}^2\, dl_v$ intervenant dans l'expression de l'énergie élastique et dont l'intégrande est en $1/{l_v}^{\frac{2}{1+n}}$ est par contre convergente.

Les intégrales $\int_{L_d}^{+\infty} b_d\, dl_d$ et $\int_{L_d}^{+\infty} {b_d}^2\, dl_d$, dont les intégrandes sont en $\frac{1}{{l_d}^{\frac{2-n}{2-2n}}}$ et $\frac{1}{{l_d}^{\frac{2-n}{1-n}}}$ sont quant à elles toutes les 2 convergentes.

Supposons maintenant à cet instant, une vitesse de sollicitation finie $\dot{q} > 0$ à valeur p constante. Nous allons examiner les conséquences sur le premier principe de la Thermodynamique au temps $t = \bar{t}^+$ qui s'écrit en termes de dérivées par rapport au temps :

$$\dot{w}^e = -p\dot{\varepsilon}_v + q\dot{\varepsilon}_d + \dot{Q}$$

où $\dot{Q}$ est la dissipation thermique.

Or pour $t = \bar{t}^+$, les valeurs de $\tilde{\varepsilon}_v^{ve}$ sont figées du fait de la présence des amortisseurs volumiques :

$\dot{\tilde{\varepsilon}}_v^{ve} = 0$ (Cf. comportement d'un élément de Kelvin-Voigt au moment d'une discontinuité de vitesse de chargement).

Il n'y a donc pas de dissipation visqueuse dans le modèle, ni pour le spectre volumique, ni pour le spectre déviatorique (compte tenu de l'absence de viscosité sur ces éléments). Le premier principe s'écrit donc dans ce cas :

$$\dot{w}^e = -p\dot{\varepsilon}_v + q\dot{\varepsilon}_d$$

Calculons alors les dérivées intervenant dans ce bilan d'énergie, on a :

$$\dot{\varepsilon}_v = \lim_{L\to+\infty} \dot{\varepsilon}_d \int_0^L b_{v,d}(l_v, \varepsilon_d) dl_v$$

$$\dot{\varepsilon}_d = \frac{\dot{q}}{E} L_d + \dot{\varepsilon}_v \int_{L_d}^{+\infty} b_{d,v}(l_d, \varepsilon_v)\, dl_d$$

Nota : les termes en $\dot{L_d}$ s'annulent dans la dérivée précédente

$$\dot{w}^e = \frac{q\dot{q}}{E} L_d + \dot{\varepsilon}_v \int_{L_v}^{+\infty} E b_d b_{d,v}\, dl_d$$

Nota : les termes en $\dot{L_d}$ s'annulent

Le premier principe impose donc l'égalité :

$$\frac{q\dot{q}}{E} L_d + \dot{\varepsilon}_v \int_{L_v}^{+\infty} E b_d b_{d,v}\, dl_d = -p \lim_{L\to+\infty} \dot{\varepsilon}_d \int_0^L b_{v,d}\, dl_v + q\left(\frac{\dot{q}}{E} L_d + \dot{\varepsilon}_v \int_{L_d}^{+\infty} b_{d,v}\, dl_d\right)$$

Soit :

$$p \lim_{L\to+\infty} \dot{\varepsilon}_d \int_0^L b_{v,d}\, dl_v = \dot{\varepsilon}_v \int_{L_v}^{+\infty} (q - E b_d) b_{d,v}\, dl_d$$

Or $b_{v,d}$et $b_{d,v}$ ont respectivement même dépendance par rapport à l_v et l_d que b_v et b_d.

Par conséquent l'intégrale $\int_0^L b_{v,d}\, dl_v$ tend vers l'infini avec l_v, tandis que l'intégrale de droite est finie.

Autrement dit, l'égalité imposée par le premier principe de la Thermodynamique ne peut avoir lieu en général, ce qui invalide le modèle VENL3D avec les amortisseurs ancrés sur les mêmes barres que les ressorts.

Annexe 5 – Modèle VENL 3D – Calcul de la déformation volumique « libre » d'un élément ouvert

L'algorithme de résolution du modèle VENL 3D repose sur le calcul de la déformation libre de l'élément volumique sur un intervalle de temps dont la contrainte $p(t)$ est affine et $\varepsilon_d(t)$ connu.

Notons :

- t_{ini} = instant initial de l'intervalle de temps considéré,
- t_{fin} = instant final de cet intervalle,
- $\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{ini}, \varepsilon_d)$ = valeur de déformation de l'élément volumique l_v supposée connue à l'instant t_{ini},
- p_{ini} = valeur de contrainte volumique supposée connue à l'instant t_{ini},
- p_{fin} = valeur de contrainte volumique supposée connue à l'instant t_{fin},
- $\dot{p} = \frac{p_{fin} - p_{ini}}{t_{fin} - t_{ini}}$
- $\varepsilon_d(t_{ini})$ = valeur de déformation déviatorique supposée connue à l'instant t_{ini},
- $\varepsilon_d(t_{fin})$ = valeur de déformation déviatorique supposée connue à l'instant t_{fin}.

La relation contrainte-déformation de l'élément libre vérifie l'équation :

$$p(t) = A + \mathrm{B}(t - t_{ini}) = E_s \left(\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) + \zeta_v(l_v) \dot{\tilde{\varepsilon}}_v(l_v, t, \varepsilon_d) \right)$$

avec : $A = -\frac{p_{ini}}{E_s} + b\left(l_v, \varepsilon_q(t_{ini})\right) - \frac{p_a}{E_S}\left(n \frac{E_S}{K_a} \frac{1}{l_v}\right)^{\frac{1}{1-n}}$

et $B = \frac{-\frac{p_{(t)}}{E_S} + b(l_v, \varepsilon_d(t)) + \frac{p_{\mathrm{ini}}}{E_S} - b(l_v, \varepsilon_d(t_{ini}))}{t - t_{ini}}$

La solution générale est de la forme :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) = C(t) e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_v(l_v)}}$$

D'où :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) + \zeta_v(l_v) \dot{\tilde{\varepsilon}}_v(l_v, t, \varepsilon_d) = C(t) e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_v(l_v)}} + \zeta_v(l_v) \left(\frac{-1}{\zeta_v(l_v)} e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_v(l_v)}} C(t) + \dot{C}(t) e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_v(l_v)}} \right)$$

$$\dot{C}(t) = \frac{\left(A + \mathrm{B}(t - t_{ini})\right)}{\zeta_v(l_v)\, E_s} e^{\frac{\mathrm{t}}{\zeta_v(l_v)}}$$

On trouve :

$$C(t) = \mathrm{A}\, e^{\frac{t}{\zeta_v(l_v)}} + \mathrm{B}\left(t - t_{ini} - \zeta_v(l_v)\right) e^{\frac{t}{\zeta_v(l_v)}} + C$$

Et donc :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) = A + \mathrm{B}\big(t - t_{ini} - \zeta_v(l_v)\big) + C e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_v(l_v)}}$$

Or à l'instant $= t_{ini}$,$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) = \tilde{\varepsilon}_v(l_v, t_{ini}, \varepsilon_d)$.
On en déduit :

$$\tilde{\varepsilon}_v(l_v, t, \varepsilon_d) = A + \mathrm{B}\big(t - t_{ini} - \zeta_v(l_v)\big) + \big(\tilde{\varepsilon}_v(t_{ini}) - \mathrm{A} + \mathrm{B}\,\zeta_v(l_v)\big) e^{\frac{-(t - t_{ini})}{\zeta_v(l_v)}}$$

En particulier pour $t = t_{fin}$:

$$\tilde{\varepsilon}_v\big(l_v, t_{fin}, \varepsilon_d\big) = A\left(1 - e^{\frac{-(t_{fin} - t_{ini})}{\zeta_v(l_v)}}\right) - \mathrm{B}\,\zeta_v(l_v)\left(1 - \frac{t_{fin} - t_{ini}}{\zeta_v(l_v)} - e^{\frac{-(t_{fin} - t_{ini})}{\zeta_v(l_v)}}\right) + \tilde{\varepsilon}_v(t_{ini}) e^{\frac{-(t_{fin} - t_{ini})}{\zeta_v(l_v)}}$$

Annexe 6 – Modèle VENL 3D – Calcul de la déformation déviatorique « libre » d'un élément ouvert

L'algorithme de résolution du modèle VENL 3D repose sur le calcul de la déformation libre de l'élément déviatorique sur un intervalle de temps dont la contrainte $q(t)$ est affine et $\varepsilon_v(t)$ connu.

Notons :

- t_{ini} = instant initial de l'intervalle de temps considéré,
- t_{fin} = instant final de cet intervalle,
- $\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{ini}, \varepsilon_v)$ = valeur de déformation de l'élément déviatorique l_v supposée connue à l'instant t_{ini},
- q_{ini} = valeur de contrainte volumique supposée connue à l'instant t_{ini},
- q_{fin} = valeur de contrainte volumique supposée connue à l'instant t_{fin},
- $\dot{q} = \frac{q_{fin} - q_{ini}}{t_{fin} - t_{ini}}$
- $\varepsilon_v(t_{ini}) =$ valeur de déformation volumique supposée connue à l'instant t_{ini},
- $\varepsilon_v(t_{fin}) =$ valeur de déformation volumique supposée connue à l'instant t_{fin}.

La relation contrainte-déformation de l'élément libre vérifie l'équation :

$$\mathrm{q(t)} = \mathrm{q}_{ini} + \dot{q}(t - t_{ini}) = E_s\left(\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) + \zeta_d(l_d)\dot{\tilde{\varepsilon}}_d(l_d, t, \varepsilon_v)\right)$$

avec $\dot{q}_i = \frac{\mathrm{q(t)} - \mathrm{q}(t_{ini})}{(t - t_{ini})}$ Equation 3.214

La solution générale est de la forme :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) = B(t)e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta(l_q)}}$$

D'où :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) + \zeta_d(l_d)\dot{\tilde{\varepsilon}}_d(l_d, t, \varepsilon_v) = B(t)e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_d(l_d)}} + \zeta_d(l_d)\left(\frac{-1}{\zeta_d(l_d)}e^{\frac{-\mathrm{t}}{\zeta_d(l_d)}}B(t) + \dot{B}(t)e^{\frac{-t}{\zeta_d(l_d)}}\right)$$

$$\dot{B}(t) = \frac{\mathrm{q}_{ini} + \dot{q}(t - t_{ini})}{\zeta_d(l_d)\, E_s}e^{\frac{\mathrm{t}}{\zeta_d(l_d)}}$$

On trouve :

$$B(t) = \frac{\mathrm{q}_{ini}}{E_s}e^{\frac{\mathrm{t}}{\zeta_d(l_d)}} + \frac{\dot{q}}{E_s}\left(t - t_{ini} - \zeta_d(l_d)\right)e^{\frac{\mathrm{t}}{\zeta_d(l_d)}} + B$$

Et donc :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) = \frac{q_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{q}}{E_s}\left(t - t_i - \zeta_d(l_d)\right) + Be^{\frac{-t}{\zeta_d(l_d)}}$$

Or à l'instant $= t_{ini}$,$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) = \tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{ini}, \varepsilon_v)$.

On en déduit :

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t, \varepsilon_v) = \frac{q_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{q}}{E_s}\left(t - t_{ini} - \zeta_d(l_d)\right) + \left(\tilde{\varepsilon}_d(t_{ini}) - \frac{q_{ini}}{E_s} + \frac{\dot{q}}{E_s}\zeta_d(l_d)\right) e^{\frac{-(t-t_{ini})}{\zeta_d(l_d)}}$$

En particulier pour $t = t_{fin}$:

$$\tilde{\varepsilon}_d(l_d, t_{fin}, \varepsilon_v) = \frac{q_{ini}}{E_s}\left(1 - e^{\frac{-(t_{fin}-t_{ini})}{\zeta_d(l_d)}}\right) - \frac{\dot{q}}{E_s}\zeta_d(l_d)\left(1 - \frac{t_{fin} - t_{ini}}{\zeta_d(l_d)} - e^{\frac{-(t_{fin}-t_{ini})}{\zeta_d(l_d)}}\right) + \tilde{\varepsilon}_d(t_{ini})\, e^{\frac{-(t_{fin}-t_{ini})}{\zeta_d(l_d)}}$$

Annexe 7 – Fiches techniques capteur de force 25 kN

IFSTTAR

Cellule de métrologie

Site de Nantes
Route de Bouaye
44344 Bouguenais

CERTIFICAT D'ETALONNAGE

N° 0100-2017 N

DELIVRE A : IFSTTAR NANTES - MIT/LAB1I

IDENTIFICATION DE L'INSTRUMENT:

DESIGNATION :	CAPTEUR DE FORCE
CONSTRUCTEUR :	GDS
TYPE :	STALC9-25kN
CONDITIONNEUR :	/
RESOLUTION :	0,0001 V
N° DE SERIE :	294387
N° D'IDENTIFICATION :	333

CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT:

TEMPERATURE:	20,3 °C
TAUX D'HYGROMETRIE:	53,3 %HR
DEMANDE N° :	0055-2017
DATE D'INTERVENTION:	08-juin-17

N° GMM : LAB1I_F_25kN_333

Renseignements complémentaires concernant l'appareil :

Ce document comprend 2 pages
4 pages d'annexe

Date d'émission: 12-juin-17

LE RESPONSABLE DE LA CELLULE DE METROLOGIE :

I - INSTRUMENT PRESENTE

Désignation:	CAPTEUR DE FORCE		
Constructeur:	GDS	Numéro de série:	294387
Type:	STALC9-25kN	Numéro d'identification:	333

IFSTTAR NANTES - MIT/LAB1I

II - METHODE D'ETALONNAGE

La méthode de contrôle est fondée sur la comparaison des indications données par l'appareil par rapport à des valeurs données par un étalon de travail raccordé aux étalons nationaux

Méthode d'essais utilisée : PLQ_SM_MET_MES_FORCE

Une étiquette orange est apposée mentionnant la date d'étalonnage et le numéro du certificat d'étalonnage sur l'instrument étalonné par la Cellule Métrologie.

III - MOYENS DE L'ETALONNAGE :

[x] Alimentation de la cellule métrologie HQ Power n° PS23023 N° DK 10027179

[x] Multimètre Tenma 72-7732 de la cellule métrologie n°1080306825

[x] Chaine de Force Schenck/Fluke ref interne E_de_T_50 kN

IV - RESULTATS DES MESURES :

Les résultats de mesure sont donnés en annexe 4.

V - Incertitudes :

Les incertitudes élargies mentionnées sont celles correspondant à deux incertitudes types. Les incertitudes tupes ont été calculées en tenant compte des différentes composantes d'incertitudes.

VI - Incertitudes sur l'effort appliqué (k = 2)

U = 1,6E+02 N + 0,0E+00 .F

VII - Incertitudes d'étalonnage de l'instrument (à k = 2)

U = 2,1E+02 N + 0,0E+00 .F

Le détail du calcul est donné en annexe

Etalonnage réalisé par : P. PAUVERT

DEFINITION DES INCERTITUDES ELEMENTAIRES PRISES EN COMPTE

1 - Grandeur appliquée

L'incertitude-type obtenue en divisant par deux l'inceritude élargie du capteur de référence.

2 - Lecture

La valeur de l'erreur de lecture est fonction de la résolution d'indication. L'incertitude-type est estimée en faisant l'hypothèse d'une loi de distribution rectangulaire.

3 - Réproductibilité

La reproductibilité de la déformation pour les séries de mesure à un palier de charge est estimée à partir de l'étendue des valeurs (X_{max} - X_{min}) divisée par le coefficient d_n dans le sens croissant des forces. Les valeurs X sont exprimées en unité de force. L'estimateur de l'écart type est donné par la relation suivante $u = (X_{max} - X_{min})/d_n$. Dans le cas d'une variation non détectée, l'incertitude maximale de reproductibilité est égale à l'incertitude de lecture.

4 - Retour à effort nul

Les variations de l'indication à charge nulle sont prises en compte en considérant la déformation maximale à charge nulle obtenue à la fin des séries d'étalonnage et en considérant une distribution rectangulaire. Dans le cas d'une variation non détectée, l'incertitude due à l'effort nul est égale à l'incertitude de lecture.

5 - Influence de la température

L'incertitude sur la température est prise en compte en considérant la sensibilité du capteur en fonction de la température. Cette dernière est déterminée à partir des spécifications du constructeur.
Note : La plupart des capteurs de force à sortie électrique sont compensés thermiquement dans la gamme -10 à 45 °C.

6 - Dérive entre deux étalonnages successifs

Cette incertitude est fonction de l'évolution des indications de l'étalon entre 2 étalonnages successifs. Elle est caractérisée à partir de la variation des indications pour une ou plusieurs valeurs fixes. L'incertitude-type est estimée en faisant l'hypothèse d'une loi de distribution rectangulaire :

$$u_{dérive} = \frac{v_{max}}{\sqrt{3}}$$

avec v_{max} la variation maximale entre 2 étalonnages successifs

7 - Hystérésis

Cette composante est évaluée si l'étalon de travail est utilisé en valeurs croissantes et décroissantes. Son estimation doit être demandée au laboratoire de métrologie.

CE n° 0100-2017 N Annexe 3/4 Date : 12/06/2017

Feuille de calcul de l'incertitude d'étalonnage

- Incertitude d'étalonnage

Composantes de l'incertitude	uj ou sj		
- Effort appliqué	79	N +	0,0E+00 .F
- Lecture	40	N	
- Retour à effort nul	40	N	
- Reproductibilité (montée)	40	N	
- Température	Négligeable sur -10 / +45 °C		
Incertitude type composée	1,0E+02	N +	0,0E+00 .F
Incertitude élargie avec k= 2	**2,1E+02**	**N +**	**0,0E+00 .F**

- Incertitude d'utilisation

Composantes de l'incertitude	uj ou sj
- Reproductibilité	
- Lecture	
- Dérive	
- Hystérésis	
Incertitude type composée	
Incertitude élargie avec k= 2	**N**

CE n° 0100-2017 N

Annexe 4/4

Date : 12/06/2017

valeur de référence (en kN)	valeur lue sur presse (en kN)	Indication de l'instrument en V						
		Montée 1	Descente 1	Montée 2	Descente 2		moyenne M	moyenne D
0		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001		0,0001	0,0001
5		0,0036	0,0035	0,0036	0,0036		0,0036	0,0036
10		0,0073	0,0072	0,0073	0,0072		0,0073	0,0072
15		0,0109	0,0109	0,0109	0,0109		0,0109	0,0109
20		0,0145	0,0145	0,0145	0,0145		0,0145	0,0145
25		0,0182	0,0182	0,0182	0,0182		0,0182	0,0182

Sensibilité montée = 0,0007 V/kN

Sensibilité descente = 0,0007 V/kN

essai réalisé le : 8-juin-17 par : P. PAUVERT

Fichier source : Capteur_force_2 montée-descente)_V2.xls

Annexe 8 – Fiches techniques capteur de déplacement 1

Capteur 020843-1

LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE

TESA

RAPPORT DE MESURE
MESSBERICHT
MEASUREMENT REPORT

No. 8C0001 - PR - 20000322

Identification de l'objet	: Palpeur	
Bezeichnung des Prüfgegenstandes	: Messtaster	03230021
Identification of the object	: Probe	
Numéro	:	
Nummer	: 8C0001	
Number	:	
Mode opératoire	:	
Messverfahren	: 363.00005	
Measurement procedure	:	
Incertitude de mesure	:	
Messunsicherheit [µm]	: ± 1	
Measurement uncertainty	:	

RESULTATS DE MESURE *MESSERGEBNISSE* *MEASUREMENT RESULTS*

Objectif		:				
Ziel	*[µm]*	:	999.94	300.01	0.00	-300.03 -999.96
Objective		:				
Indication		:				
Anzeige	*[µm]*	:	998.20	300.62	0.00	-300.47 -999.03
Indication		:				
Température		:				
Temperatur	*[°C]*	:	20 ± 0.5			
Temperature		:				
Date de l'étalonnage		:				
Kalibrier-Datum		:	2000/03/22			
Calibration date		:				
Date du certificat d'étalonnage		:				
Kalibrierschein-Datum		:	2000/03/22			
Date of calibration certificate		:				
Responsable AQ		:				
Leiter der QS		:	M. BILA			
Responsible QA		:				

brown & sharpe
TESA

Brown&Sharpe TESA SA · CH-1020 Renens

Printed in Switzerland ... Modification rights reserved

Capteur 020843-1

LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE

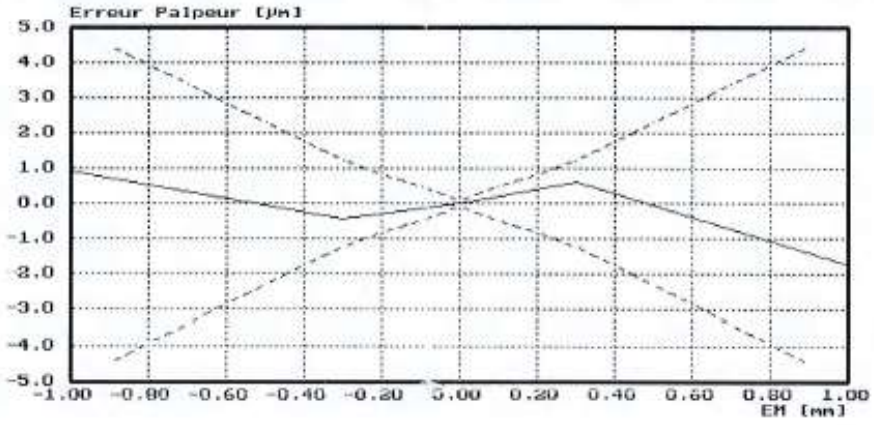
RAPPORT DE MESURE
MESSBERICHT
MEASUREMENT REPORT

No. 8C0001 - PR - 20000322

CALIBRAGE PALPEURS

Lot	:	M2203000
Type de palpeur	:	03230021
Gain	:	1.00
Offset	:	0.05
Paf+	:	999.93
Paf-	:	-999.83
Passage	:	1

Référence	Tol.	Palpeur	Erreur
999.94	± 5.00	998.20	-1.74
300.01	± 1.20	300.62	0.61
0.00	± 0.10	0.00	0.00
-300.03	± 1.20	-300.47	-0.44
-999.96	± 5.00	-999.03	0.93



Annexe 9 – Fiches techniques capteur de déplacement 2

capteur 020843-2

TESA

LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE

RAPPORT DE MESURE
MESSBERICHT
MEASUREMENT REPORT

No. 8C0002 - PR - 20000322

Identification de l'objet	: Palpeur	
Bezeichnung des Prüfgegenstandes	: Messtaster	03230021
Identification of the object	: Probe	
Numéro	:	
Nummer	: 8C0002	
Number	:	
Mode opératoire	:	
Messverfahren	: 363.00005	
Measurement procedure	:	
Incertitude de mesure	:	
Messunsicherheit [µm]	: ± 1	
Measurement uncertainty	:	

RESULTATS DE MESURE / *MESSERGEBNISSE* / *MEASUREMENT RESULTS*						
Objectif	:					
Ziel [µm]	:	999.94	300.01	0.00	-300.03	-999.96
Objective	:					
Indication	:					
Anzeige [µm]	:	998.58	300.59	0.00	-300.19	-998.33
Indication	:					
Température	:					
Temperatur [°C]	:	20 ± 0.5				
Temperature	:					
Date de l'étalonnage	:					
Kalibrier-Datum	:	2000/03/22				
Calibration date	:					
Date du certificat d'étalonnage	:					
Kalibrierschein-Datum	:	2000/03/22				
Date of calibration certificate	:					
Responsable AQ	:					
Leiter der QS	:	M. BILA				
Responsible QA	:					

brown & sharpe TESA

Brown&Sharpe TESA SA • CH-1020 Renens

Printed in Switzerland 366.00760-00 Modification rights reserved

Capteur 020 843-2

LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE

TESA

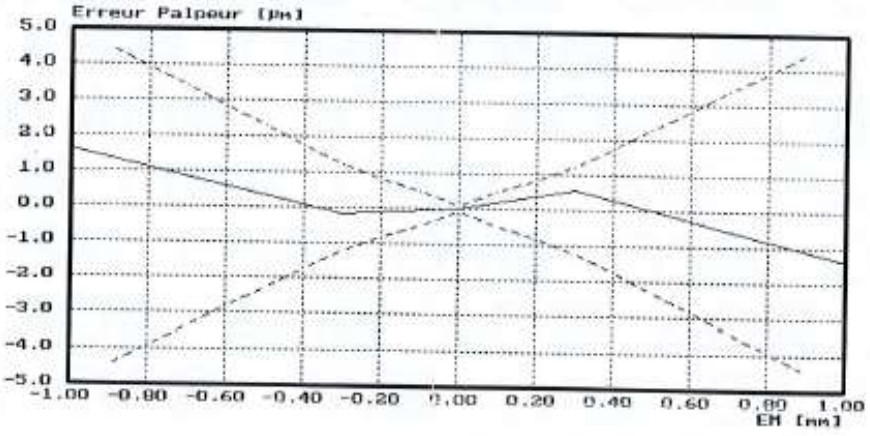
RAPPORT DE MESURE
MESSBERICHT
MEASUREMENT REPORT

No. 8C0002 - PR - 20000322

CALIBRAGE PALPEURS

Lot	:	M2203000
Type de palpeur	:	03230021
Gain	:	1.00
Offset	:	0.05
Pcf+	:	999.93
Paf-	:	-999.83
Passage	:	1

Référence	Tol.	Palpeur	Erreur
999.94	± 5.00	998.57	-1.37
300.01	± 1.20	300.59	0.58
0.00	± 0.10	0.00	0.00
-300.03	± 1.20	-300.20	-0.17
-999.96	± 5.00	-998.33	1.63



Annexe 10 – Fiches techniques capteur de déplacement 3

Radial Soufflet Noir (RSN)

TESA

LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE

RAPPORT DE MESURE
MESSBERICHT
MEASUREMENT REPORT

No. 8E0002 - PR - 20000511

Identification de l'objet	:	Palpeur
Bezeichnung des Prüfgegenstandes	:	Messtaster S32020843
Identification of the object	:	Probe
Numéro	:	
Nummer	:	8E0002
Number	:	
Mode opératoire	:	
Messverfahren	:	3.00
Measurement procedure	:	
Incertitude de mesure	:	
Messunsicherheit [µm]	:	± 1
Measurement uncertainty	:	

RESULTATS DE MESURE / *MESSERGEBNISSE* / *MEASUREMENT RESULTS*						
Objectif		:				
Ziel	*[µm]*	:	999.94	300.01	0.00	-300.03 -999.96
Objective		:				
Indication		:				
Anzeige	*[µm]*	:	998.65	300.23	0.00	-299.88 -996.45
Indication		:				
Température		:				
Temperatur	*[°C]*	:	20 ± 0.5			
Temperature		:				
Date de l'étalonnage		:				
Kalibrier-Datum		:	2000/05/11			
Calibration date		:				
Date du certificat d'étalonnage		:				
Kalibrierschein-Datum		:	2000/05/11			
Date of calibration certificate		:				
Responsable AQ		:				
Leiter der QS		:	M. BILA			
Responsible QA		:				

brown & sharpe TESA

Brown&Sharpe TESA SA - CH-1020 Renens

Printed in Switzerland - 388.00702.00 - Modification rights reserved

RSN
Radial Suffet Noir

LABORATOIRE D'ÉTALONNAGE

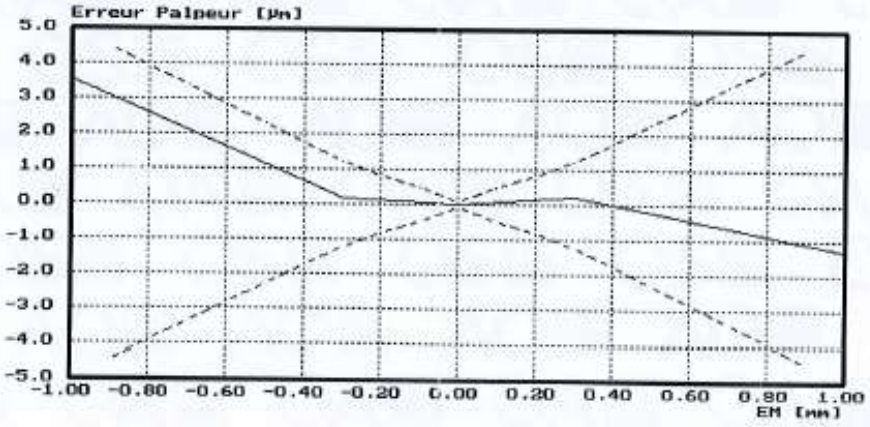
RAPPORT DE MESURE
MESSBERICHT
MEASUREMENT REPORT

No. 8E0002 - PR - 20000511

CALIBRAGE PALPEURS

Lot	:	20843
Type de palpeur	:	S32020843
Gain	:	1.00
Offset	:	-0.03
Paf+	:	999.90
Paf-	:	-999.95
Passage	:	1

Référence	Tol.	Palpeur	Erreur
999.94	± 5.00	998.65	-1.29
300.01	± 1.20	300.23	0.22
0.00	± 0.10	0.00	0.00
-300.03	± 1.20	-299.88	0.15
-999.96	± 5.00	-996.45	3.51



Printed in Switzerland 399.00702.00 Modification rights reserved

Annexe 11 – Déphasage mesuré sur un ressort élastique

La première figure présente les résultats d'essai sur ressort à 0,1Hz :

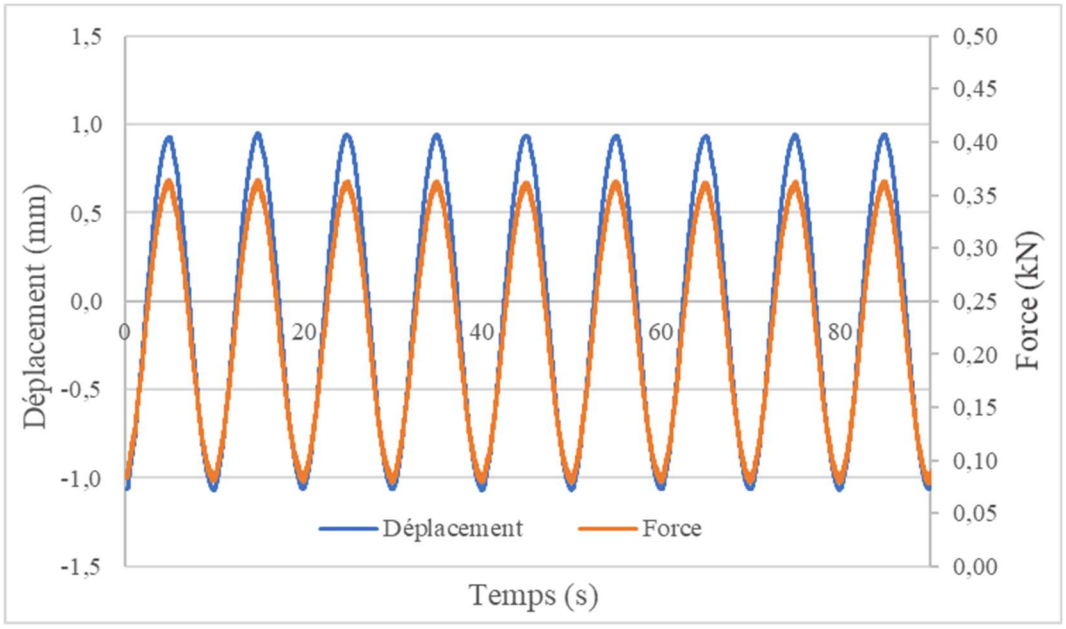


Figure 183 – Essai de compression sinusoïdal sur ressort à 0,1 Hz

La deuxième figure présente les résultats d'essai à 10 Hz :

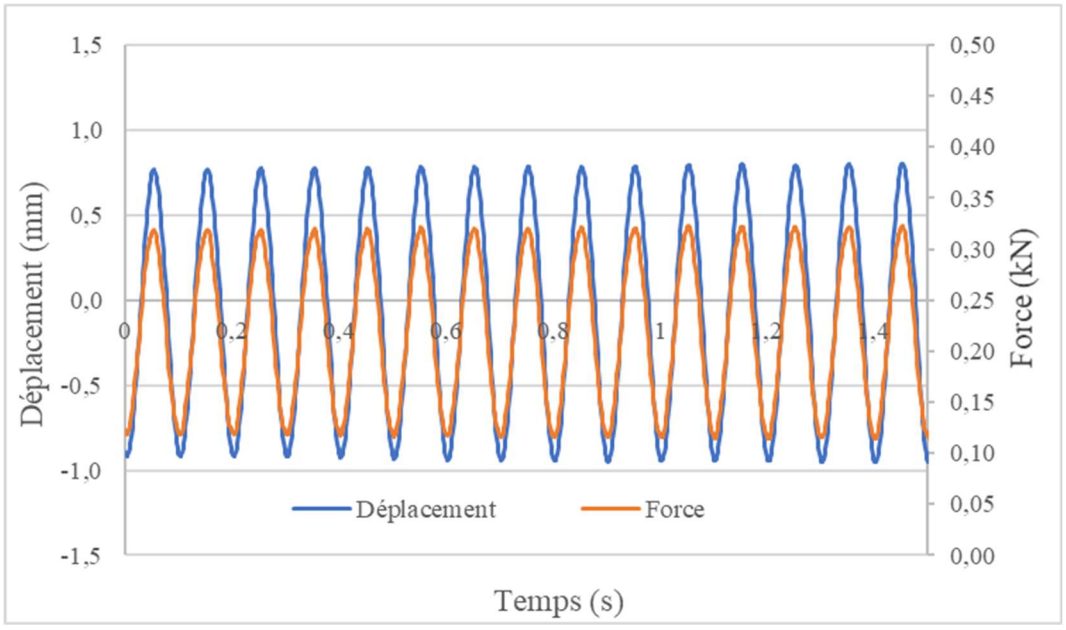


Figure 184 - Essai de compression sinusoïdal sur ressort à 10 Hz

Les valeurs de déphasage résultant de ces essais sur ressort et qui seront déduites des valeurs de déphasage sont :

Fréquence (Hz)	0,1	1	3	6	10
Déphasage (°)	0	1,25	2,23	3,72	6,36

Annexe 12 – Résultats d'essai sur Delrin

Le tableau suivant présente les résultats d'essai de compression sinusoïdal sur Delrin couplé à une mesure de jauge de déformation. Les valeurs surlignées en vert représentent les valeurs utilisées pour le calcul du module moyen et de l'écart type :

Fréquence (Hz)	Force (kN)	Dépl u (mm)	εu	εjauge	σ (Mpa)	Eu (Mpa)	Ejauge (Mpa)
0,1	13,6	1,31E-01	1,31E-03	1,34E-03	5,43	4171	4059
0,1	13,6	1,26E-01	1,26E-03	1,34E-03	5,43	4329	4064
1	13,6	1,24E-01	1,24E-03	1,32E-03	5,43	4386	4109
3	13,6	1,24E-01	1,24E-03	1,31E-03	5,43	4383	4148
0,1	9	8,56E-02	8,56E-04	8,87E-04	3,59	4215	4045
1	9	8,37E-02	8,37E-04	8,73E-04	3,59	4288	4112
3	9	8,36E-02	8,36E-04	8,67E-04	3,59	4296	4143
0,1	4,6	5,11E-02	5,11E-04	4,54E-04	1,83	3621	4033
1	4,6	4,92E-02	4,92E-04	4,44E-04	1,83	3721	4125
3	4,6	4,87E-02	4,87E-04	4,41E-04	1,83	3757	4147
0,1	2,3	3,52E-02	3,52E-04	2,30E-04	0,91	2644	4053
1	2,3	3,26E-02	3,26E-04	2,23E-04	0,91	2801	4097
3	2,3	3,12E-02	3,12E-04	2,18E-04	0,91	2926	4104
0,1	2,3	5,15E-02	5,15E-04	2,24E-04	0,91	1803	4145
1	2,3	4,74E-02	4,74E-04	2,18E-04	0,91	1928	4182
3	2,3			2,22E-04	0,91		4190
					Moy =	4117	4110
					Ecart type =	250	37

Annexe 13 – Résultats d'essai de flexion 2 points sur BBSG de référence

IDENTIFICATION DU MELANGE

Fraction	Origine	pourcentage
6/10	Noubleau	35,5
4/6	Noubleau	25,0
2/4	Noubleau	10,0
0/2	Noubleau	27,0
Fines	Calcaire	2,5
Liant		

MVRe = 2,565 g/cm^3

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES EPROUVETTES

Eprouvette	Hauteur (mm)	Grande base (mm)	Petite base (mm)	Epaisseur (mm)	Masse (g)	Mva (g/cm3)	% vide
404	249,9	56,1	24,8	24,8	625,7	2,50	4,6
418	249,4	55,9	25,4	25,1	636,4	2,50	4,5
419	249,5	55,7	25,4	25,2	633,9	2,49	4,8
420	249,5	55,6	25,2	24,7	623,0	2,51	4,2

Vide moyen des éprouvettes (%) = 4,5

M.V.A. moyenne= 2,50

Le tableau suivant présente les résultats de module complexe et d'angle de phase mesuré lors des essais de flexion 2 points sur les éprouvettes précédentes en fonction de la température et de la fréquence d'essai :

Température (°C)	Fréquence (Hz)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	|E*| (MPa)	f (°)
-10	40	29111	1339	29142	2,7
-10	30	28876	1400	28910	2,8
-10	25	28710	1452	28747	2,9
-10	10	27809	1630	27856	3,4
-10	3	26492	1917	26562	4,2
-10	1	25085	2161	25178	4,9
0	40	24536	2291	24642	5,4
0	30	24133	2342	24246	5,5
0	25	23849	2402	23970	5,8
0	10	22416	2663	22574	6,8
0	3	20247	2975	20464	8,4
0	1	18093	3178	18370	10,0
10	40	17274	3459	17617	11,3
10	30	16640	3503	17004	11,9
10	25	16216	3555	16601	12,4
10	10	14094	3710	14574	14,8
10	3	11176	3765	11793	18,6
10	1	8548	3575	9265	22,7
15	40	13168	3836	13715	16,3
15	30	12452	3818	13024	17,0
15	25	11975	3863	12583	17,9
15	10	9707	3817	10431	21,5
15	3	6818	3507	7668	27,2
15	1	4528	2944	5401	33,1
20	40	9398	3875	10166	22,4
20	30	8688	3788	9478	23,6
20	25	8202	3781	9031	24,8
20	10	6040	3446	6954	29,7
20	3	3632	2756	4560	37,2
20	1	2042	1959	2830	43,8
30	40	3065	2660	4058	41,0
30	30	2618	2421	3566	42,8
30	25	2338	2290	3273	44,4
30	10	1301	1589	2054	50,7
30	3	559	853	1020	56,8
30	1	265	426	502	58,1
40	40	520	914	1052	60,4
40	30	422	762	871	61,0
40	25	361	678	768	62,0
40	10	197	370	419	61,9
40	3	110	163	196	56,0
40	1	73	75	105	46,2
	Rappel du pourcentage de vide du lot d'éprouvettes:			4,54	%

Annexe 14 – Composition de l'enrobé à l'émulsion pour campagne d'essai œdométrique

La composition du mélange granulaire de l'enrobé à l'émulsion est présentée ci-après :

0/02	MAUZAC	45 %
2/6,3	MAUZAC	15 %
6,3/10	MAUZAC	20 %
10/14	MAUZAC	20 %
Liant anhydre résiduel total		4,5 % ext.
Dosage en émulsion C 60 B 5		7,5 % ext.
Teneur en eau totale		6,5 % ext.

La courbe granulométrique du mélange testé est la suivante :

Tamis (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6,3	8	10	12,5	14
% passant	6,0	9,0	12,8	18,6	27,3	40,2	52,1	61,6	69,5	78,8	89,6	96,4

L'émulsion de bitume utilisée dans la fabrication est :

	Emulsion C 60 B 5	Spécifications NF EN 13 808
Teneur en liant	61,1 %	58 – 62
Indice de rupture	181	> 170
PH	3,9	≥ 2

Le tableau ci-après reprend les valeurs obtenues des performances mécaniques de la grave émulsion lors des essais de sensibilité à l'eau Duriez, de compactage PCG et de module de rigidité :

	Valeurs obtenues	Spécification NORME
Essai de maniabilité	Vides à 10 girations : 18,2 %	Vides à 10 girations ≤ 20 %

	Vides à 100 girations : 12,12 %	Vides à 100 girations ≤ 15 %
Sensibilité à l'eau	Modalité n°1 : Vides = 10,2 %	≤ 12 %
	Modalité n°2 : Vides = 15,9 %	
	R = 4,6 MPa	≥ 3,5 MPa
	r/R = ,85	≥ 0,65 MPa
Module de rigidité	2 606 MPa	≥ 2 500 MPa

Annexe 15 – Résultats d'essais à 15°C et 45% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,6E-02	7,7E-02	5,7E-02	1,2E-03	0,403	341	12	5,0E-02	1,1E-01	1,0E-01	1,4E-03	0,404	288	13	1,4E-01	1,3E-01	9,9E-02	2,0E-03	0,789	398	11	1,7E-01	1,7E-01	9,5E-02	2,3E-03	0,790	338	11
4	5,7E-02	5,0E-02	6,5E-02	9,3E-04	0,403	436	15	4,4E-02	5,8E-02	5,4E-02	8,4E-04	0,403	479	15	9,2E-02	8,2E-02	9,7E-02	1,5E-03	0,788	542	13	7,4E-02	9,1E-02	8,4E-02	1,3E-03	0,789	588	13
7	4,0E-02	5,7E-02	4,8E-02	7,8E-04	0,403	518	17	7,5E-02	5,6E-02	2,9E-02	8,6E-04	0,403	466	16	6,7E-02	8,7E-02	7,8E-02	1,2E-03	0,790	635	14	9,1E-02	7,5E-02	5,9E-02	1,2E-03	0,790	652	14
9	4,4E-02	5,4E-02	5,3E-02	8,1E-04	0,403	498	18	4,4E-02	5,0E-02	3,6E-02	7,0E-04	0,403	574	18	6,4E-02	8,4E-02	8,1E-02	1,2E-03	0,790	640	15	6,9E-02	7,6E-02	6,0E-02	1,1E-03	0,790	716	15
11	3,9E-02	4,7E-02	4,8E-02	7,2E-04	0,404	560	19	3,6E-02	3,3E-02	4,4E-02	6,1E-04	0,403	661	20	6,2E-02	7,3E-02	7,9E-02	1,1E-03	0,790	688	15	5,8E-02	5,4E-02	7,1E-02	9,8E-04	0,790	805	16
14	3,7E-02	5,1E-02	4,1E-02	7,0E-04	0,403	578	19	3,4E-02	4,3E-02	3,3E-02	5,9E-04	0,403	678	21	6,0E-02	7,9E-02	6,6E-02	1,1E-03	0,789	717	16	5,7E-02	6,6E-02	5,6E-02	9,6E-04	0,789	822	17
18	5,3E-02	3,1E-02	4,5E-02	7,0E-04	0,403	574	20	3,6E-02	3,1E-02	3,5E-02	5,6E-04	0,402	712	22	7,8E-02	5,4E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,788	721	17	5,8E-02	5,1E-02	5,7E-02	9,2E-04	0,788	860	17
21	4,3E-02	3,0E-02	5,3E-02	6,9E-04	0,403	582	21	3,4E-02	3,2E-02	3,5E-02	5,6E-04	0,402	723	22	5,8E-02	5,5E-02	7,5E-02	1,0E-03	0,788	768	17	5,4E-02	5,3E-02	5,6E-02	8,9E-04	0,788	881	18
23	4,4E-02	3,4E-02	4,1E-02	6,5E-04	0,403	619	21	3,0E-02	3,1E-02	3,5E-02	5,3E-04	0,402	761	23	6,8E-02	5,5E-02	6,5E-02	1,0E-03	0,789	765	17	5,0E-02	5,3E-02	5,5E-02	8,7E-04	0,788	907	18
36	2,5E-02	2,5E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,391	938	23	2,4E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,392	1056	24	4,5E-02	4,4E-02	4,9E-02	7,5E-04	0,777	1034	19	4,4E-02	4,0E-02	3,9E-02	6,7E-04	0,777	1152	20
39	2,8E-02	2,0E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,391	936	23	2,0E-02	1,8E-02	3,1E-02	3,8E-04	0,391	1029	24	4,8E-02	3,7E-02	4,9E-02	7,4E-04	0,777	1054	18	3,6E-02	3,5E-02	5,2E-02	6,8E-04	0,777	1151	19
43	2,2E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,3E-04	0,392	915	23	2,3E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,392	1050	24	4,1E-02	4,6E-02	5,1E-02	7,6E-04	0,777	1025	19	4,0E-02	4,3E-02	3,6E-02	6,5E-04	0,776	1189	20
50	2,2E-02	2,8E-02	2,2E-02	3,9E-04	0,393	1002	23	1,7E-02	2,6E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,392	1104	24	4,1E-02	4,9E-02	3,9E-02	7,0E-04	0,779	1112	19	3,2E-02	4,4E-02	3,6E-02	6,2E-04	0,779	1260	20
57	2,5E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,392	1024	25	2,0E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,392	1123	25	4,4E-02	4,7E-02	3,4E-02	6,8E-04	0,778	1137	20	3,5E-02	3,7E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,778	1252	20
64	2,0E-02	2,8E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,392	1010	24	2,4E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,393	1116	26	3,6E-02	4,9E-02	4,3E-02	7,0E-04	0,779	1120	19	4,4E-02	3,3E-02	3,9E-02	6,4E-04	0,779	1215	20
72	2,1E-02	2,0E-02	2,5E-02	3,6E-04	0,393	1078	24	1,9E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,393	1221	25	3,9E-02	3,7E-02	4,6E-02	6,6E-04	0,777	1170	19	3,5E-02	3,5E-02	3,5E-02	5,8E-04	0,779	1346	21
78	2,3E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,392	1119	24	1,3E-02	2,2E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,392	1335	26	4,1E-02	3,7E-02	3,9E-02	6,4E-04	0,778	1222	20	2,8E-02	3,8E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,779	1421	21
84	1,8E-02	2,6E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,392	1013	24	1,7E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,392	1234	26	3,4E-02	4,6E-02	4,8E-02	7,0E-04	0,778	1108	19	3,0E-02	3,8E-02	3,7E-02	5,8E-04	0,779	1339	20

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,1E-02	6,1E-02	4,5E-02	9,5E-04	0,403	423	15	3,6E-02	8,3E-02	8,3E-02	1,1E-03	0,403	371	15	1,2E-01	9,8E-02	8,0E-02	1,6E-03	0,792	499	13	1,2E-01	1,2E-01	7,0E-02	1,6E-03	0,792	485	14
4	4,5E-02	3,8E-02	5,0E-02	7,2E-04	0,403	562	18	3,5E-02	4,6E-02	4,2E-02	6,6E-04	0,403	611	18	7,6E-02	6,6E-02	8,0E-02	1,2E-03	0,792	663	15	6,1E-02	7,4E-02	6,9E-02	1,1E-03	0,792	724	15
7	3,0E-02	4,1E-02	3,7E-02	5,8E-04	0,403	692	21	5,8E-02	4,2E-02	2,2E-02	6,5E-04	0,402	616	20	5,6E-02	6,7E-02	6,3E-02	9,9E-04	0,792	796	17	7,2E-02	5,7E-02	4,6E-02	9,4E-04	0,792	839	18
9	3,0E-02	3,9E-02	3,6E-02	5,7E-04	0,402	711	23	3,1E-02	3,5E-02	2,6E-02	5,0E-04	0,403	812	24	4,9E-02	6,6E-02	6,0E-02	9,4E-04	0,792	839	19	5,2E-02	5,6E-02	4,7E-02	8,3E-04	0,792	950	20
11	2,8E-02	3,2E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,402	789	24	2,5E-02	2,3E-02	3,0E-02	4,1E-04	0,402	971	26	4,9E-02	5,5E-02	5,8E-02	8,7E-04	0,792	907	20	4,4E-02	4,0E-02	5,3E-02	7,4E-04	0,791	1075	21
14	2,5E-02	3,6E-02	2,8E-02	4,8E-04	0,402	841	25	2,2E-02	2,9E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,402	1019	27	4,4E-02	6,0E-02	4,9E-02	8,2E-04	0,792	965	21	4,1E-02	4,7E-02	4,1E-02	7,0E-04	0,792	1137	22
18	3,6E-02	2,1E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,403	833	26	2,3E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,403	1094	28	5,8E-02	4,0E-02	5,3E-02	8,2E-04	0,792	963	22	4,2E-02	3,6E-02	4,2E-02	6,6E-04	0,792	1191	23
21	2,9E-02	2,1E-02	3,7E-02	4,8E-04	0,403	848	26	2,1E-02	2,1E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,403	1119	28	4,3E-02	3,9E-02	5,6E-02	7,6E-04	0,792	1045	22	3,7E-02	3,7E-02	4,1E-02	6,4E-04	0,792	1243	23
23	2,9E-02	2,3E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,403	933	27	1,8E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,4E-04	0,403	1189	29	4,8E-02	4,0E-02	4,9E-02	7,5E-04	0,792	1055	22	3,4E-02	3,7E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,792	1281	24
36	1,6E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,403	1432	29	1,5E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,404	1659	29	3,2E-02	3,4E-02	3,5E-02	5,6E-04	0,792	1426	24	3,2E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,8E-04	0,792	1643	24
39	1,8E-02	1,5E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,403	1432	28	1,3E-02	1,2E-02	2,0E-02	2,5E-04	0,404	1627	29	3,4E-02	2,8E-02	3,6E-02	5,4E-04	0,792	1470	24	2,5E-02	2,5E-02	3,7E-02	4,8E-04	0,792	1642	24
43	1,5E-02	1,9E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,403	1406	28	1,4E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,404	1682	29	3,0E-02	3,6E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,792	1441	23	2,8E-02	3,1E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,792	1731	24
50	1,5E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,403	1538	28	1,1E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,403	1785	30	3,0E-02	3,5E-02	2,8E-02	5,1E-04	0,792	1558	23	2,2E-02	3,2E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,792	1820	25
57	1,6E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,403	1635	30	1,3E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,403	1818	30	3,1E-02	3,2E-02	2,5E-02	4,9E-04	0,791	1632	24	2,4E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,791	1831	25
64	1,4E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,403	1574	29	1,5E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,404	1818	30	2,7E-02	3,5E-02	3,0E-02	5,0E-04	0,791	1584	24	3,1E-02	2,3E-02	2,7E-02	4,4E-04	0,792	1783	25
72	1,3E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,4E-04	0,404	1696	29	1,1E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,403	1997	30	2,7E-02	2,7E-02	3,3E-02	4,8E-04	0,791	1660	24	2,4E-02	2,5E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,792	1978	25
78	1,6E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,403	1768	30	7,6E-03	1,5E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,404	2226	32	3,0E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,792	1759	25	1,9E-02	2,7E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,791	2094	26
84	1,2E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,404	1617	29	1,1E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,404	2009	31	2,6E-02	3,5E-02	3,2E-02	5,0E-04	0,792	1571	24	2,1E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,792	1944	25

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,4E-02	5,3E-02	4,1E-02	8,5E-04	0,402	474	17	3,2E-02	7,3E-02	7,5E-02	9,6E-04	0,402	417	17	1,0E-01	8,5E-02	7,0E-02	1,4E-03	0,790	570	15	9,6E-02	1,0E-01	6,1E-02	1,4E-03	0,790	570	16
4	3,9E-02	3,2E-02	4,4E-02	6,2E-04	0,402	648	21	3,0E-02	4,0E-02	3,6E-02	5,7E-04	0,402	702	21	6,7E-02	5,8E-02	7,1E-02	1,1E-03	0,790	749	18	5,3E-02	6,5E-02	6,0E-02	9,6E-04	0,790	821	18
7	2,6E-02	3,4E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,403	826	25	5,1E-02	3,5E-02	1,9E-02	5,6E-04	0,402	714	24	4,9E-02	5,7E-02	5,5E-02	8,7E-04	0,790	914	21	6,2E-02	4,8E-02	4,0E-02	8,1E-04	0,791	977	21
9	2,5E-02	3,3E-02	2,9E-02	4,6E-04	0,402	866	27	2,5E-02	2,9E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,402	997	28	4,2E-02	5,7E-02	5,0E-02	8,1E-04	0,790	981	23	4,4E-02	4,7E-02	4,0E-02	7,0E-04	0,790	1124	23
11	2,3E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,1E-04	0,402	970	29	2,0E-02	1,8E-02	2,4E-02	3,3E-04	0,402	1211	31	4,3E-02	4,7E-02	4,7E-02	7,3E-04	0,790	1076	24	3,7E-02	3,3E-02	4,4E-02	6,2E-04	0,790	1278	25
14	2,0E-02	2,9E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,402	1050	30	1,7E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,402	1293	32	3,6E-02	5,0E-02	4,1E-02	6,8E-04	0,790	1154	25	3,4E-02	3,9E-02	3,4E-02	5,8E-04	0,790	1374	26
18	2,9E-02	1,7E-02	2,4E-02	3,9E-04	0,403	1043	30	1,8E-02	1,6E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,403	1407	33	4,8E-02	3,4E-02	4,4E-02	6,9E-04	0,790	1149	25	3,5E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,790	1440	27
21	2,3E-02	1,6E-02	3,0E-02	3,8E-04	0,402	1053	31	1,6E-02	1,6E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,403	1438	33	3,6E-02	3,3E-02	4,6E-02	6,3E-04	0,790	1263	26	3,0E-02	3,0E-02	3,4E-02	5,2E-04	0,790	1518	27
23	2,2E-02	1,8E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,403	1194	32	1,4E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,403	1544	35	3,9E-02	3,4E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,790	1281	27	2,8E-02	3,1E-02	3,3E-02	5,0E-04	0,790	1566	28
36	1,3E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,403	1823	33	1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,404	2121	34	2,4E-02	2,5E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,748	1823	27	2,3E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,748	2136	28
39	1,4E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,403	1839	33	9,8E-03	9,2E-03	1,6E-02	1,9E-04	0,403	2102	34	2,4E-02	2,2E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,748	1905	27	1,8E-02	1,8E-02	2,7E-02	3,5E-04	0,748	2151	28
43	1,1E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,404	1795	32	1,1E-02	1,4E-02	8,8E-03	1,9E-04	0,403	2174	34	2,2E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,750	1874	27	2,2E-02	2,5E-02	2,0E-02	3,7E-04	0,790	2137	28
50	1,1E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,403	1960	32	8,2E-03	1,3E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,403	2315	34	2,4E-02	2,9E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,790	1896	27	1,8E-02	2,6E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,790	2241	28
57	1,2E-02	1,2E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,403	2112	34	9,8E-03	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,403	2342	35	2,5E-02	2,6E-02	2,1E-02	3,9E-04	0,789	2009	28	2,0E-02	2,1E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,790	2266	29
64	1,1E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,403	2011	33	1,2E-02	9,6E-03	9,8E-03	1,7E-04	0,403	2336	35	2,2E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,1E-04	0,790	1938	28	2,5E-02	1,9E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,790	2210	28
72	1,0E-02	1,0E-02	1,3E-02	1,8E-04	0,403	2183	34	8,6E-03	1,0E-02	9,2E-03	1,6E-04	0,403	2591	35	2,1E-02	2,2E-02	2,8E-02	3,9E-04	0,790	2035	28	1,9E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,790	2445	29
78	1,3E-02	9,4E-03	1,0E-02	1,8E-04	0,404	2285	35	5,8E-03	1,2E-02	8,0E-03	1,4E-04	0,404	2875	38	2,5E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,790	2169	28	1,5E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,790	2579	30
84	9,5E-03	1,4E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,403	2084	34	8,4E-03	1,0E-02	9,7E-03	1,6E-04	0,403	2588	36	2,1E-02	2,8E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,790	1918	27	1,7E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,790	2375	29

Moules à 6Hz

Date	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,7E-02	4,8E-02	3,8E-02	7,7E-04	0,397	516	20	2,9E-02	6,6E-02	6,8E-02	8,8E-04	0,397	452	20	9,2E-02	7,8E-02	6,6E-02	1,3E-03	0,778	613	18	8,5E-02	8,9E-02	5,6E-02	1,2E-03	0,778	628	18
4	3,5E-02	2,8E-02	3,9E-02	5,5E-04	0,397	721	24	2,6E-02	3,6E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,398	785	25	6,0E-02	5,3E-02	6,4E-02	9,5E-04	0,778	819	21	4,8E-02	5,8E-02	5,4E-02	8,6E-04	0,778	902	21
7	2,3E-02	2,8E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,398	949	29	4,5E-02	3,1E-02	1,6E-02	4,9E-04	0,397	809	27	4,5E-02	4,9E-02	4,8E-02	7,7E-04	0,778	1016	24	5,4E-02	4,2E-02	3,6E-02	7,1E-04	0,778	1096	25
9	2,1E-02	2,8E-02	2,4E-02	3,9E-04	0,398	1014	32	2,1E-02	2,4E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,398	1170	33	3,7E-02	5,0E-02	4,3E-02	7,0E-04	0,779	1109	26	3,8E-02	4,1E-02	3,5E-02	6,1E-04	0,778	1277	27
11	2,0E-02	2,2E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,398	1139	33	1,7E-02	1,5E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,398	1432	36	3,8E-02	4,1E-02	4,0E-02	6,4E-04	0,778	1223	27	3,2E-02	2,9E-02	3,8E-02	5,3E-04	0,778	1459	29
14	1,6E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,398	1246	35	1,4E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,398	1543	37	3,1E-02	4,4E-02	3,5E-02	5,9E-04	0,779	1320	29	3,0E-02	3,3E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,779	1575	30
18	2,4E-02	1,5E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,399	1238	35	1,5E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,400	1683	39	4,1E-02	3,0E-02	3,7E-02	5,9E-04	0,777	1323	29	3,0E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,7E-04	0,776	1661	31
21	1,9E-02	1,4E-02	2,5E-02	3,2E-04	0,398	1244	35	1,3E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,3E-04	0,399	1717	38	3,1E-02	2,8E-02	3,9E-02	5,4E-04	0,777	1449	30	2,5E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,4E-04	0,777	1756	31
23	1,8E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,398	1436	37	1,1E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,399	1858	41	3,2E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,3E-04	0,777	1480	31	2,3E-02	2,6E-02	2,9E-02	4,3E-04	0,778	1807	32
36	1,0E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,398	2176	39	1,0E-02	9,5E-03	9,0E-03	1,6E-04	0,397	2531	40	2,2E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,776	1993	31	2,2E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,777	2333	32
39	1,1E-02	9,9E-03	1,2E-02	1,8E-04	0,398	2215	38	7,9E-03	7,6E-03	1,3E-02	1,6E-04	0,398	2526	40	2,3E-02	2,1E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,776	2089	31	1,7E-02	1,7E-02	2,6E-02	3,3E-04	0,776	2334	32
43	9,4E-03	1,3E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,398	2153	37	9,0E-03	1,1E-02	7,2E-03	1,5E-04	0,398	2610	39	2,0E-02	2,6E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,776	2044	31	1,9E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,777	2470	32
50	9,3E-03	1,2E-02	9,5E-03	1,7E-04	0,398	2336	37	6,7E-03	1,1E-02	8,2E-03	1,4E-04	0,398	2786	40	2,1E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,776	2177	31	1,5E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,777	2578	33
57	9,9E-03	1,0E-02	8,7E-03	1,6E-04	0,398	2540	40	8,0E-03	8,3E-03	9,4E-03	1,4E-04	0,398	2804	40	2,1E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,777	2317	32	1,7E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,777	2610	33
64	9,0E-03	1,2E-02	9,1E-03	1,7E-04	0,398	2405	38	1,0E-02	7,9E-03	8,2E-03	1,4E-04	0,398	2756	40	1,9E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,776	2236	32	2,1E-02	1,6E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,776	2531	33
72	8,2E-03	8,7E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,398	2616	40	7,0E-03	8,9E-03	7,5E-03	1,3E-04	0,398	3095	41	1,8E-02	1,9E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,776	2347	32	1,6E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,777	2814	33
78	1,1E-02	7,6E-03	8,3E-03	1,5E-04	0,398	2737	40	4,8E-03	9,7E-03	6,5E-03	1,2E-04	0,398	3424	44	2,1E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,777	2502	33	1,3E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,777	2967	34
84	8,0E-03	1,2E-02	9,8E-03	1,6E-04	0,397	2478	39	6,9E-03	8,6E-03	8,0E-03	1,3E-04	0,397	3066	42	1,8E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,776	2201	31	1,4E-02	1,9E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,777	2719	33

Moules à 10Hz

Date	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,1E-02	4,3E-02	3,4E-02	6,9E-04	0,384	554	23	2,7E-02	6,1E-02	6,3E-02	8,1E-04	0,388	479	23	8,3E-02	7,0E-02	6,0E-02	1,1E-03	0,754	657	21	7,6E-02	8,0E-02	5,1E-02	1,1E-03	0,756	679	22
4	3,1E-02	2,5E-02	3,5E-02	4,9E-04	0,384	789	28	2,3E-02	3,1E-02	2,8E-02	4,5E-04	0,385	862	29	5,5E-02	4,7E-02	5,8E-02	8,6E-04	0,754	879	24	4,4E-02	5,3E-02	4,9E-02	7,8E-04	0,751	962	25
7	2,0E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,6E-04	0,384	1058	34	3,9E-02	2,7E-02	1,4E-02	4,3E-04	0,384	888	32	4,1E-02	4,4E-02	4,3E-02	6,9E-04	0,752	1094	28	4,8E-02	3,7E-02	3,2E-02	6,3E-04	0,756	1199	28
9	1,8E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,383	1146	36	1,8E-02	2,1E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,383	1326	38	3,3E-02	4,5E-02	3,7E-02	6,2E-04	0,755	1217	30	3,4E-02	3,6E-02	3,1E-02	5,4E-04	0,754	1404	31
11	1,7E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,384	1288	38	1,4E-02	1,2E-02	1,8E-02	2,4E-04	0,384	1628	42	3,4E-02	3,6E-02	3,5E-02	5,6E-04	0,757	1343	31	2,9E-02	2,5E-02	3,3E-02	4,7E-04	0,755	1602	33
14	1,4E-02	2,1E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,384	1422	40	1,2E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,383	1756	43	2,8E-02	3,8E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,755	1462	33	2,6E-02	2,9E-02	2,6E-02	4,3E-04	0,756	1741	34
18	2,0E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,384	1417	40	1,3E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,384	1911	45	3,5E-02	2,7E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,755	1480	33	2,6E-02	2,2E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,755	1827	35
21	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-02	2,7E-04	0,382	1419	40	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,382	1959	44	2,7E-02	2,5E-02	3,3E-02	4,6E-04	0,753	1620	34	2,1E-02	2,3E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,753	1945	35
23	1,5E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,384	1656	43	9,4E-03	1,1E-02	1,3E-02	1,8E-04	0,383	2135	47	2,7E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,749	1651	35	2,0E-02	2,3E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,752	2003	36
36	8,8E-03	1,0E-02	9,6E-03	1,6E-04	0,381	2446	44	8,5E-03	8,2E-03	7,7E-03	1,3E-04	0,382	2842	46	1,9E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,747	2202	35	1,9E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,751	2590	36
39	9,4E-03	8,5E-03	9,9E-03	1,5E-04	0,383	2516	44	6,7E-03	6,5E-03	1,1E-02	1,3E-04	0,381	2857	46	1,9E-02	1,8E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,745	2320	36	1,5E-02	1,5E-02	2,2E-02	2,9E-04	0,746	2581	36
43	8,1E-03	1,1E-02	9,6E-03	1,6E-04	0,383	2431	42	7,7E-03	9,8E-03	6,1E-03	1,3E-04	0,383	2941	45	1,8E-02	2,3E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,748	2253	35	1,6E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,750	2722	36
50	7,9E-03	1,0E-02	8,2E-03	1,5E-04	0,382	2622	43	5,8E-03	9,2E-03	7,0E-03	1,2E-04	0,382	3152	47	1,8E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,747	2410	35	1,4E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,750	2854	37
57	8,4E-03	8,6E-03	7,4E-03	1,3E-04	0,383	2874	46	6,8E-03	7,2E-03	8,0E-03	1,2E-04	0,381	3142	47	1,8E-02	1,9E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,752	2571	36	1,5E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,754	2875	37
64	7,8E-03	1,0E-02	7,8E-03	1,4E-04	0,383	2706	44	9,0E-03	7,0E-03	7,4E-03	1,3E-04	0,386	2992	46	1,7E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,747	2467	36	1,9E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,749	2757	37
72	7,0E-03	7,5E-03	9,4E-03	1,3E-04	0,382	2924	46	6,1E-03	7,8E-03	6,4E-03	1,1E-04	0,383	3441	48	1,6E-02	1,7E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,748	2579	36	1,4E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,751	3095	38
78	9,1E-03	6,6E-03	7,1E-03	1,3E-04	0,383	3063	46	4,2E-03	8,3E-03	5,6E-03	1,0E-04	0,383	3821	52	1,9E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,750	2769	37	1,2E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,751	3257	38
84	7,1E-03	1,0E-02	8,4E-03	1,4E-04	0,383	2740	44	5,9E-03	7,4E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,381	3421	49	1,7E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,746	2400	35	1,3E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,752	2977	37

Annexe 16 – Résultats d'essais à 15°C et 45% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,1E-01	8,8E-02	4,7E-02	1,3E-03	0,403	303	12	6,6E-02	5,3E-02	9,0E-02	1,1E-03	0,404	360	12	1,5E-01	1,2E-01	7,9E-02	1,9E-03	0,790	420	11	1,0E-01	9,2E-02	1,4E-01	1,8E-03	0,790	441	11
4	6,4E-02	5,0E-02	5,8E-02	9,3E-04	0,403	436	14	5,3E-02	4,4E-02	5,2E-02	8,0E-04	0,403	503	14	9,5E-02	7,7E-02	8,8E-02	1,4E-03	0,789	564	12	7,7E-02	7,1E-02	8,4E-02	1,3E-03	0,790	632	12
7	5,2E-02	4,7E-02	5,3E-02	8,2E-04	0,403	493	15	6,5E-02	6,5E-02	3,3E-02	8,8E-04	0,404	460	15	7,9E-02	7,5E-02	8,1E-02	1,3E-03	0,790	627	13	8,4E-02	9,1E-02	6,3E-02	1,3E-03	0,789	617	13
9	6,4E-02	3,6E-02	5,4E-02	8,3E-04	0,403	487	16	4,5E-02	4,2E-02	4,6E-02	7,1E-04	0,403	566	17	9,1E-02	5,8E-02	8,1E-02	1,2E-03	0,789	639	14	6,6E-02	6,5E-02	7,2E-02	1,1E-03	0,790	728	14
11	5,2E-02	4,3E-02	4,6E-02	7,6E-04	0,403	530	17	3,7E-02	4,9E-02	5,8E-02	7,7E-04	0,404	525	17	8,0E-02	6,5E-02	6,9E-02	1,2E-03	0,791	684	14	5,6E-02	7,3E-02	8,4E-02	1,1E-03	0,790	688	15
14	5,5E-02	5,2E-02	4,2E-02	8,0E-04	0,403	503	16	3,9E-02	4,1E-02	4,8E-02	6,9E-04	0,403	583	17	8,0E-02	7,6E-02	6,6E-02	1,2E-03	0,790	662	14	5,9E-02	6,5E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,790	742	14
18	5,0E-02	3,7E-02	4,7E-02	7,4E-04	0,403	547	19	4,1E-02	3,3E-02	5,2E-02	6,9E-04	0,402	580	19	6,9E-02	5,7E-02	6,6E-02	1,0E-03	0,796	759	13	5,0E-02	6,4E-02	6,9E-02	1,0E-03	0,789	781	16
21	5,7E-02	3,1E-02	4,8E-02	7,4E-04	0,403	541	19	3,6E-02	3,5E-02	3,8E-02	6,0E-04	0,402	671	20	6,8E-02	5,9E-02	6,1E-02	1,0E-03	0,788	766	16	5,5E-02	5,6E-02	5,9E-02	9,3E-04	0,789	846	16
23	4,8E-02	3,4E-02	5,0E-02	7,2E-04	0,402	559	19	4,2E-02	4,2E-02	3,1E-02	6,4E-04	0,402	631	19	7,2E-02	5,4E-02	7,1E-02	1,1E-03	0,789	733	16	6,4E-02	6,7E-02	4,8E-02	9,8E-04	0,788	800	16
36	2,9E-02	2,6E-02	3,2E-02	4,8E-04	0,391	819	20	2,5E-02	2,3E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,392	937	21	4,9E-02	4,5E-02	5,1E-02	7,9E-04	0,778	978	17	4,2E-02	4,3E-02	4,4E-02	7,1E-04	0,778	1094	18
39	2,4E-02	3,6E-02	3,0E-02	4,9E-04	0,392	800	21	2,4E-02	2,5E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,391	950	21	4,1E-02	5,5E-02	5,0E-02	8,0E-04	0,777	974	17	4,1E-02	4,2E-02	4,4E-02	7,0E-04	0,778	1109	18
43	2,4E-02	3,1E-02	3,3E-02	4,8E-04	0,391	809	20	2,0E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,392	926	21	4,2E-02	4,9E-02	5,3E-02	7,9E-04	0,778	988	17	3,6E-02	4,5E-02	4,7E-02	7,0E-04	0,797	1135	21
50	2,6E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,393	912	21	1,9E-02	3,3E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,392	954	21	4,3E-02	4,3E-02	4,6E-02	7,2E-04	0,777	1075	17	3,6E-02	5,3E-02	3,5E-02	6,8E-04	0,777	1135	18
57	2,4E-02	3,0E-02	2,6E-02	4,3E-04	0,392	904	21	1,7E-02	3,0E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,392	1015	21	4,1E-02	4,9E-02	4,3E-02	7,2E-04	0,778	1074	17	3,3E-02	4,8E-02	3,8E-02	6,5E-04	0,778	1191	18
64	2,2E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,1E-04	0,392	959	21	2,2E-02	2,4E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,391	1062	22	4,0E-02	4,4E-02	4,5E-02	7,0E-04	0,778	1106	18	3,7E-02	4,0E-02	3,8E-02	6,4E-04	0,777	1216	18
72	2,4E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,392	914	21	2,4E-02	2,3E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,392	1083	22	4,1E-02	4,2E-02	4,9E-02	7,2E-04	0,779	1084	18	4,0E-02	4,0E-02	3,2E-02	6,2E-04	0,778	1257	18
78	2,4E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,392	989	22	2,1E-02	2,0E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,392	1069	22	4,0E-02	4,1E-02	4,2E-02	6,7E-04	0,778	1159	18	3,7E-02	3,4E-02	4,3E-02	6,3E-04	0,777	1237	19
84	2,6E-02	2,4E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,393	944	22	1,7E-02	2,8E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,393	1021	22	4,3E-02	4,1E-02	4,4E-02	7,0E-04	0,778	1115	18	2,9E-02	4,7E-02	4,1E-02	6,5E-04	0,778	1200	19

