

École polytechnique de Louvain

Development of a new eco-circular composite material for construction application:

SPALCO

Auteurs : Eloïse DENIS & Alexis MASARWEH

Promoteur : Thomas PARDOEN

Lecteurs : Pierre BOLLEN, Mélanie HORVATH, Joao PACHECO DE ALMEIDA, Hadrien RATTEZ

Année académique 2021–2022

Master [120] : ingénieur civil des constructions

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous souhaitons remercier chacune des personnes qui nous ont accompagné dans le processus qui a mené à la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons tout d'abord à exprimer sincèrement toute notre reconnaissance à Monsieur Thomas Pardoën, notre promoteur, pour ses conseils précieux, son suivi régulier et constructif, sa confiance en nous et son optimisme tout au long de l'encadrement de notre TFE.

Nous tenons à remercier également Mélanie Horvath, doctorante, qui nous a suivis et encadrés au quotidien durant toute l'année et avec qui nous avons collaboré à la réalisation des essais en laboratoire. Merci également pour sa relecture attentive.

Merci aussi à Pierre Bollen pour le temps qu'il nous a accordé, pour son suivi et ses conseils.

Nous tenons aussi à remercier le LEMSC et particulièrement Vincent, Quentin et Alex pour leur aide et leur soutien durant tous nos essais au laboratoire.

Un grand merci également à Hadrien Rattiez et Charline Van Innis pour leur disponibilité et leurs conseils quant à la modélisation du comportement du SPALCO et à la réalisation du modèle numérique.

Enfin, ces remerciements ne pourraient s'achever sans une pensée chaleureuse envers nos parents, frères et sœurs, amis et colocataires pour leur soutien infaillible, leurs encouragements et leurs relectures.

1	CONTEXTE	8
1.1	INTRODUCTION	8
1.1.1	Contexte actuel	8
1.1.2	SPALCO	9
1.2	ETAT DE L'ART	10
1.2.1	Les éco-matériaux	10
1.2.2	Application - Chapes	13
1.2.3	Propriétés visées pour le SPALCO	14
2	MATERIAUX & METHODES EXPERIMENTALES	16
2.1	ELABORATION DU MATÉRIAU	16
2.1.1	Méthode de la marinade	17
2.1.2	Méthode risotto	18
2.1.3	Formes d'échantillons	19
2.1.4	Méthode de recyclage	20
2.2	LES DIFFÉRENTES COMPOSITIONS DU MATÉRIAU	20
2.2.1	Explications des paramètres et nomenclature	20
2.2.2	Récapitulatif des différentes compositions	22
2.3	ESSAIS MÉCANIQUES	23
2.3.1	Flexion 4 points avec DIC	23
2.3.2	Compression uni-axiale	25
2.3.3	Essais de fluage	28
2.3.4	Essais de poinçonnement	28
2.4	ESSAIS D'ISOLATION	30
2.4.1	Isolation acoustique	30
2.4.2	Isolation thermique	33
3	RESULTATS EXPERIMENTAUX	35
3.1	FLEXION 4 POINTS + DIC	35
3.1.1	Traitement des résultats	35
3.1.2	Resultats par composition	38
3.1.3	Boxplot récapitulatifs	42
3.1.4	Discussion sur la méthodologie	42
3.2	COMPRESSION UNI-AXIALE	43
3.2.1	Traitement des résultats	43
3.2.2	Resultats par composition	47
3.2.3	Boxplot récapitulatifs	52
3.2.4	Discussion sur la méthodologie	55
3.3	ESSAIS DE FLUAGE	56
3.3.1	Traitement des résultats	56
3.3.2	Résultats	57
3.3.3	Modèle de fluage	58
3.3.4	Discussion sur la méthodologie	61
3.4	ESSAIS DE POINÇONNEMENT	62
3.4.1	Présentation des résultats	62
3.4.2	Loi de Hertz	64

3.4.3	<i>Discussion sur la méthodologie</i>	65
3.5	SÉCHAGE DES ÉCHANTILLONS.....	66
3.5.1	<i>Résultats par composition</i>	66
3.5.2	<i>Vue d'ensemble</i>	68
3.6	DENSITÉ.....	69
3.7	ISOLATION ACOUSTIQUE	70
3.7.1	<i>Bruits Aériens</i>	70
3.7.2	<i>Bruits de choc</i>	74
3.7.3	<i>Discussion sur la méthodologie</i>	75
3.8	ISOLATION THERMIQUE	76
3.8.1	<i>Traitement des résultats</i>	76
3.8.2	<i>Graphe récapitulatif</i>	77
3.8.3	<i>Discussion sur la méthodologie</i> :.....	77
3.9	CARACTERISATION PAR MICROTOMOGRAPHIE AUX RAYONS X (ALEXANDRE DE BRIEY).....	78
3.9.1	<i>Traitement des résultats</i>	78
3.9.2	<i>Résultats par composition</i>	78
3.9.3	<i>Résultats chiffrés</i>	80
4	MODELE NUMERIQUE (ABAQUS)	81
4.1	EVOLUTION DU MODÈLE.....	81
4.1.1	<i>Modèle de base Mohr-Coulomb</i>	81
4.1.2	<i>Amélioration de Mohr-Coulomb en compression</i>	83
4.1.3	<i>Amélioration du modèle en flexion</i>	84
4.2	MODÈLES DÉFINITIFS.....	89
4.2.1	<i>Modèle de compression</i>	89
4.2.2	<i>Modèle de flexion 4 points</i>	90
4.2.3	<i>Comportement global du SPALCO</i>	91
4.3	AMÉLIORATIONS DU MODÈLE	92
5	DISCUSSION	93
5.1	MECANISMES DE DEFORMATION ET RUPTURE : FONCTIONNEMENT DU COMPOSITE.....	93
5.2	ANALYSE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES PROPRIETES DE SPALCO	98
5.2.1	<i>Analyse des essais</i>	98
5.2.2	<i>Récapitulatif de l'influence des paramètres</i>	106
5.2.3	<i>Cartes : Situation du SPALCO</i>	108
5.3	COMPOSITION IDEALE	111
5.3.1	<i>Calcul de la meilleure composition</i>	111
5.3.2	<i>Suggestion de la composition idéale</i>	112
5.4	AMÉLIORATIONS.....	113
6	CONCLUSION.....	114
7	BIBLIOGRAPHIE	116
8	ANNEXES.....	120
I.	DEMONSTRATION CALCUL DES DEFORMATIONS EN FLEXION	120
II.	TABLEAU COMPLEMENTAIRE – ANALYSE DES COMPOSITIONS	122
III.	FLUAGE - RESULTATS COMPLETS ET DETAILLES	124
IV.	DENSITE – RESULTATS DETAILLES	125
V.	COMPORTEMENT DU COMPOSITE - ANALOGIE	127
VI.	FLEXION : GRAPHES FORCE-DEPLACEMENT	129
VII.	MOHR-COULOMB : DEMONSTRATION	133

1 CONTEXTE

1.1 INTRODUCTION

1.1.1 CONTEXTE ACTUEL

En Europe, le secteur de la construction et l'ensemble du bâti sont responsables de 36% de la consommation d'énergie et 37% des émissions de gaz à effet de serre. Le changement climatique et les dérèglements qu'il entraîne ainsi que l'urgence de réduire l'impact de la vie humaine sur son environnement ne sont plus à présenter.

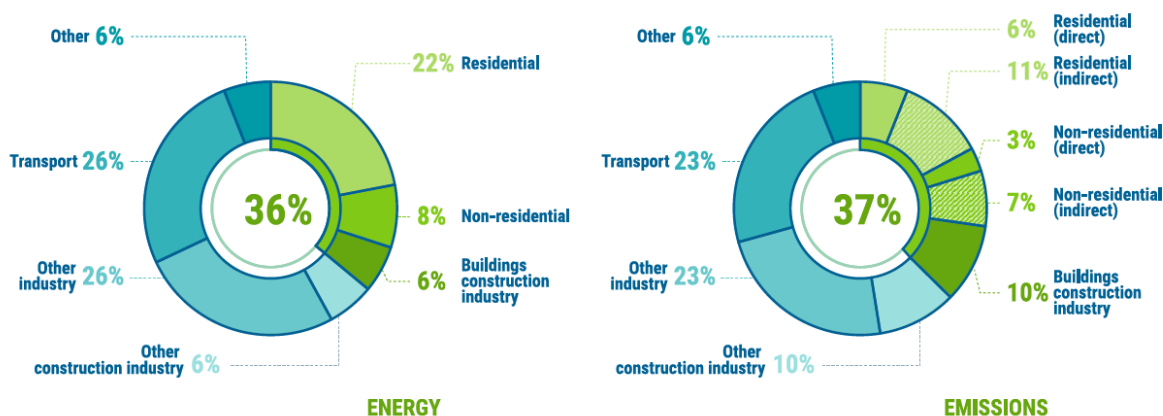


Figure 1.1-1 : Buildings and construction's share of global final energy and energy-related CO2 emissions, 2020 [1]

C'est dans ce contexte qu'a été adopté le *Green Deal* Européen [2] qui fixe une ligne de conduite et des objectifs à l'échelle européenne. Le but est de décarboner l'ensemble du parc de bâtiments européen d'ici 2050. Une des étapes intermédiaires stipule que tous les bâtiments construits après 2030 devront obligatoirement être neutres dans leur impact sur l'environnement. L'empreinte carbone des matériaux utilisés et leur performance énergétique deviendront rapidement des critères essentiels lors de la sélection des matériaux en amont d'un chantier.

En plus des deux échéances présentées ci-dessus, le *Green Deal* ambitionne d'éradiquer la « pauvreté énergétique ». La pauvreté énergétique est le fait que les personnes ayant un bas revenu ont uniquement accès aux bâtiments les moins performants sur le plan énergétique car ceux-ci sont moins cher. Dès lors, ces mêmes personnes qui rencontrent des difficultés financières se retrouvent avec des factures d'énergie conséquentes alors qu'ils ont déjà des moyens limités. Pour ce faire, tous les bâtiments ayant un PEB G devront être rénovés pour augmenter leurs performances avant 2027. Pour atteindre ces objectifs, le besoin en matériaux alliant une faible empreinte carbone avec des bonnes performances énergétiques (isolation thermique) et un coût maîtrisé va augmenter.

La rénovation aura une place essentielle dans ce *Green Deal* puisque 85% des bâtiments actuels seront toujours debout en 2050. La seule solution pour atteindre les objectifs sera donc de les rénover et d'améliorer leurs performances énergétiques.

Une des pistes pour diminuer l'impact environnemental des matériaux de construction est la circularité : implémenter une logique de réutilisation et de recyclage des matériaux est indispensable. En effet, près de 50% des ressources extraites dans le monde sont destinées au secteur de la construction [3]. De plus, ce même secteur est responsable de 35% de la production de déchets en Europe. Ajoutons à cela le fait que les phases d'extraction et production des matériaux ainsi que la démolition des bâtiments sont responsables de 5 à 12% des émissions de gaz à effet de serre annuelles de chaque pays. Au regard de ces chiffres, le potentiel de l'économie

circulaire est évident : réemployer des matériaux issus de la démolition des bâtiments permettra à la fois de diminuer l'extraction de matières premières, la production de déchets et les émissions de gaz à effet de serre du secteur.

1.1.2 SPALCO

Le matériau qui fait l'objet de ce mémoire, SPALCO, tente de répondre aux différents défis énoncés ci-dessus. SPALCO est l'acronyme de Sand-Paper-Lime Composite. Ce nom résume en 6 lettres les composants principaux du matériau : en effet, SPALCO est un matériau de construction composite fait de sable, de chaux et de papier.

Afin de limiter l'utilisation des ressources nécessaires à sa fabrication, un maximum des composants intervenant dans le processus sont des déchets qui seront, ici, revalorisés : le sable employé est issu du concassage du béton ou de maçonnerie de démolition tandis que le papier est issu d'une filière de recyclage. Seule la chaux est un matériaux « neuf », qui est extrait et transformé localement en Belgique. SPALCO s'ancre donc dans une logique d'économie locale et circulaire afin de concevoir un matériau efficient tout en minimisant l'utilisation des ressources.

L'association de ces 3 matières premières permet de produire un matériau cohérent et relativement solide, sous forme de briques ou de dalles, pour diverses utilisations. Les applications considérées jusqu'à présent sont : les chapes sèches sous forme de dalles, l'isolation de mur de façade et les cloisons intérieures.

L'objectif principal est de développer un matériau de construction autoportant, correspondant au principe de l'éco-circularité et avec des propriétés d'isolation thermique et acoustique intéressantes. De plus, l'origine des matières premières et le processus de fabrication font l'objet d'une attention particulière pour minimiser l'énergie grise de SPALCO. L'énergie grise est l'ensemble de l'énergie nécessaire à l'extraction des matières premières, à leur transport et au processus de fabrication pour obtenir un produit fini. L'énergie nécessaire à sa fin de vie (recyclage) est également prise en compte dans l'énergie grise. En somme, l'énergie nécessaire au cycle de vie du matériau que le client final ne perçoit pas.

Ce mémoire traite d'une première approche d'exploration du matériau : dans un premier temps, les éco-matériaux répondant aux défis détaillés dans l'introduction sont présentés, avec leurs avantages, inconvénients et leurs caractéristiques techniques. Par la suite, les objectifs de SPALCO sont présentés, en regard des performances techniques des matériaux comparables.

La partie expérimentale de ce mémoire a pour objectif de tester et comparer diverses compositions pour définir l'influence des multiples paramètres et trouver les compositions qui optimisent les différents critères cités ci-dessus. Des essais en laboratoire ont permis de quantifier les performances mécaniques, mais aussi acoustiques ou thermiques du matériau. Enfin, pour deux des compositions, un modèle constitutif est élaboré sur base des résultats des essais mécaniques pour donner une « carte d'identité » du matériau. Ceci permet aussi, dans une dernière phase, de modéliser le matériau à l'aide d'un logiciel d'éléments finis comme Abaqus.

1.2.1 LES ÉCO-MATÉRIAUX

Les éco-matériaux, sont des matériaux qui répondent à des critères environnementaux spécifiques tout au long de leur cycle de vie afin de limiter leur empreinte environnementale. Ces matériaux doivent combiner plusieurs qualités : [4][5]

- **Durable** : ses qualités et ses performances techniques durent dans le temps
- **Recyclable ou mieux, réutilisable** : le matériau rentre dans un cycle de circularité, il peut être réutilisé directement dans sa forme initiale ou passer par un cycle de transformation pour être recyclé.
- **Ressources durablement renouvelables** : être composé de ressources qui sont renouvelées avant la fin de la durée de vie du matériau lui-même.
- **Sain** pour la nature et les humains
- **Energétiquement neutre ou Energie grise faible** : Il doit induire une consommation énergétique faible tout au long de son cycle de vie. L'énergie grise (extraction des matières premières, production du matériau, recyclage) doit être la plus faible possible et doit être compensée par d'importantes économies d'énergie à l'usage. Un isolant permettant de grandes économies d'énergies à l'usage mais qui en consomme une quantité considérable lors de sa production peut se révéler avoir un impact total négatif.

Ces différents critères tendent à favoriser les cycles courts et les filières locales. La facilité d'entretien va être privilégiée afin d'augmenter la durée de vie du matériau. La résistance aux variations de température, au feu ou aux actions dynamiques sont des critères tout aussi importants pour que ces matériaux bas-carbone, durent dans le temps.

Il est important que ces critères soient respectés tout au long du cycle de vie. Que ce soit lors de la production, lors de la mise en œuvre, lors de leur utilisation et enfin lors du recyclage.

Dans les éco-matériaux, on retrouve souvent beaucoup de matériaux biosourcés tel que le bois, le chanvre, la paille, la cellulose. Les matériaux biosourcés sont issus de la biomasse végétale ou animale.

Aujourd'hui on retrouve différents matériaux respectant ces critères.

Briques de chaux-chanvre :



Figure 1.2-1 : Brique de chaux-chanvre [6]

Elles sont constituées de chènevotte (paille de chanvre) et de chaux hydraulique. Ces briques sont des isolants thermiques et acoustiques.

C'est un matériau naturel issu de filières locales. Son processus de fabrication est peu énergivore. De plus, c'est un matériau recyclable ou biodégradable.

Ce sont des briques qu'on peut coller ou maçonner [7], la mise en œuvre est facile et rapide. Le mélange chaux-chanvre peut aussi être mis en œuvre comme du béton. Les briques ont une bonne régulation naturelle de l'hygrométrie ainsi qu'une bonne inertie thermique. Elles résistent au feu, au gel, aux insectes et aux rongeurs. [8]

Papier & Anas de lin :



Figure 1.2-2 : Panneau de papier & anas de lin [9]

Ces panneaux isolants sont constitués de papier recyclé et d'anas de lin. L'anas de lin est un sous-produit de l'extraction des fibres textile contenues dans le lin. Il se présente sous forme de petits copeaux. Les panneaux sont utilisés pour des cloisons ou des planchers. Ils sont 100% recyclables et proviennent de filières locales. En effet le papier est issu de la filière de recyclage du papier-carton. [10]

On retrouve d'autres alternatives telles qu'un mélange d'ouate de cellulose et d'anas de lin, qui ont des bonnes propriétés d'isolation phonique.

Ils sont produits de manière peu énergivore. Les panneaux sont compactés avec une presse. L'eau qui s'échappe est réutilisée. Les panneaux font une passe au four avec un processus qui est optimisé afin de limiter la quantité d'énergie grise. [11]

Panneau en liège :



Figure 1.2-3 : Panneau en liège [12]

Le liège est un matériau naturel léger, qui a de très bonnes propriétés d'isolation acoustique et thermique. Ce matériau est produit à partir de l'écorce des chênes-lièges, et nécessite très peu de transformation (ébouillantage + autoclave si liège expansé). Il est principalement produit en Europe, et particulièrement au Portugal. Son énergie grise est donc relativement faible.

C'est un matériau résistant à l'humidité, au feu et qui est imputrescible. D'autre part, il ne nécessite pas de revêtement car il a une bonne résistance aux UV.

C'est un matériau durable qui ne perd pas ses propriétés au cours du temps. C'est également un matériau sain pour l'être humain qui a des propriétés antistatiques et est donc antiallergique et hygiénique. [13] [14] [15]

Le liège est entièrement recyclable mais les filières de recyclage sont, pour l'heure, encore peu développées pour des raisons de rentabilité. [16]

Béton de bois :



Figure 1.2-4 : Béton de bois [17]

Le béton de bois est composé d'eau, de plaquettes ou copeaux de bois et de ciment. Le bois représente 80% du matériau et provient de déchets de scieries ou de forêts durablement gérées (PEFC). [59]

Des murs ou des dalles préfabriquées sont produites avec ce type de béton. On retrouve également ce type de panneau en bord d'autoroute car ils ont une bonne efficacité d'absorption d'énergie sonore. [18]

Le béton de bois a une bonne capacité isolante et bénéficie d'une inertie thermique, ainsi qu'une régulation naturelle de l'hygrométrie. De plus, il a une bonne résistance au feu. C'est un béton léger, porteur et durable. [57]

Béton de lin :



Figure 1.2-5 : Béton de lin [19]

Le béton de lin est composé d'anas de lin et de chaux. Il peut également inclure du sable et du ciment dans son mélange. Les fibres de lin permettent d'augmenter la résistance en traction du béton et donc la durabilité du matériau.

Au contraire d'un béton classique le béton de lin est isolant. Celui-ci apporte une bonne inertie thermique au bâtiment.

Papercrete ou liant-papier :



Figure 1.2-6 : A. Brique en papercrete, B. Papercrete, C. Torchis de papercrete [20]

Ce matériau est celui qui se rapproche le plus de nos recherches. Papercrete est la contraction de « paper » et « concrete ». Le Papercrete est composé de papier ou de pulpe de papier (issue du processus de recyclage) et de ciment ou d'argile. Le mélange sèche naturellement à l'aire libre et est produit de manière simple et artisanale. C'est un matériau léger.

L'avantage de ce mélange, qui se rapproche d'un béton d'un point de vue matériaux bruts, est qu'il est plus isolant et plus léger que le béton. Toutefois, sa sensibilité à l'humidité en fait un matériau peu recommandé pour une utilisation en extérieur dans nos régions.

Ce mélange peut être employé sous forme de brique ou comme du torchis, pour enduire et renforcer des murs. Différentes formes de renforcement sont utilisées.

C'est un matériau qui s'utilise de plus en plus dans le domaine de l'éco-construction. Cependant, il n'existe pas encore de forme commerciale de papercrete, ses caractéristiques mécaniques et ses propriétés sont donc encore assez variables et son utilisation est très artisanale. [21], [22]

Valeurs¹ caractéristiques de ces matériaux :

Variables	Unités	Chaux-chanvre	Papier et Anas de lin	Béton de bois	Panneau de liège	Papercrete
Résistance à la compression	[MPa]	0.3	0.23	4.0	0.5-2	1-1.8
Conductivité thermique : λ	[W/mK]	0.071	0.053	0.16	0.32-0.045	0.06
Masse volumique : ρ	[Kg/m ³]	300-400	310	800	120-200	250
Coefficient d'absorption acoustique : α	[-]	0.85	/	/	/	/
Facteur de résistance à la vapeur d'eau : μ	[-]	2.8	/	10	5-30	/
Réaction au feu	[-]	B, S1, d0	F	B, S1, d0	E	/
Raideur du matériau : E (Module de Young)	[MPa]	80	/	/	13-50	/

Tableau 1.2-1 : Propriétés des Eco-matériaux

¹ Les chiffres sont recoupsés et proviennent des différentes sources des matériaux présentés ainsi que des sources [51] à [67]

1.2.2 APPLICATION - CHAPES

Une des applications visées pour notre matériau, SPALCO, est la chape sèche. Une chape est une couche qui se situe entre la dalle portante et la couche de finition du sol d'un bâtiment. Elle a pour but principal de niveler les pièces avant la pose de la finition pour obtenir une planéité parfaite. Elle peut également servir à isoler thermiquement et acoustiquement. Par ailleurs, avec la couche de finition, elle peut servir à répartir les charges ponctuelles sur la dalle portante ou à compenser une petite différence de niveau entre les pièces d'une maison.

Il est important de distinguer la chape sèche de la chape coulée. La chape coulée est généralement constituée d'un mortier plus ou moins liquide, qui vient se placer sur une dalle portante pour préparer la surface à recevoir une finition. Elle permet également d'enfouir les gaines nécessaires aux techniques spéciales telles que l'électricité ou le chauffage ou de placer un chauffage par le sol. Ce type de chape est le plus répandu.

La chape sèche se présente sous deux formes différentes : des granules ou des dalles. Les premières ont comme avantage de permettre de niveler la pièce puisque l'épaisseur de la couche n'est pas constante [23]. Ainsi, elles permettent de corriger un défaut de planéité dans un vieux plancher par exemple. Les secondes, les dalles, ont un avantage quant à la facilité de placement.

Puisque SPALCO se présentera sous forme de dalles, voici une liste des propriétés de dalles sèches existantes :

	Unités	Chape FERMACELL [24]	Chape Knauf Brio [25]	Gyproc rigidur floor E20 [26]
Composition		Plaques constituées d'un mélange de gypse et fibres de celluloses.	Plaques en plâtre armé.	Panneaux de plaques de plâtre renforcées de fibres.
Réaction au feu	[-]	/	A2-S1, d0	A2-S1, d0
Densité : ρ	[Kg/m ³]	1200	1225	1200
Epaisseur	[mm]	20	18	20
Charge d'exploitation admissible	[N/m ²]	2500	2500	/
Charge ponctuelle autorisée	[N]	1500	/	/
Résistance thermique : R	[m ² K/W]	0.06	0.05-0.06	0.10

Tableau 1.2-2 : Propriétés d'une chape sèche



Quelques caractéristiques importantes à retenir pour une chape :

- La capacité isolante
- L'épaisseur d'installation : en effet, moins on perd de hauteur mieux c'est pour la construction.
- La résistance aux charges appliquées.
- La méthode de pose, qui permet au mieux d'égaliser un sol.

1.2.3 PROPRIÉTÉS VISÉES POUR LE SPALCO

Les caractéristiques visées pour le SPALCO sont diverses. Les zones représentées sur ces cartes² présentent les objectifs visés pour le SPALCO et permettent de le situer face à d'autres matériaux. Ensuite dans la discussion finale, le comportement effectif mesuré sera inclus sur des cartes similaires.

Premièrement le SPALCO, en tant que matériau de construction doit avoir des bonnes propriétés mécaniques. Il doit être autoportant et doit atteindre la résistance nécessaire à l'application visée pour celui-ci. Une des applications potentielles étant une chape, le SPALCO doit atteindre une résistance en compression suffisante pour être utilisé comme tel.

Par ailleurs, une chape doit avoir des bonnes propriétés d'isolation thermique, c'est pourquoi nous visons une conductivité thermique minimale.

Enfin, l'objectif principal du SPALCO est son caractère respectueux de l'environnement, c'est pourquoi chacune des cartes ci-dessous présente les performances des matériaux en fonction de leur énergie grise. L'impact environnemental de SPALCO doit donc être nettement inférieur à celui des solutions traditionnelles.

Résistance en compression en fonction de l'énergie grise de production

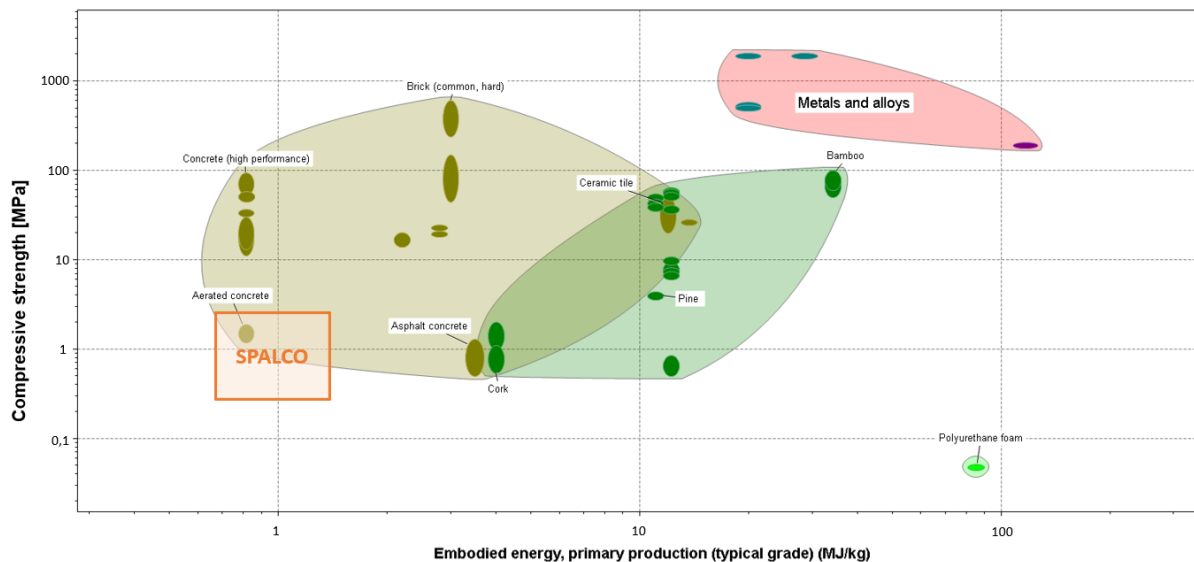


Figure 1.2-7 : Contrainte max en compression versus énergie grise de production

² Cartes produites sur le logiciel GRANTA EDUPACK

Conductivité thermique en fonction de l'énergie grise de production

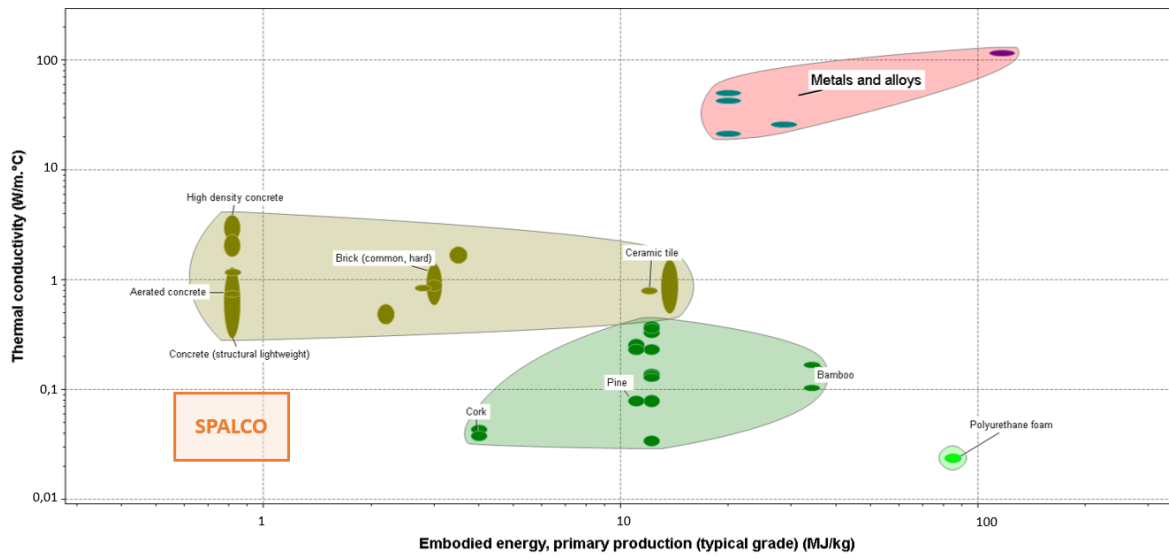


Figure 1.2-8 : Conductivité thermique versus énergie grise de production

Densité en fonction de l'énergie grise de production

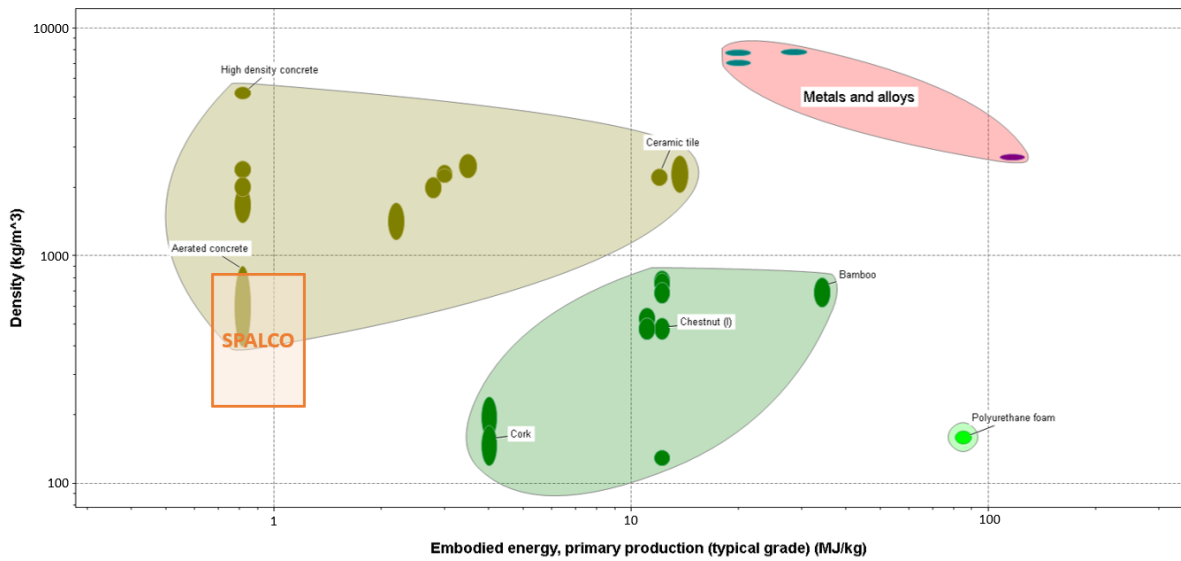


Figure 1.2-9 : Densité versus énergie grise de production

2 MATERIAUX & METHODES EXPERIMENTALES

En quelques chiffres, les campagnes d'essais qui ont été menées durant ce mémoire représentent :



2.1 ELABORATION DU MATÉRIAU

Afin de caractériser le matériau, nous avons produit plusieurs lots d'échantillons en faisant varier leur composition. Comme indiqué plus haut, le matériau est fait de sable, de chaux et de papier. Les matières premières employées dans le cadre de cette campagne d'essai sont :

1. Du **sable** de concassage obtenu au centre de recyclage et valorisation des ressources Tradecowall-Recymex, situé à St-Ghislain. [27]
2. De la **chaux**, Tradi'chaux XHA qui provient de l'entreprise *Cantillana*. [28]
3. Les déchets de **papier** ont, pour leur part, été récoltés et déchiquetés par nos soins, à l'exception des confettis, achetés chez *Makro*.

Dans le tableau suivant, voici un aperçu des quantités nécessaires pour une production de **100 briques**, en fonction du pourcentage de papier sec. Ce pourcentage donne le rapport entre la masse de papier sec incorporée dans le mélange et le poids total du mélange sec (sans compter l'eau). Le poids total sec diminue lorsque la quantité de papier augmente : ceci est dû au fait que la quantité d'eau dans le mélange est proportionnelle à la quantité de papier. Plus de papier signifie plus d'eau pour un poids total humide constant.

% papier sec	Papier [kg]	Sable [kg]	Chaux [kg]	Total sec [kg]
15	8.3	25	25	58.3
30	12.5	16.7	16.7	45.9
50	16.7	8.3	8.3	33.3

Tableau 2.1-1 : Quantités de matières premières nécessaires à la production de 100 briques

Les échantillons ont été produits manuellement. Deux méthodes de production ont été testées : *risotto* et *marinade*. La différence entre les deux méthodes réside principalement dans le pré-traitement du papier et la façon d'apporter l'eau dans le mélange : la méthode *marinade* propose de faire tremper le papier 24h avant de le mélanger tandis que la méthode *risotto* propose d'ajouter l'eau au fur et à mesure que les composants sont mélangés ensemble

2.1.1 MÉTHODE DE LA MARINADE

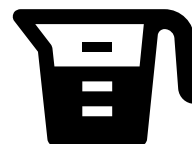
Les différentes quantités de papier/sable/chaux varient en fonctions des compositions, ainsi que le temps de malaxage. Voici la recette générale retenue pour la production :



1. Peser le papier à sec.
 2. Faire tremper le papier durant **24h** dans une bassine d'eau, l'eau est réutilisée pour les différents trempages.
 3. Sortir le papier (sans trop le compresser), peser cette quantité afin de connaître la quantité d'eau absorbée par le papier.
-



4. Peser le sable et la chaux.
 5. Mélange du papier dans la malaxeuse durant **2min** et défaire manuellement les boulettes qui se forment.
 6. Ajout du sable et de la chaux dans la malaxeuse.
-



7. Incorporation à la main du sable et de la chaux avec le papier, afin d'éviter que le sable et la chaux volent quand la malaxeuse s'enclenche.
 8. Malaxage durant **2min/5min** (temps court ou long)
 9. Ajout d'eau supplémentaire.
-



10. Malaxage durant **3min/10min** (temps court ou long)

11. Moulage : Il se fait manuellement dans des moules de forme adéquate. Chaque personne est assignée à un type d'échantillon afin que le lot soit moulé uniformément. Les échantillons sont démoulés directement, sauf ceux en forme de cylindre. Ceux-ci doivent sécher un peu dans leur moule avant d'être suffisamment rigides pour conserver leur forme lors du démoulage.

2.1.2 MÉTHODE RISOTTO

La méthode risotto varie dans la manière d'ajouter de l'eau au mélange. A la place de laisser tremper le papier une nuit, l'eau est incorporée au fur et à mesure dans la malaxeuse. La quantité d'eau doit alors être définie au préalable et nous obtenons les étapes suivantes :

1. Peser la quantité de papier, sable, chaux et la quantité d'eau définie
2. Mélanger le papier, le sable et la chaux dans la malaxeuse en ajoutant au fur et à mesure la quantité d'eau. Le temps de malaxage est adapté en fonction des paramètres de la composition (temps de mélange court ou long).
3. Moulage des échantillons.

Cette technique permettait de faire la composition en une fois et de ne pas attendre 24h que le papier soit imbibé d'eau.

Comme annoncé, c'est la méthode *marinade* qui a été retenue pour cette campagne d'essais, à la suite des premiers essais de flexion et compression. En effet, on peut observer sur les graphes de la Figure 2.1-1 que la méthode *marinade* (2TC et 2TL) donnait systématiquement des meilleurs résultats que la méthode *risotto* (1TC et 1TL). Avec TC= temps court & TL=temps long, qui définissent le temps de malaxage.

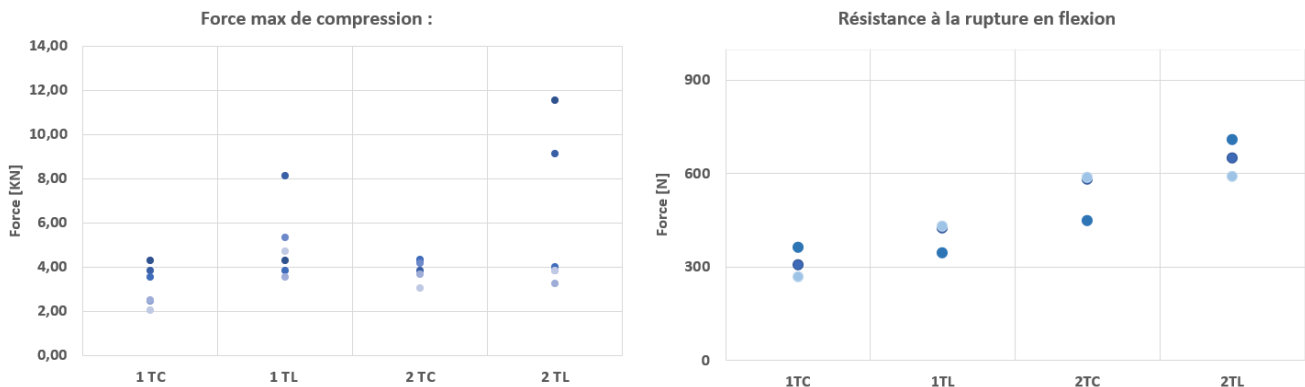


Figure 2.1-1 : Comparaison des méthodes Risotto (1TC & 1TL) & Marinade (2TC & 2TL)

2.1.3 FORMES D'ÉCHANTILLONS

Voici les différentes formes d'échantillons produits et leurs dimensions :

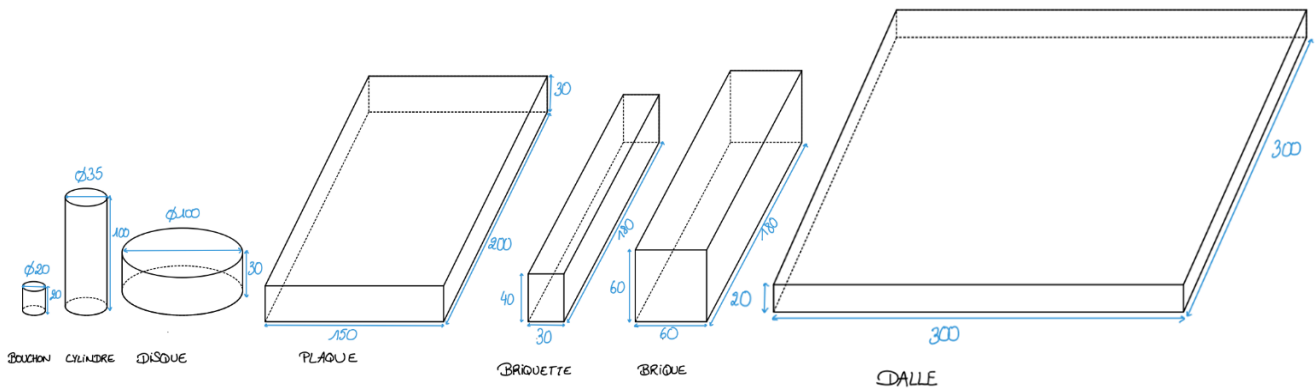


Figure 2.1-2 : Schéma des différents formats d'échantillons

Forme	Dimensions [mm]
Bouchons	20x20
Cylindre	35x100
Disque	100x30
Plaque	200x150x30
Briquettes	180x40x30
Briques	180x60x60
Dalle	300x300x20

Tableau 2.1-2 : Dimensions des échantillons



Figure 2.1-3 : Illustration des différents types d'échantillons

2.1.4 MÉTHODE DE RECYCLAGE

Toujours dans l'idée de concevoir un matériau éco-circulaire, il a été décidé de créer une composition mêlant 50% de mélange classique à 50% de SPALCO recyclé. Pour ce faire, des échantillons ayant servi pour des essais mécaniques ont été broyés sur le sol à l'aide d'une masse. La matière broyée a ensuite été tamisée pour obtenir des granulats de maximum 16mm de diamètre. Ces granulats ont été ajoutés au mélange en même temps que toute la matière sèche (étape 6 de la méthode *marinade*). Il est important de noter que les granulats de SPALCO recyclé sont composés d'un mélange indistinct de plusieurs compositions différentes.

2.2 LES DIFFÉRENTES COMPOSITIONS DU MATÉRIAU

L'objectif de la partie expérimentale de ce mémoire est de définir l'influence des proportions des différents composants. Ainsi que d'optimiser le mélange pour maximiser les performances du matériau afin qu'il réponde au mieux aux critères d'utilisations. Pour ce faire, différents sets d'échantillons ont été produits puis testés pour évaluer leurs performances. Les essais sont détaillés dans la section 3.

2.2.1 EXPLICATIONS DES PARAMÈTRES ET NOMENCLATURE

Le Tableau 2.2-1, résume les différents paramètres et les variations qui ont été expérimentées dans le cadre de ce travail. La dernière colonne représente le symbole utilisé pour désigner ce paramètre dans la nomenclature.

Éléments	Paramètre	Caractéristiques	Symbole
Papier	Tailles des bouts de papier	Petit : Confettis	P
		Moyen : bandelettes de 0.5cm sur 3cm	M
		Long : bandelettes de 0.5cm sur 30cm	L
	Quantité de papier (% du poids sec total)	15%	15
		30%	30
		50%	50
Sables	Type de sable	Sable jaune	J
		Sable concassé issu du recyclage	C
Chaux	Rapport massique Sable/Chaux	Autant de sable que de chaux	1-1
		50% plus de sable que de chaux	3-2
		Pas de sable	0-1
	Type de chaux	Hydraulique	H
Mélange total	Temps de malaxage	Temps court : 5 [min]	5
		Temps long : 15 [min]	15
Note complémentaire	Autres	Grande quantité d'eau	(E)
		Trempe du papier 48h au lieu de 24h	(2)
		Contient 50% de SPALCO recyclé	(R50)

Tableau 2.2-1 : Paramètres des compositions et leur symbole

Afin d'identifier chaque échantillon de manière unique, les différentes formes d'échantillons ont été associées à une lettre. Par forme d'échantillons, ceux-ci ont ensuite reçu un numéro.