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,2E-02	7,0E-02	4,0E-02	1,0E-03	0,403	390	15	5,5E-02	4,3E-02	7,7E-02	9,4E-04	0,403	427	14	1,3E-01	1,0E-01	6,8E-02	1,6E-03	0,792	497	14	8,7E-02	7,6E-02	1,1E-01	1,5E-03	0,792	539	13
4	5,0E-02	3,9E-02	4,7E-02	7,3E-04	0,402	549	18	4,1E-02	3,5E-02	4,2E-02	6,4E-04	0,402	633	18	7,8E-02	6,4E-02	7,5E-02	1,2E-03	0,792	682	15	6,4E-02	5,9E-02	7,1E-02	1,0E-03	0,791	761	15
7	4,1E-02	3,6E-02	4,0E-02	6,3E-04	0,403	644	20	4,9E-02	4,8E-02	2,6E-02	6,6E-04	0,402	608	20	6,5E-02	6,1E-02	6,4E-02	1,0E-03	0,792	776	17	6,7E-02	7,0E-02	5,1E-02	1,0E-03	0,791	785	17
9	4,6E-02	2,7E-02	4,0E-02	6,0E-04	0,402	667	22	3,2E-02	3,1E-02	3,3E-02	5,2E-04	0,402	776	22	6,9E-02	4,6E-02	6,4E-02	9,6E-04	0,792	822	18	5,0E-02	5,1E-02	5,5E-02	8,4E-04	0,792	942	19
11	3,7E-02	3,2E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,402	737	23	2,6E-02	3,5E-02	4,2E-02	5,5E-04	0,402	730	23	6,0E-02	5,2E-02	5,3E-02	8,8E-04	0,792	896	19	4,3E-02	5,6E-02	6,4E-02	8,8E-04	0,792	904	19
14	4,0E-02	3,7E-02	3,2E-02	5,9E-04	0,402	683	22	2,9E-02	3,0E-02	3,5E-02	5,0E-04	0,402	805	23	6,2E-02	5,8E-02	5,3E-02	9,3E-04	0,791	850	19	4,6E-02	5,0E-02	5,6E-02	8,2E-04	0,791	967	19
18	3,5E-02	2,5E-02	3,4E-02	5,2E-04	0,403	780	25	2,9E-02	2,2E-02	3,8E-02	4,9E-04	0,403	826	25	4,7E-02	3,8E-02	4,7E-02	7,2E-04	0,777	1085	16	3,7E-02	4,7E-02	5,3E-02	7,5E-04	0,792	1050	21
21	4,0E-02	2,2E-02	3,4E-02	5,2E-04	0,404	772	25	2,4E-02	2,4E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,403	990	26	5,0E-02	4,3E-02	4,8E-02	7,7E-04	0,792	1025	21	4,0E-02	4,1E-02	4,4E-02	6,9E-04	0,792	1153	22
23	3,3E-02	2,4E-02	3,4E-02	5,0E-04	0,403	811	26	2,9E-02	2,9E-02	2,1E-02	4,4E-04	0,404	921	26	5,3E-02	4,1E-02	5,3E-02	8,0E-04	0,792	989	21	4,7E-02	5,0E-02	3,5E-02	7,3E-04	0,791	1084	21
36	2,1E-02	1,8E-02	2,3E-02	3,4E-04	0,403	1203	27	1,7E-02	1,6E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,403	1396	28	3,7E-02	3,3E-02	3,9E-02	5,9E-04	0,792	1336	23	3,0E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,2E-04	0,792	1518	23
39	1,7E-02	2,5E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,403	1182	27	1,7E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,403	1424	27	3,1E-02	4,2E-02	3,5E-02	5,9E-04	0,792	1337	22	3,0E-02	3,1E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,792	1541	23
43	1,7E-02	2,3E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,403	1193	26	1,4E-02	2,0E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,404	1389	27	3,1E-02	3,8E-02	3,8E-02	5,8E-04	0,792	1355	22	2,6E-02	3,2E-02	3,3E-02	5,0E-04	0,781	1560	24
50	1,7E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,404	1356	27	1,3E-02	2,3E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,403	1437	27	3,1E-02	3,3E-02	3,4E-02	5,3E-04	0,792	1483	23	2,6E-02	4,0E-02	2,6E-02	5,0E-04	0,792	1569	23
57	1,7E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,403	1342	27	1,2E-02	2,1E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,404	1541	28	3,0E-02	3,6E-02	3,2E-02	5,4E-04	0,792	1474	22	2,4E-02	3,5E-02	2,7E-02	4,8E-04	0,792	1661	23
64	1,5E-02	2,0E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,403	1449	28	1,5E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,404	1619	28	3,0E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,791	1542	23	2,8E-02	2,9E-02	2,7E-02	4,6E-04	0,792	1706	24
72	1,6E-02	1,7E-02	2,1E-02	2,9E-04	0,403	1368	27	1,6E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,404	1650	28	2,9E-02	3,1E-02	3,6E-02	5,3E-04	0,792	1497	23	2,9E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,5E-04	0,792	1766	23
78	1,7E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,404	1513	28	1,4E-02	1,4E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,403	1641	28	3,0E-02	2,9E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,791	1633	24	2,9E-02	2,7E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,839	1727	24
84	1,8E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,403	1409	28	1,1E-02	2,0E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,404	1552	28	3,1E-02	3,1E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,791	1547	23	2,1E-02	3,5E-02	3,0E-02	4,7E-04	0,792	1682	23

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,3E-02	6,2E-02	3,5E-02	9,2E-04	0,403	439	17	5,0E-02	3,9E-02	7,0E-02	8,6E-04	0,402	469	17	1,1E-01	8,9E-02	6,1E-02	1,4E-03	0,790	562	16	7,8E-02	6,7E-02	9,7E-02	1,3E-03	0,790	606	16
4	4,3E-02	3,4E-02	4,1E-02	6,4E-04	0,402	632	21	3,5E-02	3,0E-02	3,7E-02	5,5E-04	0,402	729	21	6,9E-02	5,6E-02	6,7E-02	1,0E-03	0,790	766	18	5,6E-02	5,2E-02	6,3E-02	9,2E-04	0,790	858	18
7	3,5E-02	3,1E-02	3,3E-02	5,3E-04	0,402	757	24	4,3E-02	4,0E-02	2,2E-02	5,6E-04	0,402	712	23	5,8E-02	5,4E-02	5,5E-02	8,9E-04	0,790	886	20	5,7E-02	5,9E-02	4,5E-02	8,7E-04	0,790	910	20
9	3,7E-02	2,2E-02	3,3E-02	5,0E-04	0,402	810	26	2,6E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,402	946	27	5,8E-02	4,0E-02	5,5E-02	8,2E-04	0,791	964	22	4,2E-02	4,4E-02	4,7E-02	7,1E-04	0,790	1106	23
11	3,0E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,4E-04	0,402	907	28	2,0E-02	2,9E-02	3,5E-02	4,5E-04	0,402	890	27	4,9E-02	4,5E-02	4,5E-02	7,5E-04	0,790	1057	23	3,6E-02	4,8E-02	5,3E-02	7,4E-04	0,790	1069	23
14	3,3E-02	3,0E-02	2,7E-02	4,8E-04	0,402	830	27	2,3E-02	2,4E-02	2,8E-02	4,1E-04	0,402	983	28	5,2E-02	4,9E-02	4,6E-02	7,9E-04	0,790	1001	23	3,9E-02	4,2E-02	4,7E-02	6,9E-04	0,790	1139	23
18	2,7E-02	2,0E-02	2,8E-02	4,1E-04	0,403	974	30	2,3E-02	1,8E-02	3,1E-02	3,9E-04	0,403	1022	30	3,8E-02	3,1E-02	3,9E-02	5,9E-04	0,775	1306	1	3,1E-02	3,9E-02	4,4E-02	6,3E-04	0,790	1254	25
21	3,1E-02	1,8E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,403	971	29	1,9E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,403	1256	32	4,1E-02	3,6E-02	4,1E-02	6,4E-04	0,790	1232	25	3,3E-02	3,4E-02	3,6E-02	5,7E-04	0,789	1395	26
23	2,6E-02	2,0E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,403	1025	30	2,3E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,403	1155	31	4,3E-02	3,4E-02	4,4E-02	6,6E-04	0,789	1190	26	3,9E-02	4,2E-02	3,0E-02	6,1E-04	0,790	1301	26
36	1,6E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,404	1533	31	1,3E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,403	1785	33	2,7E-02	2,4E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,749	1708	26	2,2E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,748	1955	27
39	1,4E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,403	1513	31	1,3E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,403	1825	32	2,3E-02	3,1E-02	2,5E-02	4,3E-04	0,749	1724	26	2,2E-02	2,3E-02	2,4E-02	3,8E-04	0,750	1977	27
43	1,4E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,403	1512	30	1,1E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,403	1779	32	2,5E-02	3,2E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,790	1653	26	2,0E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,693	1826	23
50	1,3E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,403	1735	32	1,0E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,403	1832	32	2,5E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,4E-04	0,790	1806	27	2,1E-02	3,3E-02	2,1E-02	4,2E-04	0,790	1902	27
57	1,3E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,403	1710	31	9,2E-03	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,403	1964	33	2,5E-02	2,9E-02	2,7E-02	4,4E-04	0,791	1791	26	2,0E-02	2,9E-02	2,2E-02	3,9E-04	0,790	2016	27
64	1,2E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,404	1852	33	1,2E-02	1,3E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,403	2080	34	2,5E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,790	1883	27	2,3E-02	2,4E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,790	2080	28
72	1,2E-02	1,4E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,403	1745	31	1,3E-02	1,2E-02	9,9E-03	1,9E-04	0,403	2108	33	2,4E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,790	1823	26	2,4E-02	2,3E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,790	2153	27
78	1,4E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,403	1960	33	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,403	2102	33	2,5E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,790	2005	28	2,2E-02	2,0E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,790	2134	28
84	1,4E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,403	1797	32	8,6E-03	1,6E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,403	1967	33	2,5E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,791	1889	27	1,7E-02	2,9E-02	2,4E-02	3,9E-04	0,790	2045	27

Moules à 6Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,6E-02	5,6E-02	3,2E-02	8,3E-04	0,397	479	20	4,6E-02	3,5E-02	6,4E-02	7,8E-04	0,397	508	19	1,0E-01	8,1E-02	5,7E-02	1,3E-03	0,777	607	19	7,1E-02	6,2E-02	8,8E-02	1,2E-03	0,777	654	18
4	3,8E-02	3,0E-02	3,7E-02	5,6E-04	0,397	707	24	3,1E-02	2,7E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,398	814	25	6,2E-02	5,0E-02	6,1E-02	9,3E-04	0,778	837	21	5,0E-02	4,7E-02	5,7E-02	8,3E-04	0,778	941	21
7	3,1E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,398	866	28	3,7E-02	3,4E-02	2,0E-02	4,9E-04	0,397	814	27	5,1E-02	4,8E-02	4,8E-02	7,9E-04	0,777	984	23	5,1E-02	5,2E-02	4,0E-02	7,6E-04	0,777	1016	24
9	3,1E-02	1,9E-02	2,9E-02	4,2E-04	0,398	944	31	2,2E-02	2,2E-02	2,3E-02	3,6E-04	0,399	1105	32	4,9E-02	3,5E-02	4,9E-02	7,2E-04	0,778	1088	26	3,7E-02	3,9E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,778	1250	27
11	2,5E-02	2,2E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,398	1064	33	1,7E-02	2,5E-02	3,0E-02	3,8E-04	0,399	1037	32	4,1E-02	4,0E-02	3,9E-02	6,5E-04	0,778	1200	27	3,2E-02	4,2E-02	4,5E-02	6,4E-04	0,778	1211	27
14	2,8E-02	2,5E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,397	970	32	2,0E-02	2,0E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,398	1152	33	4,5E-02	4,2E-02	4,0E-02	6,9E-04	0,777	1133	27	3,4E-02	3,7E-02	4,1E-02	6,0E-04	0,777	1291	28
18	2,2E-02	1,7E-02	2,4E-02	3,4E-04	0,398	1157	35	1,9E-02	1,5E-02	2,6E-02	3,3E-04	0,398	1207	35	3,3E-02	2,8E-02	3,5E-02	5,2E-04	0,746	1440	20	2,6E-02	3,4E-02	3,8E-02	5,4E-04	0,777	1434	29
21	2,5E-02	1,5E-02	2,3E-02	3,4E-04	0,398	1157	34	1,5E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,398	1500	37	3,4E-02	3,1E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,778	1414	29	2,8E-02	2,9E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,776	1604	30
23	2,1E-02	1,7E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,398	1225	35	1,9E-02	2,0E-02	1,4E-02	2,9E-04	0,398	1376	35	3,6E-02	3,0E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,776	1371	30	3,3E-02	3,6E-02	2,6E-02	5,2E-04	0,777	1493	30
36	1,4E-02	1,1E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,399	1841	36	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,398	2142	39	2,6E-02	2,2E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,776	1872	31	2,1E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,6E-04	0,776	2138	32
39	1,2E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,398	1808	36	1,1E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,398	2185	38	2,2E-02	3,0E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,777	1885	30	2,1E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,777	2164	31
43	1,1E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,398	1809	35	9,2E-03	1,3E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,398	2122	38	2,1E-02	2,8E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,776	1901	30	1,1E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,376	1863	39
50	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,398	2076	38	8,4E-03	1,5E-02	9,5E-03	1,8E-04	0,398	2183	37	2,2E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,777	2076	31	1,8E-02	2,8E-02	1,8E-02	3,6E-04	0,777	2180	31
57	1,1E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,398	2037	36	7,7E-03	1,3E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,398	2353	38	2,2E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,777	2059	30	1,7E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,777	2327	32
64	1,0E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,398	2210	38	9,7E-03	1,1E-02	8,6E-03	1,6E-04	0,398	2487	40	2,1E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,777	2172	32	2,0E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,777	2386	32
72	9,8E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,9E-04	0,398	2083	36	1,1E-02	1,0E-02	8,2E-03	1,6E-04	0,398	2512	38	2,0E-02	2,2E-02	2,6E-02	3,7E-04	0,776	2097	30	2,0E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,777	2472	31
78	1,2E-02	9,7E-03	9,7E-03	1,7E-04	0,398	2350	39	9,2E-03	9,0E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,398	2502	39	2,2E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,777	2309	32	1,9E-02	1,8E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,777	2450	32
84	1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,400	2146	37	7,0E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,398	2344	38	2,1E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,777	2179	31	1,4E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,777	2355	31

Moules à 10Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,9E-02	5,0E-02	3,0E-02	7,5E-04	0,384	513	24	4,2E-02	3,2E-02	5,9E-02	7,2E-04	0,384	535	23	9,2E-02	7,5E-02	5,4E-02	1,2E-03	0,754	638	22	6,5E-02	5,6E-02	8,0E-02	1,1E-03	0,754	696	21
4	3,3E-02	2,6E-02	3,3E-02	5,0E-04	0,385	771	29	2,8E-02	2,4E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,385	884	29	5,5E-02	4,6E-02	5,5E-02	8,4E-04	0,753	900	24	4,5E-02	4,3E-02	5,1E-02	7,5E-04	0,750	1002	25
7	2,7E-02	2,3E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,383	963	33	3,2E-02	2,9E-02	1,7E-02	4,2E-04	0,383	901	32	4,7E-02	4,3E-02	4,2E-02	7,1E-04	0,750	1058	27	4,5E-02	4,6E-02	3,6E-02	6,8E-04	0,750	1104	27
9	2,6E-02	1,6E-02	2,5E-02	3,6E-04	0,383	1055	36	1,8E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,383	1241	37	4,2E-02	3,2E-02	4,2E-02	6,3E-04	0,755	1204	30	3,2E-02	3,4E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,755	1374	31
11	2,1E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,385	1210	38	1,4E-02	2,1E-02	2,5E-02	3,2E-04	0,384	1181	37	3,6E-02	3,6E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,754	1318	31	2,8E-02	3,7E-02	4,0E-02	5,6E-04	0,755	1336	31
14	2,3E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,384	1101	37	1,7E-02	1,7E-02	2,1E-02	3,0E-04	0,384	1294	38	3,9E-02	3,7E-02	3,6E-02	6,0E-04	0,751	1245	31	3,0E-02	3,2E-02	3,6E-02	5,3E-04	0,751	1418	32
18	1,8E-02	1,4E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,384	1331	40	1,6E-02	1,3E-02	2,2E-02	2,8E-04	0,383	1377	40								2,3E-02	2,9E-02	3,3E-02	4,7E-04	0,750	1602	33
21	2,1E-02	1,3E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,384	1324	39	1,3E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,384	1708	43	2,9E-02	2,7E-02	3,0E-02	4,7E-04	0,750	1579	33	2,4E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,749	1782	34
23	1,8E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,383	1395	40	1,6E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,384	1561	41	3,1E-02	2,7E-02	3,2E-02	4,9E-04	0,749	1531	34	2,9E-02	3,1E-02	2,3E-02	4,5E-04	0,752	1664	34
36	1,2E-02	9,1E-03	1,3E-02	1,8E-04	0,381	2088	42	9,0E-03	9,0E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,383	2427	45	2,3E-02	1,9E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,745	2064	35	1,8E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,746	2364	36
39	1,0E-02	1,4E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,383	2055	41	9,1E-03	9,9E-03	9,2E-03	1,6E-04	0,383	2473	44	2,0E-02	2,6E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,745	2082	34	1,8E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,747	2399	36
43	9,7E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,383	2038	40	7,9E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,384	2416	44	1,9E-02	2,4E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,746	2103	34							
50	9,1E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,383	2335	43	7,3E-03	1,3E-02	8,0E-03	1,6E-04	0,383	2463	43	1,9E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,746	2287	35	1,6E-02	2,5E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,751	2382	35
57	9,4E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,383	2301	41	6,7E-03	1,1E-02	8,0E-03	1,4E-04	0,383	2667	45	1,9E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,746	2265	34	1,5E-02	2,2E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,750	2577	36
64	9,2E-03	1,0E-02	9,0E-03	1,5E-04	0,382	2492	44	8,3E-03	9,2E-03	7,4E-03	1,4E-04	0,383	2796	46	1,9E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,751	2407	36	1,7E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,747	2636	36
72	8,3E-03	9,7E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,383	2345	41	8,9E-03	8,5E-03	7,0E-03	1,3E-04	0,381	2824	44	1,8E-02	2,0E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,750	2306	34	1,8E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,750	2715	36
78	1,0E-02	8,3E-03	8,2E-03	1,4E-04	0,382	2644	44	7,8E-03	7,7E-03	9,0E-03	1,4E-04	0,382	2826	45	1,9E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,752	2559	36	1,7E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,751	2695	36
84	9,8E-03	9,8E-03	9,3E-03	1,6E-04	0,386	2445	43	6,0E-03	1,1E-02	9,0E-03	1,4E-04	0,383	2664	44	1,9E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,744	2415	35	1,3E-02	2,1E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,750	2618	36

Annexe 17 – Résultats d'essais à 15°C et 45% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,0E-01	9,4E-02	6,3E-02	1,4E-03	0,403	286	10	4,9E-02	7,6E-02	8,0E-02	1,1E-03	0,403	365	10	1,3E-01	1,4E-01	1,2E-01	2,1E-03	0,789	374	9	9,7E-02	1,2E-01	1,2E-01	1,8E-03	0,789	428	10
4	6,8E-02	5,6E-02	6,4E-02	1,0E-03	0,403	397	11	6,4E-02	7,9E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,404	356	11	1,1E-01	9,4E-02	1,0E-01	1,6E-03	0,789	484	10	1,1E-01	1,3E-01	9,5E-02	1,8E-03	0,790	437	10
7	6,0E-02	5,1E-02	6,7E-02	9,6E-04	0,404	419	11	5,0E-02	7,8E-02	5,4E-02	9,8E-04	0,404	414	11	9,5E-02	8,2E-02	1,0E-01	1,5E-03	0,790	523	11	8,1E-02	1,0E-01	9,4E-02	1,5E-03	0,791	532	11
9	6,6E-02	5,1E-02	6,3E-02	9,7E-04	0,403	417	12	5,5E-02	6,1E-02	5,2E-02	9,0E-04	0,404	447	12	9,3E-02	8,2E-02	1,0E-01	1,5E-03	0,790	531	11	8,6E-02	9,0E-02	8,5E-02	1,4E-03	0,791	564	11
11	6,3E-02	5,2E-02	5,9E-02	9,3E-04	0,403	432	12	6,9E-02	4,5E-02	5,4E-02	9,1E-04	0,403	445	12	9,7E-02	8,1E-02	8,9E-02	1,4E-03	0,790	548	11	8,9E-02	7,7E-02	8,5E-02	1,3E-03	0,788	587	11
14	8,2E-02	4,9E-02	5,8E-02	1,0E-03	0,403	398	12	4,9E-02	6,5E-02	4,9E-02	8,7E-04	0,403	462	12	1,2E-01	7,4E-02	8,9E-02	1,5E-03	0,790	527	11	7,4E-02	9,4E-02	7,8E-02	1,3E-03	0,789	599	11
18	4,8E-02	4,8E-02	7,2E-02	9,2E-04	0,403	440	14	4,9E-02	4,3E-02	6,3E-02	8,5E-04	0,402	472	14	7,0E-02	7,6E-02	1,0E-01	1,4E-03	0,788	578	12	7,3E-02	6,8E-02	9,2E-02	1,3E-03	0,788	615	12
21	6,2E-02	4,2E-02	6,1E-02	9,0E-04	0,403	447	12	5,6E-02	4,6E-02	4,9E-02	8,3E-04	0,402	486	13	9,1E-02	7,1E-02	9,0E-02	1,4E-03	0,788	573	11	8,3E-02	7,1E-02	7,8E-02	1,3E-03	0,788	615	11
23	6,1E-02	4,5E-02	6,2E-02	9,1E-04	0,403	440	13	5,1E-02	4,3E-02	5,2E-02	8,1E-04	0,402	499	13	9,1E-02	7,5E-02	8,6E-02	1,4E-03	0,788	574	11	7,9E-02	6,9E-02	7,7E-02	1,2E-03	0,788	635	12
36	3,8E-02	3,8E-02	4,3E-02	6,5E-04	0,391	603	13	3,1E-02	3,7E-02	3,7E-02	5,8E-04	0,392	671	13	6,1E-02	6,5E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,777	732	12	5,2E-02	6,5E-02	5,9E-02	9,7E-04	0,778	803	12
39	3,1E-02	4,5E-02	3,7E-02	6,2E-04	0,391	634	13	3,4E-02	4,0E-02	3,3E-02	5,9E-04	0,392	665	13	5,2E-02	7,2E-02	6,2E-02	1,0E-03	0,777	763	12	6,0E-02	6,1E-02	5,6E-02	9,7E-04	0,776	797	12
43	3,1E-02	4,1E-02	4,7E-02	6,5E-04	0,392	604	13	3,5E-02	3,4E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,392	686	13	5,7E-02	6,2E-02	7,2E-02	1,0E-03	0,778	744	12	5,9E-02	5,6E-02	5,8E-02	9,5E-04	0,777	820	12
50	3,8E-02	4,1E-02	3,2E-02	6,1E-04	0,392	644	13	2,6E-02	4,9E-02	2,9E-02	5,7E-04	0,393	687	13	6,3E-02	6,6E-02	5,4E-02	1,0E-03	0,779	775	12	4,6E-02	7,4E-02	4,9E-02	9,3E-04	0,779	834	12
57	2,9E-02	4,3E-02	3,9E-02	6,1E-04	0,392	644	13	2,6E-02	3,6E-02	4,2E-02	5,7E-04	0,392	684	13	5,1E-02	6,6E-02	6,5E-02	1,0E-03	0,778	781	12	4,5E-02	6,0E-02	6,5E-02	9,4E-04	0,779	829	12
64	2,9E-02	4,0E-02	4,4E-02	6,1E-04	0,392	638	13	3,0E-02	3,0E-02	3,5E-02	5,3E-04	0,392	746	13	5,2E-02	6,2E-02	6,9E-02	9,9E-04	0,779	783	12	5,2E-02	5,0E-02	5,8E-02	8,8E-04	0,778	883	12
72	3,4E-02	3,6E-02	4,3E-02	6,2E-04	0,392	635	13	3,0E-02	3,4E-02	3,6E-02	5,5E-04	0,392	709	14	5,9E-02	5,6E-02	6,8E-02	1,0E-03	0,778	778	12	5,2E-02	5,7E-02	5,7E-02	9,1E-04	0,779	856	12
78	3,4E-02	3,5E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,392	681	13	3,3E-02	3,6E-02	2,4E-02	5,2E-04	0,392	760	14	5,5E-02	5,7E-02	6,1E-02	9,4E-04	0,777	823	12	5,5E-02	5,8E-02	4,3E-02	8,6E-04	0,778	907	12
84	3,6E-02	3,5E-02	3,0E-02	5,5E-04	0,393	712	14	3,2E-02	3,0E-02	3,4E-02	5,3E-04	0,392	740	14	5,9E-02	5,6E-02	5,1E-02	9,0E-04	0,779	860	12	5,4E-02	4,9E-02	5,5E-02	8,7E-04	0,778	895	13

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,8E-02	7,9E-02	5,6E-02	1,2E-03	0,403	338	12	4,4E-02	6,6E-02	7,1E-02	9,7E-04	0,402	414	13	1,1E-01	1,2E-01	1,0E-01	1,7E-03	0,792	453	12	8,4E-02	1,1E-01	1,0E-01	1,6E-03	0,792	500	12
4	5,9E-02	4,9E-02	5,6E-02	8,8E-04	0,403	456	14	5,7E-02	6,9E-02	5,4E-02	9,6E-04	0,403	417	14	9,7E-02	8,4E-02	8,9E-02	1,5E-03	0,792	546	13	1,0E-01	1,1E-01	8,1E-02	1,6E-03	0,792	499	12
7	5,1E-02	4,4E-02	5,8E-02	8,2E-04	0,402	489	15	4,2E-02	6,3E-02	4,8E-02	8,2E-04	0,403	488	15	8,6E-02	7,2E-02	9,2E-02	1,3E-03	0,792	587	14	7,1E-02	8,3E-02	8,2E-02	1,3E-03	0,792	623	14
9	5,4E-02	4,4E-02	5,2E-02	8,1E-04	0,402	498	15	4,6E-02	5,1E-02	4,5E-02	7,6E-04	0,403	528	15	7,9E-02	7,4E-02	8,9E-02	1,3E-03	0,792	610	14	7,4E-02	7,6E-02	7,4E-02	1,2E-03	0,792	658	14
11	5,2E-02	4,4E-02	4,9E-02	7,8E-04	0,403	516	16	5,7E-02	3,8E-02	4,4E-02	7,5E-04	0,402	537	16	8,3E-02	7,1E-02	7,7E-02	1,2E-03	0,791	636	14	7,7E-02	6,5E-02	7,2E-02	1,2E-03	0,792	688	14
14	6,8E-02	4,1E-02	4,8E-02	8,4E-04	0,402	478	16	4,0E-02	5,3E-02	4,1E-02	7,2E-04	0,402	556	17	9,8E-02	6,4E-02	7,8E-02	1,3E-03	0,792	615	14	6,4E-02	7,8E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,792	703	15
18	3,8E-02	3,7E-02	5,9E-02	7,4E-04	0,403	548	19	3,8E-02	3,5E-02	5,0E-02	6,8E-04	0,403	593	19	6,0E-02	6,2E-02	8,7E-02	1,1E-03	0,792	696	17	6,0E-02	5,5E-02	7,7E-02	1,1E-03	0,792	745	16
21	5,1E-02	3,6E-02	5,0E-02	7,5E-04	0,404	536	17	4,6E-02	3,8E-02	4,1E-02	6,9E-04	0,403	583	17	7,7E-02	6,3E-02	7,9E-02	1,2E-03	0,792	665	15	7,0E-02	6,1E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,792	723	15
23	5,0E-02	3,8E-02	5,0E-02	7,6E-04	0,403	532	17	4,2E-02	3,6E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,404	609	18	7,6E-02	6,5E-02	7,4E-02	1,2E-03	0,792	674	15	6,5E-02	5,9E-02	6,6E-02	1,0E-03	0,792	756	16
36	3,3E-02	3,2E-02	3,7E-02	5,6E-04	0,403	719	17	2,7E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,0E-04	0,403	807	18	5,4E-02	5,7E-02	6,0E-02	9,3E-04	0,792	849	16	4,4E-02	5,7E-02	5,1E-02	8,4E-04	0,792	941	16
39	2,7E-02	4,0E-02	3,1E-02	5,3E-04	0,403	757	17	2,9E-02	3,4E-02	2,9E-02	5,1E-04	0,403	798	17	4,7E-02	6,4E-02	5,3E-02	9,0E-04	0,792	881	16	5,2E-02	5,3E-02	4,9E-02	8,5E-04	0,792	937	16
43	2,7E-02	3,5E-02	4,0E-02	5,6E-04	0,403	723	17	3,0E-02	2,9E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,403	829	17	5,1E-02	5,5E-02	6,2E-02	9,1E-04	0,792	867	16	5,1E-02	4,9E-02	4,9E-02	8,2E-04	0,792	965	16
50	3,2E-02	3,6E-02	2,8E-02	5,3E-04	0,403	766	17	2,2E-02	4,1E-02	2,5E-02	4,9E-04	0,403	831	18	5,6E-02	5,8E-02	4,8E-02	8,8E-04	0,792	895	16	4,3E-02	6,4E-02	4,3E-02	8,3E-04	0,792	960	16
57	2,5E-02	3,6E-02	3,3E-02	5,2E-04	0,404	775	18	2,3E-02	3,1E-02	3,4E-02	4,8E-04	0,403	837	18	4,6E-02	5,7E-02	5,5E-02	8,7E-04	0,792	910	16	4,0E-02	5,2E-02	5,5E-02	8,1E-04	0,792	976	16
64	2,7E-02	3,7E-02	3,9E-02	5,6E-04	0,415	739	18	2,6E-02	2,6E-02	2,9E-02	4,5E-04	0,404	903	18	4,6E-02	5,4E-02	5,8E-02	8,6E-04	0,792	917	16	4,5E-02	4,4E-02	4,9E-02	7,6E-04	0,792	1041	17
72	2,9E-02	3,0E-02	3,7E-02	5,3E-04	0,403	765	18	2,5E-02	2,9E-02	3,1E-02	4,7E-04	0,403	863	18	5,1E-02	5,0E-02	5,9E-02	8,7E-04	0,792	906	16	4,4E-02	4,9E-02	4,9E-02	7,8E-04	0,792	1015	17
78	2,9E-02	3,0E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,404	829	18	2,7E-02	3,0E-02	2,1E-02	4,3E-04	0,403	934	19	4,8E-02	5,0E-02	5,2E-02	8,2E-04	0,791	968	16	4,6E-02	5,0E-02	3,7E-02	7,3E-04	0,792	1082	17
84	2,9E-02	2,9E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,403	882	19	2,6E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,4E-04	0,403	925	19	4,8E-02	4,8E-02	4,4E-02	7,7E-04	0,792	1035	17	4,5E-02	4,2E-02	4,6E-02	7,3E-04	0,792	1082	17

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,8E-02	7,1E-02	5,2E-02	1,1E-03	0,403	373	15	4,1E-02	6,1E-02	6,5E-02	9,0E-04	0,403	446	15	9,1E-02	1,0E-01	9,4E-02	1,6E-03	0,790	508	14	7,5E-02	9,6E-02	9,1E-02	1,4E-03	0,790	559	14
4	5,4E-02	4,4E-02	5,2E-02	8,1E-04	0,402	496	17	5,4E-02	6,4E-02	4,8E-02	8,9E-04	0,403	453	17	8,9E-02	7,6E-02	8,1E-02	1,3E-03	0,790	599	15	9,1E-02	1,0E-01	7,2E-02	1,4E-03	0,790	554	15
7	4,5E-02	4,0E-02	5,3E-02	7,4E-04	0,402	541	18	3,8E-02	5,6E-02	4,4E-02	7,4E-04	0,402	544	18	7,8E-02	6,5E-02	8,4E-02	1,2E-03	0,790	647	17	6,5E-02	7,2E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,790	697	17
9	4,7E-02	4,1E-02	4,7E-02	7,2E-04	0,402	555	19	4,1E-02	4,5E-02	4,1E-02	6,8E-04	0,403	589	19	7,0E-02	6,8E-02	8,0E-02	1,2E-03	0,790	673	17	6,6E-02	6,8E-02	6,6E-02	1,1E-03	0,790	736	17
11	4,6E-02	4,0E-02	4,4E-02	6,9E-04	0,402	579	20	5,1E-02	3,3E-02	3,9E-02	6,7E-04	0,402	605	20	7,5E-02	6,4E-02	7,0E-02	1,1E-03	0,790	705	18	6,8E-02	5,8E-02	6,5E-02	1,0E-03	0,790	769	18
14	6,0E-02	3,6E-02	4,3E-02	7,5E-04	0,402	539	20	3,5E-02	4,7E-02	3,7E-02	6,4E-04	0,402	629	21	8,7E-02	5,7E-02	7,0E-02	1,1E-03	0,789	687	18	5,6E-02	6,9E-02	6,1E-02	1,0E-03	0,789	790	18
18	3,2E-02	3,2E-02	5,0E-02	6,2E-04	0,403	648	24	3,3E-02	3,0E-02	4,3E-02	5,8E-04	0,403	692	23	5,3E-02	5,4E-02	7,5E-02	1,0E-03	0,790	792	20	5,3E-02	4,9E-02	6,7E-02	9,3E-04	0,790	853	20
21	4,4E-02	3,3E-02	4,4E-02	6,6E-04	0,403	609	21	4,0E-02	3,4E-02	3,6E-02	6,1E-04	0,403	661	21	6,7E-02	5,7E-02	7,0E-02	1,1E-03	0,789	744	19	6,2E-02	5,4E-02	6,0E-02	9,7E-04	0,790	814	19
23	4,3E-02	3,4E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,403	610	21	3,6E-02	3,1E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,403	701	23	6,7E-02	5,9E-02	6,5E-02	1,0E-03	0,790	759	19	5,7E-02	5,2E-02	5,8E-02	9,2E-04	0,790	855	20
36	2,9E-02	2,8E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,404	817	22	2,4E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,4E-04	0,403	916	22	4,3E-02	4,6E-02	4,8E-02	7,5E-04	0,750	1001	19	3,5E-02	4,6E-02	4,0E-02	6,7E-04	0,751	1122	20
39	2,4E-02	3,5E-02	2,7E-02	4,7E-04	0,403	853	21	2,5E-02	2,9E-02	2,6E-02	4,5E-04	0,403	906	22	3,9E-02	5,1E-02	4,2E-02	7,3E-04	0,752	1034	19	4,2E-02	4,2E-02	3,9E-02	6,7E-04	0,751	1114	19
43	2,4E-02	3,1E-02	3,4E-02	4,9E-04	0,403	821	22	2,7E-02	2,6E-02	2,5E-02	4,3E-04	0,403	942	22	4,6E-02	4,9E-02	5,4E-02	8,2E-04	0,789	967	19	4,5E-02	4,4E-02	4,3E-02	7,3E-04	0,790	1083	19
50	2,8E-02	3,1E-02	2,6E-02	4,7E-04	0,403	866	22	2,0E-02	3,6E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,403	932	22	5,0E-02	5,2E-02	4,4E-02	7,9E-04	0,790	996	19	3,9E-02	5,6E-02	3,9E-02	7,3E-04	0,790	1078	20
57	2,3E-02	3,2E-02	2,9E-02	4,6E-04	0,403	886	22	2,0E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,2E-04	0,404	960	23	4,2E-02	5,1E-02	4,9E-02	7,7E-04	0,790	1020	20	3,6E-02	4,6E-02	4,9E-02	7,2E-04	0,790	1097	20
64	2,2E-02	3,0E-02	3,1E-02	4,6E-04	0,403	878	22	2,2E-02	2,3E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,403	1032	23	4,2E-02	4,8E-02	5,1E-02	7,7E-04	0,790	1028	20	4,0E-02	3,9E-02	4,3E-02	6,8E-04	0,790	1169	20
72	2,5E-02	2,6E-02	3,3E-02	4,6E-04	0,403	872	22	2,2E-02	2,5E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,403	991	23	4,5E-02	4,5E-02	5,2E-02	7,8E-04	0,789	1018	20	3,9E-02	4,3E-02	4,3E-02	6,9E-04	0,790	1149	20
78	2,5E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,404	954	23	2,3E-02	2,6E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,403	1077	24	4,3E-02	4,5E-02	4,5E-02	7,3E-04	0,790	1087	20	4,0E-02	4,4E-02	3,3E-02	6,5E-04	0,790	1224	21
84	2,4E-02	2,6E-02	2,2E-02	3,9E-04	0,403	1027	24	2,2E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,403	1079	24	4,2E-02	4,2E-02	3,9E-02	6,7E-04	0,791	1179	21	3,9E-02	3,8E-02	4,0E-02	6,4E-04	0,790	1233	21

Moules à 6Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,0E-02	6,5E-02	4,8E-02	9,9E-04	0,397	402	17	3,8E-02	5,7E-02	6,0E-02	8,4E-04	0,397	475	18	8,3E-02	9,6E-02	8,8E-02	1,4E-03	0,777	541	17	7,0E-02	8,9E-02	8,4E-02	1,3E-03	0,777	594	17
4	4,9E-02	4,0E-02	4,8E-02	7,4E-04	0,397	536	20	5,0E-02	5,9E-02	4,2E-02	8,1E-04	0,397	490	20	8,1E-02	7,0E-02	7,5E-02	1,2E-03	0,777	641	18	8,3E-02	9,2E-02	6,5E-02	1,3E-03	0,777	601	18
7	4,1E-02	3,6E-02	4,8E-02	6,7E-04	0,397	591	22	3,4E-02	5,0E-02	4,0E-02	6,7E-04	0,397	597	22	7,0E-02	6,0E-02	7,6E-02	1,1E-03	0,777	701	20	5,9E-02	6,4E-02	6,7E-02	1,0E-03	0,778	760	20
9	4,2E-02	3,7E-02	4,2E-02	6,5E-04	0,397	612	23	3,7E-02	4,0E-02	3,7E-02	6,1E-04	0,397	651	23	6,3E-02	6,2E-02	7,2E-02	1,1E-03	0,777	732	20	5,9E-02	6,1E-02	6,0E-02	9,7E-04	0,778	804	21
11	4,1E-02	3,6E-02	3,9E-02	6,2E-04	0,398	641	24	4,6E-02	3,0E-02	3,5E-02	5,9E-04	0,398	671	24	6,7E-02	5,8E-02	6,3E-02	1,0E-03	0,779	768	21	6,1E-02	5,3E-02	5,8E-02	9,3E-04	0,779	841	21
14	5,3E-02	3,2E-02	3,8E-02	6,6E-04	0,397	600	24	3,1E-02	4,1E-02	3,3E-02	5,7E-04	0,398	701	25	7,7E-02	5,2E-02	6,3E-02	1,0E-03	0,777	755	21	5,0E-02	6,1E-02	5,5E-02	8,9E-04	0,777	869	22
18	2,8E-02	2,7E-02	4,3E-02	5,4E-04	0,398	736	29	2,8E-02	2,6E-02	3,8E-02	5,1E-04	0,398	787	28	4,7E-02	4,8E-02	6,6E-02	8,8E-04	0,776	880	24	4,6E-02	4,3E-02	5,8E-02	8,1E-04	0,776	952	24
21	3,8E-02	2,9E-02	3,9E-02	5,8E-04	0,397	682	25	3,5E-02	3,0E-02	3,2E-02	5,4E-04	0,398	740	26	5,9E-02	5,2E-02	6,3E-02	9,5E-04	0,777	817	22	5,5E-02	4,8E-02	5,4E-02	8,7E-04	0,776	897	23
23	3,7E-02	3,1E-02	3,8E-02	5,8E-04	0,397	684	26	3,1E-02	2,8E-02	3,2E-02	5,0E-04	0,398	793	27	5,9E-02	5,3E-02	5,8E-02	9,3E-04	0,776	837	23	5,0E-02	4,7E-02	5,2E-02	8,2E-04	0,776	947	23
36	2,6E-02	2,5E-02	2,9E-02	4,3E-04	0,398	915	26	2,1E-02	2,5E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,398	1028	27	4,3E-02	4,5E-02	4,8E-02	7,4E-04	0,774	1039	23	3,5E-02	4,6E-02	4,0E-02	6,7E-04	0,775	1164	24
39	2,2E-02	3,1E-02	2,4E-02	4,2E-04	0,398	949	26	2,2E-02	2,6E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,398	1016	26	4,0E-02	5,1E-02	4,2E-02	7,2E-04	0,775	1071	23	4,2E-02	4,2E-02	3,9E-02	6,7E-04	0,776	1153	23
43	2,2E-02	2,7E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,398	921	26	2,4E-02	2,3E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,398	1055	27	4,1E-02	4,4E-02	4,8E-02	7,3E-04	0,774	1061	23	4,0E-02	3,9E-02	3,9E-02	6,5E-04	0,775	1187	23
50	2,5E-02	2,7E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,397	968	26	1,8E-02	3,1E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,397	1048	27	4,5E-02	4,6E-02	4,0E-02	7,1E-04	0,776	1090	23	3,5E-02	4,9E-02	3,4E-02	6,5E-04	0,775	1186	24
57	2,0E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,398	1000	27	1,8E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,397	1082	27	3,9E-02	4,5E-02	4,3E-02	6,9E-04	0,775	1120	24	3,2E-02	4,1E-02	4,3E-02	6,4E-04	0,776	1206	24
64	2,0E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,397	991	27	2,0E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,398	1163	28	3,8E-02	4,3E-02	4,5E-02	6,8E-04	0,775	1132	24	3,5E-02	3,5E-02	3,9E-02	6,0E-04	0,775	1286	24
72	2,2E-02	2,3E-02	2,9E-02	4,0E-04	0,397	984	27	1,9E-02	2,2E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,398	1122	28	4,0E-02	4,0E-02	4,6E-02	6,9E-04	0,775	1121	24	3,5E-02	3,8E-02	3,8E-02	6,1E-04	0,775	1271	24
78	2,2E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,398	1078	28	2,0E-02	2,3E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,398	1225	29	3,8E-02	4,0E-02	4,0E-02	6,5E-04	0,776	1196	24	3,5E-02	3,9E-02	2,9E-02	5,7E-04	0,775	1354	25
84	2,1E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,399	1174	29	1,9E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,398	1232	29	3,6E-02	3,7E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,775	1315	25	3,4E-02	3,4E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,775	1369	25

Moules à 10Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,3E-02	6,0E-02	4,5E-02	9,0E-04	0,385	428	21	3,5E-02	5,2E-02	5,5E-02	7,6E-04	0,383	502	21	7,4E-02	8,8E-02	8,1E-02	1,3E-03	0,752	575	20	6,3E-02	8,1E-02	7,6E-02	1,2E-03	0,754	637	20
4	4,5E-02	3,6E-02	4,3E-02	6,7E-04	0,382	572	24	4,5E-02	5,3E-02	3,8E-02	7,3E-04	0,383	524	24	7,5E-02	6,4E-02	6,9E-02	1,1E-03	0,752	676	22	7,7E-02	8,3E-02	5,9E-02	1,2E-03	0,753	639	21
7	3,6E-02	3,3E-02	4,3E-02	6,0E-04	0,384	636	26	3,1E-02	4,4E-02	3,6E-02	5,9E-04	0,383	646	26	6,3E-02	5,4E-02	6,9E-02	1,0E-03	0,749	745	23	5,4E-02	5,8E-02	6,1E-02	9,3E-04	0,753	810	23
9	3,7E-02	3,3E-02	3,7E-02	5,8E-04	0,383	666	27	3,3E-02	3,6E-02	3,3E-02	5,4E-04	0,385	708	28	5,6E-02	5,7E-02	6,5E-02	9,6E-04	0,751	780	24	5,3E-02	5,5E-02	5,4E-02	8,7E-04	0,752	864	24
11	3,6E-02	3,2E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,385	698	28	4,0E-02	2,6E-02	3,1E-02	5,2E-04	0,384	737	29	6,0E-02	5,3E-02	5,7E-02	9,2E-04	0,755	822	25	5,5E-02	4,8E-02	5,2E-02	8,3E-04	0,757	910	25
14	4,6E-02	2,9E-02	3,3E-02	5,8E-04	0,382	658	28	2,8E-02	3,6E-02	2,9E-02	5,0E-04	0,384	768	30	6,8E-02	4,8E-02	5,6E-02	9,2E-04	0,753	815	25	4,5E-02	5,4E-02	5,0E-02	8,0E-04	0,751	937	26
18	2,5E-02	2,3E-02	3,7E-02	4,7E-04	0,383	822	33	2,4E-02	2,3E-02	3,3E-02	4,4E-04	0,383	874	33	4,1E-02	4,3E-02	5,8E-02	7,7E-04	0,747	966	28	4,1E-02	3,8E-02	5,1E-02	7,2E-04	0,750	1043	28
21	3,3E-02	2,6E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,381	750	30	3,1E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,383	814	31	5,2E-02	4,7E-02	5,5E-02	8,5E-04	0,750	887	26	4,9E-02	4,3E-02	4,8E-02	7,7E-04	0,749	968	26
23	3,2E-02	2,7E-02	3,3E-02	5,1E-04	0,385	757	31	2,7E-02	2,4E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,383	884	32	5,2E-02	4,8E-02	5,1E-02	8,3E-04	0,747	904	27	4,4E-02	4,3E-02	4,6E-02	7,3E-04	0,748	1023	27
36	2,3E-02	2,2E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,382	1009	31	1,8E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,383	1128	32	3,9E-02	4,0E-02	4,3E-02	6,7E-04	0,744	1112	27	3,1E-02	4,1E-02	3,6E-02	6,0E-04	0,750	1260	28
39	2,0E-02	2,7E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,383	1038	30	2,0E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,383	1115	31	3,6E-02	4,6E-02	3,7E-02	6,5E-04	0,748	1148	27	3,7E-02	3,7E-02	3,5E-02	6,0E-04	0,745	1238	27
43	2,0E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,382	1013	31	2,1E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,381	1155	31	3,7E-02	4,0E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,744	1132	27	3,6E-02	3,5E-02	3,4E-02	5,8E-04	0,747	1280	27
50	2,2E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,383	1060	31	1,6E-02	2,7E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,383	1152	32	4,0E-02	4,1E-02	3,6E-02	6,4E-04	0,747	1173	27	3,2E-02	4,3E-02	3,1E-02	5,8E-04	0,746	1277	28
57	1,8E-02	2,4E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,383	1106	32	1,6E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,382	1192	32	3,5E-02	4,0E-02	3,8E-02	6,2E-04	0,747	1206	28	2,9E-02	3,7E-02	3,8E-02	5,7E-04	0,750	1304	28
64	1,8E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,382	1091	32	1,7E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,382	1274	33	3,4E-02	3,8E-02	3,9E-02	6,1E-04	0,748	1231	28	3,2E-02	3,2E-02	3,4E-02	5,4E-04	0,749	1388	28
72	1,9E-02	2,0E-02	2,5E-02	3,5E-04	0,382	1086	31	1,7E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,382	1237	33	3,6E-02	3,6E-02	4,1E-02	6,2E-04	0,749	1216	27	3,1E-02	3,4E-02	3,4E-02	5,4E-04	0,750	1382	28
78	1,9E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,382	1186	33	1,7E-02	2,0E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,383	1355	34	3,4E-02	3,6E-02	3,5E-02	5,8E-04	0,746	1286	28	3,1E-02	3,5E-02	2,6E-02	5,1E-04	0,746	1463	29
84	1,8E-02	1,9E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,383	1312	34	1,6E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,381	1366	34	3,2E-02	3,3E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,748	1434	29	3,0E-02	3,0E-02	3,1E-02	5,0E-04	0,750	1489	29

Annexe 18 – Résultats d'essais à 20°C et 45% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,3E-01	6,8E-02	6,9E-02	1,4E-03	0,403	279	11	7,5E-02	7,6E-02	4,8E-02	1,1E-03	0,403	381	12
4	1,5E-01	4,3E-02	1,4E-01	1,8E-03	0,404	220	11	4,3E-02	7,7E-02	6,5E-02	9,9E-04	0,403	408	13
7	8,6E-02	4,6E-02	4,6E-02	9,7E-04	0,403	417	16	4,8E-02	4,6E-02	6,0E-02	8,2E-04	0,404	492	16
9	7,0E-02	5,6E-02	3,6E-02	8,8E-04	0,404	458	17	3,6E-02	4,4E-02	5,0E-02	6,9E-04	0,403	581	18
11	7,7E-02	5,7E-02	3,3E-02	9,1E-04	0,403	445	17	4,3E-02	4,7E-02	4,5E-02	7,3E-04	0,404	556	18
14	5,3E-02	2,9E-02	7,2E-02	8,3E-04	0,403	484	18	4,4E-02	4,1E-02	3,8E-02	6,6E-04	0,404	616	19
18	3,3E-02	4,6E-02	4,5E-02	6,9E-04	0,403	585	20	4,2E-02	3,2E-02	5,1E-02	6,9E-04	0,402	580	20
21	5,4E-02	3,0E-02	3,6E-02	6,7E-04	0,403	601	21	3,4E-02	3,4E-02	4,2E-02	6,1E-04	0,403	658	21
23	4,1E-02	3,9E-02	3,2E-02	6,2E-04	0,402	650	22	3,6E-02	3,1E-02	4,6E-02	6,2E-04	0,402	644	21
36	2,5E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,392	994	23	2,4E-02	2,2E-02	3,2E-02	4,3E-04	0,392	904	22
39	2,1E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,8E-04	0,392	1045	24	3,3E-02	2,6E-02	2,2E-02	4,5E-04	0,391	870	22
43	2,2E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,6E-04	0,392	1083	24	2,7E-02	2,3E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,391	927	22
50	1,7E-02	2,9E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,393	1128	24	1,7E-02	3,1E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,393	998	23
57	1,5E-02	3,1E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,392	1111	24	2,3E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,392	1032	23
64	2,4E-02	1,8E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,393	1078	24	2,3E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,392	1022	23
72	1,4E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,408	1222	25	2,2E-02	2,0E-02	2,7E-02	3,8E-04	0,392	1019	23
78	1,3E-02	2,2E-02	2,3E-02	3,2E-04	0,393	1214	25	1,8E-02	2,4E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,392	1117	24

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,9E-01	1,0E-01	1,0E-01	2,1E-03	0,790	372	10	1,2E-01	1,3E-01	7,0E-02	1,7E-03	0,789	463	10
4	1,9E-01	7,6E-02	1,3E-01	2,2E-03	0,789	367	11	6,9E-02	1,1E-01	9,0E-02	1,4E-03	0,790	557	12
7	1,2E-01	6,2E-02	7,4E-02	1,4E-03	0,790	572	13	7,4E-02	6,8E-02	8,7E-02	1,2E-03	0,790	649	13
9	8,6E-02	8,1E-02	6,0E-02	1,2E-03	0,790	645	14	5,5E-02	6,8E-02	7,5E-02	1,1E-03	0,791	748	15
11	9,9E-02	5,7E-02	6,6E-02	1,2E-03	0,790	658	15	6,5E-02	7,1E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,788	727	15
14	7,0E-02	4,8E-02	9,8E-02	1,2E-03	0,789	674	15	6,7E-02	6,2E-02	5,8E-02	1,0E-03	0,790	793	16
18	5,0E-02	6,7E-02	6,9E-02	1,0E-03	0,788	764	16	6,3E-02	5,2E-02	7,6E-02	1,1E-03	0,788	745	16
21	7,8E-02	4,8E-02	5,5E-02	1,0E-03	0,789	788	17	5,4E-02	5,4E-02	6,2E-02	9,4E-04	0,788	835	17
23	6,1E-02	5,9E-02	4,9E-02	9,4E-04	0,789	836	17	5,5E-02	5,1E-02	6,9E-02	9,7E-04	0,788	812	17
36	4,4E-02	3,6E-02	4,0E-02	6,7E-04	0,778	1164	19	4,1E-02	3,9E-02	5,3E-02	7,4E-04	0,778	1055	18
39	3,7E-02	4,4E-02	3,5E-02	6,5E-04	0,777	1204	19	5,3E-02	4,3E-02	3,9E-02	7,5E-04	0,777	1038	18
43	3,5E-02	4,5E-02	3,3E-02	6,3E-04	0,777	1237	19	4,5E-02	3,9E-02	4,3E-02	7,1E-04	0,778	1098	18
50	3,1E-02	4,8E-02	2,9E-02	6,0E-04	0,777	1301	19	3,1E-02	5,0E-02	4,0E-02	6,7E-04	0,778	1163	19
57	2,8E-02	5,0E-02	3,2E-02	6,1E-04	0,778	1282	19	3,9E-02	4,4E-02	3,3E-02	6,5E-04	0,778	1199	19
64	4,2E-02	3,1E-02	4,1E-02	6,3E-04	0,778	1227	19	4,0E-02	4,0E-02	3,9E-02	6,6E-04	0,778	1183	18
72	2,5E-02	3,7E-02	3,7E-02	5,5E-04	0,778	1412	21	3,9E-02	3,5E-02	4,4E-02	6,5E-04	0,778	1191	19
78	2,5E-02	3,7E-02	3,8E-02	5,6E-04	0,778	1401	20	3,2E-02	4,2E-02	3,6E-02	6,0E-04	0,779	1287	19

Date	Moules à 1Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,1E-01	5,3E-02	5,7E-02	1,2E-03	0,403	336	14	6,5E-02	6,4E-02	3,9E-02	9,0E-04	0,403	447	14
4	1,3E-01	3,2E-02	1,2E-01	1,5E-03	0,403	264	15	3,5E-02	6,1E-02	5,2E-02	7,9E-04	0,403	509	16
7	6,8E-02	3,4E-02	3,5E-02	7,4E-04	0,402	544	20	3,5E-02	3,4E-02	4,5E-02	6,1E-04	0,403	660	21
9	5,2E-02	4,0E-02	2,7E-02	6,5E-04	0,403	624	22	2,5E-02	3,2E-02	3,5E-02	4,9E-04	0,402	817	24
11	5,5E-02	3,9E-02	2,5E-02	6,4E-04	0,402	623	22	3,1E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,403	788	24
14	3,7E-02	2,0E-02	5,2E-02	5,9E-04	0,410	695	24	3,1E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,403	897	26
18	2,2E-02	3,2E-02	3,1E-02	4,7E-04	0,403	852	26	3,0E-02	2,2E-02	3,6E-02	4,8E-04	0,403	835	26
21	3,8E-02	2,0E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,403	877	26	2,3E-02	2,2E-02	2,8E-02	4,1E-04	0,403	995	28
23	2,7E-02	2,5E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,403	981	28	2,4E-02	2,1E-02	3,1E-02	4,2E-04	0,404	961	28
36	1,7E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,403	1513	29	1,7E-02	1,5E-02	2,2E-02	2,9E-04	0,403	1368	28
39	1,4E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,403	1617	31	2,3E-02	1,8E-02	1,5E-02	3,1E-04	0,404	1315	27
43	1,5E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,403	1662	30	1,8E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,403	1404	27
50	1,1E-02	2,0E-02	1,0E-02	2,3E-04	0,403	1743	31	1,1E-02	2,1E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,403	1537	29
57	9,4E-03	2,1E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,403	1707	30	1,5E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,404	1595	28
64	1,6E-02	1,2E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,403	1651	30	1,5E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,404	1574	28
72	8,0E-03	1,4E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,403	1976	33	1,5E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,403	1562	27
78	7,9E-03	1,4E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,403	1929	31	1,1E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,404	1751	29

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,6E-01	8,0E-02	8,8E-02	1,8E-03	0,792	450	13	1,1E-01	1,1E-01	6,1E-02	1,5E-03	0,792	526	13
4	1,5E-01	6,1E-02	1,0E-01	1,7E-03	0,792	461	14	6,0E-02	8,9E-02	7,6E-02	1,2E-03	0,792	661	14
7	9,4E-02	4,8E-02	5,9E-02	1,1E-03	0,792	727	17	6,0E-02	5,2E-02	7,0E-02	9,7E-04	0,792	813	17
9	6,6E-02	6,0E-02	4,7E-02	9,4E-04	0,792	846	18	4,1E-02	5,5E-02	5,6E-02	8,1E-04	0,792	976	19
11	7,5E-02	4,2E-02	5,3E-02	9,2E-04	0,792	861	19	5,0E-02	5,3E-02	5,0E-02	8,2E-04	0,791	964	20
14	5,1E-02	3,7E-02	7,4E-02	8,8E-04	0,791	904	20	5,1E-02	4,5E-02	4,4E-02	7,4E-04	0,792	1066	21
18	3,7E-02	4,9E-02	5,0E-02	7,6E-04	0,792	1040	22	4,9E-02	3,7E-02	5,8E-02	8,0E-04	0,792	985	21
21	5,7E-02	3,3E-02	4,2E-02	7,3E-04	0,792	1079	22	4,0E-02	3,9E-02	4,5E-02	6,9E-04	0,792	1153	22
23	4,5E-02	4,1E-02	3,7E-02	6,8E-04	0,792	1163	23	4,1E-02	3,7E-02	5,1E-02	7,1E-04	0,792	1108	22
36	3,1E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,8E-04	0,792	1643	24	3,0E-02	2,9E-02	3,8E-02	5,4E-04	0,792	1470	23
39	2,7E-02	3,2E-02	2,4E-02	4,6E-04	0,792	1713	25	4,0E-02	3,2E-02	2,8E-02	5,5E-04	0,792	1436	23
43	2,6E-02	3,2E-02	2,3E-02	4,5E-04	0,791	1754	25	3,2E-02	2,9E-02	3,1E-02	5,1E-04	0,791	1538	23
50	2,2E-02	3,5E-02	2,0E-02	4,3E-04	0,792	1851	25	2,3E-02	3,6E-02	2,8E-02	4,8E-04	0,792	1647	24
57	2,0E-02	3,7E-02	2,2E-02	4,4E-04	0,792	1817	25	2,8E-02	3,3E-02	2,4E-02	4,7E-04	0,791	1687	23
64	3,0E-02	2,2E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,792	1742	24	2,8E-02	2,9E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,792	1672	23
72	1,6E-02	2,7E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,792	2052	26	2,8E-02	2,6E-02	3,2E-02	4,7E-04	0,792	1679	23
78	1,7E-02	2,6E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,792	2045	26	2,2E-02	2,9E-02	2,6E-02	4,3E-04	0,791	1842	24

Moules à 3Hz

4,6 kN

Moule 5

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,6E-02	4,6E-02	5,2E-02	1,1E-03	0,403	383	17
4	1,1E-01	2,7E-02	1,0E-01	1,3E-03	0,403	303	18
7	5,8E-02	2,8E-02	3,0E-02	6,3E-04	0,402	638	24
9	4,2E-02	3,3E-02	2,3E-02	5,3E-04	0,402	758	26
11	4,6E-02	3,2E-02	2,0E-02	5,3E-04	0,402	764	27
14	2,9E-02	1,5E-02	4,2E-02	4,7E-04	0,402	851	28
18	1,7E-02	2,5E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,403	1076	31
21	3,0E-02	1,5E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,403	1104	31
23	2,1E-02	2,0E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,403	1267	33
36	1,3E-02	1,1E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,404	1957	35
39	1,1E-02	1,4E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,403	2106	36
43	1,1E-02	1,3E-02	9,0E-03	1,9E-04	0,404	2165	36
50	8,3E-03	1,6E-02	7,8E-03	1,8E-04	0,404	2259	36
57	7,2E-03	1,7E-02	8,8E-03	1,8E-04	0,404	2186	35
64	1,3E-02	8,7E-03	1,3E-02	1,9E-04	0,403	2114	35
72	5,8E-03	1,1E-02	1,1E-02	1,6E-04	0,404	2595	39
78	5,8E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,6E-04	0,404	2504	37

Moule 6

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,1E-02	5,9E-02	3,5E-02	8,3E-04	0,403	488	16
4	3,1E-02	5,4E-02	4,6E-02	7,0E-04	0,403	575	19
7	2,9E-02	2,9E-02	3,9E-02	5,1E-04	0,402	788	25
9	2,0E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,0E-04	0,402	1008	29
11	2,5E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,402	976	29
14	2,5E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,402	1128	31
18	2,4E-02	1,7E-02	2,9E-02	3,9E-04	0,403	1043	30
21	1,8E-02	1,7E-02	2,2E-02	3,1E-04	0,403	1281	33
23	1,9E-02	1,6E-02	2,4E-02	3,3E-04	0,403	1229	33
36	1,3E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,403	1759	33
39	1,8E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,404	1681	31
43	1,4E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,403	1793	31
50	8,8E-03	1,6E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,403	1973	33
57	1,2E-02	1,4E-02	9,5E-03	2,0E-04	0,403	2041	32
64	1,1E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,403	2019	33
72	1,1E-02	1,1E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,403	1984	31
78	8,4E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,404	2258	34

9 kN

Moule 5

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,3E-01	6,9E-02	8,0E-02	1,5E-03	0,790	513	15
4	1,4E-01	5,5E-02	8,7E-02	1,5E-03	0,790	519	16
7	8,1E-02	4,1E-02	5,2E-02	9,5E-04	0,790	836	20
9	5,6E-02	5,0E-02	4,0E-02	7,9E-04	0,790	996	22
11	6,2E-02	3,5E-02	4,5E-02	7,7E-04	0,790	1027	23
14	4,1E-02	3,1E-02	6,3E-02	7,3E-04	0,791	1082	24
18	3,1E-02	4,1E-02	4,1E-02	6,3E-04	0,790	1261	26
21	4,7E-02	2,7E-02	3,5E-02	6,0E-04	0,790	1311	27
23	3,6E-02	3,3E-02	3,0E-02	5,5E-04	0,790	1429	27
36	2,3E-02	1,9E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,749	2141	28
39	2,0E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,749	2241	29
43	2,0E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,790	2174	29
50	1,8E-02	2,9E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,790	2289	29
57	1,6E-02	3,1E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,790	2234	29
64	2,4E-02	1,8E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,790	2139	28
72	1,3E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,790	2554	31
78	1,3E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,1E-04	0,791	2533	30

Moule 6

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,9E-02	1,0E-01	5,6E-02	1,4E-03	0,790	575	15
4	5,5E-02	7,9E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,790	733	17
7	5,2E-02	4,5E-02	6,1E-02	8,4E-04	0,790	938	20
9	3,5E-02	4,8E-02	4,6E-02	6,9E-04	0,791	1145	23
11	4,3E-02	4,5E-02	4,2E-02	6,9E-04	0,790	1142	24
14	4,3E-02	3,7E-02	3,7E-02	6,2E-04	0,790	1277	25
18	4,1E-02	3,1E-02	4,8E-02	6,7E-04	0,790	1181	25
21	3,3E-02	3,1E-02	3,7E-02	5,6E-04	0,789	1404	27
23	3,3E-02	3,0E-02	4,2E-02	5,9E-04	0,790	1348	27
36	2,2E-02	2,2E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,748	1910	27
39	2,9E-02	2,4E-02	2,0E-02	4,0E-04	0,749	1856	26
43	2,6E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,790	1877	26
50	1,9E-02	2,9E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,790	2018	27
57	2,3E-02	2,7E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,790	2063	27
64	2,2E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,791	2051	27
72	2,2E-02	2,1E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,790	2046	27
78	1,8E-02	2,4E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,790	2263	28

Moules à 6Hz

4,6 kN

Moule 5

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,6E-02	4,0E-02	4,8E-02	9,4E-04	0,397	421	19
4	1,0E-01	2,3E-02	9,7E-02	1,2E-03	0,397	327	20
7	5,0E-02	2,4E-02	2,6E-02	5,4E-04	0,398	736	28
9	3,6E-02	2,8E-02	1,9E-02	4,5E-04	0,398	890	30
11	3,8E-02	2,6E-02	1,7E-02	4,4E-04	0,397	901	31
14	2,4E-02	1,3E-02	3,6E-02	4,0E-04	0,398	1004	33
18	1,4E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,398	1294	36
21	2,5E-02	1,2E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,398	1325	36
23	1,7E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,399	1543	39
36	1,1E-02	9,2E-03	1,0E-02	1,7E-04	0,400	2363	40
39	9,0E-03	1,1E-02	8,1E-03	1,6E-04	0,400	2553	43
43	8,9E-03	1,1E-02	7,4E-03	1,5E-04	0,400	2628	42
50	6,8E-03	1,4E-02	6,2E-03	1,5E-04	0,399	2701	43
57	5,8E-03	1,5E-02	7,1E-03	1,5E-04	0,400	2612	41
64	1,1E-02	7,1E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,399	2520	40
72	4,7E-03	9,1E-03	9,1E-03	1,3E-04	0,400	3133	47
78	4,6E-03	9,1E-03	1,0E-02	1,3E-04	0,399	3003	43

Moule 6

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,6E-02	5,4E-02	3,2E-02	7,6E-04	0,397	525	19
4	2,8E-02	4,8E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,397	639	22
7	2,5E-02	2,4E-02	3,4E-02	4,4E-04	0,398	905	29
9	1,7E-02	2,3E-02	2,4E-02	3,4E-04	0,399	1183	33
11	2,1E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,398	1145	33
14	2,1E-02	1,7E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,398	1343	35
18	2,0E-02	1,4E-02	2,4E-02	3,2E-04	0,398	1238	35
21	1,5E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,398	1541	38
23	1,5E-02	1,3E-02	2,0E-02	2,7E-04	0,398	1479	38
36	1,1E-02	9,7E-03	1,4E-02	1,9E-04	0,398	2113	38
39	1,5E-02	1,2E-02	9,1E-03	2,0E-04	0,398	2002	36
43	1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,398	2137	36
50	7,4E-03	1,4E-02	9,4E-03	1,7E-04	0,398	2360	38
57	9,7E-03	1,2E-02	7,8E-03	1,6E-04	0,398	2437	38
64	9,3E-03	1,1E-02	9,8E-03	1,6E-04	0,398	2415	38
72	9,4E-03	9,1E-03	1,2E-02	1,7E-04	0,398	2366	36
78	6,9E-03	1,1E-02	9,2E-03	1,5E-04	0,398	2694	40

9 kN

Moule 5

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,2E-01	6,2E-02	7,3E-02	1,4E-03	0,777	565	18
4	1,3E-01	5,0E-02	7,5E-02	1,4E-03	0,777	571	19
7	7,0E-02	3,6E-02	4,6E-02	8,3E-04	0,778	942	24
9	4,8E-02	4,3E-02	3,5E-02	6,9E-04	0,779	1135	26
11	5,1E-02	3,0E-02	3,9E-02	6,5E-04	0,778	1189	27
14	3,5E-02	2,7E-02	5,3E-02	6,2E-04	0,777	1249	29
18	2,6E-02	3,4E-02	3,5E-02	5,3E-04	0,777	1463	30
21	3,9E-02	2,3E-02	3,0E-02	5,1E-04	0,776	1521	31
23	3,1E-02	2,8E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,777	1663	32
36	2,1E-02	1,8E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,776	2365	33
39	1,9E-02	2,2E-02	1,6E-02	3,1E-04	0,777	2474	33
43	1,7E-02	2,2E-02	1,6E-02	3,1E-04	0,777	2523	33
50	1,5E-02	2,4E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,777	2659	34
57	1,4E-02	2,6E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,777	2590	33
64	2,1E-02	1,5E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,777	2478	33
72	1,1E-02	1,9E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,777	2973	35
78	1,1E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,778	2942	34

Moule 6

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,1E-01	9,5E-02	5,2E-02	1,3E-03	0,777	614	17
4	5,1E-02	7,1E-02	6,1E-02	9,8E-04	0,778	798	19
7	4,5E-02	3,9E-02	5,4E-02	7,4E-04	0,778	1049	24
9	3,1E-02	4,3E-02	4,0E-02	6,0E-04	0,778	1292	27
11	3,8E-02	3,8E-02	3,7E-02	6,0E-04	0,779	1297	28
14	3,7E-02	3,1E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,778	1461	29
18	3,5E-02	2,7E-02	4,1E-02	5,7E-04	0,777	1373	29
21	2,8E-02	2,7E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,777	1622	31
23	2,8E-02	2,6E-02	3,6E-02	5,0E-04	0,777	1559	31
36	2,1E-02	2,0E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,776	2081	31
39	2,8E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,777	2014	30
43	2,2E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,776	2158	30
50	1,6E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,776	2326	32
57	1,9E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,778	2366	31
64	1,9E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,776	2366	31
72	1,9E-02	1,8E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,777	2350	30
78	1,5E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,777	2603	32

Moules à 10Hz

4,6 kN

Moule 5

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,7E-02	3,6E-02	4,3E-02	8,5E-04	0,385	453	23
4	9,6E-02	2,1E-02	8,6E-02	1,1E-03	0,385	351	25
7	4,3E-02	2,0E-02	2,2E-02	4,6E-04	0,385	831	32
9	3,1E-02	2,4E-02	1,6E-02	3,8E-04	0,387	1009	35
11	3,3E-02	2,2E-02	1,5E-02	3,8E-04	0,386	1022	36
14	2,0E-02	1,1E-02	3,0E-02	3,3E-04	0,383	1152	38
18	1,2E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,386	1490	42
21	2,1E-02	1,0E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,385	1525	42
23	1,5E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,385	1793	45
36	9,4E-03	7,5E-03	8,4E-03	1,4E-04	0,386	2744	46
39	7,5E-03	9,4E-03	6,7E-03	1,3E-04	0,386	2943	49
43	7,2E-03	9,5E-03	6,3E-03	1,3E-04	0,387	3035	49
50	5,6E-03	1,1E-02	5,1E-03	1,2E-04	0,383	3123	50
57	4,9E-03	1,3E-02	6,0E-03	1,3E-04	0,386	2937	48
64	9,1E-03	5,9E-03	9,1E-03	1,3E-04	0,384	2871	46
72	4,0E-03	7,8E-03	7,8E-03	1,1E-04	0,386	3563	59
78	3,9E-03	7,7E-03	8,6E-03	1,1E-04	0,387	3436	50

Moule 6

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,1E-02	5,0E-02	2,9E-02	7,0E-04	0,386	555	22
4	2,6E-02	4,3E-02	3,6E-02	5,6E-04	0,385	689	27
7	2,1E-02	2,1E-02	2,9E-02	3,8E-04	0,385	1007	33
9	1,4E-02	2,0E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,383	1337	39
11	1,8E-02	1,8E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,384	1304	38
14	1,8E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,383	1517	41
18	1,7E-02	1,2E-02	2,0E-02	2,7E-04	0,384	1400	40
21	1,2E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,385	1763	44
23	1,3E-02	1,1E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,382	1697	44
36	9,0E-03	8,4E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,383	2391	44
39	1,3E-02	1,0E-02	7,7E-03	1,7E-04	0,381	2262	41
43	1,0E-02	9,2E-03	9,5E-03	1,6E-04	0,382	2395	41
50	6,3E-03	1,2E-02	8,1E-03	1,4E-04	0,383	2655	44
57	8,3E-03	1,0E-02	6,6E-03	1,4E-04	0,383	2729	44
64	8,0E-03	9,1E-03	8,5E-03	1,4E-04	0,384	2709	44
72	8,1E-03	7,9E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,383	2652	42
78	5,9E-03	9,1E-03	7,7E-03	1,3E-04	0,382	3018	46