Echantillon	Forme	Brique	A
		Bouchon	B
		Cylindre	C
		Disque	D
		Brique	E
		Plaque	F
		Dalle	G
	Numéro	Numéro par type d'échantillon	

Tableau 2.2-2 Détail nomenclature

Chaque composition produite a été nommée en fonction de ses paramètres, selon un code permettant de la définir entièrement. La structure de la nomenclature ainsi qu'un exemple sont donnés dans les Tableau 2.2-3 et Tableau 2.2-4. Les symboles permettant de représenter chaque paramètre sont, eux, repris dans le Tableau 2.2-1 Tableau 2.2-1 : Paramètres des compositions et leur symbole et le Tableau 2.2-2.

Taille du papier	% papier	-	Type de sable	Rapport sable et liant	Type de liant	-	Temps de malaxage	-	Note complémentaire	-	Forme	Numéro
------------------	----------	---	---------------	------------------------	---------------	---	-------------------	---	---------------------	---	-------	--------

Tableau 2.2-3 : Nomenclature

Exemple : Une composition faite de 30% de longs papiers, sable concassé et chaux hydraulique à proportion égale, 15min de malaxage et 50% de SPALCO recyclé, sous forme de brique :

L	30	-	C	1-1	H	-	15	-	(R50)	-	A	1
---	----	---	---	-----	---	---	----	---	-------	---	---	---

Tableau 2.2-4 : Exemple nomenclature

Les compositions qui ont été produites, ont été définies au moyen d'une première sélection faite à l'aide d'un plan d'expérience. Cette sélection a permis de choisir une douzaine de combinaisons comme étant les plus intéressantes à tester parmi les 72 combinaisons possibles en combinant les variations expliquées ci-dessus. De plus, quelques premiers essais ont été réalisés en amont et ont permis de définir une tendance concernant certains paramètres :

- Le **temps de malaxage** long (15 min) a été pris comme référence grâce aux résultats obtenus lors des essais préliminaires qui ont servi à déterminer la méthode de mélange (risotto ou marinade, Figure 2.1-1).
- Les **bout de papier** longs, ont été repris pour la plupart des essais sur base des premiers résultats obtenus par Mélanie Horvath l'an dernier.
- Le **sable concassé** est la référence, afin d'augmenter la quantité de matière recyclée. L'impact du choix entre sable jaune et sable concassé a été considéré comme négligeable suite aux recherches menées par Mélanie précédemment. [29]
- La **quantité de papier** intermédiaire (30%) a été sélectionnée comme référence car elle offre un compromis entre résistance mécanique, propriétés thermiques et impact environnemental, selon les essais préliminaires réalisés par Mélanie Horvath dans le cadre de sa thèse de doctorat. [29]

2.2.2 RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTES COMPOSITIONS

CODE	DATE	COMPOSITION							Temps de malaxage		Autre
		Morceaux de PAPIER [% sec]			Sable [%]		Rapport	Chaux [%]	Temps	Réf.	
Code composition	Date de création	Petit (P)	Moyen (M)	Long (L)	Sable jaune (J)	Sable concassé (C)	Sable / liant	Chaux	[min]		Commentaire
P30-C1-1H-15-(E)	16-12-21	30	0	0	0	35	1-1	35	15	E	Ajout de beaucoup d'eau
P30-C1-1H-15	16-12-21	30	0	0	0	35	1-1	35	15		
L30-C1-1H-5-(1)	15-12-21	0	0	30	0	35	1-1	35	5	1	
L30-C1-1H-5-(2)	16-12-21	0	0	30	0	35	1-1	35	5	2	Le papier à trempé 2 nuits
L30-C1-1H-15	14-12-21	0	0	30	0	35	1-1	35	15		
L30-J1-1H-15	15-02-22	0	0	30	35	0	1-1	35	15		
L30-C3-2H-15	15-02-22	0	0	30	0	42	3-2	28	15		
L50-C1-1H-15	16-02-22	0	0	50	0	25	1-1	25	15		
M30-C1-1H-15	16-02-22	0	30		0	35	1-1	35	15		
L15-C1-1H-15	22-03-22	0	0	15	0	42.5	1-1	42.5	15		
L30-C1-1H-15-(R50)	23-03-22	0	0	30	0	35	1-1	35	15	R50	50% de matière recyclée dans le mélange
L30-C0-1H-15	23-03-22	0	0	30	0	0	0-1	70	15		
L0-C1-1H-5	04-04-22	0	0	0	0	50	1-1	50	5		

Tableau 2.2-5 Récapitulatif des composition produites

2.3 ESSAIS MÉCANIQUES

Pour caractériser SPALCO mécaniquement, les différents essais suivants ont été effectués. Voici l'explication de la procédure utilisée pour chaque type d'essai.

2.3.1 FLEXION 4 POINTS AVEC DIC

Afin de définir le comportement en flexion pure et la résistance en traction, un essai de flexion 4 points accompagné d'un enregistrement DIC (*Digital Image Correlation*) a été mis en place. Concrètement cet essai permettra de quantifier la contrainte maximale de résistance en traction ainsi que la ductilité du matériau (caractérisée par la déformation à la rupture). La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.

La DIC est un système permettant, à l'aide de caméras et d'un logiciel adapté, d'enregistrer l'essai et de le transformer en un modèle numérique. En effet, l'échantillon est recouvert de milliers de petits points de repères. Les caméras prennent des photos à intervalle régulier puis le logiciel se charge de repérer les points d'une image à l'autre et de quantifier leurs déplacements tout au long de l'essai. Le résultat permet d'observer un champ de déplacement complet tout au long de l'essai et en tout point de l'échantillon. L'essai peut ainsi être employé a posteriori pour vérifier un modèle théorique. La DIC permet également d'effectuer de nombreuses mesures sans avoir besoin d'installer trop d'appareillage sur l'échantillon. Dans ce cas-ci, la DIC ne servira qu'à comparer les résultats du modèle *Abaqus* avec nos essais.

Type d'échantillon : Les échantillons utilisés pour la flexion sont les briquettes (lettre E) de dimensions 30x40x180mm. Parmi les formes d'échantillon dont nous disposons, celle-ci est la forme qui se rapproche le plus d'une « poutre » et est donc la plus adaptée à un essai de flexion. Cependant, il est important de noter que le rapport longueur/hauteur est trop petit pour que la théorie des poutres soit pleinement valide. En effet, on a [30]:

$$\frac{L}{h} = \frac{180}{40} = 4,5 < 20 \quad (2.1)$$

Préparation de l'essai : Un fond de peinture blanche recouvert d'un mouchetis de peinture noire est appliqué sur les briquettes. Ce mouchetis permet la corrélation d'images, car il crée un repère visuel pour les caméras :



Figure 2.3-1 : Mouchetis sur les échantillons

Mise en place de la DIC : Installation des deux caméras et des éclairages. Ensuite il faut calibrer les caméras pour s'assurer que celles-ci repèrent bien le mouchetis et que la mise au point soit satisfaisante.

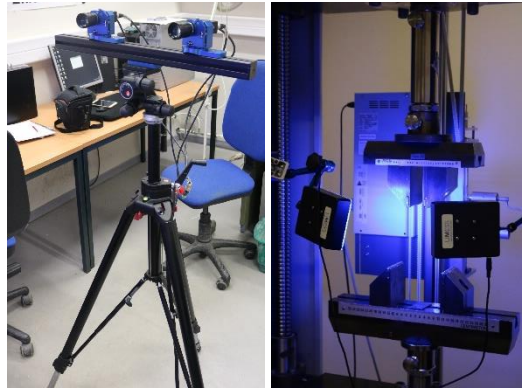


Figure 2.3-2 : Matériel de DIC

Essai de flexion : L'essai se fait à l'aide d'un banc de flexion à 4 points d'appuis (représenté en orange), installé dans une machine de traction/compression de marque ZWICK ayant une capacité maximale de 50 kN.

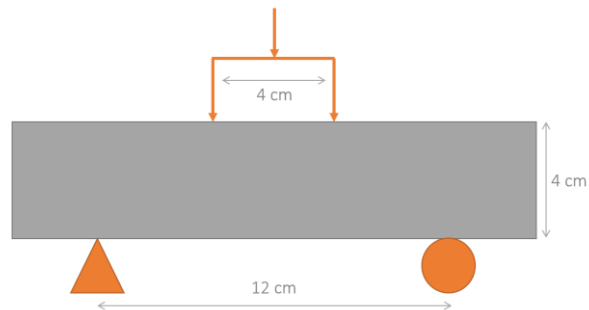


Figure 2.3-3 : Montage de flexion 4 points

Procédure de l'essai :

1. Mesurer l'échantillon et insérer ses données dans le logiciel de la ZWICK (hauteur, largeur et nom)
2. Placer l'échantillon sur le banc de flexion, en veillant à conserver une distance toujours identique entre l'échantillon et la caméra pour garantir la mise au point de celles-ci.
3. Définir la vitesse de l'essai dans le logiciel de la ZWICK & le nombre d'images par seconde que les caméras vont enregistrer.
 - a. 0.1 [mm/min] – 1 image par 5 sec (DIC)
 - b. 1 [mm/min] – 2 images par sec (DIC)
 - c. 10 [mm/min] – 5 images par sec (DIC)
4. Lancer les essais jusqu'à la rupture de l'échantillon. La Zwick mesure le déplacement de la traverse [mm], la force appliquée en [N] et la durée de l'essai. Les données sont reprises dans un fichier Excel.

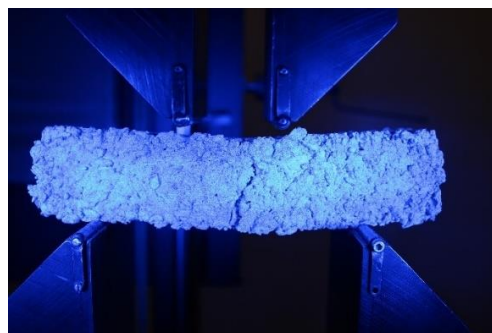


Figure 2.3-4 : Flexion 4 points + DIC

2.3.2 COMPRESSION UNI-AXIALE

L'essai de compression uni-axiale permet de définir de nombreux paramètres du matériau. Dans ce cas, il permettra de définir le module de Young et le coefficient de Poisson du matériau dans sa phase élastique. La phase élastique est la phase durant laquelle le matériau se déforme de façon réversible. Le module de Young permet de lier la déformation à la contrainte appliquée à l'échantillon. Le coefficient de poisson, quant à lui, renseigne l'importance relative de la déformation transversale par rapport à la déformation axiale. Ceci permet de voir si le matériau est compressible ou non ($\nu \in [0,0.5]$ si $\nu = 0.5$ alors le matériau est incompressible).

Il est également possible d'obtenir la limite d'élasticité, qui désigne la contrainte au moment de la transition entre le comportement élastique et le comportement plastique du matériau. La contrainte maximale en compression et la déformation à rupture nous renseignent sur la ductilité et la résistance en compression du matériau.

Type d'échantillon : Les échantillons employés lors de cet essai sont des cylindres de $90 (\pm 1)$ mm de hauteur et $35 (\pm 1)$ mm de diamètre. Cette forme relativement élancée permet de considérer que le tiers central de l'échantillon n'est pas affecté par le frottement entre les plateaux de compression et l'échantillon, qui pourrait fausser l'essai.

Préparation de l'essai : Les échantillons ont des surfaces supérieures et inférieures rugueuses dues à l'hétérogénéité du matériau et au système de moulage. Afin d'avoir une surface plane et le plus perpendiculaire possible à l'axe longitudinal, une rectification de la surface est indispensable. Cette rectification permet également de garantir une hauteur identique pour tous les échantillons. Les extrémités des échantillons ont donc été coupées à l'aide d'une scie circulaire.



Figure 2.3-5 : A. Echantillon initial



B. Echantillon scié

Mise en place : Deux types d'extensomètres sont installés sur l'échantillon :

- **Extensomètres longitudinaux :**

Placés verticalement afin de mesurer l'écrasement de l'échantillon au cours du test. La mesure est prise sur le tiers central de l'échantillon afin de ne pas être influencé par un quelconque effet de bord. De plus, les extensomètres fournissent une mesure plus fiable que celle fournie directement par la presse. En effet, celle-ci est biaisée par la compliance machine et par l'adaptation progressive de la surface de contact entre l'échantillon et le plateau en début d'essai. La compliance machine est la déformation de la machine elle-même lorsqu'elle est mise en compression (léger jeu dans les engrenages, les fixations des plateaux, les pas de vis, etc. ainsi que l'élasticité de l'acier lui-même).

Avant l'essai, 4 petits plots en plastique, imprimés en 3D à cet effet, sont collés sur l'échantillon (voir Figure 2.3-6). Ceux-ci servent de support aux extensomètres, garantissent que la mesure de l'extensomètre ne sera pas biaisée par un effet local juste sous ses appuis et permettent de mesurer avec précision l'écartement initial l_0 entre les appuis de l'extensomètre. Cette distance est

indispensable au calcul ultérieur des déformations. Les extensomètres sont maintenus en place à l'aide d'élastiques qui font le tour de l'échantillon. Les élastiques utilisés pour fixer les extensomètres à l'échantillon ne doivent pas être trop résistants afin d'éviter de comprimer l'échantillon lors de l'essai. En effet, le « confinement » induit par les élastiques pourrait fausser les mesures.

- **Extensomètre diamétral :**

L'extensomètre diamétral est un mécanisme constitué d'une petite chaîne qui vient ceinturer l'échantillon et d'un extensomètre qui mesure l'allongement de cette chaîne au cours de l'essai. Cette mesure sera utilisée pour déterminer le coefficient de poisson de notre matériau. Il a été remarqué qu'un des ressorts de l'extensomètre doit être retiré afin de diminuer sa résistance et qu'il ne comprime pas l'échantillon lors de l'essai. En effet, cet extensomètre peut également induire un « confinement » de l'échantillon et fausser les mesures.

Un cylindre métallique du diamètre de l'échantillon est positionné en dessous de l'échantillon. Ce cylindre permet de rehausser l'échantillon et de dégager suffisamment d'espace pour placer tous les extensomètres sans qu'ils ne touchent la presse. Une feuille de téflon est positionnée sur chaque face afin d'éviter l'effet tonneau dû à l'adhérence de l'échantillon sur les plateaux lors de la compression.

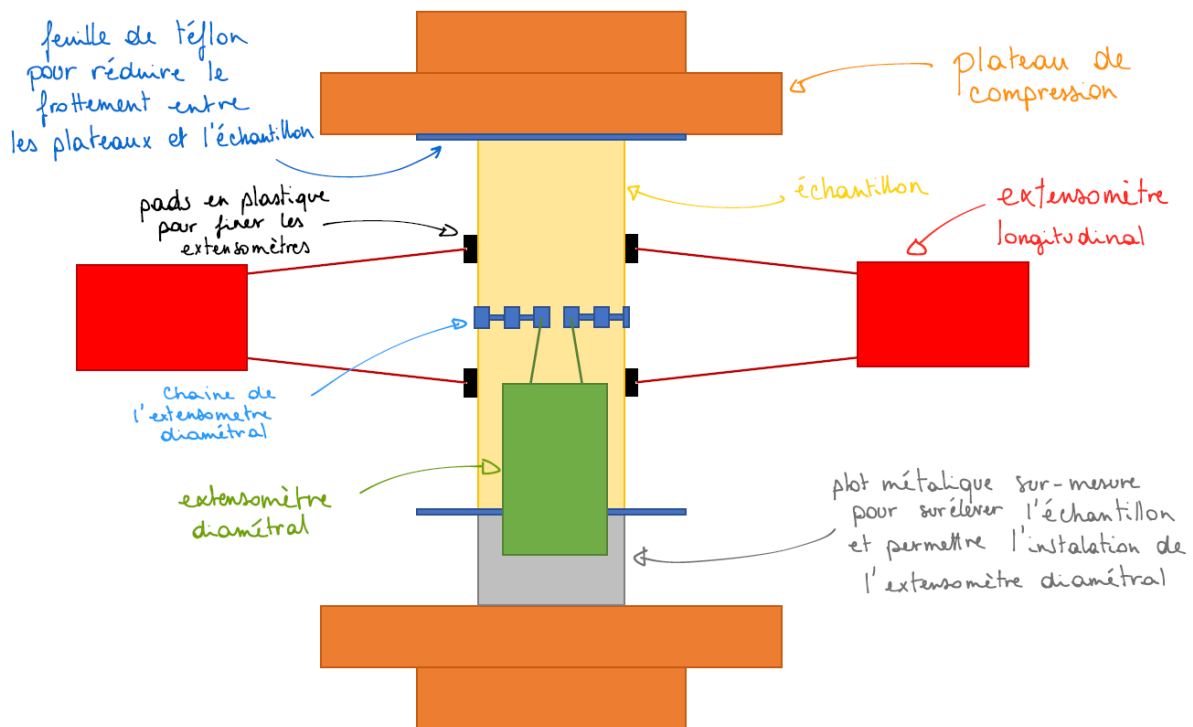


Figure 2.3-6 : Schéma du dispositif pour l'essai de compression

Essai de compression :

Les essais sont faits avec une presse hydraulique MTS 100kN dont les deux plateaux sont non-rotulés. On mesure le déplacement de la traverse d [mm], la force appliquée [N], la durée de l'essai [s] et le déplacement des extensomètres [mm]. Des essais de compression simple et des essais incluant 3 cycles de charge-décharges sont effectués. Dans tous les cas, l'essai se termine par la rupture de l'échantillon.



Figure 2.3-7 : Essais de compression

Il faut noter que l'extensomètre diamétral a une course limitée. C'est pourquoi, lorsqu'il approche de sa course maximale (4.5[mm]), il faut mettre l'essai en pause et retirer la chaîne et l'extensomètre diamétral, afin d'ensuite continuer l'essai.

2.3.3 ESSAIS DE FLUAGE

L'essai de fluage a pour but de caractériser le comportement du matériau au fil du temps, lorsqu'il est soumis à une charge constante. Il est important de définir si, sous cette charge, le matériau va continuer à se déformer ou s'il va atteindre un équilibre.

Le type d'échantillon employé ainsi que la procédure de l'essai de fluage sont identiques à ceux de l'essai de compression. La seule différence est qu'on ne place pas l'extensomètre diamétral car cette mesure est superflue pour quantifier le fluage.

Les essais de fluage sont programmés pour que la presse applique une force constante (500N) sur l'échantillon après une rapide phase transitoire de mise en compression. Cette force correspond à une contrainte d'environ 0.5 MPa. La durée des essais effectués est variable, allant de quelques heures à quelques jours en fonction des disponibilités des équipements.

2.3.4 ESSAIS DE POINÇONNEMENT

Cet essai a pour but de définir le comportement du matériau au poinçonnement, c'est-à-dire sa résistance à une charge élevée en un point. Avec cet essai on peut définir la dureté, qui est la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration du poinçon. On peut alors caractériser la résistance du matériau soumis à une déformation localisée.

Cet essai va aussi permettre d'analyser la recouvrance du matériau et de calculer le module de Young d'une autre manière qu'avec l'essai de compression. La recouvrance d'un matériau est sa capacité à reprendre sa forme initiale après une déformation lorsque la charge qui induisait la déformation a disparu. Par exemple, pour un sol qui supporterait une armoire lourde reposant sur 4 pieds, il s'agit de pouvoir prévoir si la déformation qui a été induite par la charge sous les pieds de l'armoire va se résorber lorsqu'on retire celle-ci.

Type d'échantillon : L'essai de poinçonnement est fait sur des échantillon ayant la forme d'un disque (lettre D), de 100mm de diamètre et 30mm de hauteur.

Préparation de l'essai :

Un quadrillage de 9 cases est dessiné sur l'échantillon. Le quadrillage est dessiné sur la face la plus rugueuse, afin que la face plane soit posée sur la table lors des mesures. La flèche permet d'orienter l'échantillon lors des mesures.

A l'aide d'un comparateur, on mesure la hauteur initiale des différents points du quadrillage avant l'essai. Un essai préliminaire a permis de déduire que les 4 coins du quadrillage ne sont pas impactés par l'essai de poinçonnement. C'est pourquoi le zéro de référence est pris comme étant le point en haut à gauche (A1). La croix indique le centre du quadrillage : c'est à cette endroit que le poinçonnement sera appliqué.

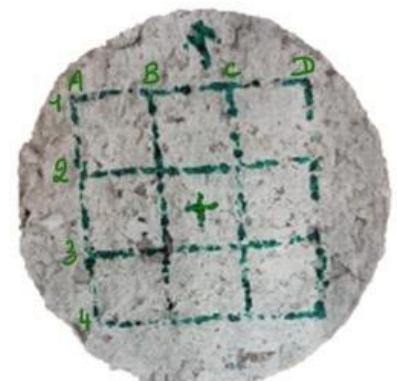


Figure 2.3-8 : Quadrillage sur l'échantillon



Figure 2.3-9 : Mesure de la hauteur des points avec le comparateur

Essai de poinçonnement :

L'essai se fait sur la machine de compressions de marque Zwick. La force est appliquée sur l'échantillon via une pointe hémisphérique de diamètre $\Phi 16$ [mm]. La machine est paramétrée pour que la pointe pénètre le matériau avec une vitesse de déplacement constante fixée à 1mm/min. Pour chaque composition, l'essai est fait deux fois, avec une force maximale de respectivement 500N et 1000N. Ces maxima ont été choisis afin d'éviter de détruire l'échantillon et afin d'être représentatif. Par exemple, avec la force de 500N on simule le talon d'une personne de 100kg, soit 50kg par talon.

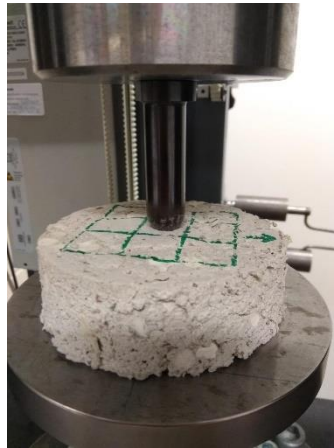


Figure 2.3-10 : Essais de poinçonnement

Après l'essai la hauteur de chaque point est mesurée à différents instants. Chaque point mesuré avant l'essai est à nouveau mesuré au cours du temps, avec le comparateur. Les hauteurs sont mesurées juste après l'essai ($t=0$ min), ensuite en $t = 10$ min puis $t=15$ min, etc. jusqu'à $t= 5$ jours. Au début les mesures sont prises à intervalle de temps court et régulier, ensuite une fois par jour. Voici le vecteur des Δt utilisés pour les mesures : t [min] = [0, 10, 20, 30, 45, 60,180] suivi de t [jours]= [1, 2, 5].

2.4.1 ISOLATION ACOUSTIQUE

Tester et mesurer les performances d'isolation acoustique d'un matériau requiert des compétences et du matériel spécifique. Cependant, sur base de plusieurs notes explicatives du CSTC [31][32], un dispositif relativement simple a été mis sur pied dans le but d'évaluer et comparer différents matériaux. La Figure 2.4-1, a permis de déterminer les catégories de bruits pertinentes à tester : les bruits aériens (1) et les bruits de chocs (2). En effet, SPALCO ayant pour application principale d'être utilisé comme chape sèche ou comme cloison intérieure, il est important pour les futurs occupants du bâtiment de pouvoir garantir une certaine intimité dans les pièces. Cela passe entre-autre par l'isolement acoustique, aussi appelé réduction du niveau de bruit : c'est une mesure de la différence de niveau sonore entre le local d'émission et le local d'absorption.

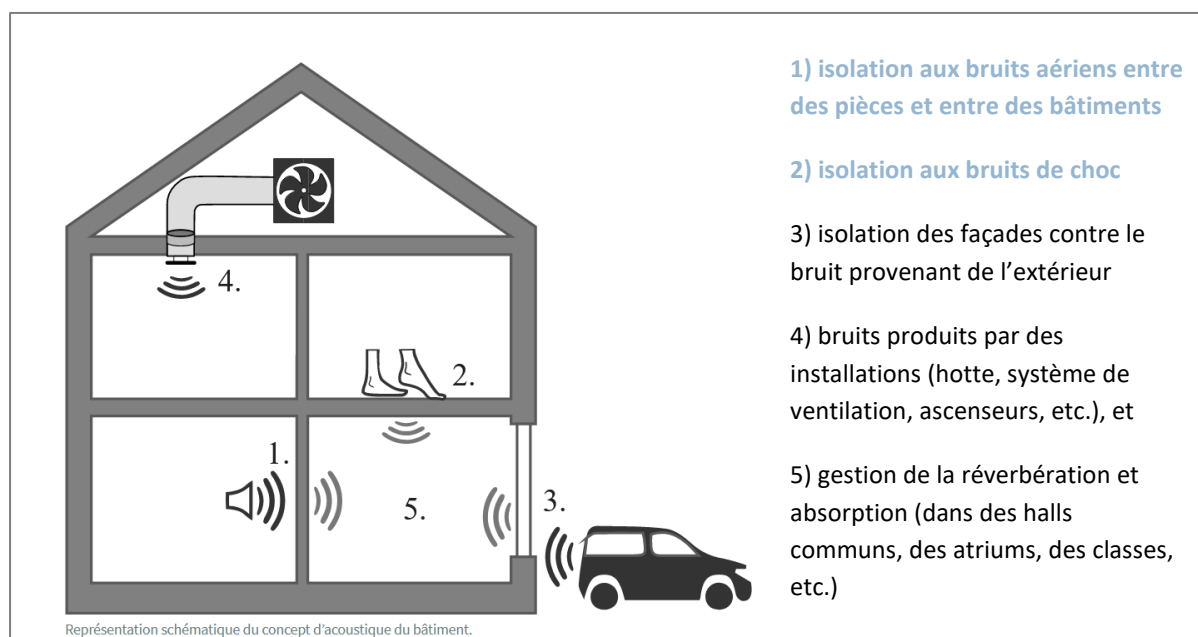


Figure 2.4-1 Acoustique d'un bâtiment [33]

Les sols de bâtiments étant soumis à des chocs de tous genres (pas, objet qui tombe, ...), il est également utile de comprendre comment le bruit résultant de ces chocs va être transmis au travers de SPALCO. Les 3 autres types de bruits ne concernent pas directement SPALCO et n'ont donc pas été étudiés.

Type d'échantillon : Plaque de dimension 30x150x200mm (lettre F). Ces plaques sont adaptées au test acoustique car elles ont une épaisseur représentative de celle d'un panneau de chape et ne sont pas trop fragiles, contrairement aux dalle (lettre G).

Préparation de l'essai :

Le dispositif est représenté sur la Figure 2.4-2 . Il est constitué d'une caisse à vin (caisse en bois 32,5x26x18cm, épaisseur 1cm) munie d'un couvercle avec une ouverture au centre. L'ouverture dans le couvercle correspond à la taille des échantillons du matériau à tester. Le reste de la caisse est recouvert d'un isolant acoustique, ici du liège en 2 couches de 1cm d'épaisseur (3 couches sur la face supérieur pour correspondre à l'épaisseur des échantillons). L'échantillon est inséré dans l'orifice aménagé dans les 3 couches de liège et vient s'appuyer sur un petit rebord en bois, au niveau du couvercle de la boîte. Des petits bouts de liège sont ajoutés sur le pourtour si l'échantillon n'est pas parfaitement ajusté. En effet, il est essentiel pour la validité du test de ne pas avoir de

« trous » dans la couverture isolante de la boîte. La Figure 2.4-2 représente le dispositif. Les ficelles qu'on peut apercevoir sur la première image servent simplement à faciliter l'extraction de l'échantillon après l'essai.

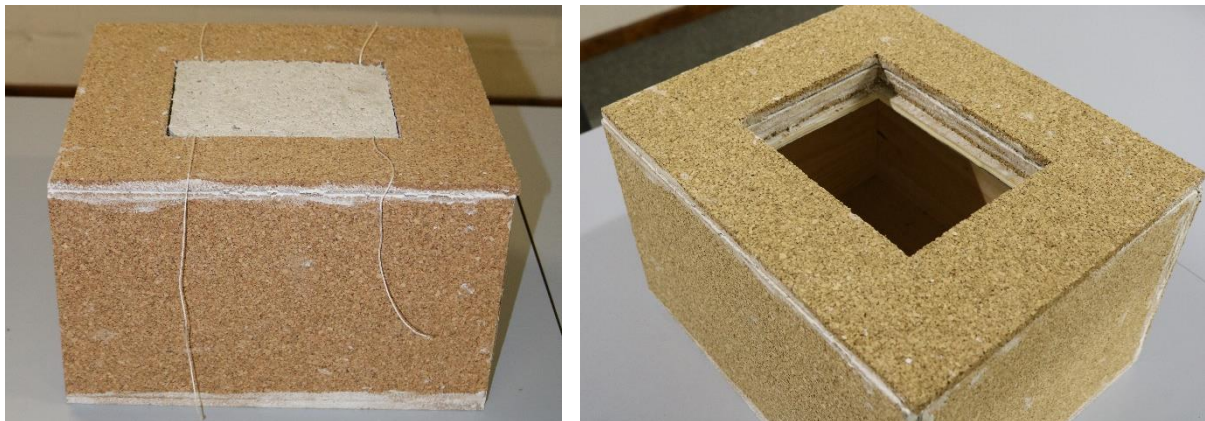


Figure 2.4-2 : Boîte d'essais acoustique

Méthode de mesure :

Les mesures d'intensité du son ont été effectuées à l'aide de l'application *XDecibel* installée sur des smartphones. La fiabilité de l'application a posé quelques soucis dans la mesure des données. L'application permet de mesurer dans le temps les décibels. Cependant chaque appareil, avec sa sensibilité avait des mesures qui variaient. L'application enregistre les dB au cours du temps.

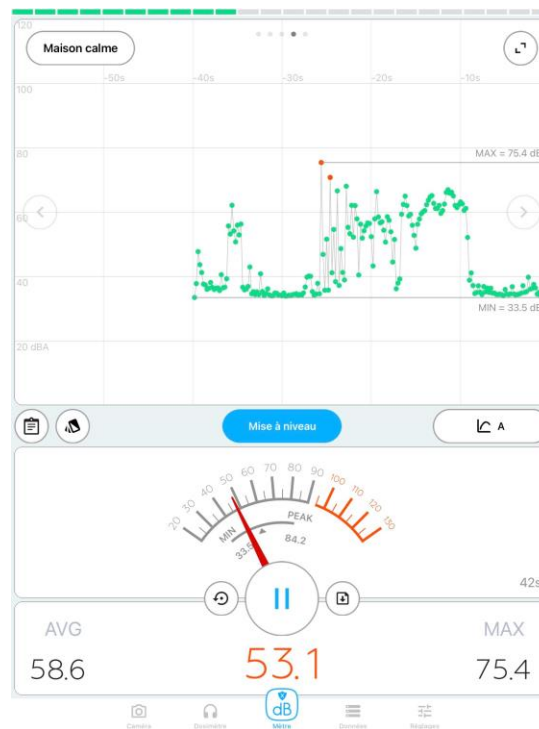


Figure 2.4-3 : Application XDecibel

Essais 1 : Les bruits aériens

Afin de quantifier la transmission des bruits acoustiques, une bande son de référence a été constituée par nos soins. Elle est composée d'un assemblage de sons pour tenter d'approcher diverses situations réelles. Tout d'abord, il y a une minute de musique [34] suivie d'un test de fréquence en plusieurs tranches allant de 0 à 1000

Hz, de 5000 à 5300 Hz et de 10 000 à 10 300 Hz [35]. Ensuite, 30sec d'un bruit d'aspirateur [36] et 10 secondes d'applaudissement [37] complètent l'enregistrement.

Le test de fréquence a pour objectif de permettre d'analyser la transmission des bruits aériens aux différentes fréquences audibles. Les fréquences au-dessus de 10300 Hz n'ont pas été testées car le haut-parleur employé pour l'essai ne permettait pas d'émettre ce type de fréquences.

Un smartphone posé à l'extérieur de la boîte sert à diffuser la bande son, un autre, mesure l'intensité du son à l'extérieur de la boîte, et un dernier mesure l'intensité du son dans la boîte, comme représenté sur la Figure 2.4-4. L'objectif ici est de quantifier l'isolement acoustique qui se traduit par la différence entre l'intensité du son à l'intérieur et à l'extérieur du boîtier. De cette manière, un indice d'affaiblissement peut être calculé, plus il est élevé plus le matériau coupe le bruit.

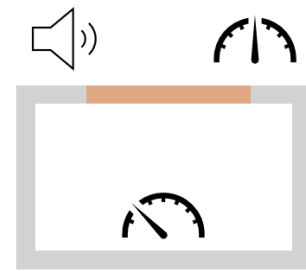


Figure 2.4-4 : Disposition des appareils d'émission et de mesure

Essais 2 : Bruits de chocs

Pour le test concernant les bruits de chocs, la même caisse a été employée et 2 smartphones mesuraient l'intensité du son, un dans la boîte et un en dehors. Différentes billes, représentées sur la Figure 2.4-5, ont été lâchées d'une hauteur de 20cm, sur les échantillons de matériau. L'énergie cinétique acquise par la bille au moment du choc est également indiquée sur la figure.

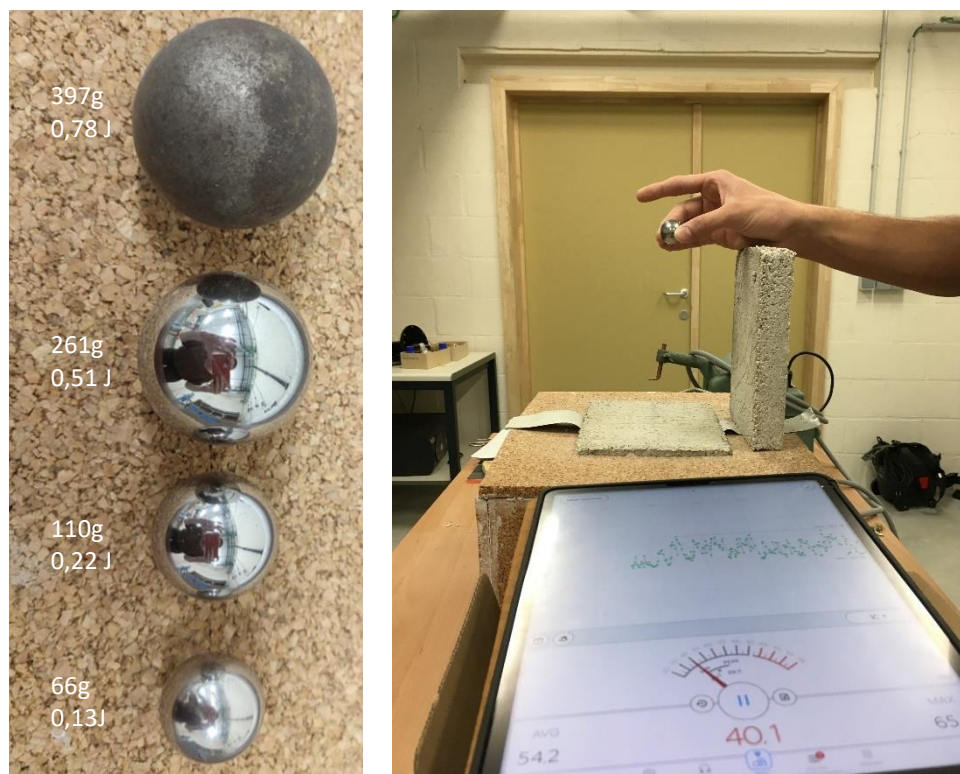


Figure 2.4-5 : Essais de choc

L'objectif ici n'est pas de pouvoir quantifier précisément la performance des matériaux mais plutôt de pouvoir comparer les différentes compositions entre elles et les classer. Pour compléter le classement, différents matériaux conventionnels sont également testés (liège, cellulose, laine de roche, laine de verre).

2.4.2 ISOLATION THERMIQUE

Les performances d'isolation thermique d'un matériau sont quantifiées par sa conductivité thermique λ . Cet indicateur donne le flux de chaleur qui traverse le matériau en fonction de son épaisseur et de la différence de température à laquelle il est soumis.

Type d'échantillon : Les échantillons employés sont de forme carrée de 40mm de côté et 30 mm d'épaisseur. Il s'agit d'échantillons sous forme de disques (D) ou de briquettes (E) recoupés à la scie circulaire (Figure 2.4-6).



Figure 2.4-6 : Echantillons découpés pour l'essai thermique

Essai : Pour mesurer cette conductivité thermique, il s'agit de poser le matériau entre une plaque chauffée à une température constante (45-50°C) et une plaque refroidie à une température constante (15°C). Le tout est installé dans un boîtier isolé. Le contact optimal entre la plaque chaude, le matériau et la plaque froide est assuré en appliquant une charge de 1000N sur l'ensemble. Le dispositif est décrit sur la Figure 2.4-7. Les mesures sont prises une fois que le système est stabilisé, après environ 1h.

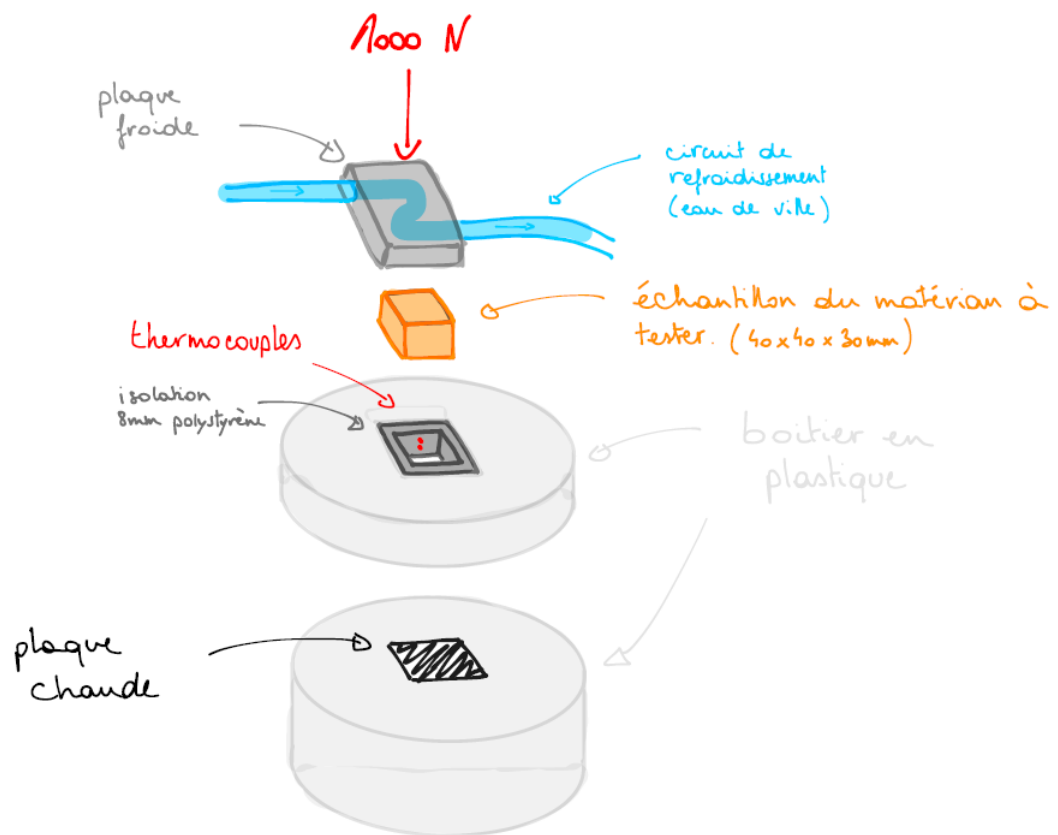


Figure 2.4-7 : Schéma représentatif de l'essai thermique

Mesure : La tension d'alimentation de la plaque chauffante est mesurée au cours de l'essai (V_{TEG}), ce qui permet de définir à chaque instant le flux de chaleur qui traverse le matériau (Q). La mesure de température est prise à l'aide de deux thermocouples appliqués contre le matériau et espacés verticalement de 15mm. En utilisant le flux de chaleur, la différence de température et la distance entre les thermocouples, il est possible de définir le coefficient de transmission du matériau (voir Figure 2.4-8)

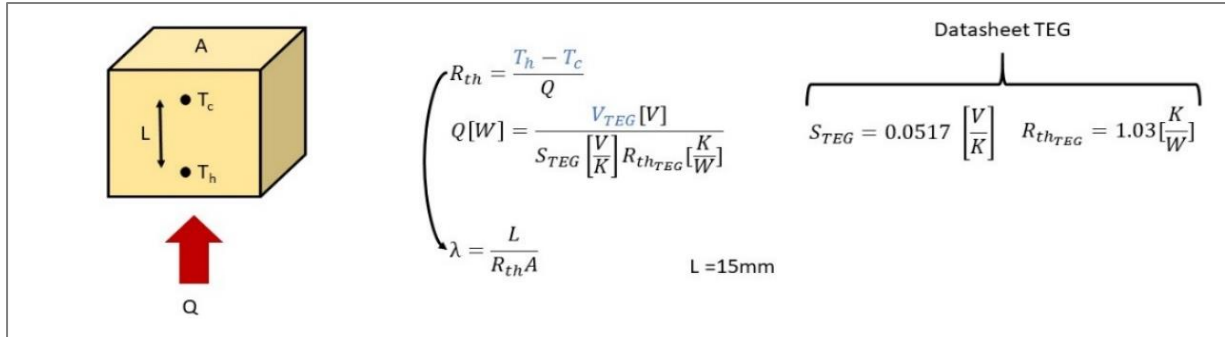


Figure 2.4-8 : Equations pour calculer la conductivité thermique λ [38]

La Figure 2.4-8 nous a été fournie par Geoffrey Roy, qui a mis en place cet essai. A l'aide de ces 3 équations il est possible de définir la conductivité thermique λ . Les valeurs obtenues via cet essai sont comparables entre-elles mais ne sont pas représentatives de la conductivité thermique réelle du matériau.

3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats de chacun des essais sont présentés dans cette section. Dans la mesure du possible, les résultats sont présentés dans le même ordre : les compositions sont triées en fonction de la taille des morceaux de papiers (long, moyen, court) puis en fonction du taux de papier (15%, 30%, 50%).

En règle générale, un *boxplot* récapitulatif est présenté à la fin de chaque essai et permet, en une figure, de rassembler et comparer l'ensemble des compositions. Pour rappel, la lecture de ce type de graphe se fait comme décrit à la Figure 3-1 :

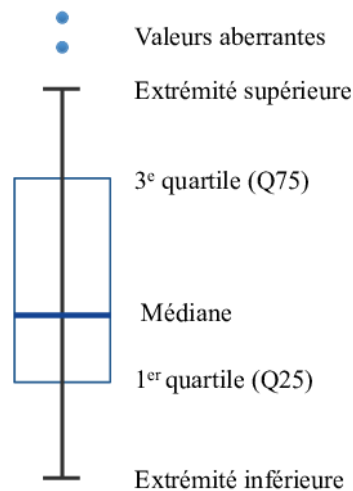


Figure 3-1 : Explication du Boxplot ou "diagramme en boîte à moustache" [39]

3.1 FLEXION 4 POINTS + DIC

Les résultats des essais de flexion sont présentés à la section 3.1.2. Dans un premier temps, l'effet de la vitesse sur le comportement du matériau était encore inconnu. C'est pourquoi chaque composition a été testée à 3 vitesses différentes (0,1 [mm/min] ; 1 [mm/min] ; 10 [mm/min]), avec 5 échantillons pour chaque vitesse. Après une première série de tests, il s'est avéré que la vitesse n'exerce aucune influence sur les résultats. Dès lors, les tests suivants n'ont été menés que sur 5 échantillons à une vitesse unique de 1 [mm/min] pour limiter la durée des essais tout en garantissant une qualité d'image optimale pour la DIC.

La composition de référence, *L30-C1-1H-15* va servir d'exemple pour détailler le traitement des résultats, depuis les données brutes jusqu'aux graphes finaux. Pour les autres compositions, seuls les graphes finaux utiles à l'analyse seront présentés.

3.1.1 TRAITEMENT DES RESULTATS

Les données brutes fournies par la presse Zwick sont présentées sous la forme d'un fichier Excel contenant la mesure du temps, de la force appliquée par la machine ainsi que le déplacement de la traverse sur laquelle sont fixés les appuis inférieurs du banc de flexion. De ces fichiers, on peut tirer un premier graphe (Figure 3.1-1) indiquant la force appliquée en fonction du déplacement de la traverse. Ce graphe permet d'appréhender la ductilité du matériau et sa résistance à la flexion.

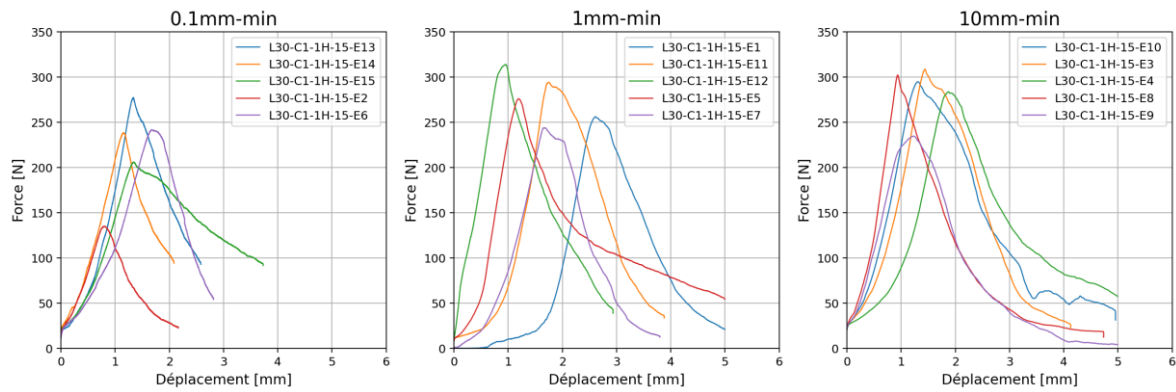


Figure 3.1-1 : Résultats bruts de l'essai de flexion pour la composition L30-C1-1H-15

Comme on le voit ci-dessus (Figure 3.1-1), les pieds de courbe, artefacts de mesure, rendent la lecture difficile. C'est pourquoi les pieds de courbe sont coupés pour que les graphes soient plus concordants. La limite à laquelle les pieds de courbe sont recoupés est variable et dépend de la composition : elle est fixée à 100, 150 ou 200 N.

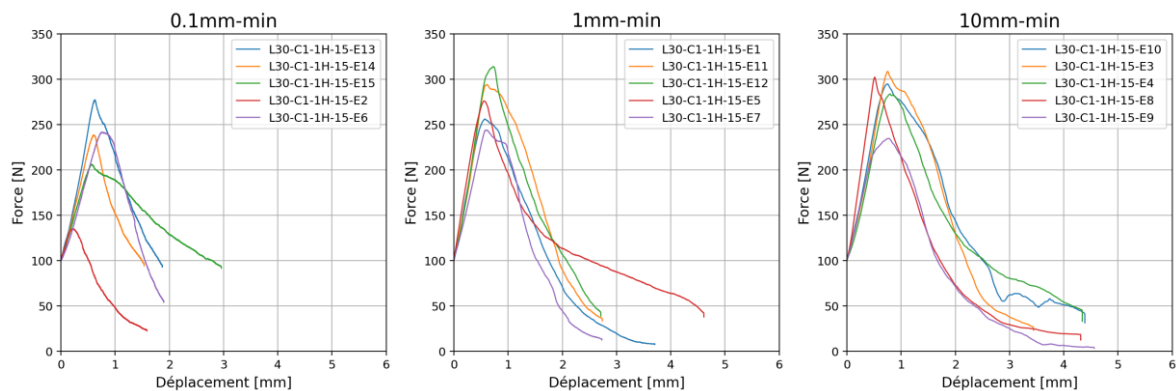


Figure 3.1-2 : Résultats flexion - suppression du pied de courbe - composition L30-C1-1H-15

Pour obtenir une information plus générale, il est intéressant de transformer la force en une contrainte et le déplacement en une déformation, qui seront indépendantes des dimensions de l'échantillon. Ceci permet de comparer les résultats à ceux d'autres matériaux. L'essai de flexion ayant pour but principal de déterminer la résistance à la traction du matériau, il a été choisi de présenter la contrainte maximale en traction, dans la fibre inférieure de l'échantillon, en fonction de la déformation de cette même fibre inférieure.

Pour transformer la force en contrainte et le déplacement en déformation, trois hypothèses sont nécessaires :

- 1) Bien que les dimensions de l'échantillon ne respectent pas tout à fait la définition pour être considéré comme une poutre, les contraintes ont tout de même été calculées comme s'il s'agissait d'une poutre.
- 2) La poutre est considérée en régime élastique tout au long de l'essai pour simplifier les calculs
- 3) Le cisaillement a été négligé et les déplacements sont petits

Ainsi, le diagramme des contraintes dans une poutre élastique en flexion est représenté à la Figure 3.1-3. [30]

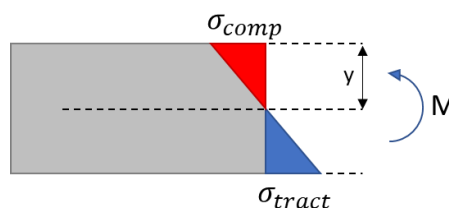


Figure 3.1-3 : Diagramme des contraintes dans une poutre en flexion

L'hypothèse d'élasticité permet d'écrire :

$$\sigma_{tract} = \frac{My}{I} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{tract} = E \varepsilon_{tract} \quad (3.2)$$

Et celle des petits déplacements donne :

$$M = EI \frac{d^2v}{dx^2} \quad (3.3)$$

En développant cette équation (voir annexe I), il est possible de trouver la relation suivante entre le déplacement de la traverse δ_t et la déformation de la fibre inférieure ε_{tract} :

$$\varepsilon_{tract} = \frac{54 \delta_t y}{5L^2} \quad (3.4)$$

Les équations ci-dessus permettent donc d'obtenir les graphes en contrainte-déformation suivants (Figure 3.1-4) :

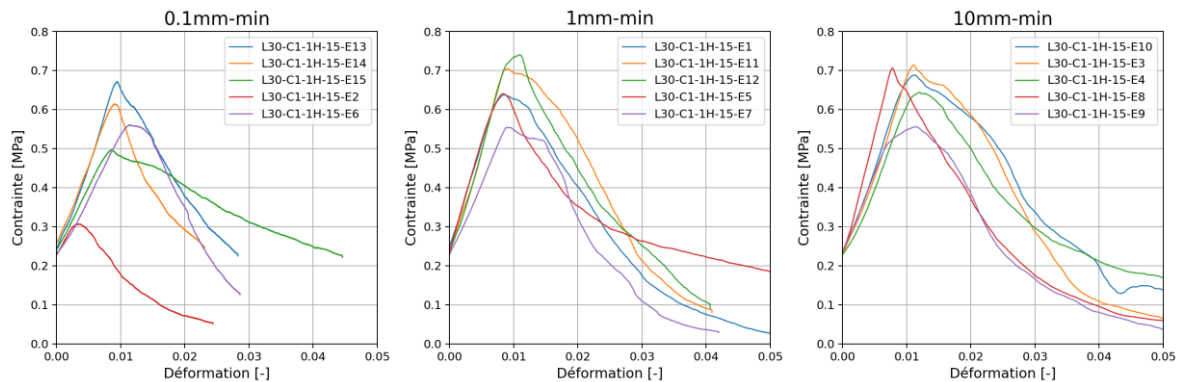


Figure 3.1-4 : Essai de flexion - Graphe contrainte-déformation - composition L30-C1-1H-15

Finalement, pour chaque composition, tous les essais sont rassemblés sur un premier graphe pour permettre d'évaluer la dispersion, tandis qu'un second graphe rassemblant juste les 3 moyennes par vitesse est également présenté pour une meilleure lisibilité (Figure 3.1-5). Par ailleurs, la contrainte maximale de chaque essai est prise en compte pour réaliser un graphe *boxplot* comparatif, présenté à la fin de la section et qui permet en un coup d'œil de comparer les contraintes maximales des compositions les unes par rapport aux autres ainsi que leur dispersion.

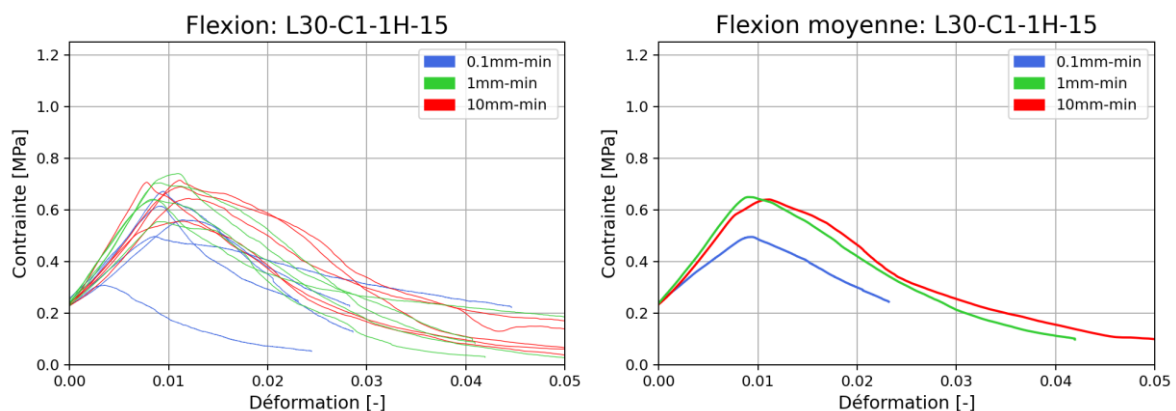


Figure 3.1-5 : Essai de flexion - Graphes finaux - composition L30-C1-1H-15

3.1.2 RESULTATS PAR COMPOSITION

L15-C1-1H-15

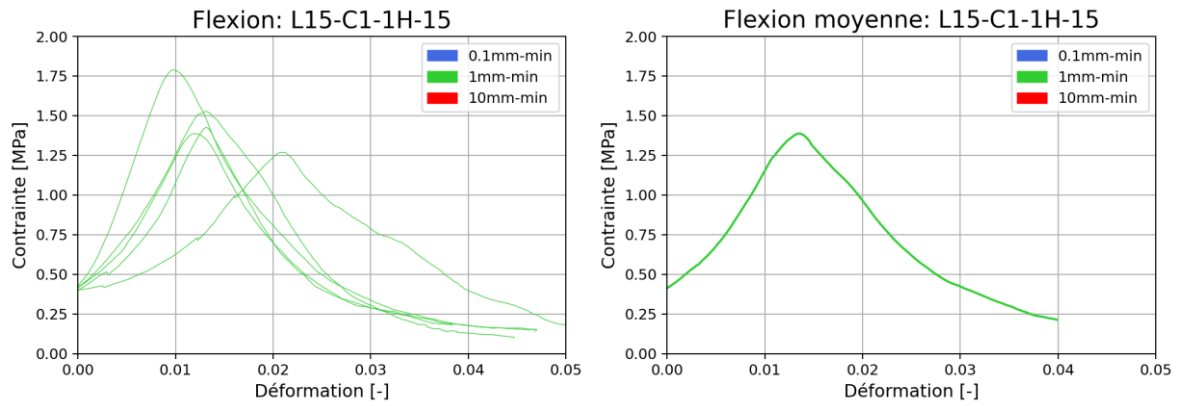


Figure 3.1-6 : Flexion L15-C1-1H-15

L30-C0-1H-15

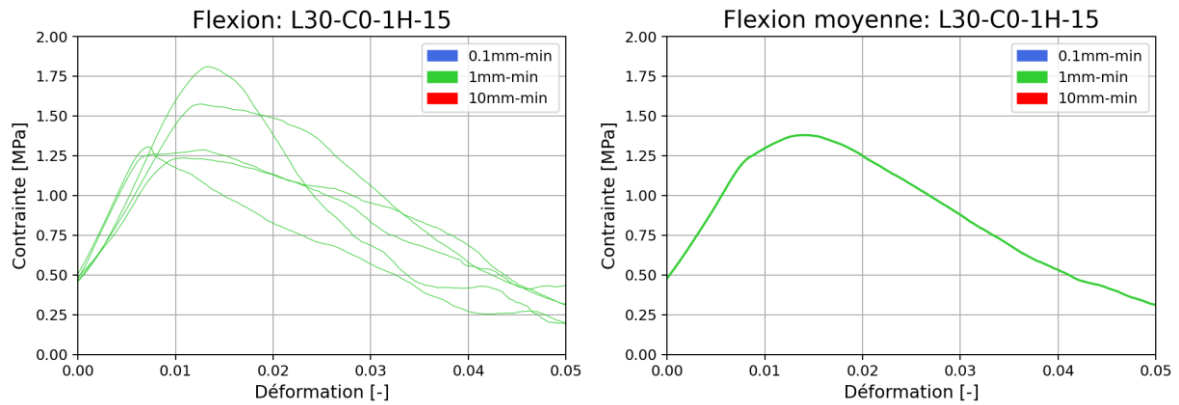


Figure 3.1-7 : Flexion L30-C0-1H-15

L30-C1-1H-15

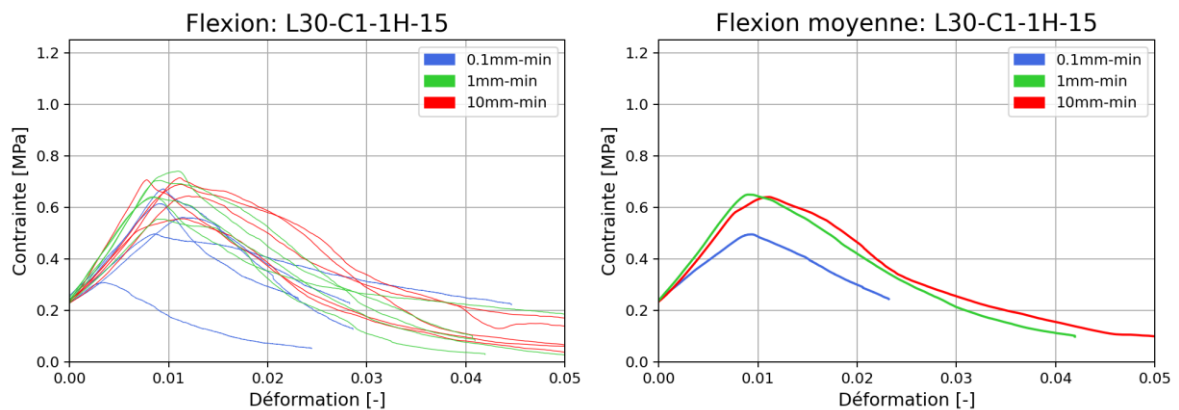


Figure 3.1-8 : Flexion L30-C1-1H15

L30-C1-1H-15-(R50)

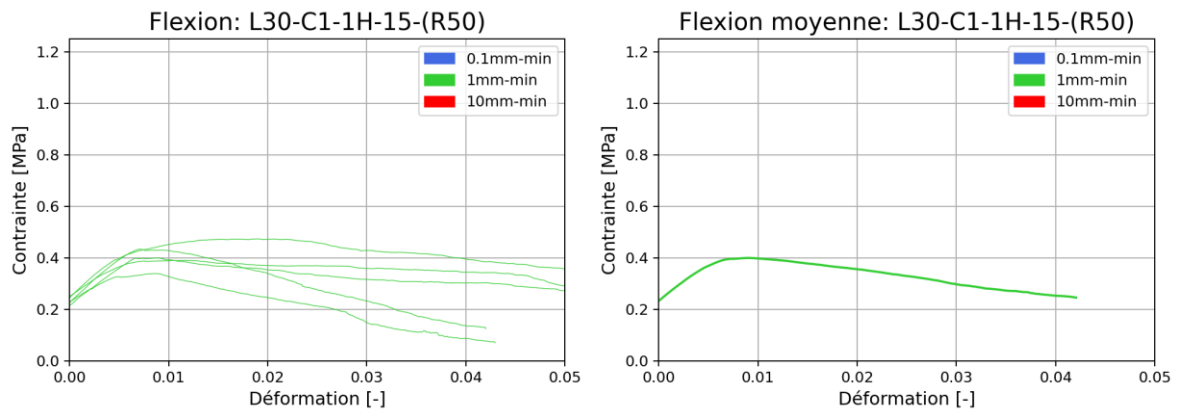


Figure 3.1-9 : Flexion L30-C1-1H-15-(R50)

L30-C1-1H-5-(1)

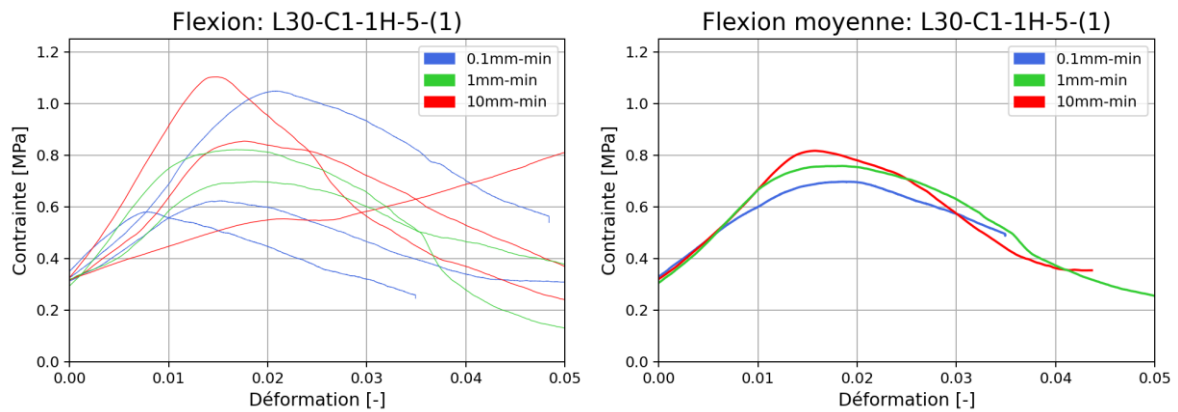


Figure 3.1-10 : Flexion L30-C1-1H5-(1)

L30-C1-1H-5-(2)

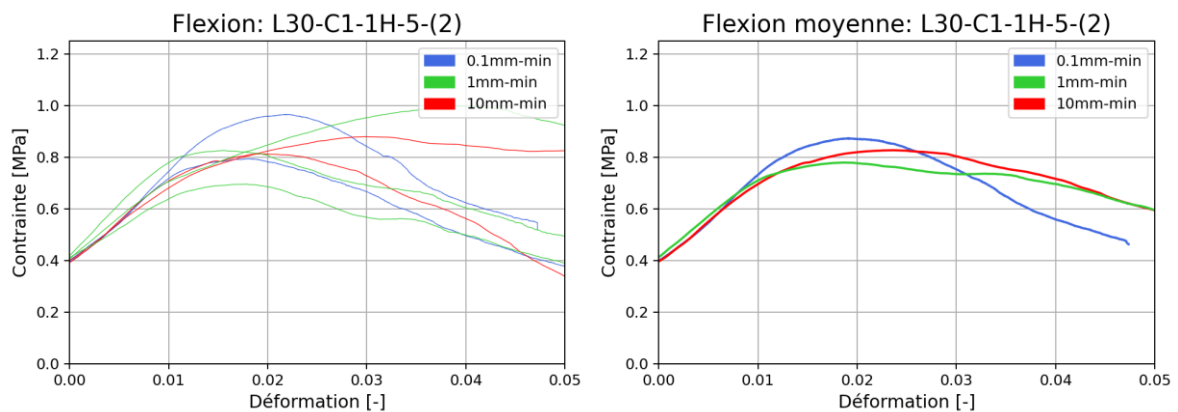


Figure 3.1-11 : Flexion L30-C1-1H-(5)

L30-C3-2H-15

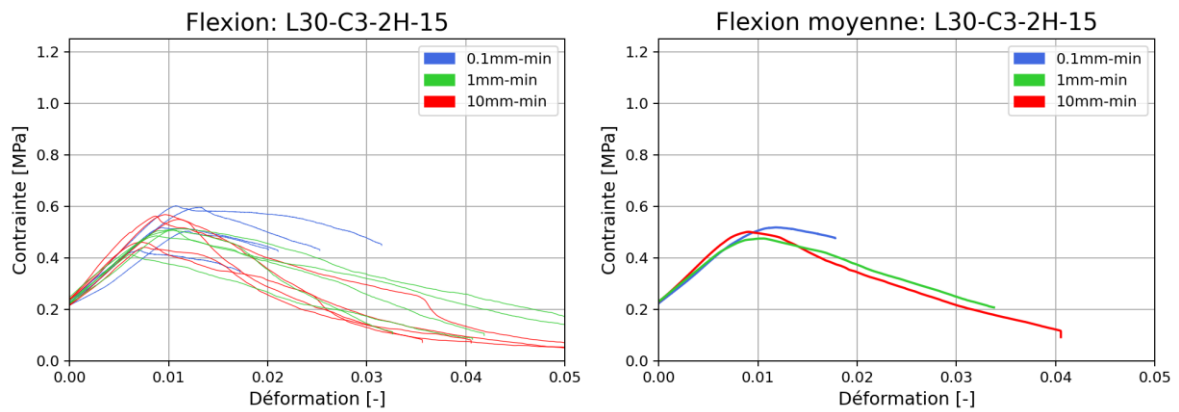


Figure 3.1-12: Flexion L30-C3-2H-15

L30-J1-1H-15

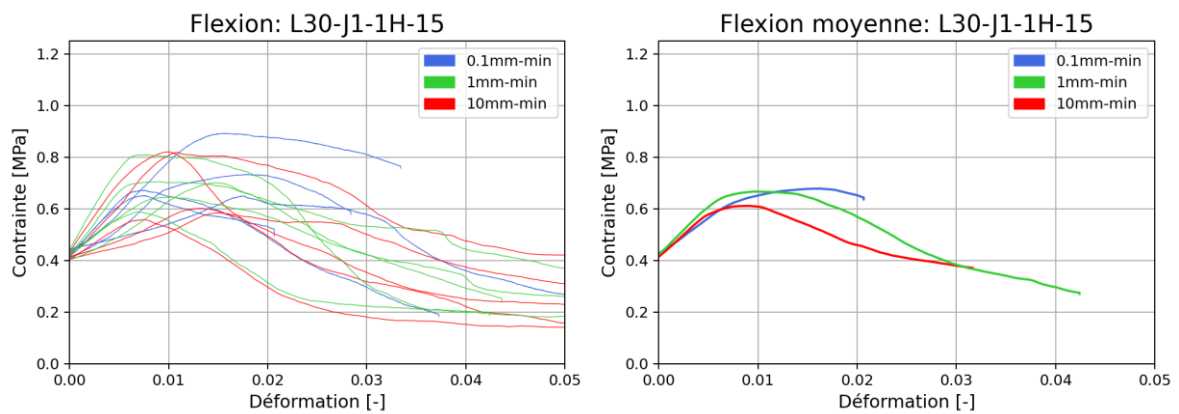


Figure 3.1-13: Flexion L30-J1-1H-15

L50-C1-1H-15

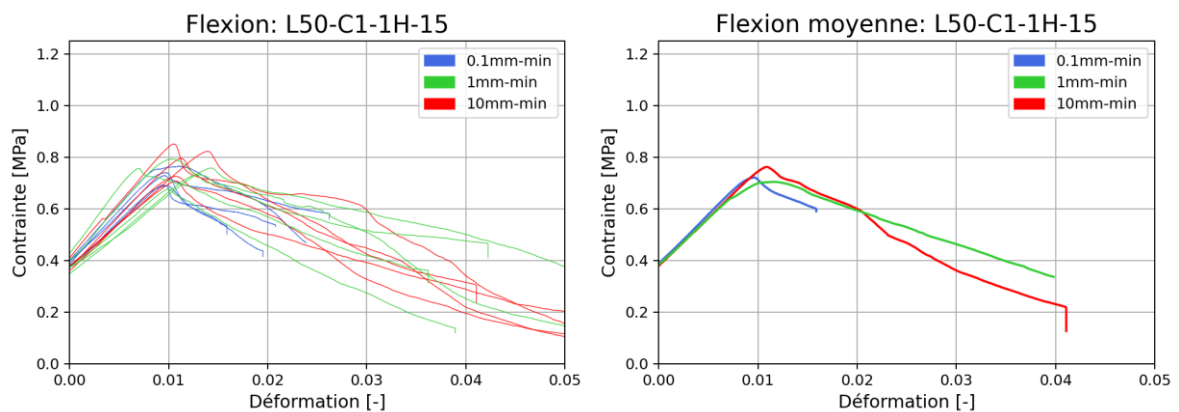


Figure 3.1-14: Flexion L50-C1-1H-15

M30-C1-1H-15

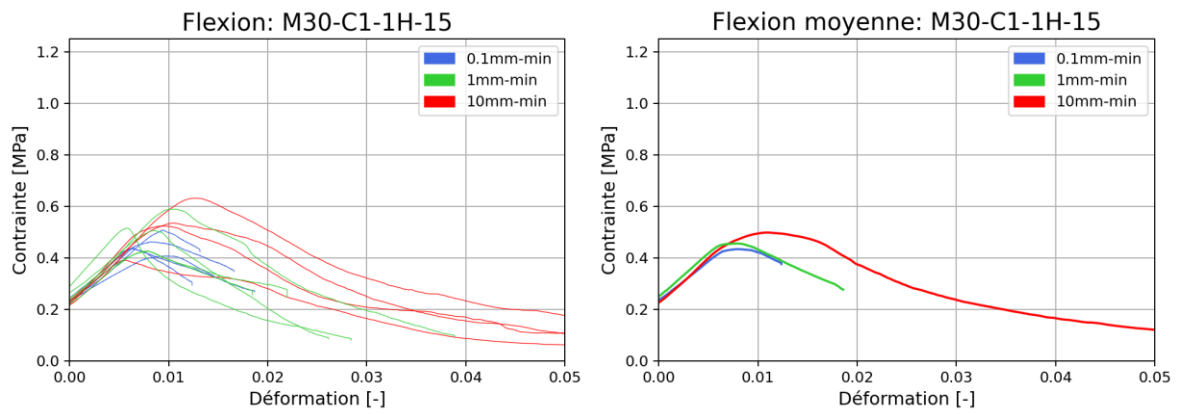


Figure 3.1-15: Flexion M30-C1-1H-15

P30-C1-1H-15

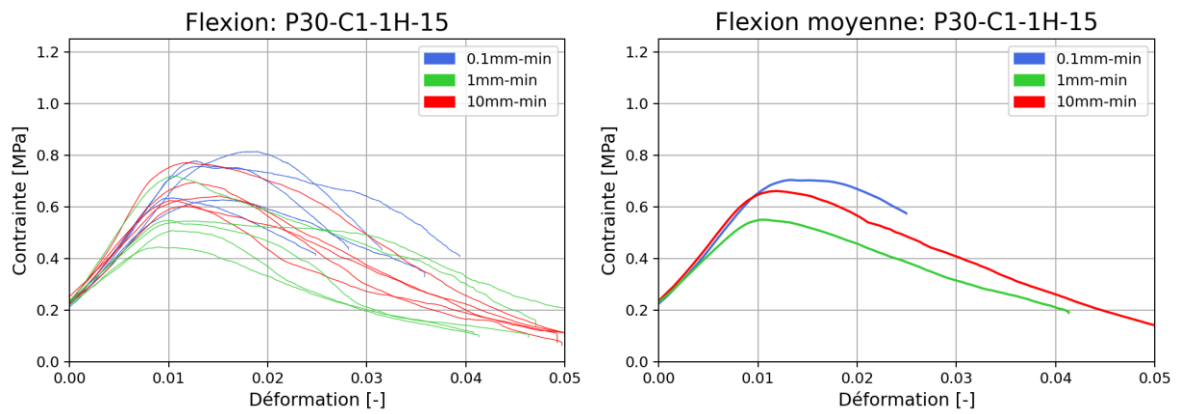


Figure 3.1-16: Flexion P30-C1-1H-15

3.1.3 BOXPLOT RÉCAPITULATIFS

Ce graphe (Figure 3.1-17) reprend les contraintes à la rupture en flexion de chaque composition sous la forme dans un *boxplot* et permet de comparer les performances de chaque composition et la dispersion des résultats. Les valeurs de contraintes à la rupture en flexion varient donc entre 0.4 et 1.75 [MPa] en fonction des compositions.

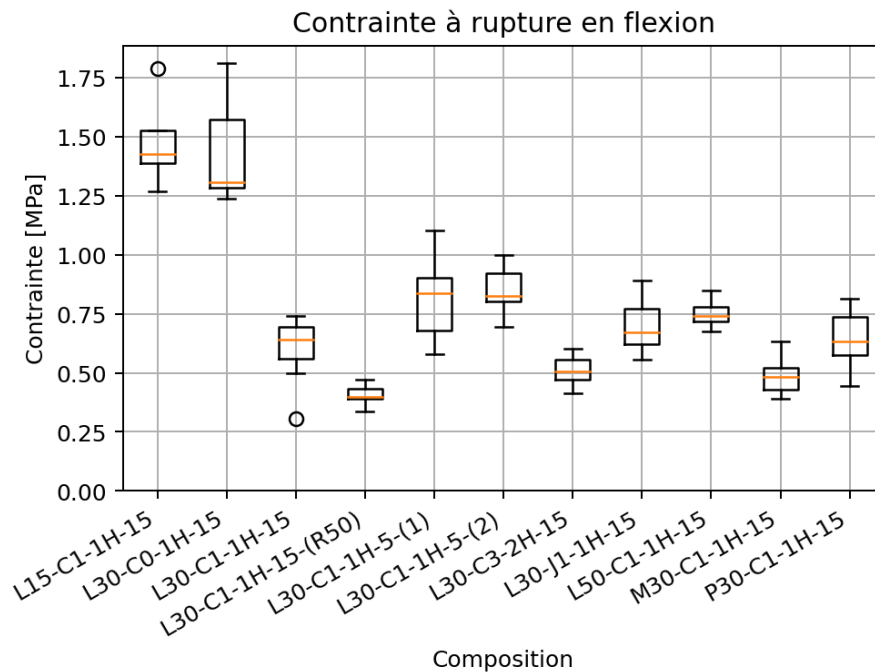


Figure 3.1-17: Boxplot des contraintes à la rupture en flexion

3.1.4 DISCUSSION SUR LA MÉTHODOLOGIE

L'essai de flexion est considéré comme fiable car il a été réalisé sur un nombre d'échantillons suffisamment large pour assurer une reproductibilité correcte. Cependant, si on veut l'améliorer, il faudrait refaire le test avec des échantillons dont les dimensions correspondent mieux à la définition d'une poutre : une section transversale plus petite ou une longueur plus grande sont nécessaires pour respecter le critère $L/h > 20$ (voir section 2.2.3), afin d'appliquer la théorie des poutres.

Par ailleurs, les résultats de la DIC pourraient être utilisés pour calculer les contraintes et déformations de la fibre inférieure du matériau avec une meilleure précision : cela permettrait de s'affranchir de plusieurs hypothèses pas tout à fait exactes.

3.2 COMPRESSION UNI-AXIALE

A nouveau, en compression uni-axiale, les premières campagnes d'essais ont été menées à plusieurs vitesses différentes. Une vitesse lente, initialement fixée à 0.1 [mm/min] puis augmentée à 0.5 [mm/min] pour limiter le temps nécessaire aux expériences, une vitesse moyenne à 1 [mm/min] et une vitesse rapide à 10 [mm/min]. Après analyse des premiers résultats, il est apparu que la vitesse n'influait pas les résultats de façon significative. La suite des essais a été faite à une vitesse unique, la vitesse moyenne (1mm/min).

Pour chaque composition, et à chaque vitesse, 5 échantillons ont été testés. Sur ces 5 échantillons, 2 suivaient un protocole de compression directe jusqu'à atteindre la rupture. Les 3 autres subissaient 3 cycles de charge/décharge entre 1000N et 10N avant d'aller jusqu'à la rupture (la borne inférieure était fixée à 50N pour la vitesse rapide afin d'éviter une perte de contact entre les plateaux et l'échantillon).

Avant de présenter les résultats finaux, une section portant sur le traitement des résultats détaille les calculs permettant l'obtention de ces graphes en prenant la composition de référence *L30-C1-1H-15* comme exemple.

3.2.1 TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Les résultats bruts se présentent sous la forme d'un fichier « .dat ». Ce fichier contient 6 colonnes qui reprennent :

- Le temps [s]
- La force appliquée par la presse hydraulique sur l'échantillon [kN]
- Le déplacement de la traverse [mm]
- Le déplacement de l'extensomètre longitudinal nommé « extenso » [mm]
- Le déplacement de l'extensomètre longitudinal nommé « extenso G » [mm]
- Le déplacement de l'extensomètre diamétral nommé « Aux » [mm]

Ces données brutes permettent d'obtenir les graphes force-déplacement présentés à la Figure 3.2-1 (uniquement pertinent avec le déplacement mesuré par la machine). La présence de « pics » parasites sur les graphes peut être observée dans la partie plastique sur la figure de gauche. Il s'agit d'une perturbation de la mesure due à quelques secondes d'interruption de l'essai nécessaire au retrait de l'extensomètre diamétral. La figure de droite montre l'effet d'un code de « nettoyage » de la mesure pour supprimer ces pics.

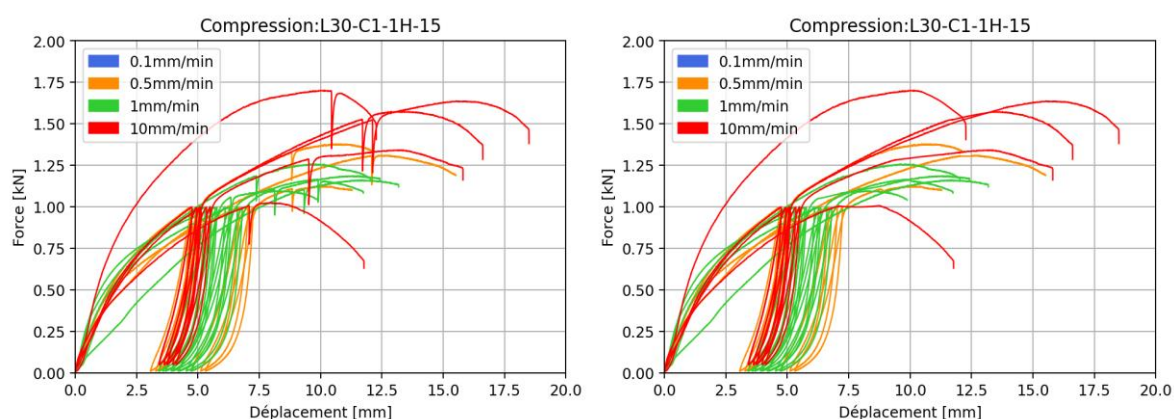


Figure 3.2-1 : Résultats bruts de l'essai de compression sur la composition L30-C1-1H-15

En divisant le déplacement par la longueur initiale de l'échantillon, on trouve la déformation ($\frac{L-L_0}{L_0}$). On peut faire pareil pour le déplacement de l'extensomètre divisé par sa longueur initiale. Cette transformation permet de s'affranchir des dimensions de l'échantillon et de comparer les résultats de la machine et ceux des extensomètres sur la même échelle. Par ailleurs, il est utile de diviser la force par la section de l'échantillon pour

obtenir la contrainte, ce qui permet de comparer nos résultats à ceux d'autres matériaux. Les deux graphes sur la Figure 3.2-2 présentent, pour l'échantillon C17 de la composition L30-C1-1H-15, le résultat du passage en contrainte-déformation pour le déplacement machine et pour le déplacement mesuré par les extensomètres.

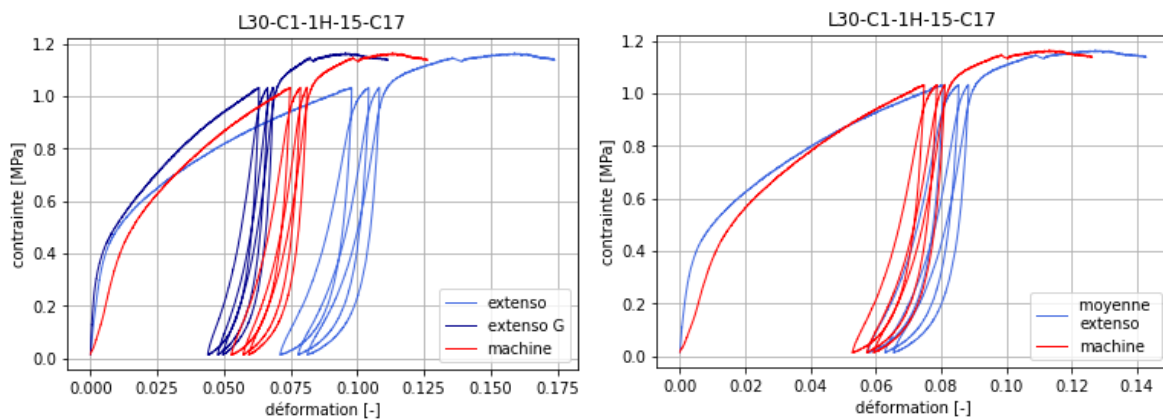


Figure 3.2-2 : Compression - Graphe contrainte-déformation - Echantillon L30-C1-1H-15-C17

Le graphe précédent met en évidence la présence d'un pied de courbe sur les mesures de la machine, qui n'est pas présent sur la mesure de l'extensomètre. Par ailleurs, la pente au début de la courbe est plus verticale sur la mesure des extensomètres que sur celle de la machine. Cette pente permettant de calculer le module de Young, paramètre essentiel à la caractérisation de notre matériau, il a été choisi de faire confiance à la mesure des extensomètres plutôt qu'à celle de la machine. En effet, cette dernière est probablement altérée par la compliance machine et l'adaptation des plateaux de compression aux surfaces de l'échantillon. Les extensomètres étant placés de part et d'autre de l'échantillon, une moyenne a été appliquée pour obtenir une mesure unique de la déformation de l'échantillon, supposée représentative de ce qu'il se passe au centre du matériau durant l'essai. On obtient donc les graphes de la Figure 3.2-3, représentant la courbe contrainte-déformation de chaque échantillon testé en fonction de la vitesse de l'essai.

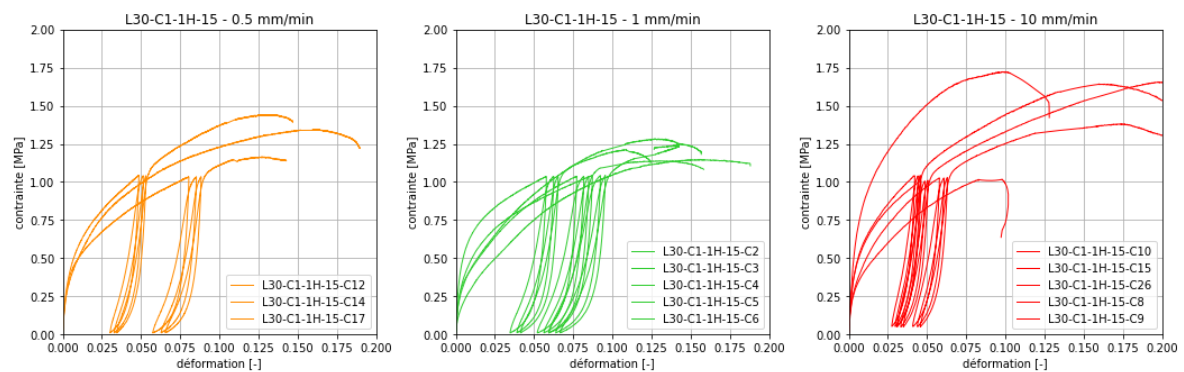


Figure 3.2-3 : Compression - contrainte-déformation par vitesse - composition L30-C1-1H-15

Afin d'être plus concis, les résultats finaux reprennent l'ensemble des essais d'une composition, à toutes les vitesses sur un seul graphe, comme celui de la Figure 3.2-4. A côté de ce dernier, un graphe représente un zoom sur le début de la courbe d'un échantillon représentatif, permettant ainsi de mieux lire le comportement du matériau pour des petites déformations (<2%). La représentation graphique du module de Young est également indiquée. L'échantillon représentatif est choisi comme étant celui dont le module de Young est le plus proche de la moyenne.

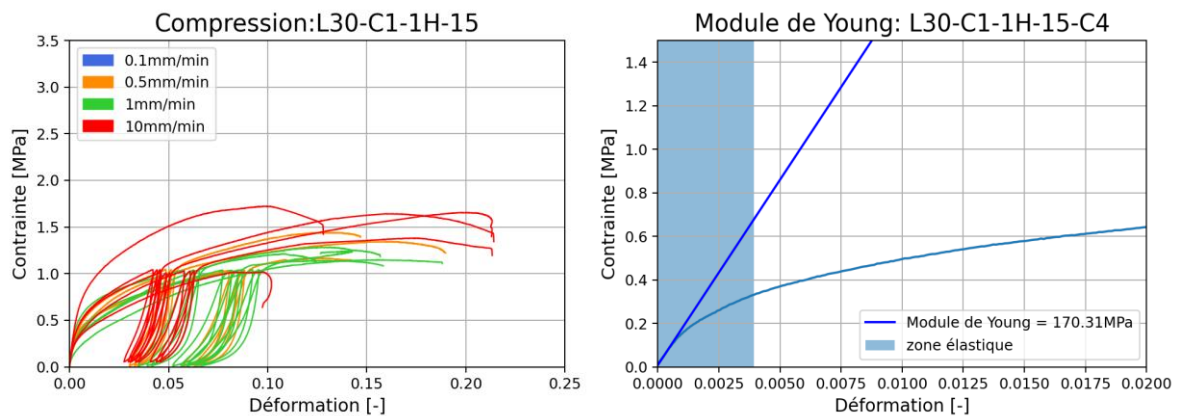


Figure 3.2-4 : Compression - Graphes finaux - composition L30-C1-1H-15

Calcul des paramètres

En plus des résultats graphiques, un tableau résume les valeurs moyennes obtenues pour les principaux paramètres de chaque composition. Celui de la composition L30-C1-1H-15 est donné en exemple ci-dessous. Chacune des valeurs données dans le tableau est la valeur moyenne de ce paramètres calculé pour tous les échantillons de la composition.