9 kN

Moule 5

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,1E-01	5,7E-02	6,8E-02	1,2E-03	0,755	605	21
4	1,2E-01	4,7E-02	6,7E-02	1,2E-03	0,756	606	22
7	6,2E-02	3,2E-02	4,1E-02	7,3E-04	0,752	1031	28
9	4,2E-02	3,7E-02	3,1E-02	6,0E-04	0,751	1257	30
11	4,3E-02	2,6E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,754	1333	31
14	3,0E-02	2,4E-02	4,6E-02	5,4E-04	0,752	1398	33
18	2,3E-02	3,0E-02	3,0E-02	4,6E-04	0,753	1636	34
21	3,3E-02	2,0E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,750	1719	35
23	2,6E-02	2,4E-02	2,2E-02	4,0E-04	0,748	1867	36
36	1,8E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,749	2626	37
39	1,6E-02	1,9E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,748	2746	38
43	1,5E-02	1,9E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,745	2784	38
50	1,3E-02	2,1E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,746	2949	38
57	1,2E-02	2,3E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,743	2850	38
64	1,8E-02	1,3E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,748	2767	37
72	9,4E-03	1,6E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,744	3281	40
78	9,6E-03	1,6E-02	1,6E-02	2,3E-04	0,746	3256	39

Moule 6

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,2E-02	8,6E-02	4,8E-02	1,2E-03	0,757	658	20
4	4,7E-02	6,4E-02	5,4E-02	8,8E-04	0,752	851	23
7	4,0E-02	3,5E-02	4,9E-02	6,6E-04	0,751	1140	27
9	2,7E-02	3,8E-02	3,5E-02	5,3E-04	0,753	1415	31
11	3,3E-02	3,4E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,756	1434	32
14	3,2E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,753	1620	33
18	3,0E-02	2,4E-02	3,4E-02	4,9E-04	0,754	1545	33
21	2,4E-02	2,3E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,748	1815	35
23	2,4E-02	2,3E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,750	1747	35
36	1,9E-02	1,8E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,746	2308	35
39	2,4E-02	2,0E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,748	2264	34
43	1,9E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,749	2376	34
50	1,5E-02	2,1E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,746	2551	36
57	1,7E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,746	2604	35
64	1,6E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,749	2609	36
72	1,7E-02	1,6E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,748	2576	35
78	1,3E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,750	2868	36

Annexe 19 – Résultats d'essais à 20°C et 45% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,3E-02	9,1E-02	9,1E-02	1,4E-03	0,403	280	11	1,0E-01	5,7E-02	1,1E-01	1,4E-03	0,403	282	11	1,4E-01	1,1E-01	1,6E-01	2,2E-03	0,790	355	9	1,7E-01	9,2E-02	1,7E-01	2,3E-03	0,790	349	9
4	7,2E-02	6,5E-02	4,9E-02	1,0E-03	0,403	400	12	6,0E-02	5,2E-02	9,3E-02	1,1E-03	0,404	370	13	1,1E-01	9,6E-02	8,1E-02	1,6E-03	0,790	509	11	7,5E-02	8,8E-02	1,4E-01	1,6E-03	0,791	494	11
7	8,2E-02	6,2E-02	4,1E-02	1,0E-03	0,403	402	14	4,7E-02	5,0E-02	6,1E-02	8,4E-04	0,403	477	15	1,2E-01	8,1E-02	6,6E-02	1,5E-03	0,789	543	12	7,1E-02	7,7E-02	9,5E-02	1,3E-03	0,789	609	13
9	3,7E-02	6,3E-02	5,5E-02	8,4E-04	0,403	479	16	5,4E-02	4,2E-02	5,1E-02	7,8E-04	0,403	516	16	5,6E-02	9,5E-02	7,9E-02	1,2E-03	0,790	633	13	8,1E-02	6,3E-02	7,7E-02	1,2E-03	0,790	673	13
11	7,4E-02	6,0E-02	3,5E-02	9,2E-04	0,403	440	15	5,0E-02	4,6E-02	5,2E-02	8,0E-04	0,403	505	16	1,0E-01	8,4E-02	5,7E-02	1,3E-03	0,790	606	13	7,4E-02	6,7E-02	8,2E-02	1,2E-03	0,790	664	13
14	7,5E-02	2,7E-02	7,4E-02	9,6E-04	0,404	422	16	4,5E-02	4,8E-02	4,4E-02	7,3E-04	0,403	551	17	9,1E-02	4,7E-02	9,9E-02	1,3E-03	0,789	614	14	6,8E-02	7,4E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,790	710	14
18	6,3E-02	6,9E-02	2,5E-02	8,8E-04	0,402	460	17	4,4E-02	3,9E-02	4,9E-02	7,3E-04	0,402	550	18	8,9E-02	9,7E-02	4,2E-02	1,3E-03	0,789	625	15	6,5E-02	6,2E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,789	707	15
21	6,2E-02	3,9E-02	4,6E-02	8,2E-04	0,402	493	19	4,3E-02	3,4E-02	4,7E-02	6,8E-04	0,403	589	19	8,3E-02	6,4E-02	6,4E-02	1,2E-03	0,789	675	16	6,7E-02	5,4E-02	7,1E-02	1,1E-03	0,789	743	16
23	5,4E-02	3,1E-02	5,1E-02	7,5E-04	0,402	533	19	4,4E-02	3,3E-02	4,8E-02	7,0E-04	0,403	579	19	8,2E-02	4,8E-02	7,3E-02	1,1E-03	0,789	700	15	6,7E-02	5,3E-02	7,3E-02	1,1E-03	0,788	736	16
36	3,4E-02	1,7E-02	3,3E-02	4,7E-04	0,391	836	21	2,6E-02	2,9E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,391	881	21	5,6E-02	3,2E-02	5,5E-02	7,9E-04	0,778	980	17	4,5E-02	4,8E-02	4,6E-02	7,7E-04	0,777	1006	17
39	2,2E-02	2,1E-02	4,0E-02	4,6E-04	0,391	854	21	2,5E-02	2,6E-02	3,4E-02	4,7E-04	0,391	830	20	3,7E-02	3,9E-02	6,3E-02	7,7E-04	0,777	1007	17	4,3E-02	4,5E-02	5,5E-02	8,0E-04	0,777	977	17
43	2,2E-02	3,0E-02	3,3E-02	4,7E-04	0,392	825	21	3,4E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,392	831	20	4,1E-02	4,8E-02	5,6E-02	8,1E-04	0,778	963	17	5,4E-02	4,4E-02	4,4E-02	7,9E-04	0,777	981	16
50	2,5E-02	2,7E-02	3,4E-02	4,7E-04	0,392	828	19	2,5E-02	3,3E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,392	860	19	4,2E-02	4,3E-02	5,5E-02	7,7E-04	0,778	1003	16	4,1E-02	5,1E-02	4,4E-02	7,6E-04	0,778	1023	16
57	2,7E-02	2,7E-02	1,7E-02	4,0E-04	0,392	984	22	2,5E-02	2,6E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,392	923	21	4,7E-02	4,6E-02	3,1E-02	6,8E-04	0,778	1136	18	4,4E-02	4,3E-02	4,3E-02	7,2E-04	0,778	1075	17
64	2,0E-02	2,3E-02	3,1E-02	4,1E-04	0,393	959	21	2,6E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,5E-04	0,393	871	20	3,6E-02	4,0E-02	5,0E-02	7,0E-04	0,778	1115	17	4,5E-02	4,6E-02	4,6E-02	7,6E-04	0,779	1027	17
72	2,0E-02	2,0E-02	2,7E-02	3,7E-04	0,393	1053	23	2,7E-02	2,2E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,393	953	21	3,7E-02	3,4E-02	4,6E-02	6,5E-04	0,778	1192	18	4,6E-02	3,8E-02	4,3E-02	7,0E-04	0,779	1106	17
78	2,2E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,392	1061	22	2,7E-02	2,4E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,392	967	21	3,8E-02	4,3E-02	3,5E-02	6,4E-04	0,779	1215	18	4,6E-02	4,1E-02	3,9E-02	7,0E-04	0,777	1114	17

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,0E-02	7,0E-02	7,6E-02	1,2E-03	0,403	344	13	8,5E-02	4,5E-02	8,6E-02	1,1E-03	0,403	351	13	1,1E-01	8,7E-02	1,3E-01	1,8E-03	0,792	452	12	1,3E-01	7,4E-02	1,3E-01	1,8E-03	0,792	445	12
4	6,0E-02	5,6E-02	4,3E-02	8,6E-04	0,403	470	14	4,3E-02	4,4E-02	7,8E-02	8,8E-04	0,403	459	15	9,4E-02	8,0E-02	7,4E-02	1,3E-03	0,792	588	13	6,1E-02	7,7E-02	1,2E-01	1,4E-03	0,792	581	13
7	6,5E-02	4,8E-02	3,2E-02	7,9E-04	0,403	511	18	3,6E-02	3,9E-02	4,8E-02	6,5E-04	0,403	617	19	1,0E-01	6,2E-02	6,0E-02	1,2E-03	0,792	658	16	5,6E-02	6,4E-02	8,0E-02	1,1E-03	0,792	744	16
9	2,8E-02	4,9E-02	4,1E-02	6,3E-04	0,403	635	21	4,0E-02	3,0E-02	3,9E-02	5,8E-04	0,402	690	21	4,5E-02	7,8E-02	6,2E-02	1,0E-03	0,793	791	17	6,4E-02	4,9E-02	6,2E-02	9,4E-04	0,792	846	17
11	5,6E-02	4,5E-02	2,7E-02	6,9E-04	0,402	583	20	3,7E-02	3,5E-02	3,9E-02	5,9E-04	0,403	682	21	8,0E-02	6,5E-02	4,7E-02	1,0E-03	0,792	764	17	5,8E-02	5,3E-02	6,6E-02	9,4E-04	0,792	843	18
14	5,6E-02	1,9E-02	5,5E-02	7,1E-04	0,402	570	22	3,4E-02	3,4E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,402	764	23	7,0E-02	3,7E-02	7,8E-02	1,0E-03	0,792	789	18	5,4E-02	5,6E-02	5,1E-02	8,6E-04	0,792	918	19
18	4,7E-02	5,2E-02	1,7E-02	6,4E-04	0,403	630	23	3,1E-02	2,8E-02	3,5E-02	5,2E-04	0,403	772	24	7,1E-02	7,4E-02	3,1E-02	9,8E-04	0,792	811	19	4,9E-02	4,7E-02	5,7E-02	8,5E-04	0,791	928	20
21	4,6E-02	2,7E-02	3,3E-02	5,9E-04	0,404	685	24	2,9E-02	2,2E-02	3,4E-02	4,8E-04	0,403	843	25	6,4E-02	4,7E-02	5,0E-02	9,0E-04	0,792	883	21	5,0E-02	3,9E-02	5,6E-02	8,0E-04	0,792	984	21
23	3,8E-02	2,1E-02	3,6E-02	5,3E-04	0,403	763	25	3,0E-02	2,3E-02	3,5E-02	4,8E-04	0,403	832	25	6,0E-02	3,6E-02	5,5E-02	8,4E-04	0,792	940	21	4,9E-02	3,9E-02	5,8E-02	8,1E-04	0,791	976	21
36	2,4E-02	1,2E-02	2,4E-02	3,3E-04	0,404	1219	26	1,8E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,404	1298	27	4,1E-02	2,4E-02	4,2E-02	6,0E-04	0,792	1325	22	3,4E-02	3,6E-02	3,4E-02	5,8E-04	0,792	1363	22
39	1,5E-02	1,5E-02	2,8E-02	3,2E-04	0,403	1262	26	1,8E-02	1,8E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,403	1212	26	2,7E-02	3,0E-02	4,7E-02	5,8E-04	0,792	1373	22	3,3E-02	3,4E-02	4,1E-02	6,0E-04	0,792	1323	22
43	1,6E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,403	1207	26	2,4E-02	1,9E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,403	1206	26	3,1E-02	3,7E-02	4,0E-02	6,0E-04	0,792	1325	22	4,1E-02	3,4E-02	3,2E-02	6,0E-04	0,792	1327	21
50	1,9E-02	1,9E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,403	1153	23	1,8E-02	2,5E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,403	1227	24	3,3E-02	3,3E-02	4,1E-02	5,9E-04	0,792	1340	20	3,2E-02	4,0E-02	3,2E-02	5,8E-04	0,792	1369	21
57	1,9E-02	1,9E-02	1,1E-02	2,7E-04	0,404	1469	28	1,6E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,404	1373	27	3,5E-02	3,3E-02	2,3E-02	5,1E-04	0,792	1565	23	3,1E-02	3,2E-02	3,3E-02	5,4E-04	0,791	1475	22
64	1,4E-02	1,6E-02	2,2E-02	2,9E-04	0,403	1398	27	1,8E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,403	1262	26	2,8E-02	3,2E-02	4,1E-02	5,6E-04	0,825	1478	22	3,4E-02	3,5E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,791	1382	22
72	1,4E-02	1,3E-02	1,9E-02	2,5E-04	0,403	1589	29	1,8E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,404	1421	27	2,7E-02	2,5E-02	3,5E-02	4,8E-04	0,791	1651	24	3,3E-02	2,9E-02	3,2E-02	5,2E-04	0,792	1520	23
78	1,5E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,403	1618	29	1,9E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,403	1429	26	2,8E-02	3,1E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,792	1695	24	3,3E-02	3,0E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,792	1527	22

Date	Moules à 3Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,2E-02	6,1E-02	6,9E-02	1,0E-03	0,403	388	15	7,5E-02	3,9E-02	7,6E-02	1,0E-03	0,403	396	16
4	5,3E-02	5,0E-02	3,9E-02	7,7E-04	0,403	521	17	3,7E-02	4,0E-02	7,1E-02	7,9E-04	0,403	511	18
7	5,6E-02	4,1E-02	2,8E-02	6,8E-04	0,402	594	22	3,0E-02	3,4E-02	4,1E-02	5,6E-04	0,402	721	23
9	2,3E-02	4,1E-02	3,4E-02	5,3E-04	0,402	754	25	3,4E-02	2,5E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,402	825	26
11	4,7E-02	3,7E-02	2,2E-02	5,8E-04	0,402	695	25	3,0E-02	2,9E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,402	816	25
14	4,7E-02	1,5E-02	4,6E-02	5,9E-04	0,402	686	26	2,8E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,3E-04	0,402	936	28
18	3,8E-02	4,3E-02	1,3E-02	5,2E-04	0,403	769	27	2,5E-02	2,3E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,403	954	29
21	3,8E-02	2,1E-02	2,8E-02	4,8E-04	0,403	838	28	2,3E-02	1,7E-02	2,9E-02	3,8E-04	0,403	1054	30
23	3,1E-02	1,6E-02	2,9E-02	4,2E-04	0,403	949	30	2,3E-02	1,8E-02	2,9E-02	3,9E-04	0,403	1044	30
36	1,9E-02	9,1E-03	1,9E-02	2,6E-04	0,403	1537	30	1,4E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,403	1649	32
39	1,1E-02	1,2E-02	2,2E-02	2,5E-04	0,404	1604	31	1,4E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,403	1537	31
43	1,2E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,403	1534	30	1,9E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,403	1522	30
50	1,6E-02	1,5E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,403	1403	25	1,5E-02	2,0E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,404	1527	28
57	1,5E-02	1,5E-02	8,5E-03	2,2E-04	0,403	1868	33	1,3E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,403	1737	31
64	1,1E-02	1,3E-02	1,8E-02	2,3E-04	0,404	1765	32	1,5E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,404	1582	31
72	1,1E-02	1,0E-02	1,5E-02	2,0E-04	0,403	2043	35	1,4E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,403	1807	32
78	1,1E-02	1,4E-02	9,5E-03	1,9E-04	0,403	2076	34	1,5E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,403	1798	31

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,7E-02	7,5E-02	1,1E-01	1,5E-03	0,790	519	15	1,1E-01	6,5E-02	1,1E-01	1,5E-03	0,790	517	15
4	8,4E-02	7,2E-02	6,9E-02	1,2E-03	0,791	648	16	5,5E-02	6,9E-02	1,0E-01	1,2E-03	0,790	658	16
7	8,8E-02	5,3E-02	5,4E-02	1,1E-03	0,790	746	19	4,8E-02	5,7E-02	7,1E-02	9,4E-04	0,791	838	19
9	3,9E-02	6,8E-02	5,3E-02	8,7E-04	0,790	910	21	5,7E-02	4,2E-02	5,5E-02	8,2E-04	0,791	962	21
11	6,9E-02	5,5E-02	4,1E-02	8,9E-04	0,790	884	21	4,9E-02	4,6E-02	5,7E-02	8,1E-04	0,791	974	21
14	5,9E-02	3,2E-02	6,7E-02	8,5E-04	0,790	929	22	4,7E-02	4,8E-02	4,4E-02	7,4E-04	0,791	1075	23
18	6,0E-02	6,3E-02	2,5E-02	8,3E-04	0,789	955	23	4,2E-02	4,0E-02	4,8E-02	7,3E-04	0,790	1086	24
21	5,4E-02	3,9E-02	4,3E-02	7,5E-04	0,789	1046	25	4,1E-02	3,2E-02	4,8E-02	6,8E-04	0,790	1170	25
23	5,0E-02	3,0E-02	4,6E-02	7,0E-04	0,789	1128	25	4,0E-02	3,2E-02	5,0E-02	6,8E-04	0,790	1161	25
36	3,0E-02	1,8E-02	3,1E-02	4,4E-04	0,752	1692	26	2,5E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,3E-04	0,748	1731	26
39	2,0E-02	2,2E-02	3,4E-02	4,2E-04	0,751	1776	26	2,5E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,4E-04	0,747	1684	26
43	2,3E-02	2,8E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,752	1668	26	3,0E-02	2,6E-02	2,4E-02	4,4E-04	0,748	1684	25
50	2,8E-02	2,7E-02	3,4E-02	4,9E-04	0,789	1595	24	2,7E-02	3,4E-02	2,6E-02	4,8E-04	0,790	1635	25
57	2,9E-02	2,7E-02	1,8E-02	4,2E-04	0,790	1898	27	2,6E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,4E-04	0,791	1782	26
64	2,1E-02	2,5E-02	3,2E-02	4,3E-04	0,790	1824	27	2,8E-02	2,9E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,790	1658	26
72	2,2E-02	2,1E-02	2,8E-02	3,9E-04	0,790	2007	28	2,7E-02	2,4E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,790	1843	27
78	2,3E-02	2,6E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,791	2067	28	2,7E-02	2,5E-02	2,5E-02	4,3E-04	0,790	1840	26

Date	Moules à 6Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,6E-02	5,5E-02	6,4E-02	9,5E-04	0,397	419	18	6,9E-02	3,6E-02	6,9E-02	9,3E-04	0,397	428	18
4	4,7E-02	4,5E-02	3,6E-02	7,0E-04	0,397	568	20	3,2E-02	3,7E-02	6,4E-02	7,1E-04	0,397	558	21
7	4,9E-02	3,6E-02	2,5E-02	5,9E-04	0,398	670	25	2,5E-02	3,0E-02	3,6E-02	4,9E-04	0,399	817	27
9	1,9E-02	3,6E-02	3,0E-02	4,6E-04	0,398	869	30	2,9E-02	2,1E-02	2,9E-02	4,2E-04	0,397	950	30
11	4,0E-02	3,2E-02	1,9E-02	5,0E-04	0,398	802	29	2,6E-02	2,5E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,398	942	30
14	4,0E-02	1,3E-02	3,9E-02	5,0E-04	0,397	799	30	2,4E-02	2,3E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,398	1093	33
18	3,3E-02	3,6E-02	1,1E-02	4,4E-04	0,398	900	32	2,1E-02	1,9E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,398	1124	34
21	3,2E-02	1,8E-02	2,3E-02	4,0E-04	0,397	980	32	1,9E-02	1,4E-02	2,4E-02	3,2E-04	0,398	1249	35
23	2,6E-02	1,4E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,398	1122	35	1,9E-02	1,5E-02	2,4E-02	3,2E-04	0,398	1239	35
36	1,6E-02	7,5E-03	1,6E-02	2,2E-04	0,397	1819	35	1,1E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,399	1971	38
39	8,9E-03	9,7E-03	1,9E-02	2,1E-04	0,397	1919	36	1,2E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,398	1829	36
43	1,0E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,396	1811	34	1,6E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,2E-04	0,398	1796	35
50	1,4E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,397	1621	29	1,2E-02	1,7E-02	1,0E-02	2,2E-04	0,398	1794	32
57	1,3E-02	1,3E-02	6,8E-03	1,8E-04	0,397	2217	38	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,398	2066	36
64	8,7E-03	1,1E-02	1,5E-02	1,9E-04	0,398	2102	38	1,2E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,397	1877	36
72	8,7E-03	8,1E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,398	2458	41	1,2E-02	1,0E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,398	2157	38
78	9,3E-03	1,2E-02	7,7E-03	1,6E-04	0,398	2488	40	1,2E-02	1,1E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,399	2127	36

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,9E-02	6,7E-02	1,0E-01	1,4E-03	0,778	561	17	1,0E-01	6,0E-02	9,8E-02	1,4E-03	0,778	558	17
4	7,6E-02	6,5E-02	6,4E-02	1,1E-03	0,778	703	18	5,1E-02	6,3E-02	8,8E-02	1,1E-03	0,778	722	18
7	7,8E-02	4,6E-02	4,9E-02	9,4E-04	0,777	825	22	4,3E-02	5,2E-02	6,4E-02	8,4E-04	0,777	921	22
9	3,5E-02	6,0E-02	4,6E-02	7,6E-04	0,778	1019	25	5,0E-02	3,7E-02	4,9E-02	7,3E-04	0,778	1072	25
11	6,0E-02	4,8E-02	3,7E-02	7,8E-04	0,778	993	25	4,4E-02	4,1E-02	5,0E-02	7,2E-04	0,778	1087	25
14	5,0E-02	2,8E-02	5,8E-02	7,4E-04	0,778	1056	26	4,1E-02	4,1E-02	3,8E-02	6,4E-04	0,779	1214	27
18	5,2E-02	5,4E-02	2,2E-02	7,1E-04	0,777	1090	27	3,6E-02	3,5E-02	4,1E-02	6,3E-04	0,776	1236	28
21	4,6E-02	3,4E-02	3,6E-02	6,4E-04	0,776	1204	29	3,5E-02	2,8E-02	4,2E-02	5,8E-04	0,777	1339	29
23	4,3E-02	2,6E-02	3,9E-02	6,0E-04	0,776	1292	29	3,4E-02	2,8E-02	4,4E-02	5,9E-04	0,777	1320	29
36	2,9E-02	1,7E-02	3,0E-02	4,2E-04	0,775	1827	30	2,3E-02	2,6E-02	2,4E-02	4,1E-04	0,777	1888	31
39	1,9E-02	2,1E-02	3,3E-02	4,1E-04	0,775	1904	30	2,4E-02	2,5E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,776	1829	30
43	2,2E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,774	1841	30	2,9E-02	2,5E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,776	1826	29
50	2,4E-02	2,4E-02	2,9E-02	4,3E-04	0,777	1814	27	2,4E-02	2,9E-02	2,2E-02	4,2E-04	0,777	1859	28
57	2,5E-02	2,4E-02	1,6E-02	3,6E-04	0,776	2176	31	2,2E-02	2,3E-02	2,4E-02	3,8E-04	0,777	2033	30
64	1,8E-02	2,1E-02	2,7E-02	3,7E-04	0,776	2088	31	2,4E-02	2,5E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,777	1893	30
72	1,9E-02	1,8E-02	2,4E-02	3,4E-04	0,777	2306	33	2,3E-02	2,1E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,777	2105	31
78	2,0E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,777	2373	32	2,3E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,776	2097	29

Date	Moules à 10Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,0E-02	5,0E-02	5,8E-02	8,5E-04	0,381	449	21	6,1E-02	3,3E-02	6,3E-02	8,4E-04	0,387	463	22
4	4,2E-02	4,0E-02	3,3E-02	6,3E-04	0,383	613	24	2,8E-02	3,4E-02	5,8E-02	6,4E-04	0,384	600	25
7	4,3E-02	3,1E-02	2,2E-02	5,2E-04	0,384	743	30	2,2E-02	2,6E-02	3,1E-02	4,2E-04	0,383	907	31
9	1,7E-02	3,1E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,385	972	35	2,5E-02	1,8E-02	2,5E-02	3,6E-04	0,383	1061	35
11	3,4E-02	2,8E-02	1,6E-02	4,3E-04	0,383	900	33	2,2E-02	2,2E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,385	1060	35
14	3,4E-02	1,1E-02	3,3E-02	4,3E-04	0,383	901	35	2,1E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,384	1231	38
18	2,7E-02	3,1E-02	9,0E-03	3,7E-04	0,382	1032	37	1,7E-02	1,7E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,383	1282	39
21	2,7E-02	1,5E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,384	1124	37	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-02	2,7E-04	0,384	1429	41
23	2,2E-02	1,2E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,383	1274	40	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-02	2,7E-04	0,384	1412	41
36	1,3E-02	6,5E-03	1,4E-02	1,9E-04	0,382	2057	40	9,6E-03	1,2E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,382	2227	43
39	7,5E-03	8,3E-03	1,6E-02	1,8E-04	0,381	2161	41	1,0E-02	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,382	2062	41
43	9,3E-03	1,3E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,382	2022	39	1,4E-02	1,1E-02	9,2E-03	1,9E-04	0,382	2014	40
50	1,2E-02	1,1E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,381	1794	33	1,1E-02	1,5E-02	8,7E-03	1,9E-04	0,382	2002	37
57	1,1E-02	1,1E-02	5,9E-03	1,5E-04	0,383	2485	44	9,2E-03	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,383	2318	41
64	7,4E-03	9,0E-03	1,3E-02	1,6E-04	0,383	2369	44	1,0E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,381	2127	41
72	7,5E-03	6,8E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,381	2765	48	9,8E-03	8,6E-03	9,8E-03	1,6E-04	0,381	2433	43
78	8,0E-03	1,0E-02	6,5E-03	1,4E-04	0,383	2805	46	1,0E-02	9,4E-03	9,1E-03	1,6E-04	0,383	2383	41

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,1E-02	6,1E-02	9,2E-02	1,3E-03	0,754	594	20	9,4E-02	5,5E-02	9,0E-02	1,3E-03	0,755	592	20
4	6,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	1,0E-03	0,754	742	21	4,7E-02	5,7E-02	7,7E-02	9,7E-04	0,751	777	22
7	7,0E-02	4,2E-02	4,5E-02	8,5E-04	0,754	884	26	3,8E-02	4,6E-02	5,7E-02	7,6E-04	0,751	992	26
9	3,1E-02	5,3E-02	4,0E-02	6,8E-04	0,754	1112	28	4,4E-02	3,3E-02	4,4E-02	6,4E-04	0,755	1171	29
11	5,3E-02	4,2E-02	3,2E-02	6,9E-04	0,752	1095	29	3,9E-02	3,6E-02	4,4E-02	6,3E-04	0,756	1198	29
14	4,4E-02	2,5E-02	5,0E-02	6,5E-04	0,758	1174	30	3,6E-02	3,6E-02	3,3E-02	5,7E-04	0,757	1340	31
18	4,5E-02	4,8E-02	2,0E-02	6,3E-04	0,751	1199	31	3,2E-02	3,2E-02	3,6E-02	5,6E-04	0,755	1356	32
21	3,9E-02	3,0E-02	3,1E-02	5,5E-04	0,751	1354	33	3,0E-02	2,4E-02	3,6E-02	5,1E-04	0,754	1493	33
23	3,6E-02	2,3E-02	3,3E-02	5,2E-04	0,751	1456	33	2,9E-02	2,5E-02	3,8E-02	5,1E-04	0,751	1467	33
36	2,7E-02	1,5E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,750	1991	34	2,0E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,747	2086	35
39	1,7E-02	1,9E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,751	2120	34	2,1E-02	2,2E-02	2,4E-02	3,7E-04	0,751	2018	34
43	2,0E-02	2,5E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,758	1935	33	2,5E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,7E-04	0,749	2007	33
50	2,1E-02	2,1E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,748	2004	31	2,1E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,744	2040	32
57	2,2E-02	2,0E-02	1,4E-02	3,1E-04	0,748	2400	35	1,9E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,753	2230	34
64	1,6E-02	1,9E-02	2,4E-02	3,3E-04	0,749	2301	35	2,1E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,748	2082	34
72	1,6E-02	1,5E-02	2,1E-02	2,9E-04	0,748	2539	37	2,0E-02	1,8E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,747	2312	35
78	1,7E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,749	2619	36	2,0E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,749	2296	33

Annexe 20 – Résultats d'essais à 20°C et 45% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,7E-02	9,3E-02	5,2E-02	1,2E-03	0,402	349	10	7,7E-02	6,4E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,402	350	9	1,1E-01	1,6E-01	8,2E-02	1,9E-03	0,790	408	9	1,3E-01	1,3E-01	8,4E-02	1,8E-03	0,789	431	9
4	9,3E-02	7,1E-02	5,3E-02	1,2E-03	0,403	343	11	4,7E-02	6,9E-02	8,5E-02	1,1E-03	0,403	377	11	1,4E-01	8,6E-02	9,2E-02	1,7E-03	0,790	452	10	8,0E-02	9,3E-02	1,4E-01	1,7E-03	0,790	473	10
7	8,1E-02	9,4E-02	4,1E-02	1,2E-03	0,403	346	11	5,1E-02	7,1E-02	5,4E-02	9,4E-04	0,404	430	11	1,2E-01	1,1E-01	6,2E-02	1,6E-03	0,789	499	11	8,5E-02	1,0E-01	8,3E-02	1,5E-03	0,790	544	10
9	8,0E-02	6,6E-02	4,4E-02	1,0E-03	0,403	391	12	4,6E-02	5,8E-02	5,7E-02	8,6E-04	0,403	470	12	1,1E-01	8,0E-02	7,5E-02	1,5E-03	0,790	540	11	6,8E-02	8,7E-02	9,0E-02	1,3E-03	0,790	605	11
11	6,5E-02	7,5E-02	3,6E-02	9,6E-04	0,402	420	13	7,3E-02	5,1E-02	5,1E-02	9,3E-04	0,403	431	12	9,7E-02	1,1E-01	5,4E-02	1,4E-03	0,789	566	12	1,0E-01	7,6E-02	8,1E-02	1,4E-03	0,789	568	11
14	7,7E-02	6,8E-02	3,8E-02	9,9E-04	0,403	407	13	5,5E-02	4,8E-02	6,6E-02	9,0E-04	0,403	447	12	1,1E-01	9,4E-02	6,1E-02	1,4E-03	0,789	554	11	8,1E-02	7,3E-02	1,0E-01	1,4E-03	0,789	579	11
18	6,7E-02	3,7E-02	5,4E-02	8,7E-04	0,403	461	15	5,3E-02	4,0E-02	6,9E-02	9,0E-04	0,402	449	14	9,3E-02	5,9E-02	8,1E-02	1,3E-03	0,790	609	13	7,5E-02	6,6E-02	9,3E-02	1,3E-03	0,788	607	12
21	6,4E-02	4,3E-02	5,4E-02	9,0E-04	0,403	448	14	5,1E-02	4,2E-02	6,4E-02	8,7E-04	0,402	464	13	9,4E-02	6,6E-02	7,8E-02	1,3E-03	0,788	596	12	7,7E-02	6,8E-02	9,5E-02	1,3E-03	0,787	591	11
23	4,5E-02	5,8E-02	5,4E-02	8,8E-04	0,403	460	14	5,6E-02	4,6E-02	5,6E-02	8,8E-04	0,402	456	13	6,6E-02	8,6E-02	7,8E-02	1,3E-03	0,788	617	12	8,5E-02	7,4E-02	7,9E-02	1,3E-03	0,787	595	11
36	3,7E-02	2,9E-02	3,9E-02	5,8E-04	0,391	670	15	3,4E-02	3,3E-02	4,1E-02	6,0E-04	0,391	650	13	6,2E-02	5,0E-02	6,0E-02	9,6E-04	0,777	811	13	5,5E-02	5,6E-02	6,8E-02	1,0E-03	0,779	778	12
39	2,9E-02	3,2E-02	4,2E-02	5,7E-04	0,392	683	14	3,5E-02	4,4E-02	3,8E-02	6,5E-04	0,392	602	13	4,8E-02	5,1E-02	6,7E-02	9,2E-04	0,777	840	13	5,9E-02	6,9E-02	6,0E-02	1,0E-03	0,777	744	12
43	2,3E-02	4,3E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,392	693	14	3,3E-02	4,2E-02	3,0E-02	5,8E-04	0,392	677	13	4,0E-02	6,9E-02	5,5E-02	9,1E-04	0,778	853	13	5,3E-02	6,7E-02	5,1E-02	9,5E-04	0,778	816	12
50	2,4E-02	4,5E-02	2,7E-02	5,4E-04	0,392	731	15	3,2E-02	4,3E-02	3,0E-02	5,9E-04	0,392	668	13	4,3E-02	6,9E-02	4,5E-02	8,8E-04	0,778	888	13	5,5E-02	6,9E-02	5,0E-02	9,7E-04	0,777	803	12
57	2,4E-02	3,3E-02	4,1E-02	5,4E-04	0,393	729	15	3,3E-02	4,0E-02	3,0E-02	5,8E-04	0,393	681	13	4,1E-02	5,2E-02	6,5E-02	8,8E-04	0,777	885	13	5,3E-02	6,6E-02	5,1E-02	9,4E-04	0,778	826	12
64	2,6E-02	4,0E-02	2,7E-02	5,1E-04	0,392	764	15	2,6E-02	4,4E-02	3,4E-02	5,8E-04	0,393	676	13	4,4E-02	6,3E-02	4,3E-02	8,4E-04	0,778	930	13	4,5E-02	6,9E-02	5,5E-02	9,4E-04	0,778	828	12
72	2,5E-02	3,9E-02	3,6E-02	5,6E-04	0,392	700	15	3,7E-02	3,1E-02	3,4E-02	5,6E-04	0,392	694	14	4,4E-02	6,2E-02	5,5E-02	8,9E-04	0,777	870	13	6,0E-02	5,2E-02	5,6E-02	9,3E-04	0,778	836	12
78	1,8E-02	3,9E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,392	776	15	2,4E-02	3,9E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,392	740	14	3,3E-02	6,0E-02	5,3E-02	8,1E-04	0,778	957	14	4,0E-02	6,3E-02	5,3E-02	8,7E-04	0,778	894	12

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,1E-02	8,4E-02	4,7E-02	1,0E-03	0,403	386	12	6,9E-02	6,0E-02	6,2E-02	1,0E-03	0,402	394	11	1,1E-01	1,4E-01	7,4E-02	1,8E-03	0,792	446	11	1,1E-01	1,2E-01	6,7E-02	1,6E-03	0,792	497	11
4	7,9E-02	5,9E-02	4,8E-02	1,0E-03	0,403	400	13	4,0E-02	5,8E-02	7,6E-02	9,3E-04	0,403	434	13	1,3E-01	7,2E-02	8,6E-02	1,5E-03	0,792	511	12	7,3E-02	7,9E-02	1,3E-01	1,5E-03	0,793	534	12
7	6,6E-02	7,5E-02	3,4E-02	9,5E-04	0,403	423	15	4,4E-02	5,9E-02	4,6E-02	8,0E-04	0,403	505	15	1,0E-01	9,1E-02	5,7E-02	1,4E-03	0,792	584	14	7,6E-02	9,1E-02	7,2E-02	1,3E-03	0,792	622	13
9	6,6E-02	5,2E-02	3,7E-02	8,4E-04	0,403	481	16	3,8E-02	4,9E-02	4,7E-02	7,1E-04	0,403	563	16	9,6E-02	6,4E-02	6,7E-02	1,2E-03	0,792	642	15	5,9E-02	7,7E-02	7,8E-02	1,1E-03	0,792	690	14
11	5,3E-02	6,0E-02	2,9E-02	7,7E-04	0,403	524	17	5,8E-02	4,2E-02	4,3E-02	7,6E-04	0,403	528	16	8,3E-02	8,7E-02	4,6E-02	1,2E-03	0,792	678	15	8,5E-02	6,4E-02	7,2E-02	1,2E-03	0,792	671	14
14	6,2E-02	5,4E-02	3,2E-02	8,0E-04	0,403	503	17	4,6E-02	4,0E-02	5,5E-02	7,5E-04	0,402	537	16	9,0E-02	7,6E-02	5,3E-02	1,2E-03	0,792	668	15	6,8E-02	6,4E-02	8,7E-02	1,2E-03	0,792	677	14
18	5,1E-02	2,8E-02	4,6E-02	7,0E-04	0,403	580	20	4,1E-02	3,2E-02	5,6E-02	7,1E-04	0,403	568	19	7,5E-02	4,7E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,792	754	18	6,1E-02	5,3E-02	7,9E-02	1,1E-03	0,792	737	17
21	5,1E-02	3,4E-02	4,4E-02	7,2E-04	0,403	561	19	4,1E-02	3,5E-02	5,3E-02	7,1E-04	0,403	566	17	7,7E-02	5,4E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,792	721	17	6,3E-02	5,9E-02	8,3E-02	1,1E-03	0,791	695	15
23	3,6E-02	4,7E-02	4,2E-02	7,0E-04	0,404	580	19	4,7E-02	3,8E-02	4,6E-02	7,3E-04	0,403	555	17	5,6E-02	7,1E-02	6,3E-02	1,1E-03	0,792	752	17	7,3E-02	6,2E-02	6,9E-02	1,1E-03	0,792	700	15
36	3,1E-02	2,4E-02	3,3E-02	4,8E-04	0,404	835	20	2,8E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,1E-04	0,404	787	18	5,2E-02	4,2E-02	5,2E-02	8,1E-04	0,792	977	18	4,7E-02	5,0E-02	5,9E-02	8,6E-04	0,792	915	16
39	2,4E-02	2,7E-02	3,5E-02	4,7E-04	0,403	850	20	2,9E-02	3,8E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,403	730	18	4,1E-02	4,4E-02	5,6E-02	7,8E-04	0,791	1013	18	5,1E-02	6,0E-02	5,1E-02	9,0E-04	0,792	879	16
43	1,9E-02	3,6E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,403	867	20	2,8E-02	3,5E-02	2,5E-02	4,9E-04	0,404	823	18	3,4E-02	5,9E-02	4,6E-02	7,7E-04	0,792	1024	18	4,6E-02	5,8E-02	4,4E-02	8,2E-04	0,792	963	16
50	2,0E-02	3,7E-02	2,2E-02	4,4E-04	0,404	915	20	2,7E-02	3,6E-02	2,6E-02	5,0E-04	0,403	812	18	3,7E-02	5,8E-02	3,8E-02	7,4E-04	0,792	1074	18	4,8E-02	6,0E-02	4,3E-02	8,4E-04	0,793	949	16
57	1,9E-02	2,7E-02	3,3E-02	4,4E-04	0,404	917	20	2,8E-02	3,4E-02	2,6E-02	4,9E-04	0,404	831	18	3,5E-02	4,4E-02	5,4E-02	7,4E-04	0,792	1076	18	4,5E-02	5,7E-02	4,4E-02	8,1E-04	0,792	977	16
64	2,1E-02	3,2E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,403	979	21	2,2E-02	3,6E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,404	834	19	3,8E-02	5,3E-02	3,5E-02	7,0E-04	0,792	1139	18	3,9E-02	5,9E-02	4,7E-02	8,0E-04	0,792	987	17
72	2,1E-02	3,2E-02	2,9E-02	4,5E-04	0,403	887	20	3,0E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,404	854	19	3,8E-02	5,1E-02	4,5E-02	7,4E-04	0,792	1068	18	5,1E-02	4,5E-02	4,8E-02	8,0E-04	0,791	995	17
78	1,4E-02	3,1E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,403	1010	21	1,9E-02	3,3E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,403	921	19	2,7E-02	4,9E-02	4,3E-02	6,7E-04	0,792	1190	18	3,4E-02	5,4E-02	4,4E-02	7,4E-04	0,792	1076	17

Date	Moules à 3Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,8E-02	7,9E-02	4,4E-02	9,8E-04	0,402	411	14	6,5E-02	5,8E-02	5,6E-02	9,5E-04	0,403	423	14
4	7,2E-02	5,3E-02	4,4E-02	9,1E-04	0,402	441	16	3,7E-02	5,3E-02	7,2E-02	8,6E-04	0,402	467	16
7	5,9E-02	6,6E-02	3,1E-02	8,4E-04	0,402	477	19	4,0E-02	5,3E-02	4,1E-02	7,2E-04	0,403	561	18
9	5,8E-02	4,5E-02	3,2E-02	7,3E-04	0,402	549	21	3,4E-02	4,3E-02	4,2E-02	6,4E-04	0,403	633	20
11	4,6E-02	5,2E-02	2,5E-02	6,7E-04	0,403	601	22	5,1E-02	3,7E-02	3,8E-02	6,7E-04	0,402	599	20
14	5,4E-02	4,6E-02	2,8E-02	6,9E-04	0,402	579	22	4,0E-02	3,5E-02	5,0E-02	6,7E-04	0,402	602	20
18	4,3E-02	2,4E-02	3,9E-02	5,9E-04	0,403	686	25	3,4E-02	2,7E-02	4,8E-02	6,0E-04	0,403	666	24
21	4,4E-02	2,8E-02	3,9E-02	6,1E-04	0,403	656	23	3,7E-02	3,1E-02	4,6E-02	6,3E-04	0,403	636	22
23	3,1E-02	4,0E-02	3,6E-02	5,9E-04	0,403	679	24	4,0E-02	3,3E-02	4,0E-02	6,3E-04	0,403	639	22
36	2,6E-02	2,0E-02	2,8E-02	4,1E-04	0,403	977	25	2,5E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,404	904	23
39	2,0E-02	2,3E-02	3,0E-02	4,1E-04	0,403	992	24	2,6E-02	3,3E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,403	835	22
43	1,6E-02	3,1E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,403	1015	25	2,5E-02	3,1E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,404	942	22
50	1,7E-02	3,2E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,403	1070	24	2,4E-02	3,2E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,403	927	22
57	1,6E-02	2,3E-02	2,9E-02	3,8E-04	0,404	1077	25	2,4E-02	2,9E-02	2,2E-02	4,2E-04	0,404	955	23
64	1,8E-02	2,8E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,403	1158	26	1,9E-02	3,1E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,404	965	23
72	1,8E-02	2,7E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,404	1041	25	2,6E-02	2,3E-02	2,4E-02	4,1E-04	0,403	987	23
78	1,2E-02	2,6E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,403	1204	26	1,7E-02	2,9E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,403	1069	24

Date	Moules à 3Hz													
	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,8E-02	1,3E-01	6,7E-02	1,6E-03	0,790	493	14	9,9E-02	1,1E-01	5,8E-02	1,4E-03	0,790	547	13
4	1,2E-01	6,5E-02	8,0E-02	1,4E-03	0,790	560	15	6,9E-02	7,3E-02	1,1E-01	1,3E-03	0,790	587	15
7	9,1E-02	8,0E-02	5,3E-02	1,2E-03	0,790	649	17	6,9E-02	8,3E-02	6,5E-02	1,2E-03	0,790	684	16
9	8,5E-02	5,6E-02	6,1E-02	1,1E-03	0,790	720	18	5,4E-02	7,1E-02	7,1E-02	1,0E-03	0,790	757	17
11	7,3E-02	7,6E-02	4,2E-02	1,0E-03	0,790	765	19	7,3E-02	5,8E-02	6,6E-02	1,0E-03	0,790	753	18
14	7,8E-02	6,6E-02	4,7E-02	1,0E-03	0,790	759	19	6,1E-02	5,8E-02	7,8E-02	1,0E-03	0,790	754	18
18	6,4E-02	4,0E-02	5,9E-02	9,0E-04	0,790	875	22	5,2E-02	4,7E-02	7,0E-02	9,4E-04	0,789	842	21
21	6,6E-02	4,7E-02	5,9E-02	9,6E-04	0,790	824	20	5,6E-02	5,3E-02	7,3E-02	1,0E-03	0,790	781	19
23	4,9E-02	6,2E-02	5,4E-02	9,2E-04	0,790	862	21	6,5E-02	5,5E-02	6,1E-02	1,0E-03	0,790	786	19
36	4,0E-02	3,3E-02	4,0E-02	6,3E-04	0,751	1187	21	3,8E-02	4,0E-02	4,6E-02	6,9E-04	0,750	1088	20
39	3,2E-02	3,4E-02	4,4E-02	6,1E-04	0,750	1228	21	4,1E-02	4,7E-02	4,1E-02	7,2E-04	0,750	1049	19
43	3,0E-02	5,2E-02	3,9E-02	6,8E-04	0,790	1170	22	4,1E-02	5,1E-02	3,9E-02	7,3E-04	0,790	1086	20
50	3,3E-02	5,0E-02	3,3E-02	6,5E-04	0,789	1223	21	4,2E-02	5,2E-02	3,8E-02	7,4E-04	0,790	1065	20
57	3,0E-02	3,8E-02	4,7E-02	6,4E-04	0,790	1235	22	4,0E-02	5,0E-02	3,9E-02	7,2E-04	0,790	1101	20
64	3,3E-02	4,6E-02	3,0E-02	6,0E-04	0,790	1307	22	3,4E-02	5,2E-02	4,1E-02	7,1E-04	0,790	1116	20
72	3,3E-02	4,5E-02	3,8E-02	6,4E-04	0,790	1230	22	4,5E-02	4,0E-02	4,2E-02	7,0E-04	0,789	1124	20
78	2,4E-02	4,3E-02	3,7E-02	5,8E-04	0,790	1367	23	3,0E-02	4,8E-02	3,8E-02	6,5E-04	0,790	1218	21

Date	Moules à 6Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,5E-02	7,3E-02	4,1E-02	9,1E-04	0,397	436	17	6,0E-02	5,4E-02	5,0E-02	8,8E-04	0,396	451	16
4	6,5E-02	4,8E-02	4,1E-02	8,3E-04	0,397	478	19	3,4E-02	4,8E-02	6,7E-02	7,9E-04	0,397	501	19
7	5,2E-02	5,8E-02	2,8E-02	7,5E-04	0,397	529	23	3,7E-02	4,7E-02	3,7E-02	6,5E-04	0,398	615	22
9	5,1E-02	3,9E-02	2,9E-02	6,4E-04	0,397	618	24	3,0E-02	3,9E-02	3,8E-02	5,7E-04	0,398	699	24
11	4,0E-02	4,6E-02	2,2E-02	5,9E-04	0,398	677	26	4,7E-02	3,5E-02	3,7E-02	6,4E-04	0,410	644	25
14	4,7E-02	4,0E-02	2,5E-02	6,1E-04	0,397	655	26	3,6E-02	3,1E-02	4,5E-02	6,0E-04	0,397	662	24
18	3,7E-02	2,0E-02	3,4E-02	5,0E-04	0,399	794	30	2,9E-02	2,4E-02	4,2E-02	5,2E-04	0,397	759	28
21	3,8E-02	2,4E-02	3,4E-02	5,3E-04	0,398	750	28	3,2E-02	2,7E-02	4,0E-02	5,5E-04	0,398	719	26
23	2,7E-02	3,4E-02	3,1E-02	5,1E-04	0,397	778	28	3,5E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,398	719	26
36	2,2E-02	1,8E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,398	1117	30	2,1E-02	2,2E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,398	1023	28
39	1,8E-02	1,9E-02	2,6E-02	3,5E-04	0,397	1135	29	2,2E-02	2,8E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,397	941	27
43	1,4E-02	2,7E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,397	1165	30	2,2E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,398	1061	27
50	1,5E-02	2,8E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,398	1225	29	2,2E-02	2,7E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,398	1042	27
57	1,4E-02	1,9E-02	2,4E-02	3,2E-04	0,397	1236	30	2,1E-02	2,6E-02	2,0E-02	3,7E-04	0,397	1076	27
64	1,5E-02	2,4E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,398	1336	31	1,7E-02	2,7E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,397	1093	28
72	1,5E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,398	1204	29	2,3E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,397	1117	28
78	1,0E-02	2,3E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,398	1390	31	1,5E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,398	1213	28

Date	Moules à 6Hz													
	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,1E-02	1,2E-01	6,2E-02	1,5E-03	0,777	528	16	9,8E-02	1,1E-01	5,5E-02	1,4E-03	0,779	562	16
4	1,1E-01	5,9E-02	7,3E-02	1,3E-03	0,777	604	18	6,4E-02	6,7E-02	9,9E-02	1,2E-03	0,776	633	17
7	8,1E-02	7,2E-02	4,8E-02	1,1E-03	0,778	711	20	6,3E-02	7,5E-02	5,9E-02	1,0E-03	0,777	741	19
9	7,6E-02	5,0E-02	5,5E-02	9,8E-04	0,777	795	22	4,8E-02	6,4E-02	6,4E-02	9,4E-04	0,778	829	21
11	6,5E-02	6,7E-02	3,8E-02	9,2E-04	0,778	846	22	6,4E-02	5,2E-02	6,1E-02	9,5E-04	0,779	824	21
14	6,9E-02	5,8E-02	4,3E-02	9,2E-04	0,776	844	23	5,4E-02	5,2E-02	6,9E-02	9,4E-04	0,777	827	21
18	5,5E-02	3,5E-02	5,1E-02	7,8E-04	0,776	990	26	4,6E-02	4,2E-02	6,1E-02	8,3E-04	0,776	938	25
21	5,8E-02	4,1E-02	5,2E-02	8,4E-04	0,776	924	24	4,9E-02	4,8E-02	6,5E-02	9,0E-04	0,776	861	23
23	4,4E-02	5,4E-02	4,7E-02	8,0E-04	0,776	964	25	5,8E-02	4,9E-02	5,5E-02	8,9E-04	0,775	867	23
36	3,9E-02	3,2E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,775	1249	26	3,7E-02	4,0E-02	4,5E-02	6,8E-04	0,775	1142	24
39	3,1E-02	3,4E-02	4,3E-02	6,0E-04	0,775	1294	26	4,1E-02	4,6E-02	4,1E-02	7,1E-04	0,775	1094	23
43	2,7E-02	4,6E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,776	1307	26	3,7E-02	4,5E-02	3,5E-02	6,5E-04	0,776	1196	24
50	2,9E-02	4,4E-02	2,9E-02	5,7E-04	0,775	1362	26	3,8E-02	4,6E-02	3,4E-02	6,6E-04	0,776	1173	24
57	2,7E-02	3,4E-02	4,1E-02	5,6E-04	0,776	1380	26	3,6E-02	4,4E-02	3,5E-02	6,4E-04	0,776	1216	24
64	2,9E-02	4,0E-02	2,6E-02	5,3E-04	0,775	1465	27	3,1E-02	4,6E-02	3,7E-02	6,3E-04	0,775	1237	24
72	2,9E-02	3,9E-02	3,3E-02	5,6E-04	0,775	1380	26	4,0E-02	3,6E-02	3,8E-02	6,3E-04	0,776	1236	24
78	2,1E-02	3,8E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,776	1524	27	2,7E-02	4,3E-02	3,3E-02	5,8E-04	0,775	1346	25

Date	Moules à 10Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,0E-02	6,7E-02	3,7E-02	8,3E-04	0,385	462	20	5,6E-02	5,1E-02	4,5E-02	8,1E-04	0,383	473	20
4	5,8E-02	4,3E-02	3,7E-02	7,5E-04	0,384	515	23	3,0E-02	4,4E-02	6,1E-02	7,2E-04	0,384	533	23
7	4,6E-02	5,1E-02	2,5E-02	6,6E-04	0,383	579	27	3,3E-02	4,2E-02	3,3E-02	5,8E-04	0,383	664	26
9	4,5E-02	3,4E-02	2,6E-02	5,6E-04	0,383	680	29	2,7E-02	3,5E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,384	755	28
11	3,6E-02	4,0E-02	2,0E-02	5,2E-04	0,385	745	31	3,8E-02	3,0E-02	3,1E-02	5,2E-04	0,385	734	29
14	4,1E-02	3,5E-02	2,2E-02	5,3E-04	0,383	724	30	3,2E-02	2,8E-02	4,0E-02	5,3E-04	0,385	724	28
18	3,1E-02	1,7E-02	2,8E-02	4,2E-04	0,383	906	35	2,4E-02	2,1E-02	3,6E-02	4,5E-04	0,382	850	33
21	3,2E-02	2,1E-02	2,9E-02	4,6E-04	0,382	837	33	2,7E-02	2,4E-02	3,5E-02	4,8E-04	0,381	798	31
23	2,3E-02	3,0E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,384	872	33	3,0E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,8E-04	0,383	797	31
36	1,9E-02	1,5E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,383	1245	35	1,9E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,4E-04	0,383	1125	32
39	1,5E-02	1,7E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,382	1260	34	2,0E-02	2,5E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,383	1035	31
43	1,2E-02	2,3E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,382	1305	35	1,9E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,382	1167	32
50	1,3E-02	2,4E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,383	1359	34	1,9E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,382	1144	32
57	1,2E-02	1,7E-02	2,1E-02	2,8E-04	0,381	1376	35	1,8E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,2E-04	0,383	1193	32
64	1,3E-02	2,1E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,382	1489	36	1,4E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,383	1213	33
72	1,3E-02	2,0E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,382	1338	34	2,0E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,383	1235	33
78	8,6E-03	1,9E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,382	1556	36	1,3E-02	2,2E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,382	1335	33

Date	Moules à 10Hz													
	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,2E-02	1,1E-01	5,8E-02	1,3E-03	0,757	567	20	9,1E-02	9,8E-02	5,1E-02	1,3E-03	0,754	590	19
4	9,8E-02	5,4E-02	6,8E-02	1,2E-03	0,753	631	21	6,0E-02	6,2E-02	8,8E-02	1,1E-03	0,753	674	21
7	7,3E-02	6,5E-02	4,4E-02	9,9E-04	0,752	762	24	5,8E-02	6,8E-02	5,3E-02	9,5E-04	0,752	791	23
9	6,7E-02	4,5E-02	4,9E-02	8,8E-04	0,753	859	25	4,3E-02	5,8E-02	5,8E-02	8,5E-04	0,753	886	25
11	5,9E-02	5,9E-02	3,5E-02	8,3E-04	0,756	913	26	5,7E-02	4,7E-02	5,5E-02	8,5E-04	0,757	888	25
14	6,1E-02	5,1E-02	3,9E-02	8,2E-04	0,751	915	27	4,8E-02	4,7E-02	6,2E-02	8,4E-04	0,752	897	25
18	4,8E-02	3,1E-02	4,4E-02	6,9E-04	0,748	1088	30	4,0E-02	3,7E-02	5,4E-02	7,3E-04	0,749	1027	28
21	5,0E-02	3,7E-02	4,6E-02	7,4E-04	0,749	1016	28	4,4E-02	4,3E-02	5,6E-02	8,0E-04	0,749	940	27
23	3,9E-02	4,8E-02	4,1E-02	7,1E-04	0,747	1057	29	5,2E-02	4,4E-02	4,9E-02	8,0E-04	0,748	934	27
36	3,4E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,745	1364	30	3,3E-02	3,6E-02	4,0E-02	6,1E-04	0,748	1235	28
39	2,8E-02	3,0E-02	3,8E-02	5,3E-04	0,747	1402	30	3,6E-02	4,1E-02	3,7E-02	6,3E-04	0,747	1182	27
43	2,4E-02	4,0E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,747	1427	30	3,3E-02	4,0E-02	3,1E-02	5,8E-04	0,748	1296	28
50	2,6E-02	3,8E-02	2,6E-02	5,0E-04	0,748	1487	30	3,4E-02	4,1E-02	3,1E-02	5,9E-04	0,745	1261	27
57	2,4E-02	3,0E-02	3,6E-02	5,0E-04	0,749	1507	30	3,2E-02	3,9E-02	3,1E-02	5,7E-04	0,746	1314	28
64	2,6E-02	3,5E-02	2,3E-02	4,7E-04	0,750	1599	31	2,8E-02	4,0E-02	3,3E-02	5,6E-04	0,745	1331	28
72	2,6E-02	3,4E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,745	1506	30	3,5E-02	3,2E-02	3,4E-02	5,6E-04	0,750	1340	28
78	2,0E-02	3,3E-02	2,9E-02	4,5E-04	0,751	1658	31	2,5E-02	3,8E-02	3,0E-02	5,1E-04	0,750	1461	29

Annexe 21 – Résultats d'essais à 35°C et 45% d'HR – Essais à 15 °C

Moules à 0,1Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,1E-02	6,8E-02	4,3E-02	1,0E-03	0,404	393	14	7,1E-02	6,1E-02	4,3E-02	9,3E-04	0,404	435	14	1,1E-01	9,3E-02	7,7E-02	1,5E-03	0,791	518	13	1,0E-01	9,4E-02	7,5E-02	1,4E-03	0,789	546	12
4	4,0E-02	4,7E-02	5,4E-02	7,6E-04	0,404	532	19	4,0E-02	5,4E-02	4,8E-02	7,5E-04	0,404	538	19	6,5E-02	7,1E-02	8,2E-02	1,2E-03	0,790	671	16	6,6E-02	8,3E-02	7,6E-02	1,2E-03	0,790	667	15
7	3,5E-02	3,7E-02	4,2E-02	6,1E-04	0,404	661	22	3,4E-02	4,6E-02	5,1E-02	6,9E-04	0,403	584	21	5,5E-02	6,0E-02	6,6E-02	9,7E-04	0,790	811	18	5,8E-02	7,2E-02	8,0E-02	1,1E-03	0,790	711	17
9	3,0E-02	3,0E-02	4,2E-02	5,5E-04	0,403	733	24	3,3E-02	3,9E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,403	705	23	4,7E-02	5,0E-02	6,7E-02	8,8E-04	0,789	897	19	5,4E-02	6,2E-02	5,7E-02	9,1E-04	0,790	863	19
11	2,9E-02	3,1E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,403	825	25	3,0E-02	3,7E-02	3,5E-02	5,4E-04	0,403	744	24	4,7E-02	5,0E-02	5,1E-02	7,9E-04	0,790	995	20	5,0E-02	5,8E-02	5,7E-02	8,8E-04	0,790	902	20
14	2,2E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,403	989	27	3,1E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,403	891	26	3,7E-02	4,4E-02	4,5E-02	6,8E-04	0,789	1166	21	5,0E-02	4,2E-02	5,0E-02	7,5E-04	0,789	1052	21
18								3,1E-02	2,3E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,403	906	25								5,0E-02	4,0E-02	4,4E-02	7,4E-04	0,788	1060	20
21								2,6E-02	3,0E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,403	928	25								4,3E-02	4,8E-02	3,7E-02	7,2E-04	0,789	1102	20
23								2,0E-02	3,0E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,402	949	26								3,5E-02	5,0E-02	4,4E-02	7,1E-04	0,788	1107	21
36								1,8E-02	1,9E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,391	1296	27								3,3E-02	3,5E-02	3,1E-02	5,5E-04	0,777	1420	22
39								1,8E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,392	1269	27								3,4E-02	3,4E-02	3,1E-02	5,5E-04	0,777	1412	22
43								1,9E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,391	1273	26								3,3E-02	3,0E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,777	1423	22
50								1,6E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,392	1392	28								2,9E-02	3,4E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,778	1499	23
57								1,8E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,393	1332	26								3,2E-02	3,4E-02	2,8E-02	5,2E-04	0,778	1498	22
64								1,2E-02	2,1E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,392	1467	29								2,3E-02	3,7E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,779	1585	23
72								1,8E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,392	1420	27								3,1E-02	3,0E-02	2,9E-02	5,0E-04	0,779	1549	22
78								1,1E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,392	1684	31								2,1E-02	3,1E-02	2,7E-02	4,4E-04	0,779	1782	25
84								1,3E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,392	1603	30								2,4E-02	3,0E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,779	1706	24

Moules à 1Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,3E-02	5,3E-02	3,5E-02	8,1E-04	0,403	498	18	5,5E-02	4,8E-02	3,6E-02	7,3E-04	0,403	549	18	9,2E-02	7,3E-02	6,6E-02	1,2E-03	0,792	639	15	8,4E-02	7,6E-02	6,7E-02	1,2E-03	0,791	660	15
4	2,8E-02	3,3E-02	3,9E-02	5,3E-04	0,403	753	24	2,9E-02	3,7E-02	3,5E-02	5,3E-04	0,403	758	24	4,9E-02	5,3E-02	6,2E-02	8,8E-04	0,792	896	20	5,2E-02	6,0E-02	5,9E-02	9,0E-04	0,792	878	20
7	2,3E-02	2,4E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,403	1018	28	2,3E-02	3,0E-02	3,3E-02	4,6E-04	0,402	884	26	4,0E-02	4,3E-02	4,6E-02	6,9E-04	0,792	1144	23	4,3E-02	5,1E-02	5,6E-02	7,9E-04	0,792	997	22
9	1,8E-02	1,9E-02	2,6E-02	3,4E-04	0,402	1184	30	2,2E-02	2,4E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,402	1133	30	3,2E-02	3,5E-02	4,5E-02	6,0E-04	0,792	1315	25	3,9E-02	4,1E-02	3,9E-02	6,3E-04	0,792	1255	25
11	1,8E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,402	1379	32	2,0E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,402	1211	31	3,2E-02	3,3E-02	3,4E-02	5,3E-04	0,792	1485	26	3,6E-02	3,7E-02	4,0E-02	6,0E-04	0,792	1329	25
14	1,3E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,3E-04	0,402	1715	35	1,7E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,402	1512	33	2,5E-02	2,9E-02	2,9E-02	4,5E-04	0,792	1772	27	3,1E-02	2,9E-02	3,4E-02	5,0E-04	0,792	1577	27
18								2,1E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,403	1478	31								3,6E-02	2,4E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,791	1539	25
21								1,7E-02	1,9E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,403	1510	29								3,1E-02	3,3E-02	2,4E-02	4,9E-04	0,792	1615	25
23								1,1E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,403	1574	31								2,3E-02	3,6E-02	3,0E-02	4,9E-04	0,792	1619	25
36								1,2E-02	1,2E-02	9,5E-03	1,8E-04	0,404	2189	32								2,3E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,792	2157	27
39								1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,403	2147	32								2,3E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,792	2138	26
43								1,1E-02	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,404	2100	30								2,2E-02	2,0E-02	2,6E-02	3,7E-04	0,792	2123	25
50								1,0E-02	1,1E-02	9,0E-03	1,7E-04	0,403	2411	34								2,1E-02	2,3E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,792	2299	27
57								1,2E-02	1,2E-02	8,8E-03	1,9E-04	0,403	2169	29								2,3E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,792	2255	26
64								5,9E-03	1,4E-02	9,1E-03	1,6E-04	0,403	2493	35								1,4E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,792	2432	28
72								1,2E-02	9,8E-03	9,3E-03	1,7E-04	0,403	2352	30								2,2E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,792	2319	25
78								5,9E-03	1,0E-02	7,9E-03	1,3E-04	0,403	3012	38								1,3E-02	2,2E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,792	2790	29
84								[illegible]														[illegible]						

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,5E-02	4,6E-02	3,1E-02	7,1E-04	0,403	571	21	4,7E-02	4,1E-02	3,2E-02	6,4E-04	0,402	631	21	8,0E-02	6,2E-02	5,9E-02	1,1E-03	0,790	729	18	7,2E-02	6,7E-02	6,1E-02	1,1E-03	0,790	746	18
4	2,2E-02	2,6E-02	3,3E-02	4,3E-04	0,403	927	28	2,3E-02	3,0E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,403	936	28	4,2E-02	4,4E-02	5,2E-02	7,4E-04	0,790	1066	24	4,4E-02	5,0E-02	5,0E-02	7,6E-04	0,790	1037	23
7	1,8E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,402	1310	33	1,9E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,6E-04	0,402	1124	31	3,3E-02	3,5E-02	3,8E-02	5,7E-04	0,790	1395	27	3,7E-02	4,2E-02	4,2E-02	6,4E-04	0,790	1234	26
9	1,4E-02	1,4E-02	2,0E-02	2,6E-04	0,402	1553	36	1,7E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,402	1482	35	2,6E-02	2,9E-02	3,4E-02	4,8E-04	0,790	1647	29	3,2E-02	3,2E-02	3,1E-02	5,1E-04	0,790	1555	29
11	1,4E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,402	1837	38	1,5E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,402	1590	36	2,5E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,790	1857	31	3,0E-02	2,8E-02	3,2E-02	4,8E-04	0,790	1656	30
14	9,5E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,7E-04	0,402	2329	41	1,2E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,402	2027	39	2,0E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,790	2237	32	2,4E-02	2,4E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,790	1985	31
18								1,6E-02	9,1E-03	1,2E-02	2,1E-04	0,403	1925	36								2,9E-02	1,9E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,790	1917	29
21								1,4E-02	1,5E-02	8,8E-03	2,1E-04	0,403	1944	33								2,6E-02	2,7E-02	1,9E-02	4,0E-04	0,790	1980	28
23								8,0E-03	1,7E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,403	2037	36								1,8E-02	3,0E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,790	1981	29
36								8,9E-03	9,5E-03	6,9E-03	1,4E-04	0,404	2879	38								1,7E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,747	2815	30
39								9,3E-03	8,3E-03	8,1E-03	1,4E-04	0,403	2831	37								1,7E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,748	2806	30
43								8,5E-03	7,4E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,403	2732	34								1,7E-02	1,6E-02	2,1E-02	3,0E-04	0,791	2630	29
50								[illegible]														[illegible]						

Annexe 22 – Résultats d'essais à 35°C et 45% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4							
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,3E-02	5,9E-02	5,0E-02	9,2E-04	0,404	437	13	6,3E-02	6,0E-02	5,5E-02	9,5E-04	0,403	426	13	9,4E-02	8,5E-02	8,5E-02	1,4E-03	0,790	556	12	9,8E-02	9,3E-02	8,5E-02	1,5E-03	0,789	539	12
4	4,2E-02	5,2E-02	5,8E-02	8,2E-04	0,403	492	17	5,7E-02	5,0E-02	4,6E-02	8,1E-04	0,403	498	16	6,7E-02	7,9E-02	8,3E-02	1,2E-03	0,790	643	14	8,3E-02	7,6E-02	7,4E-02	1,2E-03	0,790	641	14
7	4,4E-02	5,8E-02	3,8E-02	7,6E-04	0,404	533	18	4,5E-02	3,5E-02	5,7E-02	7,2E-04	0,403	557	18	6,9E-02	8,2E-02	5,8E-02	1,1E-03	0,790	702	16	7,4E-02	6,1E-02	7,3E-02	1,1E-03	0,791	720	16
9	3,7E-02	4,3E-02	3,2E-02	6,0E-04	0,404	669	20	4,0E-02	4,9E-02	4,1E-02	6,9E-04	0,403	586	20	5,7E-02	6,6E-02	5,2E-02	9,4E-04	0,790	840	17	6,1E-02	7,3E-02	6,4E-02	1,0E-03	0,789	755	17
11	4,5E-02	3,4E-02	3,1E-02	5,9E-04	0,404	685	21	4,2E-02	3,9E-02	3,7E-02	6,2E-04	0,403	648	21	6,9E-02	5,2E-02	4,7E-02	9,0E-04	0,790	875	18	6,2E-02	6,3E-02	5,7E-02	9,7E-04	0,789	818	18
14	3,1E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,2E-04	0,403	778	23	3,3E-02	3,0E-02	4,3E-02	5,6E-04	0,403	719	23	5,1E-02	5,0E-02	5,0E-02	8,1E-04	0,790	978	19	5,2E-02	4,9E-02	6,5E-02	8,7E-04	0,789	902	19
18								3,7E-02	3,2E-02	3,1E-02	5,6E-04	0,403	724	21								5,7E-02	5,2E-02	5,0E-02	8,9E-04	0,788	889	17
21								2,3E-02	3,1E-02	3,3E-02	4,8E-04	0,403	832	23								3,8E-02	5,0E-02	5,0E-02	7,7E-04	0,789	1028	19
23								3,4E-02	2,5E-02	3,8E-02	5,3E-04	0,403	757	23								4,9E-02	4,0E-02	5,8E-02	8,1E-04	0,787	967	19
36								1,9E-02	1,6E-02	2,9E-02	3,6E-04	0,392	1094	24								3,4E-02	3,0E-02	4,8E-02	6,2E-04	0,778	1248	20
39								2,1E-02	2,5E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,392	1036	23								3,6E-02	4,0E-02	3,8E-02	6,4E-04	0,779	1225	19
43								2,1E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,392	1119	24								3,6E-02	3,7E-02	3,5E-02	6,0E-04	0,778	1297	20
50								2,1E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,393	1148	24								3,5E-02	3,7E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,778	1309	20
57								2,0E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,393	1204	25								3,5E-02	3,7E-02	3,1E-02	5,7E-04	0,779	1375	21
64								2,0E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,392	1199	25								3,5E-02	3,6E-02	3,2E-02	5,7E-04	0,778	1368	21
72								2,2E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,392	1153	24								3,7E-02	3,4E-02	3,2E-02	5,7E-04	0,778	1358	20
78								1,6E-02	1,7E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,392	1333	27								2,8E-02	3,0E-02	3,5E-02	5,2E-04	0,778	1509	22
84								1,6E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,392	1325	26								2,9E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,2E-04	0,778	1496	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4							
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,2E-02	4,7E-02	4,1E-02	7,5E-04	0,402	534	17	5,2E-02	4,8E-02	4,6E-02	7,8E-04	0,402	519	16	8,0E-02	7,0E-02	7,5E-02	1,2E-03	0,792	657	15	8,6E-02	7,7E-02	7,4E-02	1,2E-03	0,792	634	14
4	3,1E-02	3,9E-02	4,3E-02	6,1E-04	0,402	665	22	4,1E-02	3,6E-02	3,6E-02	6,0E-04	0,402	670	22	5,3E-02	6,2E-02	6,4E-02	9,6E-04	0,792	825	18	6,4E-02	5,9E-02	6,2E-02	9,7E-04	0,792	812	18
7	3,1E-02	4,1E-02	2,6E-02	5,3E-04	0,402	758	24	3,1E-02	2,5E-02	4,1E-02	5,1E-04	0,403	785	24	5,3E-02	6,1E-02	4,2E-02	8,4E-04	0,792	942	21	5,5E-02	4,5E-02	5,8E-02	8,4E-04	0,792	947	21
9	2,5E-02	2,9E-02	2,2E-02	4,0E-04	0,402	997	28	2,8E-02	3,2E-02	2,7E-02	4,6E-04	0,402	876	26	4,1E-02	4,7E-02	3,8E-02	6,8E-04	0,792	1167	23	4,6E-02	5,1E-02	4,6E-02	7,6E-04	0,792	1045	22
11	3,0E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,402	1046	28	2,9E-02	2,5E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,402	985	28	4,9E-02	3,7E-02	3,6E-02	6,6E-04	0,794	1211	24	4,6E-02	4,5E-02	3,9E-02	6,8E-04	0,793	1159	23
14	2,0E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,402	1218	30	2,0E-02	2,0E-02	2,7E-02	3,6E-04	0,402	1128	29	3,6E-02	3,4E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,791	1395	24	3,5E-02	3,7E-02	4,4E-02	6,1E-04	0,791	1293	24
18								2,5E-02	2,0E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,403	1099	28								4,2E-02	3,5E-02	3,9E-02	6,4E-04	0,792	1231	23
21								1,4E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,403	1306	30								2,6E-02	3,7E-02	3,5E-02	5,4E-04	0,792	1458	24
23								2,0E-02	1,6E-02	2,6E-02	3,4E-04	0,404	1174	28								3,3E-02	2,8E-02	4,2E-02	5,8E-04	0,792	1372	24
36								1,2E-02	9,9E-03	2,1E-02	2,4E-04	0,403	1679	29								2,3E-02	2,1E-02	3,6E-02	4,5E-04	0,791	1774	25
39								1,4E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,403	1590	28								2,6E-02	2,8E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,792	1746	24
43								1,4E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,403	1745	30								2,6E-02	2,5E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,791	1875	25
50								1,4E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,403	1797	30								2,6E-02	2,7E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,792	1884	25
57								1,4E-02	1,4E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,403	1910	31								2,5E-02	2,6E-02	2,0E-02	4,0E-04	0,792	2002	26
64								1,4E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,404	1899	31								2,6E-02	2,6E-02	2,0E-02	4,0E-04	0,792	1990	26
72								1,6E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,403	1773	28								2,7E-02	2,5E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,792	1951	24
78								9,2E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,9E-04	0,403	2158	33								1,8E-02	2,1E-02	2,5E-02	3,5E-04	0,792	2246	27
84								1,1E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,403	2157	32								2,1E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,792	2217	26

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN							9 kN						
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	4,6E-02	4,1E-02	3,7E-02	6,7E-04	0,402	602	20	4,7E-02	4,2E-02	4,1E-02	6,9E-04	0,402	585	19
4	2,6E-02	3,2E-02	3,6E-02	5,0E-04	0,402	800	26	3,4E-02	3,0E-02	3,1E-02	5,0E-04	0,402	807	26
7	2,5E-02	3,4E-02	2,1E-02	4,3E-04	0,402	940	29	2,4E-02	2,0E-02	3,3E-02	4,1E-04	0,402	975	29
9	1,9E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,403	1281	33	2,3E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,402	1114	31
11	2,4E-02	1,6E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,402	1345	34	2,3E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,2E-04	0,402	1266	33
14	1,6E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,402	1576	36	1,5E-02	1,6E-02	2,1E-02	2,7E-04	0,402	1467	35
18								2,0E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,403	1405	33
21								1,0E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,403	1697	35
23								1,5E-02	1,2E-02	2,1E-02	2,7E-04	0,403	1500	33
36								9,0E-03	7,6E-03	1,7E-02	1,9E-04	0,404	2143	34
39								1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,403	2030	33
43								1,1E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,8E-04	0,404	2258	35
50								1,1E-02	1,1E-02	9,2E-03	1,7E-04	0,404	2313	36
57								1,1E-02	1,1E-02	7,4E-03	1,6E-04	0,403	2466	37
64								1,1E-02	1,1E-02	7,8E-03	1,6E-04	0,403	2455	37
72								1,3E-02	1,0E-02	9,3E-03	1,8E-04	0,404	2236	31
78								6,7E-03	8,3E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,404	2804	39
84								8,4E-03	9,2E-03	8,3E-03	1,4E-04	0,403	2802	38

Date	4,6 kN							9 kN						
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,0E-02	6,1E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,790	736	18	7,8E-02	6,7E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,790	705	17
4	4,5E-02	5,3E-02	5,3E-02	8,1E-04	0,790	974	22	5,4E-02	5,0E-02	5,4E-02	8,4E-04	0,790	945	22
7	4,5E-02	5,1E-02	3,5E-02	7,0E-04	0,790	1133	25	4,6E-02	3,8E-02	4,9E-02	7,0E-04	0,791	1126	25
9	3,3E-02	3,8E-02	3,2E-02	5,5E-04	0,790	1427	27	3,9E-02	4,1E-02	3,8E-02	6,2E-04	0,791	1269	27
11	3,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,790	1525	28	3,8E-02	3,7E-02	3,1E-02	5,6E-04	0,790	1413	28
14	3,0E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,6E-04	0,790	1717	29	2,7E-02	3,1E-02	3,5E-02	4,9E-04	0,790	1600	29
18								3,5E-02	2,8E-02	3,3E-02	5,3E-04	0,790	1487	27
21								2,1E-02	3,1E-02	2,8E-02	4,4E-04	0,791	1778	28
23								2,6E-02	2,3E-02	3,5E-02	4,7E-04	0,790	1676	27
36								1,6E-02	1,5E-02	2,7E-02	3,2E-04	0,748	2324	28
39								1,9E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,748	2275	27
43								2,1E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,791	2322	29
50								2,1E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,791	2324	29
57								2,1E-02	2,1E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,791	2479	30
64								2,1E-02	2,1E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,791	2456	30
72								2,2E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,790	2395	27
78								1,4E-02	1,6E-02	2,1E-02	2,8E-04	0,790	2800	31
84								1,7E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,791	2763	30

Moules à 6Hz

Date	4,6 kN							9 kN						
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	4,1E-02	3,7E-02	3,3E-02	5,9E-04	0,398	669	23	4,2E-02	3,7E-02	3,7E-02	6,1E-04	0,397	647	23
4	2,2E-02	2,7E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,398	931	31	2,8E-02	2,5E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,398	935	31
7	2,1E-02	2,8E-02	1,7E-02	3,6E-04	0,398	1114	34	2,0E-02	1,7E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,398	1152	34
9	1,6E-02	1,8E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,398	1547	39	1,9E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,398	1333	36
11	2,0E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,398	1622	40	1,9E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,398	1517	39
14	1,3E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,398	1907	41	1,2E-02	1,4E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,398	1763	40
18								1,6E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,399	1678	38
21								8,2E-03	1,5E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,400	2045	41
23								1,2E-02	9,6E-03	1,8E-02	2,2E-04	0,399	1793	37
36								7,0E-03	6,2E-03	1,5E-02	1,6E-04	0,400	2575	40
39								9,5E-03	1,0E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,400	2421	38
43								9,4E-03	8,5E-03	8,6E-03	1,5E-04	0,401	2719	41
50								9,3E-03	9,2E-03	7,4E-03	1,4E-04	0,399	2777	42
57								9,1E-03	9,3E-03	5,9E-03	1,3E-04	0,399	2957	43
64								9,1E-03	9,1E-03	6,2E-03	1,4E-04	0,399	2948	44
72								1,1E-02	8,6E-03	7,7E-03	1,5E-04	0,400	2634	36
78								5,3E-03	6,9E-03	9,2E-03	1,2E-04	0,400	3358	46
84								7,0E-03	7,8E-03	6,8E-03	1,2E-04	0,400	3338	45

Date	4,6 kN							9 kN						
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,2E-02	5,4E-02	6,2E-02	9,6E-04	0,777	809	20	7,1E-02	6,0E-02	6,0E-02	1,0E-03	0,777	769	20
4	3,9E-02	4,6E-02	4,5E-02	7,0E-04	0,777	1110	26	4,7E-02	4,3E-02	4,8E-02	7,3E-04	0,778	1061	26
7	3,8E-02	4,3E-02	3,0E-02	6,0E-04	0,778	1303	29	3,9E-02	3,3E-02	4,3E-02	6,1E-04	0,778	1285	29
9	2,8E-02	3,2E-02	2,7E-02	4,7E-04	0,779	1661	32	3,4E-02	3,5E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,779	1467	31
11	3,3E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,779	1770	32	3,3E-02	3,1E-02	2,6E-02	4,8E-04	0,781	1629	32
14	2,5E-02	2,3E-02	2,4E-02	3,9E-04	0,779	2007	33	2,3E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,2E-04	0,779	1861	33
18								3,0E-02	2,4E-02	2,8E-02	4,5E-04	0,777	1712	31
21								1,7E-02	2,7E-02	2,4E-02	3,8E-04	0,778	2052	33
23								2,2E-02	2,0E-02	3,0E-02	4,0E-04	0,777	1937	31
36								1,5E-02	1,4E-02	2,7E-02	3,1E-04	0,777	2504	32
39								1,8E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,776	2485	32
43								1,8E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,776	2679	33
50								1,9E-02	1,9E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,778	2676	33
57								1,8E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,777	2856	34
64								1,9E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,778	2833	34
72								1,9E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,777	2754	31
78								1,1E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,4E-04	0,777	3234	36
84								1,5E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,777	3183	35

Moules à 10Hz

Date	4,6 kN							9 kN						
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	3,6E-02	3,2E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,384	731	28	3,8E-02	3,2E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,384	703	27
4	1,9E-02	2,3E-02	2,6E-02	3,6E-04	0,385	1056	36	2,4E-02	2,1E-02	2,3E-02	3,6E-04	0,384	1055	36
7	1,8E-02	2,4E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,384	1280	39	1,7E-02	1,4E-02	2,4E-02	2,9E-04	0,384	1305	39
9	1,3E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,385	1784	45	1,6E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,384	1537	42
11	1,7E-02	1,1E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,388	1856	46	1,7E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,384	1737	45
14	1,1E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,388	2212	48	9,9E-03	1,2E-02	1,4E-02	1,9E-04	0,385	2014	46
18								1,4E-02	9,9E-03	1,2E-02	2,0E-04	0,383	1921	44
21								6,9E-03	1,2E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,388	2350	47
23								1,0E-02	8,1E-03	1,6E-02	1,9E-04	0,386	2060	43
36								5,7E-03	5,2E-03	1,3E-02	1,3E-04	0,385	2947	47
39								8,1E-03	8,3E-03	8,7E-03	1,4E-04	0,386	2759	43
43								8,0E-03	7,2E-03	7,3E-03	1,2E-04	0,388	3110	48
50								7,9E-03	7,7E-03	6,2E-03	1,2E-04	0,387	3212	49
57								7,7E-03	8,0E-03	5,0E-03	1,2E-04	0,387	3356	50
64								7,9E-03	7,8E-03	5,2E-03	1,2E-04	0,386	3329	50
72								9,7E-03	7,3E-03	6,5E-03	1,3E-04	0,386	2965	42
78								4,5E-03	5,8E-03	7,7E-03	1,0E-04	0,385	3843	54
84								6,1E-03	6,7E-03	5,9E-03	1,0E-04	0,387	3724	52

Date	4,6 kN							9 kN						
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,6E-02	4,9E-02	5,6E-02	8,7E-04	0,752	865	24	6,4E-02	5,4E-02	5,5E-02	9,2E-04	0,751	819	23
4	3,5E-02	4,0E-02	3,8E-02	6,1E-04	0,751	1232	30	4,1E-02	3,8E-02	4,3E-02	6,5E-04	0,754	1165	29
7	3,4E-02	3,7E-02	2,6E-02	5,2E-04	0,752	1443	33	3,4E-02	2,9E-02	3,8E-02	5,3E-04	0,754	1418	33
9	2,4E-02	2,8E-02	2,3E-02	4,0E-04	0,749	1858	36	3,0E-02	3,0E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,754	1634	35
11	2,8E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,752	1978	37	2,9E-02	2,8E-02	2,2E-02	4,2E-04	0,754	1808	37
14	2,2E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,749	2257	38	2,0E-02	2,4E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,754	2074	37
18								2,6E-02	2,1E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,751	1881	35
21								1,5E-02	2,3E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,749	2286	37
23								1,9E-02	1,7E-02	2,6E-02	3,5E-04	0,747	2144	36
36								1,3E-02	1,2E-02	2,3E-02	2,7E-04	0,748	2770	37
39								1,6E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,749	2729	36
43								1,6E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,748	2952	38
50								1,6E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,746	2933	38
57								1,6E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,746	3142	39
64								1,6E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,749	3104	39
72								1,7E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,746	2994	36
78								1,0E-02	1,2E-02	1,6E-02	2,1E-04	0,749	3545	41
84								1,3E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,749	3496	40

Annexe 23 – Résultats d'essais à 35°C et 45% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,1E-02	6,7E-02	7,7E-02	1,2E-03	0,404	349	11	8,7E-02	8,3E-02	7,5E-02	1,3E-03	0,403	312	11	1,1E-01	1,2E-01	1,3E-01	1,9E-03	0,789	414	10	1,4E-01	1,4E-01	1,3E-01	2,2E-03	0,790	362	10
4	4,8E-02	6,6E-02	5,2E-02	8,9E-04	0,403	451	14	6,3E-02	4,9E-02	7,2E-02	9,7E-04	0,403	415	13	7,5E-02	1,1E-01	9,0E-02	1,5E-03	0,790	544	12	1,0E-01	8,6E-02	1,1E-01	1,6E-03	0,789	494	12
7	5,2E-02	5,8E-02	5,7E-02	9,0E-04	0,403	448	14	5,5E-02	4,8E-02	6,0E-02	8,6E-04	0,403	467	14	8,3E-02	9,2E-02	9,5E-02	1,5E-03	0,790	544	12	8,9E-02	8,1E-02	9,8E-02	1,4E-03	0,790	556	12
9	5,1E-02	4,3E-02	6,0E-02	8,3E-04	0,403	487	15	4,5E-02	5,8E-02	5,2E-02	8,2E-04	0,403	489	15	8,5E-02	6,6E-02	8,8E-02	1,3E-03	0,791	618	14	7,5E-02	9,1E-02	8,3E-02	1,3E-03	0,789	598	13
11	4,6E-02	4,5E-02	4,4E-02	7,2E-04	0,403	558	16	5,0E-02	5,6E-02	5,2E-02	8,4E-04	0,404	483	14	7,3E-02	7,3E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,789	688	14	7,9E-02	8,6E-02	8,3E-02	1,3E-03	0,790	600	13
14	3,9E-02	4,0E-02	4,7E-02	6,8E-04	0,403	596	18	4,6E-02	5,3E-02	4,1E-02	7,4E-04	0,403	545	16	5,6E-02	5,6E-02	6,9E-02	9,7E-04	0,790	812	15	7,3E-02	7,8E-02	6,9E-02	1,2E-03	0,789	678	14
16	3,8E-02	3,6E-02	4,3E-02	6,3E-04	0,403	638	17								6,0E-02	5,6E-02	6,6E-02	9,8E-04	0,789	808	15							
18								4,9E-02	4,1E-02	3,4E-02	6,9E-04	0,402	583	17								7,1E-02	5,5E-02	6,6E-02	1,1E-03	0,788	740	15
21								3,2E-02	3,9E-02	5,9E-02	7,2E-04	0,402	559	17								5,3E-02	6,7E-02	7,3E-02	1,1E-03	0,788	734	15
23								2,8E-02	3,2E-02	3,8E-02	5,4E-04	0,391	726	16								4,8E-02	5,1E-02	5,8E-02	8,8E-04	0,777	888	15
36								2,9E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,7E-04	0,391	831	18								4,8E-02	4,8E-02	4,9E-02	8,0E-04	0,776	966	16
39								3,2E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,7E-04	0,391	838	18								5,2E-02	4,6E-02	4,6E-02	7,9E-04	0,776	977	16
43								2,4E-02	3,0E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,391	867	18								4,5E-02	4,9E-02	4,5E-02	7,7E-04	0,777	1009	16
50								2,6E-02	2,8E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,392	896	19								4,4E-02	4,9E-02	4,2E-02	7,5E-04	0,778	1034	16
57								2,5E-02	2,9E-02	2,8E-02	4,5E-04	0,391	866	19								4,4E-02	4,9E-02	4,7E-02	7,8E-04	0,779	1000	16
64								2,2E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,392	903	19								3,9E-02	4,5E-02	5,0E-02	7,4E-04	0,777	1048	17
72								2,3E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,392	932	19								4,0E-02	4,5E-02	4,5E-02	7,2E-04	0,778	1083	17
78								2,3E-02	2,5E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,391	959	20								3,8E-02	4,3E-02	4,4E-02	7,0E-04	0,777	1118	17
84								2,3E-02	2,5E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,394	959	20								3,9E-02	4,4E-02	4,4E-02	7,0E-04	0,785	1120	17

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,0E-02	5,5E-02	6,4E-02	9,6E-04	0,403	419	14	7,3E-02	6,7E-02	6,0E-02	1,1E-03	0,404	382	14	9,0E-02	9,0E-02	1,0E-01	1,5E-03	0,793	520	13	1,2E-01	1,0E-01	9,5E-02	1,7E-03	0,792	472	13
4	3,8E-02	5,3E-02	4,3E-02	7,2E-04	0,403	558	18	5,1E-02	4,1E-02	6,1E-02	8,1E-04	0,403	498	17	6,1E-02	8,8E-02	7,5E-02	1,2E-03	0,792	658	16	8,4E-02	7,4E-02	9,5E-02	1,3E-03	0,792	592	15
7	4,1E-02	4,5E-02	4,7E-02	7,2E-04	0,403	562	18	4,4E-02	4,0E-02	4,8E-02	7,0E-04	0,403	576	18	6,8E-02	7,4E-02	7,9E-02	1,2E-03	0,793	666	16	7,3E-02	6,8E-02	8,1E-02	1,2E-03	0,793	674	16
9	3,9E-02	3,2E-02	4,6E-02	6,3E-04	0,403	639	21	3,7E-02	4,5E-02	4,1E-02	6,5E-04	0,402	620	20	6,8E-02	5,1E-02	6,8E-02	1,0E-03	0,792	791	18	6,3E-02	7,2E-02	6,9E-02	1,1E-03	0,792	736	17
11	3,5E-02	3,4E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,403	739	21	4,0E-02	4,3E-02	4,1E-02	6,6E-04	0,403	612	19	5,8E-02	5,7E-02	5,3E-02	9,0E-04	0,792	876	19	6,5E-02	6,9E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,792	739	17
14	2,7E-02	2,8E-02	3,4E-02	4,7E-04	0,403	848	25	3,3E-02	4,0E-02	3,2E-02	5,6E-04	0,403	720	22	4,2E-02	4,2E-02	5,4E-02	7,4E-04	0,792	1073	21	5,6E-02	6,2E-02	5,6E-02	9,2E-04	0,792	857	19
16	2,7E-02	2,6E-02	3,2E-02	4,6E-04	0,403	870	22								4,7E-02	4,2E-02	5,1E-02	7,5E-04	0,792	1053	19							
18								3,5E-02	3,1E-02	2,5E-02	5,1E-04	0,403	796	23								5,4E-02	4,4E-02	5,0E-02	8,2E-04	0,792	965	20
21								2,2E-02	3,1E-02	4,3E-02	5,3E-04	0,403	758	22								4,1E-02	5,4E-02	5,5E-02	8,4E-04	0,791	948	20
23								2,1E-02	2,4E-02	3,1E-02	4,2E-04	0,404	954	20								3,9E-02	4,0E-02	4,7E-02	7,0E-04	0,792	1129	19
36								2,2E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,403	1136	23								3,7E-02	3,9E-02	3,8E-02	6,3E-04	0,792	1257	21
39								2,3E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,404	1151	24								3,9E-02	3,7E-02	3,7E-02	6,2E-04	0,792	1268	21
43								1,9E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,404	1192	24								3,6E-02	3,7E-02	3,6E-02	6,1E-04	0,792	1309	21
50								2,0E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,403	1255	25								3,6E-02	3,7E-02	3,2E-02	5,8E-04	0,792	1360	21
57								1,9E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,404	1204	24								3,6E-02	3,8E-02	3,5E-02	6,1E-04	0,792	1308	21
64								1,7E-02	1,9E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,403	1275	25								3,0E-02	3,5E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,791	1390	22
72								1,8E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,404	1313	25								3,2E-02	3,4E-02	3,4E-02	5,5E-04	0,792	1429	22
78								1,7E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,403	1375	26								3,0E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,792	1501	22
84								1,7E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,403	1371	24								3,0E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,792	1501	21

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,4E-02	4,8E-02	5,7E-02	8,6E-04	0,403	469	17	6,6E-02	5,9E-02	5,3E-02	9,5E-04	0,403	425	16	7,9E-02	7,8E-02	9,0E-02	1,3E-03	0,790	595	16	1,0E-01	9,0E-02	8,2E-02	1,4E-03	0,790	545	16
4	3,2E-02	4,6E-02	3,7E-02	6,2E-04	0,403	646	22	4,5E-02	3,7E-02	5,3E-02	7,1E-04	0,402	565	21	5,3E-02	7,7E-02	6,5E-02	1,1E-03	0,790	752	19	7,4E-02	6,5E-02	8,3E-02	1,2E-03	0,790	672	18
7	3,5E-02	3,8E-02	4,1E-02	6,1E-04	0,403	655	22	3,8E-02	3,5E-02	4,2E-02	6,1E-04	0,402	662	22	6,0E-02	6,3E-02	6,9E-02	1,0E-03	0,790	762	19	6,4E-02	6,1E-02	7,0E-02	1,0E-03	0,790	766	19
9	3,3E-02	2,7E-02	3,9E-02	5,3E-04	0,403	763	26	3,2E-02	3,8E-02	3,5E-02	5,6E-04	0,402	723	24	5,8E-02	4,3E-02	5,8E-02	8,5E-04	0,791	925	22	5,5E-02	6,2E-02	6,0E-02	9,4E-04	0,791	845	21
11	2,9E-02	2,8E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,403	889	27	3,5E-02	3,7E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,403	712	23	5,0E-02	4,9E-02	4,5E-02	7,7E-04	0,790	1022	23	5,8E-02	5,9E-02	6,0E-02	9,4E-04	0,790	845	21
14	2,1E-02	2,2E-02	2,7E-02	3,8E-04	0,402	1065	31	2,7E-02	3,4E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,402	857	27	3,5E-02	3,5E-02	4,6E-02	6,2E-04	0,790	1271	25	4,7E-02	5,4E-02	4,9E-02	7,9E-04	0,790	995	23
16	2,2E-02	2,1E-02	2,7E-02	3,8E-04	0,403	1063									4,0E-02	3,5E-02	4,4E-02	6,4E-04	0,790	1237	22							
18								2,8E-02	2,5E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,403	979	28								4,5E-02	3,8E-02	4,3E-02	7,0E-04	0,790	1134	24
21								1,7E-02	2,6E-02	3,6E-02	4,4E-04	0,403	920	27								3,6E-02	4,7E-02	4,6E-02	7,2E-04	0,790	1103	24
23								1,8E-02	2,0E-02	2,7E-02	3,6E-04	0,403	1133	23								3,1E-02	3,1E-02	3,7E-02	5,5E-04	0,756	1384	22
36								1,7E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,403	1397	28								2,8E-02	3,1E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,755	1545	24
39								1,8E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,403	1411	28								2,9E-02	2,8E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,751	1563	24
43								1,6E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,403	1463	28								3,1E-02	3,1E-02	3,1E-02	5,1E-04	0,790	1538	24
50								1,6E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,403	1553	29								3,1E-02	3,1E-02	2,6E-02	4,9E-04	0,789	1611	25
57								1,6E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,403	1480	29								3,1E-02	3,3E-02	2,9E-02	5,1E-04	0,790	1540	25
64								1,4E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,403	1584	30								2,6E-02	3,0E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,790	1648	26
72								1,5E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,403	1624	30								2,7E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,790	1692	25
78								1,3E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,403	1718	31								2,5E-02	2,8E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,790	1791	26
84								1,4E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,403	1717	29								2,5E-02	2,8E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,790	1789	24

Moules à 6Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	4,9E-02	4,3E-02	5,2E-02	7,7E-04	0,397	513	20	6,1E-02	5,4E-02	4,8E-02	8,6E-04	0,397	461	19	7,2E-02	7,1E-02	8,2E-02	1,2E-03	0,778	645	19	9,3E-02	8,1E-02	7,4E-02	1,3E-03	0,778	593	18
4	2,8E-02	4,0E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,397	727	26	3,9E-02	3,3E-02	4,8E-02	6,3E-04	0,397	627	24	4,7E-02	6,9E-02	5,8E-02	9,4E-04	0,778	828	22	6,6E-02	6,0E-02	7,5E-02	1,1E-03	0,777	732	21
7	3,0E-02	3,3E-02	3,6E-02	5,3E-04	0,396	740	25	3,3E-02	3,1E-02	3,7E-02	5,3E-04	0,397	743	26	5,4E-02	5,6E-02	6,2E-02	9,2E-04	0,777	841	22	5,7E-02	5,5E-02	6,2E-02	9,2E-04	0,777	843	23
9	2,8E-02	2,3E-02	3,3E-02	4,5E-04	0,397	882	30	2,8E-02	3,2E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,397	822	29	5,1E-02	3,7E-02	5,0E-02	7,5E-04	0,778	1044	26	5,0E-02	5,4E-02	5,3E-02	8,3E-04	0,778	940	25
11	2,5E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,397	1034	32	3,1E-02	3,2E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,397	808	27	4,4E-02	4,3E-02	3,9E-02	6,8E-04	0,778	1147	27	5,2E-02	5,2E-02	5,3E-02	8,3E-04	0,779	938	24
14	1,7E-02	1,8E-02	2,3E-02	3,1E-04	0,398	1271	37	2,2E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,398	992	32	3,0E-02	3,1E-02	3,9E-02	5,4E-04	0,778	1446	29	4,1E-02	4,7E-02	4,4E-02	7,0E-04	0,778	1112	27
16	1,9E-02	1,8E-02	2,3E-02	3,2E-04	0,398	1250	29								3,5E-02	3,1E-02	3,8E-02	5,6E-04	0,778	1396	24							
18								1,6E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,398	1344	35								3,1E-02	3,9E-02	3,2E-02	5,6E-04	0,777	1387	29
21								2,4E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,397	1148	33								3,9E-02	3,3E-02	3,7E-02	6,0E-04	0,776	1285	28
23								1,4E-02	2,3E-02	3,0E-02	3,7E-04	0,396	1069	32								3,1E-02	4,1E-02	4,0E-02	6,2E-04	0,776	1249	28
36								1,5E-02	1,7E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,397	1303	27								2,9E-02	2,9E-02	3,6E-02	5,2E-04	0,776	1478	26
39								1,4E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,397	1635	33								2,7E-02	3,0E-02	2,7E-02	4,6E-04	0,775	1670	28
43								1,5E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,397	1652	33								2,8E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,776	1680	28
50								1,4E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,397	1710	34								2,7E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,777	1726	28
57								1,4E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,2E-04	0,397	1825	35								2,7E-02	2,7E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,775	1817	29
64								1,4E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,398	1732	35								2,8E-02	2,9E-02	2,5E-02	4,5E-04	0,776	1730	29
72								1,1E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,397	1865	36								2,3E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,777	1859	30
78								1,2E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,397	1918	35								2,4E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,777	1907	30
84								1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,397	2034	36								2,2E-02	2,5E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,777	2024	31

Moules à 10Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	4,5E-02	3,8E-02	4,7E-02	7,0E-04	0,382	547	24	5,5E-02	4,9E-02	4,3E-02	7,8E-04	0,382	492	23	6,3E-02	6,4E-02	7,3E-02	1,1E-03	0,752	699	22	8,5E-02	7,4E-02	6,8E-02	1,2E-03	0,752	628	22
4	2,5E-02	3,6E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,382	796	31	3,4E-02	2,9E-02	4,2E-02	5,6E-04	0,384	683	29	4,3E-02	6,2E-02	5,1E-02	8,4E-04	0,754	901	26	5,9E-02	5,4E-02	6,6E-02	9,5E-04	0,752	794	25
7	2,7E-02	2,9E-02	3,2E-02	4,7E-04	0,381	805	30	2,9E-02	2,7E-02	3,3E-02	4,7E-04	0,384	816	31	4,9E-02	5,0E-02	5,5E-02	8,3E-04	0,755	908	26	5,1E-02	5,0E-02	5,6E-02	8,3E-04	0,751	905	27
9	2,4E-02	2,0E-02	2,9E-02	3,9E-04	0,383	987	35	2,5E-02	2,8E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,383	912	34	4,5E-02	3,3E-02	4,3E-02	6,5E-04	0,757	1158	30	4,5E-02	4,8E-02	4,7E-02	7,4E-04	0,756	1025	29
11	2,1E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,382	1153	38	2,7E-02	2,8E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,385	890	32	3,9E-02	3,8E-02	3,4E-02	6,0E-04	0,752	1254	31	4,6E-02	4,6E-02	4,7E-02	7,4E-04	0,752	1020	28
14	1,5E-02	1,6E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,385	1453	42	1,9E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,384	1115	37	2,6E-02	2,7E-02	3,5E-02	4,8E-04	0,758	1592	34	3,6E-02	4,2E-02	3,9E-02	6,2E-04	0,756	1217	31
16	1,6E-02	1,5E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,382	1402	32								3,1E-02	2,7E-02	3,4E-02	4,9E-04	0,753	1525									
18								1,4E-02	1,8E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,382	1514	41								2,7E-02	3,4E-02	2,7E-02	5,0E-04	0,755	1523	33
21								2,0E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,381	1295	38								3,4E-02	2,9E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,748	1414	32
23								1,2E-02	2,0E-02	2,6E-02	3,2E-04	0,383	1190	36								2,7E-02	3,7E-02	3,4E-02	5,5E-04	0,747	1363	32
36								1,3E-02	1,4E-02	2,0E-02	2,6E-04	0,380	1438	31								2,6E-02	2,5E-02	3,2E-02	4,6E-04	0,749	1623	30
39								1,2E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,379	1815	39								2,3E-02	2,7E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,745	1819	33
43								1,3E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,382	1842	39								2,4E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,749	1828	33
50								1,2E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,381	1892	39								2,4E-02	2,3E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,750	1886	33
57								1,2E-02	1,2E-02	9,6E-03	1,9E-04	0,380	2032	41								2,4E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,748	1985	34
64								1,2E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,383	1927	40								2,5E-02	2,5E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,751	1900	33
72								1,0E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,380	2066	41								2,0E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,749	2036	34
78								1,1E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,382	2133	41								2,2E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,752	2091	34
84								9,8E-03	1,1E-02	9,9E-03	1,7E-04	0,380	2262	42								2,0E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,753	2218	35

Annexe 24 – Résultats d'essais à 35°C et 20% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,2E-02	3,9E-02	3,5E-02	6,3E-04	0,403	639	21	4,9E-02	7,2E-02	3,5E-02	8,5E-04	0,403	473	17	5,8E-02	5,8E-02	5,2E-02	9,2E-04	0,788	861	18	7,6E-02	1,0E-01	5,2E-02	1,3E-03	0,789	628	15
5	4,1E-02	2,8E-02	2,4E-02	5,1E-04	0,404	795	26	4,1E-02	2,7E-02	5,2E-02	6,6E-04	0,404	616	21	5,8E-02	4,3E-02	3,9E-02	7,6E-04	0,789	1035	22	5,1E-02	4,6E-02	8,4E-02	9,9E-04	0,788	799	17
8	2,0E-02	1,7E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,403	1312	33	3,5E-02	1,4E-02	3,3E-02	4,5E-04	0,403	897	24	3,3E-02	2,8E-02	3,0E-02	5,0E-04	0,789	1583	26	5,5E-02	2,7E-02	4,7E-02	7,1E-04	0,789	1112	20
12	1,3E-02	4,6E-02	2,3E-02	4,4E-04	0,403	906	28	2,3E-02	2,8E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,402	993	23	2,4E-02	5,6E-02	3,1E-02	6,1E-04	0,788	1297	25	3,7E-02	4,3E-02	3,7E-02	6,4E-04	0,787	1225	19
15	1,7E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,403	1545	35	2,2E-02	1,8E-02	2,9E-02	3,8E-04	0,403	1051	24	2,7E-02	2,5E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,789	1843	28	3,7E-02	3,1E-02	4,5E-02	6,2E-04	0,789	1277	20
18	1,5E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,404	1746	35	2,4E-02	1,9E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,403	1082	24	2,4E-02	2,8E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,790	1993	28	4,1E-02	3,3E-02	3,8E-02	6,1E-04	0,789	1296	20
27	1,1E-02	1,4E-02	9,9E-03	1,9E-04	0,403	2135	39	1,8E-02	2,4E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,403	1174	25	1,9E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,789	2403	31	3,0E-02	3,7E-02	3,4E-02	5,5E-04	0,789	1426	20
32	2,3E-02	1,2E-02	9,4E-03	2,4E-04	0,391	1613	32	2,2E-02	2,4E-02	1,4E-02	3,3E-04	0,391	1200	25	3,5E-02	2,2E-02	1,8E-02	4,1E-04	0,766	1847	25	3,5E-02	3,9E-02	2,6E-02	5,4E-04	0,766	1420	21
40	1,0E-02	1,1E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,391	1876	38	2,2E-02	1,6E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,391	1227	26	1,9E-02	2,0E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,767	2153	30	3,6E-02	2,7E-02	3,1E-02	5,3E-04	0,767	1448	21
46	9,5E-03	1,2E-02	7,9E-03	1,7E-04	0,392	2286	42	2,1E-02	1,5E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,392	1246	26	1,7E-02	2,0E-02	1,5E-02	3,1E-04	0,767	2486	32	3,5E-02	2,7E-02	3,1E-02	5,2E-04	0,767	1470	21
54	9,2E-03	8,7E-03	9,2E-03	1,6E-04	0,392	2468	45	2,0E-02	1,8E-02	1,4E-02	2,9E-04	0,392	1348	28	1,7E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,767	2619	34	3,2E-02	3,1E-02	2,4E-02	4,9E-04	0,767	1550	22
61	1,2E-02	7,0E-03	1,6E-02	2,0E-04	0,392	1916	38	1,7E-02	2,5E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,392	1227	26	2,0E-02	1,4E-02	2,5E-02	3,5E-04	0,767	2208	30	2,9E-02	3,9E-02	2,7E-02	5,4E-04	0,767	1428	21
75	8,2E-03	1,1E-02	9,1E-03	1,6E-04	0,393	2397	41	1,1E-02	1,6E-02	2,0E-02	2,7E-04	0,393	1456	28	1,5E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,769	2686	32	2,0E-02	2,6E-02	3,4E-02	4,5E-04	0,769	1692	23
88	1,0E-02	8,0E-03	8,0E-03	1,5E-04	0,393	2565	44	1,2E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,393	1533	29	1,8E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,768	2725	34	2,2E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,768	1774	24
103	7,4E-03	1,2E-02	7,1E-03	1,5E-04	0,392	2541	44	1,5E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,392	1612	29	1,4E-02	2,0E-02	1,3E-02	2,8E-04	0,766	2781	34	2,6E-02	2,5E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,766	1856	24
112	7,6E-03	8,1E-03	7,8E-03	1,4E-04	0,392	2831	47	1,8E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,392	1571	29	1,3E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,766	3014	35	2,8E-02	2,6E-02	2,1E-02	4,2E-04	0,767	1824	23
123	8,5E-03	7,2E-03	1,0E-02	1,5E-04	0,409	2709	44	1,4E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,409	1572	28	1,6E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,799	2835	33	2,4E-02	2,5E-02	3,0E-02	4,4E-04	0,800	1798	23

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	2,8E-02	2,6E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,403	969	27	3,8E-02	5,1E-02	2,6E-02	6,3E-04	0,404	643	21	4,0E-02	4,2E-02	3,6E-02	6,4E-04	0,792	1231	23	6,2E-02	7,4E-02	4,0E-02	9,7E-04	0,792	820	18
5	2,5E-02	1,6E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,403	1340	33	2,6E-02	1,7E-02	4,2E-02	4,7E-04	0,403	866	25	3,8E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,9E-04	0,792	1602	28	3,6E-02	3,1E-02	6,1E-02	7,0E-04	0,792	1135	22
8	9,8E-03	8,7E-03	1,0E-02	1,6E-04	0,403	2569	48	2,2E-02	8,6E-03	2,2E-02	2,9E-04	0,403	1404	29	1,9E-02	1,7E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,791	2675	36	3,8E-02	2,0E-02	3,4E-02	5,0E-04	0,792	1584	24
12	6,8E-03	3,0E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,404	1531	34	1,4E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,404	1537	27	1,4E-02	4,0E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,792	2015	31	2,5E-02	3,2E-02	2,6E-02	4,5E-04	0,792	1742	22
15	7,8E-03	7,2E-03	7,4E-03	1,2E-04	0,403	3289	49	1,3E-02	1,0E-02	2,1E-02	2,4E-04	0,403	1664	28	1,5E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,792	3310	37	2,4E-02	2,0E-02	3,5E-02	4,3E-04	0,791	1830	23
18	7,3E-03	7,0E-03	5,6E-03	1,1E-04	0,403	3705	50	1,8E-02	1,1E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,403	1705	28	1,4E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,792	3570	37	3,2E-02	2,2E-02	2,4E-02	4,3E-04	0,792	1853	23
27	4,8E-03	6,3E-03	4,4E-03	8,5E-05	0,403	4763	61	9,7E-03	1,6E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,403	1894	29	1,0E-02	1,3E-02	9,8E-03	1,8E-04	0,792	4390	41	1,9E-02	2,7E-02	2,4E-02	3,8E-04	0,792	2091	24
32	1,4E-02	5,6E-03	4,2E-03	1,3E-04	0,388	3041	41	1,4E-02	1,5E-02	7,3E-03	2,0E-04	0,389	1967	30	2,3E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,5E-04	0,762	3023	29	2,5E-02	2,6E-02	1,6E-02	3,7E-04	0,763	2089	24
40	4,3E-03	4,8E-03	6,2E-03	9,0E-05	0,389	4322	56	1,3E-02	8,6E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,389	2032	30	9,8E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,763	4003	40	2,4E-02	1,7E-02	2,2E-02	3,6E-04	0,762	2144	24
46	4,0E-03	5,4E-03	3,8E-03	7,7E-05	0,389	5033	70	1,2E-02	8,1E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,389	2086	31	9,0E-03	1,1E-02	7,7E-03	1,6E-04	0,762	4667	45	2,3E-02	1,7E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,763	2189	25
54	3,9E-03	3,8E-03	4,0E-03	6,9E-05	0,389	5673	79	1,3E-02	1,0E-02	6,7E-03	1,7E-04	0,389	2289	33	9,0E-03	8,6E-03	8,6E-03	1,5E-04	0,762	4966	48	2,4E-02	2,0E-02	1,4E-02	3,3E-04	0,763	2319	26
61	5,2E-03	4,4E-03	8,4E-03	1,1E-04	0,389	3684	58	1,1E-02	1,5E-02	7,3E-03	1,9E-04	0,389	2031	31	1,1E-02	7,3E-03	1,5E-02	1,9E-04	0,763	3978	40	2,1E-02	2,7E-02	1,6E-02	3,6E-04	0,762	2114	25
75	3,6E-03	4,9E-03	3,8E-03	7,2E-05	0,390	5432	67	5,2E-03	9,9E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,390	2514	34	7,7E-03	1,0E-02	8,6E-03	1,5E-04	0,765	4959	44	1,1E-02	1,8E-02	2,3E-02	2,9E-04	0,765	2602	27
88	4,4E-03	3,6E-03	3,7E-03	6,9E-05	0,390	5688	75	5,9E-03	9,0E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,390	2752	36	9,5E-03	7,5E-03	8,1E-03	1,5E-04	0,764	5197	47	1,3E-02	1,6E-02	2,0E-02	2,7E-04	0,765	2783	28
103	3,6E-03	5,6E-03	3,8E-03	7,6E-05	0,388	5109	75	8,1E-03	8,7E-03	7,2E-03	1,4E-04	0,388	2869	36	7,0E-03	1,1E-02	6,8E-03	1,5E-04	0,762	5235	48	1,6E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,762	2917	28
112	3,5E-03	3,5E-03	3,6E-03	6,2E-05	0,388	6256	84	1,1E-02	8,6E-03	5,4E-03	1,4E-04	0,389	2737	34	6,5E-03	8,6E-03	7,3E-03	1,3E-04	0,761	5809	51	1,9E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,762	2821	27
123	3,9E-03	3,7E-03	4,8E-03	7,3E-05	0,399	5456	72	8,0E-03	8,3E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,399	2631	33	8,3E-03	7,3E-03	9,9E-03	1,5E-04	0,785	5263	45	1,6E-02	1,7E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,784	2704	26

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	2,1E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,403	1250	33	3,3E-02	4,0E-02	2,1E-02	5,1E-04	0,403	783	25	3,2E-02	3,4E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,790	1519	28	5,4E-02	6,1E-02	3,4E-02	8,2E-04	0,789	964	22
5	2,0E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,3E-04	0,404	1790	40	2,0E-02	1,3E-02	3,6E-02	3,7E-04	0,403	1082	29	3,0E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,790	2046	33	3,0E-02	2,4E-02	5,0E-02	5,7E-04	0,789	1380	25
8	6,7E-03	6,2E-03	7,0E-03	1,1E-04	0,403	3697	65	1,7E-02	6,9E-03	1,8E-02	2,3E-04	0,403	1765	33	1,4E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,790	3553	46	3,0E-02	1,7E-02	2,9E-02	4,1E-04	0,790	1914	27
12	4,8E-03	2,4E-02	7,7E-03	2,0E-04	0,403	2030	42	1,0E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,403	1928	30	1,0E-02	3,2E-02	1,4E-02	3,1E-04	0,790	2564	37	1,9E-02	2,8E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,790	2093	25
15	5,3E-03	5,1E-03	5,2E-03	8,5E-05	0,403	4741	66	9,8E-03	7,7E-03	1,8E-02	1,9E-04	0,403	2085	32	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,790	4421	46	1,9E-02	1,6E-02	3,0E-02	3,6E-04	0,790	2197	27
18	5,1E-03	4,8E-03	4,1E-03	7,6E-05	0,403	5286	66	1,5E-02	8,6E-03	1,1E-02	1,9E-04	0,403	2135	31	1,1E-02	1,1E-02	8,7E-03	1,7E-04	0,790	4752	46	2,8E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,790	2207	26
27	3,9E-03	4,4E-03	3,8E-03	6,6E-05	0,403	6094	84	7,0E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,403	2403	33	7,8E-03	9,5E-03	7,4E-03	1,4E-04	0,790	5831	52	1,4E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,790	2531	27
32	1,1E-02	4,4E-03	3,7E-03	1,0E-04	0,388	3753	49	1,2E-02	1,1E-02	5,4E-03	1,6E-04	0,389	2478	34	1,9E-02	1,0E-02	7,8E-03	2,0E-04	0,761	3749	34	2,1E-02	2,1E-02	1,3E-02	3,0E-04	0,761	2531	27
40	3,9E-03	3,6E-03	4,3E-03	6,9E-05	0,388	5596	76	1,0E-02	6,4E-03	1,0E-02	1,5E-04	0,388	2587	34	7,4E-03	8,3E-03	8,8E-03	1,4E-04	0,761	5309	49	1,9E-02	1,4E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,761	2605	28
46	3,7E-03	3,8E-03	3,9E-03	6,7E-05	0,389	5782	98	9,5E-03	6,0E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,388	2691	35	6,7E-03	8,6E-03	5,7E-03	1,2E-04	0,761	6183	58	1,8E-02	1,3E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,761	2676	28
54	3,6E-03	3,7E-03	3,9E-03	6,6E-05	0,388	5876	109	1,1E-02	7,6E-03	4,9E-03	1,3E-04	0,388	2936	38	6,9E-03	6,5E-03	6,4E-03	1,2E-04	0,761	6566	63	2,0E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,7E-04	0,761	2831	29
61	3,8E-03	4,8E-03	6,2E-03	8,7E-05	0,389	4483	78	9,1E-03	1,2E-02	5,3E-03	1,5E-04	0,388	2588	36	8,0E-03	5,8E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,760	5184	51	1,8E-02	2,2E-02	1,3E-02	3,0E-04	0,760	2571	28
75	3,5E-03	3,6E-03	3,5E-03	6,2E-05	0,389	6323	93	3,7E-03	7,7E-03	9,8E-03	1,2E-04	0,390	3249	39	5,9E-03	7,6E-03	6,5E-03	1,2E-04	0,763	6495	58	8,6E-03	1,5E-02	1,9E-02	2,4E-04	0,763	3196	30
88	3,5E-03	3,7E-03	3,7E-03	6,4E-05	0,390	6131	104	4,3E-03	6,8E-03	7,7E-03	1,1E-04	0,389	3658	42	7,2E-03	5,6E-03	6,2E-03	1,1E-04	0,763	6862	62	1,0E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,2E-04	0,762	3466	31
103	3,7E-03	3,9E-03	4,0E-03	6,8E-05	0,388	5672	101	5,9E-03	6,7E-03	5,3E-03	1,0E-04	0,388	3837	42	5,3E-03	8,5E-03	5,1E-03	1,1E-04	0,760	6836	62	1,2E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,760	3621	32
112	3,5E-03	3,4E-03	3,6E-03	6,1E-05	0,388	6340	113	9,2E-03	6,5E-03	4,0E-03	1,1E-04	0,388	3507	40	4,9E-03	6,6E-03	5,6E-03	1,0E-04	0,760	7565	68	1,6E-02	1,4E-02	9,6E-03	2,2E-04	0,760	3450	30
123	3,2E-03	3,2E-03	3,4E-03	5,7E-05	0,331	5764	99	5,8E-03	5,9E-03	7,6E-03	1,1E-04	0,330	3025	38	5,6E-03	4,8E-03	6,8E-03	1,0E-04	0,632	6217	59	1,1E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,631	3020	29

Date	Moules à 6Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	1,7E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,398	1509	39	2,9E-02	3,4E-02	1,8E-02	4,4E-04	0,396	897	29	2,7E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,4E-04	0,777	1772	33	4,9E-02	5,3E-02	3,0E-02	7,2E-04	0,776	1077	25
5	1,6E-02	9,3E-03	7,9E-03	1,8E-04	0,398	2212	48	1,6E-02	1,0E-02	3,1E-02	3,1E-04	0,397	1276	33	2,4E-02	1,8E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,777	2447	39	2,5E-02	2,1E-02	4,3E-02	4,8E-04	0,777	1610	29
8	5,7E-03	5,3E-03	5,8E-03	9,2E-05	0,399	4341	83	1,4E-02	6,0E-03	1,5E-02	1,9E-04	0,398	2079	38	1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,778	4208	56	2,5E-02	1,5E-02	2,5E-02	3,5E-04	0,778	2217	31
12	4,7E-03	2,0E-02	5,8E-03	1,6E-04	0,397	2421	51	8,5E-03	1,4E-02	9,8E-03	1,8E-04	0,399	2245	34	8,8E-03	2,6E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,779	3138	44	1,6E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,779	2372	29
15	4,7E-03	4,4E-03	4,7E-03	7,5E-05	0,400	5306	82	8,0E-03	6,4E-03	1,6E-02	1,6E-04	0,399	2428	37	9,1E-03	9,0E-03	9,4E-03	1,5E-04	0,778	5171	56	1,6E-02	1,4E-02	2,7E-02	3,1E-04	0,778	2494	30
18	4,3E-03	4,2E-03	3,9E-03	6,8E-05	0,399	5911	81	1,4E-02	7,2E-03	8,7E-03	1,6E-04	0,399	2475	36	9,0E-03	9,0E-03	7,4E-03	1,4E-04	0,778	5613	55	2,5E-02	1,6E-02	1,6E-02	3,1E-04	0,776	2495	29
27	4,0E-03	4,1E-03	4,0E-03	6,6E-05	0,400	6071	102	5,7E-03	1,1E-02	9,0E-03	1,4E-04	0,399	2804	38	6,7E-03	8,0E-03	6,3E-03	1,1E-04	0,778	6763	64	1,2E-02	2,0E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,777	2874	31
32	9,0E-03	3,7E-03	3,9E-03	9,1E-05	0,384	4225	59	1,0E-02	9,3E-03	4,5E-03	1,3E-04	0,383	2918	39	1,6E-02	9,0E-03	6,7E-03	1,7E-04	0,748	4340	39	1,8E-02	1,8E-02	1,1E-02	2,6E-04	0,746	2903	31
40	4,0E-03	3,6E-03	3,7E-03	6,6E-05	0,384	5794	94	8,4E-03	5,3E-03	8,6E-03	1,3E-04	0,383	3043	40	6,2E-03	7,2E-03	7,5E-03	1,2E-04	0,750	6122	60	1,6E-02	1,2E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,748	2975	32
46	3,9E-03	3,5E-03	4,2E-03	6,8E-05	0,383	5618	115	7,7E-03	5,0E-03	8,6E-03	1,2E-04	0,383	3179	41	5,7E-03	7,4E-03	5,3E-03	1,1E-04	0,749	6942	71	1,6E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,747	3029	32
54	3,8E-03	4,0E-03	4,1E-03	7,0E-05	0,385	5522	124	9,3E-03	6,1E-03	4,1E-03	1,1E-04	0,383	3477	45	5,9E-03	5,5E-03	5,4E-03	9,9E-05	0,748	7548	79	1,8E-02	1,4E-02	9,6E-03	2,3E-04	0,748	3229	33
61	3,7E-03	5,2E-03	5,0E-03	8,1E-05	0,384	4736	96	7,8E-03	1,0E-02	4,4E-03	1,3E-04	0,383	3032	42	6,9E-03	5,9E-03	9,2E-03	1,3E-04	0,747	5795	61	1,5E-02	1,9E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,746	2928	32
75	3,6E-03	3,3E-03	3,6E-03	6,2E-05	0,385	6218	110	3,3E-03	6,4E-03	8,3E-03	1,0E-04	0,384	3771	47	5,3E-03	6,6E-03	5,6E-03	1,0E-04	0,753	7312	71	7,4E-03	1,3E-02	1,7E-02	2,1E-04	0,751	3601	35
88	3,4E-03	3,9E-03	3,9E-03	6,6E-05	0,384	5833	119	3,7E-03	5,6E-03	6,3E-03	8,8E-05	0,384	4360	51	6,3E-03	4,8E-03	5,4E-03	9,7E-05	0,750	7719	75	8,7E-03	1,2E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,750	3945	36
103	4,0E-03	3,5E-03	4,3E-03	6,9E-05	0,385	5565	117	4,8E-03	5,7E-03	4,4E-03	8,4E-05	0,385	4573	50	5,0E-03	7,2E-03	5,3E-03	1,0E-04	0,749	7314	77	1,1E-02	1,1E-02	1,0E-02	1,8E-04	0,749	4112	37
112	3,7E-03	3,6E-03	3,8E-03	6,5E-05	0,384	5907	127	8,0E-03	5,4E-03	3,4E-03	9,5E-05	0,384	4036	48	4,8E-03	5,7E-03	4,9E-03	9,1E-05	0,750	8264	83	1,3E-02	1,2E-02	8,4E-03	1,9E-04	0,749	3886	35
123	3,3E-03	3,6E-03	3,2E-03	5,9E-05	0,335	5661	115	4,7E-03	4,7E-03	6,2E-03	8,8E-05	0,334	3798	45	4,8E-03	4,4E-03	5,9E-03	8,8E-05	0,662	7499	73	9,7E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,662	3646	34

Date	Moules à 10Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	1,5E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,384	1746	46	2,6E-02	3,0E-02	1,6E-02	3,9E-04	0,384	987	33	2,4E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,9E-04	0,753	1939	38	4,6E-02	4,7E-02	2,7E-02	6,5E-04	0,753	1152	28
5	1,3E-02	8,0E-03	6,8E-03	1,5E-04	0,386	2533	56	1,3E-02	8,3E-03	2,7E-02	2,7E-04	0,384	1442	37	2,0E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,752	2764	45	2,1E-02	1,8E-02	3,5E-02	4,1E-04	0,751	1842	33
8	5,4E-03	5,1E-03	5,4E-03	8,7E-05	0,383	4418	99	1,1E-02	5,2E-03	1,3E-02	1,6E-04	0,383	2371	44	1,0E-02	9,8E-03	9,7E-03	1,6E-04	0,756	4589	65	2,1E-02	1,4E-02	2,1E-02	3,0E-04	0,752	2482	35
12	4,7E-03	1,6E-02	5,2E-03	1,4E-04	0,384	2722	60	7,2E-03	1,3E-02	8,5E-03	1,5E-04	0,384	2487	40	7,9E-03	2,0E-02	9,2E-03	2,0E-04	0,750	3659	45	1,4E-02	2,2E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,750	2596	33
15	4,5E-03	4,3E-03	4,5E-03	7,3E-05	0,383	5238	96	6,8E-03	5,6E-03	1,4E-02	1,4E-04	0,383	2672	43	8,1E-03	7,9E-03	8,3E-03	1,4E-04	0,758	5607	65	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-02	2,8E-04	0,751	2726	34
18	4,2E-03	4,0E-03	4,0E-03	6,6E-05	0,383	5775	93	1,2E-02	6,2E-03	7,2E-03	1,4E-04	0,384	2720	42	8,1E-03	8,1E-03	6,7E-03	1,3E-04	0,757	5954	64	2,3E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,749	2693	33
27	4,1E-03	4,0E-03	4,2E-03	6,7E-05	0,384	5695	114	5,0E-03	9,9E-03	7,8E-03	1,2E-04	0,383	3093	45	6,1E-03	7,3E-03	5,8E-03	1,1E-04	0,758	7112	73	1,1E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,753	3125	35
32	7,3E-03	3,4E-03	4,1E-03	8,1E-05	0,367	4548	71	8,8E-03	7,7E-03	4,0E-03	1,1E-04	0,368	3277	47	1,4E-02	8,6E-03	6,2E-03	1,6E-04	0,722	4595	45	1,7E-02	1,6E-02	9,9E-03	2,3E-04	0,722	3112	36
40	4,2E-03	3,7E-03	3,6E-03	6,8E-05	0,367	5414	107	7,1E-03	4,7E-03	7,6E-03	1,1E-04	0,370	3367	47	5,6E-03	6,6E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,723	6486	70	1,4E-02	1,1E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,726	3189	36
46	4,1E-03	3,6E-03	4,5E-03	7,1E-05	0,371	5215	124	6,6E-03	4,6E-03	7,6E-03	1,1E-04	0,372	3503	48	5,2E-03	6,9E-03	5,4E-03	1,0E-04	0,723	7081	82	1,4E-02	1,1E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,722	3222	37
54	4,1E-03	4,2E-03	4,4E-03	7,4E-05	0,367	4956	132	8,1E-03	5,2E-03	3,7E-03	9,6E-05	0,367	3826	53	5,4E-03	5,2E-03	5,3E-03	9,3E-05	0,724	7775	89	1,6E-02	1,2E-02	8,9E-03	2,1E-04	0,722	3465	38
61	3,6E-03	5,4E-03	4,2E-03	7,7E-05	0,368	4753	108	6,8E-03	8,5E-03	4,0E-03	1,1E-04	0,367	3375	49	6,4E-03	6,2E-03	8,1E-03	1,2E-04	0,719	5929	71	1,4E-02	1,7E-02	9,8E-03	2,3E-04	0,718	3149	37
75	3,9E-03	3,4E-03	3,9E-03	6,5E-05	0,372	5698	118	3,4E-03	5,7E-03	7,5E-03	9,4E-05	0,372	3963	55	5,0E-03	6,2E-03	5,2E-03	9,6E-05	0,723	7504	81	6,8E-03	1,2E-02	1,5E-02	1,9E-04	0,726	3775	40
88	3,6E-03	4,1E-03	4,2E-03	7,0E-05	0,374	5374	126	3,5E-03	4,8E-03	5,4E-03	7,7E-05	0,369	4774	60	6,0E-03	5,2E-03	5,3E-03	9,7E-05	0,730	7519	85	8,1E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,7E-04	0,725	4188	42
103	4,1E-03	3,5E-03	4,5E-03	7,1E-05	0,368	5169	125	4,3E-03	5,0E-03	4,0E-03	7,5E-05	0,370	4919	60	5,2E-03	6,5E-03	5,5E-03	1,0E-04	0,729	7183	86	9,7E-03	1,0E-02	9,2E-03	1,7E-04	0,727	4403	42
112	3,9E-03	3,8E-03	4,0E-03	6,9E-05	0,368	5338	133	7,1E-03	4,9E-03	3,4E-03	8,6E-05	0,369	4264	56	5,0E-03	5,4E-03	5,0E-03	9,1E-05	0,729	8044	92	1,2E-02	1,1E-02	7,8E-03	1,7E-04	0,725	4151	41
123	4,3E-03	4,7E-03	3,9E-03	7,6E-05	0,405	5314	124	5,2E-03	5,1E-03	6,8E-03	9,7E-05	0,406	4174	54	5,9E-03	6,1E-03	6,6E-03	1,1E-04	0,792	7281	85	1,1E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,794	3792	40

Annexe 25 – Résultats d'essais à 35°C et 20% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,7E-02	6,4E-02	3,1E-02	8,9E-04	0,403	454	18	7,2E-02	3,5E-02	5,1E-02	8,6E-04	0,403	468	17	8,3E-02	9,1E-02	4,8E-02	1,2E-03	0,789	650	16	7,8E-02	7,8E-02	9,9E-02	1,4E-03	0,788	566	13
5	3,5E-02	2,3E-02	5,7E-02	6,3E-04	0,403	640	22	4,0E-02	3,6E-02	4,0E-02	6,4E-04	0,403	633	20	4,9E-02	4,0E-02	8,0E-02	9,2E-04	0,789	856	19	6,3E-02	5,7E-02	5,8E-02	9,7E-04	0,789	810	16
8	3,5E-02	2,4E-02	2,2E-02	4,4E-04	0,403	923	27	2,5E-02	4,0E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,403	781	21	5,0E-02	3,6E-02	3,6E-02	6,7E-04	0,790	1188	22	4,0E-02	6,0E-02	4,8E-02	8,1E-04	0,789	975	18
12	2,8E-02	3,5E-02	1,4E-02	4,2E-04	0,403	968	28	3,7E-02	2,0E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,403	841	22	3,9E-02	5,5E-02	2,7E-02	6,6E-04	0,789	1189	23	5,6E-02	3,4E-02	4,7E-02	7,5E-04	0,788	1049	18
15	1,8E-02	1,3E-02	2,3E-02	2,9E-04	0,403	1387	33	2,9E-02	2,9E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,403	858	21	2,9E-02	2,3E-02	3,7E-02	4,9E-04	0,790	1617	26	4,4E-02	4,5E-02	4,4E-02	7,3E-04	0,790	1078	18
18	1,5E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,403	1511	33	2,2E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,404	944	23	2,5E-02	2,9E-02	2,7E-02	4,4E-04	0,789	1782	27	3,6E-02	4,4E-02	4,4E-02	6,8E-04	0,789	1159	19
27	1,6E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,403	1700	35	2,0E-02	2,5E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,403	1021	23	2,6E-02	2,7E-02	2,0E-02	4,0E-04	0,789	1967	28	3,2E-02	4,0E-02	4,3E-02	6,3E-04	0,789	1251	19
32	1,7E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,391	1504	32	2,6E-02	2,5E-02	2,1E-02	3,9E-04	0,390	989	23	2,8E-02	2,8E-02	2,0E-02	4,1E-04	0,766	1845	26	4,2E-02	4,0E-02	3,5E-02	6,3E-04	0,767	1210	19
40	1,8E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,8E-04	0,392	1384	32	2,9E-02	2,5E-02	1,6E-02	4,0E-04	0,392	989	24	2,8E-02	2,9E-02	2,2E-02	4,6E-04	0,767	1659	26	4,3E-02	4,0E-02	3,0E-02	6,4E-04	0,766	1206	20
46	1,5E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,393	1641	35	2,4E-02	2,9E-02	1,7E-02	3,9E-04	0,392	1000	24	2,4E-02	2,3E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,767	1882	27	3,8E-02	4,2E-02	3,1E-02	6,3E-04	0,767	1226	20
54	9,7E-03	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,392	1789	37	2,1E-02	2,7E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,392	1037	24	1,8E-02	2,3E-02	2,4E-02	3,8E-04	0,767	2009	29	3,3E-02	4,2E-02	3,3E-02	6,1E-04	0,768	1252	20
61	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,392	1681	34	2,2E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,392	1078	24	2,3E-02	2,2E-02	2,2E-02	4,0E-04	0,767	1937	27	3,4E-02	3,6E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,766	1304	20
75	1,2E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,393	1854	37	1,6E-02	2,7E-02	1,9E-02	3,5E-04	0,393	1130	25	2,1E-02	1,9E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,768	2099	29	2,5E-02	4,1E-02	3,4E-02	5,7E-04	0,769	1354	21
88	9,7E-03	1,2E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,393	1885	38	1,7E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,393	1204	26	1,8E-02	2,0E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,769	2114	29	2,8E-02	3,8E-02	3,0E-02	5,4E-04	0,768	1421	21
103	1,0E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,392	1854	36	1,4E-02	1,6E-02	2,4E-02	3,0E-04	0,392	1308	27	1,9E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,767	2123	29	2,5E-02	2,6E-02	3,7E-02	5,0E-04	0,767	1540	22
112	1,2E-02	9,6E-03	1,2E-02	2,0E-04	0,392	1979	39	2,3E-02	2,0E-02	1,3E-02	3,2E-04	0,392	1237	26	2,0E-02	1,8E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,767	2200	30	3,6E-02	3,3E-02	2,2E-02	5,2E-04	0,766	1482	21
123	9,3E-03	1,0E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,410	2230	38	1,7E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,409	1308	25	1,7E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,799	2431	30	2,5E-02	3,6E-02	3,1E-02	5,2E-04	0,799	1550	21
132	7,6E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,416	2304	40	1,7E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,416	1473	27	1,5E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,814	2534	31	2,6E-02	3,0E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,814	1659	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,5E-02	4,6E-02	2,0E-02	6,0E-04	0,403	667	23	5,4E-02	2,6E-02	4,0E-02	6,5E-04	0,403	618	22	6,5E-02	6,8E-02	3,4E-02	9,1E-04	0,791	867	20	5,9E-02	7,0E-02	8,2E-02	1,2E-03	0,792	687	17
5	2,3E-02	1,5E-02	3,9E-02	4,2E-04	0,403	959	28	2,8E-02	2,5E-02	2,8E-02	4,4E-04	0,403	916	25	3,4E-02	2,8E-02	5,7E-02	6,4E-04	0,791	1231	25	4,8E-02	4,1E-02	4,3E-02	7,2E-04	0,791	1092	21
8	2,1E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,403	1598	36	1,8E-02	2,7E-02	1,9E-02	3,5E-04	0,403	1161	26	3,2E-02	2,3E-02	2,3E-02	4,3E-04	0,792	1853	30	3,0E-02	4,4E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,792	1340	22
12	1,6E-02	2,0E-02	7,5E-03	2,4E-04	0,404	1715	37	2,4E-02	1,4E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,403	1244	25	2,4E-02	3,5E-02	1,7E-02	4,1E-04	0,792	1912	30	3,9E-02	2,6E-02	3,6E-02	5,5E-04	0,792	1437	21
15	8,5E-03	6,5E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,403	2763	47	2,0E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,403	1286	25	1,7E-02	1,4E-02	2,3E-02	2,9E-04	0,792	2734	35	3,3E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,791	1487	21
18	7,6E-03	9,1E-03	7,3E-03	1,3E-04	0,403	3063	47	1,4E-02	2,0E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,403	1446	27	1,5E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,791	3056	35	2,5E-02	3,3E-02	3,0E-02	4,9E-04	0,792	1629	22
27	7,7E-03	8,1E-03	5,2E-03	1,1E-04	0,403	3513	51	1,2E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,404	1610	28	1,5E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,791	3421	37	2,2E-02	3,0E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,792	1787	23
32	8,3E-03	9,2E-03	6,0E-03	1,3E-04	0,388	3022	44	1,7E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,388	1545	28	1,6E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,763	3143	34	2,9E-02	2,9E-02	2,3E-02	4,4E-04	0,762	1720	23
40	8,5E-03	9,5E-03	5,7E-03	1,4E-04	0,389	2801	45	2,0E-02	1,5E-02	9,2E-03	2,5E-04	0,389	1584	29	1,5E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,763	2870	34	3,2E-02	2,7E-02	1,9E-02	4,4E-04	0,763	1735	24
46	6,7E-03	6,5E-03	5,9E-03	1,1E-04	0,389	3473	51	1,5E-02	1,9E-02	8,8E-03	2,4E-04	0,389	1596	29	1,3E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,763	3289	36	2,7E-02	3,0E-02	1,9E-02	4,3E-04	0,763	1761	24
54	4,3E-03	6,0E-03	6,9E-03	1,0E-04	0,389	3854	58	1,3E-02	1,8E-02	1,0E-02	2,3E-04	0,388	1665	29	9,8E-03	1,4E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,763	3539	39	2,4E-02	3,1E-02	2,0E-02	4,2E-04	0,763	1810	24
61	6,4E-03	5,9E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,389	3598	50	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,389	1726	29	1,3E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,763	3411	36	2,5E-02	2,3E-02	2,3E-02	4,0E-04	0,762	1888	24
75	5,6E-03	4,7E-03	6,1E-03	9,6E-05	0,390	4050	56	8,6E-03	1,8E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,390	1860	30	1,2E-02	1,0E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,764	3781	39	1,6E-02	3,0E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,764	1997	24
88	4,1E-03	5,2E-03	6,5E-03	9,3E-05	0,390	4185	59	1,0E-02	1,5E-02	9,0E-03	2,0E-04	0,390	1998	31	9,3E-03	1,1E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,765	3807	40	1,9E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,765	2110	25
103	4,6E-03	6,5E-03	5,4E-03	9,7E-05	0,389	4000	56	7,0E-03	9,3E-03	1,4E-02	1,7E-04	0,389	2235	33	1,0E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,762	3784	39	1,5E-02	1,8E-02	2,5E-02	3,3E-04	0,762	2300	26
112	5,1E-03	4,4E-03	5,7E-03	8,9E-05	0,388	4351	61	1,5E-02	1,1E-02	7,3E-03	1,9E-04	0,388	2059	32	1,1E-02	1,0E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,762	3972	41	2,6E-02	2,2E-02	1,4E-02	3,5E-04	0,762	2181	25
123	4,5E-03	4,9E-03	6,0E-03	9,0E-05	0,402	4452	60	1,1E-02	1,3E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,398	2086	30	8,9E-03	1,0E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,784	4299	41	1,7E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,785	2257	24
132	4,0E-03	5,2E-03	5,4E-03	8,6E-05	0,421	4915	62	1,1E-02	9,2E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,421	2427	32	8,7E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,826	4500	41	1,9E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,826	2430	25

Moules à 3Hz

4,6 kN

Moule 7

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,7E-02	3,8E-02	1,6E-02	5,0E-04	0,403	805	28
5	1,8E-02	1,2E-02	3,2E-02	3,4E-04	0,403	1193	34
8	1,5E-02	9,3E-03	9,1E-03	1,8E-04	0,403	2194	46
12	1,1E-02	1,5E-02	5,5E-03	1,7E-04	0,403	2336	46
15	5,9E-03	4,7E-03	8,1E-03	1,0E-04	0,403	3940	64
18	5,4E-03	6,4E-03	5,1E-03	9,2E-05	0,403	4359	62
27	5,4E-03	5,6E-03	4,1E-03	8,2E-05	0,403	4898	69
32	5,8E-03	6,7E-03	4,1E-03	9,1E-05	0,388	4283	56
40	5,7E-03	6,7E-03	4,1E-03	9,7E-05	0,389	4011	58
46	4,6E-03	4,6E-03	4,2E-03	7,9E-05	0,388	4938	69
54	4,1E-03	4,4E-03	4,7E-03	7,7E-05	0,389	5036	81
61	4,5E-03	4,2E-03	4,2E-03	7,6E-05	0,388	5124	66
75	4,0E-03	3,7E-03	4,3E-03	7,1E-05	0,390	5519	76
88	3,9E-03	3,8E-03	4,5E-03	7,2E-05	0,390	5427	82
103	3,8E-03	4,5E-03	3,9E-03	7,1E-05	0,388	5441	75
112	4,0E-03	3,8E-03	4,1E-03	7,0E-05	0,388	5580	84
123	3,2E-03	3,2E-03	3,7E-03	6,0E-05	0,318	5304	86
132	4,2E-03	3,7E-03	3,7E-03	6,8E-05	0,420	6180	85

Moule 8

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,5E-02	2,2E-02	3,4E-02	5,5E-04	0,403	729	26
5	2,2E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,403	1136	29
8	1,5E-02	2,2E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,403	1449	31
12	1,9E-02	1,1E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,403	1537	29
15	1,7E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,403	1586	29
18	1,1E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,403	1800	30
27	9,2E-03	1,5E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,403	2041	33
32	1,4E-02	1,4E-02	8,8E-03	2,0E-04	0,388	1945	32
40	1,6E-02	1,1E-02	7,0E-03	1,9E-04	0,389	1999	34
46	1,2E-02	1,5E-02	6,3E-03	1,9E-04	0,388	2047	33
54	1,1E-02	1,4E-02	7,3E-03	1,8E-04	0,388	2124	33
61	1,1E-02	9,3E-03	1,1E-02	1,8E-04	0,388	2211	33
75	6,2E-03	1,5E-02	7,9E-03	1,7E-04	0,390	2363	34
88	8,1E-03	1,2E-02	6,6E-03	1,5E-04	0,389	2583	36
103	5,1E-03	7,3E-03	1,1E-02	1,3E-04	0,388	2897	39
112	1,2E-02	8,3E-03	5,4E-03	1,5E-04	0,388	2673	37
123	7,8E-03	9,5E-03	7,6E-03	1,4E-04	0,337	2398	34
132	8,4E-03	7,0E-03	8,8E-03	1,4E-04	0,421	3084	37

9 kN

Moule 7

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,4E-02	5,7E-02	2,8E-02	7,6E-04	0,789	1038	24
5	2,7E-02	2,2E-02	4,7E-02	5,2E-04	0,790	1519	30
8	2,5E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,789	2385	36
12	1,8E-02	2,7E-02	1,3E-02	3,2E-04	0,790	2465	36
15	1,3E-02	1,1E-02	1,7E-02	2,2E-04	0,790	3594	44
18	1,1E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,790	4013	43
27	1,2E-02	1,2E-02	8,8E-03	1,8E-04	0,790	4506	46
32	1,2E-02	1,3E-02	9,2E-03	1,9E-04	0,761	4072	41
40	1,1E-02	1,3E-02	9,7E-03	2,0E-04	0,761	3833	42
46	1,0E-02	1,1E-02	9,4E-03	1,8E-04	0,760	4314	45
54	7,4E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,761	4619	49
61	9,8E-03	9,6E-03	9,6E-03	1,7E-04	0,761	4471	44
75	8,9E-03	8,0E-03	9,4E-03	1,5E-04	0,763	4957	49
88	7,0E-03	8,7E-03	1,0E-02	1,5E-04	0,763	4984	50
103	7,7E-03	9,5E-03	8,7E-03	1,5E-04	0,760	4986	48
112	8,0E-03	7,6E-03	9,4E-03	1,5E-04	0,760	5200	51
123	6,1E-03	7,3E-03	8,1E-03	1,3E-04	0,631	5002	51
132	6,9E-03	8,4E-03	8,8E-03	1,4E-04	0,825	5834	51

Moule 8

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,9E-02	5,9E-02	7,2E-02	9,9E-04	0,789	801	20
5	4,1E-02	3,4E-02	3,7E-02	6,1E-04	0,790	1294	25
8	2,6E-02	3,7E-02	2,8E-02	4,9E-04	0,790	1599	26
12	3,2E-02	2,2E-02	3,1E-02	4,7E-04	0,790	1697	25
15	2,9E-02	2,6E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,790	1761	24
18	2,1E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,1E-04	0,789	1940	25
27	1,8E-02	2,6E-02	2,4E-02	3,7E-04	0,790	2143	27
32	2,4E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,760	2071	26
40	2,7E-02	2,2E-02	1,5E-02	3,6E-04	0,760	2094	27
46	2,3E-02	2,6E-02	1,5E-02	3,6E-04	0,761	2127	27
54	2,0E-02	2,6E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,761	2194	27
61	2,1E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,761	2290	27
75	1,2E-02	2,6E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,763	2415	28
88	1,6E-02	2,2E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,763	2575	28
103	1,2E-02	1,6E-02	2,1E-02	2,7E-04	0,760	2794	29
112	2,2E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,9E-04	0,760	2651	29
123	1,2E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,631	2529	27
132	1,6E-02	1,6E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,824	2939	28