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
170.97 MPa	267.27 MPa	0.37 MPa	0.045	1.3 MPa	0.1248

Tableau 3.2-1 : Compression - Récapitulatif des paramètres moyens - composition L30-C1-1H-15

Le **module de Young** est calculé comme étant la pente la plus forte de la courbe contrainte-déformation, dans la partie élastique de la déformation de l'échantillon. Cette pente est représentée par un trait bleu foncé sur la Figure 3.2-4.

A côté du module de Young, on retrouve le module de Young calculé sur les cycles de charge-décharge, appelé **Young CDC**. Celui-ci est une moyenne des pentes maximales à la décharge sur les différents cycles de charge-décharge des échantillons testés (voir exemple sur la Figure 3.2-5).

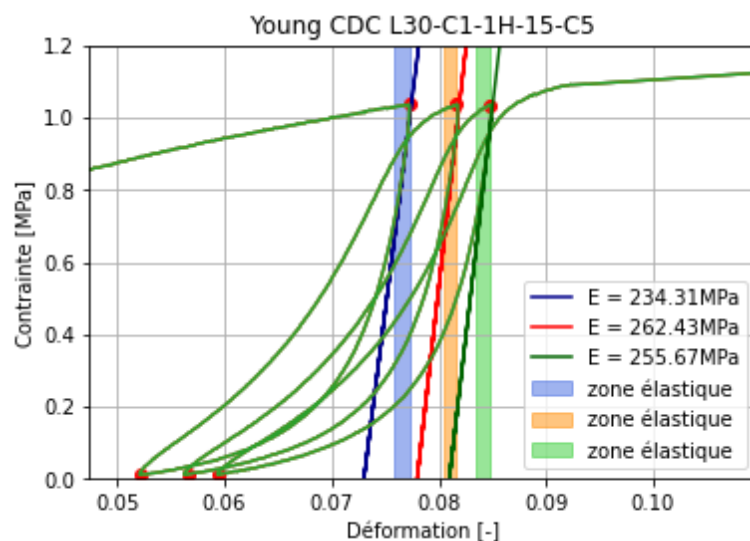


Figure 3.2-5 : Module de Young sur les cycles charge-décharge

La **limite d'élasticité** fournie dans le tableau est la limite à 0,2% de déformation. Pour les matériaux dont la limite d'élasticité n'est pas visible à l'œil nu comme un changement de pente marqué, il est courant de considérer une limite d'élasticité à 0,2% de déformation. Concrètement, il s'agit de tracer une droite ayant pour pente le module de Young et passant par le point $[\epsilon = 0,2\%, \sigma = 0]$. La contrainte à l'intersection de cette droite avec la courbe de l'essai donne la valeur de la limite d'élasticité du matériau (voir Figure 3.2-6)

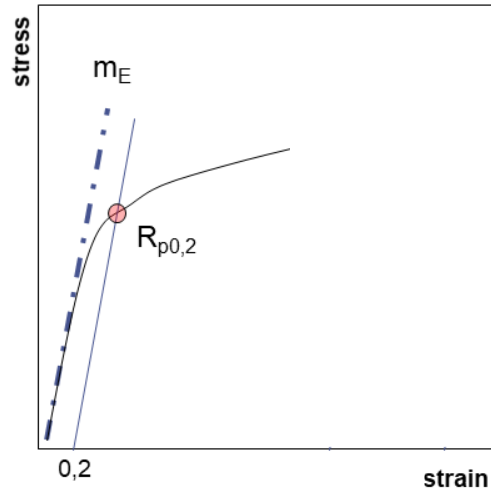


Figure 3.2-6 : Limite d'élasticité à 0,2% [40]

Concernant le **coefficient de poisson** ν , il donne le rapport entre la déformation diamétrale et longitudinale et est calculé selon la formule 3.5 :

$$\nu = \frac{1 - \frac{d}{d_0}}{\frac{l}{l_0} - 1} \quad (3.5)$$

Dans ce cas, le diamètre est mesuré par l'extensomètre de diamètre et la déformation $l/l_0 - 1$ est donnée par les extensomètres longitudinaux. Ce coefficient de poisson n'est valide que dans la zone élastique. La zone élastique est, ici, définie comme la zone pour laquelle la pente du graphe vaut le module de Young $\pm 5\%$. Elle est désignée par la zone bleu clair sur le graphe Figure 3.2-4.

Le point de rupture est le point pour lequel la contrainte est maximale. **La contrainte à la rupture** ainsi que la **déformation à la rupture** sont donc les abscisses et ordonnées de ce même point.

3.2.2 RESULTATS PAR COMPOSITION

L15-C1-1H-15

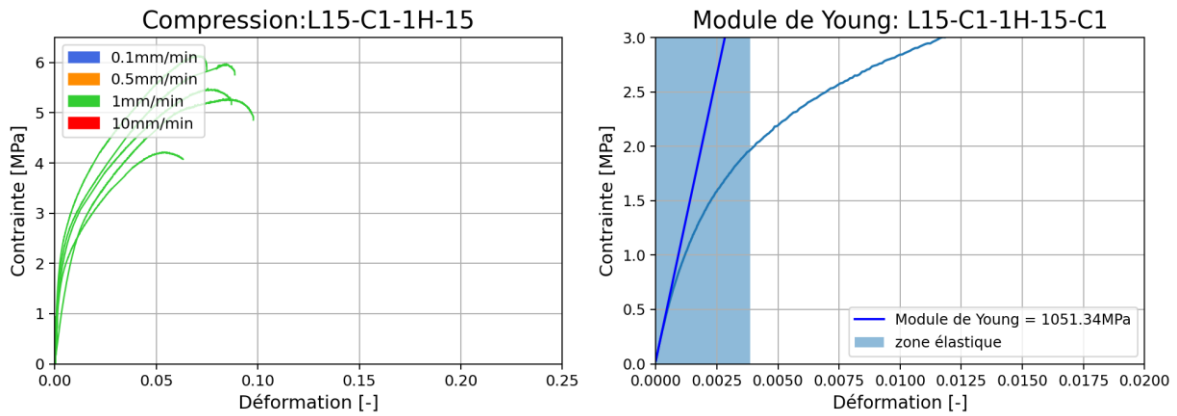


Figure 3.2-7: Compression L15-C1-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
1028.8 MPa	1231.45 MPa	2.07 MPa	0.0523	5.68 MPa	0.0848

L30-C0-1H-15

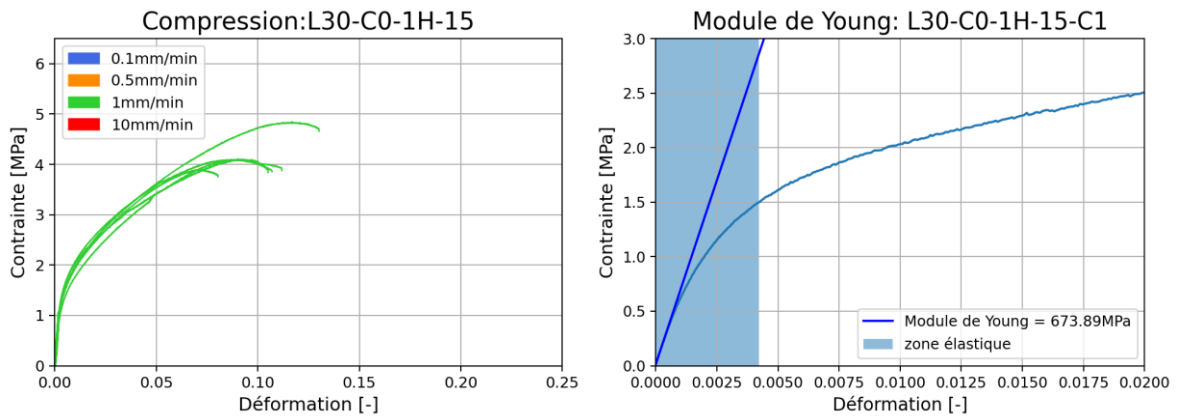


Figure 3.2-8 : Compression L30-C0-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
701.47 MPa	678.23 MPa	1.38 MPa	0.0367	4.35 MPa	0.0954

L30-C1-1H-15

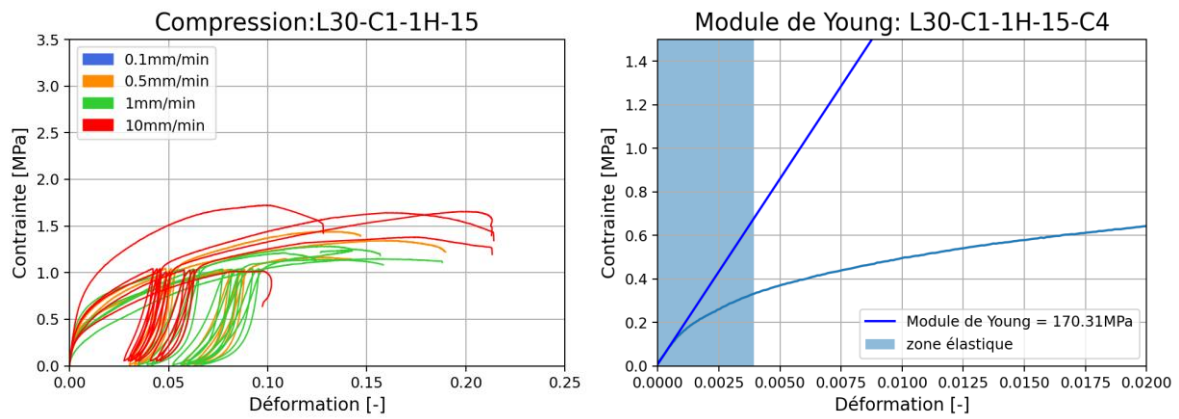


Figure 3.2-9: Compression L30-C1-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
170.97 MPa	267.27 MPa	0.37 MPa	0.045	1.3 MPa	0.1248

L30-C1-1H-15-(R50)

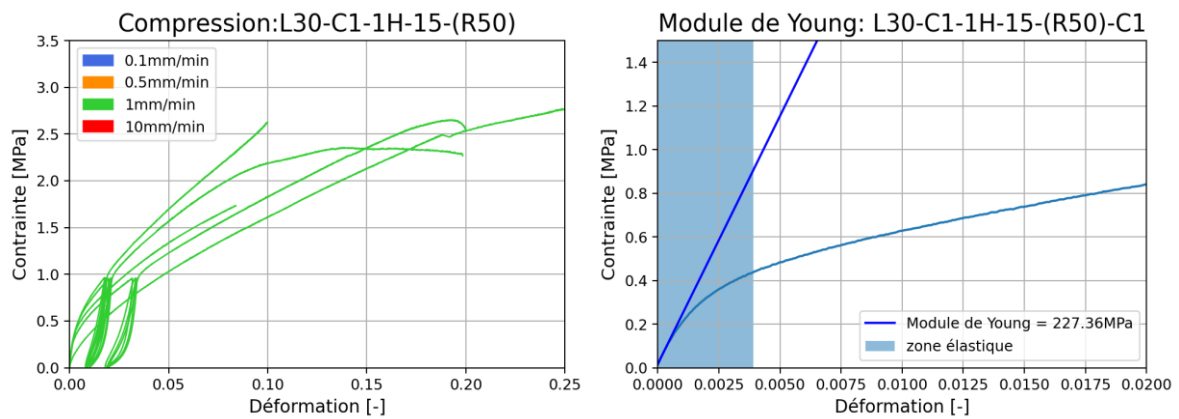


Figure 3.2-10: Compression L30-C1-1H-15-(R50)

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
217.79 MPa	298.62 MPa	0.39 MPa	0.0414	2.69 MPa	0.2078

L30-C1-1H-5-(1)

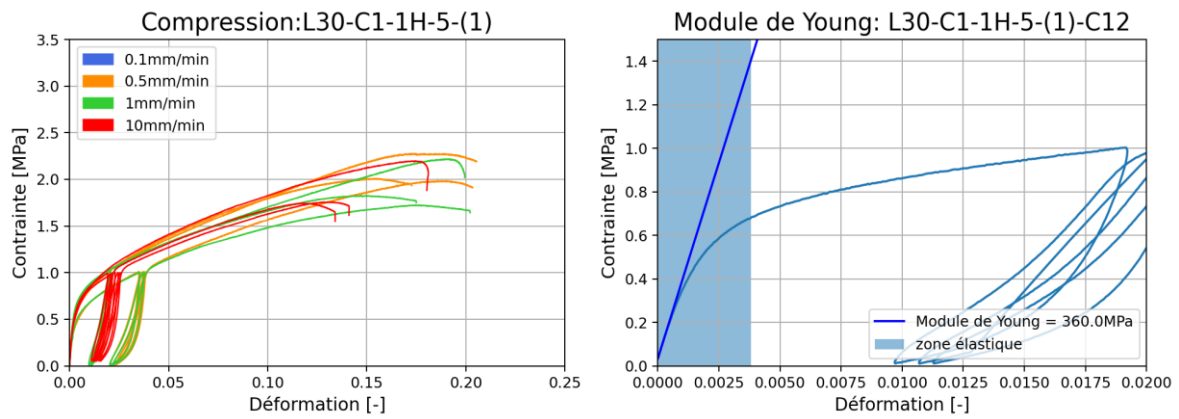


Figure 3.2-11: Compression L30-C1-1H-5-(1)

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
351.45 MPa	285.83 MPa	0.59 MPa	0.0368	1.97 MPa	0.1544

L30-C1-1H-5-(2)

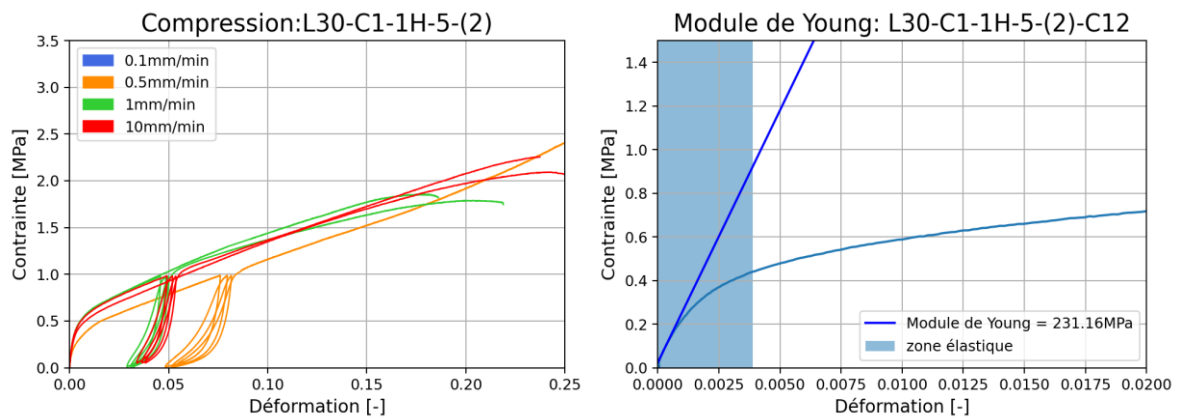


Figure 3.2-12: Compression L30-C1-1H-5-(2)

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
222.52 MPa	269.21 MPa	0.39 MPa	0.0419	2.13 MPa	0.2104

L30-C3-2H-15

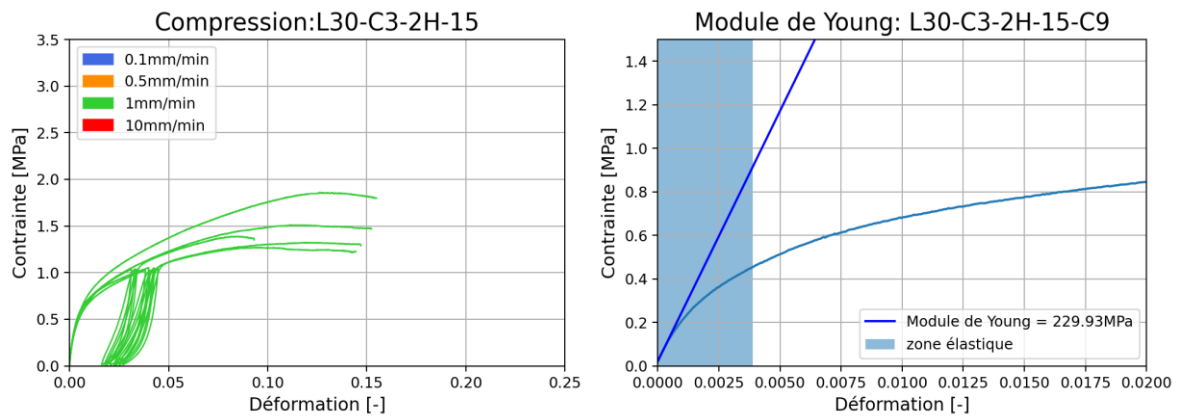


Figure 3.2-13: Compression L30-C3-2H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
236.63 MPa	253.21 MPa	0.49 MPa	0.0333	1.46 MPa	0.1314

L30-J1-1H-15

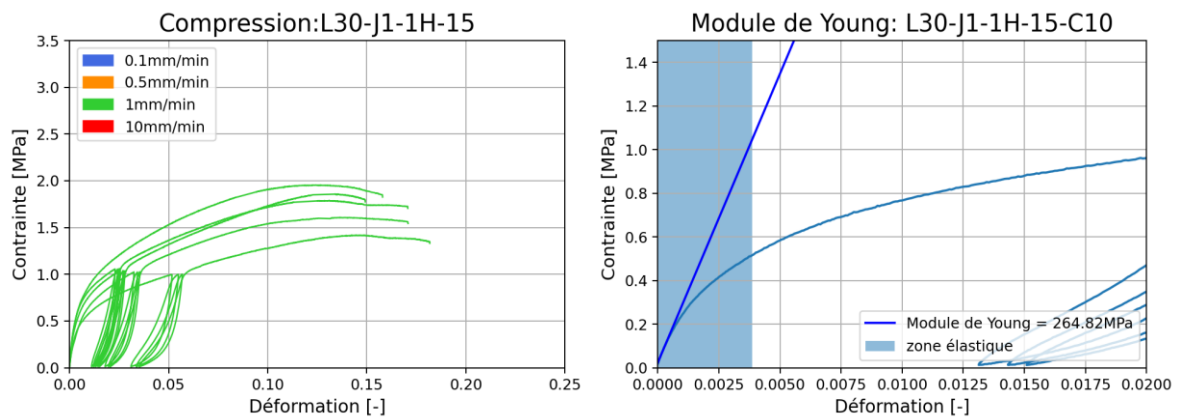


Figure 3.2-14: Compression L30-J1-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
251.65 MPa	258.1 MPa	0.5 MPa	0.0354	1.69 MPa	0.1258

L50-C1-1H-15

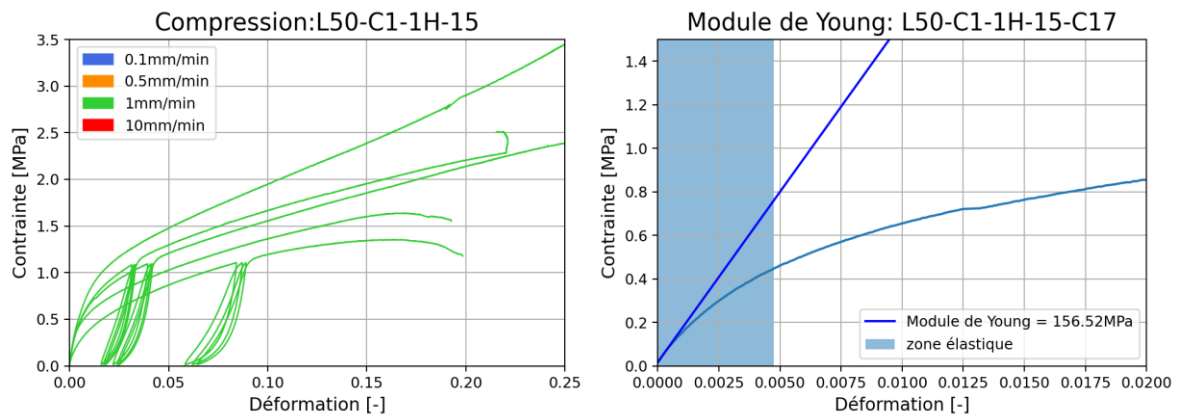


Figure 3.2-15: Compression L50-C1-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
163.99 MPa	206.07 MPa	0.41 MPa	0.0567	2.13 MPa	0.2094

M30-C1-1H-15

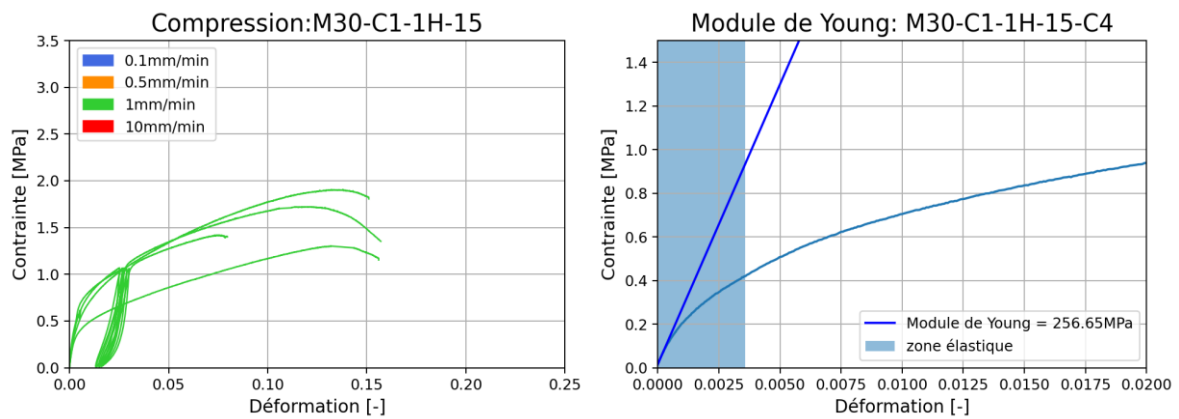


Figure 3.2-16: Compression M30-C1-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
234.68 MPa	303.98 MPa	0.51 MPa	0.0436	1.49 MPa	0.1191

P30-C1-1H-15

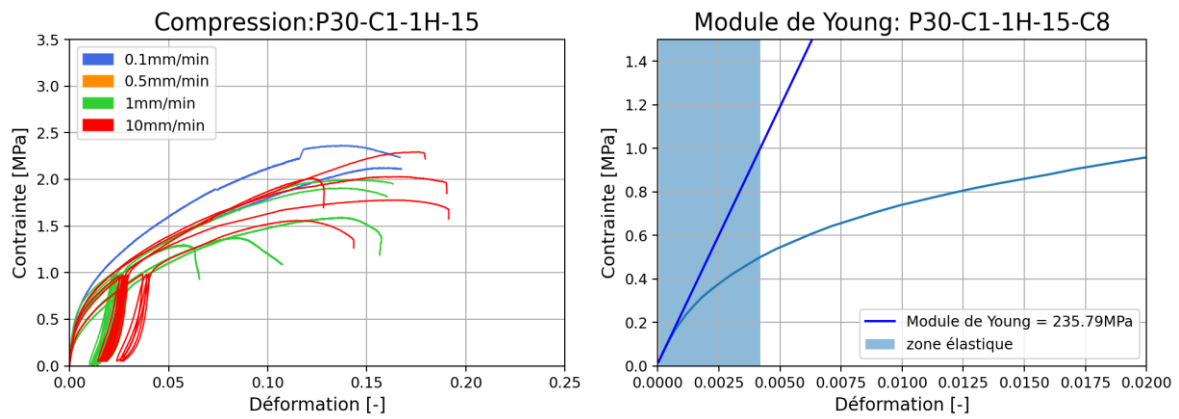


Figure 3.2-17: Compression P30-C1-1H-15

Module de Young	Module de Young CDC	Limite d'élasticité	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Déformation à rupture
240.15 MPa	243.25 MPa	0.45 MPa	0.0479	1.89 MPa	0.1252

3.2.3 BOXPLOT RÉCAPITULATIFS

Les graphes *boxplot* suivants permettent de comparer les différents paramètres de chaque composition en clin d'œil. Ils permettent également d'observer la dispersion des données.

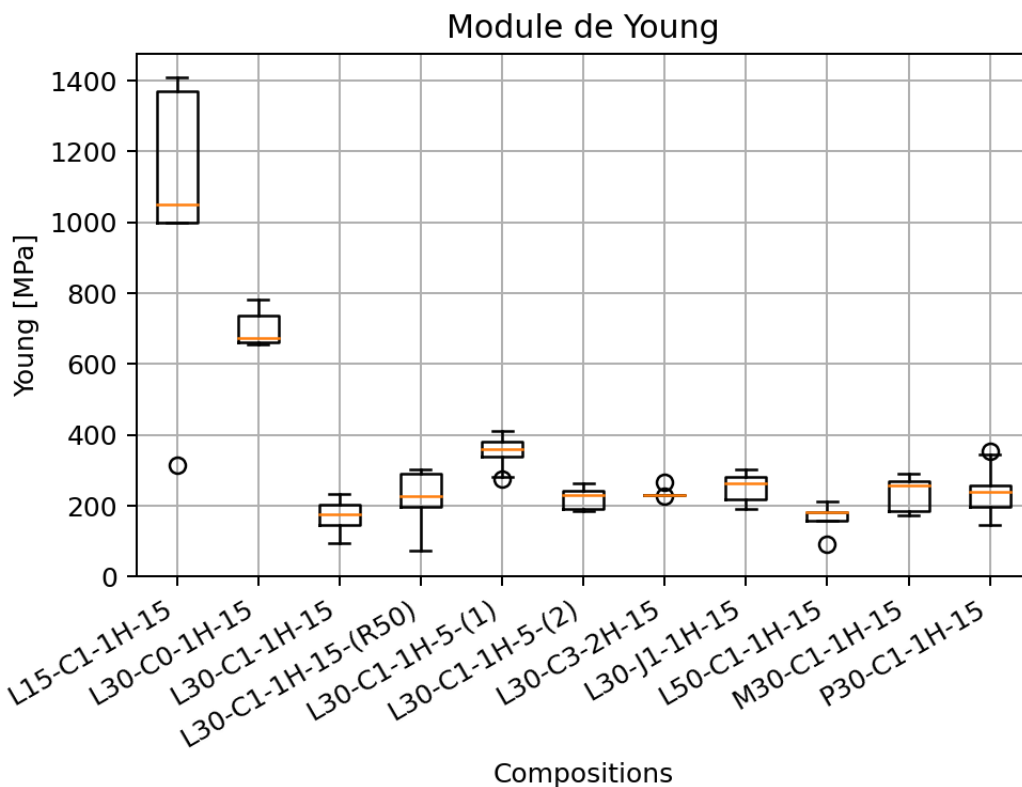


Figure 3.2-18: Boxplot du module de Young

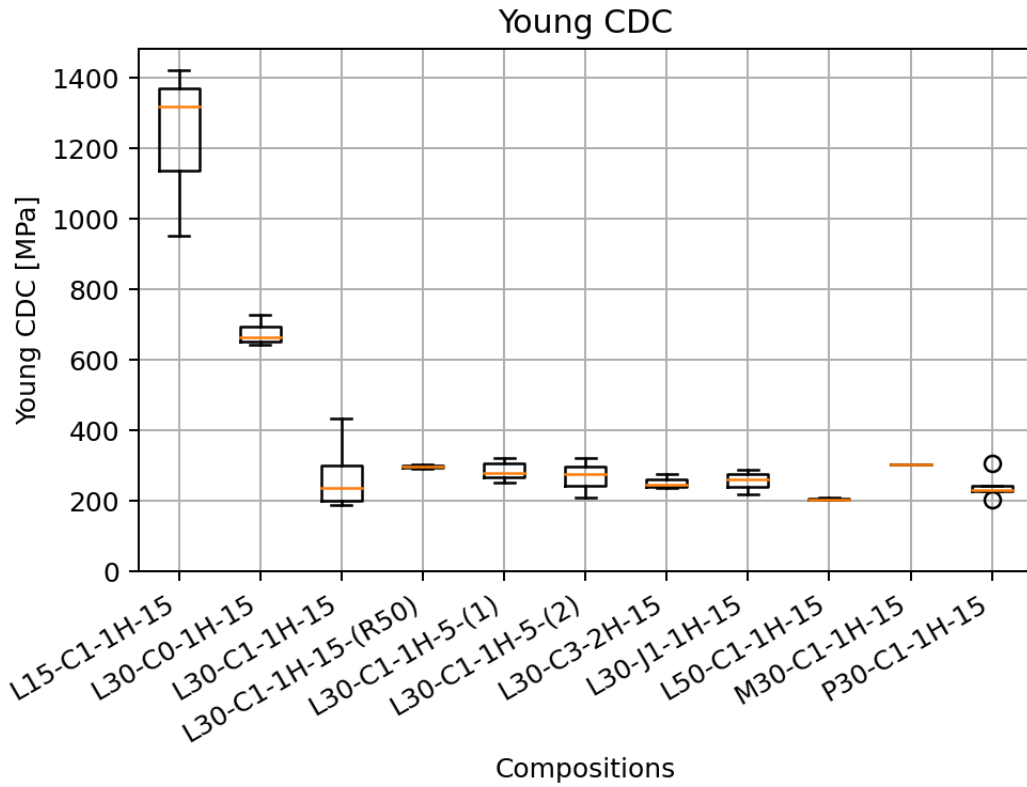


Figure 3.2-19: Boxplot du module de Young en charge-décharge

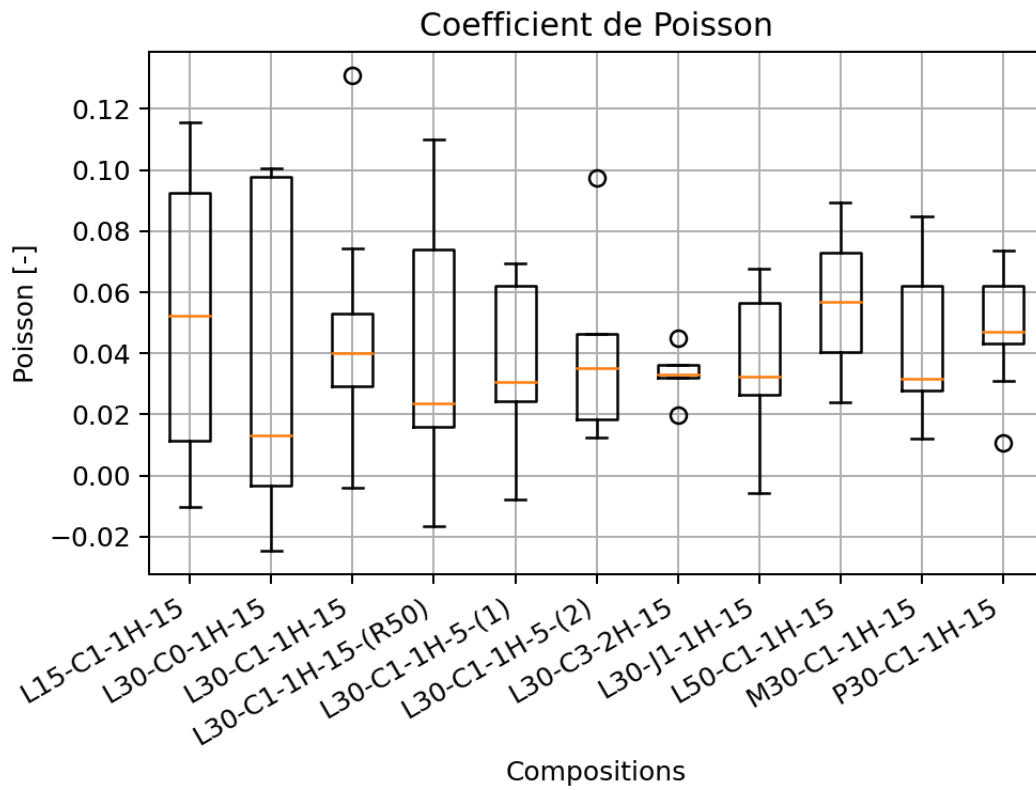


Figure 3.2-20: Boxplot du coefficient de Poisson

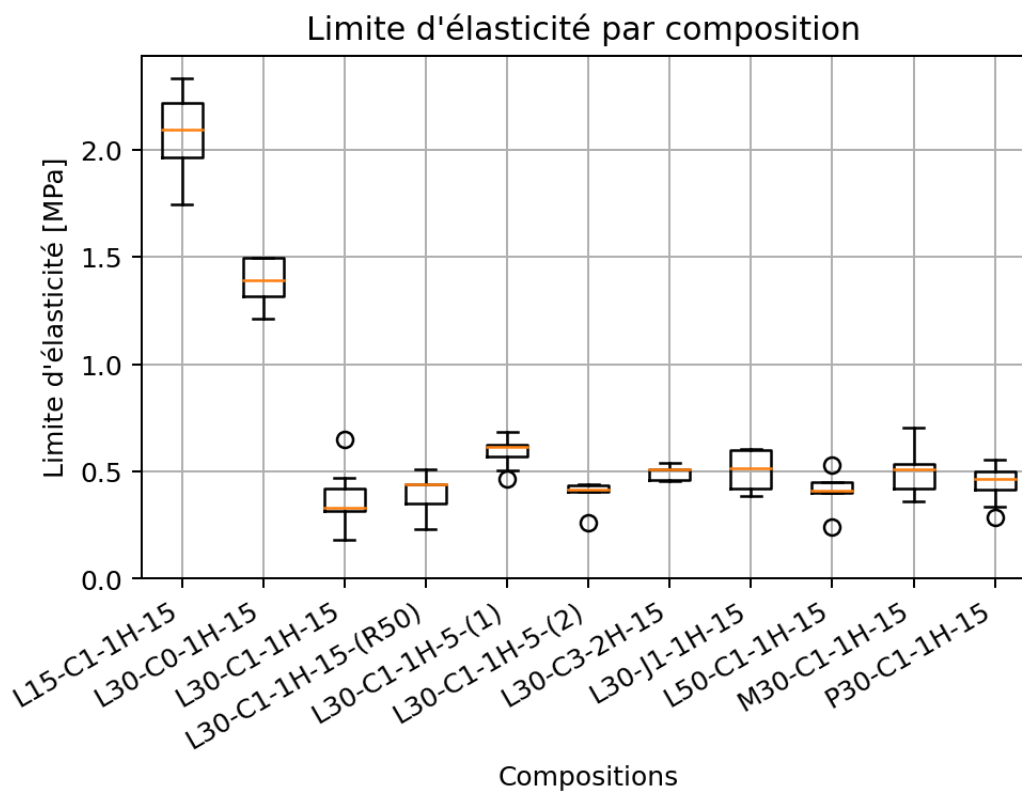


Figure 3.2-21: Boxplot de la limite d'élasticité en compression

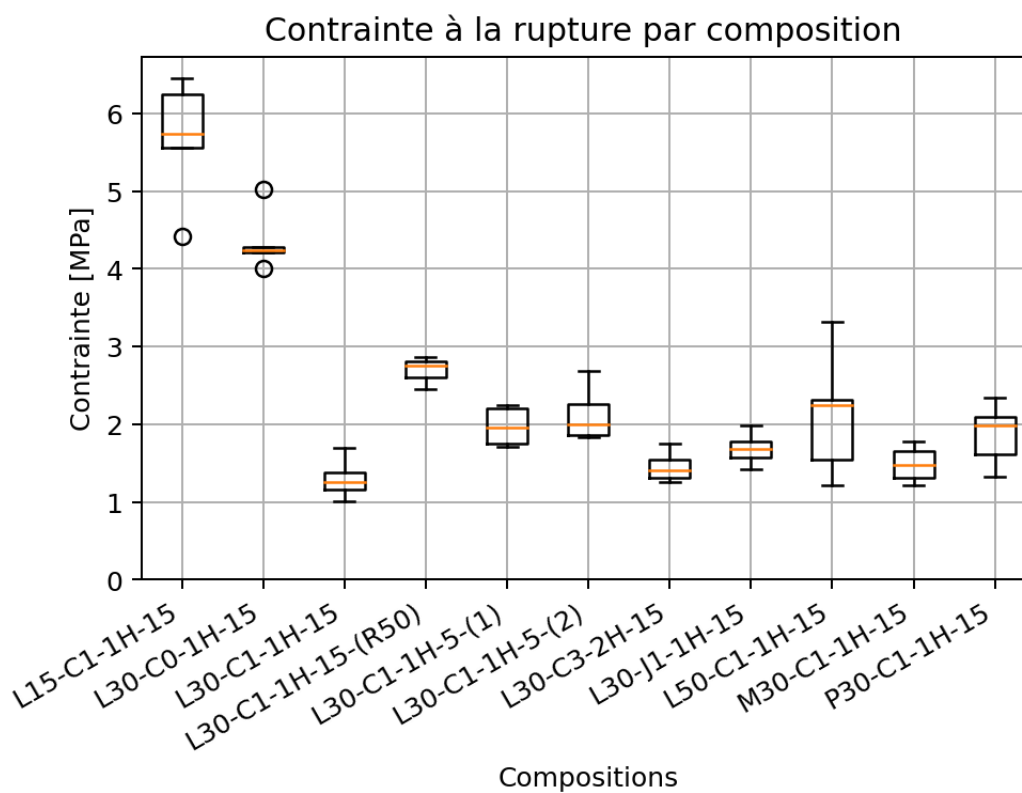


Figure 3.2-22: Boxplot de la contrainte à la rupture en compression

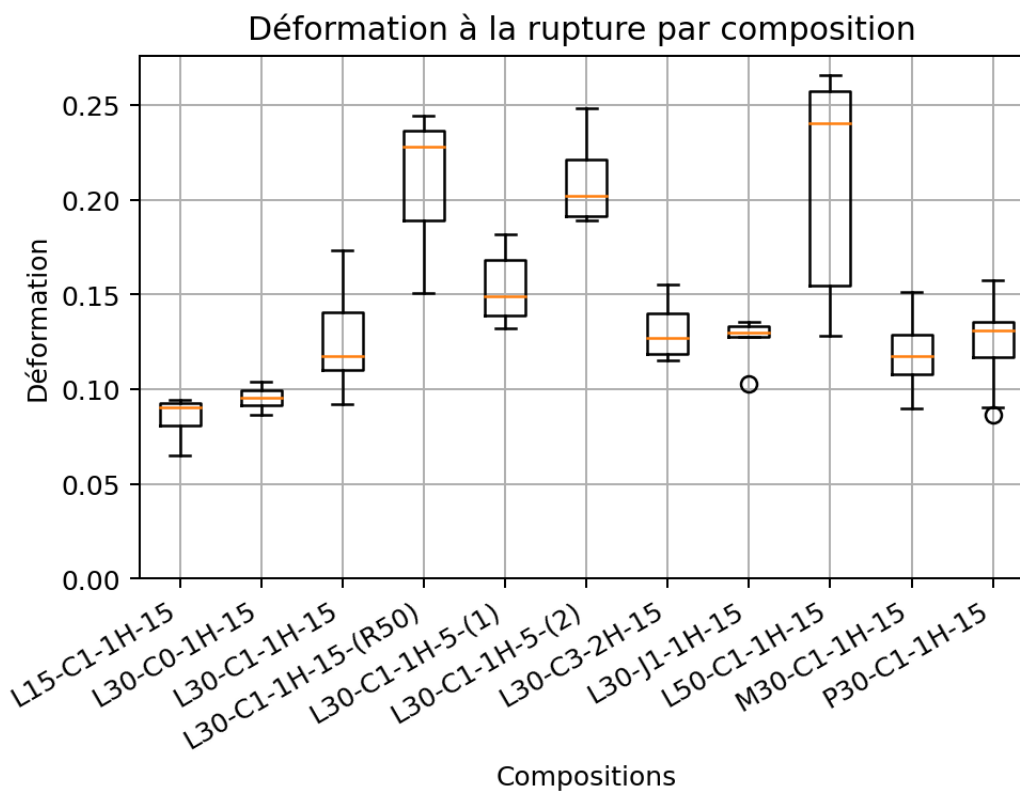


Figure 3.2-23: Boxplot de la déformation à la rupture en compression

3.2.4 DISCUSSION SUR LA METHODOLOGIE

Les essais de compression uni-axiale sont considérés comme fiables car ils portent sur un nombre d'échantillon suffisamment large pour assurer une reproductibilité correcte. De plus, le protocole est suffisamment maîtrisé.

Cependant, diverses améliorations sont possibles : un moulage des échantillons de meilleure qualité permettrait d'assurer une parfaite perpendicularité entre les faces supérieure et inférieure du cylindre et son axe longitudinal, permettant de garantir que la contrainte de compression est parfaitement répartie dans l'échantillon. Par ailleurs, la façon de fixer les extensomètres à l'aide d'élastiques a probablement un impact sur la résistance maximale du matériau en appliquant une contrainte de confinement diamétrale qui réhausse sa cohésion.

3.3 ESSAIS DE FLUAGE

Dans cette section, les données d'essais de fluage sont présentées. La disponibilité de la machine pour de long essais de ce type étant assez variable, c'est cela qui a déterminé la durée des différents essais.

Un exemple du traitement des résultats est donné pour la composition *L30-C3-2H-15*, qui contient plus de sable que de chaux. Les données brutes se présentent sous la même forme que celles des essais de compression décrits ci-dessus et leur traitement est similaire.

3.3.1 TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Les graphes « bruts » représentent le déplacement machine et le déplacement mesuré par les extensomètres en fonction du temps. Ces résultats ont ensuite été adaptés en déformation-temps (Figure 3.3-1). Sur les courbes de déformation de la machine, des vaguelettes apparaissent. Cela est probablement dû aux essais de fatigue (essais avec de nombreux cycles de charge/décharge) effectués en même temps sur des machines utilisant le même circuit hydraulique que la machine utilisée pour le fluage. Pour limiter l'impact de ces imprécisions, les données utilisées par la suite sont celles mesurées par les extensomètres.