Moules à 6Hz

4,6 kN

Moule 7

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,1E-02	3,2E-02	1,4E-02	4,2E-04	0,397	942	32
5	1,5E-02	9,8E-03	2,7E-02	2,8E-04	0,398	1429	40
8	1,2E-02	7,4E-03	7,4E-03	1,5E-04	0,399	2728	56
12	8,9E-03	1,2E-02	4,8E-03	1,4E-04	0,399	2872	55
15	5,0E-03	4,7E-03	6,4E-03	8,8E-05	0,400	4540	80
18	4,6E-03	5,2E-03	4,5E-03	7,9E-05	0,400	5079	77
27	4,7E-03	4,7E-03	4,2E-03	7,4E-05	0,400	5392	86
32	4,7E-03	5,3E-03	4,0E-03	7,6E-05	0,383	5004	70
40	4,4E-03	5,3E-03	4,1E-03	8,0E-05	0,383	4771	72
46	3,9E-03	4,0E-03	4,0E-03	7,0E-05	0,383	5487	87
54	4,3E-03	4,1E-03	4,0E-03	7,3E-05	0,383	5264	100
61	4,1E-03	3,9E-03	3,6E-03	6,8E-05	0,383	5651	82
75	3,7E-03	3,8E-03	3,9E-03	6,7E-05	0,385	5770	94
88	4,2E-03	3,7E-03	4,0E-03	6,9E-05	0,385	5542	100
103	3,9E-03	4,0E-03	3,8E-03	6,9E-05	0,385	5589	93
112	3,9E-03	4,0E-03	3,9E-03	6,9E-05	0,383	5537	103
123	2,6E-03	2,7E-03	2,8E-03	4,7E-05	0,279	5927	96
132	4,4E-03	3,5E-03	3,5E-03	6,7E-05	0,416	6190	103

Moule 8

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,8E-02	1,9E-02	3,0E-02	4,8E-04	0,397	832	31
5	1,9E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,398	1337	34
8	1,3E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,398	1710	36
12	1,6E-02	9,5E-03	1,5E-02	2,2E-04	0,398	1784	33
15	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,399	1846	33
18	9,4E-03	1,5E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,398	2097	35
27	7,7E-03	1,2E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,399	2404	38
32	1,2E-02	1,1E-02	7,2E-03	1,7E-04	0,383	2291	37
40	1,4E-02	9,2E-03	5,8E-03	1,6E-04	0,384	2355	40
46	1,0E-02	1,3E-02	5,1E-03	1,6E-04	0,382	2409	39
54	9,3E-03	1,2E-02	5,8E-03	1,5E-04	0,383	2507	39
61	9,3E-03	7,6E-03	9,0E-03	1,5E-04	0,384	2631	39
75	5,0E-03	1,3E-02	6,7E-03	1,4E-04	0,385	2748	40
88	6,9E-03	9,9E-03	5,4E-03	1,3E-04	0,385	3060	43
103	4,3E-03	6,2E-03	9,5E-03	1,1E-04	0,384	3407	46
112	1,0E-02	6,8E-03	4,6E-03	1,2E-04	0,384	3152	44
123	6,1E-03	7,6E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,334	2982	40
132	7,0E-03	5,8E-03	7,6E-03	1,2E-04	0,415	3595	43

9 kN

Moule 7

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,6E-02	4,9E-02	2,5E-02	6,5E-04	0,777	1192	28
5	2,2E-02	1,9E-02	3,8E-02	4,3E-04	0,777	1789	34
8	2,0E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,778	2840	43
12	1,5E-02	2,1E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,779	2980	43
15	1,1E-02	8,9E-03	1,4E-02	1,8E-04	0,779	4279	53
18	9,6E-03	1,1E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,778	4701	51
27	9,7E-03	9,9E-03	7,5E-03	1,5E-04	0,778	5263	56
32	9,9E-03	1,1E-02	7,9E-03	1,6E-04	0,748	4784	49
40	8,9E-03	1,1E-02	8,3E-03	1,7E-04	0,748	4520	50
46	8,5E-03	9,0E-03	8,0E-03	1,5E-04	0,748	4998	55
54	6,2E-03	9,1E-03	8,4E-03	1,4E-04	0,749	5358	59
61	8,3E-03	8,1E-03	8,2E-03	1,4E-04	0,748	5170	53
75	7,7E-03	6,9E-03	8,1E-03	1,3E-04	0,753	5675	59
88	5,9E-03	7,5E-03	8,8E-03	1,3E-04	0,750	5747	61
103	6,6E-03	8,1E-03	7,4E-03	1,3E-04	0,749	5768	59
112	6,8E-03	6,4E-03	8,0E-03	1,2E-04	0,749	5999	64
123	5,1E-03	6,3E-03	6,8E-03	1,1E-04	0,660	6201	63
132	6,0E-03	7,3E-03	7,6E-03	1,2E-04	0,811	6600	63

Moule 8

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,2E-02	5,2E-02	6,5E-02	8,7E-04	0,775	889	23
5	3,5E-02	2,9E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,777	1474	28
8	2,3E-02	3,2E-02	2,4E-02	4,3E-04	0,778	1823	29
12	2,7E-02	2,0E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,777	1920	28
15	2,5E-02	2,2E-02	2,4E-02	3,9E-04	0,778	1988	27
18	1,8E-02	2,6E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,777	2199	29
27	1,5E-02	2,3E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,778	2443	31
32	2,1E-02	2,2E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,747	2351	30
40	2,4E-02	1,9E-02	1,3E-02	3,1E-04	0,748	2388	31
46	2,0E-02	2,2E-02	1,3E-02	3,1E-04	0,748	2426	31
54	1,7E-02	2,2E-02	1,3E-02	3,0E-04	0,748	2510	31
61	1,8E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,747	2604	31
75	1,1E-02	2,3E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,751	2702	32
88	1,3E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,748	2951	33
103	1,0E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,4E-04	0,749	3160	34
112	1,9E-02	1,5E-02	1,0E-02	2,5E-04	0,749	3001	33
123	1,1E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,662	3045	32
132	1,4E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,811	3312	33

Moules à 10Hz

4,6 kN

Moule 7

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	2,6E-02	2,8E-02	1,2E-02	3,6E-04	0,384	1067	37
5	1,2E-02	8,2E-03	2,2E-02	2,3E-04	0,383	1642	46
8	9,7E-03	6,3E-03	6,2E-03	1,2E-04	0,384	3173	67
12	7,4E-03	9,3E-03	4,8E-03	1,2E-04	0,382	3245	65
15	4,8E-03	4,8E-03	5,6E-03	8,3E-05	0,383	4611	94
18	4,5E-03	4,6E-03	4,4E-03	7,4E-05	0,383	5191	91
27	4,5E-03	4,3E-03	4,4E-03	7,2E-05	0,383	5287	100
32	4,3E-03	4,6E-03	4,1E-03	7,0E-05	0,369	5241	84
40	4,1E-03	4,6E-03	4,1E-03	7,5E-05	0,369	4913	86
46	3,8E-03	4,1E-03	4,0E-03	7,0E-05	0,371	5285	99
54	4,6E-03	4,1E-03	4,0E-03	7,4E-05	0,369	4971	112
61	4,1E-03	3,9E-03	3,5E-03	6,7E-05	0,369	5491	95
75	3,8E-03	3,9E-03	3,9E-03	6,9E-05	0,374	5442	106
88	4,3E-03	3,8E-03	3,9E-03	7,1E-05	0,368	5214	113
103	4,0E-03	3,9E-03	3,9E-03	7,0E-05	0,369	5299	105
112	3,9E-03	4,2E-03	3,9E-03	7,1E-05	0,368	5212	114
123	4,3E-03	4,4E-03	4,1E-03	7,5E-05	0,405	5370	115
132	4,6E-03	3,6E-03	3,5E-03	6,9E-05	0,396	5716	113

Moule 8

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,2E-02	1,6E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,382	938	36
5	1,6E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,383	1515	39
8	1,1E-02	1,6E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,383	1918	41
12	1,4E-02	8,3E-03	1,3E-02	1,9E-04	0,384	2000	38
15	1,3E-02	9,8E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,383	2057	38
18	8,1E-03	1,3E-02	9,0E-03	1,6E-04	0,382	2338	40
27	6,6E-03	1,1E-02	8,7E-03	1,4E-04	0,382	2677	44
32	1,0E-02	9,7E-03	6,1E-03	1,4E-04	0,367	2580	43
40	1,2E-02	7,7E-03	5,2E-03	1,4E-04	0,368	2638	46
46	9,2E-03	1,1E-02	4,5E-03	1,4E-04	0,372	2632	45
54	8,2E-03	1,0E-02	5,0E-03	1,3E-04	0,371	2774	45
61	7,9E-03	6,5E-03	7,8E-03	1,3E-04	0,370	2955	45
75	4,6E-03	1,2E-02	6,3E-03	1,3E-04	0,373	2931	47
88	6,0E-03	8,3E-03	4,8E-03	1,1E-04	0,371	3436	50
103	3,8E-03	5,5E-03	8,1E-03	9,9E-05	0,369	3747	55
112	8,8E-03	5,9E-03	4,1E-03	1,1E-04	0,367	3461	52
123	6,6E-03	8,2E-03	6,5E-03	1,2E-04	0,405	3367	48
132	6,0E-03	5,2E-03	6,8E-03	1,0E-04	0,399	3915	51

9 kN

Moule 7

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,7E-02	4,3E-02	2,2E-02	5,5E-04	0,750	1352	32
5	1,9E-02	1,7E-02	3,3E-02	3,8E-04	0,755	2012	40
8	1,7E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,752	3215	50
12	1,3E-02	1,8E-02	1,0E-02	2,2E-04	0,756	3390	49
15	9,3E-03	7,8E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,754	4764	61
18	8,5E-03	9,8E-03	8,5E-03	1,5E-04	0,759	5168	59
27	8,6E-03	8,7E-03	6,7E-03	1,3E-04	0,754	5727	64
32	8,8E-03	9,5E-03	6,9E-03	1,4E-04	0,721	5229	57
40	7,9E-03	9,9E-03	7,6E-03	1,5E-04	0,726	4850	58
46	7,7E-03	8,3E-03	7,3E-03	1,4E-04	0,728	5315	63
54	5,8E-03	8,2E-03	7,6E-03	1,3E-04	0,722	5700	69
61	7,4E-03	7,3E-03	7,5E-03	1,3E-04	0,720	5529	61
75	7,0E-03	6,2E-03	7,3E-03	1,2E-04	0,723	6012	69
88	5,5E-03	6,7E-03	8,0E-03	1,2E-04	0,723	6089	70
103	6,1E-03	7,3E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,731	6177	63
112	6,2E-03	5,9E-03	7,4E-03	1,1E-04	0,729	6391	73
123	6,0E-03	6,9E-03	7,6E-03	1,2E-04	0,794	6606	74
132	5,8E-03	6,8E-03	7,1E-03	1,1E-04	0,800	6957	71

Moule 8

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,7E-02	4,5E-02	6,3E-02	7,9E-04	0,752	947	26
5	3,0E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,749	1628	32
8	2,0E-02	2,8E-02	2,1E-02	3,8E-04	0,750	1991	33
12	2,4E-02	1,8E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,750	2112	32
15	2,2E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,751	2186	31
18	1,6E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,751	2410	33
27	1,4E-02	2,0E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,753	2686	35
32	1,9E-02	1,9E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,723	2538	34
40	2,1E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,8E-04	0,724	2584	36
46	1,7E-02	2,0E-02	1,1E-02	2,7E-04	0,723	2645	35
54	1,5E-02	2,0E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,722	2736	35
61	1,6E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,718	2796	35
75	1,0E-02	2,1E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,726	2851	36
88	1,2E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,722	3180	38
103	9,4E-03	1,3E-02	1,6E-02	2,1E-04	0,729	3412	39
112	1,7E-02	1,4E-02	9,3E-03	2,2E-04	0,722	3232	38
123	1,2E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,792	3268	37
132	1,3E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,789	3523	37

Annexe 26 – Résultats d'essais à 35°C et 20% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,2E-02	7,2E-02	6,6E-02	1,0E-03	0,403	390	15	6,4E-02	6,4E-02	7,1E-02	1,1E-03	0,403	371	13	7,6E-02	1,1E-01	9,3E-02	1,5E-03	0,789	525	14	8,4E-02	1,1E-01	1,2E-01	1,7E-03	0,789	462	11
5	4,7E-02	4,4E-02	3,5E-02	6,9E-04	0,403	588	20	5,3E-02	3,7E-02	4,4E-02	7,4E-04	0,403	547	16	6,4E-02	6,4E-02	5,2E-02	9,8E-04	0,789	802	18	8,7E-02	6,2E-02	7,0E-02	1,2E-03	0,788	660	14
8	3,7E-02	3,5E-02	3,7E-02	5,9E-04	0,404	679	20	4,2E-02	4,3E-02	3,5E-02	6,6E-04	0,404	617	16	5,5E-02	5,4E-02	5,8E-02	9,1E-04	0,789	868	17	6,1E-02	7,0E-02	5,9E-02	1,0E-03	0,790	762	14
12	3,2E-02	3,5E-02	2,9E-02	5,3E-04	0,403	764	21	3,6E-02	4,0E-02	3,6E-02	6,1E-04	0,404	661	16	5,0E-02	5,4E-02	4,5E-02	8,2E-04	0,790	965	18	5,9E-02	5,7E-02	6,0E-02	9,6E-04	0,790	821	14
15	2,0E-02	4,2E-02	2,4E-02	4,7E-04	0,403	858	22	2,8E-02	3,6E-02	4,5E-02	6,0E-04	0,403	673	16	3,5E-02	4,9E-02	4,2E-02	6,9E-04	0,789	1143	19	4,8E-02	5,4E-02	6,9E-02	9,3E-04	0,789	848	14
18	2,4E-02	3,2E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,403	840	22	3,1E-02	3,2E-02	5,1E-02	6,3E-04	0,404	645	16	4,0E-02	4,5E-02	4,7E-02	7,2E-04	0,789	1098	19	5,4E-02	4,6E-02	7,1E-02	9,3E-04	0,790	845	14
27	2,5E-02	2,3E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,404	1020	23	3,1E-02	3,5E-02	3,6E-02	5,6E-04	0,403	722	17	4,1E-02	3,8E-02	3,7E-02	6,3E-04	0,789	1255	20	4,8E-02	5,9E-02	5,3E-02	8,7E-04	0,789	903	15
32	2,7E-02	2,4E-02	2,2E-02	4,0E-04	0,392	978	23	3,9E-02	3,3E-02	3,0E-02	5,5E-04	0,392	708	17	4,2E-02	3,8E-02	3,4E-02	6,3E-04	0,768	1225	19	5,8E-02	5,4E-02	4,7E-02	8,7E-04	0,767	884	15
40	2,2E-02	2,1E-02	2,9E-02	4,2E-04	0,392	923	23	3,7E-02	3,3E-02	2,8E-02	5,5E-04	0,392	712	17	3,6E-02	3,6E-02	4,1E-02	6,6E-04	0,766	1157	20	5,7E-02	5,3E-02	4,2E-02	8,6E-04	0,767	894	15
46	1,7E-02	2,5E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,392	995	23	3,3E-02	3,3E-02	2,7E-02	5,3E-04	0,392	743	18	2,9E-02	4,0E-02	3,9E-02	6,3E-04	0,767	1222	20	4,9E-02	5,3E-02	4,3E-02	8,2E-04	0,767	934	15
54	2,0E-02	2,5E-02	1,7E-02	3,7E-04	0,393	1073	25	3,1E-02	3,6E-02	2,5E-02	5,2E-04	0,393	761	18	3,4E-02	3,8E-02	2,9E-02	5,9E-04	0,767	1298	20	4,6E-02	5,5E-02	4,1E-02	8,0E-04	0,766	954	15
61	2,4E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,8E-04	0,392	1026	24	2,3E-02	3,0E-02	3,9E-02	5,2E-04	0,392	757	18	3,8E-02	3,4E-02	3,1E-02	6,0E-04	0,767	1268	20	3,9E-02	4,5E-02	5,7E-02	7,9E-04	0,767	966	16
75	1,8E-02	2,0E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,393	1061	25	2,4E-02	3,3E-02	2,8E-02	4,8E-04	0,393	817	19	3,0E-02	3,3E-02	3,7E-02	5,9E-04	0,770	1313	21	3,7E-02	5,2E-02	4,5E-02	7,5E-04	0,769	1019	16
88	1,8E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,393	1183	26	2,4E-02	3,6E-02	2,2E-02	4,6E-04	0,392	847	20	2,8E-02	3,3E-02	3,1E-02	5,4E-04	0,768	1422	22	3,8E-02	5,4E-02	3,7E-02	7,3E-04	0,768	1050	17
103	2,1E-02	2,5E-02	1,5E-02	3,5E-04	0,354	1009	28	2,3E-02	2,2E-02	3,2E-02	4,4E-04	0,349	802	21								3,7E-02	3,3E-02	5,0E-02	6,8E-04	0,679	996	18
112	2,3E-02	2,0E-02	1,4E-02	3,4E-04	0,350	1038	29	2,9E-02	3,1E-02	1,9E-02	4,4E-04	0,351	789	21	3,5E-02	3,2E-02	2,5E-02	5,3E-04	0,696	1309	24	4,3E-02	4,6E-02	3,0E-02	6,8E-04	0,683	1007	18
123	2,1E-02	1,6E-02	1,6E-02	3,1E-04	0,410	1330	28	2,8E-02	2,9E-02	1,9E-02	4,3E-04	0,409	942	20	3,3E-02	2,6E-02	2,7E-02	5,0E-04	0,799	1589	23	4,3E-02	4,6E-02	3,1E-02	6,8E-04	0,799	1177	17

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,9E-02	5,7E-02	5,0E-02	7,9E-04	0,403	509	19	5,1E-02	5,4E-02	5,5E-02	8,7E-04	0,403	462	16	5,8E-02	8,5E-02	7,2E-02	1,2E-03	0,792	673	17	6,0E-02	9,6E-02	9,1E-02	1,4E-03	0,792	584	14
5	3,2E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,6E-04	0,403	873	26	4,1E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,8E-04	0,403	694	20	4,6E-02	4,7E-02	3,7E-02	7,1E-04	0,792	1112	23	6,8E-02	5,0E-02	5,7E-02	9,6E-04	0,791	827	18
8	2,5E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,403	984	27	3,3E-02	3,3E-02	2,6E-02	5,0E-04	0,403	802	21	3,9E-02	3,9E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,792	1204	23	4,8E-02	5,5E-02	4,5E-02	8,2E-04	0,792	972	18
12	2,2E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,403	1127	28	2,6E-02	3,1E-02	2,9E-02	4,7E-04	0,403	856	20	3,7E-02	3,9E-02	3,2E-02	5,9E-04	0,792	1344	23	4,5E-02	4,6E-02	5,0E-02	7,7E-04	0,792	1028	18
15	1,3E-02	2,7E-02	1,6E-02	3,1E-04	0,404	1310	30	2,2E-02	2,9E-02	3,4E-02	4,6E-04	0,403	877	20	2,5E-02	3,4E-02	3,0E-02	4,9E-04	0,792	1624	25	3,9E-02	4,4E-02	5,3E-02	7,4E-04	0,792	1066	18
18	1,6E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,403	1294	29	2,5E-02	2,3E-02	3,6E-02	4,6E-04	0,403	874	20	2,8E-02	2,9E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,792	1603	25	4,2E-02	3,7E-02	5,7E-02	7,4E-04	0,792	1064	18
27	1,6E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,403	1603	31	2,4E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,403	966	22	2,9E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,792	1807	25	3,8E-02	4,7E-02	3,9E-02	6,8E-04	0,791	1165	19
32	1,7E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,388	1548	31	3,0E-02	2,3E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,389	958	22	2,9E-02	2,6E-02	2,3E-02	4,3E-04	0,763	1765	26	4,6E-02	4,1E-02	3,6E-02	6,7E-04	0,762	1134	19
40	1,3E-02	1,3E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,388	1491	31	2,7E-02	2,3E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,389	969	22	2,4E-02	2,4E-02	2,8E-02	4,5E-04	0,763	1697	26	4,5E-02	4,0E-02	3,3E-02	6,7E-04	0,762	1146	19
46	9,4E-03	1,6E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,389	1604	32	2,4E-02	2,3E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,389	1025	23	1,9E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,763	1792	26	3,8E-02	4,0E-02	3,3E-02	6,3E-04	0,763	1216	19
54	1,3E-02	1,5E-02	9,9E-03	2,2E-04	0,389	1759	34	2,3E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,389	1051	23	2,3E-02	2,5E-02	2,0E-02	4,0E-04	0,763	1912	27	3,7E-02	4,1E-02	3,1E-02	6,2E-04	0,763	1236	20
61	1,5E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,389	1693	34	1,5E-02	2,2E-02	2,8E-02	3,7E-04	0,389	1056	23	2,6E-02	2,2E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,762	1885	27	2,8E-02	3,5E-02	4,4E-02	6,1E-04	0,762	1258	20
75	1,0E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,390	1777	34	1,8E-02	2,4E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,390	1155	24	1,9E-02	2,2E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,765	1984	28	2,9E-02	3,9E-02	3,2E-02	5,7E-04	0,765	1342	21
88	1,0E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,389	2030	37	1,7E-02	2,4E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,389	1220	25	1,9E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,765	2164	29	3,0E-02	4,0E-02	2,7E-02	5,5E-04	0,765	1397	21
103	1,3E-02	1,5E-02	8,1E-03	2,1E-04	0,388	1833	34	1,6E-02	1,6E-02	2,3E-02	3,2E-04	0,388	1231	24	1,8E-02	2,0E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,748	2479	40	2,8E-02	2,7E-02	4,0E-02	5,4E-04	0,762	1424	19
112	1,5E-02	1,1E-02	8,2E-03	2,0E-04	0,389	1953	37	2,2E-02	2,1E-02	1,4E-02	3,2E-04	0,389	1223	25	2,4E-02	2,0E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,762	2175	28	3,6E-02	3,5E-02	2,4E-02	5,4E-04	0,762	1409	20
123	1,2E-02	8,5E-03	8,9E-03	1,7E-04	0,400	2326	38	2,0E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,400	1370	25	2,1E-02	1,7E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,786	2407	29	3,4E-02	3,2E-02	2,4E-02	5,0E-04	0,786	1560	21

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,3E-02	4,9E-02	4,2E-02	6,8E-04	0,403	595	23	4,3E-02	4,9E-02	4,8E-02	7,6E-04	0,403	527	19	4,9E-02	7,5E-02	6,2E-02	1,0E-03	0,789	776	20	5,2E-02	8,9E-02	8,2E-02	1,2E-03	0,789	647	17
5	2,5E-02	2,3E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,403	1102	32	3,5E-02	2,6E-02	3,1E-02	5,0E-04	0,403	808	24	3,8E-02	3,9E-02	3,0E-02	5,8E-04	0,790	1356	28	5,9E-02	4,4E-02	5,0E-02	8,4E-04	0,789	943	21
8	2,0E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,403	1232	33	2,9E-02	2,8E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,403	936	25	3,2E-02	3,2E-02	3,5E-02	5,5E-04	0,789	1446	28	4,3E-02	4,9E-02	3,9E-02	7,1E-04	0,790	1107	22
12	1,7E-02	1,9E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,403	1423	34	2,2E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,403	996	25	3,0E-02	3,2E-02	2,7E-02	4,9E-04	0,790	1612	29	3,9E-02	4,0E-02	4,5E-02	6,8E-04	0,790	1165	21
15	1,0E-02	2,1E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,403	1673	37	1,9E-02	2,5E-02	2,8E-02	3,9E-04	0,403	1022	24	2,1E-02	2,8E-02	2,4E-02	4,0E-04	0,790	1971	31	3,4E-02	3,9E-02	4,6E-02	6,6E-04	0,790	1205	21
18	1,2E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,4E-04	0,403	1643	35	2,1E-02	2,0E-02	3,1E-02	3,9E-04	0,403	1021	24	2,3E-02	2,3E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,789	1953	30	3,7E-02	3,4E-02	5,0E-02	6,6E-04	0,790	1201	21
27	1,3E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,403	2080	39	2,1E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,403	1148	26	2,3E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,791	2208	31	3,4E-02	4,1E-02	3,3E-02	5,9E-04	0,790	1341	22
32	1,3E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,388	2017	39	2,5E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,389	1143	26	2,4E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,5E-04	0,760	2165	31	4,1E-02	3,5E-02	3,1E-02	5,8E-04	0,760	1307	23
40	1,0E-02	1,0E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,388	1958	39	2,3E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,388	1159	26	1,9E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,6E-04	0,760	2085	31	3,9E-02	3,4E-02	2,9E-02	5,7E-04	0,760	1323	22
46	6,9E-03	1,2E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,388	2110	40	2,0E-02	1,9E-02	1,6E-02	3,1E-04	0,389	1245	27	1,5E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,760	2210	32	3,3E-02	3,4E-02	2,9E-02	5,4E-04	0,761	1416	23
54	9,6E-03	1,1E-02	7,4E-03	1,7E-04	0,388	2339	43	2,0E-02	2,0E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,388	1279	27	1,9E-02	2,0E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,761	2351	33	3,3E-02	3,5E-02	2,6E-02	5,3E-04	0,761	1427	23
61	1,1E-02	9,6E-03	8,1E-03	1,7E-04	0,388	2265	42	1,2E-02	1,9E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,389	1286	27	2,1E-02	1,7E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,761	2338	33	2,4E-02	3,0E-02	3,7E-02	5,2E-04	0,761	1471	23
75	7,3E-03	8,9E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,389	2368	42	1,5E-02	2,0E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,390	1411	28	1,5E-02	1,7E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,763	2481	33	2,6E-02	3,4E-02	2,7E-02	4,9E-04	0,763	1559	24
88	7,8E-03	8,6E-03	7,7E-03	1,4E-04	0,390	2751	46	1,5E-02	2,0E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,389	1493	29	1,5E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,762	2704	35	2,6E-02	3,3E-02	2,3E-02	4,6E-04	0,763	1645	25
103	9,4E-03	1,2E-02	6,0E-03	1,6E-04	0,388	2443	42	1,2E-02	1,4E-02	1,9E-02	2,6E-04	0,388	1500	27								2,3E-02	2,3E-02	3,4E-02	4,6E-04	0,761	1655	22
112	1,1E-02	8,0E-03	6,1E-03	1,5E-04	0,388	2648	46	1,9E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,6E-04	0,388	1499	29	1,9E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,8E-04	0,760	2732	33	3,1E-02	2,9E-02	2,1E-02	4,6E-04	0,760	1651	22
123	8,1E-03	5,7E-03	6,1E-03	1,2E-04	0,321	2758	48	1,5E-02	1,3E-02	9,5E-03	2,1E-04	0,322	1542	29	1,5E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,632	2778	35	2,5E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,7E-04	0,632	1722	24

Date	Moules à 6Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	2,9E-02	4,3E-02	3,6E-02	5,9E-04	0,397	671	27	3,8E-02	4,5E-02	4,3E-02	6,9E-04	0,397	578	22	4,3E-02	6,6E-02	5,4E-02	8,9E-04	0,775	868	23	4,6E-02	8,1E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,775	707	20
5	2,1E-02	1,9E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,398	1317	38	3,0E-02	2,3E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,397	915	29	3,1E-02	3,3E-02	2,6E-02	4,9E-04	0,777	1573	33	5,2E-02	3,9E-02	4,5E-02	7,4E-04	0,777	1046	25
8	1,7E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,398	1465	39	2,5E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,398	1061	29	2,7E-02	2,8E-02	3,0E-02	4,7E-04	0,777	1662	33	3,8E-02	4,3E-02	3,4E-02	6,3E-04	0,777	1227	25
12	1,4E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,398	1701	41	1,9E-02	2,4E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,398	1127	29	2,6E-02	2,7E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,777	1856	34	3,4E-02	3,6E-02	4,1E-02	6,0E-04	0,777	1287	25
15	8,8E-03	1,7E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,398	2012	45	1,7E-02	2,2E-02	2,5E-02	3,4E-04	0,398	1158	29	1,9E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,777	2278	37	3,1E-02	3,5E-02	4,0E-02	5,8E-04	0,776	1335	25
18	1,0E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,398	1958	42	1,8E-02	1,8E-02	2,7E-02	3,4E-04	0,399	1156	28	2,0E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,4E-04	0,777	2275	35	3,3E-02	3,0E-02	4,4E-02	5,8E-04	0,776	1331	24
27	1,1E-02	8,7E-03	9,8E-03	1,6E-04	0,400	2505	47	1,9E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,398	1312	31	2,0E-02	1,7E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,776	2553	37	3,1E-02	3,6E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,777	1494	26
32	1,1E-02	9,3E-03	8,6E-03	1,6E-04	0,383	2458	47	2,2E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,383	1321	31	2,0E-02	1,8E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,746	2507	36	3,6E-02	3,0E-02	2,7E-02	5,1E-04	0,745	1466	26
40	8,0E-03	8,2E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,383	2378	47	1,9E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,383	1334	30	1,6E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,748	2415	37	3,4E-02	2,9E-02	2,6E-02	5,1E-04	0,748	1480	26
46	5,6E-03	9,9E-03	9,9E-03	1,5E-04	0,383	2571	49	1,7E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,382	1455	32	1,3E-02	1,9E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,747	2563	38	2,9E-02	2,9E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,747	1587	27
54	7,9E-03	9,1E-03	6,1E-03	1,4E-04	0,384	2834	53	1,7E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,384	1483	32	1,7E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,750	2708	39	3,0E-02	3,1E-02	2,3E-02	4,7E-04	0,750	1591	27
61	9,2E-03	7,6E-03	6,7E-03	1,4E-04	0,383	2781	52	9,9E-03	1,6E-02	1,9E-02	2,5E-04	0,383	1510	32	1,8E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,748	2711	39	2,1E-02	2,7E-02	3,2E-02	4,5E-04	0,746	1660	27
75	5,9E-03	7,2E-03	9,5E-03	1,3E-04	0,385	2892	51	1,3E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,384	1633	33	1,3E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,751	2860	39	2,3E-02	3,0E-02	2,3E-02	4,3E-04	0,750	1739	28
88	6,3E-03	7,0E-03	6,2E-03	1,1E-04	0,385	3361	57	1,3E-02	1,6E-02	1,0E-02	2,2E-04	0,383	1752	35	1,3E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,750	3115	42	2,3E-02	2,8E-02	2,0E-02	4,0E-04	0,749	1860	29
103	7,6E-03	9,6E-03	5,0E-03	1,3E-04	0,384	2965	51	1,0E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,2E-04	0,383	1745	31								2,0E-02	2,1E-02	3,0E-02	4,0E-04	0,748	1849	25
112	8,8E-03	6,3E-03	5,1E-03	1,2E-04	0,383	3228	57	1,6E-02	1,4E-02	9,2E-03	2,2E-04	0,383	1750	34	1,6E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,748	3167	38	2,8E-02	2,5E-02	1,8E-02	4,0E-04	0,748	1857	25
123	6,4E-03	4,7E-03	4,9E-03	9,4E-05	0,339	3593	59	1,3E-02	1,0E-02	8,2E-03	1,8E-04	0,338	1901	35	1,2E-02	9,9E-03	1,0E-02	1,9E-04	0,663	3453	43	2,2E-02	1,9E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,663	2059	28

Date	Moules à 10Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 7							Moule 8							Moule 7							Moule 8						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	2,5E-02	3,8E-02	3,1E-02	5,1E-04	0,383	744	31	3,3E-02	4,0E-02	3,8E-02	6,1E-04	0,383	625	26	4,0E-02	5,8E-02	4,7E-02	7,9E-04	0,751	949	27	4,3E-02	7,3E-02	6,7E-02	1,0E-03	0,751	753	23
5	1,7E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,384	1505	44	2,6E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,381	1015	33	2,7E-02	2,9E-02	2,2E-02	4,3E-04	0,754	1762	37	4,6E-02	3,5E-02	4,0E-02	6,6E-04	0,750	1132	28
8	1,4E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,383	1687	46	2,2E-02	2,2E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,383	1175	34	2,4E-02	2,4E-02	2,6E-02	4,0E-04	0,753	1864	38	3,4E-02	3,9E-02	3,0E-02	5,6E-04	0,748	1330	29
12	1,2E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,384	1943	48	1,6E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,383	1242	34	2,3E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,7E-04	0,755	2054	39	3,0E-02	3,2E-02	3,6E-02	5,4E-04	0,749	1393	29
15	7,6E-03	1,4E-02	8,6E-03	1,6E-04	0,383	2327	53	1,5E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,0E-04	0,384	1275	33	1,7E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,750	2525	42	2,8E-02	3,1E-02	3,5E-02	5,2E-04	0,748	1449	29
18	8,4E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,7E-04	0,383	2258	49	1,5E-02	1,6E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,382	1279	33	1,7E-02	1,7E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,750	2533	41	3,0E-02	2,8E-02	3,8E-02	5,2E-04	0,749	1439	28
27	9,0E-03	7,3E-03	8,2E-03	1,3E-04	0,383	2857	56	1,7E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,386	1460	35	1,8E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,756	2809	42	2,8E-02	3,2E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,750	1622	30
32	8,7E-03	7,8E-03	7,3E-03	1,3E-04	0,367	2816	56	1,9E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,367	1469	36	1,7E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,718	2721	42	3,2E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,722	1580	30
40	6,8E-03	7,0E-03	9,4E-03	1,4E-04	0,366	2691	56	1,7E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,368	1481	36	1,4E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,725	2636	43	3,0E-02	2,6E-02	2,4E-02	4,5E-04	0,727	1598	30
46	4,8E-03	8,3E-03	8,4E-03	1,3E-04	0,371	2942	59	1,5E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,369	1619	37	1,1E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,725	2812	44	2,6E-02	2,6E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,722	1707	31
54	6,8E-03	7,7E-03	5,3E-03	1,2E-04	0,370	3188	63	1,5E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,371	1640	37	1,5E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,729	2998	45	2,6E-02	2,7E-02	2,1E-02	4,2E-04	0,729	1743	31
61	7,7E-03	6,4E-03	5,7E-03	1,2E-04	0,369	3169	62	8,5E-03	1,4E-02	1,6E-02	2,2E-04	0,369	1710	38	1,5E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,724	2988	45	1,8E-02	2,4E-02	2,9E-02	4,0E-04	0,721	1800	32
75	5,3E-03	6,5E-03	8,2E-03	1,2E-04	0,373	3177	60	1,1E-02	1,5E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,371	1798	39	1,1E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,724	3077	45	2,2E-02	2,7E-02	2,1E-02	3,9E-04	0,725	1844	32
88	5,5E-03	6,0E-03	5,4E-03	1,0E-04	0,375	3772	68	1,1E-02	1,3E-02	8,5E-03	1,8E-04	0,367	1996	41	1,1E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,728	3373	48	2,1E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,6E-04	0,719	2008	33
103	6,4E-03	8,0E-03	4,7E-03	1,1E-04	0,368	3298	59	8,8E-03	1,1E-02	1,5E-02	1,9E-04	0,369	1914	34								1,8E-02	1,9E-02	2,6E-02	3,6E-04	0,725	2019	26
112	7,6E-03	5,5E-03	4,8E-03	1,1E-04	0,371	3519	68	1,4E-02	1,2E-02	8,1E-03	1,9E-04	0,370	1923	40	1,4E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,728	3465	42	2,5E-02	2,2E-02	1,6E-02	3,6E-04	0,721	2018	27
123	6,9E-03	5,0E-03	5,2E-03	1,0E-04	0,406	4077	71	1,4E-02	1,1E-02	9,0E-03	1,9E-04	0,407	2124	40	1,4E-02	1,1E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,794	3655	50	2,5E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,793	2171	33

Annexe 27 – Résultats d'essais à 35°C et 70% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	8,3E-02	6,3E-02	6,0E-02	1,2E-03	0,403	335	13	9,7E-02	6,6E-02	4,3E-02	1,1E-03	0,404	366	14	1,3E-01	9,1E-02	8,4E-02	1,8E-03	0,789	436	12	1,0E-01	1,3E-01	1,7E-01	2,2E-03	0,788	358	11
5	7,2E-02	3,4E-02	8,5E-02	1,1E-03	0,403	362	13	9,7E-02	5,6E-02	1,4E-01	1,6E-03	0,403	252	13	1,0E-01	4,8E-02	1,2E-01	1,6E-03	0,789	497	12	1,2E-01	7,2E-02	1,7E-01	1,9E-03	0,789	408	12
8	3,9E-02	4,7E-02	5,6E-02	8,3E-04	0,403	487	15	9,7E-02	6,6E-02	4,3E-02	1,1E-03	0,404	366	14	6,1E-02	7,3E-02	8,1E-02	1,3E-03	0,789	626	12	1,2E-01	1,0E-01	6,3E-02	1,6E-03	0,789	509	12
12	4,2E-02	3,4E-02	4,6E-02	7,2E-04	0,403	562	17	6,8E-02	5,8E-02	3,9E-02	8,9E-04	0,403	454	18	6,3E-02	5,4E-02	6,8E-02	1,1E-03	0,790	730	15	8,2E-02	8,4E-02	5,7E-02	1,2E-03	0,788	660	16
15	3,5E-02	2,4E-02	5,2E-02	6,5E-04	0,403	620	19	3,2E-02	6,0E-02	2,9E-02	6,5E-04	0,404	621	20	5,4E-02	4,0E-02	7,9E-02	1,0E-03	0,789	781	16	5,3E-02	8,0E-02	5,3E-02	1,0E-03	0,789	793	17
18	3,4E-02	2,2E-02	5,0E-02	6,2E-04	0,403	646	20	4,4E-02	2,3E-02	3,7E-02	5,6E-04	0,403	724	23	5,3E-02	4,4E-02	7,3E-02	9,9E-04	0,790	794	17	6,5E-02	4,3E-02	5,6E-02	8,8E-04	0,789	894	19
27	2,0E-02	3,3E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,403	859	24	1,7E-02	4,9E-02	2,9E-02	5,1E-04	0,403	798	24	3,4E-02	5,2E-02	4,3E-02	7,6E-04	0,789	1039	20	3,6E-02	5,6E-02	5,1E-02	7,7E-04	0,790	1027	20
32	3,2E-02	2,6E-02	1,7E-02	4,4E-04	0,391	886	25	3,5E-02	2,6E-02	2,0E-02	4,3E-04	0,391	907	25	5,0E-02	4,3E-02	3,0E-02	7,2E-04	0,766	1059	20	5,4E-02	4,4E-02	3,5E-02	7,1E-04	0,767	1074	21
40	2,6E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,7E-04	0,392	1062	27	4,1E-02	1,4E-02	2,9E-02	4,7E-04	0,392	832	25	4,2E-02	3,3E-02	3,1E-02	6,2E-04	0,767	1238	22	5,7E-02	2,7E-02	4,7E-02	7,4E-04	0,767	1037	21
46	1,8E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,393	1134	28	1,7E-02	2,4E-02	3,0E-02	4,0E-04	0,392	982	25	3,2E-02	4,1E-02	2,9E-02	6,0E-04	0,767	1287	22	3,5E-02	3,6E-02	4,4E-02	6,4E-04	0,767	1192	22
54	1,6E-02	1,5E-02	2,4E-02	3,3E-04	0,393	1195	28	3,0E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,7E-04	0,392	1061	26	2,8E-02	2,8E-02	4,0E-02	5,6E-04	0,767	1365	22	4,7E-02	3,2E-02	3,3E-02	6,2E-04	0,767	1231	21
61	2,3E-02	1,5E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,392	1204	28	2,0E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,392	1173	27	3,7E-02	2,7E-02	2,9E-02	5,5E-04	0,767	1405	23	3,5E-02	3,4E-02	3,2E-02	5,7E-04	0,766	1353	22
75								2,1E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,393	1199	27	3,0E-02	4,7E-02	3,2E-02	6,3E-04	0,769	1214	21	3,5E-02	3,4E-02	3,0E-02	5,5E-04	0,768	1386	22
88	1,5E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,393	1333	29	1,1E-02	2,1E-02	2,6E-02	3,2E-04	0,393	1220	27	2,5E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,2E-04	0,769	1482	23	2,6E-02	3,0E-02	3,8E-02	5,3E-04	0,769	1461	23
103	1,8E-02	1,9E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,392	1298	28	1,9E-02	1,9E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,392	1287	28	3,1E-02	3,2E-02	2,4E-02	5,0E-04	0,767	1519	23	3,1E-02	3,2E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,767	1473	23
112	1,6E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,393	1395	29								2,7E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,8E-04	0,768	1599	23							
123	1,6E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,409	1467	28	2,1E-02	1,8E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,409	1349	27	2,8E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,8E-04	0,799	1673	23	3,4E-02	3,1E-02	2,8E-02	5,2E-04	0,799	1531	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	7,1E-02	5,1E-02	4,8E-02	9,9E-04	0,403	406	16	7,8E-02	5,5E-02	3,2E-02	8,9E-04	0,403	452	17	1,1E-01	7,5E-02	7,0E-02	1,5E-03	0,791	522	14	8,0E-02	1,1E-01	1,4E-01	1,8E-03	0,792	446	14
5	6,0E-02	2,7E-02	7,3E-02	9,3E-04	0,403	432	16	7,3E-02	4,4E-02	1,0E-01	1,2E-03	0,403	342	16	8,5E-02	3,9E-02	1,1E-01	1,4E-03	0,792	585	15	9,4E-02	5,7E-02	1,1E-01	1,4E-03	0,792	570	15
8	3,2E-02	3,8E-02	4,5E-02	6,7E-04	0,403	598	17	7,8E-02	5,5E-02	3,2E-02	8,9E-04	0,403	452	17	5,2E-02	6,2E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,792	750	15	1,1E-01	8,9E-02	5,2E-02	1,3E-03	0,792	600	15
12	3,1E-02	2,6E-02	3,4E-02	5,3E-04	0,403	755	21	4,6E-02	4,3E-02	2,5E-02	6,1E-04	0,403	659	22	5,0E-02	4,2E-02	5,3E-02	8,5E-04	0,792	931	18	6,1E-02	6,3E-02	4,1E-02	8,9E-04	0,792	892	19
15	2,5E-02	1,6E-02	3,8E-02	4,7E-04	0,403	865	24	2,0E-02	4,2E-02	2,0E-02	4,4E-04	0,403	906	25	4,1E-02	3,0E-02	6,3E-02	7,8E-04	0,791	1014	19	3,7E-02	5,9E-02	4,0E-02	7,3E-04	0,792	1083	21
18	2,3E-02	1,5E-02	3,7E-02	4,4E-04	0,403	915	25	3,0E-02	1,3E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,403	1118	28	3,9E-02	3,2E-02	5,6E-02	7,4E-04	0,792	1069	21	4,8E-02	2,8E-02	4,1E-02	6,3E-04	0,792	1261	23
27	1,1E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,403	1360	30	1,0E-02	3,3E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,403	1213	27	2,3E-02	3,8E-02	2,9E-02	5,3E-04	0,792	1504	24	2,5E-02	3,8E-02	3,6E-02	5,3E-04	0,792	1493	24
32	2,0E-02	1,6E-02	9,8E-03	2,7E-04	0,388	1454	31	2,2E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,6E-04	0,389	1491	30	3,4E-02	3,0E-02	2,0E-02	4,9E-04	0,762	1556	25	3,7E-02	3,1E-02	2,2E-02	4,8E-04	0,763	1589	25
40	1,6E-02	1,2E-02	9,1E-03	2,1E-04	0,389	1838	34	2,8E-02	7,7E-03	1,7E-02	3,0E-04	0,389	1304	28	2,8E-02	2,1E-02	2,0E-02	4,1E-04	0,763	1879	27	4,1E-02	1,7E-02	3,1E-02	5,0E-04	0,763	1534	24
46	1,0E-02	1,5E-02	8,9E-03	2,0E-04	0,389	1939	35	9,6E-03	1,4E-02	2,0E-02	2,4E-04	0,389	1606	28	2,0E-02	2,8E-02	1,8E-02	3,9E-04	0,763	1949	27	2,3E-02	2,2E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,762	1788	25
54	9,2E-03	8,2E-03	1,5E-02	1,9E-04	0,388	2026	34	2,0E-02	1,0E-02	1,0E-02	2,3E-04	0,389	1716	29	1,8E-02	1,8E-02	2,8E-02	3,7E-04	0,763	2044	26	3,4E-02	2,2E-02	2,0E-02	4,3E-04	0,763	1785	24
61	1,4E-02	8,5E-03	9,7E-03	1,9E-04	0,389	2052	33	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,389	1999	31	2,6E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,6E-04	0,763	2141	27	2,1E-02	2,3E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,762	2048	25
75								1,4E-02	1,3E-02	8,4E-03	1,9E-04	0,390	2002	30	2,0E-02	3,3E-02	2,1E-02	4,4E-04	0,765	1758	24	2,5E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,765	2075	25
88	7,6E-03	1,1E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,389	2290	35	4,9E-03	1,2E-02	1,7E-02	1,9E-04	0,390	2031	32	1,5E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,765	2226	26	1,5E-02	1,9E-02	2,7E-02	3,4E-04	0,765	2244	26
103	1,1E-02	1,2E-02	7,5E-03	1,8E-04	0,389	2195	33	1,1E-02	1,1E-02	8,8E-03	1,8E-04	0,388	2206	32	2,0E-02	2,2E-02	1,5E-02	3,3E-04	0,762	2288	27	2,1E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,762	2254	26
112	9,5E-03	8,3E-03	9,5E-03	1,6E-04	0,388	2436	36								1,8E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,762	2456	27							
123	9,6E-03	9,5E-03	9,2E-03	1,7E-04	0,398	2404	33	1,4E-02	1,0E-02	8,9E-03	1,8E-04	0,398	2179	30	1,8E-02	1,8E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,784	2522	26	2,4E-02	2,0E-02	1,7E-02	3,4E-04	0,785	2277	25

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,5E-02	4,5E-02	4,3E-02	9,0E-04	0,403	449	18	7,0E-02	5,0E-02	2,8E-02	7,9E-04	0,403	508	20	1,0E-01	6,7E-02	6,2E-02	1,4E-03	0,790	581	17	6,9E-02	1,0E-01	1,2E-01	1,6E-03	0,789	496	16
5	5,4E-02	2,3E-02	6,7E-02	8,4E-04	0,403	479	19	6,4E-02	3,9E-02	9,0E-02	1,0E-03	0,403	390	18	7,6E-02	3,4E-02	9,7E-02	1,2E-03	0,789	651	18	7,7E-02	5,4E-02	7,6E-02	1,1E-03	0,788	708	18
8	2,8E-02	3,4E-02	4,0E-02	6,0E-04	0,403	673	21	7,0E-02	5,0E-02	2,8E-02	7,9E-04	0,403	508	20	4,6E-02	5,6E-02	6,0E-02	9,5E-04	0,790	833	18	9,3E-02	8,1E-02	4,6E-02	1,2E-03	0,789	670	17
12	2,6E-02	2,2E-02	2,9E-02	4,5E-04	0,403	897	25	3,8E-02	3,5E-02	2,0E-02	5,0E-04	0,403	807	25	4,3E-02	3,7E-02	4,6E-02	7,3E-04	0,790	1077	21	5,1E-02	5,4E-02	3,4E-02	7,5E-04	0,790	1053	23
15	2,1E-02	1,3E-02	3,3E-02	3,9E-04	0,403	1038	28	1,6E-02	3,5E-02	1,7E-02	3,6E-04	0,403	1108	28	3,5E-02	2,5E-02	5,5E-02	6,7E-04	0,789	1176	23	3,0E-02	5,0E-02	3,4E-02	6,2E-04	0,790	1284	25
18	1,9E-02	1,3E-02	3,1E-02	3,7E-04	0,403	1097	29	2,4E-02	1,0E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,403	1399	32	3,2E-02	2,7E-02	4,9E-02	6,3E-04	0,790	1254	24	4,1E-02	2,3E-02	3,4E-02	5,2E-04	0,790	1506	27
27	8,2E-03	1,8E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,403	1740	35	8,2E-03	2,6E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,403	1517	31	1,8E-02	3,3E-02	2,4E-02	4,4E-04	0,790	1809	28	2,1E-02	3,1E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,789	1809	28
32	1,6E-02	1,3E-02	7,3E-03	2,1E-04	0,388	1875	36	1,7E-02	1,3E-02	7,9E-03	2,0E-04	0,388	1896	33	2,8E-02	2,4E-02	1,6E-02	3,9E-04	0,761	1928	29	3,1E-02	2,5E-02	1,7E-02	3,9E-04	0,761	1944	28
40	1,2E-02	8,6E-03	6,6E-03	1,6E-04	0,388	2434	40	2,4E-02	5,8E-03	1,4E-02	2,5E-04	0,388	1583	31	2,3E-02	1,7E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,760	2336	31	3,5E-02	1,4E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,761	1842	27
46	7,4E-03	1,2E-02	6,6E-03	1,5E-04	0,388	2558	41	7,4E-03	1,1E-02	1,6E-02	1,9E-04	0,389	2034	32	1,6E-02	2,3E-02	1,4E-02	3,1E-04	0,761	2430	31	1,9E-02	1,8E-02	2,5E-02	3,5E-04	0,760	2198	28
54	6,9E-03	6,0E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,389	2647	40	1,7E-02	8,0E-03	7,3E-03	1,8E-04	0,388	2157	32	1,4E-02	1,4E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,761	2523	30	2,9E-02	1,8E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,760	2153	26
61	1,1E-02	6,4E-03	7,2E-03	1,5E-04	0,388	2660	38	7,9E-03	9,7E-03	9,5E-03	1,5E-04	0,389	2568	34	2,1E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,9E-04	0,761	2652	30	1,6E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,760	2501	28
75								1,1E-02	1,0E-02	6,1E-03	1,5E-04	0,389	2528	34	1,7E-02	2,9E-02	1,7E-02	3,7E-04	0,762	2064	26	2,1E-02	1,8E-02	1,4E-02	3,0E-04	0,763	2566	29
88	5,5E-03	8,0E-03	8,7E-03	1,3E-04	0,390	3003	40	3,7E-03	9,2E-03	1,4E-02	1,5E-04	0,389	2537	36	1,2E-02	1,7E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,763	2735	30	1,2E-02	1,5E-02	2,3E-02	2,8E-04	0,763	2746	29
103	8,2E-03	9,7E-03	5,6E-03	1,4E-04	0,388	2823	38	9,1E-03	8,9E-03	6,3E-03	1,4E-04	0,388	2849	36	1,6E-02	1,9E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,760	2802	30	1,8E-02	1,8E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,760	2761	28
112	7,4E-03	6,1E-03	7,4E-03	1,2E-04	0,388	3171	42								1,4E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,761	3035	31							
123	7,0E-03	7,0E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,340	2817	38	1,1E-02	7,2E-03	6,2E-03	1,3E-04	0,338	2507	34	1,3E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,630	2794	29	1,8E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,631	2528	27

Date	Moules à 6Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,1E-02	4,0E-02	3,9E-02	8,2E-04	0,397	485	21	6,2E-02	4,6E-02	2,4E-02	7,1E-04	0,396	556	22	9,3E-02	6,2E-02	5,5E-02	1,2E-03	0,775	629	20	6,3E-02	9,5E-02	1,1E-01	1,5E-03	0,776	535	19
5	4,8E-02	2,0E-02	6,1E-02	7,6E-04	0,396	525	23	5,7E-02	3,5E-02	8,0E-02	9,2E-04	0,395	427	22	6,8E-02	3,1E-02	8,8E-02	1,1E-03	0,776	712	21	7,4E-02	5,4E-02	5,9E-02	1,0E-03	0,775	769	21
8	2,5E-02	3,0E-02	3,6E-02	5,4E-04	0,397	741	24	6,2E-02	4,6E-02	2,4E-02	7,1E-04	0,396	556	22	4,2E-02	5,0E-02	5,3E-02	8,5E-04	0,776	911	21	8,2E-02	7,4E-02	4,1E-02	1,1E-03	0,775	734	20
12	2,3E-02	1,9E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,397	1028	29	3,2E-02	3,0E-02	1,7E-02	4,2E-04	0,397	935	29	3,8E-02	3,2E-02	4,0E-02	6,5E-04	0,778	1205	25	4,4E-02	4,7E-02	3,0E-02	6,5E-04	0,777	1193	26
15	1,8E-02	1,1E-02	2,8E-02	3,3E-04	0,398	1191	32	1,3E-02	3,0E-02	1,5E-02	3,1E-04	0,398	1293	33	3,1E-02	2,2E-02	4,8E-02	5,9E-04	0,776	1325	27	2,6E-02	4,3E-02	3,0E-02	5,3E-04	0,778	1458	28
18	1,6E-02	1,1E-02	2,7E-02	3,2E-04	0,399	1264	33	2,1E-02	8,3E-03	1,6E-02	2,4E-04	0,399	1641	36	2,7E-02	2,3E-02	4,3E-02	5,5E-04	0,777	1425	28	3,5E-02	1,9E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,777	1732	30
27	6,6E-03	1,5E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,398	2069	41	7,1E-03	2,1E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,398	1787	35	1,5E-02	2,8E-02	2,0E-02	3,7E-04	0,778	2097	32	1,9E-02	2,6E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,778	2075	31
32	1,3E-02	1,0E-02	5,9E-03	1,7E-04	0,384	2266	42	1,4E-02	1,1E-02	6,4E-03	1,7E-04	0,384	2260	38	2,3E-02	2,0E-02	1,3E-02	3,3E-04	0,747	2272	34	2,6E-02	2,2E-02	1,4E-02	3,3E-04	0,746	2271	32
40	9,9E-03	7,1E-03	5,5E-03	1,3E-04	0,383	2918	48	2,1E-02	4,9E-03	1,2E-02	2,1E-04	0,383	1824	35	2,0E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,8E-04	0,749	2704	36	3,0E-02	1,2E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,747	2127	30
46	5,9E-03	1,0E-02	5,3E-03	1,2E-04	0,383	3089	49	6,1E-03	8,4E-03	1,4E-02	1,6E-04	0,382	2415	36	1,3E-02	2,0E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,747	2790	36	1,6E-02	1,5E-02	2,2E-02	3,0E-04	0,748	2513	32
54	5,6E-03	4,8E-03	1,0E-02	1,2E-04	0,384	3184	47	1,4E-02	6,9E-03	5,8E-03	1,5E-04	0,383	2522	37	1,2E-02	1,2E-02	2,0E-02	2,6E-04	0,749	2913	35	2,5E-02	1,6E-02	1,3E-02	3,1E-04	0,748	2448	30
61	9,6E-03	5,3E-03	5,8E-03	1,2E-04	0,384	3176	45	6,4E-03	8,2E-03	8,0E-03	1,3E-04	0,383	3027	40	1,8E-02	1,2E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,747	3098	35	1,4E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,748	2850	31
75								9,8E-03	8,6E-03	4,9E-03	1,3E-04	0,384	2931	39	1,6E-02	2,7E-02	1,5E-02	3,3E-04	0,750	2250	30	1,8E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,751	2911	32
88	4,6E-03	6,5E-03	7,2E-03	1,1E-04	0,384	3592	48	3,8E-03	7,5E-03	1,3E-02	1,3E-04	0,384	2878	42	1,0E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,748	3141	34	9,8E-03	1,2E-02	2,0E-02	2,4E-04	0,748	3148	33
103	6,8E-03	8,3E-03	4,5E-03	1,2E-04	0,383	3326	44	7,8E-03	7,6E-03	5,1E-03	1,2E-04	0,384	3328	42	1,3E-02	1,6E-02	1,0E-02	2,3E-04	0,749	3190	34	1,6E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,748	3114	32
112	6,3E-03	5,1E-03	6,2E-03	1,0E-04	0,385	3758	49								1,2E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,750	3464	36							
123	5,5E-03	5,6E-03	5,3E-03	9,6E-05	0,333	3472	45	9,1E-03	5,7E-03	4,9E-03	1,1E-04	0,334	3027	39	1,1E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,659	3417	34	1,6E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,2E-04	0,660	3040	31

Date	Moules à 10Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,6E-02	3,6E-02	3,5E-02	7,4E-04	0,382	515	24	5,6E-02	4,2E-02	2,1E-02	6,4E-04	0,385	603	26	8,8E-02	5,8E-02	5,2E-02	1,2E-03	0,752	650	22	5,8E-02	8,7E-02	1,0E-01	1,3E-03	0,755	570	22
5	4,3E-02	1,8E-02	5,5E-02	6,8E-04	0,386	570	26	5,2E-02	3,6E-02	7,5E-02	8,8E-04	0,383	437	24	6,1E-02	2,8E-02	7,8E-02	9,8E-04	0,753	771	23	7,0E-02	5,7E-02	7,7E-02	1,1E-03	0,762	695	24
8	2,3E-02	2,8E-02	3,2E-02	4,8E-04	0,383	795	28	5,6E-02	4,2E-02	2,1E-02	6,4E-04	0,385	603	26	3,8E-02	4,5E-02	4,7E-02	7,6E-04	0,749	983	24	7,3E-02	6,8E-02	3,8E-02	9,6E-04	0,753	786	23
12	2,0E-02	1,6E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,384	1134	34	2,8E-02	2,6E-02	1,4E-02	3,7E-04	0,385	1046	33	3,3E-02	2,9E-02	3,5E-02	5,7E-04	0,749	1317	28	3,9E-02	4,1E-02	2,7E-02	5,7E-04	0,751	1309	30
15	1,6E-02	9,5E-03	2,4E-02	2,9E-04	0,382	1323	37	1,1E-02	2,6E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,385	1438	37	2,7E-02	2,0E-02	4,1E-02	5,2E-04	0,749	1452	31	2,3E-02	3,7E-02	2,7E-02	4,7E-04	0,750	1601	32
18	1,3E-02	9,7E-03	2,3E-02	2,7E-04	0,382	1418	38	1,7E-02	7,1E-03	1,4E-02	2,1E-04	0,382	1858	42	2,4E-02	2,1E-02	3,7E-02	4,8E-04	0,748	1570	32	3,0E-02	1,7E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,752	1923	34
27	5,7E-03	1,3E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,382	2315	47	6,3E-03	1,8E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,383	2013	41	1,3E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,752	2319	37	1,7E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,750	2296	35
32	1,0E-02	8,7E-03	5,1E-03	1,4E-04	0,367	2607	50	1,2E-02	9,3E-03	5,4E-03	1,4E-04	0,367	2573	45	2,0E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,9E-04	0,722	2495	39	2,2E-02	1,9E-02	1,2E-02	2,9E-04	0,720	2483	36
40	8,3E-03	6,1E-03	4,9E-03	1,1E-04	0,369	3265	56	1,9E-02	4,4E-03	9,6E-03	1,8E-04	0,368	2014	40	1,7E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,723	2926	41	2,6E-02	1,1E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,723	2356	35
46	5,2E-03	8,7E-03	4,8E-03	1,1E-04	0,371	3395	57	5,5E-03	7,3E-03	1,2E-02	1,4E-04	0,374	2663	42	1,2E-02	1,8E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,722	3019	41	1,5E-02	1,3E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,721	2718	36
54	5,0E-03	4,3E-03	8,8E-03	1,1E-04	0,371	3508	55	1,3E-02	6,1E-03	5,0E-03	1,3E-04	0,367	2759	43	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-02	2,3E-04	0,725	3162	40	2,2E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,8E-04	0,726	2639	34
61	7,9E-03	4,5E-03	4,8E-03	1,0E-04	0,368	3675	54	5,5E-03	7,2E-03	7,0E-03	1,1E-04	0,368	3333	46	1,6E-02	1,1E-02	9,8E-03	2,1E-04	0,717	3342	40	1,2E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,719	3102	36
75								8,9E-03	7,7E-03	4,4E-03	1,2E-04	0,373	3176	46	1,5E-02	2,4E-02	1,3E-02	3,1E-04	0,731	2382	35	1,7E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,727	3064	37
88	4,0E-03	5,4E-03	6,2E-03	9,1E-05	0,369	4038	57	3,9E-03	6,2E-03	1,1E-02	1,2E-04	0,369	3112	50	9,5E-03	1,2E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,721	3365	39	8,8E-03	1,1E-02	1,8E-02	2,1E-04	0,724	3383	38
103	6,0E-03	7,3E-03	4,1E-03	1,0E-04	0,369	3616	52	7,0E-03	6,8E-03	4,6E-03	1,0E-04	0,370	3596	49	1,2E-02	1,4E-02	9,4E-03	2,1E-04	0,723	3466	39	1,4E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,2E-04	0,725	3347	37
112	5,5E-03	4,5E-03	5,4E-03	9,0E-05	0,373	4129	59								1,1E-02	1,0E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,721	3742	41							
123	6,0E-03	6,1E-03	5,8E-03	1,1E-04	0,406	3867	54	1,0E-02	6,3E-03	5,3E-03	1,2E-04	0,406	3314	46	1,2E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,794	3563	39	1,9E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,793	3137	36

Annexe 28 – Résultats d'essais à 35°C et 70% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	7,1E-02	6,8E-02	4,5E-02	1,1E-03	0,403	376	12	4,5E-02	7,1E-02	8,5E-02	1,1E-03	0,403	373	12	9,4E-02	1,1E-01	7,3E-02	1,6E-03	0,789	494	11	8,1E-02	1,1E-01	1,2E-01	1,7E-03	0,789	471	11
5	8,0E-02	5,1E-02	5,3E-02	1,1E-03	0,403	375	13	7,3E-02	1,5E-01	9,2E-02	1,7E-03	0,403	239	13	1,1E-01	8,2E-02	7,7E-02	1,6E-03	0,789	504	11	8,9E-02	1,7E-01	1,2E-01	2,0E-03	0,789	389	12
8	5,8E-02	4,4E-02	5,4E-02	9,1E-04	0,403	444	14	4,5E-02	6,0E-02	6,3E-02	9,1E-04	0,404	446	13	8,5E-02	6,7E-02	7,7E-02	1,3E-03	0,790	590	12	6,7E-02	9,2E-02	9,9E-02	1,4E-03	0,789	567	12
12	4,7E-02	4,8E-02	3,0E-02	7,4E-04	0,403	547	17	5,2E-02	7,5E-02	4,0E-02	9,0E-04	0,403	447	17	7,3E-02	7,4E-02	4,8E-02	1,1E-03	0,789	692	14	7,9E-02	1,1E-01	5,6E-02	1,3E-03	0,789	595	15
15	2,6E-02	4,3E-02	5,0E-02	6,9E-04	0,404	582	19	3,9E-02	4,1E-02	5,9E-02	7,5E-04	0,404	540	19	4,1E-02	6,6E-02	7,6E-02	1,1E-03	0,789	741	16	5,7E-02	6,1E-02	9,0E-02	1,1E-03	0,789	706	16
18	3,3E-02	5,0E-02	2,8E-02	6,5E-04	0,404	622	20	4,0E-02	3,0E-02	4,4E-02	6,2E-04	0,404	656	21	5,1E-02	7,5E-02	4,6E-02	1,0E-03	0,789	786	16	6,2E-02	5,0E-02	6,8E-02	9,7E-04	0,789	816	18
27	3,0E-02	3,3E-02	2,5E-02	5,1E-04	0,404	791	23	3,2E-02	3,9E-02	2,6E-02	5,2E-04	0,403	777	23	4,7E-02	5,1E-02	4,1E-02	8,1E-04	0,789	972	19	5,2E-02	6,0E-02	4,4E-02	8,4E-04	0,789	938	19
32	3,2E-02	2,9E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,391	747	22	2,9E-02	3,3E-02	3,1E-02	5,0E-04	0,391	785	24	4,8E-02	4,6E-02	4,6E-02	8,2E-04	0,766	932	19	4,9E-02	5,3E-02	4,8E-02	8,1E-04	0,766	946	20
40	2,6E-02	2,3E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,392	947	26	2,2E-02	4,2E-02	2,5E-02	5,0E-04	0,392	792	24	4,4E-02	3,8E-02	3,5E-02	6,9E-04	0,767	1119	21	4,3E-02	5,2E-02	3,9E-02	7,5E-04	0,767	1021	20
46	2,0E-02	2,6E-02	2,2E-02	4,0E-04	0,392	989	26	2,0E-02	2,9E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,392	936	26	3,5E-02	4,0E-02	3,5E-02	6,5E-04	0,767	1180	21	3,4E-02	4,6E-02	4,3E-02	6,9E-04	0,767	1115	21
54	2,2E-02	1,9E-02	2,8E-02	4,0E-04	0,393	972	25	2,1E-02	2,9E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,392	888	24	3,6E-02	3,3E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,768	1163	21	3,6E-02	4,8E-02	4,6E-02	7,3E-04	0,767	1053	20
61	2,1E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,392	1101	27	2,4E-02	3,2E-02	1,8E-02	4,1E-04	0,392	952	25	3,6E-02	3,4E-02	3,2E-02	5,9E-04	0,767	1290	22	4,1E-02	5,0E-02	3,2E-02	6,8E-04	0,767	1120	21
75	1,9E-02	2,3E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,393	1059	26	2,1E-02	2,2E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,394	1009	26	3,1E-02	3,8E-02	3,5E-02	6,1E-04	0,770	1265	21	3,4E-02	3,8E-02	4,4E-02	6,5E-04	0,769	1188	21
88	1,7E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,393	1114	27	2,0E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,392	1099	27	2,9E-02	4,0E-02	3,0E-02	5,9E-04	0,768	1312	22	3,4E-02	4,0E-02	3,4E-02	6,1E-04	0,769	1264	22
103	2,1E-02	2,1E-02	1,6E-02	3,4E-04	0,392	1167	27	2,3E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,6E-04	0,392	1100	26	3,5E-02	3,5E-02	2,7E-02	5,7E-04	0,766	1349	21	3,8E-02	3,7E-02	3,2E-02	6,0E-04	0,767	1277	22
112	2,3E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,6E-04	0,392	1091	26	2,5E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,7E-04	0,392	1046	25	3,4E-02	3,5E-02	2,9E-02	5,8E-04	0,767	1330	22	4,0E-02	3,7E-02	3,5E-02	6,2E-04	0,766	1228	21
123	1,7E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,409	1273	27	2,2E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,409	1127	25	2,8E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,3E-04	0,799	1496	22	3,6E-02	3,7E-02	3,6E-02	6,1E-04	0,799	1303	21
133	1,5E-02	2,4E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,416	1314	27	1,8E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,416	1307	27	2,6E-02	3,8E-02	2,7E-02	5,4E-04	0,815	1522	22	3,2E-02	3,3E-02	3,5E-02	5,6E-04	0,814	1447	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,8E-02	5,9E-02	3,8E-02	9,1E-04	0,403	444	15	3,9E-02	6,1E-02	7,3E-02	9,3E-04	0,403	435	14	7,9E-02	9,6E-02	6,3E-02	1,4E-03	0,792	571	13	7,1E-02	9,6E-02	1,0E-01	1,4E-03	0,792	548	13
5	6,8E-02	4,5E-02	4,4E-02	9,2E-04	0,403	439	15	5,2E-02	1,1E-01	7,4E-02	1,3E-03	0,403	314	16	9,4E-02	7,0E-02	6,6E-02	1,3E-03	0,792	589	14	7,2E-02	1,4E-01	9,4E-02	1,6E-03	0,792	484	14
8	4,8E-02	3,6E-02	4,3E-02	7,4E-04	0,403	543	17	3,6E-02	4,9E-02	5,4E-02	7,4E-04	0,403	541	16	7,1E-02	5,6E-02	6,5E-02	1,1E-03	0,792	702	15	5,8E-02	7,8E-02	8,4E-02	1,2E-03	0,791	669	14
12	3,7E-02	3,7E-02	2,2E-02	5,6E-04	0,404	716	21	3,7E-02	5,8E-02	2,7E-02	6,6E-04	0,403	614	21	5,9E-02	5,9E-02	3,8E-02	9,1E-04	0,792	868	17	6,0E-02	9,1E-02	4,3E-02	1,0E-03	0,792	760	18
15	1,7E-02	3,2E-02	3,8E-02	5,1E-04	0,403	790	23	2,5E-02	2,8E-02	4,4E-02	5,2E-04	0,403	772	23	3,0E-02	5,1E-02	6,0E-02	8,2E-04	0,792	965	20	4,0E-02	4,9E-02	7,0E-02	8,6E-04	0,791	925	20
18	2,2E-02	3,6E-02	2,0E-02	4,6E-04	0,403	878	25	2,6E-02	1,9E-02	3,2E-02	4,1E-04	0,403	976	26	3,8E-02	5,7E-02	3,4E-02	7,6E-04	0,792	1048	20	4,4E-02	3,6E-02	5,2E-02	7,1E-04	0,792	1120	22
27	1,9E-02	2,2E-02	1,5E-02	3,3E-04	0,403	1222	29	2,0E-02	2,5E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,403	1218	28	3,4E-02	3,7E-02	2,8E-02	5,7E-04	0,791	1380	24	3,6E-02	4,2E-02	3,1E-02	5,9E-04	0,791	1345	23
32	2,0E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,388	1141	27	1,8E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,389	1263	28	3,3E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,8E-04	0,762	1325	23	3,3E-02	3,8E-02	3,2E-02	5,5E-04	0,763	1378	24
40	1,6E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,389	1589	33	1,2E-02	2,8E-02	1,5E-02	3,1E-04	0,389	1251	28	3,1E-02	2,5E-02	2,2E-02	4,6E-04	0,763	1664	26	2,8E-02	3,8E-02	2,6E-02	5,1E-04	0,763	1481	24
46	1,2E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,388	1630	33	1,1E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,389	1527	31	2,4E-02	2,7E-02	2,4E-02	4,4E-04	0,762	1741	26	2,2E-02	3,1E-02	3,0E-02	4,7E-04	0,763	1638	25
54	1,4E-02	1,1E-02	1,8E-02	2,5E-04	0,389	1555	30	1,1E-02	1,8E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,389	1416	28	2,5E-02	2,3E-02	3,0E-02	4,5E-04	0,763	1691	25	2,2E-02	3,4E-02	3,3E-02	5,0E-04	0,763	1522	24
61	1,3E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,389	1864	33	1,3E-02	2,1E-02	1,0E-02	2,5E-04	0,389	1543	29	2,4E-02	2,3E-02	2,0E-02	3,9E-04	0,763	1945	26	2,6E-02	3,6E-02	2,1E-02	4,6E-04	0,763	1642	24
75	1,1E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,390	1727	31	1,3E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,4E-04	0,390	1650	30	2,0E-02	2,6E-02	2,4E-02	4,1E-04	0,765	1863	25	2,3E-02	2,4E-02	3,1E-02	4,4E-04	0,765	1744	24
88	9,6E-03	1,6E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,389	1855	32	1,2E-02	1,5E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,390	1856	32	1,9E-02	2,8E-02	2,0E-02	3,9E-04	0,764	1958	26	2,3E-02	2,8E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,765	1879	25
103	1,3E-02	1,3E-02	8,4E-03	2,0E-04	0,388	1935	33	1,5E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,388	1863	32	2,4E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,8E-04	0,762	2016	25	2,6E-02	2,4E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,762	1913	26
112	1,4E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,2E-04	0,388	1805	32	1,6E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,388	1710	30	2,3E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,762	1971	25	2,7E-02	2,6E-02	2,2E-02	4,2E-04	0,762	1810	25
123	1,0E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,399	2096	31	1,3E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,398	1794	29	1,9E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,6E-04	0,784	2205	25	2,4E-02	2,6E-02	2,4E-02	4,2E-04	0,786	1890	24
133	8,7E-03	1,5E-02	9,4E-03	1,9E-04	0,421	2170	32	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,421	2141	31	1,7E-02	2,7E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,826	2263	25	2,1E-02	2,2E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,826	2140	25

Moules à 3Hz

4,6 kN

Moule 9

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,1E-02	5,4E-02	3,5E-02	8,2E-04	0,403	491	17
5	6,2E-02	4,1E-02	3,9E-02	8,3E-04	0,403	486	18
8	4,3E-02	3,2E-02	3,8E-02	6,6E-04	0,403	612	20
12	3,3E-02	3,2E-02	1,9E-02	4,9E-04	0,403	831	24
15	1,3E-02	2,7E-02	3,3E-02	4,3E-04	0,404	945	28
18	1,8E-02	3,0E-02	1,6E-02	3,8E-04	0,403	1073	29
27	1,5E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,403	1567	34
32	1,6E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,388	1450	31
40	1,3E-02	1,0E-02	8,6E-03	1,8E-04	0,389	2103	40
46	9,2E-03	1,2E-02	9,8E-03	1,8E-04	0,389	2142	38
54	1,1E-02	8,8E-03	1,4E-02	2,0E-04	0,389	1964	35
61	9,7E-03	9,5E-03	7,9E-03	1,6E-04	0,389	2455	39
75	8,2E-03	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,390	2201	35
88	7,1E-03	1,3E-02	8,2E-03	1,6E-04	0,390	2396	37
103	9,8E-03	1,1E-02	6,2E-03	1,6E-04	0,388	2471	37
112	1,1E-02	9,9E-03	7,6E-03	1,7E-04	0,388	2289	36
123	7,3E-03	7,8E-03	8,4E-03	1,4E-04	0,328	2392	36
133	6,8E-03	1,2E-02	7,2E-03	1,5E-04	0,420	2761	37

Moule 10

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,6E-02	5,5E-02	6,5E-02	8,4E-04	0,403	478	17
5	4,4E-02	1,0E-01	6,5E-02	1,1E-03	0,403	358	19
8	3,2E-02	4,4E-02	4,9E-02	6,7E-04	0,403	600	19
12	3,1E-02	5,1E-02	2,1E-02	5,5E-04	0,403	727	24
15	2,0E-02	2,3E-02	3,7E-02	4,3E-04	0,403	933	27
18	2,1E-02	1,5E-02	2,6E-02	3,3E-04	0,403	1217	30
27	1,6E-02	2,0E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,403	1552	32
32	1,4E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,388	1595	32
40	8,3E-03	2,3E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,388	1579	31
46	8,0E-03	1,4E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,388	1971	35
54	8,1E-03	1,5E-02	1,6E-02	2,2E-04	0,389	1782	31
61	9,9E-03	1,8E-02	7,7E-03	2,0E-04	0,388	1962	33
75	1,0E-02	9,4E-03	1,4E-02	1,9E-04	0,389	2091	33
88	9,3E-03	1,2E-02	7,6E-03	1,6E-04	0,389	2407	37
103	1,1E-02	9,3E-03	7,8E-03	1,6E-04	0,388	2432	37
112	1,3E-02	1,1E-02	8,4E-03	1,8E-04	0,388	2163	33
123	9,8E-03	1,0E-02	9,0E-03	1,6E-04	0,332	2044	32
133	8,3E-03	8,6E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,421	2736	35

9 kN

Moule 9

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	7,1E-02	8,9E-02	5,7E-02	1,3E-03	0,789	622	16
5	8,5E-02	6,3E-02	6,0E-02	1,2E-03	0,790	651	16
8	6,4E-02	5,1E-02	5,9E-02	1,0E-03	0,790	777	18
12	5,2E-02	5,0E-02	3,3E-02	7,9E-04	0,790	997	21
15	2,5E-02	4,3E-02	5,1E-02	7,0E-04	0,790	1124	23
18	3,1E-02	4,9E-02	2,9E-02	6,4E-04	0,790	1238	24
27	2,8E-02	3,0E-02	2,2E-02	4,7E-04	0,790	1678	28
32	2,7E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,7E-04	0,761	1623	27
40	2,5E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,760	2064	31
46	2,0E-02	2,2E-02	1,9E-02	3,5E-04	0,761	2157	30
54	2,0E-02	1,8E-02	2,4E-02	3,7E-04	0,761	2061	28
61	1,9E-02	1,8E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,761	2403	30
75	1,6E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,763	2276	28
88	1,5E-02	2,3E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,763	2418	29
103	1,9E-02	2,0E-02	1,3E-02	3,1E-04	0,760	2464	29
112	2,0E-02	1,9E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,760	2403	29
123	1,4E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,630	2461	29
133	1,4E-02	2,2E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,824	2734	29

Moule 10

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,6E-02	8,9E-02	9,1E-02	1,3E-03	0,789	599	16
5	6,5E-02	1,2E-01	8,3E-02	1,4E-03	0,789	544	17
8	5,3E-02	7,0E-02	7,6E-02	1,1E-03	0,790	738	17
12	5,2E-02	7,9E-02	3,6E-02	9,0E-04	0,789	878	21
15	3,4E-02	4,0E-02	6,1E-02	7,3E-04	0,789	1087	24
18	3,5E-02	2,9E-02	4,5E-02	5,9E-04	0,790	1341	26
27	2,9E-02	3,5E-02	2,6E-02	4,8E-04	0,790	1631	27
32	2,7E-02	3,2E-02	2,6E-02	4,6E-04	0,761	1662	27
40	2,2E-02	3,1E-02	2,2E-02	4,2E-04	0,761	1809	27
46	1,7E-02	2,6E-02	2,5E-02	3,8E-04	0,761	2003	29
54	1,7E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,1E-04	0,760	1837	26
61	2,0E-02	3,0E-02	1,7E-02	3,8E-04	0,761	2013	27
75	1,9E-02	1,9E-02	2,6E-02	3,6E-04	0,763	2113	27
88	1,9E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,763	2294	29
103	2,1E-02	1,9E-02	1,7E-02	3,2E-04	0,760	2352	29
112	2,3E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,760	2197	27
123	1,7E-02	1,9E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,631	2128	27
133	1,7E-02	1,8E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,824	2617	28

Moules à 6Hz

4,6 kN

Moule 9

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,6E-02	5,0E-02	3,1E-02	7,4E-04	0,397	534	20
5	5,6E-02	3,7E-02	3,5E-02	7,5E-04	0,397	530	22
8	3,8E-02	2,8E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,397	676	24
12	2,8E-02	2,7E-02	1,6E-02	4,2E-04	0,398	948	29
15	1,1E-02	2,3E-02	2,8E-02	3,6E-04	0,398	1091	32
18	1,5E-02	2,6E-02	1,4E-02	3,2E-04	0,398	1258	33
27	1,3E-02	1,4E-02	9,3E-03	2,1E-04	0,397	1875	40
32	1,3E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,384	1735	36
40	1,0E-02	8,6E-03	6,8E-03	1,5E-04	0,384	2553	47
46	7,6E-03	9,8E-03	7,9E-03	1,5E-04	0,384	2600	45
54	8,8E-03	7,2E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,384	2344	41
61	8,0E-03	7,8E-03	6,4E-03	1,3E-04	0,384	2958	45
75	6,8E-03	9,4E-03	9,2E-03	1,5E-04	0,386	2601	41
88	5,8E-03	1,0E-02	6,7E-03	1,3E-04	0,384	2856	43
103	8,2E-03	9,3E-03	5,1E-03	1,3E-04	0,384	2912	44
112	9,8E-03	8,2E-03	6,4E-03	1,4E-04	0,385	2699	42
123	5,9E-03	6,3E-03	6,7E-03	1,1E-04	0,335	3028	42
133	5,8E-03	1,0E-02	6,1E-03	1,3E-04	0,416	3197	43

Moule 10

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,3E-02	5,1E-02	5,8E-02	7,7E-04	0,396	517	20
5	3,6E-02	9,2E-02	5,8E-02	1,0E-03	0,396	395	22
8	2,9E-02	3,9E-02	4,4E-02	6,0E-04	0,397	658	22
12	2,7E-02	4,5E-02	1,8E-02	4,8E-04	0,397	827	27
15	1,7E-02	1,9E-02	3,2E-02	3,7E-04	0,398	1085	31
18	1,7E-02	1,2E-02	2,3E-02	2,8E-04	0,398	1432	35
27	1,3E-02	1,7E-02	1,1E-02	2,2E-04	0,399	1836	37
32	1,1E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,383	1895	37
40	6,7E-03	2,0E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,383	1854	36
46	6,3E-03	1,2E-02	1,1E-02	1,6E-04	0,382	2348	41
54	6,4E-03	1,3E-02	1,4E-02	1,8E-04	0,383	2098	36
61	7,8E-03	1,5E-02	6,2E-03	1,6E-04	0,383	2339	37
75	8,6E-03	7,6E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,384	2454	38
88	7,8E-03	9,9E-03	6,1E-03	1,3E-04	0,384	2867	43
103	9,8E-03	7,6E-03	6,4E-03	1,3E-04	0,384	2882	43
112	1,1E-02	9,2E-03	6,8E-03	1,5E-04	0,384	2545	38
123	8,0E-03	8,5E-03	7,1E-03	1,3E-04	0,334	2535	37
133	7,0E-03	7,2E-03	9,0E-03	1,3E-04	0,416	3194	41

9 kN

Moule 9

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,4E-02	8,2E-02	5,2E-02	1,2E-03	0,775	671	19
5	7,6E-02	5,7E-02	5,4E-02	1,1E-03	0,775	709	19
8	5,7E-02	4,6E-02	5,3E-02	9,2E-04	0,776	848	20
12	4,6E-02	4,3E-02	2,9E-02	6,9E-04	0,777	1119	24
15	2,2E-02	3,8E-02	4,5E-02	6,1E-04	0,777	1264	27
18	2,7E-02	4,2E-02	2,5E-02	5,5E-04	0,777	1407	28
27	2,4E-02	2,6E-02	1,9E-02	4,0E-04	0,778	1936	32
32	2,2E-02	2,3E-02	2,2E-02	4,0E-04	0,746	1873	31
40	2,1E-02	1,7E-02	1,5E-02	3,1E-04	0,748	2393	35
46	1,7E-02	1,9E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,747	2501	35
54	1,7E-02	1,6E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,748	2394	33
61	1,7E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,747	2784	35
75	1,4E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,749	2600	32
88	1,2E-02	1,9E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,749	2803	34
103	1,7E-02	1,8E-02	1,1E-02	2,7E-04	0,748	2810	34
112	1,7E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,749	2749	33
123	1,2E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,661	3007	33
133	1,3E-02	1,9E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,811	3074	33

Moule 10

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,1E-02	8,1E-02	8,1E-02	1,2E-03	0,775	646	18
5	5,9E-02	1,1E-01	7,4E-02	1,3E-03	0,775	597	19
8	4,9E-02	6,3E-02	6,8E-02	9,7E-04	0,777	803	19
12	4,5E-02	6,9E-02	3,2E-02	7,8E-04	0,776	990	25
15	2,9E-02	3,4E-02	5,3E-02	6,2E-04	0,775	1244	27
18	3,0E-02	2,5E-02	3,9E-02	5,1E-04	0,777	1535	29
27	2,5E-02	3,0E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,777	1881	31
32	2,3E-02	2,7E-02	2,2E-02	3,9E-04	0,748	1920	31
40	1,8E-02	2,7E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,747	2092	31
46	1,5E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,748	2292	33
54	1,5E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,6E-04	0,748	2100	30
61	1,7E-02	2,6E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,748	2305	31
75	1,7E-02	1,6E-02	2,3E-02	3,1E-04	0,751	2389	31
88	1,7E-02	2,0E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,748	2632	32
103	1,8E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,748	2686	33
112	2,0E-02	1,9E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,748	2502	31
123	1,5E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,663	2581	30
133	1,5E-02	1,5E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,810	2961	32

Moules à 10Hz

4,6 kN

Moule 9

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,2E-02	4,6E-02	2,9E-02	6,8E-04	0,383	565	24
5	5,0E-02	3,4E-02	3,1E-02	6,7E-04	0,385	574	25
8	3,4E-02	2,5E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,382	737	27
12	2,5E-02	2,4E-02	1,4E-02	3,6E-04	0,384	1053	33
15	9,3E-03	2,0E-02	2,5E-02	3,2E-04	0,384	1208	37
18	1,2E-02	2,2E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,383	1426	38
27	1,1E-02	1,2E-02	7,9E-03	1,8E-04	0,385	2122	46
32	1,1E-02	1,1E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,366	1956	42
40	8,7E-03	7,3E-03	5,9E-03	1,3E-04	0,370	2890	56
46	6,6E-03	8,1E-03	6,6E-03	1,2E-04	0,371	2979	53
54	7,6E-03	6,2E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,370	2658	48
61	6,7E-03	6,7E-03	5,6E-03	1,1E-04	0,371	3335	53
75	5,9E-03	8,1E-03	8,1E-03	1,3E-04	0,372	2874	48
88	5,0E-03	8,7E-03	5,7E-03	1,1E-04	0,370	3267	51
103	7,1E-03	8,1E-03	4,6E-03	1,2E-04	0,372	3208	51
112	8,5E-03	7,0E-03	5,6E-03	1,2E-04	0,372	3013	49
123	6,5E-03	6,8E-03	7,3E-03	1,2E-04	0,406	3376	50
133	5,1E-03	9,0E-03	5,4E-03	1,1E-04	0,398	3480	51

Moule 10

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	3,1E-02	4,6E-02	5,3E-02	7,0E-04	0,384	548	23
5	3,1E-02	8,4E-02	5,3E-02	9,1E-04	0,384	424	25
8	2,6E-02	3,5E-02	3,9E-02	5,4E-04	0,382	712	26
12	2,3E-02	3,9E-02	1,5E-02	4,2E-04	0,383	917	31
15	1,4E-02	1,6E-02	2,8E-02	3,2E-04	0,383	1212	36
18	1,4E-02	1,0E-02	2,0E-02	2,4E-04	0,385	1620	40
27	1,1E-02	1,4E-02	9,2E-03	1,8E-04	0,383	2072	43
32	9,2E-03	1,2E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,366	2173	42
40	5,8E-03	1,7E-02	8,8E-03	1,8E-04	0,366	2082	42
46	5,5E-03	1,0E-02	9,8E-03	1,4E-04	0,371	2622	47
54	5,5E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,6E-04	0,369	2307	41
61	6,6E-03	1,3E-02	5,5E-03	1,4E-04	0,372	2613	43
75	7,8E-03	6,6E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,372	2669	44
88	6,8E-03	8,3E-03	5,2E-03	1,1E-04	0,369	3246	50
103	8,5E-03	6,4E-03	5,6E-03	1,1E-04	0,369	3212	50
112	9,5E-03	8,2E-03	6,0E-03	1,3E-04	0,369	2786	45
123	8,7E-03	9,3E-03	7,6E-03	1,4E-04	0,405	2828	44
133	6,1E-03	6,3E-03	7,9E-03	1,1E-04	0,397	3480	48

9 kN

Moule 9

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,8E-02	7,4E-02	4,7E-02	1,0E-03	0,751	716	22
5	6,9E-02	5,2E-02	4,9E-02	1,0E-03	0,749	751	22
8	5,1E-02	4,2E-02	4,9E-02	8,3E-04	0,748	902	24
12	4,1E-02	3,7E-02	2,6E-02	6,1E-04	0,750	1231	28
15	2,0E-02	3,4E-02	3,9E-02	5,4E-04	0,748	1381	31
18	2,3E-02	3,7E-02	2,2E-02	4,8E-04	0,748	1549	32
27	2,1E-02	2,2E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,750	2146	37
32	2,0E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,721	2035	35
40	1,9E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,8E-04	0,726	2614	40
46	1,5E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,722	2726	40
54	1,5E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,722	2611	37
61	1,4E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,720	3044	40
75	1,3E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,729	2762	37
88	1,1E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,719	3010	39
103	1,5E-02	1,6E-02	1,0E-02	2,4E-04	0,732	3066	39
112	1,5E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,721	3008	38
123	1,4E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,793	3158	38
133	1,2E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,796	3325	37

Moule 10

Date	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,7E-02	7,5E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,750	675	21
5	5,5E-02	9,9E-02	6,8E-02	1,2E-03	0,753	631	23
8	4,5E-02	5,7E-02	6,2E-02	8,8E-04	0,750	848	22
12	4,0E-02	6,0E-02	2,9E-02	6,9E-04	0,750	1085	28
15	2,5E-02	3,0E-02	4,6E-02	5,4E-04	0,748	1375	31
18	2,6E-02	2,2E-02	3,4E-02	4,4E-04	0,748	1701	33
27	2,1E-02	2,6E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,752	2081	35
32	2,0E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,722	2128	35
40	1,6E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,2E-04	0,723	2293	35
46	1,3E-02	1,9E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,726	2492	37
54	1,3E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,726	2279	34
61	1,5E-02	2,3E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,719	2508	35
75	1,6E-02	1,5E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,725	2531	35
88	1,5E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,723	2852	37
103	1,7E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,730	2932	37
112	1,8E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,726	2679	35
123	1,7E-02	1,9E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,794	2708	35
133	1,4E-02	1,4E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,792	3182	36

Annexe 29 – Résultats d'essais à 35°C et 70% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	7,8E-02	8,6E-02	5,6E-02	1,3E-03	0,403	312	11	9,5E-02	8,5E-02	7,8E-02	1,4E-03	0,403	292	11	1,2E-01	1,3E-01	8,9E-02	2,0E-03	0,789	399	11	1,5E-01	1,5E-01	8,6E-02	2,1E-03	0,788	376	10
5	4,3E-02	7,1E-02	5,6E-02	9,9E-04	0,403	408	11	6,5E-02	9,0E-02	5,6E-02	1,1E-03	0,403	356	10	7,9E-02	1,1E-01	7,8E-02	1,6E-03	0,789	497	10	9,9E-02	1,4E-01	1,1E-01	1,9E-03	0,789	421	9
8	5,1E-02	5,2E-02	4,9E-02	8,9E-04	0,404	455	12	6,7E-02	6,4E-02	9,3E-02	1,2E-03	0,404	335	11	7,6E-02	8,3E-02	7,6E-02	1,4E-03	0,789	572	11	9,0E-02	1,1E-01	1,1E-01	1,7E-03	0,789	466	10
12	5,8E-02	2,0E-02	6,3E-02	8,3E-04	0,403	487	16	4,9E-02	6,5E-02	4,7E-02	8,7E-04	0,404	465	14	8,9E-02	1,1E-01	5,2E-02	1,4E-03	0,790	547	12	7,8E-02	9,6E-02	7,8E-02	1,4E-03	0,789	582	12
15	5,0E-02	4,5E-02	3,9E-02	7,8E-04	0,404	514	15	5,8E-02	7,1E-02	4,6E-02	9,5E-04	0,403	427	14	7,4E-02	6,9E-02	6,0E-02	1,2E-03	0,789	662	13	9,3E-02	9,5E-02	7,0E-02	1,4E-03	0,788	568	13
18	4,7E-02	2,9E-02	5,9E-02	7,9E-04	0,403	509	16	4,9E-02	5,6E-02	7,1E-02	9,4E-04	0,404	429	15	7,1E-02	5,1E-02	8,5E-02	1,2E-03	0,790	654	14	7,7E-02	7,9E-02	1,1E-01	1,5E-03	0,788	542	14
27	4,1E-02	3,5E-02	4,0E-02	6,8E-04	0,403	596	18	3,9E-02	5,2E-02	4,2E-02	7,2E-04	0,404	564	18	6,2E-02	5,6E-02	6,0E-02	1,0E-03	0,789	762	15	6,2E-02	8,1E-02	6,7E-02	1,1E-03	0,789	699	15
32	3,8E-02	4,1E-02	3,4E-02	6,6E-04	0,392	598	18	4,7E-02	5,0E-02	3,4E-02	7,1E-04	0,392	555	18	5,9E-02	6,0E-02	5,2E-02	1,0E-03	0,767	766	16	7,4E-02	7,5E-02	5,6E-02	1,1E-03	0,767	695	15
40	3,8E-02	4,0E-02	2,8E-02	6,2E-04	0,393	632	19	4,5E-02	3,1E-02	3,3E-02	6,1E-04	0,392	641	19	5,7E-02	6,1E-02	4,4E-02	9,5E-04	0,767	807	16	6,8E-02	5,0E-02	5,4E-02	9,6E-04	0,767	796	16
46	3,2E-02	3,2E-02	2,6E-02	5,3E-04	0,392	739	20	3,3E-02	4,6E-02	3,3E-02	6,2E-04	0,392	628	19	5,0E-02	5,0E-02	4,3E-02	8,4E-04	0,767	916	17	5,5E-02	6,6E-02	5,2E-02	9,7E-04	0,767	793	16
54	2,7E-02	3,0E-02	3,2E-02	5,2E-04	0,392	758	21	2,6E-02	4,7E-02	5,1E-02	7,0E-04	0,393	562	18	4,2E-02	4,7E-02	4,9E-02	8,1E-04	0,767	949	18	4,4E-02	7,0E-02	7,1E-02	1,0E-03	0,766	741	16
61	2,6E-02	3,3E-02	2,7E-02	5,0E-04	0,392	777	21	4,0E-02	2,8E-02	3,6E-02	5,8E-04	0,392	678	20	4,4E-02	5,1E-02	4,1E-02	7,9E-04	0,767	971	17	6,1E-02	4,6E-02	5,5E-02	9,1E-04	0,767	842	17
75	3,2E-02	2,9E-02	2,9E-02	5,2E-04	0,394	754	21	3,5E-02	2,6E-02	4,3E-02	5,8E-04	0,393	674	19	4,9E-02	4,5E-02	4,5E-02	8,1E-04	0,769	954	18	5,2E-02	4,4E-02	6,3E-02	8,9E-04	0,769	863	17
88	2,8E-02	3,1E-02	2,3E-02	4,8E-04	0,393	819	21	3,3E-02	3,8E-02	2,5E-02	5,4E-04	0,393	726	20	4,3E-02	4,8E-02	3,9E-02	7,6E-04	0,768	1007	18	5,3E-02	5,8E-02	4,4E-02	8,7E-04	0,769	889	17
103	2,7E-02	2,5E-02	2,7E-02	4,5E-04	0,345	765	23	3,2E-02	3,1E-02	2,8E-02	5,1E-04	0,366	716	22	4,5E-02	4,0E-02	4,5E-02	7,6E-04	0,766	1010	18	5,2E-02	5,2E-02	4,4E-02	8,3E-04	0,767	923	17
112	2,9E-02	2,7E-02	2,1E-02	4,5E-04	0,344	757	23	3,3E-02	2,9E-02	2,9E-02	5,1E-04	0,351	683	22	4,6E-02	4,3E-02	3,4E-02	7,0E-04	0,704	1011	20	5,0E-02	4,7E-02	4,6E-02	8,0E-04	0,669	837	18
123	2,8E-02	2,7E-02	1,7E-02	4,2E-04	0,409	972	23	2,5E-02	3,1E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,409	810	20	4,3E-02	4,4E-02	2,9E-02	6,7E-04	0,799	1184	19	4,0E-02	5,1E-02	5,4E-02	8,1E-04	0,799	984	17

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,6E-02	7,5E-02	4,7E-02	1,1E-03	0,403	367	14	7,9E-02	7,0E-02	6,2E-02	1,1E-03	0,403	356	13	9,2E-02	1,2E-01	7,1E-02	1,6E-03	0,792	486	13	1,2E-01	1,2E-01	7,4E-02	1,7E-03	0,792	461	12
5	3,9E-02	6,4E-02	5,1E-02	8,9E-04	0,404	451	13	5,6E-02	8,2E-02	5,2E-02	1,0E-03	0,404	395	12	6,9E-02	1,0E-01	7,0E-02	1,4E-03	0,792	561	12	8,6E-02	1,3E-01	9,5E-02	1,6E-03	0,792	481	12
8	4,4E-02	4,6E-02	4,2E-02	7,7E-04	0,403	522	14	5,4E-02	5,6E-02	7,7E-02	1,0E-03	0,403	400	13	6,7E-02	7,5E-02	6,8E-02	1,2E-03	0,792	647	13	7,9E-02	9,5E-02	9,6E-02	1,5E-03	0,791	545	13
12	4,3E-02	9,8E-03	5,6E-02	6,4E-04	0,403	630	19	4,1E-02	5,4E-02	3,8E-02	7,1E-04	0,403	566	17	7,9E-02	8,9E-02	4,4E-02	1,2E-03	0,792	639	15	6,7E-02	8,1E-02	6,5E-02	1,1E-03	0,792	693	15
15	4,0E-02	3,6E-02	3,0E-02	6,2E-04	0,403	647	19	4,8E-02	5,5E-02	3,5E-02	7,4E-04	0,403	547	18	6,1E-02	5,7E-02	4,9E-02	9,8E-04	0,792	807	16	7,8E-02	7,5E-02	5,7E-02	1,1E-03	0,792	700	16
18	3,7E-02	2,2E-02	4,7E-02	6,2E-04	0,404	649	20	3,9E-02	4,3E-02	5,8E-02	7,5E-04	0,403	540	19	5,8E-02	3,9E-02	6,8E-02	9,7E-04	0,792	820	18	6,4E-02	5,8E-02	9,1E-02	1,1E-03	0,791	690	17
27	3,0E-02	2,5E-02	3,0E-02	5,0E-04	0,403	813	23	2,8E-02	4,0E-02	3,0E-02	5,3E-04	0,403	763	23	4,8E-02	4,2E-02	4,7E-02	8,0E-04	0,791	992	20	4,7E-02	6,6E-02	5,2E-02	8,8E-04	0,792	896	19
32	2,7E-02	2,8E-02	2,4E-02	4,6E-04	0,389	837	24	3,4E-02	3,6E-02	2,5E-02	5,1E-04	0,389	765	23	4,4E-02	4,5E-02	3,9E-02	7,5E-04	0,762	1019	21	5,7E-02	5,7E-02	4,4E-02	8,4E-04	0,763	903	20
40	2,6E-02	2,8E-02	1,9E-02	4,3E-04	0,389	904	25	3,2E-02	2,3E-02	2,3E-02	4,3E-04	0,389	902	24	4,2E-02	4,6E-02	3,1E-02	7,0E-04	0,762	1092	22	5,2E-02	3,9E-02	4,0E-02	7,3E-04	0,763	1043	21
46	2,2E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,6E-04	0,389	1081	27	2,2E-02	3,3E-02	2,4E-02	4,4E-04	0,389	882	24	3,6E-02	3,7E-02	3,1E-02	6,1E-04	0,762	1251	23	4,0E-02	5,0E-02	4,0E-02	7,3E-04	0,762	1046	21
54	1,8E-02	1,9E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,389	1121	27	1,7E-02	3,4E-02	3,7E-02	5,0E-04	0,389	785	23	3,0E-02	3,3E-02	3,7E-02	5,9E-04	0,763	1301	23	3,2E-02	5,2E-02	5,6E-02	7,9E-04	0,762	969	20
61	1,8E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,389	1141	26	2,9E-02	1,8E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,389	964	25	3,2E-02	3,7E-02	2,9E-02	5,8E-04	0,763	1326	22	4,7E-02	3,4E-02	4,1E-02	6,8E-04	0,763	1116	21
75	2,2E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,5E-04	0,390	1108	26	2,5E-02	1,7E-02	2,9E-02	4,0E-04	0,390	967	24	3,5E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,8E-04	0,765	1312	23	4,0E-02	3,1E-02	4,6E-02	6,6E-04	0,765	1167	21
88	1,8E-02	2,1E-02	1,5E-02	3,2E-04	0,389	1223	27	2,4E-02	2,6E-02	1,6E-02	3,7E-04	0,390	1055	25	3,1E-02	3,6E-02	2,7E-02	5,5E-04	0,764	1393	23	4,0E-02	4,3E-02	3,1E-02	6,4E-04	0,765	1197	21
103	1,9E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,389	1245	26	2,3E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,388	1108	26	3,3E-02	2,8E-02	3,2E-02	5,4E-04	0,762	1401	23	3,9E-02	3,7E-02	3,2E-02	6,1E-04	0,762	1251	22
112	2,1E-02	1,8E-02	1,4E-02	3,1E-04	0,388	1239	27	2,5E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,388	1059	25	3,5E-02	3,1E-02	2,5E-02	5,1E-04	0,762	1493	21	4,0E-02	3,5E-02	3,5E-02	6,2E-04	0,762	1231	21
123	1,8E-02	1,8E-02	1,0E-02	2,7E-04	0,400	1482	28	1,8E-02	2,1E-02	2,3E-02	3,4E-04	0,400	1166	25	3,1E-02	3,2E-02	2,1E-02	4,8E-04	0,786	1622	23	3,1E-02	3,7E-02	4,0E-02	6,1E-04	0,787	1300	21

Moules à 3Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	6,0E-02	6,8E-02	4,2E-02	9,9E-04	0,402	405	17	7,4E-02	6,4E-02	5,3E-02	1,0E-03	0,403	392	15	8,4E-02	1,1E-01	6,3E-02	1,5E-03	0,789	532	16	1,1E-01	1,1E-01	6,7E-02	1,5E-03	0,789	510	15
5	3,6E-02	6,0E-02	4,7E-02	8,4E-04	0,403	479	15	5,2E-02	7,6E-02	4,9E-02	9,5E-04	0,403	423	15	6,4E-02	9,4E-02	6,6E-02	1,3E-03	0,789	601	15	8,0E-02	1,2E-01	9,0E-02	1,5E-03	0,789	514	14
8	4,0E-02	4,2E-02	3,9E-02	7,1E-04	0,403	566	17	4,7E-02	5,2E-02	7,0E-02	9,1E-04	0,403	442	16	6,1E-02	7,0E-02	6,2E-02	1,1E-03	0,789	696	16	7,2E-02	8,7E-02	8,8E-02	1,3E-03	0,789	595	15
12	3,8E-02	9,4E-03	5,1E-02	5,8E-04	0,402	699	23	3,7E-02	4,8E-02	3,3E-02	6,3E-04	0,403	639	21	7,1E-02	7,9E-02	4,0E-02	1,1E-03	0,789	711	18	6,0E-02	7,2E-02	5,8E-02	1,0E-03	0,789	771	19
15	3,5E-02	3,1E-02	2,6E-02	5,4E-04	0,403	743	23	4,2E-02	4,7E-02	2,9E-02	6,4E-04	0,403	632	22	5,4E-02	5,0E-02	4,4E-02	8,7E-04	0,789	910	20	7,0E-02	6,6E-02	5,0E-02	9,9E-04	0,790	795	20
18	3,2E-02	1,9E-02	4,1E-02	5,3E-04	0,403	756	25	3,3E-02	3,5E-02	5,2E-02	6,4E-04	0,403	627	23	5,0E-02	3,4E-02	5,9E-02	8,4E-04	0,790	940	21	5,7E-02	4,7E-02	8,0E-02	9,9E-04	0,789	797	21
27	2,5E-02	2,1E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,403	981	28	2,3E-02	3,4E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,403	911	27	4,1E-02	3,5E-02	4,0E-02	6,8E-04	0,790	1159	24	4,0E-02	5,8E-02	4,5E-02	7,6E-04	0,790	1033	23
32	2,2E-02	2,3E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,388	1029	29	2,8E-02	3,0E-02	2,1E-02	4,2E-04	0,388	923	27	3,7E-02	3,8E-02	3,3E-02	6,3E-04	0,760	1204	25	4,9E-02	4,8E-02	3,8E-02	7,3E-04	0,761	1045	24
40	2,1E-02	2,3E-02	1,5E-02	3,5E-04	0,388	1122	30	2,6E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,389	1101	29	3,6E-02	3,8E-02	2,6E-02	5,9E-04	0,760	1298	25	4,4E-02	3,4E-02	3,3E-02	6,2E-04	0,760	1222	24
46	1,7E-02	1,8E-02	1,4E-02	2,9E-04	0,389	1360	32	1,7E-02	2,8E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,388	1076	28	3,0E-02	3,1E-02	2,6E-02	5,1E-04	0,761	1499	27	3,3E-02	4,3E-02	3,4E-02	6,1E-04	0,760	1238	24
54	1,4E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,388	1409	32	1,3E-02	2,8E-02	3,2E-02	4,1E-04	0,389	949	26	2,5E-02	2,7E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,761	1561	26	2,7E-02	4,4E-02	4,8E-02	6,7E-04	0,760	1136	23
61	1,4E-02	1,8E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,388	1430	31	2,4E-02	1,4E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,388	1182	29	2,6E-02	3,1E-02	2,4E-02	4,8E-04	0,761	1586	26	4,0E-02	2,8E-02	3,5E-02	5,8E-04	0,761	1320	25
75	1,7E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,390	1380	31	2,1E-02	1,3E-02	2,4E-02	3,3E-04	0,390	1191	28	2,9E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,9E-04	0,763	1567	26	3,4E-02	2,6E-02	3,9E-02	5,5E-04	0,762	1378	24
88	1,5E-02	1,7E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,389	1542	32	2,0E-02	2,1E-02	1,2E-02	3,0E-04	0,389	1305	30	2,5E-02	3,0E-02	2,2E-02	4,6E-04	0,763	1675	27	3,4E-02	3,6E-02	2,5E-02	5,4E-04	0,763	1416	25
103	1,5E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,388	1550	29	1,9E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,8E-04	0,388	1375	30	2,7E-02	2,4E-02	2,7E-02	4,6E-04	0,760	1670	26	3,3E-02	3,1E-02	2,7E-02	5,1E-04	0,760	1480	25
112	1,7E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,388	1551	32	2,1E-02	1,5E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,388	1309	29	2,9E-02	2,5E-02	2,1E-02	4,3E-04	0,760	1775	24	3,5E-02	2,9E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,760	1453	25
123	1,3E-02	1,3E-02	7,1E-03	1,9E-04	0,322	1681	33	1,3E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,322	1306	29	2,2E-02	2,3E-02	1,5E-02	3,5E-04	0,633	1799	27	2,3E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,632	1431	24

Moules à 6Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	5,4E-02	6,3E-02	3,8E-02	9,1E-04	0,396	435	20	6,9E-02	5,9E-02	4,7E-02	9,4E-04	0,396	421	18	7,6E-02	9,8E-02	5,7E-02	1,4E-03	0,775	571	18	1,0E-01	9,9E-02	6,3E-02	1,4E-03	0,775	548	18
5	3,3E-02	5,6E-02	4,4E-02	7,8E-04	0,397	507	19	4,8E-02	7,0E-02	4,7E-02	8,9E-04	0,396	447	18	5,9E-02	8,7E-02	6,3E-02	1,2E-03	0,775	635	17	7,4E-02	1,1E-01	8,3E-02	1,4E-03	0,775	548	17
8	3,7E-02	3,9E-02	3,6E-02	6,5E-04	0,397	611	20	4,3E-02	4,8E-02	6,4E-02	8,3E-04	0,396	475	19	5,6E-02	6,5E-02	5,7E-02	1,0E-03	0,776	747	19	6,7E-02	7,9E-02	8,0E-02	1,2E-03	0,775	639	18
12	3,3E-02	1,1E-02	4,6E-02	5,3E-04	0,397	754	27	3,3E-02	4,2E-02	2,9E-02	5,6E-04	0,397	710	25	6,4E-02	7,0E-02	3,6E-02	9,9E-04	0,776	780	21	5,4E-02	6,3E-02	5,3E-02	9,2E-04	0,776	844	22
15	3,1E-02	2,8E-02	2,3E-02	4,8E-04	0,398	836	27	3,8E-02	4,1E-02	2,5E-02	5,6E-04	0,397	712	26	4,9E-02	4,5E-02	3,9E-02	7,7E-04	0,776	1005	23	6,2E-02	5,7E-02	4,4E-02	8,8E-04	0,775	883	23
18	2,8E-02	1,6E-02	3,5E-02	4,6E-04	0,397	857	29	2,8E-02	2,9E-02	4,7E-02	5,6E-04	0,397	705	27	4,4E-02	3,0E-02	5,2E-02	7,4E-04	0,775	1050	25	5,0E-02	4,0E-02	7,1E-02	8,7E-04	0,775	895	24
27	2,1E-02	1,7E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,398	1137	33	1,9E-02	3,0E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,398	1050	32	3,6E-02	3,0E-02	3,5E-02	5,9E-04	0,777	1309	28	3,5E-02	5,1E-02	3,9E-02	6,7E-04	0,776	1165	27
32	1,8E-02	1,9E-02	1,7E-02	3,2E-04	0,383	1213	34	2,3E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,6E-04	0,382	1075	32	3,2E-02	3,2E-02	2,9E-02	5,4E-04	0,746	1376	29	4,2E-02	4,2E-02	3,4E-02	6,3E-04	0,746	1182	27
40	1,8E-02	1,9E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,383	1320	35	2,2E-02	1,6E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,382	1288	33	3,1E-02	3,3E-02	2,3E-02	5,0E-04	0,747	1483	30	3,8E-02	3,0E-02	2,9E-02	5,4E-04	0,747	1385	28
46	1,4E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,383	1622	38	1,4E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,383	1257	32	2,6E-02	2,7E-02	2,2E-02	4,4E-04	0,747	1712	31	2,8E-02	3,7E-02	3,0E-02	5,3E-04	0,747	1404	28
54	1,2E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,384	1680	38	1,1E-02	2,3E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,383	1106	30	2,1E-02	2,3E-02	2,7E-02	4,2E-04	0,748	1800	31	2,4E-02	3,8E-02	4,2E-02	5,8E-04	0,748	1291	27
61	1,2E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,383	1700	36	2,1E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,383	1393	34	2,3E-02	2,7E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,747	1810	30	3,5E-02	2,4E-02	3,0E-02	5,0E-04	0,746	1492	29
75	1,5E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,385	1623	36	1,8E-02	1,1E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,384	1394	32	2,5E-02	2,4E-02	2,4E-02	4,2E-04	0,751	1770	30	3,0E-02	2,2E-02	3,4E-02	4,8E-04	0,751	1550	28
88	1,2E-02	1,4E-02	9,4E-03	2,1E-04	0,383	1850	38	1,7E-02	1,8E-02	9,9E-03	2,5E-04	0,383	1535	34	2,2E-02	2,6E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,749	1906	31	3,0E-02	3,1E-02	2,2E-02	4,7E-04	0,749	1604	28
103	1,3E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,384	1831	33	1,6E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,383	1618	35	2,4E-02	2,1E-02	2,3E-02	4,0E-04	0,748	1891	30	2,9E-02	2,7E-02	2,3E-02	4,5E-04	0,749	1675	29
112	1,4E-02	1,2E-02	9,3E-03	2,1E-04	0,383	1832	38	1,8E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,383	1529	34	2,5E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,7E-04	0,748	2024	27	3,1E-02	2,4E-02	2,6E-02	4,6E-04	0,747	1640	29
123	1,1E-02	1,1E-02	6,0E-03	1,6E-04	0,338	2103	39	1,1E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,338	1620	33	1,9E-02	2,0E-02	1,3E-02	3,0E-04	0,663	2185	31	2,0E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,663	1720	28

Moules à 10Hz

Date	4,6 kN														9 kN												
	Moule 9							Moule 10							Moule 9							Moule 10						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
1	4,9E-02	5,8E-02	3,5E-02	8,3E-04	0,384	461	22	6,2E-02	5,3E-02	3,9E-02	8,3E-04	0,383	462	22	7,0E-02	9,4E-02	5,3E-02	1,3E-03	0,753	594	21	9,3E-02	9,0E-02	5,9E-02	1,3E-03	0,752	577	20
5	3,0E-02	5,1E-02	4,0E-02	7,1E-04	0,383	539	22	4,4E-02	6,4E-02	4,4E-02	8,2E-04	0,384	470	21	5,4E-02	8,1E-02	6,0E-02	1,1E-03	0,753	663	20	7,0E-02	9,8E-02	7,8E-02	1,3E-03	0,754	570	20
8	3,3E-02	3,5E-02	3,2E-02	5,9E-04	0,384	650	24	3,9E-02	4,3E-02	5,7E-02	7,5E-04	0,382	512	23	5,1E-02	5,9E-02	5,2E-02	9,5E-04	0,750	791	22	6,2E-02	7,2E-02	7,4E-02	1,1E-03	0,748	672	21
12	3,0E-02	1,4E-02	4,3E-02	5,0E-04	0,388	768	30	3,0E-02	3,6E-02	2,6E-02	4,9E-04	0,383	777	29	5,7E-02	6,1E-02	3,4E-02	8,9E-04	0,751	846	25	4,9E-02	5,6E-02	4,9E-02	8,2E-04	0,748	907	25
15	2,7E-02	2,4E-02	2,0E-02	4,2E-04	0,382	920	32	3,3E-02	3,6E-02	2,2E-02	4,9E-04	0,382	786	30	4,3E-02	4,0E-02	3,5E-02	6,9E-04	0,748	1085	27	5,5E-02	5,1E-02	3,9E-02	7,8E-04	0,748	958	27
18	2,4E-02	1,4E-02	3,1E-02	4,0E-04	0,383	953	34	2,5E-02	2,5E-02	4,2E-02	4,9E-04	0,387	785	31	3,9E-02	2,7E-02	4,6E-02	6,5E-04	0,751	1152	29	4,6E-02	3,5E-02	6,3E-02	7,7E-04	0,751	969	28
27	1,9E-02	1,4E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,383	1278	38	1,6E-02	2,6E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,384	1172	36	3,1E-02	2,7E-02	3,1E-02	5,2E-04	0,753	1448	32	3,0E-02	4,5E-02	3,4E-02	5,9E-04	0,748	1276	31
32	1,5E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,368	1386	40	2,0E-02	2,1E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,366	1216	37	2,8E-02	2,8E-02	2,6E-02	4,8E-04	0,722	1506	33	3,7E-02	3,7E-02	3,0E-02	5,6E-04	0,722	1288	31
40	1,5E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,368	1487	41	1,9E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,368	1449	38	2,7E-02	2,9E-02	2,0E-02	4,5E-04	0,724	1617	34	3,4E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,9E-04	0,724	1488	32
46	1,2E-02	1,3E-02	9,5E-03	2,0E-04	0,368	1837	44	1,2E-02	2,1E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,370	1410	37	2,3E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,718	1865	36	2,5E-02	3,3E-02	2,7E-02	4,7E-04	0,721	1520	32
54	9,6E-03	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,368	1941	44	9,4E-03	2,0E-02	2,4E-02	3,0E-04	0,369	1244	35	1,9E-02	2,0E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,726	1975	35	2,1E-02	3,2E-02	3,7E-02	5,1E-04	0,723	1425	31
61	9,8E-03	1,3E-02	9,9E-03	1,9E-04	0,367	1923	43	1,8E-02	9,8E-03	1,4E-02	2,4E-04	0,369	1566	39	2,0E-02	2,3E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,722	1979	35	3,2E-02	2,1E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,720	1627	33
75	1,3E-02	1,1E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,372	1812	42	1,6E-02	9,7E-03	1,8E-02	2,4E-04	0,374	1545	37	2,2E-02	2,1E-02	2,1E-02	3,8E-04	0,722	1913	34	2,7E-02	2,0E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,725	1682	32
88	1,0E-02	1,2E-02	8,1E-03	1,8E-04	0,374	2094	44	1,5E-02	1,6E-02	8,4E-03	2,2E-04	0,372	1723	39	1,9E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,727	2072	35	2,7E-02	2,8E-02	1,9E-02	4,1E-04	0,725	1752	33
103	1,1E-02	9,9E-03	1,1E-02	1,8E-04	0,367	2043	37	1,4E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,368	1813	41	2,0E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,666	2012	30	2,6E-02	2,4E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,729	1841	33
112	1,3E-02	1,0E-02	8,1E-03	1,8E-04	0,372	2041	44	1,6E-02	1,1E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,369	1691	39	2,2E-02	1,9E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,719	2219	29	2,8E-02	2,2E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,723	1778	33
123	1,2E-02	1,1E-02	6,4E-03	1,7E-04	0,406	2351	46	1,2E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,406	1812	38	2,1E-02	2,3E-02	1,5E-02	3,5E-04	0,793	2286	36	2,3E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,793	1829	32

Annexe 30 – Résultats d'essais à 35°C et 43% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz													
	4,6 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,7E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,426	1542	33	2,6E-02	1,2E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,426	1330	31
7	1,6E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,426	1627	30	1,9E-02	1,6E-02	1,1E-02	2,5E-04	0,426	1734	32
10	1,4E-02	8,5E-03	8,2E-03	1,7E-04	0,426	2481	40	1,2E-02	9,8E-03	1,4E-02	2,0E-04	0,426	2172	37
13	1,0E-02	8,8E-03	9,1E-03	1,5E-04	0,426	2752	41	8,9E-03	9,5E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,426	2605	41
16	8,3E-03	7,1E-03	1,4E-02	1,6E-04	0,427	2625	38	9,7E-03	7,3E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,426	2701	39
20	9,0E-03	5,6E-03	6,6E-03	1,2E-04	0,426	3613	50	1,2E-02	8,2E-03	7,1E-03	1,5E-04	0,426	2931	42
27	5,5E-03	6,3E-03	6,9E-03	1,0E-04	0,426	4107	52	7,3E-03	7,9E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,426	3714	48
55	5,9E-03	5,5E-03	4,3E-03	8,7E-05	0,427	4891	58	5,7E-03	6,0E-03	4,9E-03	8,9E-05	0,426	4776	55
85	3,8E-03	6,4E-03	6,0E-03	9,0E-05	0,425	4723	52	4,9E-03	6,2E-03	8,4E-03	1,1E-04	0,425	4045	48
119	3,9E-03	5,2E-03	7,3E-03	9,2E-05	0,426	4649	54	6,2E-03	4,5E-03	6,7E-03	9,4E-05	0,425	4545	49
157	5,8E-03	3,7E-03	4,9E-03	8,0E-05	0,425	5311	54	1,3E-02	5,0E-03	4,5E-03	1,2E-04	0,425	3549	42
184								1,0E-02	8,9E-03	6,2E-03	1,4E-04	0,425	3095	33

Date	9 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,5E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,2E-04	0,833	2002	29	3,5E-02	2,1E-02	3,2E-02	4,8E-04	0,832	1749	28
7	2,4E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,833	2188	28	2,8E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,833	2190	28
10	2,2E-02	1,5E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,833	2901	33	2,0E-02	1,8E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,832	2538	30
13	1,6E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,833	3142	33	1,5E-02	1,7E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,832	2960	31
16	1,6E-02	1,3E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,833	3115	31	1,7E-02	1,4E-02	2,0E-02	2,7E-04	0,833	3046	32
20	1,6E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,833	3867	38	1,9E-02	1,6E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,832	3205	33
27	1,1E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,833	4230	38	1,4E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,833	3823	36
55	1,1E-02	1,0E-02	7,6E-03	1,6E-04	0,832	5157	41	1,1E-02	1,2E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,833	4766	40
85	7,2E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,832	5248	39	1,0E-02	1,0E-02	1,4E-02	1,9E-04	0,831	4455	37
119	7,1E-03	9,4E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,832	5191	39	1,2E-02	9,1E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,833	4769	37
157	1,1E-02	7,7E-03	9,8E-03	1,6E-04	0,832	5245	38	2,0E-02	1,0E-02	9,3E-03	2,1E-04	0,832	3964	34
184								1,7E-02	1,7E-02	1,1E-02	2,4E-04	0,833	3467	27

Date	Moules à 1Hz													
	4,6 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,6E-03	8,0E-03	8,3E-03	1,4E-04	0,420	3033	48	1,3E-02	5,9E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,420	2575	44
7	8,9E-03	8,1E-03	9,8E-03	1,5E-04	0,420	2830	38	1,0E-02	7,8E-03	5,5E-03	1,3E-04	0,420	3351	45
10	7,4E-03	4,5E-03	4,4E-03	9,1E-05	0,418	4613	66	6,1E-03	5,1E-03	7,0E-03	9,8E-05	0,418	4286	57
13	4,9E-03	4,4E-03	4,4E-03	7,6E-05	0,418	5495	71	4,3E-03	4,8E-03	5,8E-03	8,0E-05	0,417	5188	68
16	4,5E-03	4,1E-03	7,1E-03	8,7E-05	0,420	4812	60	4,6E-03	3,8E-03	6,3E-03	7,9E-05	0,418	5288	61
20	4,2E-03	4,6E-03	3,8E-03	7,0E-05	0,419	5972	91	5,9E-03	4,2E-03	3,9E-03	7,5E-05	0,417	5534	69
27	3,8E-03	3,7E-03	3,6E-03	6,1E-05	0,419	6822	97	3,7E-03	4,0E-03	4,0E-03	6,2E-05	0,417	6681	85
55	3,0E-03	3,1E-03	4,9E-03	6,1E-05	0,421	6892	106	3,2E-03	3,1E-03	3,8E-03	5,5E-05	0,418	7607	100
85	3,9E-03	3,0E-03	3,0E-03	5,5E-05	0,417	7561	90	4,1E-03	3,3E-03	4,5E-03	6,4E-05	0,419	6546	82
119	4,6E-03	2,9E-03	3,9E-03	6,3E-05	0,419	6631	94	3,1E-03	3,5E-03	3,2E-03	5,2E-05	0,418	7991	84
157	2,9E-03	3,5E-03	3,0E-03	5,2E-05	0,419	8034	95	8,3E-03	3,1E-03	3,6E-03	8,0E-05	0,417	5182	62
184								6,2E-03	5,6E-03	3,2E-03	8,1E-05	0,418	5178	43

Date	9 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,4E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,823	3624	39	1,9E-02	1,2E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,823	3147	36
7	1,4E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,823	3761	35	1,6E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,822	3864	37
10	1,2E-02	8,3E-03	8,0E-03	1,6E-04	0,815	5163	47	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,819	4482	41
13	8,9E-03	9,0E-03	8,4E-03	1,5E-04	0,820	5609	48	8,1E-03	9,8E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,821	5334	44
16	9,4E-03	7,3E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,820	5424	43	9,2E-03	7,6E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,820	5386	42
20	8,4E-03	5,8E-03	6,9E-03	1,2E-04	0,820	6984	57	1,1E-02	8,2E-03	7,7E-03	1,4E-04	0,815	5669	45
27	6,0E-03	6,4E-03	6,7E-03	1,1E-04	0,821	7710	57	7,5E-03	8,3E-03	6,0E-03	1,2E-04	0,816	6970	51
55	6,1E-03	5,8E-03	5,8E-03	9,8E-05	0,818	8353	63	6,2E-03	6,4E-03	5,1E-03	9,5E-05	0,820	8651	59
85	4,4E-03	5,9E-03	5,6E-03	8,8E-05	0,816	9252	57	5,5E-03	5,1E-03	8,4E-03	1,0E-04	0,817	7973	52
119	5,2E-03	5,3E-03	7,4E-03	9,9E-05	0,816	8251	56	6,6E-03	5,0E-03	6,2E-03	9,5E-05	0,820	8611	52
157	6,4E-03	4,3E-03	5,4E-03	9,0E-05	0,819	9105	55	1,3E-02	5,8E-03	5,0E-03	1,3E-04	0,819	6412	43
184								1,0E-02	1,2E-02	6,2E-03	1,5E-04	0,818	5397	30

Date	Moules à 3Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,2E-03	4,7E-03	4,9E-03	8,2E-05	0,338	4112	65	7,4E-03	3,6E-03	6,6E-03	9,5E-05	0,339	3563	59	9,1E-03	8,1E-03	8,3E-03	1,4E-04	0,662	4676	50	1,2E-02	7,2E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,663	4102	45
7	5,3E-03	4,8E-03	6,6E-03	9,2E-05	0,338	3662	47	6,0E-03	4,6E-03	3,6E-03	7,6E-05	0,338	4428	60	8,5E-03	7,6E-03	9,2E-03	1,4E-04	0,662	4704	43	1,0E-02	8,2E-03	6,8E-03	1,3E-04	0,663	4923	46
10	4,7E-03	3,7E-03	3,6E-03	6,7E-05	0,338	5079	94	3,8E-03	3,5E-03	4,3E-03	6,2E-05	0,338	5456	80	7,8E-03	5,5E-03	5,4E-03	1,0E-04	0,690	6626	64	7,4E-03	6,8E-03	7,8E-03	1,2E-04	0,662	5592	52
13	3,4E-03	3,3E-03	3,2E-03	5,5E-05	0,338	6163	101	3,5E-03	3,5E-03	3,8E-03	5,8E-05	0,340	5888	95	5,8E-03	5,8E-03	5,5E-03	9,5E-05	0,662	6985	64	5,0E-03	6,3E-03	6,9E-03	9,8E-05	0,662	6780	59
16	2,8E-03	3,4E-03	4,3E-03	5,8E-05	0,338	5794	84	3,0E-03	2,9E-03	3,9E-03	5,3E-05	0,338	6410	84	6,1E-03	4,5E-03	6,8E-03	9,7E-05	0,662	6827	55	5,8E-03	4,8E-03	7,5E-03	9,7E-05	0,662	6817	53
20	3,0E-03	3,9E-03	3,0E-03	5,5E-05	0,338	6108	120	3,7E-03	3,4E-03	3,2E-03	5,6E-05	0,339	6095	94	5,5E-03	4,7E-03	4,4E-03	8,1E-05	0,663	8150	77	7,3E-03	5,3E-03	5,1E-03	9,6E-05	0,684	7156	57
27	3,2E-03	3,1E-03	2,8E-03	5,0E-05	0,339	6788	124	2,9E-03	2,9E-03	3,5E-03	5,0E-05	0,340	6806	113	3,8E-03	4,0E-03	4,3E-03	6,7E-05	0,663	9862	78	5,0E-03	5,6E-03	4,5E-03	8,1E-05	0,681	8366	68
55	2,4E-03	2,4E-03	4,1E-03	5,0E-05	0,338	6823	130	2,6E-03	2,4E-03	3,3E-03	4,5E-05	0,338	7511	125	4,2E-03	3,9E-03	4,9E-03	7,2E-05	0,661	9125	85	4,0E-03	4,1E-03	4,0E-03	6,5E-05	0,662	10153	79
85	3,4E-03	2,3E-03	2,3E-03	4,4E-05	0,337	7612	114	3,3E-03	2,7E-03	3,0E-03	4,8E-05	0,337	6992	108	3,8E-03	4,1E-03	3,8E-03	6,5E-05	0,662	10212	73	4,0E-03	3,6E-03	5,7E-03	7,1E-05	0,658	9233	68
119	3,9E-03	2,4E-03	2,8E-03	5,0E-05	0,338	6715	118	2,4E-03	3,0E-03	2,4E-03	4,2E-05	0,338	8057	110	4,6E-03	3,7E-03	5,2E-03	7,5E-05	0,679	9058	74	4,4E-03	3,7E-03	4,2E-03	6,6E-05	0,662	9962	68
157	2,2E-03	3,0E-03	2,4E-03	4,2E-05	0,339	8015	119	6,1E-03	2,7E-03	3,1E-03	6,4E-05	0,342	5355	80	4,5E-03	3,7E-03	3,7E-03	6,6E-05	0,662	10068	72	9,5E-03	3,9E-03	3,7E-03	9,3E-05	0,662	7144	53
184								4,3E-03	3,9E-03	2,4E-03	5,7E-05	0,338	5913	53								7,2E-03	8,7E-03	4,2E-03	1,1E-04	0,664	6139	35

Date	Moules à 6Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,1E-03	5,1E-03	5,0E-03	8,4E-05	0,384	4560	85	6,3E-03	4,6E-03	5,9E-03	9,0E-05	0,383	4246	76	8,7E-03	7,8E-03	7,9E-03	1,4E-04	0,748	5517	63	1,0E-02	7,2E-03	1,0E-02	1,5E-04	0,749	5075	56
7	5,3E-03	4,9E-03	6,7E-03	9,3E-05	0,401	4300	59	5,6E-03	5,0E-03	4,4E-03	8,1E-05	0,403	5006	78	7,6E-03	7,1E-03	8,9E-03	1,3E-04	0,747	5720	53	9,0E-03	7,7E-03	6,5E-03	1,3E-04	0,748	5970	58
10	4,7E-03	4,6E-03	4,5E-03	7,6E-05	0,383	5006	114	4,3E-03	4,3E-03	4,5E-03	7,1E-05	0,381	5406	100	7,0E-03	5,8E-03	5,6E-03	1,0E-04	0,752	7337	81	6,9E-03	6,3E-03	7,1E-03	1,1E-04	0,748	6827	66
13	4,2E-03	4,2E-03	4,0E-03	6,9E-05	0,381	5506	118	4,3E-03	4,3E-03	4,1E-03	6,8E-05	0,382	5600	114	5,5E-03	5,6E-03	5,3E-03	9,1E-05	0,749	8241	81	5,5E-03	6,1E-03	6,6E-03	9,8E-05	0,747	7618	75
16	3,4E-03	4,7E-03	4,3E-03	6,9E-05	0,382	5570	103	3,7E-03	3,9E-03	3,8E-03	6,2E-05	0,381	6181	102	6,3E-03	5,6E-03	6,2E-03	1,0E-04	0,748	7425	69	5,7E-03	4,9E-03	7,0E-03	9,5E-05	0,749	7919	67
20	3,6E-03	5,3E-03	4,0E-03	7,2E-05	0,381	5312	133	3,7E-03	4,3E-03	4,0E-03	6,4E-05	0,382	5955	112	5,3E-03	6,0E-03	5,0E-03	9,0E-05	0,749	8301	95	6,7E-03	5,3E-03	4,9E-03	9,1E-05	0,751	8211	71
27	4,3E-03	4,2E-03	3,6E-03	6,7E-05	0,382	5677	135	3,6E-03	3,5E-03	4,4E-03	6,2E-05	0,382	6212	127	4,9E-03	4,9E-03	4,5E-03	8,0E-05	0,747	9372	95	4,8E-03	5,3E-03	5,3E-03	8,3E-05	0,751	9093	85
55	3,1E-03	3,3E-03	5,3E-03	6,5E-05	0,383	5884	138	3,5E-03	3,2E-03	4,3E-03	5,9E-05	0,382	6480	134	4,2E-03	4,1E-03	6,0E-03	7,9E-05	0,751	9449	101	4,3E-03	4,3E-03	5,1E-03	7,4E-05	0,748	10081	95
85	4,2E-03	2,7E-03	2,6E-03	5,3E-05	0,373	7051	123	4,4E-03	3,3E-03	3,1E-03	5,7E-05	0,372	6484	119	4,5E-03	4,1E-03	3,9E-03	7,0E-05	0,728	10471	85	4,7E-03	4,0E-03	5,4E-03	7,6E-05	0,727	9601	81
119	5,1E-03	3,1E-03	3,1E-03	6,3E-05	0,382	6072	128	3,1E-03	3,9E-03	2,9E-03	5,4E-05	0,382	7093	122	5,3E-03	4,0E-03	5,1E-03	8,0E-05	0,751	9341	90	4,5E-03	4,7E-03	4,3E-03	7,2E-05	0,749	10380	83
157	2,9E-03	3,9E-03	3,2E-03	5,6E-05	0,381	6847	128	6,1E-03	3,4E-03	3,9E-03	7,2E-05	0,383	5350	95	4,5E-03	4,4E-03	3,9E-03	7,1E-05	0,750	10526	87	9,6E-03	4,1E-03	4,5E-03	9,8E-05	0,750	7673	65
184								4,2E-03	4,1E-03	3,1E-03	6,1E-05	0,382	6266	65								7,0E-03	8,9E-03	4,3E-03	1,1E-04	0,749	6892	42

Date	Moules à 10Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,3E-03	5,5E-03	5,3E-03	8,9E-05	0,423	4744	100	6,1E-03	5,3E-03	5,4E-03	9,0E-05	0,423	4698	92	8,2E-03	7,2E-03	7,3E-03	1,3E-04	0,826	6552	75	9,7E-03	6,9E-03	9,7E-03	1,4E-04	0,827	5864	67
7	5,2E-03	4,8E-03	6,7E-03	9,3E-05	0,422	4562	73	5,3E-03	5,0E-03	4,7E-03	8,1E-05	0,422	5224	93	7,0E-03	6,7E-03	8,8E-03	1,3E-04	0,826	6589	65	8,4E-03	7,3E-03	6,2E-03	1,2E-04	0,825	7004	70
10	5,1E-03	5,5E-03	5,3E-03	8,8E-05	0,422	4779	125	4,8E-03	5,1E-03	4,9E-03	8,0E-05	0,421	5289	113	7,0E-03	7,1E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,826	7139	95	6,8E-03	6,7E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,826	7526	77
13	4,9E-03	5,1E-03	4,8E-03	8,2E-05	0,422	5123	128	5,2E-03	5,1E-03	4,7E-03	8,1E-05	0,422	5241	124	6,6E-03	6,5E-03	6,3E-03	1,1E-04	0,828	7693	93	6,7E-03	6,4E-03	6,5E-03	1,0E-04	0,826	7884	87
16	3,8E-03	5,4E-03	4,4E-03	7,5E-05	0,421	5588	115	4,4E-03	4,5E-03	4,2E-03	7,0E-05	0,421	5984	114	6,3E-03	6,7E-03	6,2E-03	1,1E-04	0,826	7742	81	5,7E-03	5,8E-03	7,3E-03	1,0E-04	0,827	8174	78
20	4,4E-03	6,0E-03	4,6E-03	8,4E-05	0,422	5042	138	4,2E-03	5,0E-03	4,8E-03	7,5E-05	0,422	5596	121	5,7E-03	7,1E-03	5,9E-03	1,0E-04	0,828	7986	106	6,9E-03	6,4E-03	5,7E-03	1,0E-04	0,828	8110	84
27	5,0E-03	4,9E-03	4,2E-03	7,9E-05	0,422	5347	139	4,3E-03	4,2E-03	5,1E-03	7,3E-05	0,423	5805	133	5,9E-03	6,0E-03	5,4E-03	9,6E-05	0,828	8644	105	5,5E-03	5,4E-03	6,5E-03	9,3E-05	0,826	8861	96
55	3,8E-03	3,9E-03	6,0E-03	7,6E-05	0,422	5551	140	4,1E-03	3,8E-03	4,9E-03	6,9E-05	0,422	6112	138	4,8E-03	5,0E-03	7,1E-03	9,4E-05	0,826	8800	109	5,3E-03	4,8E-03	6,3E-03	8,9E-05	0,828	9342	105
85	4,7E-03	3,0E-03	2,9E-03	5,9E-05	0,383	6535	127	4,7E-03	3,5E-03	3,3E-03	6,2E-05	0,382	6166	121	4,8E-03	4,6E-03	4,4E-03	7,7E-05	0,766	9954	89	5,2E-03	4,3E-03	5,8E-03	8,2E-05	0,766	9315	86
119	5,8E-03	3,8E-03	3,6E-03	7,3E-05	0,423	5766	131	3,8E-03	4,6E-03	3,6E-03	6,5E-05	0,422	6533	127	6,5E-03	4,8E-03	5,7E-03	9,4E-05	0,829	8791	98	4,8E-03	5,7E-03	4,6E-03	8,1E-05	0,827	10186	93
157	3,5E-03	4,5E-03	3,8E-03	6,6E-05	0,422	6385	132	6,6E-03	4,0E-03	4,4E-03	8,1E-05	0,423	5218	105	4,9E-03	5,5E-03	4,9E-03	8,5E-05	0,827	9753	96	1,0E-02	4,7E-03	5,4E-03	1,1E-04	0,825	7630	76
184								4,6E-03	4,4E-03	3,9E-03	6,9E-05	0,422	6133	77								7,7E-03	9,8E-03	4,8E-03	1,2E-04	0,827	6894	50

Annexe 31 – Résultats d'essais à 35°C et 43% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,5E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,426	1437	31	2,8E-02	1,5E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,426	1288	30	2,4E-02	2,8E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,834	1877	28	4,0E-02	2,4E-02	2,9E-02	5,0E-04	0,834	1666	26
7	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-02	2,6E-04	0,426	1643	31	2,0E-02	1,2E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,426	1441	29	2,0E-02	2,2E-02	3,0E-02	4,0E-04	0,833	2090	27	2,7E-02	2,4E-02	3,7E-02	4,7E-04	0,833	1768	24
10	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-02	2,2E-04	0,427	1897	32	1,8E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,426	1763	33	1,8E-02	2,0E-02	2,7E-02	3,6E-04	0,833	2312	27	2,8E-02	2,4E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,833	2105	27
13	1,4E-02	9,5E-03	1,1E-02	1,9E-04	0,427	2239	37	1,4E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,426	2024	35	2,2E-02	1,7E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,833	2633	30	2,1E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,833	2374	29
16	1,1E-02	1,7E-02	9,3E-03	2,1E-04	0,426	2064	35	1,3E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,426	2146	36	1,8E-02	2,3E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,833	2624	30	2,1E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,833	2545	30
20	8,2E-03	8,6E-03	9,8E-03	1,5E-04	0,427	2887	41	1,1E-02	1,1E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,426	2470	38	1,5E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,833	3240	32	1,9E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,834	2794	30
27	6,8E-03	1,0E-02	7,8E-03	1,4E-04	0,426	3097	42	9,0E-03	9,8E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,426	2681	40	1,2E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,833	3496	33	1,6E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,833	3035	32
55	6,8E-03	4,6E-03	6,7E-03	1,0E-04	0,426	4232	51	6,4E-03	7,8E-03	1,1E-02	1,3E-04	0,426	3175	42	1,2E-02	9,6E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,834	4496	38	1,2E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,832	3631	34
85	6,2E-03	6,1E-03	6,4E-03	1,0E-04	0,425	4100	49	4,9E-03	7,3E-03	8,9E-03	1,1E-04	0,425	3750	50	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,831	4298	37	1,1E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,832	3896	36
119	4,2E-03	7,3E-03	4,5E-03	8,9E-05	0,426	4775	58	4,6E-03	1,2E-02	7,6E-03	1,3E-04	0,426	3285	43	7,8E-03	1,3E-02	9,0E-03	1,6E-04	0,834	5081	40	9,7E-03	1,8E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,832	3845	35
157	7,2E-03	5,9E-03	4,0E-03	9,5E-05	0,426	4467	52	1,0E-02	6,2E-03	4,9E-03	1,1E-04	0,425	3727	44	1,3E-02	1,2E-02	7,8E-03	1,8E-04	0,831	4620	36	1,3E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,832	4163	35
184								8,0E-03	7,4E-03	5,7E-03	1,1E-04	0,425	3765	44								1,4E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,833	4098	34

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,8E-03	9,5E-03	9,9E-03	1,5E-04	0,412	2735	45	1,5E-02	7,3E-03	9,7E-03	1,7E-04	0,420	2407	42	1,4E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,821	3294	37	2,4E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,822	2835	35
7	6,5E-03	6,8E-03	1,3E-02	1,4E-04	0,420	2901	42	1,0E-02	6,7E-03	1,4E-02	1,7E-04	0,420	2526	38	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-02	2,3E-04	0,820	3500	35	1,5E-02	1,4E-02	2,3E-02	2,8E-04	0,824	2924	31
10	5,4E-03	5,9E-03	1,1E-02	1,2E-04	0,418	3421	46	9,9E-03	7,0E-03	6,2E-03	1,2E-04	0,419	3359	47	1,0E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,1E-04	0,822	3830	35	1,7E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,821	3616	36
13	7,4E-03	4,7E-03	5,5E-03	9,8E-05	0,418	4279	58	6,7E-03	6,3E-03	6,6E-03	1,1E-04	0,419	3971	52	1,3E-02	9,4E-03	9,8E-03	1,8E-04	0,820	4516	41	1,2E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,819	4073	38
16	5,0E-03	8,5E-03	4,8E-03	1,0E-04	0,420	4130	53	6,5E-03	5,6E-03	6,1E-03	9,8E-05	0,419	4270	54	9,8E-03	1,2E-02	9,8E-03	1,8E-04	0,820	4624	40	1,2E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,820	4434	39
20	3,9E-03	4,2E-03	5,0E-03	7,2E-05	0,420	5812	68	5,3E-03	5,4E-03	5,1E-03	8,5E-05	0,419	4929	59	8,0E-03	8,2E-03	9,7E-03	1,4E-04	0,821	5713	45	1,1E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,822	4853	40
27	3,9E-03	4,8E-03	3,9E-03	7,0E-05	0,418	5987	69	4,4E-03	4,6E-03	5,2E-03	7,6E-05	0,420	5497	62	7,0E-03	9,1E-03	7,7E-03	1,3E-04	0,818	6185	45	9,0E-03	9,4E-03	9,7E-03	1,5E-04	0,819	5416	42
55	3,4E-03	3,7E-03	3,3E-03	5,8E-05	0,418	7266	93	3,5E-03	3,6E-03	5,5E-03	6,8E-05	0,418	6137	66	6,4E-03	5,4E-03	6,3E-03	1,0E-04	0,819	8138	56	6,5E-03	6,9E-03	1,0E-02	1,3E-04	0,819	6506	45
85	3,6E-03	3,3E-03	3,2E-03	5,6E-05	0,417	7478	85	4,6E-03	3,5E-03	4,2E-03	6,7E-05	0,416	6239	87	6,1E-03	6,2E-03	6,8E-03	1,1E-04	0,816	7684	51	6,0E-03	7,1E-03	8,0E-03	1,1E-04	0,816	7174	50
119	4,6E-03	3,9E-03	3,2E-03	6,6E-05	0,419	6396	104	4,2E-03	7,2E-03	3,7E-03	8,1E-05	0,419	5164	66	5,4E-03	7,8E-03	4,9E-03	1,0E-04	0,820	8199	60	5,3E-03	1,1E-02	7,1E-03	1,3E-04	0,818	6521	46
157	3,7E-03	3,1E-03	4,3E-03	6,2E-05	0,418	6773	89	5,9E-03	3,4E-03	3,6E-03	7,0E-05	0,418	6004	69	8,0E-03	6,5E-03	5,0E-03	1,1E-04	0,819	7567	50	8,3E-03	6,1E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,821	7437	48
184								4,2E-03	3,7E-03	3,6E-03	6,1E-05	0,420	6842	69								8,6E-03	7,4E-03	5,3E-03	1,1E-04	0,817	7143	46