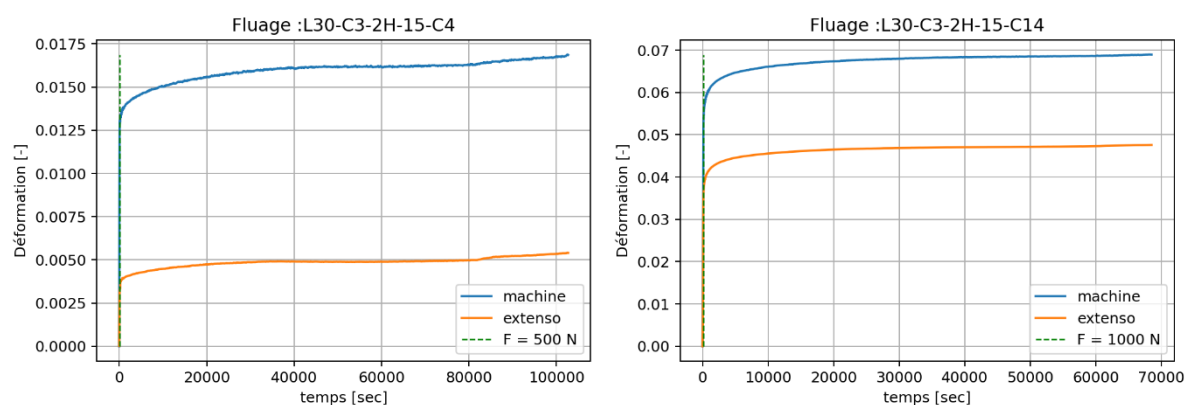


Figure 3.3-1 : Fluage - graphe contrainte-déformation - composition L30-C3-2H-15

Lorsqu'on regarde de manière plus précise sur le début de l'essai, on peut déterminer le temps d'application de la force et le moment où cette force atteint la valeur imposée :

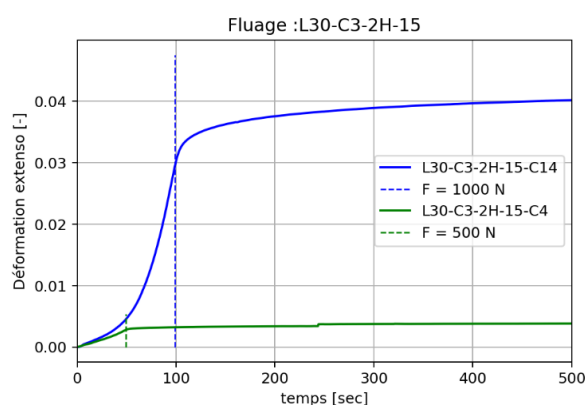


Figure 3.3-2 : Fluage - zoom sur le début de l'essai - L30-C3-2H-15

Ensuite, afin de pouvoir mieux observer le comportement de fluage du matériau, le graphe suivant montre la déformation et sa dérivée, la vitesse de déformation avec un axe du temps logarithmique (Figure 3.3-3).

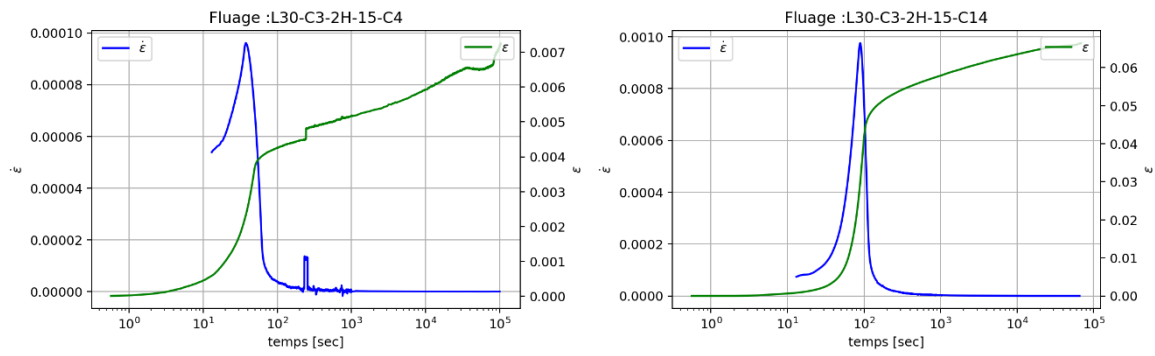


Figure 3.3-3 : Fluage - axes logarithmique - L30-C3-2H-15

3.3.2 RÉSULTATS

Les résultats des essais de fluage sont tous représentés sur la Figure 3.3-4

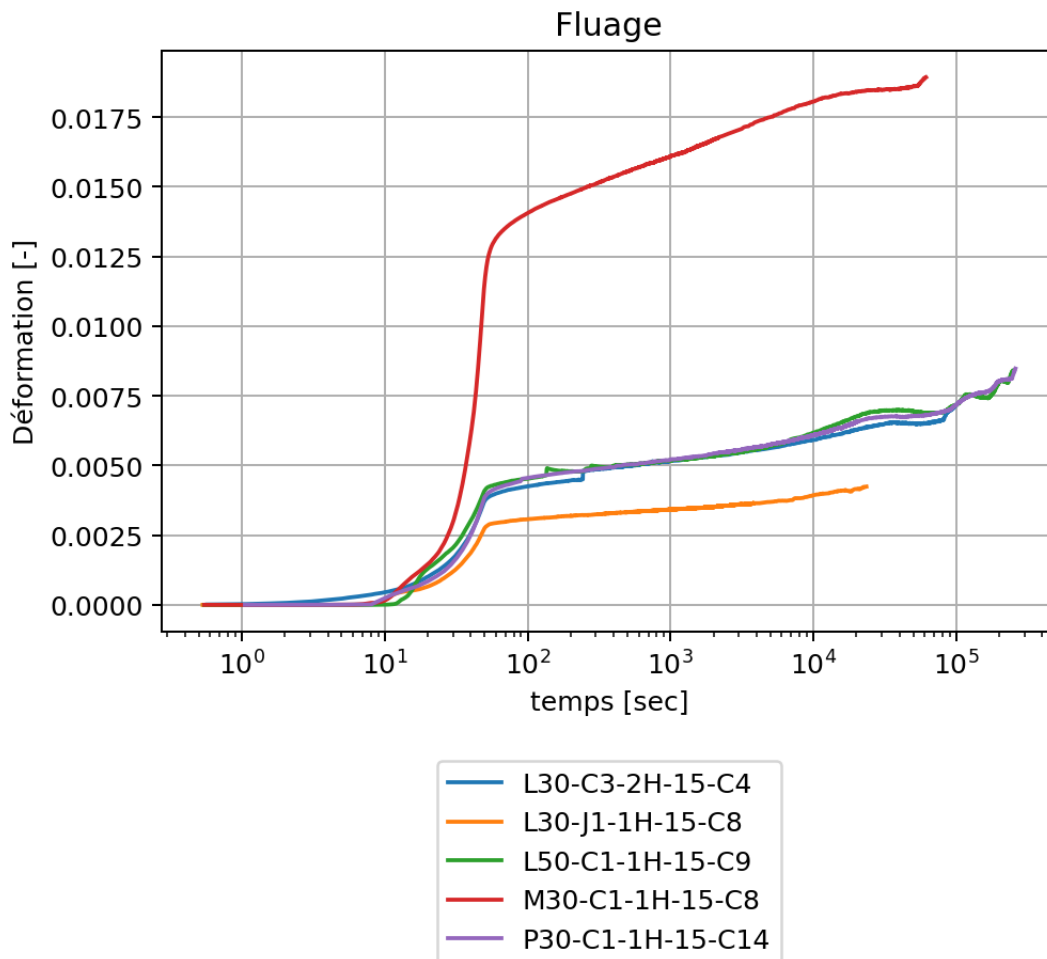


Figure 3.3-4 : Ensemble des résultats de fluage

3.3.3 MODÈLE DE FLUAGE

Recherches théoriques :

Si on repart d'un schéma de fluage classique, celui-ci est constitué de 3 parties : le fluage primaire, secondaire et tertiaire. Sur le graphe de la Figure 3.3-5, ϵ_0 est la déformation élastique lors de la mise en charge. [41]

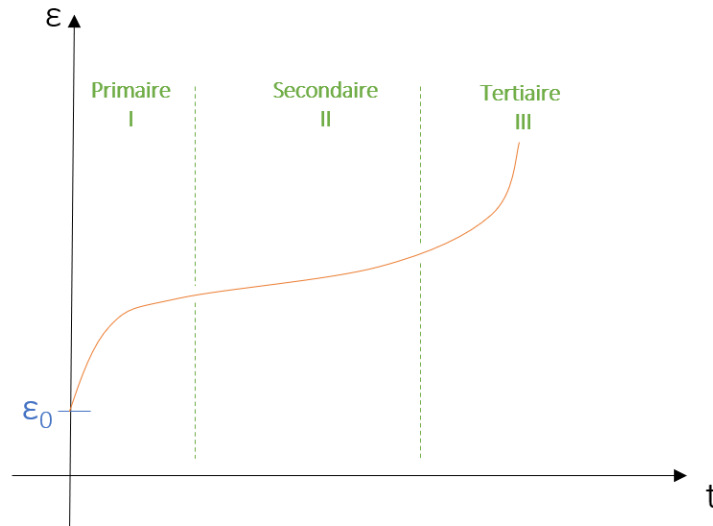


Figure 3.3-5 : Schéma de fluage

I. Equation de fluage primaire [42] :

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta t^m \text{ avec } 0 < m < 1 \quad (3.6)$$

II. Fluage secondaire : dans cette section la vitesse de déformation est constante.

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3.7)$$

B et n sont des constantes qui dépendent du matériau, $-Q$ est l'énergie d'activation du mécanisme contrôlant la vitesse de fluage, R la constante des gaz parfaits ($8.31 \text{ [mol K]}^{-1}$) et T est la température absolue. [43]

III. Fluage tertiaire : zone dans laquelle la microstructure est altérée et la vitesse de déformation s'accélère jusqu'à la rupture.

Dans nos essais la limite a été le temps d'essais et non la rupture de l'échantillon. Nous obtenons donc seulement les deux premières phases de fluage, pour lesquelles nous allons identifier les paramètres.

Déformation initiale : ϵ_0

Le temps que la force atteignent la valeur de la force constante imposée, il y a une déformation initiale. Dans le Tableau 3.3-1 sont repris les différentes valeurs de la déformation initiale par échantillon.

Echantillon	Déformation initiale	Force appliquée[N]
L30-C3-2H-15-C14	0.0406	1000
L30-C3-2H-15-C4	0.0036	500
L30-J1-1H-15-C8	0.0027	500
L50-C1-1H-15-C9	0.0041	500
M30-C1-1H-15-C8	0.0111	500
P30-C1-1H-15-C14	0.0038	500
Moyenne pour F=500N	0.0051	

Tableau 3.3-1 : Fluage - déformations initiales pour chaque échantillon

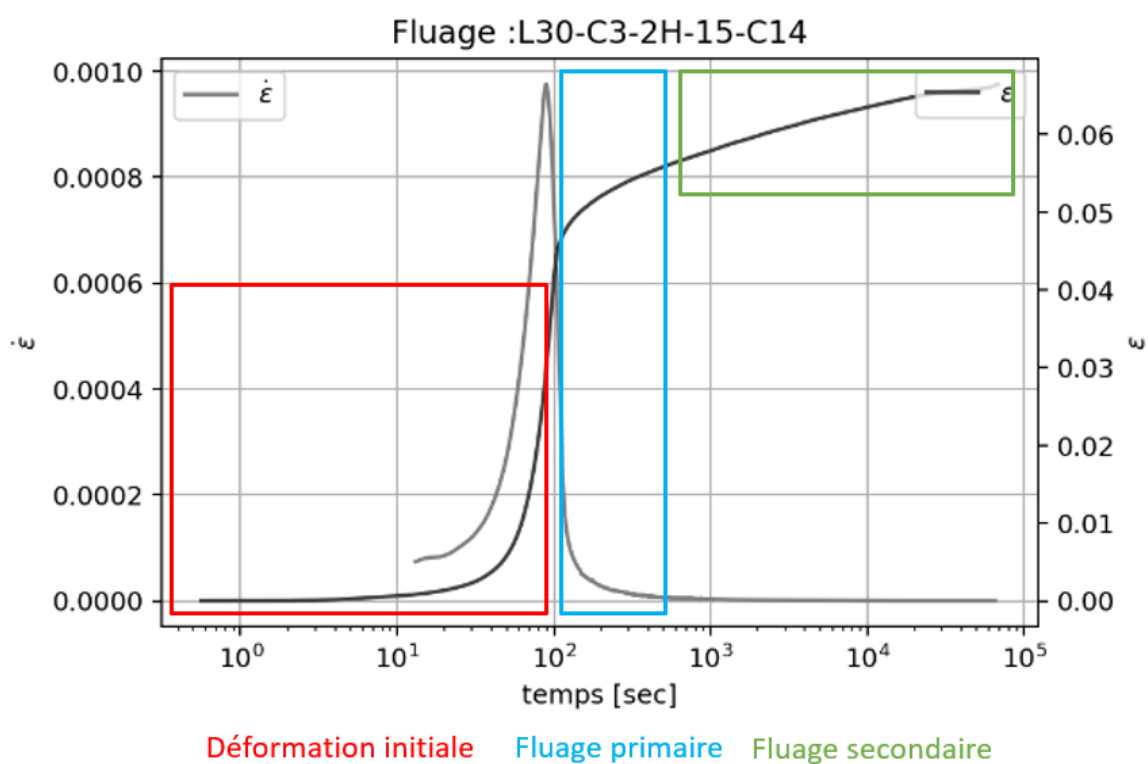


Figure 3.3-6 : Fluage - définition des zones de déformation initiale, fluage primaire et secondaire

Fluage primaire :

D'après nos recherches [42], une loi en puissance (3.8) permet d'approcher les modèles de fluages dans la zone primaire. Nous avons également comparé cette loi avec une loi logarithmique (3.9):

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta t^m \text{ avec } 0 < m < 1 \quad (3.8)$$

$$\epsilon = \alpha \epsilon_0 + \beta \ln(t) \quad (3.9)$$

La Figure 3.3-7 montre une comparaison de ces deux modèles sur la zone de fluage primaire (zone qui commence en ϵ_0 et qui se termine lorsque $\dot{\epsilon}$ est constante) :

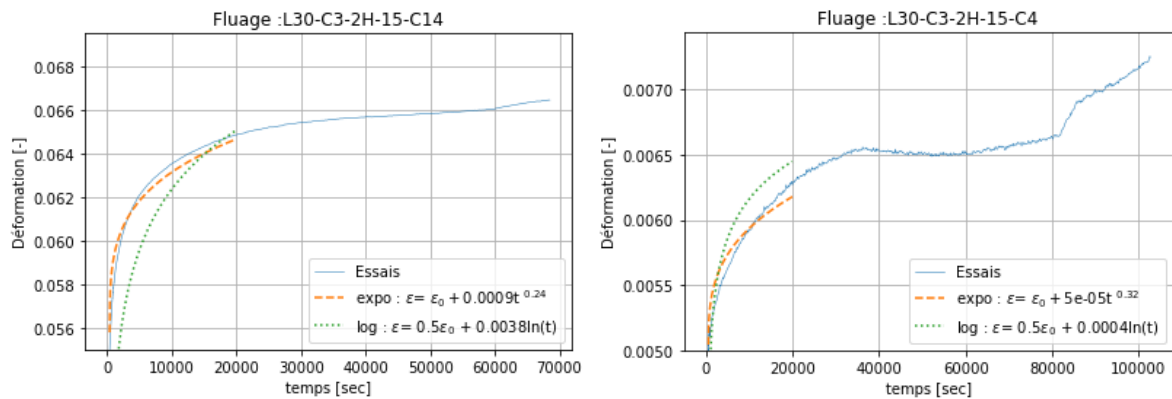
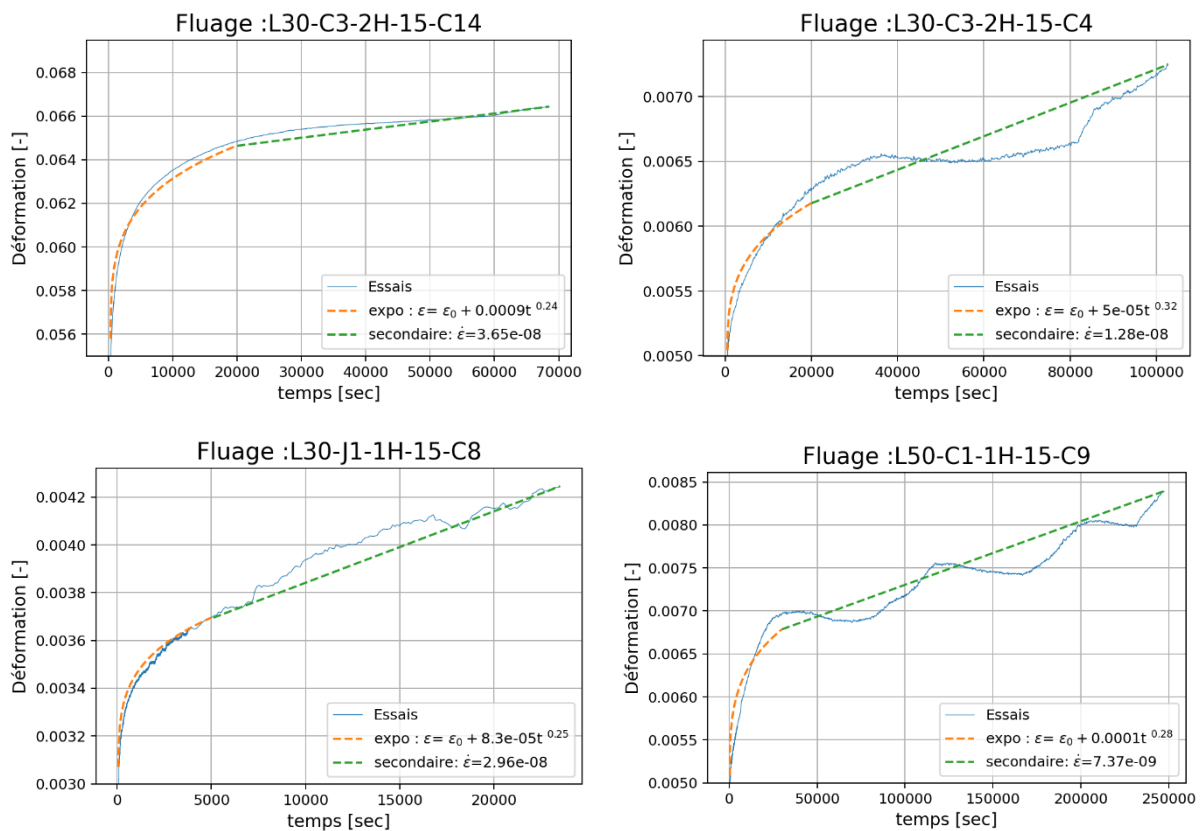


Figure 3.3-7 : Fluage - comparaison loi de puissance et courbe logarithmique

Avec cette comparaison, on observe clairement que c'est la loi en puissance (3.8) qui est la plus cohérente. Pour chaque échantillon, voici l'identification des paramètres pour la zone de fluage primaire, sur le graphe de fluage (Figure 3.3-8). Une approximation linéaire du fluage secondaire est également proposée.



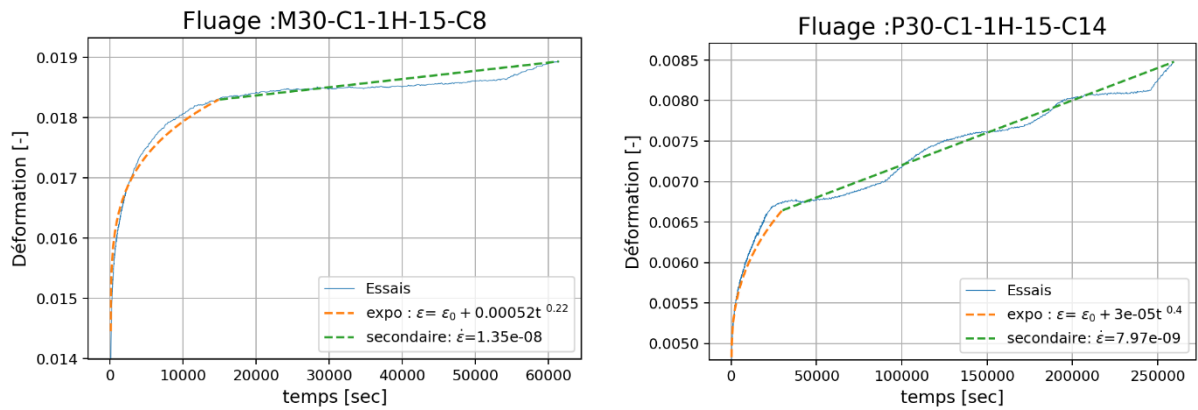


Figure 3.3-8 : Fluage - résultats finaux et modélisation

Fluage secondaire :

Si on reprend l'équation du fluage secondaire (3.7), on peut la simplifier car, dans les essais effectués, aucune variation de température n'a été étudiée, ce terme sera donc constant. On obtient :

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \quad (3.10)$$

L'unique composition sur laquelle cette formule peut être appliquée est la composition L30-C3-2H-15 car c'est la seule à avoir été testée pour 2 valeurs de contrainte différentes. Des graphes ci-dessus, on peut tirer les résultats présentés dans le Tableau 3.3-2.

Echantillon	$\dot{\epsilon}$ [-/s]	Force [N]	Contrainte [MPa]
L30-C3-2H-15-C4	1.28e-8	500	0.50
L30-C3-2H-15-C14	3.65e-8	1000	1.00

Tableau 3.3-2 : Fluage secondaire - composition L30-C3-2H-15

L'équation proposée ci-dessus nous permet de créer un système et d'obtenir la valeur des paramètres B et n :

$$\begin{cases} 1.28 \cdot 10^{-8} = B \cdot 0.5^n \\ 3.65 \cdot 10^{-8} = B \cdot 1^n \end{cases} \quad \text{ce qui donne} \quad \begin{cases} n = 1.5 \\ B = 3.65 \cdot 10^{-8} \end{cases} \quad (3.11)$$

3.3.4 DISCUSSION SUR LA MÉTHODOLOGIE

Il est évident que vu le faible nombre d'essai, la variabilité dans la durée des essais ainsi que le manque d'information quant au comportement d'une même composition sous différentes contraintes, les informations données ci-dessus ne permettent pas de caractériser précisément le comportement au fluage du matériau. Une campagne d'essai complémentaire, plus large et rigoureuse est nécessaire pour identifier correctement les paramètres du modèle de fluage.

3.4 ESSAIS DE POINÇONNEMENT

3.4.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les premiers graphes représentent les données brutes de l'essai de poinçonnement fourni par la presse Zwick : la force appliquée par la pointe hémisphérique en fonction de son déplacement vertical. On remarque que l'essai de l'échantillon P30-C1-1H-15-D5 se démarque des autres : en effet, cet échantillon a servi de test pour définir, par la suite, la force maximale à imposer pour les suivants. Sur base de sa résistance maximale (proche des 2500N), il a été décidé que, pour chaque composition, un échantillon subirait un poinçonnement à 500N et un autre à 1000N.

Tous les essais sont représentés sur le premier graphe (Figure 3.4-1) pour donner une vue d'ensemble. Ensuite deux graphes (Figure 3.4-2) reprennent les essais en fonction de la force limite qui a été appliquée, afin d'y voir plus clair.

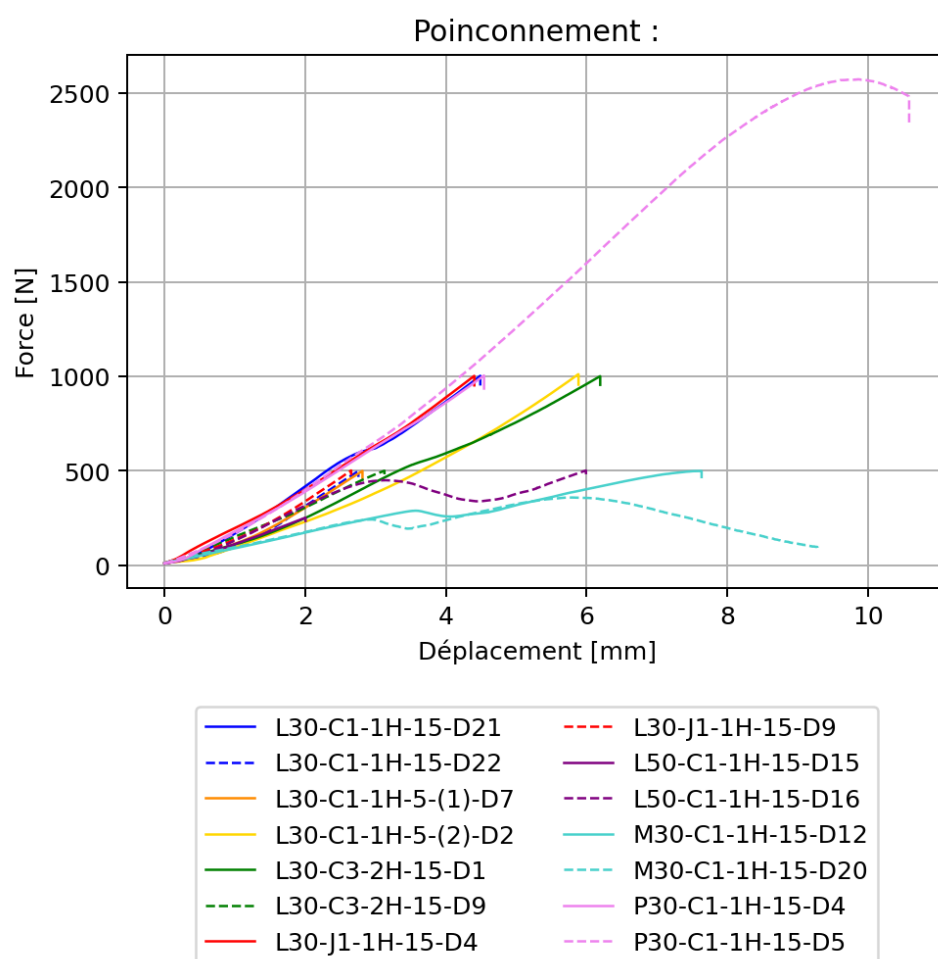


Figure 3.4-1 : Poinçonnement - graphe force-déplacement

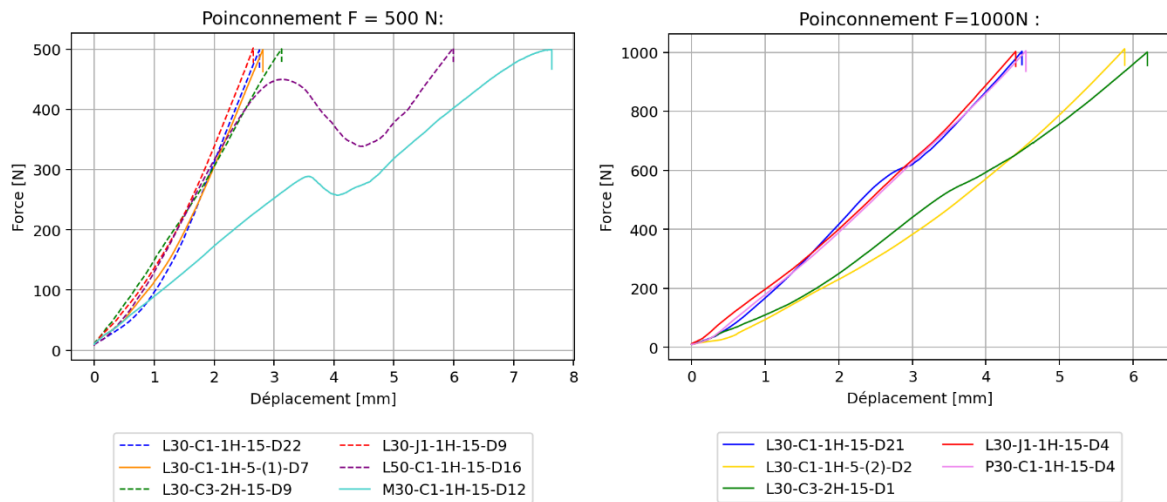


Figure 3.4-2 : Poinçonnement - graphe force déformation en fonction de la force max appliquée

Ensuite la recouvrance du matériau après poinçonnement a été mesurée à l'aide d'un comparateur. La Figure 3.4-3 montre la mesure de déplacement du point central au cours du temps :

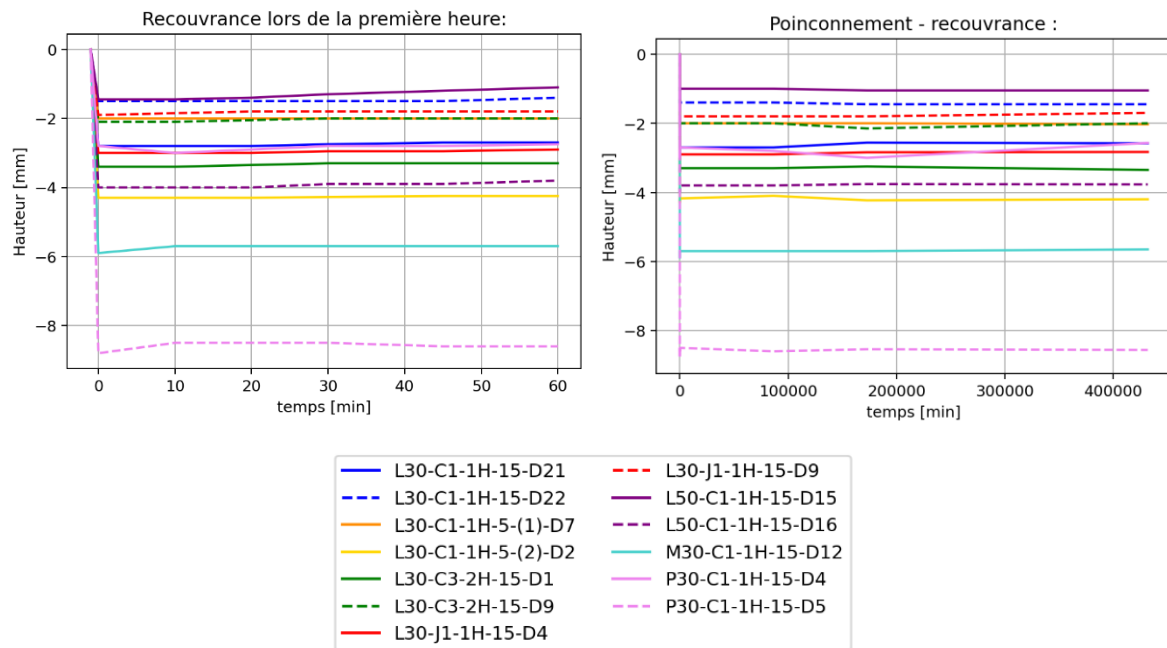


Figure 3.4-3 : Poinçonnement - graphes de recouvrance

L'échantillon P30-C1-1H-D5 semble avoir une déformation bien supérieure aux autres échantillons : cela s'explique par le fait qu'il a subi une force maximale de plus de 2500N. L'échantillon M30-C1-1H-15-D20, n'est pas présent dans le graphe de recouvrance, car il s'est fissuré lors du poinçonnement (voir Figure 3.4-4).



Figure 3.4-4 : échantillon M30-C1-1H-15-D20 fissuré lors du poinçonnement

3.4.2 LOI DE HERTZ

La loi de Hertz ou contact de Hertz est une loi qui décrit le contact entre 2 objets sphériques [44]. Ce type de contact a pour particularité que la surface de contact varie lorsque la force de contact augmente. En utilisant cette relation, il est possible de déduire une nouvelle expression du module de Young pour les différentes compositions. En effet, la loi s'écrit :

$$F = \frac{4E^*\sqrt{\delta^3R}}{3} \text{ en sachant que } E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (3.12)$$

Puisque les essais de poinçonnement fournissent l'enfoncement δ en fonction de la force F , puisque le rayon R de la pointe hémisphérique est connu et qu'on a obtenu une expression du coefficient de poisson précédemment, le module de Young peut être calculé comme étant :

$$E = \frac{3F}{4\sqrt{\delta^3R}}(1-\nu^2) \quad (3.13)$$

Le tableau (Tableau 3.4-1) suivant reprend ν ainsi que le module de Young obtenu sur base de l'essai de poinçonnement, par la formule de Hertz.

Échantillon	Poisson [-]	Young moyen Hertz [MPa]	Young moyen compression [MPa]
L30-C1-1H-15	0.04	30.39	217.79
L30-C1-1H-15	0.04	20.49	217.79
L30-C1-1H-5-(1)	0.04	24.92	351.45
L30-C1-1H-5-(2)	0.04	16.29	222.52
L30-C3-2H-15	0.03	19.65	236.63
L30-C3-2H-15	0.03	30.56	236.63
L30-J1-1H-15	0.04	36.39	251.65
L30-J1-1H-15	0.04	31.13	251.65
L50-C1-1H-15	0.06	19.39	163.99
L50-C1-1H-15	0.06	17.31	163.99
M30-C1-1H-15	0.04	11.18	234.68
M30-C1-1H-15	0.04	9.78	234.68
P30-C1-1H-15	0.05	29.86	240.15
P30-C1-1H-15	0.05	29.09	240.15

Tableau 3.4-1 : Poinçonnement - Calcul du module de Young avec la formule de Hertz

3.4.3 DISCUSSION SUR LA MÉTHODOLOGIE

On observe dans le Tableau 3.4-1 que les valeurs obtenues pour le module de Young sont bien loin de celles obtenues lors des essais de compression. Cela s'explique par le fait que l'essai de poinçonnement se déroule presque uniquement en régime plastique. Le module de Young n'étant valable que dans le régime élastique, il est logique que les valeurs obtenues ici ne concordent pas avec celles obtenues précédemment.

La Figure 3.4-5 présente les valeurs du module de Young calculées avec la loi de Hertz ainsi que la contrainte en fonction du déplacement de la pointe hémisphérique. Les données des premières secondes du test ne sont pas utilisables dans la formule de Hertz car le déplacement 0 correspond à une force de 10N sur une surface nulle. Un petit déplacement initial a donc été imposé pour que la formule soit valide. La ligne rouge indique la contrainte correspondant à la limite d'élasticité du matériau. On constate donc que, tout au long de l'essai, les contraintes sont bien plus élevées que la limite d'élasticité ... au-delà de laquelle la formule de Hertz n'est plus valide. Il semble que notre matériau ait une limite d'élasticité trop faible pour pouvoir lui appliquer la loi de Hertz.

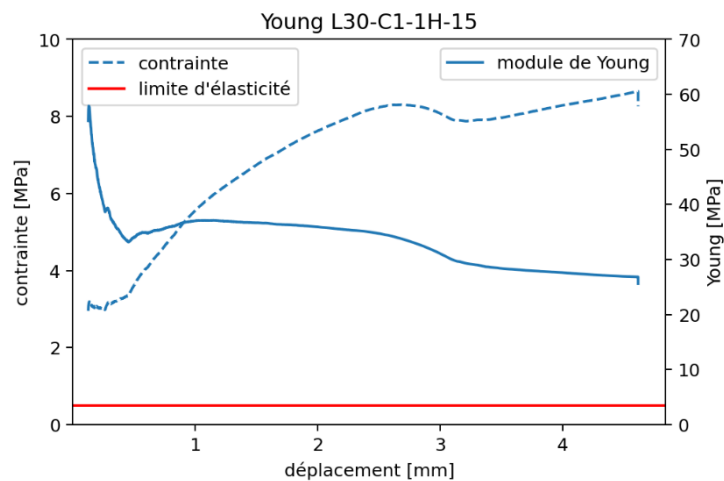


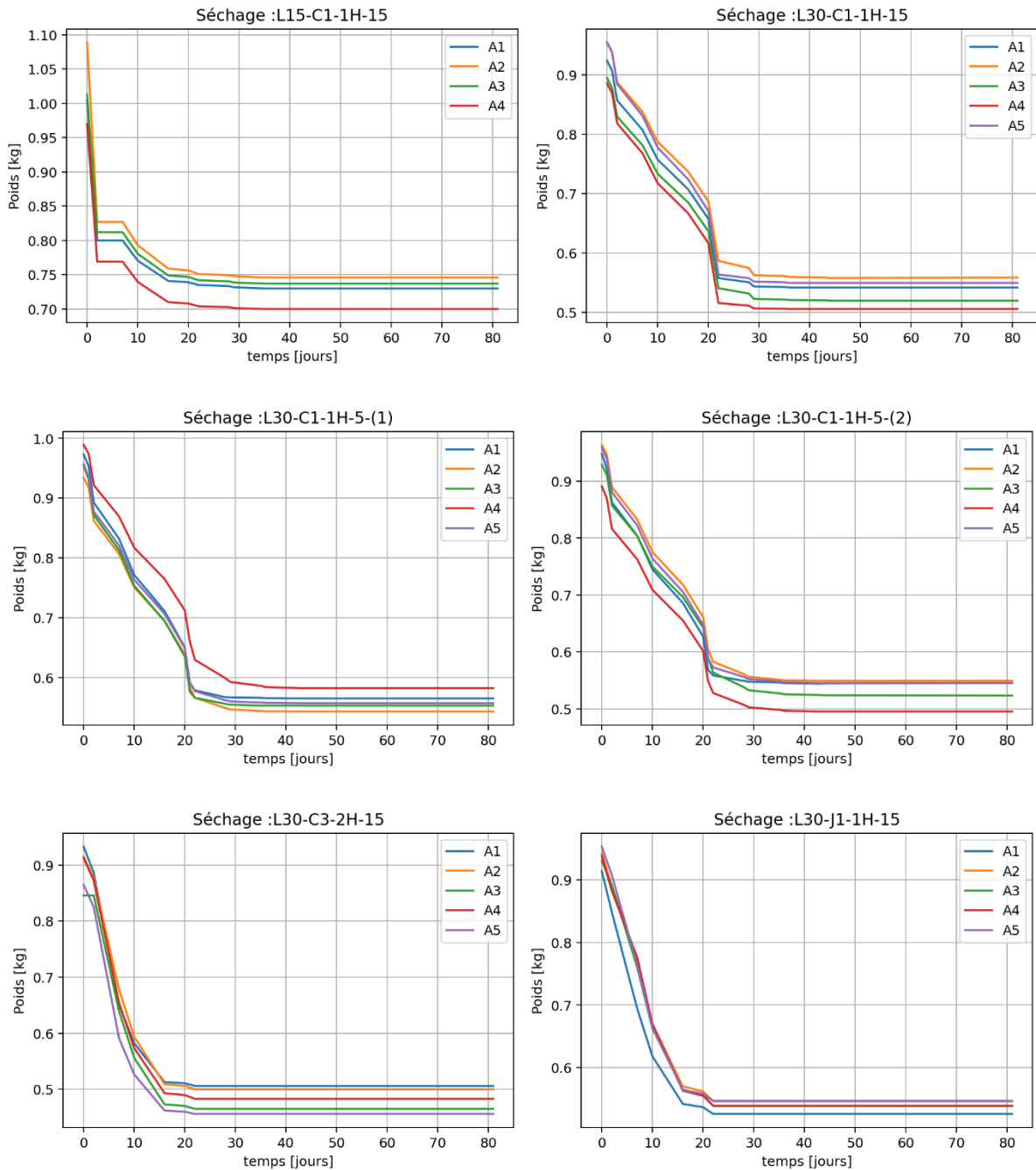
Figure 3.4-5 : Poinçonnement - Module de Young et contrainte en fonction de l'enfoncement de la pointe

Cependant, ces mesures de poinçonnement en régime plastique pourraient être utilisées pour définir la dureté du matériau dans des recherches futures.

3.5 SÉCHAGE DES ÉCHANTILLONS

Le séchage des briques a fait l'objet d'un suivi régulier afin de définir le temps de séchage optimal et la quantité d'eau perdue durant cette opération. Les courbes ci-dessous ont fait l'objet d'une interpolation linéaire, ce qui explique leur apparence anguleuse.

3.5.1 RÉSULTATS PAR COMPOSITION



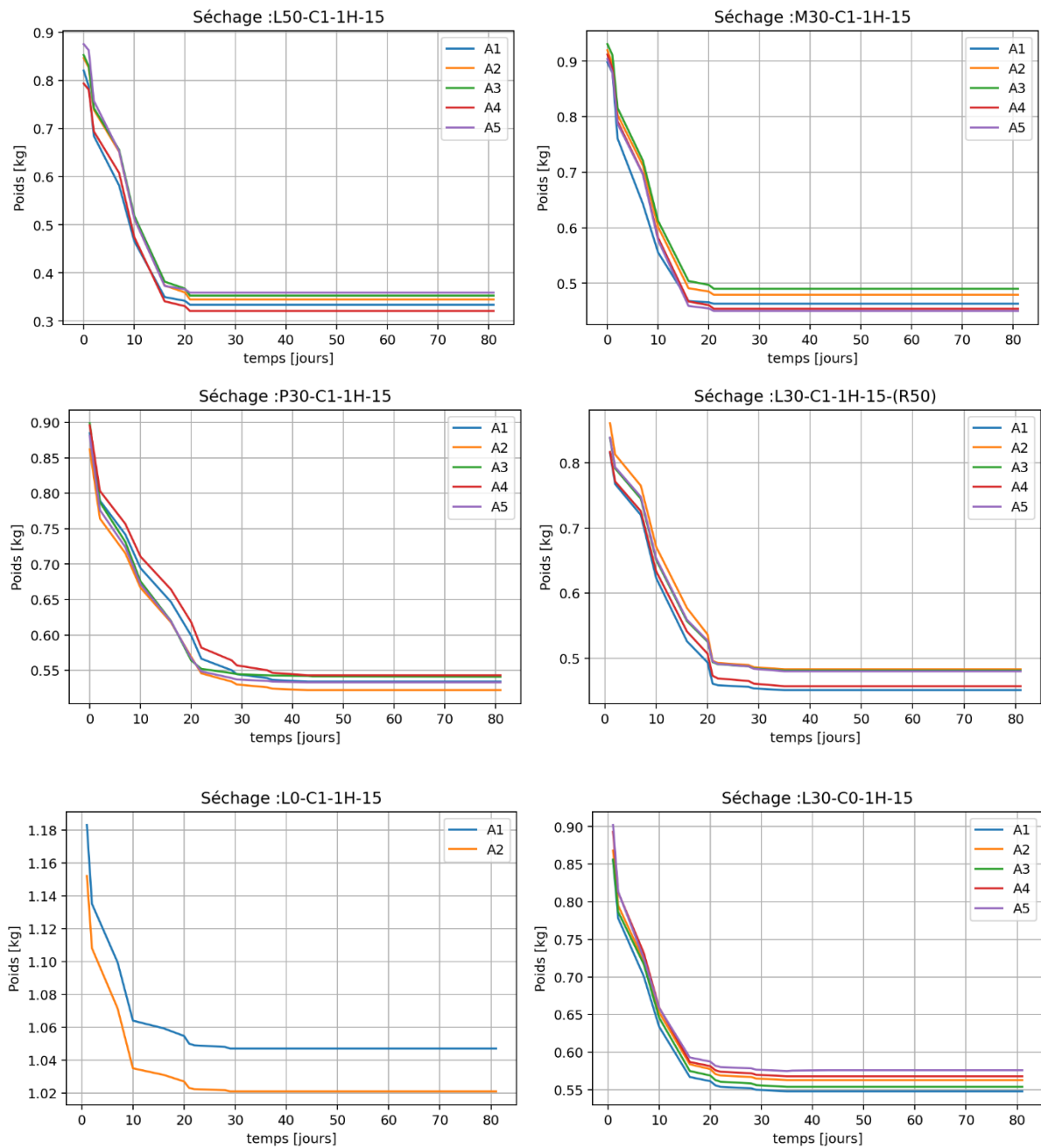


Figure 3.5-1 : Graphes de séchage par composition

Pour la composition P30-C1-1H-5-(E), les briques, n'ont pas pu être pesées durant les premiers jours, car elles étaient trop fragiles, donc impossibles à déplacer. C'est pourquoi leur graphe de séchage ne commence pas à $t = 1$ jour

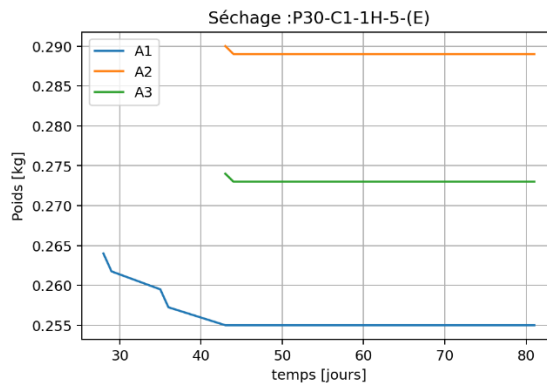


Figure 3.5-2 : Séchage e la composition P30-C1-1H-5-(E)

3.5.2 VUE D'ENSEMBLE

Le graphe suivant (Figure 3.5-3) montre l'évolution moyenne du séchage des différentes compositions. On observe une tendance globale pour la durée de séchage : après 25 jours, toutes les compositions sont sèches. Le poids final est fort variable pour les différentes compositions. On remarque toutefois une convergence vers un poids proche de 500g pour toutes les compositions faites de 30% de papier.