Date	Moules à 3Hz																									
	4,6 kN														9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2				
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,0E-03	5,9E-03	6,1E-03	9,5E-05	0,333	3510	59	9,2E-03	4,3E-03	5,8E-03	1,0E-04	0,339	3259	55	8,7E-03	9,5E-03	9,9E-03	1,6E-04	0,662	4239	48	1,5E-02	8,2E-03	1,1E-02	1,8E-04	0,663	3621	42
7	3,9E-03	4,1E-03	8,2E-03	9,0E-05	0,338	3749	55	6,2E-03	4,1E-03	8,8E-03	1,0E-04	0,338	3302	49	7,2E-03	8,1E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,662	4306	43	9,3E-03	9,3E-03	1,5E-02	1,8E-04	0,662	3621	38
10	3,6E-03	3,9E-03	7,1E-03	8,0E-05	0,340	4225	61	6,1E-03	4,3E-03	3,8E-03	7,6E-05	0,338	4442	64	6,4E-03	7,5E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,662	4761	44	1,1E-02	8,1E-03	7,9E-03	1,4E-04	0,662	4571	45
13	4,8E-03	3,6E-03	3,8E-03	6,8E-05	0,341	5036	81	4,0E-03	3,9E-03	4,1E-03	6,5E-05	0,339	5251	71	8,9E-03	6,1E-03	6,4E-03	1,2E-04	0,662	5576	53	7,4E-03	8,6E-03	8,4E-03	1,3E-04	0,662	5057	47
16	3,2E-03	5,0E-03	3,3E-03	6,4E-05	0,338	5313	74	4,0E-03	3,5E-03	3,7E-03	6,0E-05	0,338	5607	74	6,3E-03	7,4E-03	6,3E-03	1,1E-04	0,661	5944	51	7,6E-03	6,8E-03	7,6E-03	1,2E-04	0,662	5598	49
20	3,0E-03	3,1E-03	3,3E-03	5,2E-05	0,339	6466	95	3,2E-03	3,4E-03	3,3E-03	5,3E-05	0,338	6342	82	5,2E-03	5,2E-03	6,2E-03	9,2E-05	0,661	7204	59	7,0E-03	6,6E-03	6,6E-03	1,1E-04	0,662	6101	51
27	3,1E-03	3,1E-03	2,8E-03	5,0E-05	0,338	6744	96	3,0E-03	3,1E-03	3,3E-03	5,1E-05	0,338	6669	85	4,7E-03	6,0E-03	5,2E-03	8,8E-05	0,662	7491	60	6,0E-03	6,0E-03	6,3E-03	9,8E-05	0,661	6730	53
55	2,7E-03	3,2E-03	2,6E-03	4,7E-05	0,338	7157	120	2,8E-03	2,7E-03	3,5E-03	4,9E-05	0,339	6923	89	4,3E-03	4,0E-03	4,2E-03	7,0E-05	0,662	9512	76	4,3E-03	4,6E-03	6,7E-03	8,4E-05	0,662	7928	57
85	2,9E-03	2,6E-03	2,5E-03	4,4E-05	0,338	7608	112	4,0E-03	2,9E-03	2,7E-03	5,1E-05	0,337	6547	114	4,1E-03	4,2E-03	4,7E-03	7,2E-05	0,664	9194	66	4,3E-03	4,7E-03	5,4E-03	7,8E-05	0,666	8583	64
119	4,0E-03	2,8E-03	2,7E-03	5,3E-05	0,339	6435	127	3,6E-03	5,0E-03	2,5E-03	6,0E-05	0,338	5662	89	4,5E-03	5,5E-03	3,3E-03	7,4E-05	0,663	8964	80	4,3E-03	8,0E-03	4,6E-03	9,1E-05	0,662	7277	59
157	2,5E-03	2,4E-03	3,6E-03	4,8E-05	0,338	7068	113	4,1E-03	2,8E-03	3,1E-03	5,4E-05	0,339	6276	92	5,7E-03	4,5E-03	4,2E-03	8,0E-05	0,662	8293	64	6,0E-03	3,9E-03	3,7E-03	7,3E-05	0,662	9029	61
184								2,7E-03	2,7E-03	2,9E-03	4,5E-05	0,339	7538	92								6,0E-03	5,1E-03	4,0E-03	8,1E-05	0,672	8268	58

Date	Moules à 6Hz																									
	4,6 kN														9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2				
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	3,2E-03	3,6E-03	3,6E-03	5,8E-05	0,251	4337	78	8,1E-03	4,9E-03	5,5E-03	9,9E-05	0,384	3863	70	8,3E-03	8,8E-03	9,0E-03	1,5E-04	0,748	5158	60	1,3E-02	7,7E-03	1,0E-02	1,7E-04	0,748	4521	52
7	4,5E-03	4,9E-03	8,0E-03	9,6E-05	0,401	4158	70	5,7E-03	4,9E-03	8,4E-03	1,0E-04	0,397	3895	62	6,7E-03	7,6E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,749	5232	53	8,6E-03	9,1E-03	1,5E-02	1,7E-04	0,754	4358	46
10	3,9E-03	4,4E-03	6,3E-03	8,2E-05	0,382	4678	79	5,5E-03	4,6E-03	4,3E-03	7,7E-05	0,382	4945	81	6,2E-03	7,4E-03	1,0E-02	1,3E-04	0,748	5593	54	1,0E-02	7,5E-03	7,6E-03	1,4E-04	0,748	5535	55
13	4,5E-03	4,4E-03	4,4E-03	7,4E-05	0,382	5182	101	4,3E-03	4,3E-03	4,3E-03	7,0E-05	0,381	5487	89	8,2E-03	5,8E-03	6,0E-03	1,1E-04	0,749	6712	67	6,9E-03	8,0E-03	7,9E-03	1,2E-04	0,750	6138	58
16	3,9E-03	4,9E-03	4,2E-03	7,2E-05	0,389	5383	93	4,2E-03	4,3E-03	4,1E-03	6,7E-05	0,381	5668	92	6,1E-03	6,2E-03	6,5E-03	1,0E-04	0,748	7164	65	7,3E-03	6,6E-03	7,2E-03	1,1E-04	0,749	6602	61
20	3,8E-03	4,1E-03	4,1E-03	6,7E-05	0,382	5732	113	4,0E-03	4,0E-03	4,2E-03	6,6E-05	0,386	5849	101	5,2E-03	5,2E-03	6,2E-03	9,2E-05	0,747	8109	73	7,0E-03	6,5E-03	6,4E-03	1,1E-04	0,747	6973	62
27	4,1E-03	3,5E-03	3,5E-03	6,2E-05	0,382	6214	114	3,8E-03	3,8E-03	3,7E-03	6,1E-05	0,382	6280	103	5,0E-03	5,7E-03	5,0E-03	8,7E-05	0,749	8564	74	5,8E-03	5,7E-03	5,6E-03	9,2E-05	0,749	8100	66
55	3,5E-03	4,1E-03	3,4E-03	6,1E-05	0,382	6283	131	3,9E-03	3,4E-03	3,6E-03	5,9E-05	0,382	6494	106	4,4E-03	4,8E-03	4,2E-03	7,5E-05	0,750	10051	92	4,6E-03	4,5E-03	6,2E-03	8,2E-05	0,749	9098	71
85	3,6E-03	3,3E-03	3,0E-03	5,5E-05	0,372	6788	125	4,9E-03	3,3E-03	2,9E-03	5,9E-05	0,374	6294	125	4,2E-03	4,0E-03	4,7E-03	7,2E-05	0,730	10184	78	4,8E-03	4,4E-03	5,3E-03	7,8E-05	0,728	9311	77
119	5,2E-03	3,2E-03	3,5E-03	6,6E-05	0,382	5799	135	4,7E-03	5,2E-03	3,2E-03	7,0E-05	0,381	5420	105	5,6E-03	5,5E-03	4,0E-03	8,4E-05	0,749	8912	95	5,2E-03	7,8E-03	4,6E-03	9,4E-05	0,750	7945	74
157	2,9E-03	3,1E-03	4,8E-03	6,0E-05	0,381	6338	124	3,9E-03	3,7E-03	4,0E-03	6,2E-05	0,382	6124	107	5,6E-03	4,5E-03	5,1E-03	8,4E-05	0,750	8895	79	6,5E-03	4,6E-03	4,5E-03	8,4E-05	0,749	8951	75
184								3,1E-03	3,4E-03	3,9E-03	5,6E-05	0,383	6822	106								5,9E-03	4,9E-03	4,7E-03	8,3E-05	0,751	9009	72

Date	Moules à 10Hz																									
	4,6 kN														9 kN											
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2				
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	5,2E-03	5,6E-03	5,6E-03	9,1E-05	0,424	4650	97	7,1E-03	5,4E-03	5,3E-03	9,6E-05	0,422	4415	85	7,9E-03	8,2E-03	8,5E-03	1,4E-04	0,827	6048	71	1,3E-02	7,4E-03	1,0E-02	1,6E-04	0,826	5131	62
7	4,7E-03	5,0E-03	7,2E-03	9,4E-05	0,422	4512	84	5,2E-03	5,1E-03	7,5E-03	9,6E-05	0,423	4412	76	6,4E-03	7,3E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,827	5972	64	8,0E-03	8,6E-03	1,4E-02	1,6E-04	0,826	5028	55
10	4,5E-03	5,1E-03	6,2E-03	8,8E-05	0,422	4802	94	5,4E-03	5,2E-03	5,0E-03	8,3E-05	0,423	5065	96	6,0E-03	7,2E-03	1,0E-02	1,3E-04	0,827	6328	65	1,0E-02	7,2E-03	7,3E-03	1,3E-04	0,827	6273	66
13	4,9E-03	5,2E-03	5,0E-03	8,4E-05	0,423	5034	114	4,8E-03	4,9E-03	4,7E-03	7,7E-05	0,422	5457	103	8,1E-03	6,5E-03	6,4E-03	1,2E-04	0,828	7081	79	6,7E-03	7,7E-03	7,8E-03	1,2E-04	0,828	6948	69
16	4,6E-03	5,0E-03	4,9E-03	8,1E-05	0,423	5249	107	4,6E-03	4,9E-03	4,5E-03	7,6E-05	0,421	5574	106	6,3E-03	6,4E-03	6,4E-03	1,1E-04	0,827	7788	78	7,1E-03	6,5E-03	7,0E-03	1,1E-04	0,826	7447	72
20	4,6E-03	4,8E-03	4,7E-03	7,8E-05	0,420	5357	122	4,5E-03	4,5E-03	4,7E-03	7,4E-05	0,422	5719	113	5,6E-03	5,8E-03	6,0E-03	9,6E-05	0,826	8567	86	6,8E-03	6,2E-03	6,2E-03	1,0E-04	0,827	7991	73
27	5,0E-03	4,0E-03	4,2E-03	7,3E-05	0,422	5742	122	4,4E-03	4,5E-03	4,3E-03	7,1E-05	0,422	5959	115	5,8E-03	5,7E-03	5,2E-03	9,3E-05	0,826	8892	87	5,7E-03	5,6E-03	5,7E-03	9,1E-05	0,826	9036	79
55	4,2E-03	5,0E-03	4,1E-03	7,4E-05	0,421	5703	135	4,6E-03	4,0E-03	4,0E-03	6,8E-05	0,422	6170	116	5,3E-03	5,8E-03	5,1E-03	9,0E-05	0,827	9184	101	5,5E-03	5,3E-03	6,4E-03	9,3E-05	0,827	8904	83
85	4,1E-03	3,7E-03	3,3E-03	6,2E-05	0,386	6260	128	5,3E-03	3,5E-03	3,2E-03	6,4E-05	0,383	5949	128	4,6E-03	4,4E-03	5,1E-03	7,8E-05	0,765	9766	84	5,2E-03	4,7E-03	5,6E-03	8,3E-05	0,764	9205	83
119	5,9E-03	3,7E-03	4,4E-03	7,8E-05	0,421	5429	138	5,4E-03	5,8E-03	3,9E-03	8,1E-05	0,422	5216	114	6,6E-03	5,7E-03	4,9E-03	9,6E-05	0,825	8613	105	6,3E-03	8,1E-03	4,7E-03	1,0E-04	0,826	8062	85
157	3,7E-03	3,7E-03	5,5E-03	7,2E-05	0,420	5848	129	4,2E-03	4,3E-03	4,5E-03	7,0E-05	0,421	6015	116	6,0E-03	4,6E-03	6,1E-03	9,3E-05	0,825	8906	89	6,8E-03	5,2E-03	5,3E-03	9,3E-05	0,826	8865	86
184								3,5E-03	4,0E-03	4,5E-03	6,4E-05	0,423	6582	115								6,4E-03	5,1E-03	5,8E-03	9,3E-05	0,826	8901	83

Annexe 32 – Résultats d'essais à 35°C et 43% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz													
	4,6 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,4E-02	3,1E-02	3,9E-02	5,2E-04	0,426	819	26	3,3E-02	2,4E-02	5,3E-02	6,0E-04	0,425	713	24
7	1,8E-02	2,1E-02	2,6E-02	3,6E-04	0,425	1184	28	2,7E-02	2,9E-02	2,4E-02	4,3E-04	0,426	987	24
10	2,0E-02	1,6E-02	1,7E-02	3,0E-04	0,426	1434	29	2,7E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,426	1124	25
13	2,0E-02	1,7E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,425	1441	29	2,2E-02	2,5E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,426	1176	25
16	1,7E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,426	1292	25	1,5E-02	2,2E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,426	1222	26
20	1,4E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,426	1641	31	1,8E-02	1,5E-02	2,8E-02	3,3E-04	0,427	1301	27
27	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,426	1969	33	1,6E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,426	1413	28
55	1,1E-02	1,3E-02	9,2E-03	1,9E-04	0,425	2296	36	1,4E-02	1,7E-02	9,9E-03	2,2E-04	0,426	1951	35
85	9,6E-03	7,6E-03	1,3E-02	1,7E-04	0,425	2569	40	1,4E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,425	1782	32
119	8,5E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,425	2625	40	1,1E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,425	1943	33
157	9,6E-03	1,0E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,425	2386	37	1,4E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,426	1963	33
184	1,4E-02	9,6E-03	7,6E-03	1,8E-04	0,425	2413	36	1,5E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,426	1816	31

Date	9 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	3,6E-02	4,4E-02	5,3E-02	7,4E-04	0,833	1125	23	4,6E-02	4,0E-02	7,5E-02	8,7E-04	0,833	957	22
7	2,9E-02	3,4E-02	4,0E-02	5,7E-04	0,832	1453	25	4,3E-02	4,5E-02	4,1E-02	7,0E-04	0,833	1193	22
10	3,3E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,833	1687	25	4,4E-02	4,0E-02	3,3E-02	6,2E-04	0,832	1333	22
13	3,1E-02	2,9E-02	2,7E-02	4,8E-04	0,832	1719	25	3,6E-02	4,0E-02	3,5E-02	6,0E-04	0,833	1396	22
16	2,6E-02	3,4E-02	3,0E-02	5,0E-04	0,833	1661	23	2,8E-02	3,5E-02	4,4E-02	5,7E-04	0,834	1455	23
20	2,4E-02	2,6E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,832	1920	26	3,4E-02	2,6E-02	4,2E-02	5,5E-04	0,833	1521	23
27	2,6E-02	1,9E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,832	2212	27	2,9E-02	3,2E-02	3,2E-02	5,0E-04	0,832	1662	24
55	1,9E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,832	2473	29	2,4E-02	2,9E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,833	2172	28
85	1,7E-02	1,5E-02	2,1E-02	2,9E-04	0,831	2820	31	2,2E-02	2,5E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,831	2124	27
119	1,6E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,832	2977	32	2,0E-02	2,5E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,832	2271	28
157	1,7E-02	1,8E-02	2,1E-02	3,1E-04	0,832	2677	30	2,3E-02	2,3E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,832	2230	27
184	2,4E-02	1,7E-02	1,4E-02	3,1E-04	0,832	2687	29	2,6E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,832	2074	26

Date	Moules à 1Hz													
	4,6 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,4E-02	1,7E-02	2,3E-02	3,0E-04	0,419	1390	33	2,0E-02	1,5E-02	3,3E-02	3,7E-04	0,418	1134	31
7	1,0E-02	1,1E-02	1,6E-02	2,1E-04	0,419	2025	38	1,7E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,417	1563	33
10	1,2E-02	8,7E-03	9,5E-03	1,7E-04	0,417	2513	41	1,7E-02	1,4E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,417	1819	34
13	1,1E-02	9,7E-03	8,8E-03	1,6E-04	0,418	2542	40	1,3E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,419	1930	34
16	8,2E-03	1,5E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,415	2177	32	8,8E-03	1,3E-02	1,7E-02	2,1E-04	0,417	2028	35
20	7,4E-03	8,2E-03	9,3E-03	1,4E-04	0,416	3001	44	9,7E-03	8,8E-03	1,7E-02	1,9E-04	0,418	2205	37
27	8,6E-03	5,5E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,418	3610	46	8,9E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,7E-04	0,419	2431	37
55	5,4E-03	7,1E-03	4,5E-03	9,4E-05	0,419	4465	53	6,7E-03	9,7E-03	5,2E-03	1,2E-04	0,418	3613	50
85	4,9E-03	4,2E-03	6,5E-03	8,7E-05	0,419	4826	63	6,5E-03	8,1E-03	8,3E-03	1,2E-04	0,419	3393	44
119	4,3E-03	5,1E-03	4,9E-03	7,9E-05	0,419	5270	63	5,5E-03	8,8E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,418	3694	48
157	5,0E-03	5,3E-03	7,0E-03	9,6E-05	0,419	4355	52	7,1E-03	7,1E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,418	3671	46
184	8,2E-03	4,8E-03	4,0E-03	9,4E-05	0,416	4406	52	8,3E-03	7,6E-03	7,8E-03	1,3E-04	0,415	3250	42

Date	9 kN													
	Moule 1							Moule 2						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,3E-02	2,6E-02	3,3E-02	4,6E-04	0,819	1797	29	3,0E-02	2,8E-02	4,7E-02	5,6E-04	0,820	1460	28
7	1,8E-02	2,1E-02	2,5E-02	3,5E-04	0,818	2319	32	2,8E-02	2,9E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,818	1796	29
10	2,1E-02	1,6E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,818	2669	33	3,0E-02	2,5E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,820	1997	29
13	1,9E-02	1,8E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,821	2733	32	2,4E-02	2,6E-02	2,3E-02	3,9E-04	0,816	2097	29
16	1,5E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,817	2579	29	1,9E-02	2,2E-02	2,9E-02	3,8E-04	0,821	2177	29
20	1,5E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,819	3103	34	2,0E-02	1,7E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,818	2328	30
27	1,7E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,818	3619	34	1,8E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,2E-04	0,819	2592	30
55	1,0E-02	1,3E-02	9,1E-03	1,8E-04	0,814	4576	39	1,3E-02	1,8E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,819	3542	36
85	1,0E-02	8,3E-03	1,3E-02	1,7E-04	0,815	4764	41	1,2E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,818	3532	34
119	9,3E-03	9,8E-03	9,3E-03	1,6E-04	0,818	5179	42	1,1E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,818	3762	35
157	1,0E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,819	4384	37	1,5E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,820	3609	34
184	1,5E-02	1,0E-02	8,2E-03	1,9E-04	0,814	4306	36	1,7E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,814	3258	32

Date	Moules à 3Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,1E-03	1,0E-02	1,5E-02	1,9E-04	0,338	1787	39	1,3E-02	1,0E-02	2,1E-02	2,3E-04	0,338	1441	36	1,5E-02	1,7E-02	2,2E-02	3,0E-04	0,664	2236	34	1,9E-02	1,8E-02	3,0E-02	3,6E-04	0,661	1812	31
7	6,2E-03	7,0E-03	9,8E-03	1,3E-04	0,338	2647	48	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,339	1975	40	1,1E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,661	2888	38	1,8E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,664	2213	33
10	7,5E-03	5,4E-03	6,0E-03	1,1E-04	0,338	3206	53	1,2E-02	9,1E-03	6,9E-03	1,5E-04	0,338	2283	42	1,4E-02	1,0E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,662	3291	39	2,1E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,662	2458	34
13	6,8E-03	6,0E-03	5,4E-03	1,0E-04	0,338	3325	52	8,5E-03	9,8E-03	7,3E-03	1,4E-04	0,338	2462	42	1,3E-02	1,2E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,662	3410	39	1,6E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,671	2576	33
16	5,0E-03	1,0E-02	7,6E-03	1,3E-04	0,351	2784	38	5,8E-03	7,9E-03	1,1E-02	1,3E-04	0,338	2546	43	9,6E-03	1,5E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,669	3128	33	1,2E-02	1,4E-02	2,0E-02	2,5E-04	0,662	2637	33
20	4,8E-03	5,2E-03	5,9E-03	8,8E-05	0,344	3908	58	6,1E-03	5,7E-03	1,1E-02	1,2E-04	0,338	2777	47	1,0E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,661	3820	41	1,3E-02	1,1E-02	1,9E-02	2,3E-04	0,664	2842	35
27	5,9E-03	3,3E-03	4,2E-03	7,5E-05	0,338	4534	59	5,5E-03	7,1E-03	7,6E-03	1,1E-04	0,339	3122	45	1,2E-02	7,1E-03	8,2E-03	1,5E-04	0,662	4411	41	1,2E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,662	3154	35
55	3,3E-03	4,4E-03	3,3E-03	6,1E-05	0,338	5557	71	3,9E-03	6,3E-03	3,8E-03	7,6E-05	0,339	4481	66	6,7E-03	8,5E-03	6,0E-03	1,2E-04	0,657	5589	49	8,3E-03	1,2E-02	7,6E-03	1,5E-04	0,661	4325	42
85	3,1E-03	3,2E-03	4,0E-03	5,7E-05	0,337	5874	85	3,9E-03	5,0E-03	5,1E-03	7,5E-05	0,337	4502	56	6,6E-03	5,5E-03	8,5E-03	1,1E-04	0,673	5874	50	7,8E-03	1,0E-02	1,0E-02	1,5E-04	0,658	4330	40
119	3,1E-03	3,2E-03	3,2E-03	5,3E-05	0,338	6393	86	3,3E-03	5,6E-03	4,1E-03	7,0E-05	0,338	4829	62	6,1E-03	6,6E-03	6,1E-03	1,0E-04	0,667	6371	52	7,3E-03	1,1E-02	8,4E-03	1,4E-04	0,663	4618	42
157	3,0E-03	3,5E-03	5,3E-03	6,5E-05	0,338	5181	66	4,4E-03	4,3E-03	4,4E-03	7,1E-05	0,338	4793	59	6,4E-03	7,2E-03	9,3E-03	1,3E-04	0,662	5194	44	9,8E-03	8,4E-03	9,8E-03	1,5E-04	0,662	4392	40
184	5,4E-03	3,2E-03	3,2E-03	6,6E-05	0,343	5199	69	5,5E-03	4,9E-03	5,1E-03	8,3E-05	0,355	4294	52	1,1E-02	7,0E-03	5,6E-03	1,3E-04	0,695	5357	43	1,2E-02	9,4E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,697	4088	36

Date	Moules à 6Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,2E-03	8,9E-03	1,3E-02	1,7E-04	0,382	2298	47	1,1E-02	8,9E-03	1,8E-02	2,0E-04	0,382	1886	43	1,4E-02	1,5E-02	1,9E-02	2,7E-04	0,749	2823	39	1,7E-02	1,7E-02	2,7E-02	3,3E-04	0,748	2288	36
7	5,8E-03	6,3E-03	8,7E-03	1,2E-04	0,381	3308	61	9,1E-03	9,1E-03	9,5E-03	1,5E-04	0,382	2559	49	1,0E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,751	3649	46	1,6E-02	1,6E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,751	2798	39
10	6,6E-03	4,9E-03	5,4E-03	9,4E-05	0,382	4053	67	1,1E-02	7,8E-03	6,1E-03	1,3E-04	0,382	2911	52	1,2E-02	9,6E-03	1,1E-02	1,8E-04	0,750	4113	48	1,9E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,750	3009	40
13	6,1E-03	5,6E-03	5,1E-03	9,3E-05	0,381	4099	66	7,7E-03	8,7E-03	6,5E-03	1,2E-04	0,381	3093	52	1,1E-02	1,1E-02	9,9E-03	1,8E-04	0,748	4139	47	1,5E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,752	3171	39
16	4,6E-03	9,6E-03	6,9E-03	1,2E-04	0,384	3284	46	5,4E-03	6,9E-03	9,7E-03	1,2E-04	0,382	3234	52	8,8E-03	1,5E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,751	3769	39	1,2E-02	1,3E-02	1,8E-02	2,3E-04	0,747	3194	39
20	4,4E-03	4,6E-03	5,2E-03	7,9E-05	0,382	4858	74	5,4E-03	5,1E-03	9,6E-03	1,1E-04	0,382	3515	58	9,4E-03	9,4E-03	9,9E-03	1,6E-04	0,750	4700	49	1,2E-02	1,1E-02	1,7E-02	2,1E-04	0,750	3494	41
27	5,4E-03	3,8E-03	4,2E-03	7,5E-05	0,382	5113	73	5,2E-03	6,4E-03	6,8E-03	9,9E-05	0,381	3832	55	1,1E-02	6,7E-03	7,5E-03	1,4E-04	0,749	5338	50	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,750	3890	41
55	3,6E-03	4,1E-03	4,2E-03	6,6E-05	0,382	5762	88	4,1E-03	5,8E-03	5,1E-03	8,1E-05	0,381	4722	83	4,2E-03	5,4E-03	3,6E-03	7,3E-05	0,412	5658	52	7,5E-03	1,2E-02	7,3E-03	1,4E-04	0,751	5263	51
85	3,7E-03	4,1E-03	3,7E-03	6,4E-05	0,371	5838	103	4,0E-03	4,5E-03	4,6E-03	7,0E-05	0,371	5295	70	6,2E-03	5,1E-03	7,9E-03	1,1E-04	0,733	6908	60	7,1E-03	9,5E-03	9,5E-03	1,4E-04	0,730	5199	47
119	3,9E-03	3,6E-03	3,8E-03	6,3E-05	0,383	6072	105	3,9E-03	5,2E-03	4,1E-03	7,1E-05	0,382	5378	78	5,9E-03	6,3E-03	5,8E-03	1,0E-04	0,752	7527	64	6,8E-03	1,1E-02	7,8E-03	1,4E-04	0,750	5544	51
157	3,6E-03	3,7E-03	5,5E-03	7,2E-05	0,382	5334	81	4,2E-03	4,2E-03	4,2E-03	6,7E-05	0,382	5656	73	6,3E-03	6,7E-03	9,3E-03	1,2E-04	0,750	6048	53	9,2E-03	7,7E-03	9,3E-03	1,4E-04	0,749	5305	47
184	4,9E-03	3,6E-03	3,8E-03	6,9E-05	0,383	5570	86	5,1E-03	4,4E-03	4,6E-03	7,6E-05	0,384	5067	63	1,0E-02	6,7E-03	5,3E-03	1,2E-04	0,752	6020	51	1,1E-02	8,8E-03	9,8E-03	1,6E-04	0,752	4720	43

Date	Moules à 10Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 1							Moule 2							Moule 1							Moule 2					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,0E-03	8,4E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,420	2657	56	9,9E-03	8,5E-03	1,6E-02	1,9E-04	0,422	2270	52	1,4E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,825	3228	46	1,7E-02	1,7E-02	2,5E-02	3,2E-04	0,827	2599	42
7	5,8E-03	5,8E-03	8,1E-03	1,1E-04	0,422	3874	74	8,4E-03	8,3E-03	9,0E-03	1,4E-04	0,423	3063	59	1,0E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,0E-04	0,827	4103	55	1,6E-02	1,6E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,826	3116	46
10	6,3E-03	5,3E-03	5,3E-03	9,4E-05	0,421	4495	81	1,0E-02	7,2E-03	5,9E-03	1,2E-04	0,422	3393	63	1,2E-02	9,0E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,826	4745	57	1,9E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,825	3371	46
13	5,7E-03	5,3E-03	5,1E-03	8,9E-05	0,421	4730	80	7,4E-03	8,2E-03	5,9E-03	1,2E-04	0,422	3653	63	1,1E-02	1,1E-02	9,6E-03	1,8E-04	0,827	4653	55	1,5E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,828	3485	46
16	5,0E-03	9,6E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,422	3584	55	5,2E-03	6,5E-03	9,1E-03	1,1E-04	0,421	3783	63	8,5E-03	1,5E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,823	4140	46	1,2E-02	1,3E-02	1,8E-02	2,3E-04	0,826	3557	46
20	4,7E-03	5,1E-03	5,3E-03	8,4E-05	0,421	5034	88	5,4E-03	5,2E-03	9,1E-03	1,1E-04	0,421	3971	69	9,4E-03	9,0E-03	9,7E-03	1,6E-04	0,828	5296	58	1,2E-02	1,0E-02	1,7E-02	2,1E-04	0,826	3900	48
27	5,5E-03	4,5E-03	4,5E-03	8,1E-05	0,422	5239	87	5,1E-03	6,0E-03	6,5E-03	9,4E-05	0,422	4487	67	1,2E-02	6,9E-03	7,5E-03	1,4E-04	0,824	5729	58	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,827	4287	48
55	4,0E-03	4,2E-03	5,0E-03	7,4E-05	0,422	5746	101	4,6E-03	5,6E-03	5,9E-03	8,6E-05	0,422	4895	97	5,5E-03	7,3E-03	5,6E-03	1,0E-04	0,670	6547	68	7,2E-03	1,2E-02	7,2E-03	1,4E-04	0,824	5772	60
85	4,0E-03	4,5E-03	3,8E-03	6,8E-05	0,384	5636	112	4,1E-03	4,2E-03	4,4E-03	6,8E-05	0,381	5636	82	6,1E-03	5,1E-03	7,8E-03	1,0E-04	0,758	7224	67	6,9E-03	9,1E-03	9,1E-03	1,4E-04	0,762	5626	53
119	4,8E-03	4,0E-03	4,6E-03	7,5E-05	0,421	5645	115	4,6E-03	5,1E-03	4,5E-03	7,7E-05	0,423	5507	91	5,9E-03	6,3E-03	5,6E-03	9,9E-05	0,827	8386	76	6,6E-03	1,0E-02	7,5E-03	1,3E-04	0,826	6264	60
157	4,4E-03	4,2E-03	6,0E-03	8,2E-05	0,421	5160	93	4,6E-03	4,6E-03	4,2E-03	7,2E-05	0,421	5843	86	6,3E-03	6,5E-03	9,4E-03	1,2E-04	0,826	6717	63	9,4E-03	7,6E-03	9,7E-03	1,4E-04	0,827	5753	55
184	5,2E-03	4,3E-03	4,7E-03	7,9E-05	0,420	5328	98	4,9E-03	5,0E-03	4,6E-03	7,8E-05	0,422	5435	75	1,1E-02	6,7E-03	5,6E-03	1,3E-04	0,825	6490	60	1,1E-02	8,6E-03	9,9E-03	1,6E-04	0,825	5187	50

Annexe 33 – Résultats d'essais à 20°C et 43% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	3,8E-02	1,2E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,426	1042	28	1,7E-02	2,2E-02	2,7E-02	3,6E-04	0,426	1175	30	5,0E-02	2,3E-02	3,8E-02	6,0E-04	0,833	1397	26	2,7E-02	3,3E-02	3,7E-02	5,3E-04	0,833	1576	27
7	9,9E-03	1,8E-02	3,3E-02	3,3E-04	0,426	1303	29	2,5E-02	1,2E-02	2,5E-02	3,4E-04	0,426	1271	25	1,7E-02	2,7E-02	4,3E-02	4,7E-04	0,833	1779	26	3,3E-02	2,3E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,833	1749	24
10	1,9E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,426	1481	27	2,3E-02	1,6E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,426	1296	25	3,0E-02	2,7E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,833	1881	24	3,2E-02	2,5E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,833	1798	23
13	1,7E-02	3,6E-02	1,0E-02	3,4E-04	0,427	1244	24	1,4E-02	1,6E-02	7,8E-03	2,1E-04	0,426	2051	32	2,6E-02	4,8E-02	2,0E-02	5,0E-04	0,833	1652	22	2,1E-02	2,3E-02	1,4E-02	3,2E-04	0,833	2610	28
16	2,5E-02	2,4E-02	1,1E-02	3,2E-04	0,427	1321	23	1,2E-02	7,9E-03	1,2E-02	1,7E-04	0,426	2456	35	1,9E-02	2,4E-02	3,9E-02	4,4E-04	0,834	1898	22	2,0E-02	1,4E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,833	2931	29
20	1,3E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,427	1950	30	1,7E-02	7,2E-03	1,4E-02	2,1E-04	0,426	2052	31	2,1E-02	2,6E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,833	2278	24	2,5E-02	1,4E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,834	2552	27
27	1,3E-02	1,4E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,426	2065	30	1,1E-02	1,2E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,426	2205	32	2,1E-02	2,4E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,834	2477	25	1,7E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,833	2807	28
55	2,2E-02	9,5E-03	6,8E-03	2,1E-04	0,426	2047	29	1,6E-02	8,1E-03	7,1E-03	1,7E-04	0,426	2535	35	2,8E-02	1,6E-02	1,4E-02	3,1E-04	0,832	2652	25	2,3E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,832	3027	29
85	7,8E-03	1,1E-02	1,8E-02	2,0E-04	0,426	2137	30	9,5E-03	8,7E-03	9,9E-03	1,5E-04	0,425	2773	36	1,2E-02	2,4E-02	3,2E-02	3,6E-04	0,831	2295	23	1,5E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,832	3247	30
119	5,0E-03	2,0E-02	5,7E-02	4,4E-04	0,426	958	18	7,7E-03	1,3E-02	9,1E-03	1,7E-04	0,426	2572	37	1,1E-02	3,4E-02	5,7E-02	5,5E-04	0,832	1518	18	1,4E-02	2,0E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,833	2999	30
157	2,8E-02	7,6E-03	1,1E-02	2,6E-04	0,425	1657	24	7,9E-03	1,1E-02	9,3E-03	1,6E-04	0,425	2665	36	4,1E-02	1,3E-02	1,8E-02	4,0E-04	0,832	2102	21	1,5E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,832	3015	29
184	5,3E-02	7,4E-03	9,4E-03	3,8E-04	0,426	1120	17	3,3E-02	9,3E-03	8,3E-03	2,9E-04	0,425	1465	23	9,0E-02	1,3E-02	1,7E-02	6,6E-04	0,833	1266	15	4,0E-02	1,8E-02	1,4E-02	4,2E-04	0,832	2003	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,2E-02	6,2E-03	1,4E-02	2,3E-04	0,420	1837	38	9,0E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,8E-04	0,421	2296	41	3,0E-02	1,3E-02	2,2E-02	3,5E-04	0,823	2319	32	1,7E-02	1,8E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,823	2774	34
7	5,0E-03	9,9E-03	2,0E-02	1,9E-04	0,420	2227	38	1,5E-02	6,1E-03	1,6E-02	2,1E-04	0,420	2038	30	9,9E-03	1,6E-02	2,7E-02	2,8E-04	0,822	2910	33	2,1E-02	1,3E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,822	2791	29
10	1,2E-02	9,2E-03	9,7E-03	1,6E-04	0,419	2570	35	1,5E-02	8,7E-03	1,4E-02	2,0E-04	0,420	2073	29	2,0E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,822	3020	29	2,0E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,823	2859	28
13	9,8E-03	2,6E-02	5,2E-03	2,2E-04	0,420	1886	28	8,0E-03	9,5E-03	4,3E-03	1,2E-04	0,418	3520	41	1,7E-02	3,4E-02	1,1E-02	3,3E-04	0,822	2472	25	1,3E-02	1,4E-02	7,6E-03	1,9E-04	0,819	4361	35
16	1,8E-02	1,7E-02	8,5E-03	2,3E-04	0,419	1804	27	6,8E-03	4,0E-03	5,8E-03	9,0E-05	0,420	4641	49	1,2E-02	1,4E-02	2,7E-02	2,9E-04	0,820	2875	26	1,2E-02	7,4E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,820	4978	36
20	6,7E-03	8,4E-03	7,4E-03	1,2E-04	0,417	3438	38	1,1E-02	4,2E-03	7,4E-03	1,3E-04	0,417	3328	38	1,2E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,818	3532	27	1,7E-02	7,5E-03	1,2E-02	2,0E-04	0,819	4081	32
27	7,6E-03	8,5E-03	5,5E-03	1,2E-04	0,417	3595	36	5,3E-03	6,1E-03	7,0E-03	1,0E-04	0,419	4181	41	1,3E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,818	3916	28	9,8E-03	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,817	4840	34
55	1,6E-02	5,2E-03	3,6E-03	1,3E-04	0,420	3169	34	9,1E-03	4,1E-03	3,5E-03	9,1E-05	0,419	4581	48	2,0E-02	9,7E-03	8,1E-03	2,0E-04	0,819	4009	28	1,4E-02	8,9E-03	6,7E-03	1,6E-04	0,820	5123	36
85	4,0E-03	5,6E-03	1,2E-02	1,2E-04	0,417	3531	36	4,4E-03	4,0E-03	5,0E-03	7,4E-05	0,417	5645	51	6,6E-03	1,5E-02	2,3E-02	2,4E-04	0,819	3368	25	8,0E-03	8,2E-03	9,7E-03	1,4E-04	0,818	5768	37
119	5,6E-03	1,2E-02	4,6E-02	3,4E-04	0,417	1210	18	3,8E-03	7,8E-03	4,3E-03	8,7E-05	0,417	4816	53	1,0E-02	2,4E-02	4,4E-02	4,2E-04	0,819	1931	19	7,8E-03	1,3E-02	9,3E-03	1,6E-04	0,817	5020	36
157	2,1E-02	3,8E-03	6,1E-03	1,7E-04	0,419	2468	25	3,9E-03	5,9E-03	4,6E-03	8,3E-05	0,420	5049	48	3,1E-02	7,4E-03	1,1E-02	2,7E-04	0,821	3066	22	8,7E-03	1,1E-02	8,9E-03	1,6E-04	0,817	5024	34
184	4,6E-02	3,4E-03	5,7E-03	3,0E-04	0,416	1382	16	2,5E-02	5,8E-03	4,1E-03	2,0E-04	0,415	2057	24	7,4E-02	9,5E-03	1,1E-02	5,2E-04	0,817	1573	14	3,0E-02	1,2E-02	8,0E-03	2,9E-04	0,817	2825	23

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,4E-02	4,0E-03	8,5E-03	1,4E-04	0,338	2402	47	6,0E-03	6,9E-03	8,4E-03	1,2E-04	0,368	3151	54	1,9E-02	8,4E-03	1,4E-02	2,2E-04	0,663	2960	39	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,663	3561	42
7	3,6E-03	6,2E-03	1,3E-02	1,2E-04	0,339	2779	49	1,0E-02	3,9E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,339	2494	37	6,2E-03	1,0E-02	1,7E-02	1,8E-04	0,663	3642	41	1,3E-02	8,5E-03	1,3E-02	1,9E-04	0,662	3425	35
10	7,6E-03	5,7E-03	6,0E-03	1,0E-04	0,339	3260	44	9,8E-03	5,4E-03	9,2E-03	1,3E-04	0,338	2546	35	1,3E-02	1,0E-02	9,4E-03	1,8E-04	0,662	3749	35	1,3E-02	9,4E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,663	3529	34
13	6,3E-03	1,8E-02	3,5E-03	1,5E-04	0,339	2239	33	5,2E-03	6,4E-03	3,4E-03	8,2E-05	0,338	4103	52	1,1E-02	2,3E-02	7,5E-03	2,3E-04	0,663	2936	29	8,3E-03	9,7E-03	4,7E-03	1,2E-04	0,662	5341	42
16	1,3E-02	1,2E-02	6,7E-03	1,7E-04	0,339	2008	31	4,4E-03	3,0E-03	3,6E-03	6,0E-05	0,338	5617	65	7,8E-03	9,4E-03	1,9E-02	2,0E-04	0,662	3373	29	8,4E-03	4,7E-03	7,0E-03	1,1E-04	0,661	6036	44
20	4,3E-03	5,8E-03	5,0E-03	8,1E-05	0,341	4226	48	8,0E-03	3,6E-03	4,9E-03	9,0E-05	0,340	3780	46	8,2E-03	1,2E-02	9,5E-03	1,6E-04	0,668	4184	32	1,2E-02	4,9E-03	8,3E-03	1,4E-04	0,661	4828	37
27	5,1E-03	5,8E-03	3,7E-03	7,8E-05	0,341	4376	44	3,3E-03	3,7E-03	4,5E-03	6,3E-05	0,339	5392	51	8,7E-03	1,0E-02	7,6E-03	1,4E-04	0,664	4607	32	6,6E-03	6,7E-03	7,3E-03	1,1E-04	0,664	5906	41
55	1,1E-02	3,3E-03	2,9E-03	9,4E-05	0,338	3589	40	6,1E-03	2,6E-03	2,8E-03	6,3E-05	0,338	5381	62	1,5E-02	6,5E-03	5,4E-03	1,4E-04	0,662	4589	31	9,2E-03	6,0E-03	4,4E-03	1,1E-04	0,661	6163	44
85	2,8E-03	3,7E-03	8,9E-03	8,3E-05	0,337	4077	42	2,8E-03	2,6E-03	3,3E-03	4,8E-05	0,337	7074	68	4,4E-03	1,1E-02	1,7E-02	1,7E-04	0,659	3819	27	5,4E-03	5,5E-03	6,6E-03	9,5E-05	0,659	6937	46
119	5,1E-03	8,3E-03	3,6E-02	2,6E-04	0,338	1280	19	2,9E-03	5,3E-03	2,8E-03	6,0E-05	0,339	5619	70	8,6E-03	1,8E-02	3,4E-02	3,2E-04	0,662	2038	21	5,2E-03	9,0E-03	6,2E-03	1,1E-04	0,679	6077	44
157	1,6E-02	2,8E-03	3,9E-03	1,2E-04	0,338	2754	28	2,6E-03	3,9E-03	3,0E-03	5,4E-05	0,338	6266	62	2,2E-02	4,8E-03	7,7E-03	1,9E-04	0,662	3475	24	6,0E-03	7,4E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,675	6018	41
184	3,7E-02	2,6E-03	4,9E-03	2,4E-04	0,350	1435	17	2,0E-02	4,2E-03	3,1E-03	1,6E-04	0,350	2236	26	5,9E-02	6,9E-03	7,8E-03	4,0E-04	0,677	1689	15	2,3E-02	9,1E-03	5,4E-03	2,2E-04	0,666	3084	25

Date	Moules à 6Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,2E-02	4,7E-03	7,6E-03	1,3E-04	0,389	2995	59	4,4E-03	4,9E-03	5,6E-03	8,1E-05	0,316	3876	68	1,7E-02	8,2E-03	1,3E-02	2,0E-04	0,751	3740	47	1,0E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,748	4314	52
7	4,6E-03	5,5E-03	1,1E-02	1,2E-04	0,383	3304	63	9,7E-03	5,0E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,386	2807	45	6,2E-03	9,9E-03	1,5E-02	1,7E-04	0,747	4398	50	1,3E-02	8,4E-03	1,3E-02	1,8E-04	0,748	4062	42
10	7,2E-03	5,3E-03	5,5E-03	9,7E-05	0,381	3946	56	9,4E-03	5,4E-03	9,1E-03	1,3E-04	0,388	2974	42	1,3E-02	9,6E-03	8,7E-03	1,7E-04	0,748	4461	43	1,2E-02	9,3E-03	1,2E-02	1,8E-04	0,759	4184	41
13	6,1E-03	1,8E-02	4,0E-03	1,5E-04	0,384	2538	40	4,9E-03	6,1E-03	4,5E-03	8,5E-05	0,382	4503	64	1,1E-02	2,3E-02	7,2E-03	2,2E-04	0,748	3415	34	7,9E-03	9,2E-03	5,5E-03	1,2E-04	0,749	6074	51
16	1,3E-02	1,2E-02	9,0E-03	1,8E-04	0,381	2080	36	4,3E-03	4,1E-03	3,6E-03	6,6E-05	0,381	5800	81	7,6E-03	9,0E-03	1,9E-02	1,9E-04	0,748	3899	35	8,2E-03	5,0E-03	6,7E-03	1,1E-04	0,749	6879	54
20	3,9E-03	5,4E-03	4,5E-03	7,4E-05	0,383	5154	60	7,9E-03	4,5E-03	4,5E-03	9,2E-05	0,382	4143	57	7,7E-03	1,2E-02	8,9E-03	1,5E-04	0,750	4942	38	1,2E-02	5,4E-03	7,8E-03	1,4E-04	0,748	5468	45
27	4,6E-03	5,4E-03	3,4E-03	7,2E-05	0,382	5331	54	3,4E-03	3,5E-03	4,4E-03	6,1E-05	0,381	6211	64	8,2E-03	1,0E-02	7,2E-03	1,4E-04	0,749	5445	38	6,4E-03	6,3E-03	6,8E-03	1,1E-04	0,750	7052	50
55	1,2E-02	4,0E-03	3,8E-03	1,0E-04	0,383	3669	49	5,7E-03	3,5E-03	3,5E-03	6,9E-05	0,382	5511	78	1,5E-02	6,4E-03	5,3E-03	1,4E-04	0,749	5183	37	8,6E-03	6,0E-03	4,5E-03	1,0E-04	0,748	7152	55
85	3,3E-03	3,5E-03	8,6E-03	8,3E-05	0,374	4523	51	2,9E-03	2,9E-03	3,2E-03	4,9E-05	0,373	7611	83	5,3E-03	1,0E-02	1,7E-02	1,7E-04	0,728	4225	32	5,3E-03	5,3E-03	6,4E-03	9,3E-05	0,726	7825	55
119	6,3E-03	8,1E-03	3,8E-02	2,8E-04	0,382	1362	22	3,7E-03	5,1E-03	3,2E-03	6,6E-05	0,383	5820	86	1,0E-02	1,8E-02	3,5E-02	3,4E-04	0,749	2199	25	4,9E-03	8,6E-03	6,0E-03	1,1E-04	0,751	7034	54
157	1,6E-02	3,0E-03	3,9E-03	1,3E-04	0,381	3009	33	3,2E-03	3,8E-03	3,2E-03	5,9E-05	0,381	6496	76	2,2E-02	4,3E-03	7,6E-03	1,9E-04	0,749	4002	29	5,8E-03	7,1E-03	6,0E-03	1,1E-04	0,750	6880	49
184	3,9E-02	2,9E-03	5,3E-03	2,6E-04	0,383	1475	19	2,0E-02	4,2E-03	3,5E-03	1,6E-04	0,383	2364	30	6,1E-02	7,4E-03	8,3E-03	4,2E-04	0,751	1787	17	2,4E-02	9,2E-03	5,2E-03	2,2E-04	0,749	3395	29

Date	Moules à 10Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,0E-02	5,1E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,422	3521	71	5,2E-03	5,5E-03	6,0E-03	9,2E-05	0,422	4609	82	1,5E-02	7,7E-03	1,2E-02	1,892E-04	0,826	4366	56	1,0E-02	9,6E-03	1,0E-02	1,6E-04	0,827	5181	61
7	5,3E-03	5,5E-03	1,1E-02	1,1E-04	0,422	3672	77	9,2E-03	5,6E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,422	3110	54	6,7E-03	9,5E-03	1,4E-02	1,631E-04	0,826	5060	61	1,2E-02	8,1E-03	1,2E-02	1,8E-04	0,827	4699	50
10	6,8E-03	5,0E-03	5,2E-03	9,1E-05	0,422	4620	68	8,9E-03	4,9E-03	8,6E-03	1,2E-04	0,423	3452	51	1,3E-02	9,4E-03	8,7E-03	1,680E-04	0,826	4917	51	1,2E-02	8,9E-03	1,2E-02	1,8E-04	0,827	4720	49
13	5,9E-03	1,8E-02	4,3E-03	1,5E-04	0,422	2780	48	5,0E-03	6,1E-03	5,4E-03	9,0E-05	0,422	4687	77	1,1E-02	8,9E-03	7,0E-03	1,437E-04	0,825	5742	41	8,1E-03	9,3E-03	8,7E-03	1,4E-04	0,826	5885	61
16	1,4E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,421	2149	41	4,1E-03	4,7E-03	4,0E-03	7,0E-05	0,421	5996	95	7,4E-03	9,2E-03	8,3E-03	1,341E-04	0,824	6147	41	8,7E-03	7,7E-03	6,6E-03	1,2E-04	0,826	6683	65
20	4,2E-03	5,5E-03	4,5E-03	7,6E-05	0,420	5545	72	8,2E-03	5,3E-03	4,7E-03	9,9E-05	0,422	4247	68	7,6E-03	1,2E-02	9,0E-03	1,533E-04	0,824	5378	45	1,2E-02	6,3E-03	7,8E-03	1,4E-04	0,826	5831	53
27	4,7E-03	5,3E-03	3,7E-03	7,4E-05	0,422	5683	65	3,8E-03	3,8E-03	4,6E-03	6,7E-05	0,423	6327	76	8,5E-03	8,0E-03	7,6E-03	1,296E-04	0,827	6377	46	6,6E-03	6,4E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,827	7726	60
55	1,2E-02	4,4E-03	4,5E-03	1,1E-04	0,422	3727	59	5,9E-03	4,0E-03	4,2E-03	7,7E-05	0,423	5486	91	5,8E-03	6,4E-03	5,3E-03	9,392E-05	0,826	8790	44	8,6E-03	6,1E-03	5,4E-03	1,1E-04	0,827	7641	66
85	3,7E-03	3,4E-03	8,1E-03	8,2E-05	0,387	4722	60	3,1E-03	3,1E-03	3,3E-03	5,2E-05	0,382	7348	94	5,6E-03	9,8E-03	1,6E-02	1,7E-04	0,756	4533	36	5,5E-03	5,6E-03	6,6E-03	9,7E-05	0,767	7899	61
119	7,5E-03	8,6E-03	4,1E-02	3,1E-04	0,421	1378	26	4,3E-03	5,3E-03	3,9E-03	7,3E-05	0,421	5734	99	1,2E-02	2,0E-02	3,8E-02	3,8E-04	0,825	2190	30	5,4E-03	8,9E-03	6,0E-03	1,1E-04	0,827	7469	64
157	1,7E-02	3,6E-03	4,1E-03	1,4E-04	0,421	3093	41	3,9E-03	4,1E-03	3,6E-03	6,7E-05	0,422	6325	88	2,3E-02	4,4E-03	8,3E-03	1,9E-04	0,826	4281	36	6,0E-03	7,5E-03	6,3E-03	1,1E-04	0,826	7236	58
184	4,3E-02	3,9E-03	6,4E-03	2,9E-04	0,421	1452	24	2,2E-02	4,4E-03	4,0E-03	1,7E-04	0,421	2422	37	6,7E-02	7,8E-03	8,9E-03	4,5E-04	0,826	1817	21	2,5E-02	1,0E-02	5,7E-03	2,4E-04	0,826	3505	35

Annexe 34 – Résultats d'essais à 20°C et 43% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,8E-02	3,5E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,426	898	27	2,1E-02	3,2E-02	3,2E-02	4,6E-04	0,426	919	28	3,9E-02	5,1E-02	3,8E-02	6,9E-04	0,832	1210	25	3,3E-02	4,6E-02	4,5E-02	6,8E-04	0,833	1229	25
7	1,8E-02	3,5E-02	1,9E-02	3,9E-04	0,426	1102	27	1,5E-02	2,2E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,426	1292	28	2,8E-02	4,4E-02	3,2E-02	5,6E-04	0,833	1493	24	2,7E-02	3,3E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,833	1621	25
10	1,8E-02	3,0E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,426	1207	26	2,0E-02	2,1E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,426	1397	27	2,9E-02	4,3E-02	2,8E-02	5,3E-04	0,832	1561	23	3,0E-02	3,2E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,833	1758	24
13	1,7E-02	2,6E-02	2,8E-02	3,8E-04	0,426	1116	24	1,9E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,426	1742	30	2,7E-02	4,0E-02	4,1E-02	5,8E-04	0,833	1433	21	2,7E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,9E-04	0,833	2152	26
16	2,8E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,426	1238	24	1,6E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,426	1720	29	4,5E-02	2,7E-02	3,2E-02	5,6E-04	0,833	1500	21	2,8E-02	2,0E-02	2,6E-02	4,0E-04	0,832	2078	24
20	4,3E-02	2,3E-02	1,6E-02	4,4E-04	0,426	963	21	1,8E-02	1,4E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,426	1585	26	4,1E-02	2,4E-02	2,2E-02	4,7E-04	0,833	1771	22	2,7E-02	2,4E-02	2,5E-02	4,1E-04	0,834	2014	23
27	3,1E-02	1,6E-02	1,1E-02	3,1E-04	0,426	1362	24	1,2E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,426	1947	31	1,8E-02	4,8E-02	2,6E-02	5,0E-04	0,833	1679	20	2,0E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,832	2368	26
55	2,7E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,7E-04	0,426	1575	26	1,4E-02	1,4E-02	9,3E-03	2,0E-04	0,426	2083	34	4,1E-02	2,0E-02	2,1E-02	4,4E-04	0,833	1887	22	2,2E-02	2,3E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,832	2419	28
85	1,4E-02	1,2E-02	1,8E-02	2,4E-04	0,425	1799	29	1,8E-02	8,2E-03	1,6E-02	2,3E-04	0,425	1880	31	2,2E-02	2,3E-02	2,7E-02	3,8E-04	0,832	2166	24	2,6E-02	1,5E-02	2,4E-02	3,5E-04	0,831	2341	27
119	1,2E-02	1,1E-02	2,4E-02	2,5E-04	0,426	1676	24	6,5E-03	1,1E-02	1,3E-02	1,7E-04	0,426	2573	36	1,8E-02	1,8E-02	3,4E-02	3,8E-04	0,833	2202	22	1,3E-02	1,8E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,833	3026	30
157	1,7E-02	1,3E-02	9,9E-03	2,2E-04	0,425	1976	29	1,9E-02	6,1E-03	1,5E-02	2,3E-04	0,425	1872	31	2,7E-02	2,1E-02	1,7E-02	3,5E-04	0,832	2348	24	2,8E-02	1,2E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,832	2361	27
184	1,8E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,426	1726	28	1,3E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,426	1873	30	2,9E-02	2,4E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,832	2069	23	2,3E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,832	2164	24

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,5E-02	2,0E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,420	1581	35	1,2E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,420	1661	36	2,3E-02	3,1E-02	2,3E-02	4,1E-04	0,822	1988	30	2,0E-02	2,6E-02	2,6E-02	4,0E-04	0,820	2065	31
7	9,7E-03	2,1E-02	1,1E-02	2,3E-04	0,419	1855	34	8,1E-03	1,3E-02	1,4E-02	1,9E-04	0,420	2189	36	1,7E-02	2,8E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,819	2388	30	1,7E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,818	2576	31
10	1,0E-02	1,8E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,418	2033	33	1,3E-02	1,3E-02	7,9E-03	1,8E-04	0,419	2304	33	1,8E-02	2,8E-02	1,7E-02	3,3E-04	0,821	2456	29	1,9E-02	2,0E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,819	2749	29
13	9,4E-03	1,6E-02	1,8E-02	2,3E-04	0,417	1786	28	1,2E-02	6,4E-03	6,4E-03	1,3E-04	0,418	3094	37	1,7E-02	2,6E-02	2,8E-02	3,8E-04	0,820	2150	25	1,7E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,819	3523	31
16	1,9E-02	8,5E-03	1,2E-02	2,2E-04	0,416	1916	28	9,4E-03	6,0E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,418	2959	34	3,2E-02	1,6E-02	2,2E-02	3,8E-04	0,817	2163	24	1,7E-02	1,1E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,818	3267	28
20	3,1E-02	1,5E-02	8,9E-03	3,0E-04	0,416	1401	24	1,1E-02	8,0E-03	1,0E-02	1,6E-04	0,417	2597	29	2,9E-02	1,6E-02	1,4E-02	3,2E-04	0,816	2577	24	1,8E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,818	3098	26
27	2,3E-02	7,7E-03	5,4E-03	1,9E-04	0,418	2156	28	6,0E-03	7,4E-03	7,6E-03	1,2E-04	0,417	3629	39	1,1E-02	3,4E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,820	2456	22	1,2E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,817	3949	32
55	1,9E-02	7,5E-03	5,6E-03	1,7E-04	0,418	2432	29	6,9E-03	7,5E-03	4,5E-03	1,0E-04	0,417	4037	47	2,9E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,819	2778	23	1,0E-02	1,3E-02	9,0E-03	1,8E-04	0,816	4638	35
85	7,2E-03	6,9E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,416	3032	35	1,0E-02	4,0E-03	9,4E-03	1,3E-04	0,418	3271	39	1,3E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,5E-04	0,821	3290	26	1,5E-02	8,7E-03	1,6E-02	2,2E-04	0,817	3715	31
119	6,2E-03	6,1E-03	1,7E-02	1,6E-04	0,417	2688	25	3,4E-03	6,0E-03	6,7E-03	8,8E-05	0,417	4750	48	9,2E-03	1,2E-02	2,6E-02	2,5E-04	0,820	3242	22	7,1E-03	1,1E-02	1,1E-02	1,6E-04	0,821	5115	36
157	1,0E-02	7,0E-03	4,8E-03	1,2E-04	0,418	3430	34	1,2E-02	3,6E-03	8,4E-03	1,4E-04	0,418	3058	38	1,8E-02	1,3E-02	9,5E-03	2,2E-04	0,818	3673	26	1,9E-02	6,8E-03	1,3E-02	2,2E-04	0,819	3731	31
184	1,1E-02	7,6E-03	7,7E-03	1,4E-04	0,415	2898	32	7,2E-03	9,0E-03	5,8E-03	1,3E-04	0,415	3291	36	1,9E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,6E-04	0,818	3160	26	1,4E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,818	3334	27

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	9,4E-03	1,3E-02	8,4E-03	1,6E-04	0,338	2066	42	7,5E-03	1,0E-02	1,1E-02	1,5E-04	0,339	2205	45	1,5E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,662	2506	35	1,4E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,662	2595	37
7	6,0E-03	1,4E-02	6,8E-03	1,4E-04	0,338	2379	42	5,1E-03	8,3E-03	8,7E-03	1,2E-04	0,339	2810	45	1,1E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,662	2956	36	1,1E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,662	3168	37
10	6,3E-03	1,2E-02	6,2E-03	1,3E-04	0,339	2578	41	8,4E-03	8,2E-03	4,9E-03	1,2E-04	0,338	2871	41	1,1E-02	1,8E-02	1,1E-02	2,2E-04	0,663	3039	34	1,3E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,662	3347	35
13	6,0E-03	1,0E-02	1,2E-02	1,5E-04	0,338	2191	34	8,2E-03	4,1E-03	4,1E-03	8,9E-05	0,338	3787	45	1,1E-02	1,7E-02	1,9E-02	2,6E-04	0,662	2565	28	1,2E-02	8,5E-03	8,2E-03	1,6E-04	0,661	4232	37
16	1,4E-02	5,5E-03	8,3E-03	1,5E-04	0,346	2287	32	6,4E-03	3,7E-03	6,9E-03	9,3E-05	0,338	3634	40	2,3E-02	1,1E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,668	2511	27	1,2E-02	7,3E-03	1,2E-02	1,7E-04	0,661	3890	32
20	2,7E-02	1,2E-02	6,0E-03	2,4E-04	0,342	1397	27	7,7E-03	5,4E-03	7,1E-03	1,1E-04	0,338	3074	33	2,1E-02	1,1E-02	9,4E-03	2,2E-04	0,673	3025	28	1,3E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,661	3613	29
27	1,7E-02	4,7E-03	3,5E-03	1,4E-04	0,339	2494	32	3,8E-03	4,6E-03	5,0E-03	7,4E-05	0,338	4596	48	7,1E-03	2,4E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,662	2850	24	7,9E-03	9,0E-03	8,4E-03	1,4E-04	0,666	4817	37
55	1,4E-02	4,7E-03	3,8E-03	1,2E-04	0,338	2796	31	4,2E-03	4,9E-03	3,1E-03	6,7E-05	0,339	5094	60	2,1E-02	8,9E-03	9,0E-03	2,1E-04	0,663	3178	26	6,7E-03	8,4E-03	5,9E-03	1,1E-04	0,644	5622	44
85	4,7E-03	4,7E-03	8,1E-03	9,4E-05	0,337	3587	40	6,7E-03	2,7E-03	6,6E-03	8,7E-05	0,337	3853	47	8,8E-03	1,0E-02	1,3E-02	1,7E-04	0,659	3797	29	1,0E-02	5,8E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,660	4344	36
119	3,8E-03	4,2E-03	1,2E-02	1,1E-04	0,338	3125	28	2,9E-03	4,0E-03	4,4E-03	6,2E-05	0,339	5507	62	5,8E-03	8,7E-03	1,9E-02	1,8E-04	0,662	3653	24	4,4E-03	7,7E-03	7,6E-03	1,1E-04	0,663	6162	43
157	7,3E-03	4,7E-03	3,0E-03	8,2E-05	0,338	4126	40	8,4E-03	3,1E-03	5,2E-03	9,5E-05	0,338	3547	47	1,3E-02	9,3E-03	6,3E-03	1,5E-04	0,663	4279	30	1,3E-02	4,5E-03	8,8E-03	1,5E-04	0,662	4342	37
184	7,6E-03	5,1E-03	5,0E-03	9,7E-05	0,353	3631	37	4,8E-03	6,3E-03	3,8E-03	8,5E-05	0,357	4178	43	1,4E-02	1,1E-02	8,2E-03	1,8E-04	0,662	3674	28	9,8E-03	1,2E-02	7,8E-03	1,7E-04	0,663	3881	30

Date	Moules à 6Hz													
	4,6 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,2E-03	1,1E-02	7,4E-03	1,4E-04	0,381	2656	51	6,9E-03	8,8E-03	9,2E-03	1,4E-04	0,383	2807	55
7	5,7E-03	1,2E-02	6,0E-03	1,3E-04	0,381	3024	52	5,2E-03	7,5E-03	7,7E-03	1,1E-04	0,381	3416	56
10	5,8E-03	1,1E-02	5,6E-03	1,2E-04	0,381	3194	51	7,8E-03	7,4E-03	4,9E-03	1,1E-04	0,381	3461	51
13	5,3E-03	9,2E-03	1,2E-02	1,4E-04	0,382	2702	40	7,8E-03	3,7E-03	4,0E-03	8,5E-05	0,382	4504	55
16	1,5E-02	5,0E-03	7,9E-03	1,5E-04	0,383	2587	38	5,9E-03	3,7E-03	6,6E-03	8,8E-05	0,381	4325	49
20	3,4E-02	1,5E-02	5,2E-03	2,9E-04	0,381	1318	30	7,4E-03	5,0E-03	6,7E-03	1,0E-04	0,382	3662	38
27	1,8E-02	4,5E-03	3,9E-03	1,4E-04	0,382	2704	37	3,6E-03	4,3E-03	4,6E-03	6,8E-05	0,382	5607	60
55	1,4E-02	4,5E-03	4,1E-03	1,2E-04	0,382	3115	37	3,9E-03	4,5E-03	3,7E-03	6,6E-05	0,383	5783	75
85	4,1E-03	4,3E-03	7,5E-03	8,6E-05	0,373	4353	48	5,9E-03	3,4E-03	6,0E-03	8,4E-05	0,372	4442	57
119	3,3E-03	4,1E-03	1,2E-02	1,1E-04	0,382	3604	33	3,7E-03	3,9E-03	4,3E-03	6,5E-05	0,383	5930	77
157	7,1E-03	4,4E-03	3,4E-03	8,1E-05	0,382	4686	49	8,2E-03	3,9E-03	4,9E-03	9,8E-05	0,382	3899	57
184	7,3E-03	4,7E-03	4,5E-03	9,0E-05	0,383	4233	45	4,4E-03	6,1E-03	3,6E-03	8,1E-05	0,384	4754	52

Date	9 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,3E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,748	3125	41	1,2E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,3E-04	0,749	3317	44
7	1,0E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,750	3751	43	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,750	3962	44
10	1,1E-02	1,7E-02	9,9E-03	2,0E-04	0,748	3708	41	1,2E-02	1,2E-02	9,4E-03	1,8E-04	0,750	4127	43
13	1,0E-02	1,6E-02	1,9E-02	2,4E-04	0,749	3089	33	1,1E-02	7,9E-03	7,7E-03	1,5E-04	0,750	5092	44
16	2,3E-02	1,0E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,751	2883	31	1,1E-02	6,9E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,750	4625	37
20	2,1E-02	1,1E-02	8,7E-03	2,1E-04	0,750	3498	32	1,2E-02	9,9E-03	1,0E-02	1,8E-04	0,749	4233	34
27	6,9E-03	2,4E-02	1,2E-02	2,3E-04	0,749	3265	27	7,5E-03	8,4E-03	7,8E-03	1,3E-04	0,750	5797	45
55	2,1E-02	8,5E-03	8,9E-03	2,0E-04	0,749	3658	30	4,4E-03	5,8E-03	3,9E-03	7,7E-05	0,473	6129	53
85	8,1E-03	1,0E-02	1,3E-02	1,7E-04	0,727	4367	34	9,4E-03	5,5E-03	1,1E-02	1,4E-04	0,730	5227	43
119	5,5E-03	8,9E-03	2,0E-02	1,8E-04	0,750	4054	28	4,5E-03	7,5E-03	7,3E-03	1,1E-04	0,747	7042	52
157	1,3E-02	9,0E-03	5,9E-03	1,5E-04	0,751	4977	35	1,3E-02	4,9E-03	8,4E-03	1,5E-04	0,749	4989	44
184	1,4E-02	1,1E-02	7,7E-03	1,8E-04	0,750	4261	33	9,4E-03	1,2E-02	7,5E-03	1,7E-04	0,749	4490	35

Date	Moules à 10Hz													
	4,6 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,6E-03	1,0E-02	6,8E-03	1,3E-04	0,422	3210	61	6,1E-03	7,8E-03	8,2E-03	1,2E-04	0,423	3493	66
7	5,2E-03	1,1E-02	5,6E-03	1,2E-04	0,422	3663	64	5,7E-03	6,9E-03	7,1E-03	1,1E-04	0,423	3941	69
10	5,6E-03	1,0E-02	5,5E-03	1,1E-04	0,423	3695	61	7,5E-03	7,0E-03	5,3E-03	1,1E-04	0,422	3905	62
13	5,1E-03	8,3E-03	1,1E-02	1,3E-04	0,422	3155	49	7,8E-03	3,9E-03	4,4E-03	8,8E-05	0,422	4799	67
16	1,6E-02	5,6E-03	7,9E-03	1,6E-04	0,422	2686	44	5,6E-03	4,1E-03	6,6E-03	8,9E-05	0,423	4741	58
20	3,5E-02	1,3E-02	5,0E-03	2,8E-04	0,422	1486	36	7,5E-03	4,9E-03	6,8E-03	1,0E-04	0,422	4030	46
27	1,9E-02	5,0E-03	4,6E-03	1,5E-04	0,422	2739	44	4,0E-03	4,1E-03	4,5E-03	6,9E-05	0,421	6093	72
55	1,4E-02	4,7E-03	4,7E-03	1,3E-04	0,421	3300	45	4,1E-03	4,5E-03	4,4E-03	7,1E-05	0,423	5913	88
85	3,8E-03	4,1E-03	6,7E-03	7,9E-05	0,383	4880	57	5,3E-03	3,8E-03	5,6E-03	8,1E-05	0,384	4765	67
119	3,5E-03	4,3E-03	1,3E-02	1,1E-04	0,422	3807	40	4,3E-03	4,0E-03	4,6E-03	7,1E-05	0,422	5934	90
157	7,2E-03	4,4E-03	3,8E-03	8,5E-05	0,422	4979	59	8,7E-03	4,6E-03	5,0E-03	1,0E-04	0,422	4022	69
184	7,3E-03	4,8E-03	4,7E-03	9,2E-05	0,422	4602	54	4,5E-03	6,1E-03	3,9E-03	8,3E-05	0,422	5061	63

Date	9 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,3E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,827	3599	48	1,2E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,826	3823	51
7	1,0E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,827	4197	51	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,827	4401	53
10	1,0E-02	1,7E-02	9,7E-03	2,0E-04	0,828	4162	49	1,2E-02	1,2E-02	9,2E-03	1,8E-04	0,827	4542	51
13	1,0E-02	1,6E-02	1,9E-02	2,4E-04	0,828	3429	39	1,2E-02	8,1E-03	7,6E-03	1,5E-04	0,827	5518	52
16	2,5E-02	1,0E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,827	3089	37	1,1E-02	6,7E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,824	5022	44
20	2,1E-02	1,1E-02	9,0E-03	2,2E-04	0,826	3743	37	1,3E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,8E-04	0,827	4557	40
27	7,2E-03	2,6E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,827	3348	31	7,7E-03	8,5E-03	7,9E-03	1,3E-04	0,827	6294	54
55	2,1E-02	8,8E-03	9,5E-03	2,1E-04	0,827	3922	35	4,2E-03	5,8E-03	3,9E-03	7,6E-05	0,534	7049	57
85	8,0E-03	1,0E-02	1,1E-02	1,6E-04	0,761	4761	38	9,0E-03	5,6E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,764	5601	48
119	5,4E-03	9,3E-03	2,1E-02	1,9E-04	0,826	4272	34	5,3E-03	8,0E-03	7,7E-03	1,1E-04	0,828	7209	61
157	1,4E-02	9,6E-03	6,2E-03	1,6E-04	0,827	5145	41	1,4E-02	5,8E-03	9,0E-03	1,6E-04	0,826	5080	52
184	1,4E-02	1,1E-02	7,6E-03	1,8E-04	0,826	4601	39	9,8E-03	1,3E-02	7,5E-03	1,7E-04	0,826	4798	42