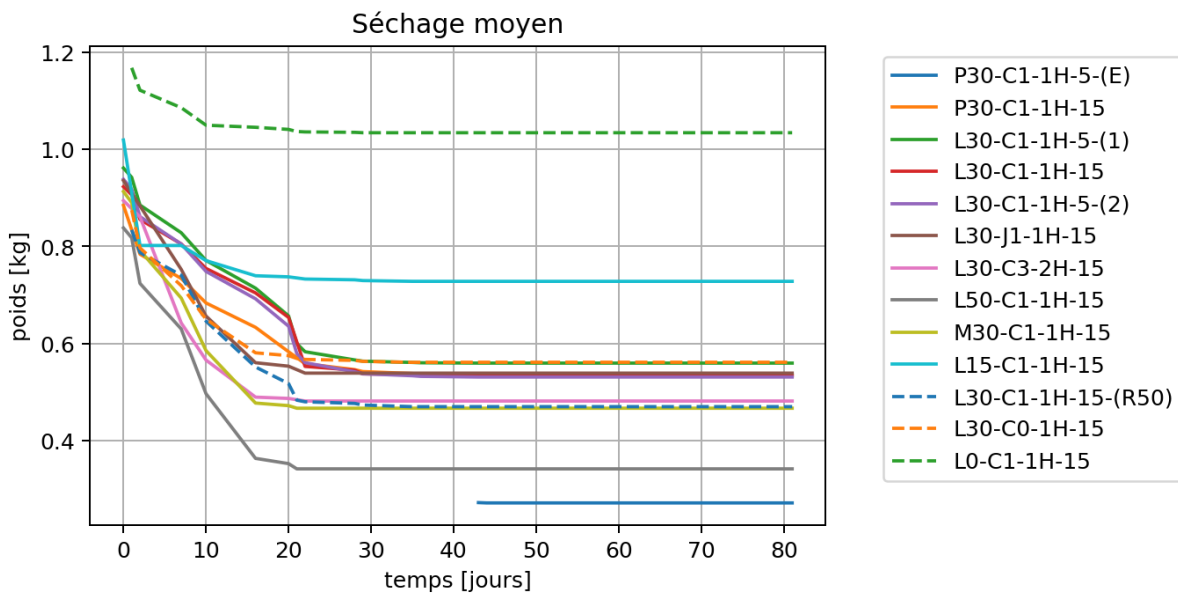


Figure 3.5-3 : Moyennes des données de séchage par compositions

3.6 DENSITÉ

Voici le comparatif (Figure 3.6-1) des densités des différentes compositions. Ce comparatif est basé sur la densité des échantillons de forme cylindrique. Chaque échantillon a été pesé et mesuré après plus d'un mois de séchage.

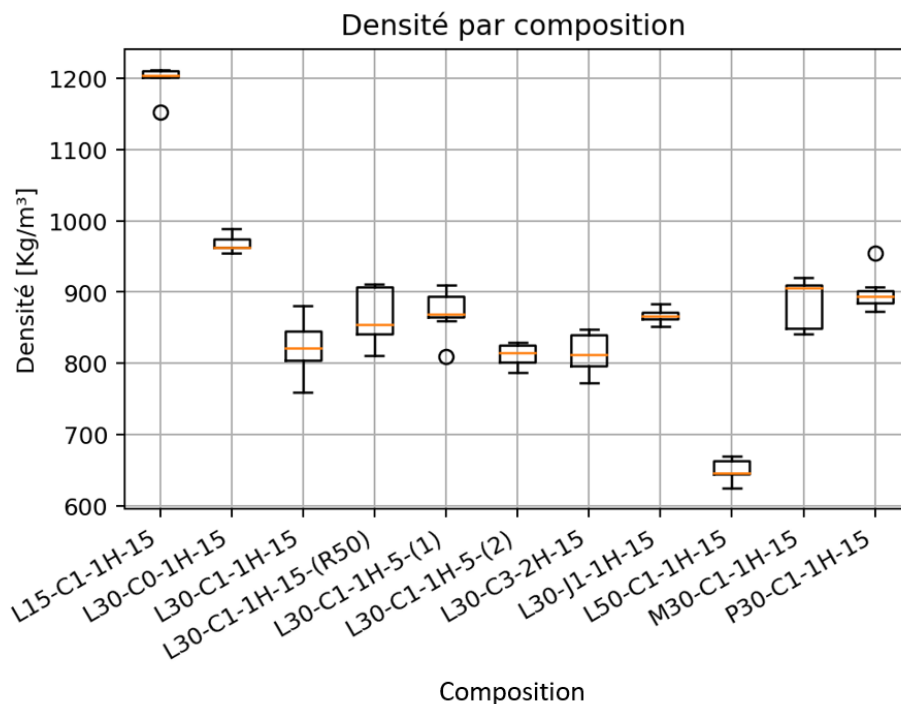


Figure 3.6-1 : Densité - graphe récapitulatif

Ensuite, les densités des échantillons cylindriques (C) et des briques (A) ont été comparées (Figure 3.6-2). Comme la méthode de production est artisanale, chaque forme se moule un peu différemment. La composition P30-C1-1H-5-(E) n'existe pas sous la forme de cylindre car tous les cylindres se sont cassés lors du démoulage.

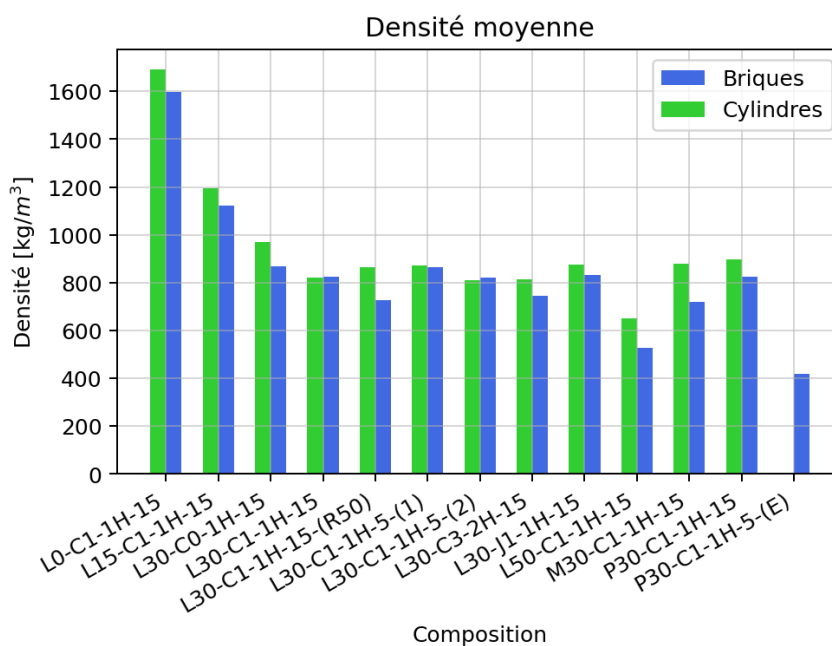


Figure 3.6-2 : Densité - comparatif entre les briques (type A) et les cylindres (type C)

3.7 ISOLATION ACOUSTIQUE

Les essais acoustiques sont des approches empiriques ayant pour objectif d'explorer les performances en termes d'isolation acoustique de notre matériau. Les résultats ont pour but de donner une idée qualitative, et non quantitative, de ces performances.

3.7.1 BRUITS AÉRIENS

Les essais d'isolation aux bruits aériens permettent d'observer différents paramètres :

- La différence entre la mesure intérieure et extérieure de la boîte lorsqu'il n'y a pas de son est d'environ 10dB. (Zone verte)
- La zone orange sur le graphe représente le test de fréquences décrit dans la méthode. On voit qu'en règle générale, la transmission des hautes fréquences est limitée par la présence du matériau.
- Enfin, la zone bleue représente le bruit d'aspirateur. Ce bruit sera utilisé pour calculer une différence moyenne entre la mesure extérieure et intérieure et produire un graphe permettant de comparer les performances d'isolation acoustique des compositions.

Les zones citées ci-dessus font référence aux couleurs sur les graphes de la section 3.7.1.2.

3.7.1.1 TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Les résultats bruts produits par l'application *XDecibels* prennent la forme d'un fichier contenant une seule colonne de mesure d'intensité sonore, sans aucune indication du temps correspondant à chaque mesure. La durée totale est néanmoins fournie, ce qui permet, en supposant un échantillonnage à intervalle régulier, de retrouver le pas de temps. Malheureusement, il s'est avéré que même la mesure de la durée totale était erronée sur l'un des téléphones. Ainsi, la Figure 3.7-1 montre les données brutes et les données recoupées manuellement pour ne conserver que la partie de l'enregistrement correspondant à la bande son du test. Un décalage de l'échantillonnage entre la courbe intérieur et extérieur est observable.

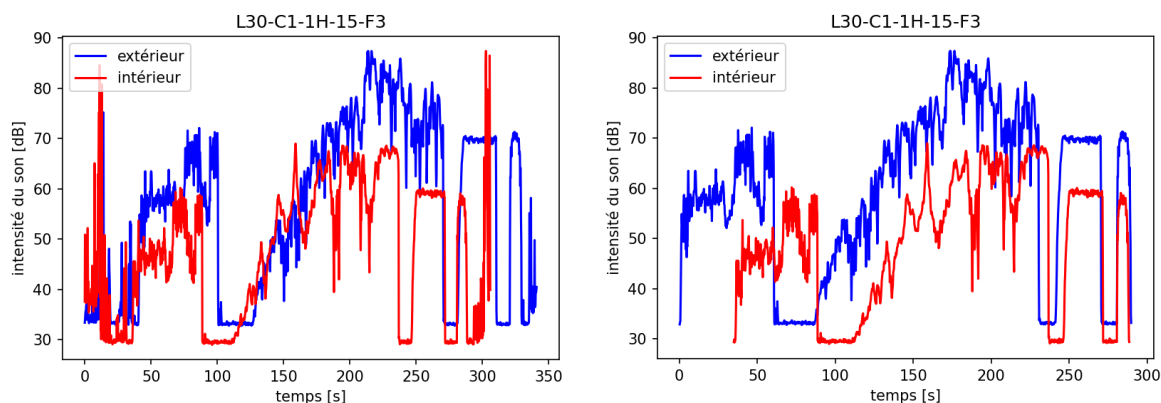


Figure 3.7-1 : Acoustique - Bruits aériens - données brutes (gauche) et recoupées (droite)

Les graphes produits sont donc inutilisables comme tels. Une mise à l'échelle des données du téléphone situé à l'intérieur est nécessaire. Pour ce faire, les sets de données recoupés ont été mis à la même longueur sur base de la durée totale mesurée par l'appareil extérieur. Une dernière opération d'interpolation permet d'assurer que les 2 graphes, intérieur et extérieur, sont échantillonnés de la même manière. Ceci permet, par exemple, de calculer la différence entre les 2 courbes, point par point.

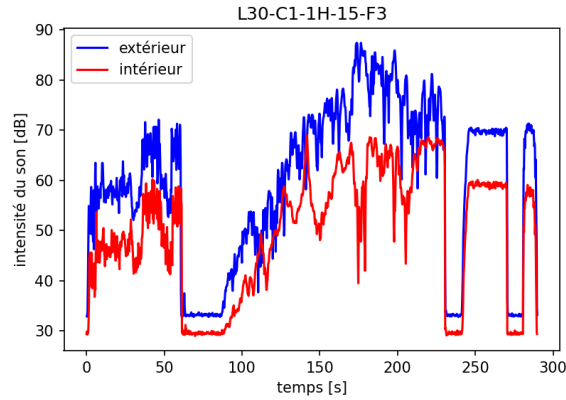


Figure 3.7-2 : Acoustique - Bruits aériens - données mises à l'échelle

3.7.1.2 RÉSULTATS PAR COMPOSITION

Les graphes ci-dessous présentent les résultats pour chaque composition. Il est important de noter que le graphe de l'échantillon P30-C1-1H-15-F1 est à négliger : en effet, il semblerait que l'échantillonnage ne soit pas régulier (temps total erroné, incohérence entre les longueurs des 2 sets de données), ce qui rend la mesure inutilisable. Par ailleurs, quatre graphes supplémentaires donnent le résultat du même test réalisé sur divers matériaux conventionnels.

Le graphe 'boîte ouverte' indique une valeur mesurée à l'intérieur qui est supérieure à celle mesurée à l'extérieur : ceci est probablement dû à un effet de « caisse de résonance » du dispositif expérimental.

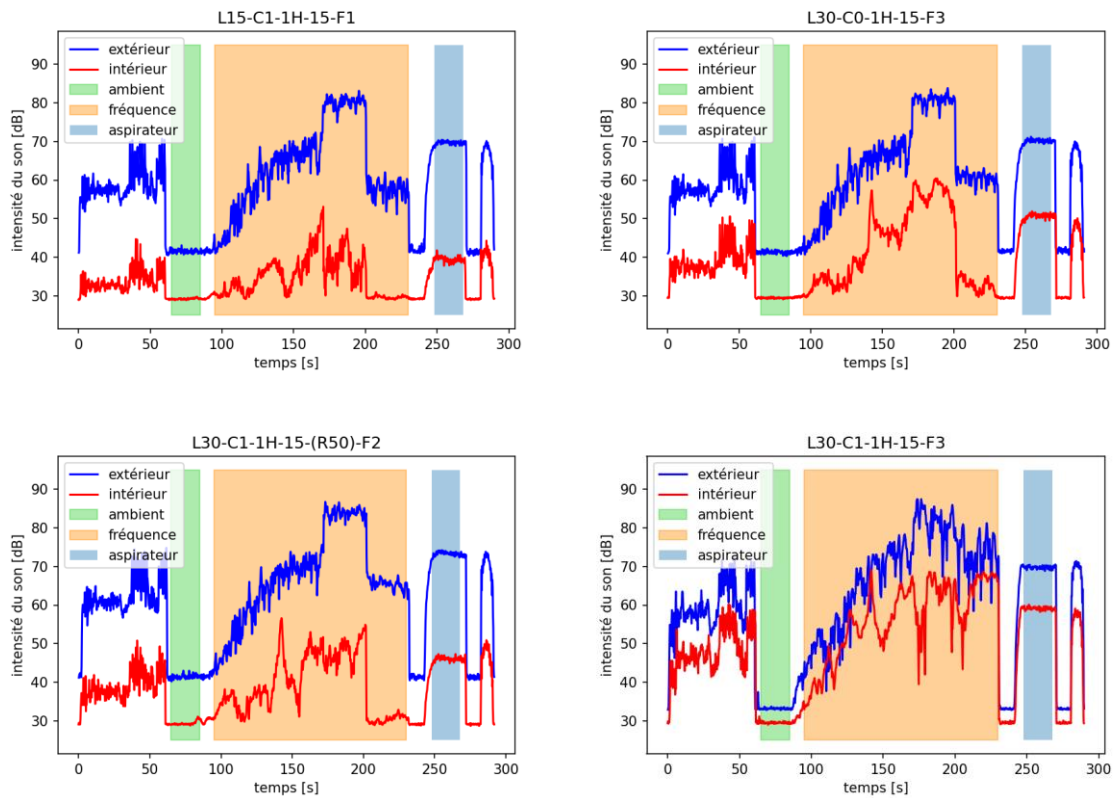


Figure 3.7-3 : Graphes des résultats des essais acoustique

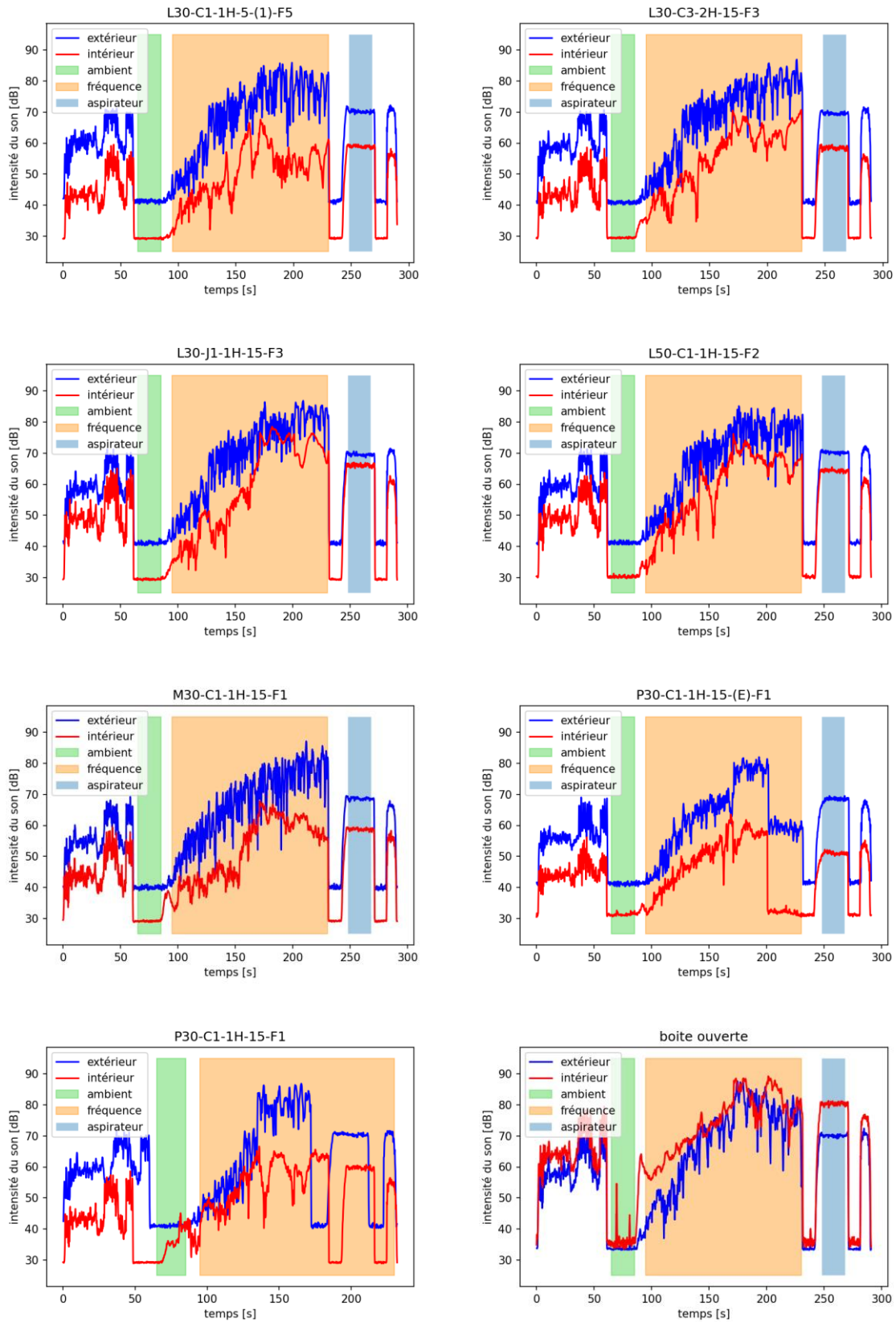


Figure 3.7-4 : Graphes des résultats des essais acoustiques

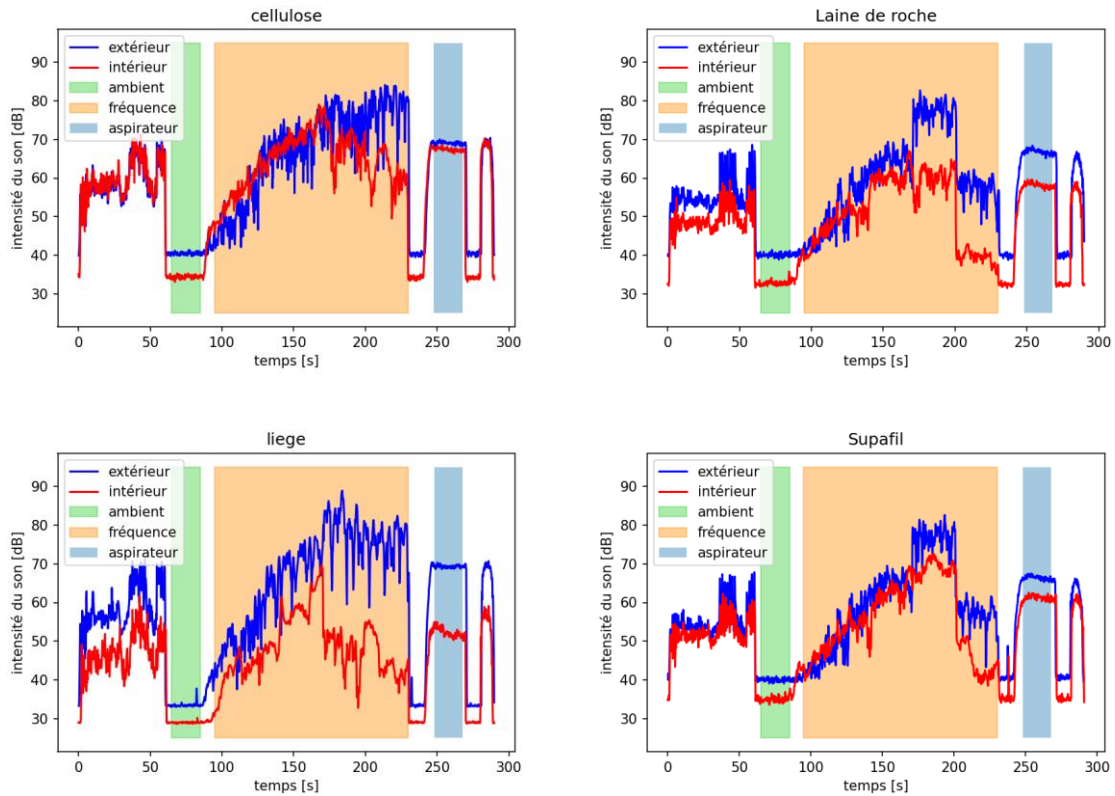


Figure 3.7-5: Graphes des résultats des essais acoustiques

3.7.1.3 GRAPHE RECAPITULATIF

Ce graphe (Figure 3.7-6) présente la réduction de l'intensité sonore moyenne pour un bruit d'aspirateur (zone bleue de chaque graphe de la section 3.7.1.20) pour chaque composition et chacun des matériaux conventionnels, à l'exception de la composition P30-C1-1H-15 dont les résultats ne sont pas utilisables.

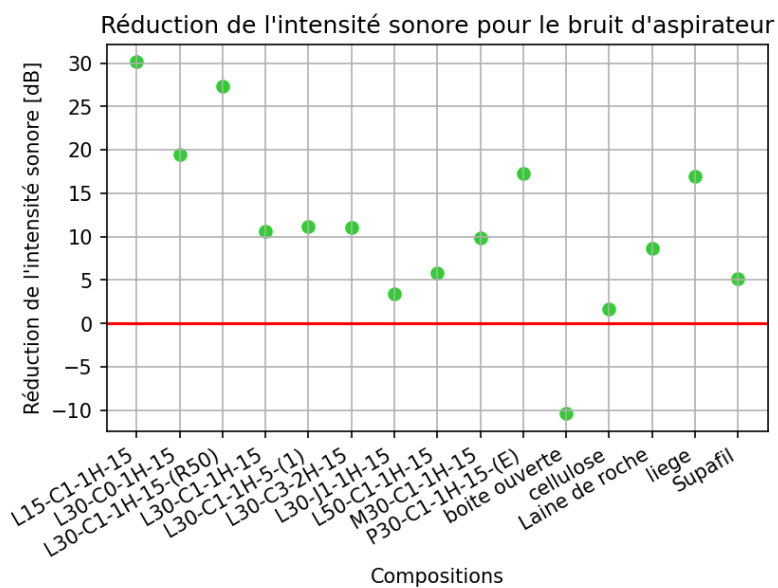


Figure 3.7-6 : Réduction de l'intensité sonore par composition

3.7.2 BRUITS DE CHOC

Les essais de bruit de choc ont pour but de quantifier l'absorption et la transmission des bruits de choc par le matériau.

3.7.2.1 TRAITEMENT DES RESULTATS

Le traitement des résultats est identique à celui expliqué pour les bruits aériens. Chaque pic représente le choc causé par chacune des billes présentées dans la méthode. Elles sont toujours lâchées dans l'ordre de poids croissant.

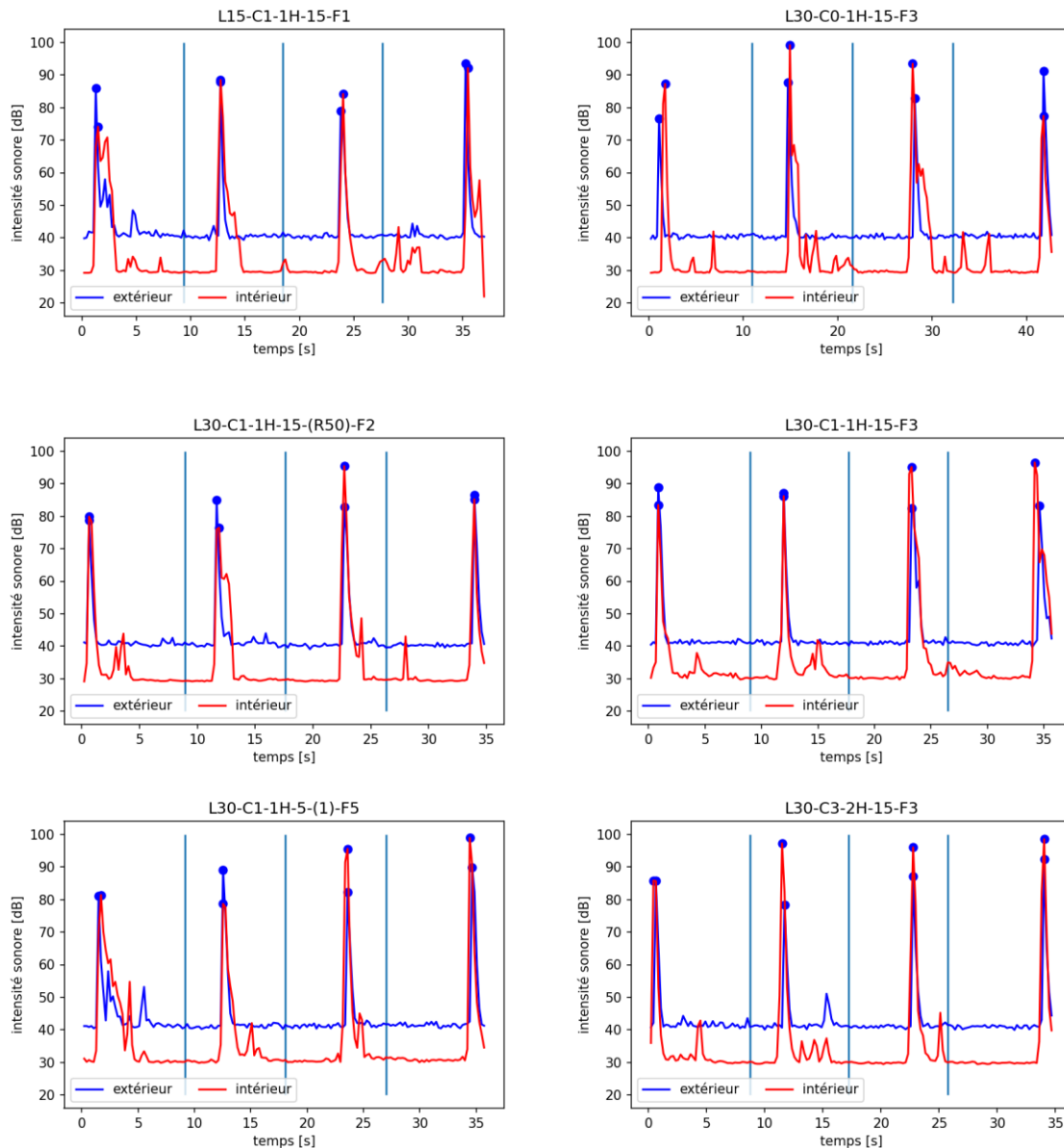


Figure 3.7-7: Graphes des résultats d'essais de chocs par composition

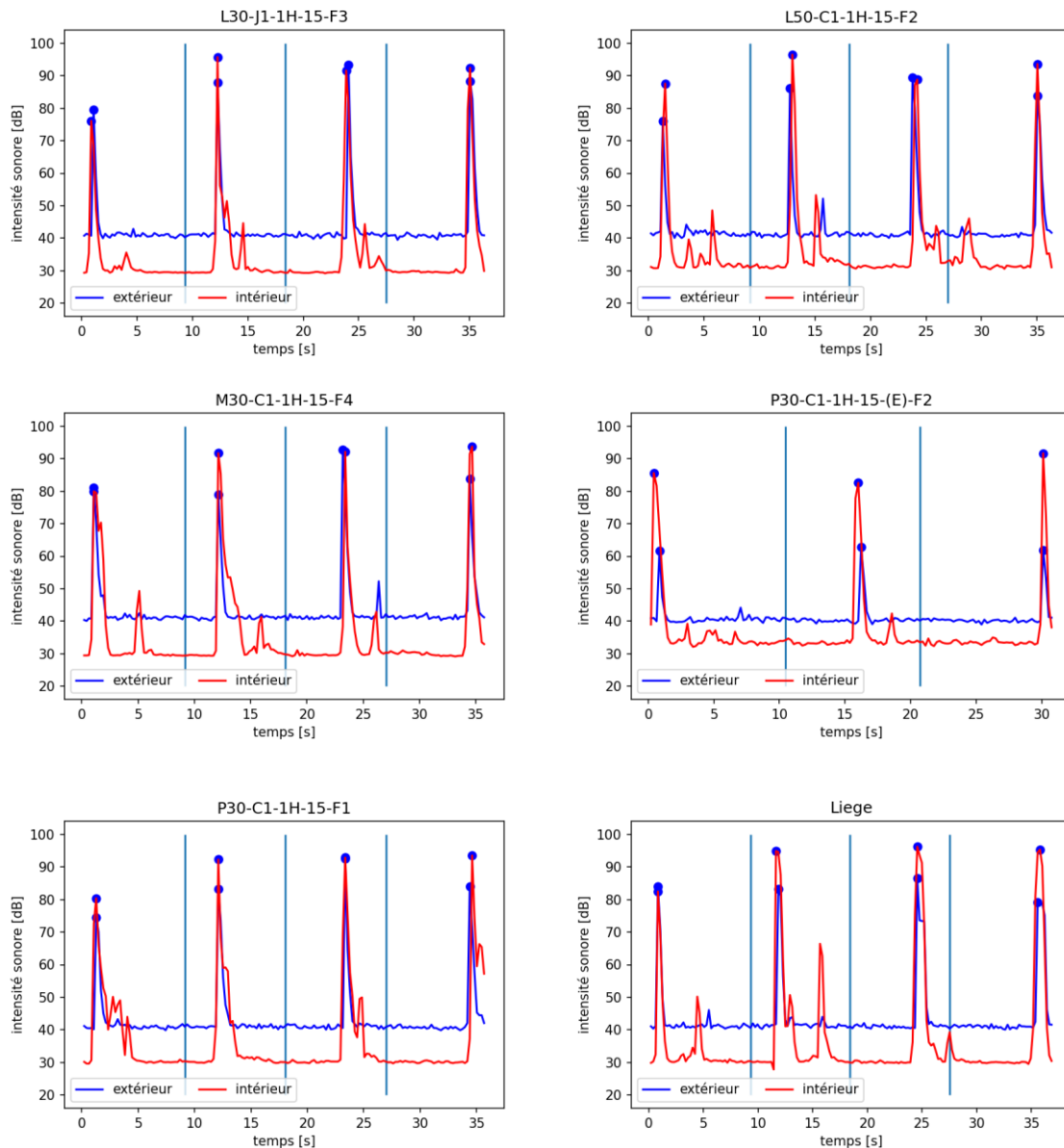


Figure 3.7-8 : Graphes des résultats d'essais de chocs par composition

3.7.3 DISCUSSION SUR LA METHODOLOGIE

Les essais concernant les bruits aériens sont plutôt concluants, bien que les résultats ne puissent pas être employés pour définir les véritables caractéristiques du matériau. Ceux-ci permettent tout de même de donner une tendance en comparant les différentes compositions entre elles et également en comparant notre matériau à d'autres matériaux standards.

A l'inverse, les essais concernant les bruits de chocs ne sont pas concluants. Les défauts de mesure de l'application *XDecibel* ne nous ont pas permis de mesurer précisément les données nécessaires (le temps de transmission entre autres) pour tirer quelque chose d'utile de ces tests. Les résultats ne sont donc pas considérés comme fiables et ne sont pas utilisés dans la discussion. Un protocole plus rigoureux et de meilleurs appareils de mesures sont nécessaires pour obtenir des mesures représentatives.

3.8 ISOLATION THERMIQUE

Les essais d'isolation thermique permettent de comparer la conductivité thermique des différentes compositions.

3.8.1 TRAITEMENT DES RESULTATS

Comme expliqué dans la section 2.4.2, le système prend environ 1h avant d'atteindre un état d'équilibre. Lorsque le système de test atteint un régime stable (que la tension d'alimentation de la plaque chauffante est quasi constante), on enregistre une trentaine de mesures avec un pas de temps de 1 seconde. Ces mesures se présentent sous la forme d'un fichier Excel avec de multiples données. Celles qui servent à calculer la conductivité thermique sont la tension d'alimentation de la plaque chauffante et la température mesurée par chacun des deux thermocouples placés contre l'échantillon. Une moyenne de chacune de ces valeurs est calculée sur les 30 secondes d'enregistrement et est utilisée dans les formules suivantes pour obtenir la conductivité thermique.

Il s'agit tout d'abord de calculer le flux de chaleur, à l'aide des caractéristiques techniques de la plaque chauffante ainsi que la tension d'alimentation V_{TEG} à l'aide des formules (3.14) et (3.15): [38]

$$\text{Caractéristiques techniques : } S_{TEG} = 0.0517 \left[\frac{V}{K} \right], R_{thTEG} = 1.03 \left[\frac{K}{W} \right] \quad (3.14)$$

$$\text{Flux de chaleur : } Q[W] = \frac{V_{TEG}[V]}{S_{TEG} \left[\frac{V}{K} \right] R_{thTEG} \left[\frac{K}{W} \right]} \quad (3.15)$$

Les températures mesurées par les thermocouples en contact avec l'échantillon ainsi que le flux de chaleur calculé précédemment permettent d'obtenir la résistance thermique du matériau :

$$R_{th} = \frac{T_h - T_c}{Q} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (3.16)$$

Enfin, la conductivité thermique λ est obtenue en utilisant la distance entre les 2 thermocouples ($L=15\text{mm}$) et la surface de l'échantillon qui est perpendiculaire au flux de chaleur (A) :

$$\lambda = \frac{L}{R_{th}A} \left[\frac{W}{m K} \right] \quad (3.16)$$

3.8.2 GRAPHE RECAPITULATIF

La conductivité thermique de chaque composition est reprise sur le graphe ci-dessous (Figure 3.8-1). Pour la majorité des compositions, 3 échantillons ont été testés, néanmoins certaines compositions ne comptent qu'une seule mesure.

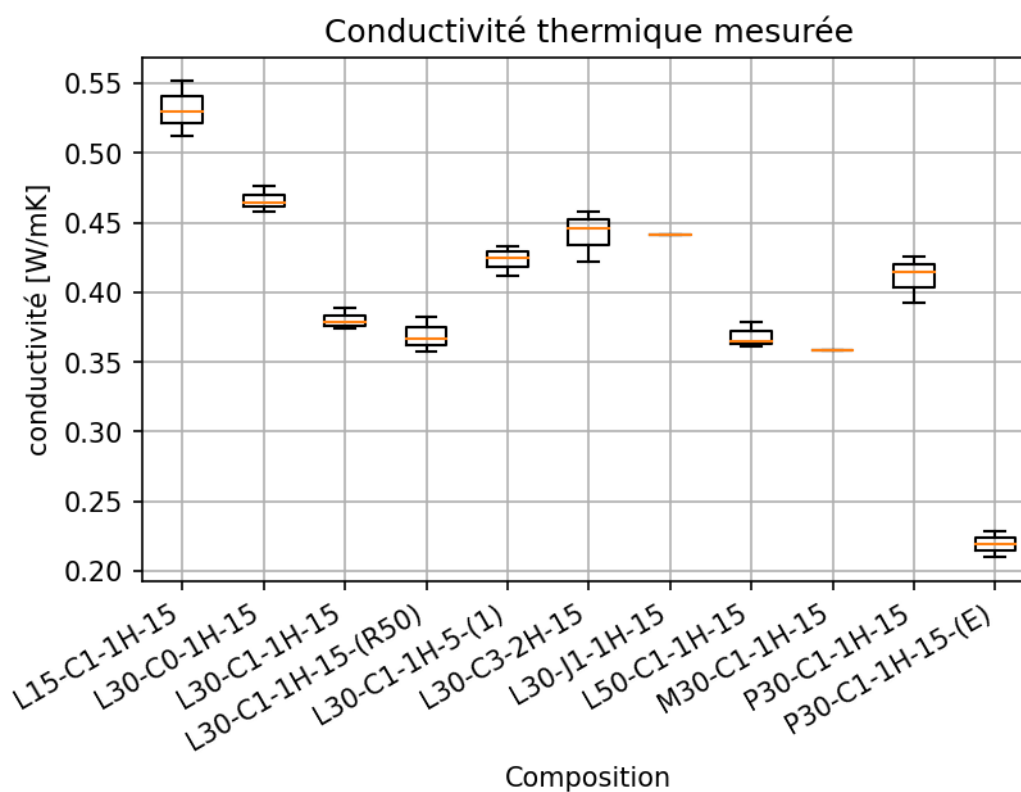


Figure 3.8-1: Résultats de conductivité thermique par composition

3.8.3 DISCUSSION SUR LA METHODOLOGIE :

Certains matériaux conventionnels ont également été testés pour voir à quel point ce test est représentatif de la réalité. Il s'est avéré que les matériaux conventionnels obtiennent des scores bien moins bon qu'en réalité. Au plus la conductivité thermique est faible, au plus le matériau est un bon isolant. Cependant, les isolants conventionnels ont tous obtenus une conductivité thermique mesurée λ bien plus élevée que la valeur standard. Un facteur de correction doit donc être appliqué à la conductivité mesurée sur nos échantillons si l'on veut les comparer à d'autres matériaux.

3.9 CARACTERISATION PAR MICROTOMOGRAPHIE AUX RAYONS X (ALEXANDRE DE BRIEY)

En parallèle de ce mémoire, Alexandre de Briey a analysé les échantillons de SPALCO en tomographie. La tomographie est définie comme suit [45] :

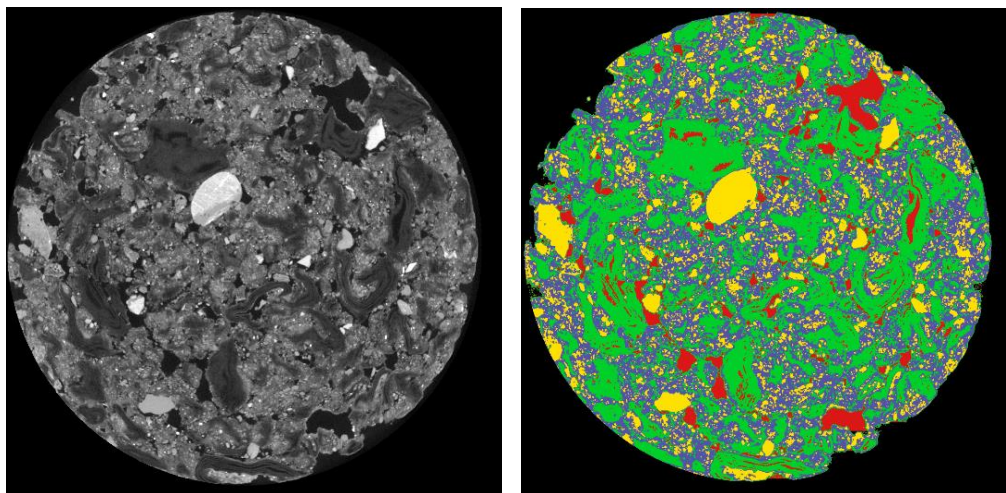
« *Technique radiologique permettant d'obtenir artificiellement l'image radiographique nette d'un plan de coupe d'organe ou d'organisme, les autres couches étant estompées.* »

Les essais sont faits sur des coupes pratiquées dans les échantillons cylindriques, le même type d'échantillon que nous avons utilisé pour les essais de compression uni-axiale.

Tous les résultats présentés dans cette section proviennent du travail d'Alexandre de Briey pour son TFE (« *Tomographic analysis of a new eco-circular composite material for construction application* ») [46].

3.9.1 TRAITEMENT DES RESULTATS

Les résultats se présentent sous la forme d'images, comme celles présentées à la Figure 3.9-1. L'image en noir et blanc est le résultat brut. Les nuances de gris indiquent une variation de densité du matériau. Ainsi, en établissant une correspondance entre une certaine nuance de gris et la densité de chacun des matériaux qui entrent dans la composition de SPALCO, il est possible d'obtenir l'image de droite, où chaque couleur indique un composant différent. A l'aide de cette image, les fractions volumiques de chaque constituant peuvent être déduites.



L30-C1-1H-5-(1) - C1.1

■ Bulles d'air ■ Papier ■ Chaux ■ Sable

Figure 3.9-1 : Tomographie : Résultats avant et après traitement - Echantillon L30-C1-1H-5(1)-C1.1 [46]

3.9.2 RÉSULTATS PAR COMPOSITION

Seules 5 des compositions ont été étudiées en tomographie. Pour chacune, 3 coupes ont été observées : 2 coupes provenant d'un même échantillon, pour vérifier l'homogénéité au sein d'un même échantillon, et une 3^{ème} coupe provenant d'un autre échantillon pour pouvoir les comparer entre eux.

Le tableau ci-dessous (Tableau 3.9-1) présente une coupe par composition pour donner un aperçu.

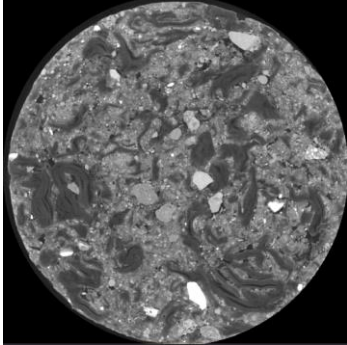
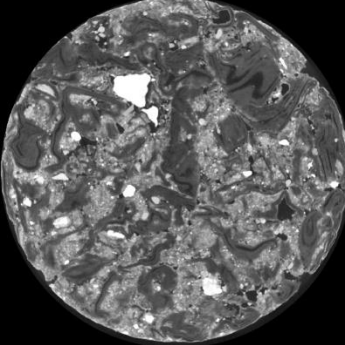
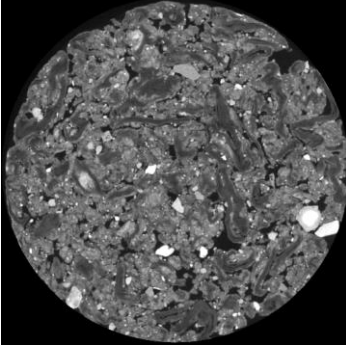
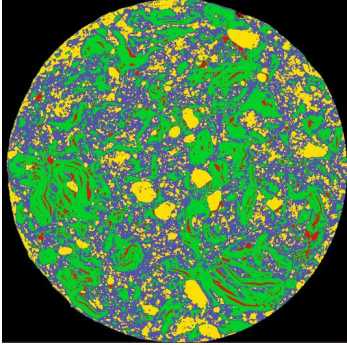
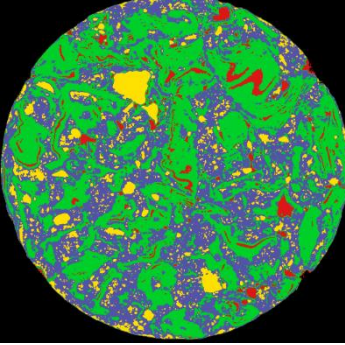
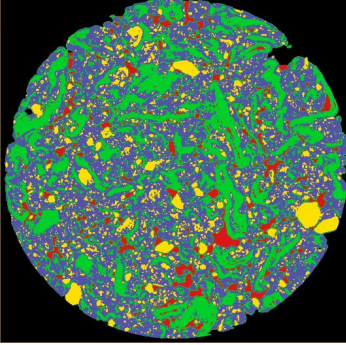
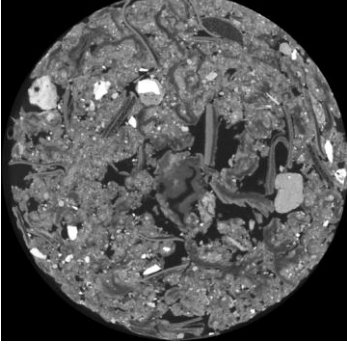
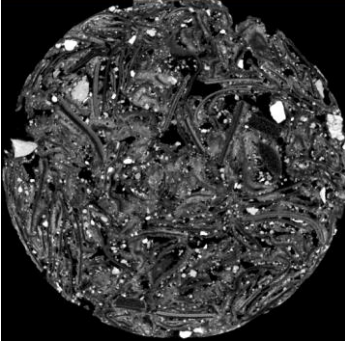
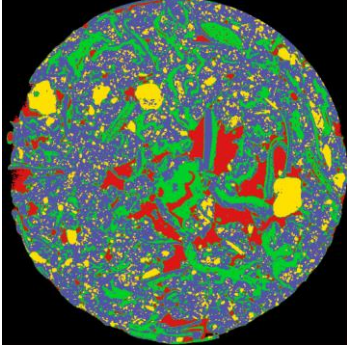
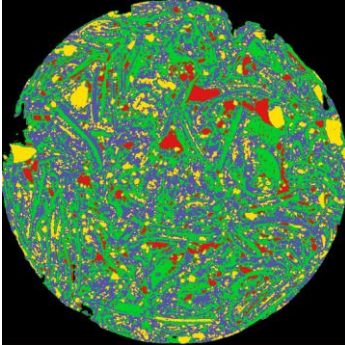
L30-C1-1H-5-(1) -C1.2	L30-C1-1H-5-(2) -C1.1	L30-C1-1H-15-C1.1
		
		
P30-C1-1H-15-C1.1		P30-C1-1H-15-(E) -C1.1
		
		

Tableau 3.9-1 : Résultats de tomographie par composition [46]

3.9.3 RÉSULTATS CHIFFRÉS

Le graphe de la Figure 3.9-2 présente les fractions volumiques de chaque constituant du composite sur base de l'analyse tomographique.

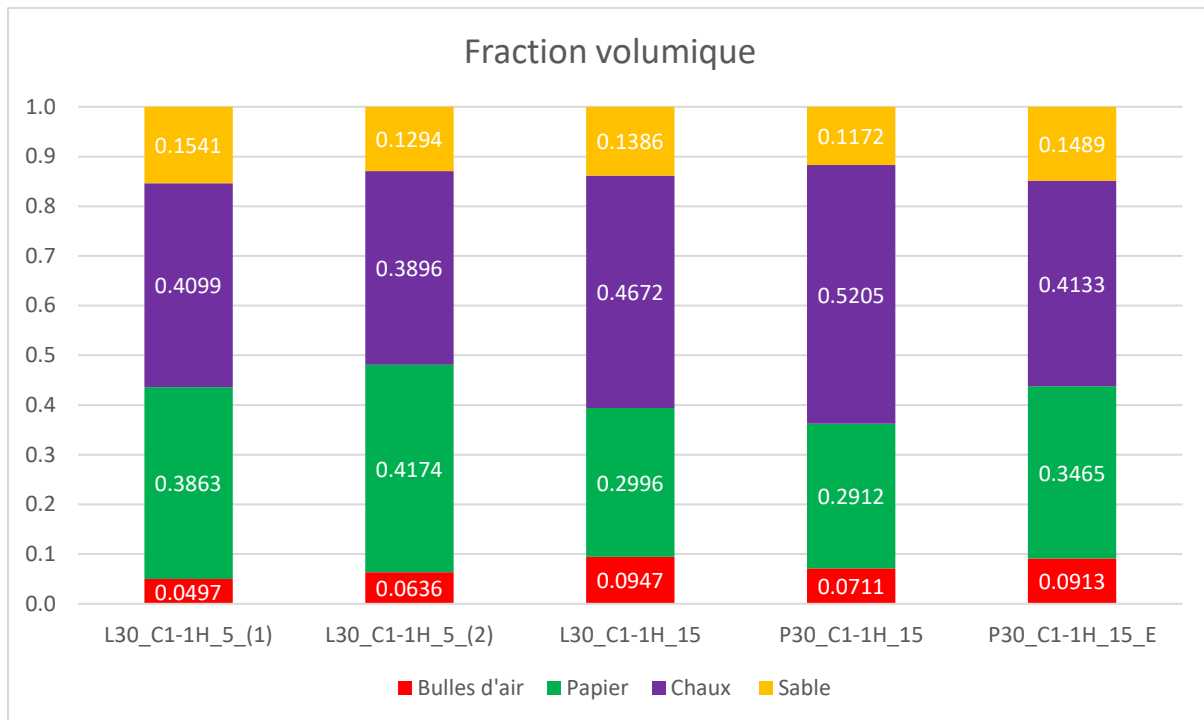


Figure 3.9-2 : Tomographie - fraction volumique moyenne [46]

Afin de définir un modèle constitutif du matériau et de vérifier comment il réagit, nous avons créé un modèle numérique sur Abaqus. Abaqus est un logiciel d'éléments finis qui permet de modéliser des matériaux, faire des assemblages mécaniques, imposer des conditions limites (déplacement, force, ...) et permet ensuite de visualiser les résultats.

La création d'un modèle numérique précis permet dans un second temps de faire des essais virtuels sur le matériau. C'est dans cette optique que les modèles ont été créés. L'analyse du matériau sous différentes formes et pour diverses applications peut alors être faite. Par exemple, comment SPALCO réagirait sous forme de chape.

Parmi les 13 compositions produites, chacune se comporte d'une manière spécifique et a ses propres propriétés. Nous avons donc choisi 2 compositions à mettre en avant pour le modèle. Dans un premier temps, le modèle Abaqus se base sur la composition L30-C1-1H-15-(R50), qui a été sélectionnée car elle représente l'objectif du matériau, c'est-à-dire, un matériau éco-circulaire. En effet cette composition est constituée de 50% de SPALCO recyclé. La seconde composition est la L50-C1-1H-15, qui est composée de 50% de papier. Ces deux compositions ont des résultats intéressants d'un point de vue de la résistance mécanique, elles ont une ductilité intéressante et des propriétés d'isolation qui sortent du lot. Ces résultats seront discutés en détail dans la section 5.2 : *Analyse de l'influence des paramètres sur les* .

Dans ce chapitre, l'évolution de la réflexion sur le modèle sera présentée, ensuite le modèle constitutif va être développé. Par après des résultats du modèle numérique seront détaillés et comparés aux essais en laboratoire.

Pour l'approche via Abaqus deux modèles principaux ont été modélisés. Un modèle de compression uni-axiale et un modèle de flexion 4 points.

Dans cette partie, les compositions seront appelées par leur nom abrégé, L30-C1-1H-15-(R50) est surnommée **R50** et L50-C1-1H-15 est surnommée **L50**.

4.1 EVOLUTION DU MODÈLE

Le matériau SPALCO se caractérise comme un matériau élasto-plastique, avec une meilleure résistance en compression qu'en traction.

L'hypothèse d'un comportement visqueux a rapidement été écartée : en effet comme on peut l'observer sur les graphes présentés dans les sections 3.1 et 3.2, la vitesse de chargement n'a pas d'influence sur la réponse du matériau.

4.1.1 MODÈLE DE BASE MOHR-COULOMB

Considérant l'asymétrie entre la résistance en traction et en compression, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle de Mohr-Coulomb car celui-ci permet de représenter la contrainte de rupture d'un matériau comprenant une meilleure résistance en compression qu'en traction.

Mohr-Coulomb représente les états de contrainte du matériau (Figure 4.1-1) sur un plan dont les axes sont la contrainte normale et la contrainte tangentielle (Figure 4.1-2). Sur ce plan sont tracés deux demi-cercles qui représentent l'état de contrainte ultime en traction et en compression. La droite tangente à ces deux cercles, donnée par l'équation (4.1) marque la limite des états de contrainte possible dans le matériau avant la rupture. Les paramètres qui définissent cette droite, l'angle de frottement ϕ et la cohésion C , suffisent à Abaqus pour reproduire le comportement du matériau.

$$\tau = \sigma \tan \phi + C \quad (4.1)$$

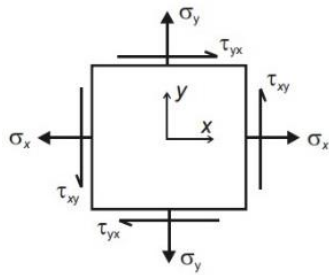


Figure 4.1-1 : Etat plan de contraintes [47]

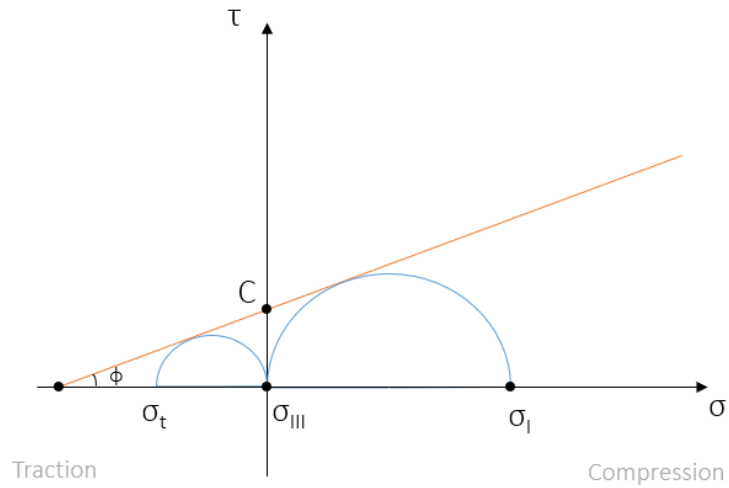


Figure 4.1-2 : Schéma du plan de Mohr-coulomb

La démonstration présentée à l'annexe VII permet de définir ces deux paramètres à l'aide des équations 4.2 et 4.3.

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{R_1}{\frac{R_1^2 + R_1 R_2}{R_1 - R_2}} \right) \quad (4.2)$$

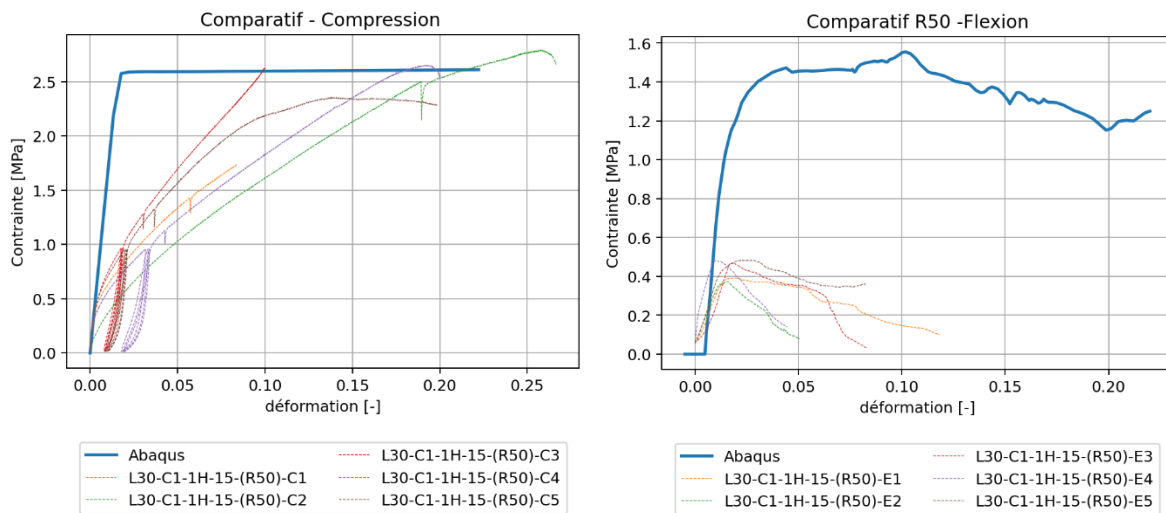
$$C = \tan(\phi) \left(\frac{2 R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2} \right) \quad (4.3)$$

Les paramètres R_1 et R_2 sont les rayons des deux cercles de Mohr. Soit $R_1 = \frac{\sigma_c}{2}$ et $R_2 = \frac{\sigma_t}{2}$.

En appliquant cette approche sur la composition **R50**, nous obtenons les résultats suivants :

Données initiales :	Variables pour Mohr-Coulomb :
➤ Contrainte max en traction : $\sigma_t = 0,406$ MPa	➤ $\Phi : 47,5^\circ$
➤ Contrainte max en compression : $\sigma_c = 2,69$ MPa	➤ $C : 0,52$

Les résultats du modèle en compression et en flexion sont visibles sur la Figure 4.1-3.



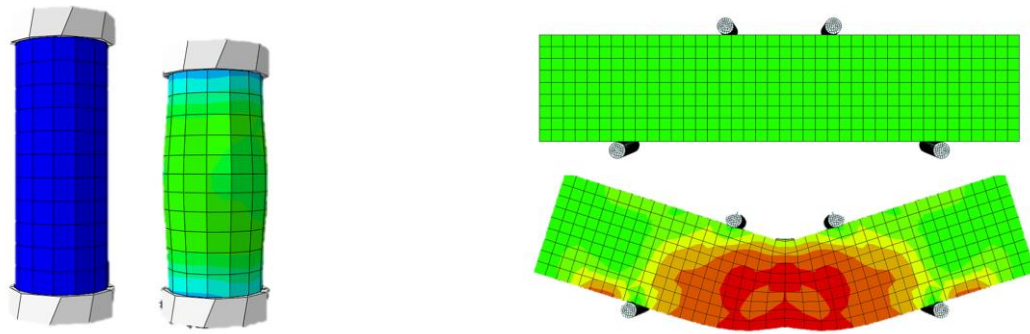


Figure 4.1-3 : Présentation du modèle initial - Mohr-Coulomb simple

4.1.2 AMÉLIORATION DE MOHR-COULOMB EN COMPRESSION

Dans ce premier modèle, on observe qu'un simple critère de Mohr-Coulomb n'est pas suffisant pour représenter le comportement du matériau. En effet, les essais ont montré qu'après une phase plastique, le matériau entre dans une phase de plasticité avec écoulement : le matériau se déforme de façon plastique mais la contrainte continue d'augmenter. Une seconde approche a donc été envisagée : un durcissement a été ajouté dans les paramètres pour mieux s'adapter au modèle de compression. Entre la fin de l'élasticité et la fin de la plasticité une approximation linéaire a été faite, en calculant la cohésion obtenue pour ces deux étapes et en gardant l'angle de frottement constant. Cela est représenté sur la Figure 4.1-4.

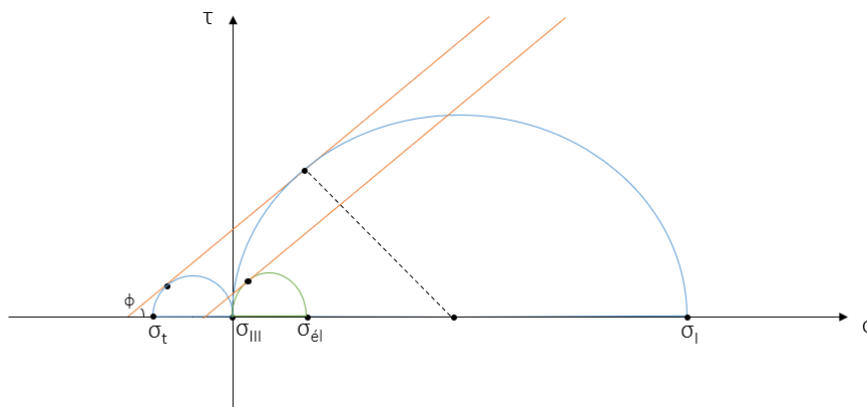


Figure 4.1-4 : Paramètres pour la loi d'écoulement

Données initiales :

- Contrainte max en traction : $\sigma_t = 0,406$ MPa
- Contrainte max en compression : $\sigma_c = 2,69$ MPa
- Limite d'élasticité : $\sigma_{él} = 0,43$ MPa

Variables pour Mohr-Coulomb :

	Φ	C	$ \epsilon_{pl} $
Début de plasticité	47.5°	0.08	0
Fin de plasticité	47.5°	0.52	0.7

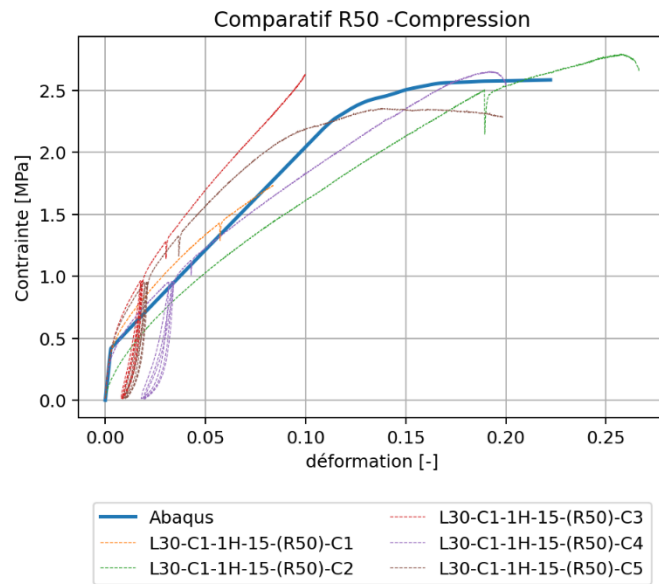


Figure 4.1-5 : Modèle numérique bilinéaire en compression

Grâce à cette approximation, le modèle de Mohr-Coulomb devient bilinéaire et la résistance en compression est représentée de manière plus correcte.

4.1.3 AMÉLIORATION DU MODÈLE EN FLEXION

Avant de discuter le modèle de flexion, il est important de rappeler que les essais en flexion montrent des résultats peu utilisables : les dimensions des échantillons n'étant vraiment pas très adaptées à ce type de test, on obtient des contraintes maximales entre 0.4 et 1.75 [MPa] et des déplacements assez faibles. Il est donc difficile d'utiliser ces résultats pour valider le modèle de flexion. Cependant, le modèle numérique de la flexion a été produit et l'évolution de la réflexion est présenté dans cette section même si les résultats ne sont pas très concluants.

Modèle 2D :

Dans un premier temps un modèle 2D remplace le modèle 3D présenté précédemment, en utilisant les mêmes paramètres que ceux donnés dans le modèle de compression avec Mohr-Coulomb simple. Ce passage à un modèle 2D permet de réduire le temps de calcul tout en augmentant la précision du maillage. La Figure 4.1-6 confirme que les résultats sont similaires.

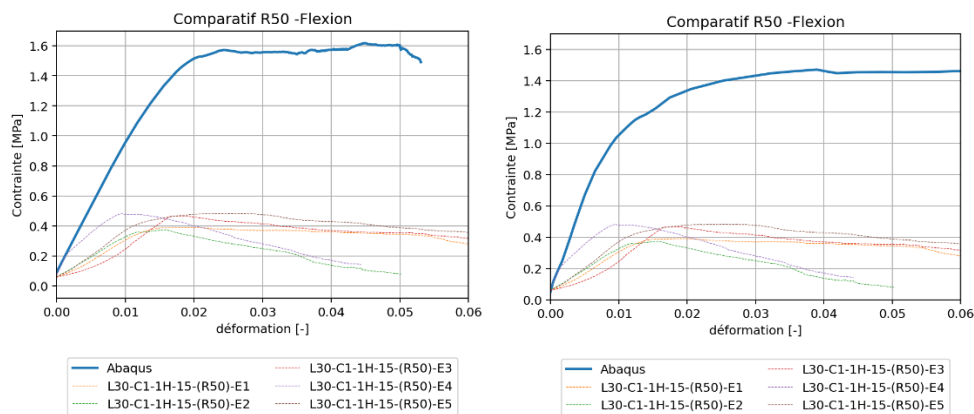


Figure 4.1-6 : Comparaison du modèle de Mohr-Coulomb 2D (gauche) et 3D (droite)

En analysant ce modèle de Mohr-Coulomb simple, il ressort qu'il n'est pas représentatif du comportement en flexion observé lors des mesures. C'est pourquoi, les recherches suivantes se basent sur un modèle 2D élastique, à l'image de la Figure 4.1-7.

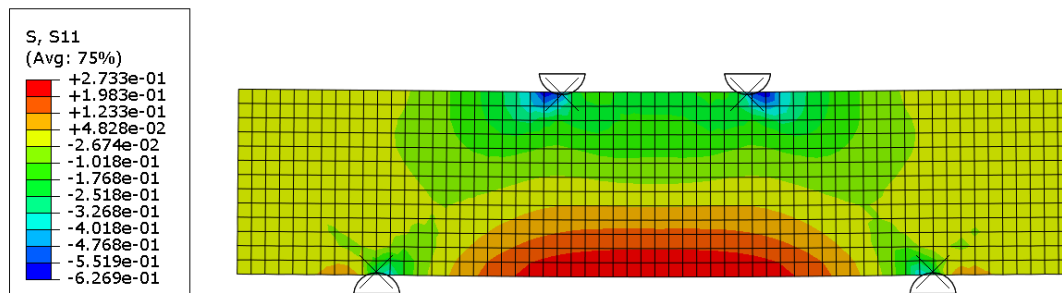


Figure 4.1-7 : Modèle de flexion en 2D, élastique

La courbe (Figure 4.1-6) du modèle présente une pente bien plus forte que les essais réels. Quelques recherches permettent d'adapter le module de Young pour faire correspondre les résultats du modèle à la réalité. La Figure 4.1-8 permet de comparer le module de Young utilisé initialement calculé à partir des essais de compression, et le module de Young modifié pour le modèle de flexion.

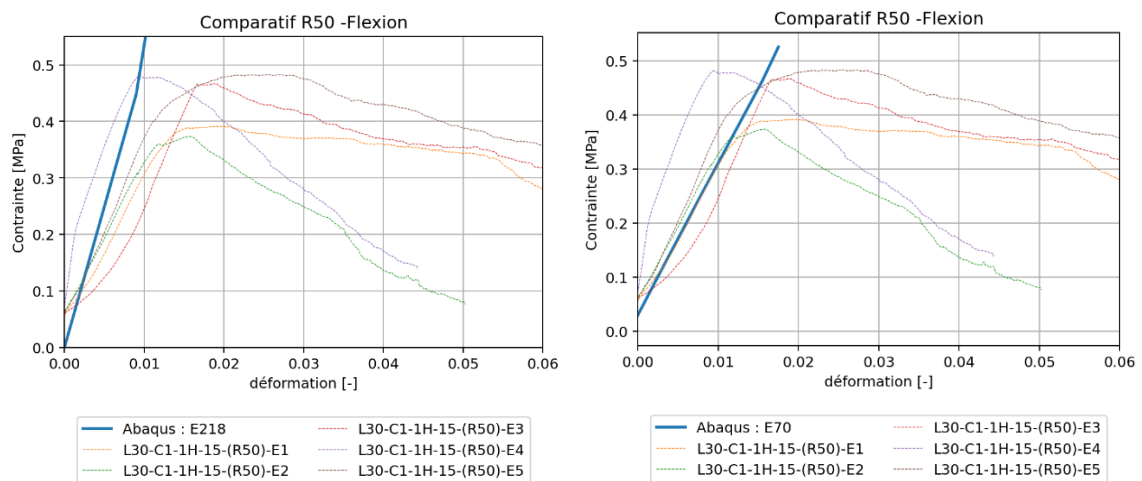


Figure 4.1-8 : Comparaison entre le module de Young initial (218 MPa) et le module de Young adapté (70 MPa)

Lors de cette approche, il a été observé que, pour faire correspondre le modèle aux données des essais en laboratoire, le module de Young imposé doit être inférieur à la valeur utilisée en compression. Cette différence pourrait être due au fait que le matériau ne soit pas complètement isotrope. En effet, jusqu'ici le matériau a toujours été considéré comme isotrope, et donc insensible à l'orientation selon laquelle il est sollicité. Sa composition faite de bandelettes de papier rend toutefois l'hypothèse d'anisotropie plausible : il se pourrait donc que les sollicitations en flexion et compression soient différentes à cause du changement d'orientation. Des recherches complémentaires concernant l'isotropie du matériau pourraient s'avérer utiles pour appuyer cette hypothèse.

Par ailleurs, une comparaison avec les données issues de la DIC des essais de flexion permettrait probablement de mieux comprendre le comportement du matériau sous ce type de sollicitations et d'affiner le modèle.

Modèle avec fissuration :

Il est important de comprendre que c'est la contrainte de traction dans la fibre inférieure qui limite la résistance de la briquette lors de l'essai de flexion. Cette contrainte engendre la fissuration de l'échantillon. Un modèle qui tient compte de la fissuration permettrait de faire coïncider la contrainte maximale atteinte par le modèle Abaqus avec celle obtenue lors des essais réels.

Les différents modes de fissure qui existent sont présentés à la Figure 4.1-9. Dans notre cas le type de fissuration est le mode I. La fissure est perpendiculaire à la force de traction qui apparaît dans la fibre inférieure lors de la mise en flexion.

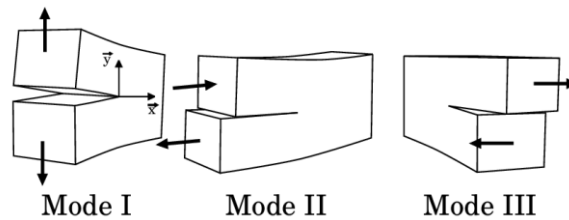


Figure 4.1-9 : Modes élémentaires de fissuration [48]

« Dans le mode I la fissure se propage lorsque l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons atomiques est inférieure à l'énergie élastique relaxée par la propagation de la fissure. Cela correspond à un facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} » [49]

L'énergie liée à cette fissuration n'a pas été mesurée : des essais de ténacité sont nécessaires pour la quantifier. La quantité d'énergie que le SPALCO peut absorber avant de se fissurer a été définie comme l'aire sous la courbe de contrainte-déformation dans la zone élastique (Figure 4.1-10), et calculée à l'aide de la formule 4.4.

$$E = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y * aire * L [J] \quad (4.4)$$

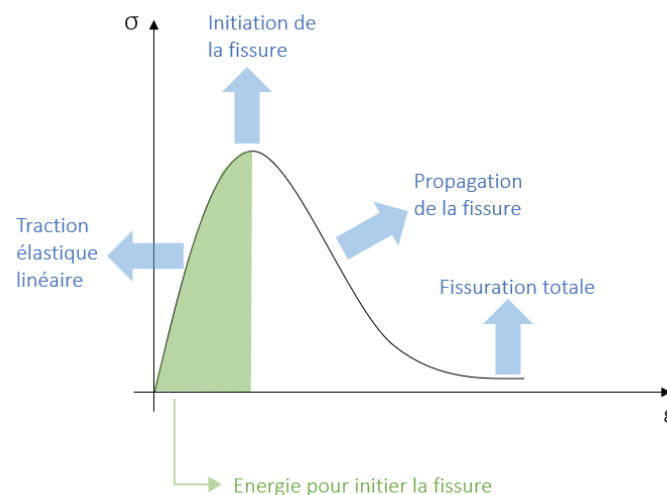


Figure 4.1-10 : Comportement schématisé du SPALCO en flexion

Le modèle de flexion 2D créé dans Abaqus a été modifié avec des paramètres spécifiques qui permettent de propager une fissure lorsque le matériau atteint une valeur limite de déformation, ainsi qu'une certaine énergie. Dans ce modèle le paramètre XFEM est utilisé pour générer de la fissuration. XFEM est une méthode d'éléments

finis étendue qui utilise les modèles de fissuration cohésive. Le modèle présenté est un modèle préliminaire, qui permet d'approcher le comportement du SPALCO de manière plus réaliste.

Une analyse du fonctionnement de la fissuration lors des essais a été faite afin de comprendre le comportement du matériau lors de la rupture : il a été observé que la fissuration se produisait au centre de l'échantillon.

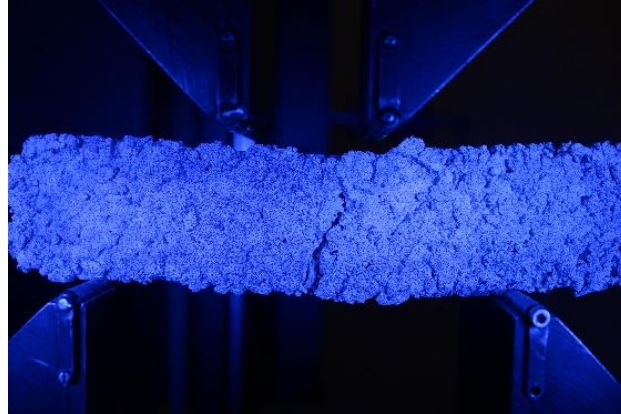


Figure 4.1-11 : Fissuration lors de l'essai de flexion 4 points

Par ailleurs, l'analyse des essais met en évidence que la différence majeure entre le modèle et les essais en laboratoire est le fait que SPALCO est hétérogène : il présente des discontinuités et des « zones faibles » qui facilitent et influencent la propagation de la fissure. Par ailleurs, la Figure 4.1-12 met en évidence que, lors de la fissuration, les fibres de papier retiennent lentement l'échantillon. Le modèle numérique ne permet pas de représenter cette hétérogénéité.



Figure 4.1-12 : Photos des échantillons après l'essai de flexion

Le modèle de flexion avec fissuration considère seulement les déformations élastiques. Cette première approche se base sur le schéma à la Figure 4.1-10, présentée plus haut. Les paramètres qui déterminent ce modèle sont les suivants :

- *Maxpe damage* : la déformation à la rupture ε_y
- *Fracture energy* : l'énergie de fissuration qui est la valeur calculée sous la courbe divisée par la surface de fissuration, qui est ici la section de la briquette.
- *Module de Young*
- *Plane strain thickness* : profondeur du modèle 2D
- Paramètre de contact : *General contact* avec un coefficient de frottement et un « hard » contact normal.

D'après nos calculs, les paramètres devraient donc être ceux donnés dans le Tableau 4.1-1.

Caractéristiques		Données élastiques				Energie de fissuration
Composition	Module de Young [MPa]	Young modèle de flexion [MPa]	Poisson	σ_y [MPa]	ϵ_y	E [KJ/m ²]
R50	218	70	0.06	0.43	0.01	0.256

Tableau 4.1-1 : Paramètre calculés pour le modèle Abaqus avec fissuration

Cependant le modèle Abaqus donne des résultats incorrects pour ces paramètres de contrainte et d'énergie de fissuration. La détermination précise d'un modèle de fissuration et la compréhension de chacun des paramètres qui y sont liés dépasse notre maîtrise d'Abaqus. Le graphe présenté à la Figure 4.1-13, montre le comportement souhaité en flexion avec fissuration, obtenu en utilisant des paramètres modifiés pour correspondre à nos essais réels.

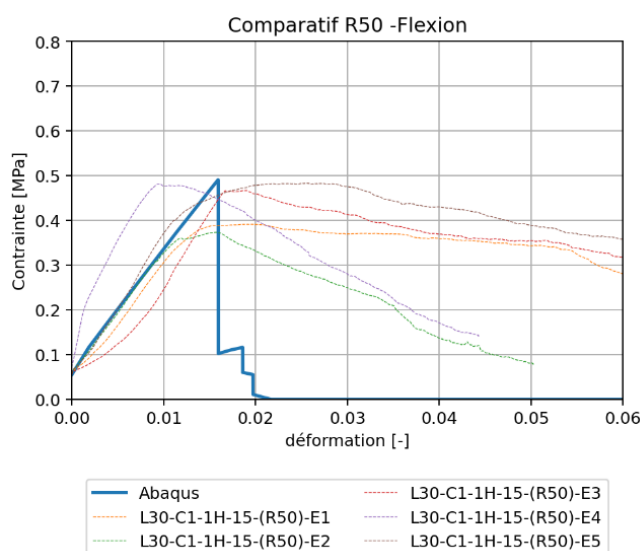
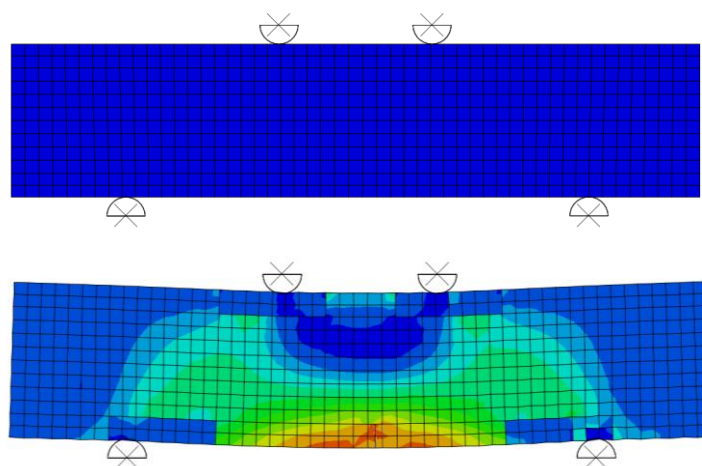


Figure 4.1-13 : Résultats du modèle de flexion avec fissuration pour la composition R50

D'autre part, dans ce modèle, comme il y a une localisation des déformations, la qualité des résultats dépend de la taille du maillage. La modélisation ayant été effectuée sur une licence « étudiant » d'Abaqus, ceci implique que la précision du maillage est limitée. La Figure 4.1-14 présente les résultats du modèle avec la taille de maillage la plus précise possible.



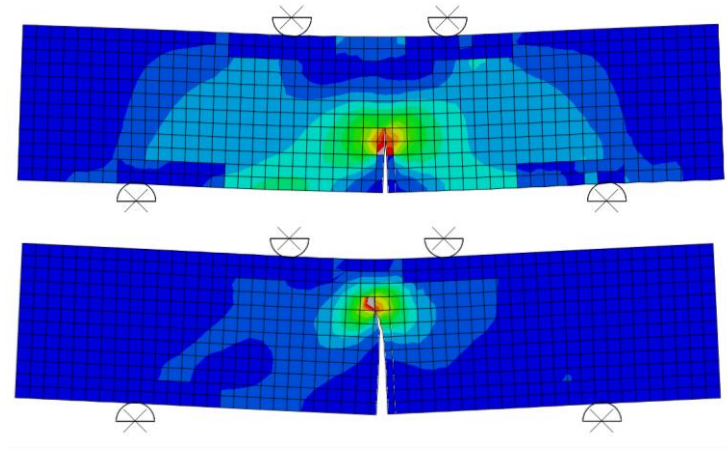


Figure 4.1-14 : Propagation de la fissure

Ces schémas ont été obtenus avec des valeurs non maîtrisées pour la valeur de contrainte de fissuration et d'énergie de fissuration. Cependant le modèle représente bien l'allure du comportement du SPALCO en flexion : le SPALCO se déforme linéairement jusqu'à atteindre une contrainte à laquelle une fissure apparait et se propage.

Sur les images de la Figure 4.1-14, des zones sans contrainte sont visibles au niveau des appuis : ces zones ont été définies, afin d'assurer une localisation de la fissuration au centre de l'échantillon et non sous les appuis.

4.2 MODÈLES DÉFINITIFS

SPALCO est donc modélisé comme un matériau élasto-plastique, à l'aide d'un modèle de Mohr-Coulomb avec écoulement. Un modèle de compression et un modèle de flexion permettent de caractériser le comportement du SPALCO.

4.2.1 MODÈLE DE COMPRESSION

Le modèle de compression uni-axiale est un modèle de compression 3D, il est formé d'un cylindre de diamètre 35mm et hauteur 90mm. Ce cylindre est positionné entre deux appuis de forme cylindrique, le contact entre ces appuis et le cylindre est représenté par une force de contact tangentielle avec un coefficient de frottement de 0,5. Dans les conditions limite on impose un déplacement de l'appuis supérieur dans le sens longitudinal du cylindre. Tandis que l'appuis inférieur est bloqué.

Le comportement général du SPALCO en compression est décrit par le système d'équations (4.5) :

$$\begin{cases} \sigma = \varepsilon^e E & \text{si } \sigma < \sigma_{\text{él}} \\ \sigma = a\varepsilon^p + \sigma_{\text{él}} & \text{si } \sigma < \sigma_{\text{max}} \\ \sigma = \sigma_{\text{max}} & \end{cases} \quad (4.5)$$

Voici un tableau reprenant les valeurs utiles à la modélisation des deux compositions suivantes R50 et L50 :

Caractéristiques		Données élasto-plastiques						Mohr-Coulomb	
Composition	Densité	Young	Poisson	$\sigma_{\text{él}}$	σ_{max}	σ_t	ε_{max}	Φ	C
R50	850	217.8	0.06	0.43	2.69	0.406	0.207	$\Phi = 47.5^\circ$	$C_{\text{el}} = 0.08$ $C_{\text{pl}} = 0.52$
L50	500	164	0.07	0.51	2.13	0.74	0.209	$\Phi = 28.85^\circ$	$C_{\text{el}} = 0.15$ $C_{\text{pl}} = 0.63$

Tableau 4.2-1 : Variables du modèle de compression

Voici les deux courbes (Figure 4.2-1) qui représentent la résistance en compression des compositions R50 et L50 :

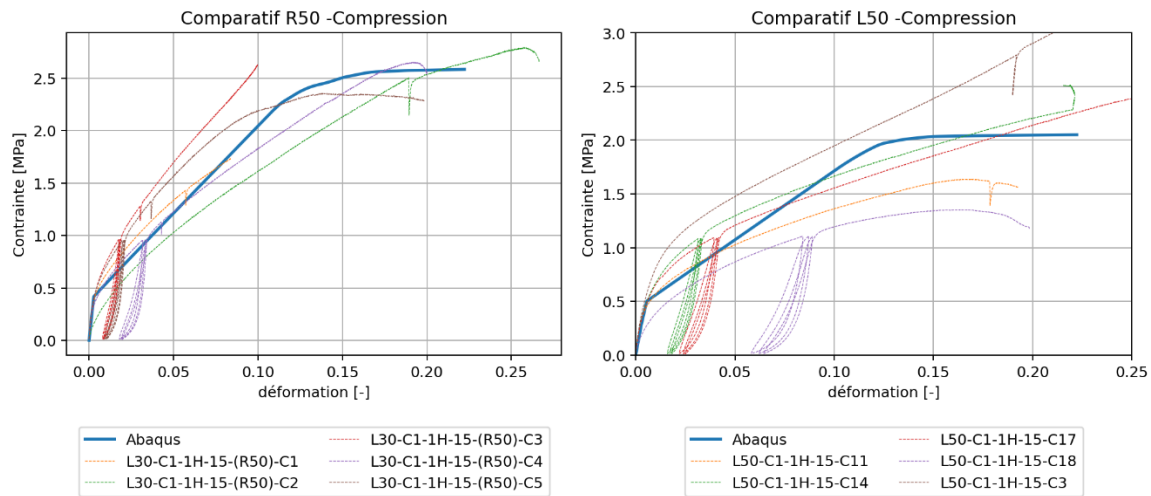


Figure 4.2-1 : Modèle numérique de compression*

*Dans la composition R50, les échantillons C1 et C3, lors de l'essai, ont dû être arrêtés car les extensomètres se sont décrochés, c'est pourquoi ils ont une déformations limite plus petite que celle des autres échantillons.

4.2.2 MODÈLE DE FLEXION 4 POINTS

Le modèle est constitué d'une brique de dimension 180x40x30 [mm³], cette briquette est posée entre 4 appuis rigides, avec un coefficient de frottement de 0,5 à l'interface. Les conditions limites imposées sont les suivantes : les appuis inférieurs sont encastres et les appuis supérieurs ont un déplacement vertical imposé.

Le comportement général du SPALCO en flexion est défini par le système d'équations (4.6) :

$$\begin{cases} \sigma = \epsilon^e E_{flex} & \text{si } \sigma < \sigma_{max} \\ \sigma = -A\epsilon \end{cases} \quad (4.6)$$

Le coefficient A, dépend de la composition du SPALCO et sa capacité à retenir la fissure. Le comportement est schématisé à la Figure 4.1-10.