Annexe 35 – Résultats d'essais à 20°C et 43% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,2E-02	3,8E-02	3,2E-02	5,0E-04	0,426	857	23	2,6E-02	3,5E-02	4,1E-02	5,6E-04	0,426	763	23	3,8E-02	5,6E-02	4,9E-02	7,7E-04	0,833	1088	20	4,3E-02	5,1E-02	5,9E-02	8,4E-04	0,833	997	21
7	3,3E-02	3,0E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,426	901	22	3,0E-02	2,8E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,426	864	21	5,0E-02	4,4E-02	3,7E-02	7,0E-04	0,833	1185	21	4,5E-02	4,5E-02	4,8E-02	7,5E-04	0,833	1106	20
10	3,0E-02	3,3E-02	2,6E-02	4,8E-04	0,427	889	21	3,1E-02	2,7E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,426	883	21	4,4E-02	5,1E-02	3,9E-02	7,2E-04	0,833	1150	19	4,5E-02	4,2E-02	4,5E-02	7,2E-04	0,833	1158	20
13	1,7E-02	4,0E-02	4,1E-02	5,2E-04	0,426	811	20	2,3E-02	2,7E-02	3,1E-02	4,4E-04	0,426	970	21	2,9E-02	5,4E-02	5,9E-02	7,6E-04	0,832	1092	18	3,5E-02	4,4E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,833	1259	19
16	2,0E-02	1,9E-02	4,1E-02	4,3E-04	0,426	987	22	2,7E-02	1,8E-02	2,6E-02	3,8E-04	0,426	1111	23	3,4E-02	3,3E-02	6,0E-02	6,8E-04	0,833	1222	19	4,0E-02	2,8E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,833	1454	21
20	2,9E-02	2,5E-02	2,3E-02	4,2E-04	0,427	1020	22	2,8E-02	2,7E-02	2,4E-02	4,3E-04	0,427	998	20	4,6E-02	3,8E-02	3,5E-02	6,4E-04	0,833	1306	19	3,9E-02	3,9E-02	3,7E-02	6,3E-04	0,833	1327	19
27	2,9E-02	2,8E-02	1,8E-02	4,0E-04	0,426	1072	23	2,0E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,0E-04	0,426	1069	22	4,2E-02	3,3E-02	2,9E-02	5,6E-04	0,833	1494	20	3,3E-02	3,8E-02	3,8E-02	5,9E-04	0,833	1409	20
55	2,4E-02	1,9E-02	2,6E-02	3,8E-04	0,426	1135	22	1,9E-02	2,6E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,426	1205	24	3,7E-02	3,1E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,833	1466	19	3,0E-02	3,7E-02	3,1E-02	5,4E-04	0,833	1549	22
85	1,7E-02	4,3E-02	2,6E-02	4,6E-04	0,425	922	21	2,1E-02	1,7E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,425	1288	25	2,8E-02	5,5E-02	3,6E-02	6,4E-04	0,831	1299	19	3,2E-02	2,8E-02	3,4E-02	5,1E-04	0,831	1620	22
119	2,4E-02	1,8E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,426	1297	24	1,9E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,426	1492	28	3,6E-02	2,8E-02	2,9E-02	5,0E-04	0,833	1664	20	3,0E-02	2,4E-02	2,9E-02	4,5E-04	0,832	1836	23
157	2,2E-02	2,7E-02	1,7E-02	3,6E-04	0,426	1197	23	2,2E-02	2,6E-02	1,6E-02	3,6E-04	0,426	1166	24	3,3E-02	4,1E-02	2,8E-02	5,6E-04	0,833	1490	20	3,5E-02	3,9E-02	2,8E-02	5,9E-04	0,832	1420	20
184	3,8E-02	1,6E-02	2,1E-02	4,1E-04	0,426	1032	21	2,0E-02	2,4E-02	1,9E-02	3,6E-04	0,426	1188	24	5,8E-02	2,4E-02	3,4E-02	6,4E-04	0,832	1306	18	3,0E-02	3,5E-02	3,1E-02	5,5E-04	0,833	1506	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,3E-02	2,5E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,420	1337	30	1,6E-02	2,1E-02	2,7E-02	3,5E-04	0,420	1197	30	2,4E-02	3,6E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,810	1660	26	3,0E-02	3,3E-02	3,9E-02	5,5E-04	0,821	1479	27
7	2,2E-02	1,9E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,420	1392	29	1,9E-02	1,9E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,420	1275	27	3,4E-02	2,9E-02	2,5E-02	4,7E-04	0,820	1733	26	3,1E-02	3,1E-02	3,3E-02	5,2E-04	0,823	1574	25
10	1,9E-02	2,2E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,420	1339	27	2,1E-02	1,7E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,418	1330	27	2,9E-02	3,6E-02	2,7E-02	5,0E-04	0,820	1644	24	3,1E-02	2,8E-02	3,1E-02	4,9E-04	0,819	1660	25
13	1,0E-02	2,6E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,418	1209	25	1,4E-02	1,7E-02	2,1E-02	2,9E-04	0,418	1458	25	2,0E-02	3,6E-02	4,3E-02	5,3E-04	0,821	1542	23	2,4E-02	3,0E-02	3,0E-02	4,6E-04	0,819	1785	23
16	1,3E-02	1,2E-02	2,8E-02	2,9E-04	0,420	1468	27	1,8E-02	1,0E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,420	1741	30	2,3E-02	2,3E-02	4,4E-02	4,8E-04	0,820	1703	23	2,8E-02	1,8E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,821	2122	27
20	2,0E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,420	1587	27	1,9E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,8E-04	0,419	1482	25	3,4E-02	2,5E-02	2,2E-02	4,4E-04	0,822	1864	23	2,7E-02	2,7E-02	2,6E-02	4,4E-04	0,822	1877	23
27	1,9E-02	1,6E-02	1,0E-02	2,4E-04	0,419	1717	28	1,3E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,420	1636	27	3,0E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,818	2168	25	2,3E-02	2,5E-02	2,6E-02	4,0E-04	0,823	2059	24
55	1,5E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,4E-04	0,419	1759	27	1,1E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,419	1960	32	2,5E-02	2,1E-02	2,6E-02	3,9E-04	0,818	2113	23	2,0E-02	2,5E-02	2,0E-02	3,5E-04	0,817	2314	27
85	9,8E-03	3,0E-02	1,6E-02	3,0E-04	0,418	1376	24	1,2E-02	9,7E-03	1,3E-02	1,9E-04	0,416	2173	34	1,9E-02	3,9E-02	2,4E-02	4,4E-04	0,816	1860	22	2,1E-02	1,8E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,816	2444	28
119	1,6E-02	1,1E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,418	2111	28	1,1E-02	9,4E-03	9,2E-03	1,6E-04	0,418	2600	36	2,5E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,3E-04	0,819	2451	23	1,9E-02	1,6E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,819	2844	29
157	1,3E-02	1,8E-02	9,8E-03	2,2E-04	0,417	1866	29	1,3E-02	1,7E-02	9,6E-03	2,3E-04	0,416	1835	30	2,2E-02	2,9E-02	1,9E-02	3,8E-04	0,819	2139	24	2,3E-02	2,8E-02	1,9E-02	4,1E-04	0,819	2013	25
184	3,0E-02	8,9E-03	1,3E-02	2,8E-04	0,418	1486	24	1,2E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,2E-04	0,420	1921	31	4,4E-02	1,5E-02	2,3E-02	4,5E-04	0,819	1803	21	2,0E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,822	2236	27

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 3							Moule 4							Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,5E-03	1,6E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,339	1695	37	1,1E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,2E-04	0,338	1509	36	1,6E-02	2,4E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,649	1989	29	2,0E-02	2,1E-02	2,6E-02	3,7E-04	0,662	1813	31
7	1,4E-02	1,2E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,339	1735	35	1,3E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,338	1558	32	2,3E-02	2,0E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,662	2088	30	2,1E-02	2,1E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,663	1890	29
10	1,2E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,339	1639	33	1,4E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,338	1613	33	1,9E-02	2,5E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,662	1964	28	2,1E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,663	1981	29
13	6,9E-03	1,7E-02	1,9E-02	2,3E-04	0,338	1464	30	9,2E-03	1,1E-02	1,5E-02	1,9E-04	0,338	1747	29	1,3E-02	2,4E-02	3,0E-02	3,6E-04	0,662	1833	26	1,6E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,662	2100	26
16	8,4E-03	7,8E-03	1,9E-02	1,9E-04	0,338	1763	32	1,2E-02	6,5E-03	1,0E-02	1,6E-04	0,338	2145	36	1,5E-02	1,5E-02	3,1E-02	3,3E-04	0,662	1997	26	1,9E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,662	2517	31
20	1,4E-02	1,0E-02	8,3E-03	1,8E-04	0,338	1925	31	1,3E-02	1,1E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,338	1778	28	2,4E-02	1,7E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,663	2191	26	1,9E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,662	2205	26
27	1,3E-02	1,0E-02	6,8E-03	1,6E-04	0,339	2107	33	8,5E-03	1,2E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,339	1988	32	2,1E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,662	2520	28	1,6E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,660	2363	27
55	1,0E-02	7,5E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,339	2120	31	6,9E-03	1,1E-02	7,5E-03	1,4E-04	0,338	2447	38	1,7E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,662	2471	26	1,3E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,669	2803	32
85	6,3E-03	2,2E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,337	1621	27	7,6E-03	6,1E-03	8,8E-03	1,2E-04	0,339	2756	42	1,3E-02	2,8E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,660	2163	25	1,4E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,662	2955	33
119	1,1E-02	6,9E-03	6,8E-03	1,3E-04	0,338	2578	33	7,0E-03	6,0E-03	6,2E-03	1,0E-04	0,339	3234	44	1,7E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,661	2857	26	1,3E-02	1,1E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,662	3387	34
157	8,9E-03	1,2E-02	6,5E-03	1,5E-04	0,339	2251	34	8,7E-03	1,1E-02	6,4E-03	1,5E-04	0,344	2262	36	1,5E-02	2,1E-02	1,3E-02	2,6E-04	0,662	2502	27	1,6E-02	2,0E-02	1,3E-02	2,8E-04	0,662	2344	28
184	2,3E-02	5,5E-03	8,5E-03	2,0E-04	0,338	1673	26	7,7E-03	9,7E-03	7,2E-03	1,4E-04	0,338	2398	38	3,3E-02	1,0E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,661	2031	23	1,4E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,663	2691	31

Date	Moules à 6Hz													
	4,6 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,6E-03	1,4E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,381	2137	44	9,8E-03	1,2E-02	1,5E-02	2,0E-04	0,381	1893	43
7	1,4E-02	1,1E-02	9,5E-03	1,8E-04	0,388	2121	42	1,2E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,391	1885	38
10	1,1E-02	1,4E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,384	1984	39	1,3E-02	9,7E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,382	1998	39
13	6,5E-03	1,5E-02	1,8E-02	2,1E-04	0,383	1809	36	8,4E-03	1,0E-02	1,5E-02	1,8E-04	0,382	2113	34
16	7,9E-03	7,1E-03	1,9E-02	1,8E-04	0,383	2100	38	1,2E-02	6,5E-03	9,6E-03	1,5E-04	0,389	2539	43
20	1,4E-02	1,0E-02	7,6E-03	1,7E-04	0,386	2245	36	1,3E-02	1,0E-02	9,9E-03	1,8E-04	0,381	2099	33
27	1,2E-02	9,1E-03	6,6E-03	1,5E-04	0,382	2571	39	8,1E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,382	2377	38
55	9,5E-03	6,7E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,382	2544	36	6,2E-03	1,0E-02	6,7E-03	1,3E-04	0,382	3032	46
85	5,7E-03	2,0E-02	9,5E-03	1,9E-04	0,371	1936	31	6,7E-03	5,4E-03	7,8E-03	1,1E-04	0,374	3456	51
119	1,0E-02	6,4E-03	6,2E-03	1,2E-04	0,382	3117	39	6,3E-03	5,3E-03	5,6E-03	9,4E-05	0,382	4070	53
157	8,1E-03	1,1E-02	5,9E-03	1,4E-04	0,383	2749	40	7,8E-03	1,1E-02	6,0E-03	1,4E-04	0,383	2738	43
184	2,4E-02	5,0E-03	7,7E-03	2,0E-04	0,382	1887	29	7,5E-03	9,3E-03	6,9E-03	1,4E-04	0,390	2865	45

Date	Moules à 6Hz													
	9 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,0E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,0E-04	0,492	2472	35	1,8E-02	1,9E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,748	2251	36
7	2,1E-02	1,8E-02	1,5E-02	2,9E-04	0,749	2599	35	1,9E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,748	2289	34
10	1,8E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,749	2392	32	2,0E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,748	2424	34
13	1,3E-02	2,1E-02	2,9E-02	3,4E-04	0,748	2203	30	1,5E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,749	2519	30
16	1,4E-02	1,4E-02	3,1E-02	3,2E-04	0,749	2371	30	1,8E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,749	3019	36
20	2,4E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,747	2566	30	1,8E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,748	2599	31
27	2,0E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,750	2999	32	1,2E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,619	2957	33
55	1,6E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,750	2936	30	1,2E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,750	3394	37
85	1,2E-02	2,6E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,728	2559	28	1,3E-02	1,1E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,728	3542	38
119	1,7E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,749	3359	30	1,2E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,749	4090	40
157	1,4E-02	2,0E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,749	2978	32	1,5E-02	1,9E-02	1,2E-02	2,7E-04	0,749	2805	33
184	3,4E-02	9,7E-03	1,5E-02	3,2E-04	0,749	2320	27	1,3E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,747	3175	37

Date	Moules à 10Hz													
	4,6 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,1E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,423	2552	53	9,2E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,9E-04	0,423	2258	51
7	1,2E-02	9,8E-03	8,6E-03	1,7E-04	0,422	2555	51	1,1E-02	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,422	2247	45
10	1,0E-02	1,3E-02	9,9E-03	1,8E-04	0,423	2347	47	1,3E-02	9,1E-03	1,2E-02	1,8E-04	0,421	2322	47
13	6,2E-03	1,3E-02	1,8E-02	2,0E-04	0,423	2116	42	8,2E-03	9,6E-03	1,5E-02	1,8E-04	0,423	2399	40
16	7,2E-03	6,4E-03	1,8E-02	1,7E-04	0,422	2454	45	1,1E-02	5,7E-03	8,7E-03	1,4E-04	0,422	3009	51
20	1,4E-02	9,9E-03	6,9E-03	1,6E-04	0,422	2573	43	1,3E-02	9,9E-03	9,7E-03	1,8E-04	0,422	2380	38
27	1,2E-02	8,5E-03	6,6E-03	1,4E-04	0,422	2935	46	8,0E-03	1,0E-02	1,0E-02	1,5E-04	0,422	2723	45
55	9,1E-03	6,4E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,422	2894	42	5,9E-03	9,8E-03	6,4E-03	1,2E-04	0,421	3492	55
85	5,4E-03	1,9E-02	8,5E-03	1,8E-04	0,384	2167	36	6,1E-03	4,9E-03	7,1E-03	9,9E-05	0,384	3878	60
119	1,0E-02	6,3E-03	6,1E-03	1,2E-04	0,422	3516	46	6,1E-03	5,0E-03	5,5E-03	9,1E-05	0,422	4638	64
157	7,9E-03	1,1E-02	5,6E-03	1,4E-04	0,422	3113	48	7,5E-03	1,0E-02	5,6E-03	1,3E-04	0,423	3153	51
184	2,7E-02	4,8E-03	7,4E-03	2,1E-04	0,422	1998	34	7,0E-03	8,6E-03	6,4E-03	1,3E-04	0,422	3331	54

Date	Moules à 10Hz													
	9 kN													
	Moule 3							Moule 4						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,5E-02	2,1E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,825	2853	43	1,8E-02	1,9E-02	2,3E-02	3,3E-04	0,827	2508	42
7	2,0E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,825	2927	42	1,8E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,826	2603	39
10	1,7E-02	2,3E-02	1,7E-02	3,1E-04	0,826	2672	38	2,0E-02	1,7E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,826	2680	40
13	1,3E-02	2,0E-02	2,9E-02	3,4E-04	0,827	2463	35	1,5E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,0E-04	0,825	2785	36
16	1,4E-02	1,4E-02	3,1E-02	3,2E-04	0,826	2610	35	1,8E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,824	3379	43
20	2,4E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,9E-04	0,826	2848	34	1,8E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,827	2907	36
27	2,0E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,826	3297	37	1,5E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,826	3230	39
55	1,7E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,6E-04	0,827	3163	34	1,2E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,826	3751	44
85	1,2E-02	2,5E-02	1,4E-02	2,7E-04	0,757	2798	32	1,2E-02	1,0E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,760	3856	44
119	1,7E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,827	3692	36	1,2E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,827	4490	47
157	1,4E-02	2,0E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,827	3258	37	1,5E-02	1,9E-02	1,3E-02	2,7E-04	0,826	3077	38
184	3,6E-02	9,5E-03	1,5E-02	2,0E-04	0,826	4137	31	1,3E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,826	3529	43

Annexe 36 – Résultats d'essais à 15°C et 43% d'HR – Essais à 15 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,8E-02	2,5E-02	2,4E-02	4,2E-04	0,425	1016	28	2,9E-02	2,4E-02	3,1E-02	4,6E-04	0,426	918	28	4,2E-02	3,9E-02	3,6E-02	6,3E-04	0,833	1321	25	4,3E-02	3,5E-02	4,3E-02	6,6E-04	0,833	1257	26
7	1,9E-02	1,8E-02	1,7E-02	2,9E-04	0,425	1478	32	1,8E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,426	1425	31	3,2E-02	2,8E-02	2,7E-02	4,6E-04	0,833	1794	27	2,9E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,6E-04	0,832	1800	26
10	1,7E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,7E-04	0,426	1606	31	1,8E-02	1,4E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,426	1558	31	2,7E-02	2,8E-02	2,5E-02	4,3E-04	0,832	1933	26	2,9E-02	2,3E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,833	1923	26
13	1,7E-02	1,1E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,426	1964	34	2,1E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,5E-04	0,426	1689	32	2,7E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,832	2234	28	3,3E-02	2,1E-02	2,0E-02	4,1E-04	0,832	2053	27
16	1,9E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,426	1654	28	1,3E-02	1,4E-02	2,3E-02	2,7E-04	0,426	1562	28	2,8E-02	2,6E-02	2,4E-02	4,2E-04	0,834	1978	24	2,2E-02	2,2E-02	3,5E-02	4,3E-04	0,832	1934	24
20	1,7E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,426	1760	30	1,4E-02	1,8E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,426	1730	30	2,8E-02	2,5E-02	2,1E-02	4,0E-04	0,832	2103	26	2,3E-02	2,7E-02	2,2E-02	3,9E-04	0,833	2127	26
27	1,1E-02	1,2E-02	1,0E-02	1,8E-04	0,426	2384	36	1,1E-02	1,9E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,426	1805	31	2,0E-02	2,1E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,832	2585	29	1,8E-02	2,9E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,833	2223	27
55	9,7E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,426	2521	36	1,3E-02	1,2E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,426	2177	35	1,8E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,834	2790	29	2,2E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,832	2545	29
85	7,8E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,6E-04	0,425	2733	36	1,4E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,425	2034	30	1,5E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,831	3043	30	2,3E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,831	2345	27
119	1,0E-02	1,4E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,426	2297	35	1,3E-02	1,5E-02	1,1E-02	2,1E-04	0,426	2009	34	1,8E-02	2,4E-02	1,7E-02	3,2E-04	0,833	2577	27	2,3E-02	2,2E-02	1,8E-02	3,5E-04	0,833	2412	28
157	1,0E-02	1,1E-02	7,5E-03	1,5E-04	0,426	2810	39	1,5E-02	9,5E-03	8,8E-03	1,8E-04	0,425	2367	37	1,8E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,833	3040	30	2,2E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,832	2832	30
184								1,3E-02	1,4E-02	6,8E-03	1,9E-04	0,426	2299	34								2,1E-02	2,3E-02	1,2E-02	3,1E-04	0,832	2713	27

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,6E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,418	1821	36	1,6E-02	1,2E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,418	1687	36	2,6E-02	2,3E-02	2,1E-02	3,7E-04	0,820	2195	31	2,5E-02	2,0E-02	2,4E-02	3,8E-04	0,813	2157	31
7	9,7E-03	9,1E-03	8,9E-03	1,5E-04	0,418	2802	43	9,7E-03	9,4E-03	9,9E-03	1,6E-04	0,420	2648	42	1,7E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,815	3035	34	1,7E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,818	3040	34
10	9,3E-03	9,1E-03	7,9E-03	1,4E-04	0,419	2968	42	1,0E-02	7,1E-03	9,5E-03	1,5E-04	0,419	2858	43	1,6E-02	1,7E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,819	3182	33	1,8E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,819	3209	34
13	9,4E-03	5,7E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,418	3665	49	1,3E-02	6,6E-03	5,9E-03	1,4E-04	0,419	3066	46	1,7E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,819	3687	35	2,0E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,820	3417	36
16	1,0E-02	7,9E-03	8,5E-03	1,4E-04	0,417	2912	35	6,8E-03	7,2E-03	1,4E-02	1,5E-04	0,417	2698	37	1,8E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,816	3100	28	1,3E-02	1,3E-02	2,3E-02	2,7E-04	0,816	3049	30
20	1,0E-02	8,0E-03	6,6E-03	1,3E-04	0,418	3163	40	7,7E-03	1,0E-02	7,2E-03	1,4E-04	0,417	3055	40	1,8E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,819	3396	31	1,4E-02	1,6E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,817	3439	32
27	5,5E-03	5,9E-03	5,2E-03	8,9E-05	0,418	4686	54	5,9E-03	1,0E-02	6,9E-03	1,3E-04	0,420	3322	43	1,2E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,818	4350	36	1,1E-02	1,7E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,818	3687	34
55	4,8E-03	6,0E-03	5,0E-03	8,4E-05	0,417	4942	52	7,1E-03	5,9E-03	5,5E-03	1,0E-04	0,417	4143	51	1,0E-02	1,2E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,817	4757	36	1,3E-02	1,1E-02	1,0E-02	1,9E-04	0,815	4305	38
85	3,9E-03	5,0E-03	5,4E-03	7,7E-05	0,417	5431	52	8,6E-03	7,0E-03	5,4E-03	1,1E-04	0,416	3621	37	8,2E-03	9,8E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,815	5227	36	1,3E-02	1,2E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,810	4072	30
119	5,2E-03	8,0E-03	4,8E-03	9,7E-05	0,419	4338	48	6,8E-03	7,8E-03	5,2E-03	1,1E-04	0,418	3864	44	1,1E-02	1,5E-02	9,7E-03	1,9E-04	0,818	4218	33	1,3E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,0E-04	0,819	4076	33
157	4,7E-03	5,5E-03	3,8E-03	7,5E-05	0,419	5597	60	7,8E-03	4,5E-03	4,5E-03	9,2E-05	0,418	4568	51	1,0E-02	1,0E-02	8,9E-03	1,6E-04	0,822	5252	38	1,4E-02	8,3E-03	8,9E-03	1,7E-04	0,818	4863	37
184								6,8E-03	8,6E-03	3,8E-03	1,1E-04	0,415	3952	43								1,3E-02	1,5E-02	6,2E-03	1,9E-04	0,818	4312	31

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN														9 kN										
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,0E-02	8,7E-03	8,0E-03	1,4E-04	0,339	2346	44	1,0E-02	7,7E-03	1,0E-02	1,5E-04	0,340	2216	43	1,7E-02	1,5E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,662	2734	36	1,6E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,701	2885	37
7	6,1E-03	5,6E-03	5,6E-03	9,3E-05	0,338	3643	56	5,9E-03	5,6E-03	6,0E-03	9,6E-05	0,338	3526	56	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,690	3937	41	1,1E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,671	3840	43
10	5,7E-03	5,7E-03	4,8E-03	8,7E-05	0,339	3894	55	6,5E-03	4,4E-03	5,8E-03	9,1E-05	0,339	3733	57	1,1E-02	1,1E-02	9,5E-03	1,7E-04	0,662	3910	40	1,2E-02	8,6E-03	1,0E-02	1,7E-04	0,662	3966	42
13	6,0E-03	3,7E-03	3,8E-03	7,2E-05	0,339	4677	65	7,7E-03	4,0E-03	3,6E-03	8,4E-05	0,338	4023	63	1,1E-02	7,9E-03	8,3E-03	1,5E-04	0,662	4484	43	1,3E-02	7,8E-03	7,7E-03	1,6E-04	0,662	4259	45
16	6,6E-03	5,2E-03	5,7E-03	9,4E-05	0,338	3613	43	4,3E-03	4,5E-03	9,6E-03	1,0E-04	0,338	3353	46	1,2E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,674	3777	32	9,1E-03	8,2E-03	1,6E-02	1,8E-04	0,678	3770	35
20	6,5E-03	4,9E-03	4,0E-03	8,3E-05	0,338	4060	50	5,0E-03	6,3E-03	4,6E-03	8,7E-05	0,338	3894	51	1,2E-02	9,7E-03	8,3E-03	1,6E-04	0,662	4080	37	9,3E-03	1,1E-02	8,7E-03	1,6E-04	0,666	4240	39
27	3,4E-03	3,6E-03	3,3E-03	5,5E-05	0,338	6119	73	3,7E-03	6,3E-03	4,2E-03	7,7E-05	0,338	4374	57	8,0E-03	7,8E-03	7,3E-03	1,2E-04	0,664	5319	44	7,6E-03	1,2E-02	7,6E-03	1,5E-04	0,663	4536	42
55	3,0E-03	3,8E-03	3,2E-03	5,4E-05	0,338	6278	69	4,5E-03	3,7E-03	3,5E-03	6,4E-05	0,338	5264	70	6,6E-03	8,1E-03	6,5E-03	1,1E-04	0,669	5844	44	8,9E-03	7,3E-03	6,9E-03	1,3E-04	0,686	5432	47
85	2,9E-03	3,1E-03	3,5E-03	5,1E-05	0,361	7017	69	6,0E-03	4,5E-03	3,5E-03	7,6E-05	0,340	4478	44	5,6E-03	6,5E-03	7,5E-03	1,1E-04	0,671	6359	43	8,3E-03	7,0E-03	6,8E-03	1,2E-04	0,630	5235	47
119	3,1E-03	5,2E-03	3,0E-03	6,1E-05	0,338	5514	62	4,5E-03	5,0E-03	3,2E-03	6,9E-05	0,339	4894	54	7,5E-03	1,1E-02	6,5E-03	1,3E-04	0,664	5015	39	9,0E-03	9,0E-03	6,7E-03	1,4E-04	0,667	4936	39
157	3,0E-03	3,4E-03	2,8E-03	4,9E-05	0,338	6858	81	5,1E-03	2,9E-03	2,9E-03	6,0E-05	0,338	5684	65	6,6E-03	6,5E-03	5,8E-03	1,0E-04	0,662	6470	47	9,5E-03	5,5E-03	5,9E-03	1,1E-04	0,664	5811	44
184								4,5E-03	6,0E-03	3,3E-03	7,6E-05	0,353	4680	53								9,2E-03	1,1E-02	4,2E-03	1,3E-04	0,667	5018	35

Date	Moules à 6Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,8E-03	7,5E-03	7,0E-03	1,3E-04	0,383	3047	53	8,9E-03	6,8E-03	8,4E-03	1,3E-04	0,382	2909	53	1,5E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,748	3445	42	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,752	3509	44
7	5,3E-03	5,1E-03	5,1E-03	8,4E-05	0,382	4559	72	5,5E-03	5,3E-03	5,6E-03	9,0E-05	0,382	4233	72	9,8E-03	1,0E-02	9,7E-03	1,6E-04	0,752	4720	50	9,9E-03	9,3E-03	9,8E-03	1,6E-04	0,751	4751	52
10	5,4E-03	5,4E-03	4,8E-03	8,3E-05	0,382	4577	69	5,8E-03	4,5E-03	5,4E-03	8,6E-05	0,382	4432	73	9,7E-03	1,1E-02	8,8E-03	1,6E-04	0,749	4793	48	1,1E-02	8,0E-03	9,1E-03	1,5E-04	0,749	4923	53
13	5,5E-03	4,3E-03	4,1E-03	7,5E-05	0,382	5113	82	6,9E-03	4,7E-03	4,5E-03	8,7E-05	0,381	4357	81	1,0E-02	7,4E-03	7,8E-03	1,4E-04	0,749	5455	52	1,2E-02	7,2E-03	7,3E-03	1,4E-04	0,748	5247	56
16	6,0E-03	4,7E-03	5,3E-03	8,6E-05	0,381	4444	53	4,0E-03	4,4E-03	9,0E-03	9,5E-05	0,382	4012	57	1,1E-02	9,2E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,751	4470	38	8,7E-03	7,5E-03	1,5E-02	1,7E-04	0,751	4436	43
20	6,2E-03	4,6E-03	4,1E-03	8,0E-05	0,381	4768	62	4,5E-03	5,5E-03	4,4E-03	7,8E-05	0,382	4863	65	1,2E-02	9,1E-03	7,7E-03	1,5E-04	0,749	4903	44	8,5E-03	9,7E-03	8,0E-03	1,4E-04	0,750	5241	48
27	3,9E-03	3,8E-03	3,7E-03	6,1E-05	0,381	6227	91	4,3E-03	5,8E-03	4,5E-03	7,9E-05	0,385	4848	73	7,7E-03	7,3E-03	6,8E-03	1,2E-04	0,751	6408	54	7,2E-03	1,1E-02	7,0E-03	1,4E-04	0,750	5542	52
55	3,4E-03	3,7E-03	3,5E-03	5,7E-05	0,383	6721	86	4,2E-03	4,1E-03	3,9E-03	6,7E-05	0,382	5702	87	6,3E-03	7,8E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,751	6910	53	8,3E-03	6,8E-03	6,4E-03	1,2E-04	0,752	6398	58
85	2,0E-03	2,1E-03	2,4E-03	3,5E-05	0,247	7050	83	5,7E-03	4,0E-03	3,8E-03	7,4E-05	0,374	5074	54	5,3E-03	6,2E-03	7,4E-03	1,0E-04	0,730	7223	51	5,5E-03	4,7E-03	4,2E-03	7,9E-05	0,439	5568	54
119	3,7E-03	5,0E-03	3,4E-03	6,5E-05	0,382	5869	76	4,1E-03	4,5E-03	3,4E-03	6,5E-05	0,382	5861	66	7,2E-03	1,0E-02	6,2E-03	1,3E-04	0,750	5893	47	8,4E-03	8,4E-03	6,4E-03	1,3E-04	0,750	5895	46
157	3,4E-03	3,5E-03	3,7E-03	5,7E-05	0,381	6728	100	4,7E-03	3,4E-03	3,5E-03	6,4E-05	0,382	6008	81	6,5E-03	6,5E-03	5,9E-03	1,0E-04	0,748	7342	57	9,0E-03	5,2E-03	5,8E-03	1,1E-04	0,751	6847	53
184								4,2E-03	5,9E-03	4,1E-03	7,7E-05	0,384	4972	65								8,9E-03	1,1E-02	4,8E-03	1,3E-04	0,750	5599	41

Date	Moules à 10Hz																										
	4,6 kN														9 kN												
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6					
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	8,1E-03	7,0E-03	6,3E-03	1,2E-04	0,422	3667	64	8,2E-03	6,1E-03	7,6E-03	1,2E-04	0,422	3540	64	1,5E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,828	3872	50	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,828	3967	52
7	5,4E-03	4,9E-03	5,2E-03	8,3E-05	0,422	5072	86	5,3E-03	5,3E-03	5,5E-03	8,8E-05	0,422	4786	88	9,5E-03	9,9E-03	9,6E-03	1,6E-04	0,827	5316	60	9,7E-03	8,9E-03	9,5E-03	1,5E-04	0,825	5387	63
10	5,2E-03	5,0E-03	5,1E-03	8,2E-05	0,423	5159	83	5,5E-03	5,0E-03	5,5E-03	8,8E-05	0,422	4804	88	9,5E-03	1,0E-02	8,5E-03	1,5E-04	0,827	5421	58	1,1E-02	7,7E-03	8,7E-03	1,5E-04	0,828	5556	63
13	5,3E-03	5,1E-03	4,6E-03	8,1E-05	0,422	5226	97	6,5E-03	5,2E-03	5,2E-03	9,2E-05	0,423	4573	96	1,1E-02	7,4E-03	7,7E-03	1,4E-04	0,827	5977	62	1,2E-02	7,1E-03	7,3E-03	1,4E-04	0,827	5798	67
16	5,8E-03	4,6E-03	5,2E-03	8,4E-05	0,422	5004	63	4,5E-03	4,8E-03	8,6E-03	9,8E-05	0,422	4294	69	1,2E-02	9,3E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,827	4753	45	8,7E-03	7,3E-03	1,5E-02	1,7E-04	0,827	4889	51
20	6,1E-03	4,8E-03	4,4E-03	8,2E-05	0,422	5140	75	4,5E-03	5,4E-03	4,6E-03	7,9E-05	0,421	5333	79	1,2E-02	9,5E-03	7,6E-03	1,5E-04	0,826	5337	52	8,7E-03	9,7E-03	8,0E-03	1,4E-04	0,827	5737	58
27	4,6E-03	4,3E-03	4,2E-03	7,0E-05	0,422	6014	104	4,7E-03	5,4E-03	4,8E-03	8,1E-05	0,423	5200	88	7,7E-03	7,3E-03	6,8E-03	1,2E-04	0,826	7026	65	7,2E-03	1,1E-02	6,7E-03	1,3E-04	0,827	6174	62
55	3,9E-03	4,0E-03	4,1E-03	6,5E-05	0,422	6508	99	4,5E-03	4,6E-03	4,5E-03	7,4E-05	0,422	5673	101	6,4E-03	7,9E-03	6,1E-03	1,1E-04	0,826	7502	63	8,5E-03	6,7E-03	6,4E-03	1,2E-04	0,827	7003	69
85	3,8E-03	3,2E-03	3,4E-03	5,6E-05	0,381	6840	97	5,5E-03	3,8E-03	4,1E-03	7,3E-05	0,382	5251	65	5,5E-03	6,3E-03	7,6E-03	1,0E-04	0,767	7363	58	2,9E-03	2,5E-03	2,1E-03	4,1E-05	0,234	5734	29
119	4,3E-03	4,9E-03	4,0E-03	7,1E-05	0,422	5938	90	4,2E-03	4,6E-03	4,0E-03	7,0E-05	0,422	6030	79	7,2E-03	1,0E-02	6,2E-03	1,3E-04	0,828	6459	56	8,8E-03	8,6E-03	6,4E-03	1,3E-04	0,827	6353	55
157	4,0E-03	4,0E-03	4,3E-03	6,6E-05	0,422	6378	111	5,0E-03	3,9E-03	4,2E-03	7,1E-05	0,422	5921	93	6,5E-03	6,5E-03	5,9E-03	1,0E-04	0,827	8120	68	9,5E-03	5,3E-03	5,8E-03	1,1E-04	0,827	7339	62
184								4,2E-03	5,9E-03	4,8E-03	8,1E-05	0,422	5202	77								9,4E-03	1,1E-02	5,6E-03	1,4E-04	0,825	5725	49

Annexe 37 – Résultats d'essais à 15°C et 43% d'HR – Essais à 20 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,1E-02	2,4E-02	3,4E-02	4,2E-04	0,426	1003	27	2,7E-02	2,0E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,425	1049	28	3,2E-02	3,6E-02	4,8E-02	6,2E-04	0,832	1341	24	4,0E-02	3,2E-02	3,9E-02	6,0E-04	0,833	1381	25
7	2,4E-02	1,7E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,426	1269	27	2,5E-02	2,1E-02	2,3E-02	3,8E-04	0,426	1132	25	3,5E-02	2,8E-02	3,2E-02	5,1E-04	0,833	1631	24	3,6E-02	3,3E-02	3,4E-02	5,6E-04	0,833	1481	23
10	2,1E-02	1,7E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,426	1403	27	2,3E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,427	1465	28	3,2E-02	2,8E-02	2,8E-02	4,7E-04	0,832	1766	24	3,4E-02	2,6E-02	2,5E-02	4,6E-04	0,834	1803	24
13	1,4E-02	1,6E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,426	1704	30	1,9E-02	1,4E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,426	1576	30	2,2E-02	2,5E-02	2,5E-02	3,9E-04	0,833	2138	25	2,9E-02	2,2E-02	2,6E-02	4,2E-04	0,833	1963	26
16	2,0E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,426	1633	29	1,7E-02	1,7E-02	1,7E-02	2,7E-04	0,426	1554	28	3,0E-02	2,1E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,832	2032	25	2,7E-02	2,5E-02	2,5E-02	4,3E-04	0,833	1957	24
20	1,8E-02	1,4E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,426	1778	31	1,3E-02	1,9E-02	1,3E-02	2,5E-04	0,427	1724	30	2,8E-02	2,4E-02	2,0E-02	3,8E-04	0,834	2170	26	2,2E-02	2,8E-02	2,2E-02	3,9E-04	0,833	2112	25
27	1,3E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,3E-04	0,426	1821	31	1,3E-02	1,8E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,426	1663	28	2,3E-02	2,1E-02	2,4E-02	3,7E-04	0,832	2257	25	2,2E-02	2,9E-02	2,8E-02	4,3E-04	0,833	1928	25
55	1,1E-02	1,3E-02	8,8E-03	1,7E-04	0,426	2480	37	1,5E-02	1,4E-02	9,5E-03	2,1E-04	0,426	2031	33	1,7E-02	2,1E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,833	2857	29	2,4E-02	2,3E-02	1,6E-02	3,5E-04	0,833	2412	28
85	1,0E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,4E-04	0,425	1740	30	1,1E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,425	2003	34	1,8E-02	3,1E-02	2,5E-02	4,0E-04	0,831	2066	24	1,9E-02	2,7E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,831	2322	27
119	7,6E-03	1,2E-02	1,3E-02	1,8E-04	0,426	2433	33	7,2E-03	9,2E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,426	2843	38	1,4E-02	1,9E-02	2,1E-02	2,9E-04	0,833	2900	28	1,3E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,5E-04	0,832	3277	31
157	1,4E-02	1,2E-02	9,1E-03	1,9E-04	0,426	2270	32	1,5E-02	1,0E-02	8,5E-03	1,8E-04	0,426	2315	34	2,4E-02	1,9E-02	1,6E-02	3,2E-04	0,832	2639	26	2,4E-02	1,6E-02	1,5E-02	3,0E-04	0,831	2757	28
184								1,4E-02	1,3E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,426	2081	30								2,3E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,4E-04	0,833	2482	24

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,2E-02	1,3E-02	2,0E-02	2,4E-04	0,420	1768	34	1,6E-02	1,1E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,420	1887	36	1,9E-02	2,2E-02	2,9E-02	3,8E-04	0,821	2175	30	2,4E-02	1,9E-02	2,3E-02	3,6E-04	0,824	2284	31
7	1,4E-02	9,0E-03	1,3E-02	1,9E-04	0,420	2178	34	1,4E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,2E-04	0,420	1888	31	2,1E-02	1,7E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,822	2595	29	2,2E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,5E-04	0,821	2320	28
10	1,2E-02	9,4E-03	1,1E-02	1,7E-04	0,420	2414	35	1,3E-02	7,9E-03	8,8E-03	1,6E-04	0,421	2575	38	2,0E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,821	2804	29	2,1E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,824	2902	31
13	7,6E-03	8,3E-03	8,7E-03	1,3E-04	0,420	3170	43	1,0E-02	7,2E-03	9,0E-03	1,5E-04	0,419	2866	43	1,4E-02	1,5E-02	1,6E-02	2,4E-04	0,815	3435	32	1,8E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,6E-04	0,820	3206	34
16	1,1E-02	6,5E-03	8,9E-03	1,4E-04	0,419	2899	38	9,8E-03	9,1E-03	9,1E-03	1,5E-04	0,418	2729	38	1,9E-02	1,3E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,820	3251	30	1,8E-02	1,6E-02	1,5E-02	2,6E-04	0,819	3122	31
20	1,0E-02	8,0E-03	6,3E-03	1,3E-04	0,419	3216	42	7,0E-03	1,1E-02	7,3E-03	1,4E-04	0,419	3079	42	1,7E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,4E-04	0,823	3471	32	1,3E-02	1,7E-02	1,4E-02	2,4E-04	0,820	3386	33
27	7,2E-03	6,9E-03	9,6E-03	1,3E-04	0,419	3286	40	7,2E-03	9,8E-03	8,9E-03	1,4E-04	0,417	2950	41	1,4E-02	1,2E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,821	3691	31	1,4E-02	1,7E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,819	3214	32
55	5,0E-03	6,9E-03	4,1E-03	8,7E-05	0,418	4821	54	7,8E-03	7,6E-03	4,9E-03	1,1E-04	0,417	3764	49	9,6E-03	1,3E-02	8,7E-03	1,7E-04	0,820	4802	37	1,4E-02	1,4E-02	9,7E-03	2,0E-04	0,817	3990	36
85	5,2E-03	1,2E-02	8,4E-03	1,4E-04	0,417	3056	39	5,6E-03	8,2E-03	6,2E-03	1,1E-04	0,417	3813	48	1,1E-02	1,9E-02	1,6E-02	2,5E-04	0,816	3276	30	1,1E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,816	3844	34
119	3,7E-03	6,4E-03	7,9E-03	9,7E-05	0,419	4324	43	3,6E-03	4,6E-03	5,5E-03	7,5E-05	0,419	5579	56	7,5E-03	1,1E-02	1,3E-02	1,7E-04	0,820	4748	33	6,7E-03	9,0E-03	1,0E-02	1,4E-04	0,819	5729	38
157	8,2E-03	6,4E-03	4,6E-03	1,0E-04	0,418	4055	41	8,5E-03	4,9E-03	4,1E-03	9,6E-05	0,418	4363	45	1,5E-02	1,1E-02	9,7E-03	2,0E-04	0,816	4177	30	1,5E-02	9,2E-03	8,5E-03	1,8E-04	0,816	4542	33
184								7,9E-03	7,7E-03	5,5E-03	1,2E-04	0,418	3625	35								1,5E-02	1,4E-02	1,0E-02	2,1E-04	0,818	3827	26

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	7,3E-03	8,0E-03	1,2E-02	1,5E-04	0,338	2279	42	9,6E-03	6,6E-03	8,8E-03	1,4E-04	0,338	2485	46	1,3E-02	1,4E-02	1,9E-02	2,5E-04	0,663	2703	35	1,6E-02	1,2E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,663	2887	37
7	8,7E-03	5,5E-03	8,4E-03	1,2E-04	0,339	2780	42	8,7E-03	7,9E-03	9,2E-03	1,4E-04	0,338	2399	38	1,4E-02	1,1E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,663	3184	35	1,4E-02	1,4E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,662	2858	33
10	7,8E-03	5,8E-03	6,8E-03	1,1E-04	0,338	3085	44	8,0E-03	4,9E-03	5,5E-03	1,0E-04	0,339	3375	49	1,3E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,662	3456	35	1,3E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,8E-04	0,663	3648	38
13	4,7E-03	5,1E-03	5,4E-03	8,1E-05	0,339	4156	58	6,5E-03	4,4E-03	5,6E-03	9,0E-05	0,338	3745	58	9,1E-03	9,9E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,685	4304	40	1,2E-02	8,8E-03	1,0E-02	1,7E-04	0,663	3952	42
16	7,5E-03	4,1E-03	5,5E-03	9,2E-05	0,338	3691	48	6,3E-03	5,7E-03	5,6E-03	9,7E-05	0,338	3500	50	1,3E-02	8,6E-03	9,9E-03	1,7E-04	0,662	3950	36	1,2E-02	1,0E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,662	3803	38
20	6,3E-03	5,2E-03	3,9E-03	8,3E-05	0,338	4083	54	4,3E-03	6,6E-03	4,6E-03	8,4E-05	0,338	4005	56	1,1E-02	1,0E-02	7,5E-03	1,6E-04	0,662	4248	39	8,5E-03	1,1E-02	9,2E-03	1,6E-04	0,662	4175	41
27	4,6E-03	4,2E-03	6,1E-03	8,0E-05	0,338	4220	51	4,7E-03	6,2E-03	5,6E-03	9,0E-05	0,338	3761	54	9,7E-03	7,9E-03	9,6E-03	1,5E-04	0,663	4522	38	9,3E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,7E-04	0,662	3970	39
55	3,1E-03	4,5E-03	3,0E-03	5,7E-05	0,338	5942	74	5,0E-03	4,8E-03	3,5E-03	7,3E-05	0,338	4649	66	6,2E-03	9,1E-03	5,6E-03	1,1E-04	0,662	5884	46	9,2E-03	9,2E-03	6,5E-03	1,4E-04	0,669	4921	45
85	3,2E-03	7,7E-03	5,4E-03	8,8E-05	0,337	3831	47	3,5E-03	5,1E-03	3,9E-03	6,8E-05	0,337	4947	64	7,2E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,664	3975	35	7,8E-03	9,8E-03	8,1E-03	1,4E-04	0,664	4724	42
119	2,9E-03	4,2E-03	5,3E-03	6,7E-05	0,338	5047	54	2,8E-03	2,9E-03	3,5E-03	5,0E-05	0,338	6714	75	5,0E-03	7,7E-03	9,3E-03	1,2E-04	0,661	5590	39	4,3E-03	6,1E-03	7,2E-03	9,6E-05	0,662	6884	47
157	5,6E-03	4,2E-03	3,0E-03	6,9E-05	0,338	4910	51	5,6E-03	3,1E-03	2,7E-03	6,2E-05	0,338	5415	58	1,1E-02	7,7E-03	6,6E-03	1,3E-04	0,680	5047	36	1,1E-02	6,1E-03	5,8E-03	1,2E-04	0,684	5554	39
184								5,3E-03	5,4E-03	3,5E-03	7,7E-05	0,338	4391	41								1,0E-02	1,0E-02	6,7E-03	1,5E-04	0,663	4424	30

Date	Moules à 6Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,8E-03	7,3E-03	1,1E-02	1,3E-04	0,382	2838	51	8,7E-03	6,3E-03	7,9E-03	1,3E-04	0,386	3085	57
7	7,9E-03	5,5E-03	7,9E-03	1,1E-04	0,387	3383	52	7,8E-03	7,4E-03	8,6E-03	1,3E-04	0,384	2944	47
10	7,3E-03	5,7E-03	6,5E-03	1,1E-04	0,393	3732	54	7,4E-03	5,1E-03	5,3E-03	9,7E-05	0,394	4051	63
13	4,8E-03	4,8E-03	5,2E-03	7,9E-05	0,383	4818	74	5,9E-03	4,7E-03	5,1E-03	8,6E-05	0,382	4453	74
16	7,0E-03	4,2E-03	4,9E-03	8,6E-05	0,381	4424	59	5,9E-03	5,3E-03	5,1E-03	8,9E-05	0,381	4288	63
20	5,8E-03	5,1E-03	4,3E-03	8,1E-05	0,382	4686	68	4,6E-03	5,9E-03	4,5E-03	8,2E-05	0,381	4652	72
27	4,5E-03	4,1E-03	5,6E-03	7,6E-05	0,382	5021	63	4,4E-03	5,4E-03	5,0E-03	8,1E-05	0,382	4732	69
55	3,6E-03	4,4E-03	3,8E-03	6,4E-05	0,381	5984	92	4,6E-03	4,4E-03	4,1E-03	7,2E-05	0,382	5319	84
85	3,6E-03	6,7E-03	5,0E-03	8,3E-05	0,374	4520	58	3,9E-03	4,4E-03	3,6E-03	6,5E-05	0,373	5703	79
119	3,8E-03	4,0E-03	5,1E-03	7,0E-05	0,382	5488	68	3,8E-03	3,2E-03	3,3E-03	5,6E-05	0,382	6790	93
157	5,3E-03	3,9E-03	3,3E-03	6,7E-05	0,382	5669	63	5,4E-03	3,3E-03	3,4E-03	6,6E-05	0,382	5791	71
184								4,9E-03	5,4E-03	3,3E-03	7,4E-05	0,382	5132	49

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,2E-02	1,3E-02	1,7E-02	2,2E-04	0,748	3333	41	1,4E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,748	3551	45
7	1,2E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,748	3863	41	1,2E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,749	3534	39
10	1,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,748	4184	42	1,2E-02	1,0E-02	9,6E-03	1,7E-04	0,756	4371	46
13	8,6E-03	9,2E-03	9,9E-03	1,5E-04	0,752	5059	49	1,1E-02	8,3E-03	9,3E-03	1,5E-04	0,750	4869	52
16	1,2E-02	8,4E-03	9,0E-03	1,6E-04	0,749	4736	44	1,1E-02	9,7E-03	8,5E-03	1,6E-04	0,751	4704	47
20	1,1E-02	9,9E-03	7,5E-03	1,5E-04	0,749	4956	47	8,2E-03	1,0E-02	8,8E-03	1,5E-04	0,749	5040	51
27	9,5E-03	7,6E-03	8,9E-03	1,4E-04	0,749	5343	46	8,9E-03	9,8E-03	9,3E-03	1,5E-04	0,749	4907	48
55	6,0E-03	9,0E-03	5,6E-03	1,1E-04	0,748	6769	56	8,5E-03	8,6E-03	6,1E-03	1,3E-04	0,751	5921	56
85	6,7E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,5E-04	0,728	4746	41	7,2E-03	8,7E-03	7,7E-03	1,3E-04	0,727	5650	50
119	4,8E-03	7,4E-03	9,2E-03	1,2E-04	0,750	6506	47	4,6E-03	6,0E-03	7,0E-03	9,6E-05	0,749	7770	57
157	1,0E-02	7,4E-03	6,5E-03	1,3E-04	0,751	5761	42	1,0E-02	5,8E-03	5,6E-03	1,2E-04	0,751	6351	47
184								1,0E-02	1,1E-02	6,3E-03	1,5E-04	0,751	5084	35

Date	Moules à 10Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	6,2E-03	6,6E-03	9,9E-03	1,2E-04	0,422	3474	62	7,8E-03	5,6E-03	6,9E-03	1,1E-04	0,422	3810	69
7	7,1E-03	4,9E-03	7,4E-03	1,0E-04	0,423	4040	63	7,1E-03	6,9E-03	8,2E-03	1,2E-04	0,422	3477	57
10	6,5E-03	5,1E-03	6,1E-03	9,5E-05	0,422	4446	66	6,6E-03	5,0E-03	4,8E-03	8,9E-05	0,423	4730	77
13	5,0E-03	5,0E-03	5,0E-03	8,1E-05	0,423	5228	89	5,6E-03	5,2E-03	5,3E-03	8,8E-05	0,422	4774	90
16	6,8E-03	4,6E-03	4,9E-03	8,8E-05	0,422	4820	72	5,6E-03	5,2E-03	5,2E-03	8,7E-05	0,423	4840	76
20	5,5E-03	4,9E-03	4,7E-03	8,1E-05	0,422	5212	81	5,0E-03	5,8E-03	4,8E-03	8,5E-05	0,422	4969	87
27	4,5E-03	4,2E-03	5,4E-03	7,6E-05	0,422	5567	76	4,9E-03	5,3E-03	4,8E-03	8,2E-05	0,422	5161	83
55	4,2E-03	4,3E-03	4,5E-03	7,0E-05	0,423	6046	105	4,8E-03	4,5E-03	4,9E-03	7,8E-05	0,422	5411	99
85	4,0E-03	6,0E-03	4,7E-03	7,9E-05	0,384	4829	69	4,3E-03	4,3E-03	3,8E-03	6,7E-05	0,383	5683	91
119	4,6E-03	4,3E-03	5,3E-03	7,6E-05	0,422	5538	80	4,4E-03	3,7E-03	3,5E-03	6,4E-05	0,422	6627	104
157	5,4E-03	4,3E-03	3,9E-03	7,3E-05	0,421	5751	75	5,5E-03	3,7E-03	4,0E-03	7,2E-05	0,422	5841	84
184								4,9E-03	5,6E-03	3,6E-03	7,7E-05	0,421	5475	59

Date	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,2E-02	1,3E-02	1,6E-02	2,2E-04	0,826	3747	48	1,4E-02	1,1E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,829	4040	53
7	1,2E-02	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,827	4403	49	1,2E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,826	3983	46
10	1,2E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,829	4592	50	1,1E-02	9,7E-03	9,2E-03	1,7E-04	0,827	4987	56
13	8,5E-03	9,0E-03	9,8E-03	1,5E-04	0,827	5634	59	1,1E-02	8,1E-03	8,9E-03	1,5E-04	0,829	5479	63
16	1,2E-02	8,2E-03	9,2E-03	1,6E-04	0,826	5183	52	1,1E-02	9,6E-03	8,4E-03	1,6E-04	0,825	5168	56
20	1,1E-02	9,9E-03	7,1E-03	1,5E-04	0,826	5551	56	7,8E-03	9,9E-03	8,6E-03	1,4E-04	0,826	5741	61
27	9,6E-03	7,5E-03	8,9E-03	1,4E-04	0,826	5904	54	8,8E-03	9,6E-03	9,0E-03	1,5E-04	0,826	5504	57
55	6,0E-03	9,2E-03	5,8E-03	1,1E-04	0,827	7342	66	8,6E-03	8,7E-03	6,6E-03	1,3E-04	0,827	6333	67
85	6,8E-03	1,1E-02	1,0E-02	1,5E-04	0,761	5062	47	7,3E-03	8,5E-03	7,8E-03	1,3E-04	0,765	5930	57
119	5,5E-03	7,6E-03	9,5E-03	1,2E-04	0,824	6768	55	5,5E-03	6,2E-03	7,5E-03	1,0E-04	0,826	7878	67
157	1,1E-02	7,3E-03	6,5E-03	1,3E-04	0,827	6272	50	1,1E-02	6,0E-03	5,6E-03	1,2E-04	0,827	6732	56
184								1,1E-02	1,1E-02	6,7E-03	1,6E-04	0,827	5296	41

Annexe 38 – Résultats d'essais à 15°C et 43% d'HR – Essais à 35 °C

Date	Moules à 0,1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	3,1E-02	3,8E-02	3,7E-02	5,7E-04	0,426	745	22	2,9E-02	4,0E-02	3,0E-02	5,4E-04	0,426	786	22	5,0E-02	5,4E-02	5,6E-02	8,6E-04	0,833	963	20	4,6E-02	6,0E-02	4,6E-02	8,3E-04	0,833	1004	20
7	3,6E-02	2,7E-02	2,7E-02	4,9E-04	0,426	878	22	3,1E-02	3,1E-02	2,9E-02	5,0E-04	0,426	852	21	5,5E-02	4,8E-02	4,4E-02	7,9E-04	0,833	1060	19	4,7E-02	4,9E-02	4,6E-02	7,8E-04	0,834	1068	19
10	3,8E-02	1,9E-02	2,9E-02	4,6E-04	0,426	924	22	3,4E-02	2,3E-02	2,5E-02	4,4E-04	0,426	966	22	5,4E-02	3,4E-02	4,7E-02	7,2E-04	0,833	1151	20	5,0E-02	3,8E-02	4,1E-02	7,0E-04	0,833	1184	20
13	2,7E-02	2,7E-02	2,9E-02	4,4E-04	0,426	963	22	2,3E-02	3,2E-02	3,0E-02	4,7E-04	0,426	916	21	4,3E-02	4,2E-02	4,2E-02	6,8E-04	0,832	1224	19	3,8E-02	4,8E-02	4,5E-02	7,1E-04	0,832	1166	19
16	2,6E-02	2,5E-02	2,6E-02	4,1E-04	0,427	1031	23	2,2E-02	2,6E-02	3,0E-02	4,3E-04	0,426	1002	22	4,0E-02	3,9E-02	4,0E-02	6,4E-04	0,833	1296	20	3,6E-02	4,2E-02	4,4E-02	6,7E-04	0,833	1242	19
20	2,5E-02	3,0E-02	2,7E-02	4,4E-04	0,427	971	21	2,3E-02	2,5E-02	3,9E-02	4,8E-04	0,426	895	20	3,9E-02	4,4E-02	4,2E-02	6,8E-04	0,833	1233	19	3,9E-02	3,6E-02	5,6E-02	7,2E-04	0,833	1164	18
27	2,2E-02	2,3E-02	2,7E-02	3,9E-04	0,426	1103	23	2,2E-02	2,5E-02	2,7E-02	4,1E-04	0,427	1045	21	3,5E-02	3,7E-02	4,1E-02	6,1E-04	0,833	1364	20	3,6E-02	4,0E-02	4,2E-02	6,5E-04	0,833	1289	19
55	1,8E-02	2,9E-02	2,2E-02	3,7E-04	0,426	1141	24	2,0E-02	2,8E-02	2,1E-02	3,8E-04	0,426	1127	24	3,0E-02	4,3E-02	3,4E-02	5,8E-04	0,833	1439	21	3,2E-02	4,4E-02	3,4E-02	6,0E-04	0,833	1382	21
85	1,5E-02	1,8E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,425	1514	27	1,4E-02	2,2E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,425	1389	27	2,6E-02	2,8E-02	3,2E-02	4,6E-04	0,831	1789	23	2,3E-02	3,4E-02	3,3E-02	4,9E-04	0,831	1690	23
119	1,3E-02	2,1E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,426	1544	27	1,1E-02	1,9E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,426	1545	28	2,2E-02	3,2E-02	2,7E-02	4,3E-04	0,833	1920	23	2,1E-02	2,9E-02	3,0E-02	4,4E-04	0,833	1908	24
157	2,4E-02	2,0E-02	1,5E-02	3,1E-04	0,426	1362	25	2,2E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,2E-04	0,425	1311	24	3,9E-02	3,0E-02	2,4E-02	5,0E-04	0,832	1677	21	3,3E-02	3,1E-02	3,0E-02	5,2E-04	0,832	1613	21
184	2,4E-02	2,1E-02	1,4E-02	3,2E-04	0,426	1322	25	2,1E-02	2,0E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,426	1316	25	3,6E-02	3,4E-02	2,3E-02	5,0E-04	0,833	1658	22	3,3E-02	3,1E-02	3,0E-02	5,1E-04	0,832	1631	22

Date	Moules à 1Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,1E-02	2,4E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,418	1119	28	1,8E-02	2,7E-02	2,0E-02	3,6E-04	0,420	1182	29	3,5E-02	3,6E-02	3,9E-02	5,9E-04	0,821	1380	25	3,1E-02	4,1E-02	3,2E-02	5,7E-04	0,821	1446	26
7	2,4E-02	1,8E-02	1,8E-02	3,2E-04	0,420	1296	28	2,0E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,420	1251	27	3,5E-02	3,2E-02	2,8E-02	5,1E-04	0,821	1601	25	3,2E-02	3,5E-02	3,3E-02	5,5E-04	0,823	1500	25
10	2,5E-02	1,2E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,420	1366	28	2,2E-02	1,4E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,418	1450	29	3,7E-02	2,4E-02	3,3E-02	5,1E-04	0,820	1615	25	3,6E-02	2,6E-02	2,9E-02	4,9E-04	0,820	1665	25
13	1,8E-02	1,8E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,419	1428	27	1,5E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,418	1370	28	3,0E-02	3,0E-02	2,9E-02	4,8E-04	0,820	1717	24	2,6E-02	3,3E-02	3,2E-02	5,0E-04	0,816	1639	24
16	1,6E-02	1,6E-02	1,7E-02	2,6E-04	0,416	1581	30	1,4E-02	1,7E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,418	1506	29	2,8E-02	2,7E-02	2,8E-02	4,5E-04	0,815	1823	25	2,5E-02	3,0E-02	3,2E-02	4,7E-04	0,820	1744	25
20	1,6E-02	2,0E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,420	1416	26	1,5E-02	1,7E-02	2,8E-02	3,3E-04	0,419	1284	25	2,8E-02	3,1E-02	3,1E-02	4,8E-04	0,819	1698	23	2,8E-02	2,5E-02	4,0E-02	5,1E-04	0,817	1593	23
27	1,4E-02	1,5E-02	1,8E-02	2,5E-04	0,419	1665	29	1,5E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,7E-04	0,419	1536	28	2,6E-02	2,6E-02	2,9E-02	4,3E-04	0,822	1896	24	2,6E-02	2,8E-02	3,0E-02	4,6E-04	0,822	1782	24
55	1,1E-02	1,9E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,417	1795	31	1,2E-02	1,9E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,418	1767	31	2,0E-02	3,1E-02	2,3E-02	4,0E-04	0,821	2061	26	2,1E-02	3,1E-02	2,2E-02	4,1E-04	0,815	1984	26
85	7,9E-03	9,7E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,417	2654	36	7,4E-03	1,3E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,417	2382	37	1,5E-02	1,7E-02	2,0E-02	2,8E-04	0,819	2938	28	1,5E-02	2,2E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,818	2572	29
119	7,0E-03	1,3E-02	9,8E-03	1,6E-04	0,419	2620	35	6,3E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,6E-04	0,419	2646	36	1,4E-02	2,2E-02	1,7E-02	2,8E-04	0,819	2925	28	1,3E-02	1,8E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,821	2941	29
157	1,5E-02	1,2E-02	8,2E-03	1,9E-04	0,416	2210	33	1,4E-02	1,1E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,417	2136	32	2,7E-02	2,0E-02	1,6E-02	3,3E-04	0,817	2453	26	2,3E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,819	2381	26
184	1,5E-02	1,3E-02	7,9E-03	2,0E-04	0,419	2135	33	1,3E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,420	2161	33	2,5E-02	2,3E-02	1,5E-02	3,3E-04	0,819	2447	28	2,2E-02	1,9E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,820	2430	28

Date	Moules à 3Hz																								
	4,6 kN													9 kN											
	Moule 5							Moule 6							Moule 5							Moule 6			
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,4E-02	1,5E-02	1,7E-02	2,5E-04	0,338	1373	33	1,2E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,339	1487	35	2,3E-02	2,4E-02	2,7E-02	4,0E-04	0,663	1671	29	2,0E-02	2,7E-02	2,1E-02	3,8E-04	0,662	1761	29
7	1,6E-02	1,2E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,339	1595	33	1,3E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,339	1555	33	2,3E-02	2,1E-02	1,8E-02	3,3E-04	0,649	1940	25	2,1E-02	2,4E-02	2,3E-02	3,7E-04	0,662	1810	29
10	1,7E-02	7,9E-03	1,3E-02	2,0E-04	0,338	1663	34	1,5E-02	9,2E-03	1,1E-02	1,9E-04	0,338	1772	36	2,5E-02	1,7E-02	2,3E-02	3,5E-04	0,661	1901	29	2,5E-02	1,7E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,662	1972	30
13	1,2E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,338	1732	32	9,8E-03	1,4E-02	1,4E-02	2,0E-04	0,339	1675	34	2,1E-02	2,0E-02	2,0E-02	3,3E-04	0,662	2016	28	1,8E-02	2,3E-02	2,2E-02	3,4E-04	0,673	1979	29
16	1,1E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,345	1968	37	9,0E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,8E-04	0,338	1848	36	1,9E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,682	2209	29	1,7E-02	2,0E-02	2,2E-02	3,2E-04	0,662	2076	30
20	1,1E-02	1,3E-02	1,3E-02	2,0E-04	0,338	1699	31	1,0E-02	1,0E-02	1,9E-02	2,1E-04	0,338	1576	30	1,9E-02	2,1E-02	2,2E-02	3,3E-04	0,661	1979	27	2,0E-02	1,7E-02	2,8E-02	3,5E-04	0,664	1877	27
27	9,9E-03	9,6E-03	1,2E-02	1,7E-04	0,338	2019	35	1,0E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,339	1864	33	1,8E-02	1,8E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,662	2233	28	1,8E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,662	2107	28
55	7,1E-03	1,3E-02	8,6E-03	1,6E-04	0,341	2191	37	7,7E-03	1,3E-02	8,1E-03	1,6E-04	0,338	2173	39	1,3E-02	2,1E-02	1,6E-02	2,7E-04	0,662	2453	30	1,5E-02	2,2E-02	1,5E-02	2,8E-04	0,685	2435	31
85	5,0E-03	6,1E-03	7,6E-03	1,0E-04	0,337	3356	45	4,6E-03	8,4E-03	7,4E-03	1,1E-04	0,337	3024	46	9,6E-03	1,1E-02	1,3E-02	1,8E-04	0,647	3596	24	9,5E-03	1,4E-02	1,5E-02	2,1E-04	0,659	3121	34
119	4,3E-03	8,8E-03	6,2E-03	1,0E-04	0,338	3263	43	3,9E-03	7,1E-03	7,7E-03	1,0E-04	0,339	3318	43	9,1E-03	1,5E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,663	3475	33	8,6E-03	1,2E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,663	3535	34
157	1,1E-02	7,4E-03	5,3E-03	1,3E-04	0,342	2717	40	9,1E-03	7,5E-03	6,9E-03	1,3E-04	0,340	2637	39	1,9E-02	1,3E-02	1,0E-02	2,3E-04	0,667	2913	31	1,6E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,4E-04	0,662	2817	31
184	1,0E-02	8,7E-03	4,9E-03	1,3E-04	0,338	2653	41	8,5E-03	7,3E-03	7,1E-03	1,2E-04	0,338	2708	41	1,7E-02	1,6E-02	9,7E-03	2,3E-04	0,661	2913	32	1,5E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,3E-04	0,662	2887	32

Date	Moules à 6Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,3E-02	1,4E-02	1,5E-02	2,2E-04	0,382	1703	39	1,1E-02	1,6E-02	1,2E-02	2,1E-04	0,385	1827	42
7	1,5E-02	1,1E-02	1,1E-02	2,0E-04	0,390	1931	40	1,2E-02	1,4E-02	1,3E-02	2,2E-04	0,404	1869	40
10	1,5E-02	7,4E-03	1,2E-02	1,9E-04	0,381	2020	41	1,4E-02	8,1E-03	9,7E-03	1,7E-04	0,381	2219	44
13	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,382	2116	39	8,8E-03	1,2E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,381	2087	41
16	9,9E-03	9,4E-03	1,0E-02	1,6E-04	0,381	2407	44	8,0E-03	1,0E-02	1,2E-02	1,7E-04	0,382	2294	44
20	1,0E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,383	2021	37	9,3E-03	9,0E-03	1,8E-02	2,0E-04	0,381	1909	36
27	9,3E-03	8,8E-03	1,1E-02	1,5E-04	0,382	2471	42	9,5E-03	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,381	2257	40
55	6,4E-03	1,2E-02	7,7E-03	1,4E-04	0,382	2706	45	6,8E-03	1,2E-02	7,1E-03	1,4E-04	0,382	2715	47
85	4,4E-03	5,3E-03	6,8E-03	8,9E-05	0,373	4179	56	4,2E-03	7,3E-03	6,5E-03	9,8E-05	0,373	3794	56
119	4,2E-03	8,3E-03	5,7E-03	9,8E-05	0,382	3916	53	3,9E-03	6,6E-03	7,1E-03	9,7E-05	0,382	3951	53
157	1,0E-02	6,4E-03	4,8E-03	1,1E-04	0,382	3344	49	8,5E-03	6,8E-03	6,1E-03	1,2E-04	0,382	3272	47
184	9,5E-03	8,2E-03	4,6E-03	1,2E-04	0,381	3183	49	8,1E-03	6,8E-03	6,7E-03	1,2E-04	0,386	3273	49

Date	Moules à 6Hz													
	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,2E-02	2,2E-02	2,5E-02	3,7E-04	0,749	2042	33	1,8E-02	2,5E-02	2,0E-02	3,4E-04	0,749	2179	34
7	1,6E-02	1,5E-02	1,3E-02	2,3E-04	0,483	2080	37	1,9E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,4E-04	0,749	2192	34
10	2,3E-02	1,5E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,749	2317	33	2,3E-02	1,6E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,749	2423	35
13	1,9E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,1E-04	0,748	2433	32	1,6E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,751	2393	34
16	1,8E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,751	2587	34	1,5E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,0E-04	0,748	2509	35
20	1,8E-02	2,0E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,749	2363	31	1,9E-02	1,5E-02	2,7E-02	3,3E-04	0,749	2252	31
27	1,7E-02	1,7E-02	1,9E-02	2,8E-04	0,748	2637	33	1,7E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,0E-04	0,748	2495	33
55	1,2E-02	2,0E-02	1,5E-02	2,5E-04	0,748	2934	35	1,3E-02	2,1E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,752	2882	36
85								8,9E-03	1,3E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,724	3729	40
119	8,6E-03	1,4E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,749	4144	39	8,4E-03	1,2E-02	1,3E-02	1,8E-04	0,749	4192	40
157	1,8E-02	1,2E-02	9,9E-03	2,2E-04	0,750	3450	36	1,5E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,749	3399	36
184	1,6E-02	1,5E-02	9,2E-03	2,2E-04	0,749	3485	38	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,748	3536	38

Date	Moules à 10Hz													
	4,6 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	1,2E-02	1,3E-02	1,4E-02	2,1E-04	0,422	1993	46	9,9E-03	1,4E-02	1,1E-02	1,9E-04	0,422	2195	50
7	1,4E-02	1,0E-02	9,9E-03	1,8E-04	0,421	2309	48	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,9E-04	0,422	2217	48
10	1,4E-02	7,0E-03	1,2E-02	1,8E-04	0,422	2370	48	1,3E-02	7,6E-03	9,2E-03	1,6E-04	0,422	2606	53
13	1,0E-02	1,0E-02	1,1E-02	1,7E-04	0,422	2465	46	8,3E-03	1,1E-02	1,2E-02	1,7E-04	0,422	2448	49
16	9,5E-03	9,1E-03	9,8E-03	1,5E-04	0,422	2772	53	7,6E-03	9,4E-03	1,2E-02	1,6E-04	0,422	2697	53
20	9,9E-03	1,2E-02	1,2E-02	1,8E-04	0,421	2319	43	8,8E-03	8,6E-03	1,8E-02	1,9E-04	0,422	2200	43
27	9,0E-03	8,5E-03	1,0E-02	1,5E-04	0,421	2831	50	9,1E-03	9,7E-03	1,1E-02	1,6E-04	0,422	2621	48
55	6,1E-03	1,2E-02	7,4E-03	1,4E-04	0,422	3084	53	6,4E-03	1,1E-02	6,8E-03	1,3E-04	0,422	3152	56
85	4,2E-03	4,9E-03	6,2E-03	8,2E-05	0,383	4648	66	4,3E-03	6,6E-03	6,0E-03	9,2E-05	0,385	4190	67
119	4,7E-03	7,9E-03	5,4E-03	9,7E-05	0,423	4374	64	4,5E-03	6,5E-03	6,8E-03	9,7E-05	0,422	4351	63
157	1,0E-02	6,2E-03	4,8E-03	1,1E-04	0,421	3726	58	8,3E-03	6,6E-03	5,9E-03	1,1E-04	0,422	3700	56
184	9,1E-03	7,9E-03	4,9E-03	1,2E-04	0,422	3574	59	7,6E-03	6,1E-03	6,2E-03	1,1E-04	0,422	3864	59

Date	Moules à 10Hz													
	9 kN													
	Moule 5							Moule 6						
	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ	Δ dépl 3	Δ dépl 2	Δ dépl 1	Δ Déf	Δ contr	E	ϕ
2	2,2E-02	2,2E-02	2,4E-02	3,6E-04	0,827	2272	38	1,8E-02	2,5E-02	1,9E-02	3,4E-04	0,828	2445	40
7	1,9E-02	1,9E-02	1,6E-02	2,9E-04	0,746	2567	39	1,8E-02	2,2E-02	2,1E-02	3,3E-04	0,827	2503	39
10	2,3E-02	1,6E-02	2,1E-02	3,2E-04	0,827	2595	39	2,2E-02	1,5E-02	1,8E-02	3,0E-04	0,826	2722	41
13	1,9E-02	1,9E-02	1,8E-02	3,1E-04	0,827	2703	38	1,6E-02	2,1E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,826	2653	39
16	1,8E-02	1,8E-02	1,8E-02	2,9E-04	0,826	2891	40	1,5E-02	1,8E-02	2,0E-02	2,9E-04	0,826	2818	41
20	1,8E-02	1,9E-02	2,0E-02	3,1E-04	0,825	2665	36	1,9E-02	1,5E-02	2,7E-02	3,3E-04	0,825	2533	37
27	1,7E-02	1,7E-02	1,8E-02	2,8E-04	0,825	2981	39	1,7E-02	1,8E-02	1,9E-02	2,9E-04	0,826	2809	38
55	1,2E-02	2,0E-02	1,4E-02	2,5E-04	0,826	3289	41	1,3E-02	2,1E-02	1,4E-02	2,6E-04	0,827	3176	42
85	3,8E-03	4,3E-03	5,2E-03	7,2E-05	0,299	4183	39	8,6E-03	1,3E-02	1,3E-02	1,9E-04	0,763	4075	46
119	8,4E-03	1,5E-02	1,1E-02	1,8E-04	0,826	4528	46	8,3E-03	1,2E-02	1,3E-02	1,8E-04	0,826	4647	47
157	1,8E-02	1,2E-02	9,6E-03	2,1E-04	0,825	3852	43	1,5E-02	1,3E-02	1,2E-02	2,2E-04	0,827	3748	42
184	1,6E-02	1,5E-02	8,9E-03	2,1E-04	0,827	3895	45	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	2,1E-04	0,826	3876	45