Modèle avec fissuration :

Le modèle de fissuration est donc un modèle élastique simple pour lequel une fissure apparait lorsqu'une contrainte maximale est atteinte. Pour chaque composition présentée, un module de Young apparent en flexion a été défini (voir Tableau 4.2-2). Dans le modèle numérique A est considéré comme nul.

Composition	Module de Young [MPa]	Young modèle de flexion [MPa]	Contrainte max [MPa]
R50	218	70	0.43
L50	164	50	0.74

Tableau 4.2-2 : Module de Young apparent en flexion

Les graphes de la Figure 4.2-2 représentent la déformation élastique et le comportement souhaité à la fissuration.

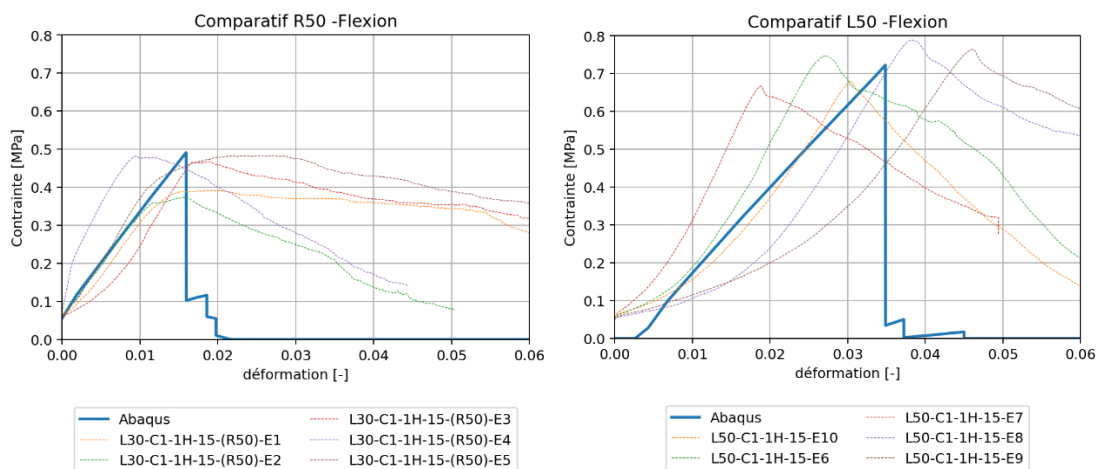


Figure 4.2-2 : Comportement souhaité du modèle de flexion pour la composition R50 (gauche) et L50 (droite)

Le matériau se rapproche plus d'un comportement fragile en flexion, dû à sa faible résistance et sa faible ductilité en traction.

4.2.3 COMPORTEMENT GLOBAL DU SPALCO

Sur le graphe de la Figure 4.2-3, le comportement global, c'est-à-dire en compression et en traction, du SPALCO est représenté pour les compositions L50 et R50. Ce graphe est produit avec les résultats du modèle Abaqus.

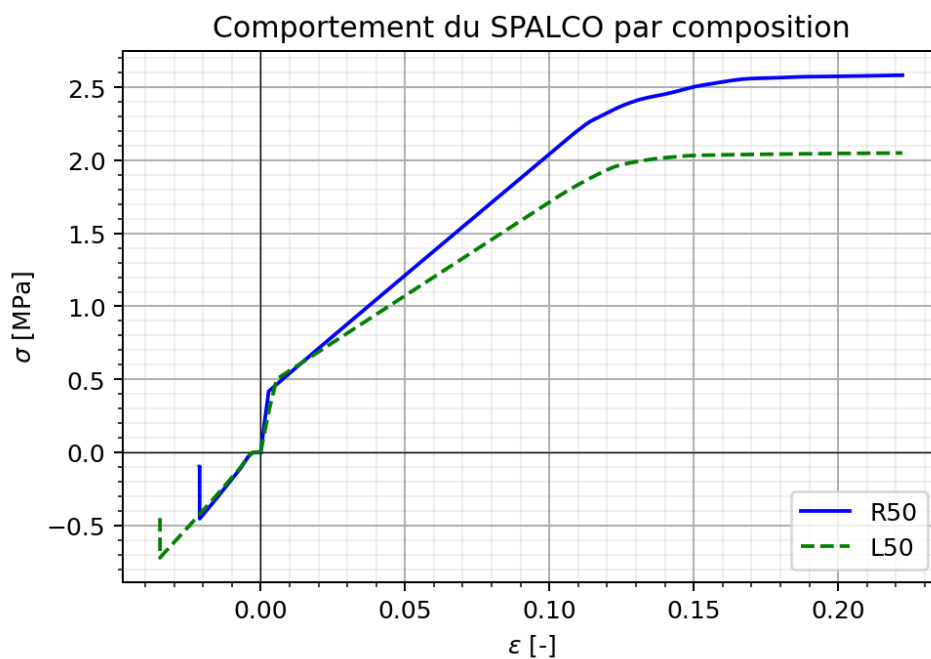


Figure 4.2-3 : Comportement global des compositions R50 et L50

4.3 AMÉLIORATIONS DU MODÈLE

Le modèle a été produit afin de valider le comportement constitutif du matériau. Dans cette optique le modèle numérique est un modèle préliminaire qui nécessite encore certaines améliorations afin d'être fiable.

Le modèle de flexion peut être perfectionné et l'analyse des données de DIC permettrait certainement de mieux comprendre le comportement du matériau sous ce type de sollicitations.

Par la suite, une des améliorations serait de faire une analyse de convergence du maillage. Le maillage a ici été défini avec le maillage le plus précis que la version étudiante autorise.

D'autres expériences numériques complémentaires, pourraient être intéressantes afin de valider le comportement du modèle. Par exemple un essai de poinçonnement. Ce genre d'essais nécessiterait un maillage précis.

Pour aller plus loin dans l'analyse du SPALCO et afin de trouver son application idéale, il serait intéressant de créer des modèles représentant le SPALCO dans des conditions réalistes. Par exemple, la mise en œuvre du SPALCO comme chape, entre la structure portante et les finitions. D'autres mises en œuvre pourraient aussi être analysées, comme des plaques pour former un mur, l'analyse d'un mur en briques de SPALCO, etc.

5 DISCUSSION

Dans cette discussion, des raccourcis des noms des compositions vont être employés. Ces raccourcis mettent en évidence la caractéristique principale de la composition. Voici un tableau afin de vous familiariser avec les termes utilisés :

Composition	Raccourcis	Caractéristique
L30-C1-1H-15	REF	Composition de référence
P30-C1-1H-15	P30	Papier sous forme de confettis
P30-C1-1H-15-(E)	P30-(E)	Papier sous forme de confettis avec beaucoup d'eau ajoutée au mélange.
M30-C1-1H-15	M30	Papier de taille moyenne
L15-C1-1H-15	L15	Papiers longs avec seulement 15% de papier
L30-C0-1H-15	C0	Composition sans sable
L30-C1-1H-5-(1)	5-(1)	Temps de malaxage court, temps de trempage normal (24h)
L30-C1-1H-5-(2)	5-(2)	Temps de malaxage court et temps de trempage long (48h)
L30-C1-1H-15-(R50)	R50	Composition avec 50% de SPALCO recyclé
L30-C3-2H-15	C3-2H	Composition avec plus de sable que de chaux
L30-J1-1H-15	J	Composition à base de sable jaune
L50-C1-1H-15	L50	Composition avec 50% de papier
L0-C1-1H-15	L0	Sans papier

Tableau 5-1 : Récapitulatif des raccourcis des compositions employés pour rendre la discussion plus fluide

5.1 MECANISMES DE DEFORMATION ET RUPTURE : FONCTIONNEMENT DU COMPOSITE

Dans cette section une analyse du comportement physique du SPALCO est faite pour comprendre l'influence des constituants du composite sur son comportement.

Le SPALCO est composé de trois constituants : papier, sable et chaux. Le sable et la chaux forment une matrice dans laquelle des inclusions de papier se mélangent. Au contraire des composites habituels, ici, les inclusions ne renforcent pas le matériau mais lui apportent d'autres caractéristiques que nous allons détailler dans cette section.

Dans un premier temps, afin de comparer les propriétés de chacun des constituants, des compositions spécifiques ont été produites :

- **L0-C1-1H-15** : Une composition sans papier, juste à base de sable et de chaux. Cela se rapproche d'un mortier. Le but est donc de comprendre comment la matrice travaille. Cette composition n'a pas été présentée dans les résultats auparavant car elle ne fait pas partie de la catégorie des SPALCO puisqu'elle ne contient pas de papier.
- **L30-C0-1H-15** : Une composition sans sable. Cette composition permet donc d'analyser le comportement du papier avec le liant.

Lorsqu'on compare la résistance en compression de ces deux échantillons, voici le graphe obtenu (Figure 5.1-1) :

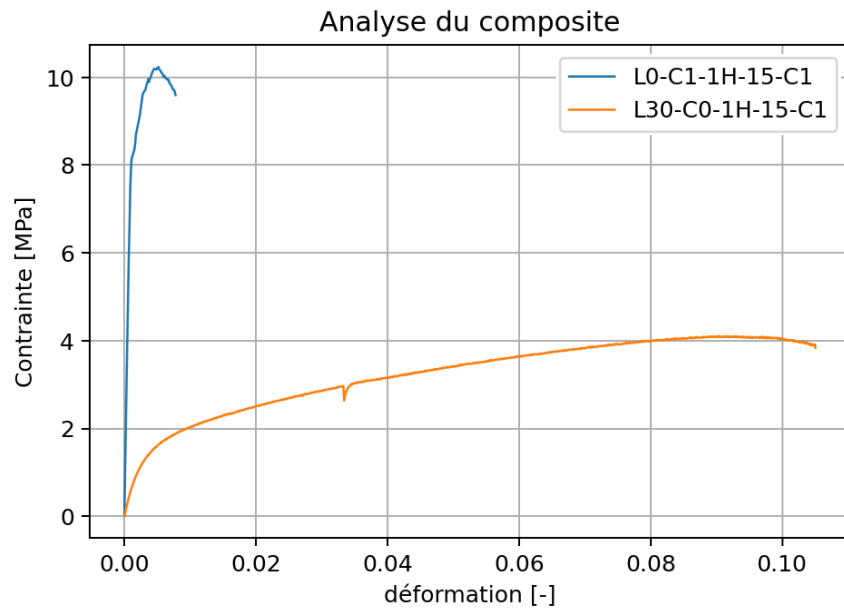


Figure 5.1-1 : Comparaison entre le comportement de la matrice et le comportement du papier en compression

L'observation est directe, la composition L0, soit la matrice, donne la résistance mécanique tandis que la composition C0 apporte la ductilité, soit la capacité à se déformer. La contrainte maximale pour L0 est deux fois et demie plus élevée. Tandis que la déformation de C0 est 10 fois plus importante que celle de L0.

Ensuite la seconde analyse concerne le comportement du matériau lors de la charge-décharge. Le premier graphe, Figure 5.1-2, ci-dessous représente l'essai au complet de la composition L0 (compression avec cycles de charge-décharge). Ensuite le graphe de droite montre un zoom sur la zone en charge-décharge.

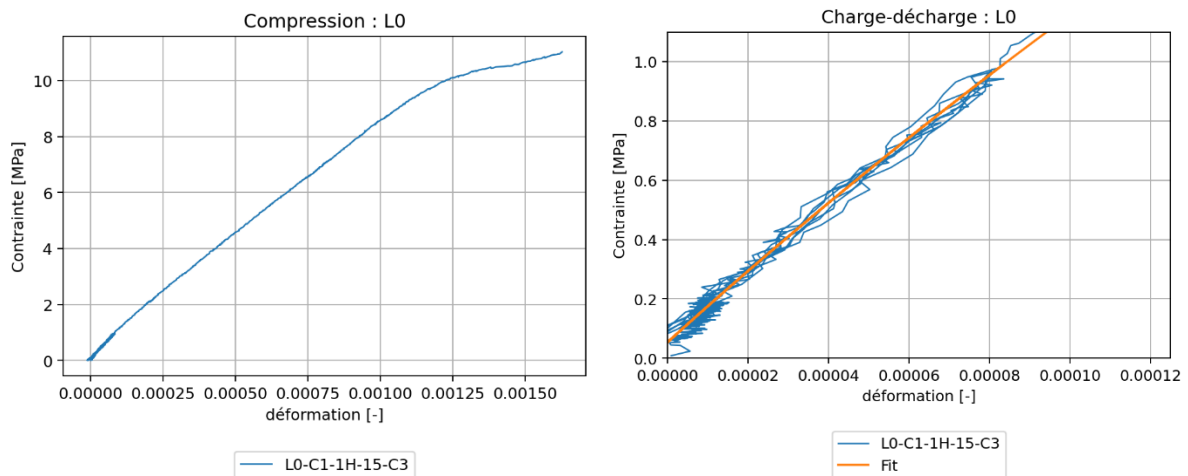


Figure 5.1-2 : Compression et cycles de charge-décharge pour la composition L0-C1-1H-15

La charge-décharge est linéaire, ce qui correspond à une décharge élastique classique. Les données sont discontinues dû à des imprécisions car le matériel était calibré pour des plus grands déplacements.

Si on fait cette même analyse sur la composition C0, Figure 5.1-3, on observe que la pente à la décharge est légèrement différente de la pente de recharge qui, elle, a la même courbure que le chargement initial. La contrainte limite d'élasticité pour cette composition vaut 1.38 [MPa], le cycle de charge-décharge est donc bien effectué dans la zone calculée comme élastique. La limite d'élasticité considérée ici est une limite à 0.2% de déformation. Lors de la décharge, une déformation résiduelle est présente et identique durant les 3 cycles de décharge. La pente de la décharge est plus raide que lors du chargement initial. Le chargement initial joue un certain rôle, il implique un durcissement du matériau, ce qui pourrait être le signe d'un réarrangement granulaire ou d'une fermeture des porosités. Car ensuite les différents cycles sont identiques entre eux et ne contiennent aucune déformation résiduelle.

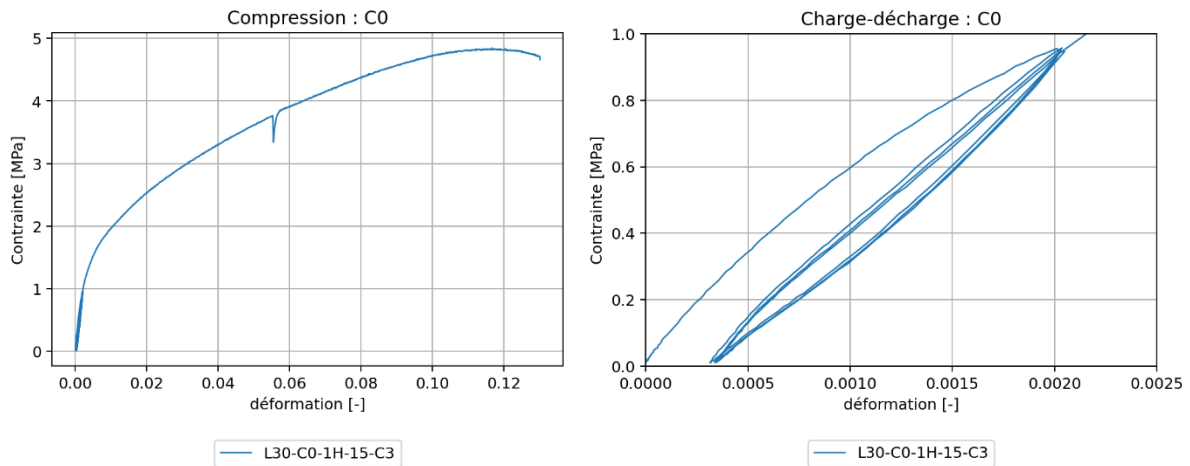


Figure 5.1-3 : Compression et cycles de charge-décharge pour la composition L30-C0-1H-15

Ces analyses sont à prendre avec du recul, car ici on analyse une composition formée de papier mais aussi d'une grande quantité de chaux. En effet cette composition est formée de 30% de papier et 70% de chaux.

Lorsqu'on observe ensuite le graphe (Figure 5.1-4) d'une composition de SPALCO classique L30-C1-1H-15, on remarque que la courbe de charge-décharge est beaucoup moins linéaire : une déformation résiduelle est présente après chaque cycle. Cela est dû au fait que le cycle de charge-décharge a été effectué dans la zone plastique, car pour cette composition, la limite d'élasticité vaut 0.37 [MPa].

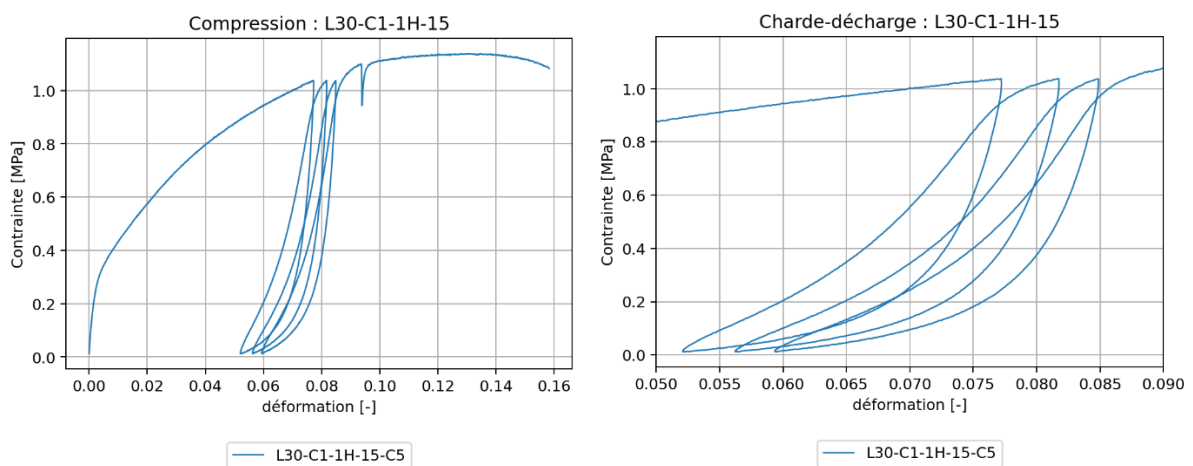


Figure 5.1-4 : Compression et cycles de charge-décharge pour la composition L30-C1-1H-15

La non-dépendance au temps, observée dans les différents essais effectués, permet d'éloigner les modèles de viscoplasticité. La forme de la courbe de charge-décharge est due au mélange des propriétés des constituants du composite. Le début de la décharge est proche d'un comportement de décharge élastique normal, ensuite

lorsque la contrainte est plus petite que 0.4 [MPa], on observe un déchargement différent. La seconde phase de déchargement a plus une allure de décharge plastique et recouvre plus les déformations. Lors de la décharge il y a une recouvrance de 2.5% de déformation.

Ce type de comportement sur les cycles charge-décharge provient du fait que le matériau est un composite. En effet, la matrice faite de sable et de chaux ne se comporte pas de la même façon que le papier, comme l'illustre bien la Figure 5.1-1. Ainsi le comportement du matériau composite sera une combinaison des comportements des différents composants. Le schéma Figure 5.1-5 explique de façon simplifiée le comportement sur le cycle charge-décharge en fonction du comportement séparé de la matrice et du papier.

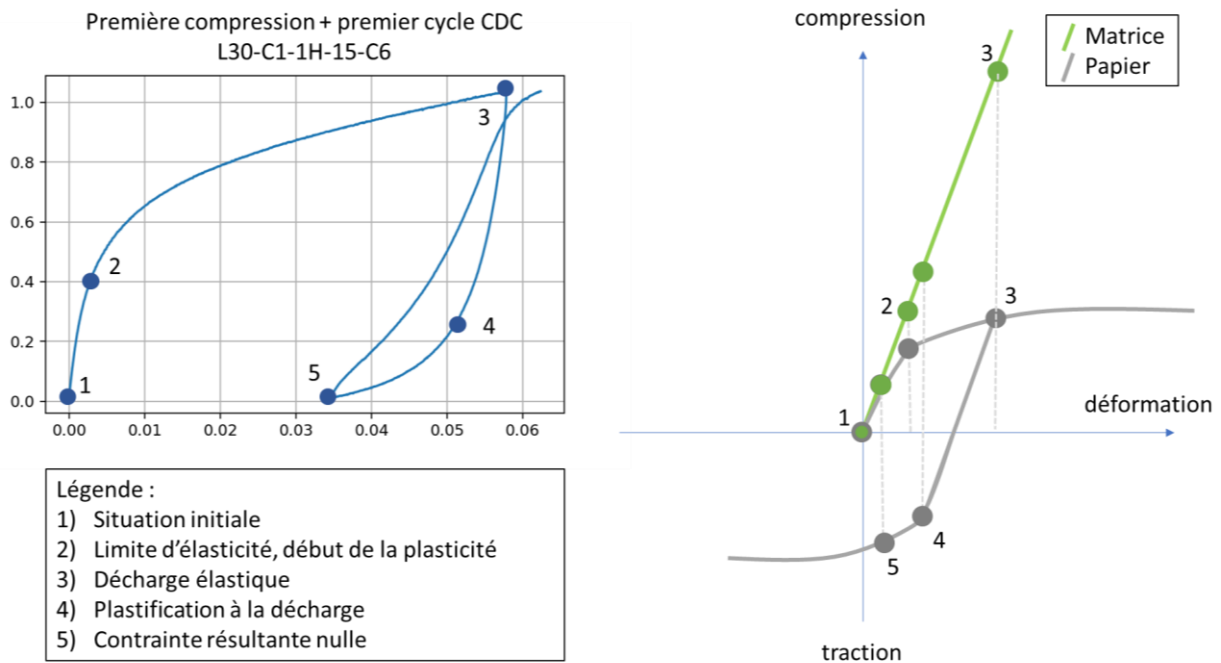


Figure 5.1-5 : Fonctionnement interne de la déformation du composite

Pour mieux comprendre ce phénomène, une analogie est proposée dans l'annexe V.

Dans l'optique de comparer les cycles de charge-décharge dans la zone élastique et la zone plastique, différentes décharges ont été effectuées sur l'échantillon L30-J1-1H-15-C6 (Figure 5.1-6). Pour cette composition la limite d'élasticité vaut 0.5 [MPa].

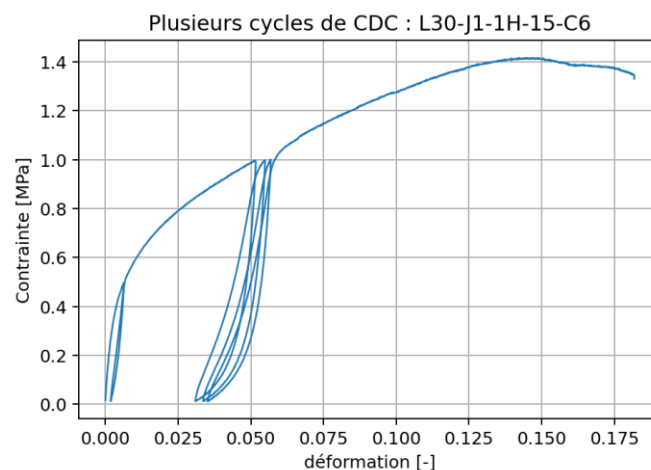


Figure 5.1-6 : Différents cycles de charge-décharge sur l'échantillon L30-J1-1H-15

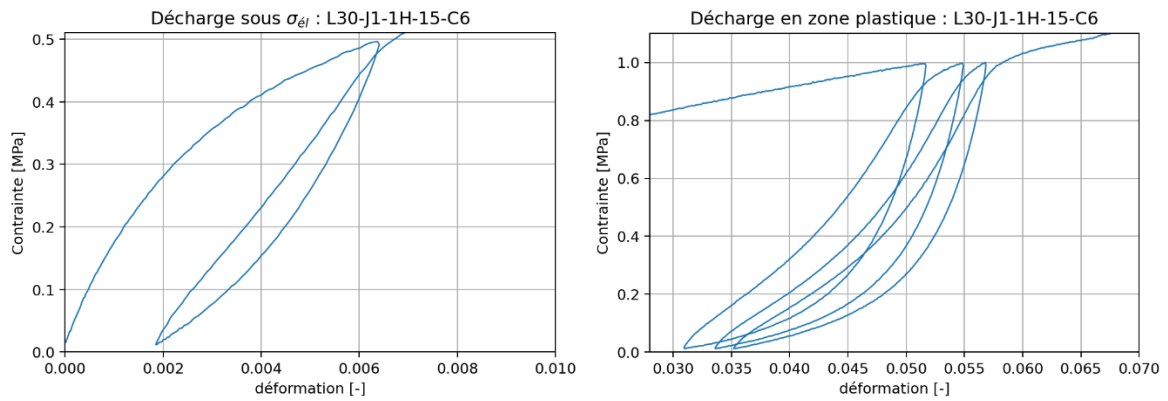


Figure 5.1-7 : Zoom sur les différents cycles de charge-décharge de l'échantillon L30-J1-1H-15

Les zooms sur le graphe (Figure 5.1-7) permettent de mieux observer les courbes (attention les deux échelles sont différentes). Le premier agrandissement indique clairement une pente constante sur le cycle charge-décharge, ce qui confirme l'absence de plasticité, tandis que le second met en évidence un changement de pente bien marqué lors de la décharge, ce qui montre la plastification du matériau. A nouveau une déformation résiduelle est observée, lors du premier cycle de charge-décharge en zone élastique.

En continuant la comparaison entre **L0** et **C0**, sur les graphes de séchage (Figure 5.1-8), il faut 10 jours afin que la composition sans papier soit sèche contre 15 jours pour la composition sans sable. Cette différence se doit à la quantité d'eau présente dans le mélange. La composition contenant du papier est composée d'eau due au trempage du papier plus une quantité d'eau supplémentaire qui est ajoutée lors du mélange (voir section 2.1.1). Cette quantité d'eau qui sèche laisse ensuite des bulles d'air.

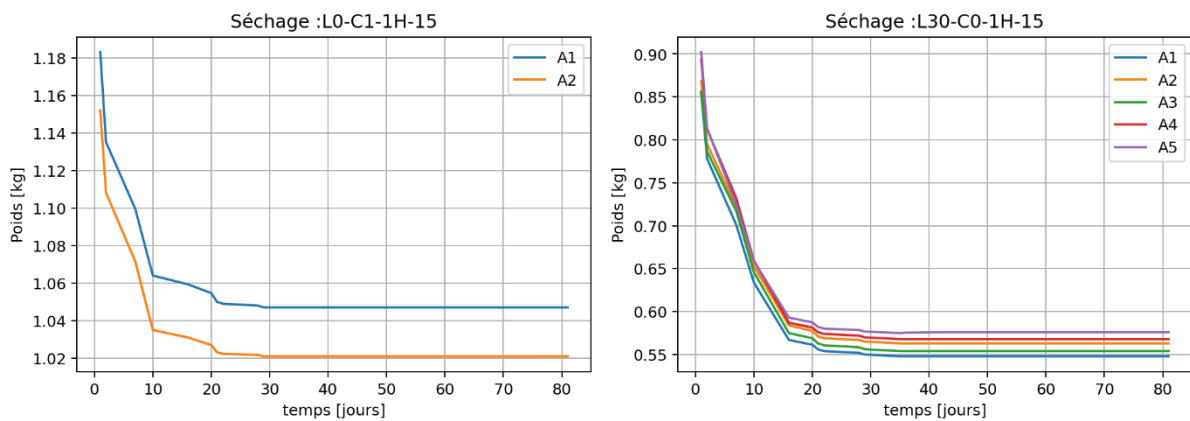


Figure 5.1-8 : Comparaison du temps de séchage entre les compositions L0 et C0

Les densités obtenues pour les deux compositions sont les suivantes : **L0** - 1660[Kg/m³] & **C0** - 920 [Kg/m³]. Le papier apporte donc la légèreté au matériau. Cette différence de densité impacte aussi l'isolation que le matériau apporte. Ces paramètres seront développés dans la section suivante de la discussion.

Cette analyse permet donc de mieux comprendre l'influence de la proportion de papier dans le matériau sur ses caractéristiques mécaniques : le papier apporte ductilité et légèreté mais réduit la résistance. L'analyse du comportement indépendant des constituants du composite justifie également l'allure singulière de la courbe résultant des essais de compression et particulièrement au niveau des cycles de charge-décharge.

5.2 ANALYSE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES PROPRIETES DE SPALCO

Dans la continuité de cette discussion, une approche de l'influence des paramètres est réalisée afin d'identifier leur impact sur les caractéristiques du matériau.

5.2.1 ANALYSE DES ESSAIS

Chaque essai est parcouru pour mettre en avant l'impact de la variation des paramètres sur ceux-ci.

5.2.1.1 FLEXION 4 POINTS :

Dans les essais de flexion 4 points, les briquettes fissaient au centre dû à la faible résistance en traction du SPALCO. La contrainte maximale atteinte est assez faible pour toutes les compositions. Cependant deux compositions sortent du lot. Les compositions L15-C1-1H-15 et L30-C0-1H-15 ont une contrainte de rupture en flexion plus de deux fois supérieure à la moyenne. Ce résultat n'est pas surprenant puisqu'il s'agit, d'une part, de la composition avec le moins de papier et, d'autre part, de la composition avec le plus de liant. De manière générale, il est attendu que ces deux compositions dominent le classement en termes d'essai mécanique. Parmi les autres compositions, notons que les compositions L30-C1-1H-5(1) & (2) et la composition L50-C1-1H-15 montrent une résistance supérieure à la moyenne, qui tourne autour de 0,75 – 0,8 MPa.

A l'inverse, le bas du classement est occupé par les compositions L30-C1-1H-15-(R50), L30-C3-2H-15 et M30-C1-1H-15. Ces piètres performances peuvent s'expliquer respectivement par la présence de 50% de matière recyclée, donc une proportion inférieure de liant, par une faible proportion de liant pour le C3-2H et par des fibres plus courtes que la composition de référence pour la dernière.

Le diagramme présenté à la Figure 5.2-1 reprend, outre la contrainte à rupture en flexion, les différentes informations suivantes : la quantité de papier (échelle de droite en [%]), la longueur des bouts de papier représentée en différentes couleurs et la quantité de chaux dans le mélange représentée par les croix (échelle de droite en [%]).

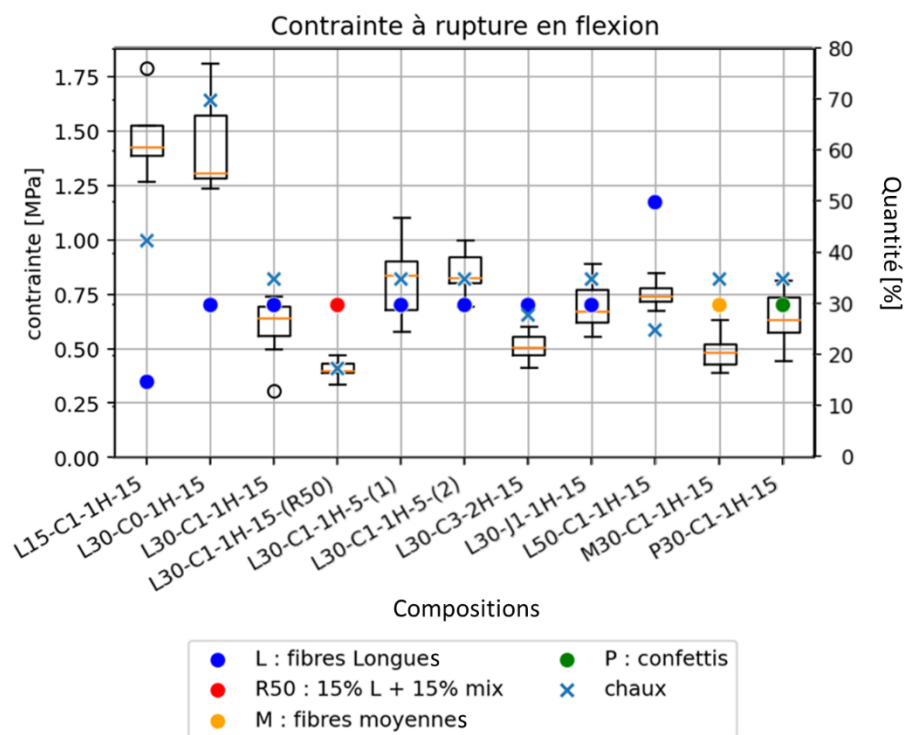


Figure 5.2-1 : Influence des variantes de composition sur la contrainte de rupture en flexion

La première observation est le lien entre la quantité de chaux et la contrainte maximale à la rupture en flexion. En effet, sur le graphe Figure 5.2-1, il y a une corrélation directe entre la proportion de chaux et la résistance : plus il y a de chaux, plus le SPALCO résiste en flexion.

La ductilité en flexion sera importante, comme discuté dans le modèle numérique (section 4.2.2), le comportement en flexion se rapproche d'un comportement fragile. Afin d'éviter une rupture inattendue la capacité à se déformer est utile. La composition qui s'en sort le mieux est la composition L30-C1-1H-5-(1)/(2). Les fibres de papier longues permettent de retenir la propagation de la fissure. Plus il y a de papier fibres longues, plus la déformation à la rupture est importante.

Le temps de malaxage court semble aussi mieux conserver les fibres et apporte une meilleure résistance. Si on compare la contrainte maximale obtenue pour la composition L30-C1-1H-15 (temps long de malaxage) de 0.6 [MPa], les compositions de temps court (1) et (2) avec 0.8 [MPa] ont une meilleure résistance en flexion.

Dans la suite de cette idée, comparons les données tomographiques des compositions en temps court et long :

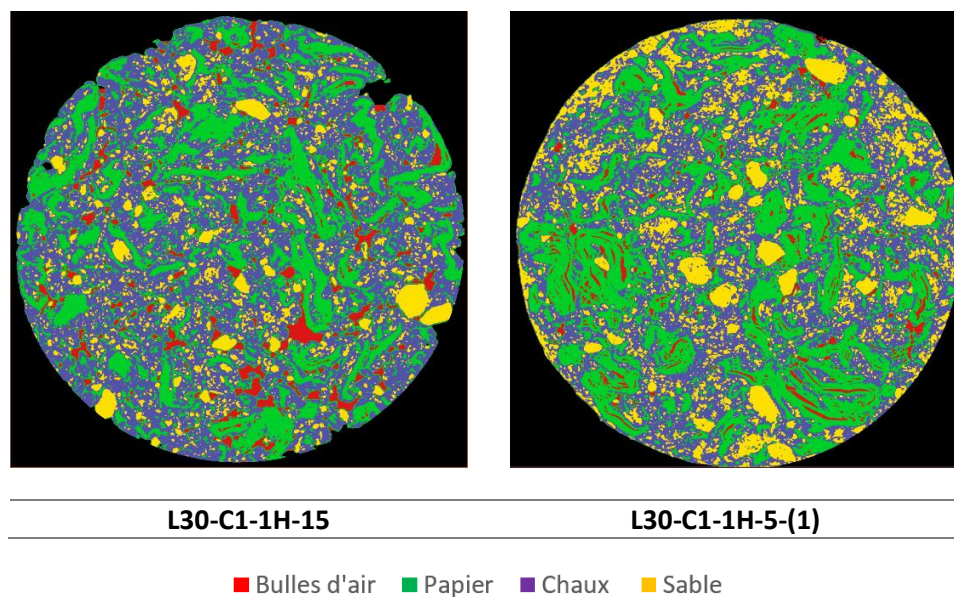


Figure 5.2-2 : Images de tomographie - comparaison entre temps de malaxage long (droite) et court (gauche) [46]

On voit que les fibres dans la composition avec un temps de malaxage court, paraissent plus longues et donc mieux conservées lors du mélange.

Enfin, la composition **R50** qui est constituée de 15% de fibres longues mais également de 15% d'un mix indéfini de papier puisqu'il provient de la matière recyclée, semble avoir le plus mauvais comportement en flexion. Cela peut s'expliquer par la très faible quantité de chaux neuve présente dans le mélange. Il serait intéressant de tester des variantes de cette composition en modifiant la proportion de chaux pour voir si on obtient de meilleures performances.

5.2.1.2 COMPRESSION UNI-AXIALE :

Tout d'abord, concernant le **module de Young** du matériau, il est obtenu de deux manières différentes : une fois comme étant la pente de la déformation élastique initiale, et une fois comme étant la pente maximale à la décharge. Ces deux façons de mesurer fournissent des résultats légèrement différents, tout en conservant les tendances globales (Figure 5.2-3).

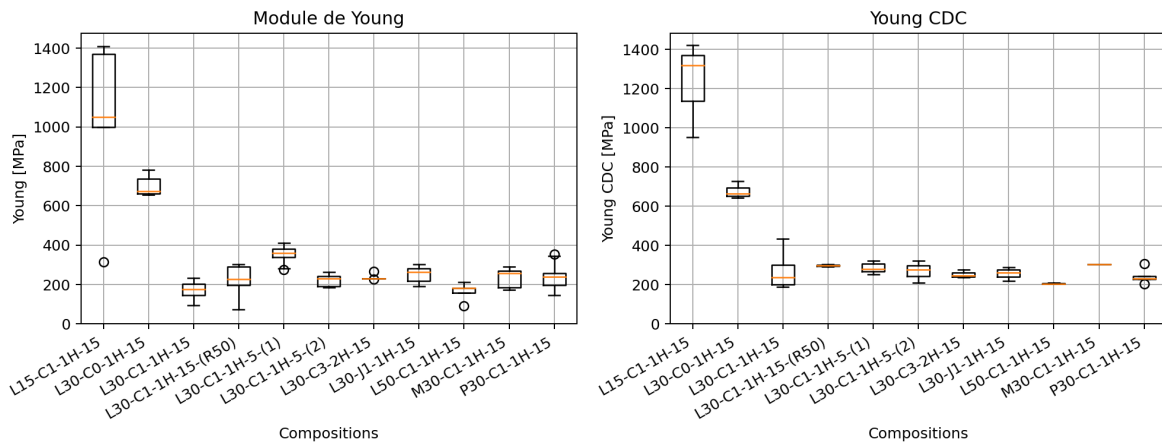


Figure 5.2-3 : Comparaison des modules de Young obtenu sur le premier chargement ou à la décharge

Ainsi, comme attendu, les compositions L15-C1-1H-15 et L30-C0-1H-15 sortent du lot avec un module de Young de respectivement 1050 MPa et 675 MPa. A nouveau, la grande quantité de liant dans ces compositions est probablement l'explication de ces performances supérieures. Les modules de Young moyen sur les cycles de charge-décharge semblent confirmer ces valeurs, avec respectivement 1350 MPa et 678 MPa.

Concernant les autres compositions, leurs modules de Young se trouvent tous dans un intervalle compris entre 150 et 400 MPa. Les plus faibles valeurs sont à retrouver pour les compositions L30-C1-1H-15 et L50-C1-1H-15, ce qui est logique puisqu'elles contiennent une plus grande proportion de papier.

Il est intéressant de noter également que les compositions L30-C1-1H-5 (1) et (2) ont des comportements fort différents. Ainsi, la durée de trempage du papier (respectivement 24h et 48h) impacterait le module de Young de façon significative. Cette observation peut être mise en parallèle avec les résultats de tomographie (section 3.9) : la différence entre les compositions (1) et (2) réside seulement dans le temps de trempage, or les fractions volumiques des échantillons varient. Il y a plus de sable et plus de chaux dans la composition (1) tandis qu'il y a plus d'air et plus de papier dans la composition (2).

Avec ces différentes observations on peut dire que le module de Young est influencé par la quantité de sable et chaux, mais ce n'est pas le paramètre le plus influent (Figure 5.2-4).

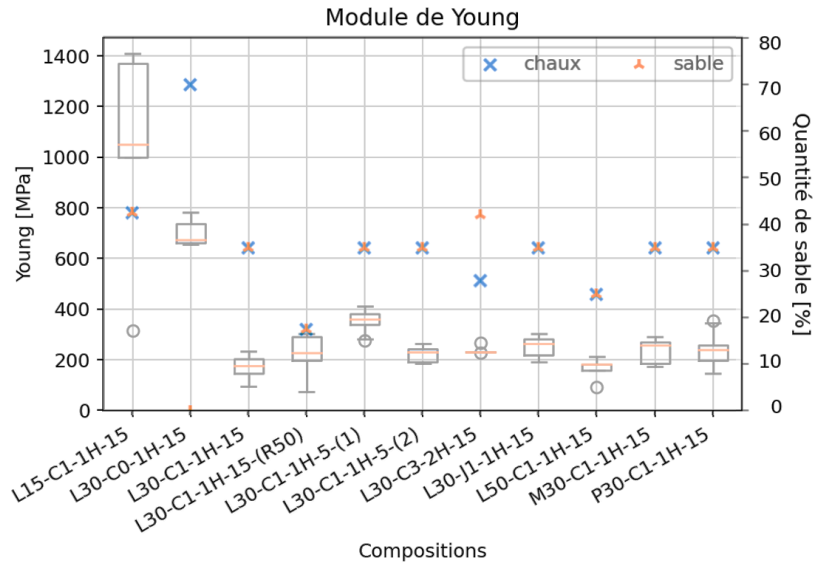


Figure 5.2-4 : Influence du sable et de la chaux sur le module de Young

Le module de Young mesuré sur les cycles de charge-décharge montre une tendance beaucoup plus constante pour ces compositions. Ainsi, le module moyen se trouve toujours entre 200 et 300 MPa. On observe également que le « classement » des compositions reste plus ou moins identique à celui établi pour le module de Young calculé sur la première compression mais que les différences d'une composition à l'autre sont plus réduites. Concernant les compositions L30-C1-1H-5 (1) et (2), elles semblent ici avoir un module de Young bien plus proche (respectivement 285 MPa et 270 MPa).

Le comportement du SPALCO est élasto-plastique, les paramètres du modèle numérique dépendent de la **limite d'élasticité**, la **contrainte maximale** atteinte et la **déformation à la rupture**. Il est important de comprendre la variation de ceux-ci :

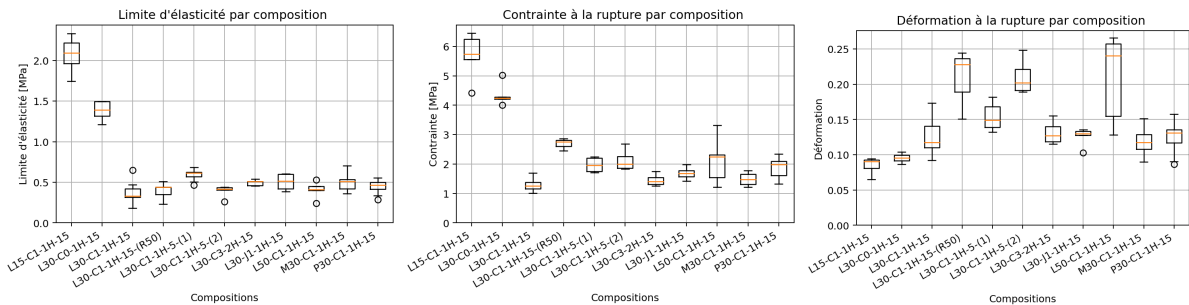


Figure 5.2-5 : Influence de la composition sur la limite d'élasticité, la contrainte et la déformation à rupture en compression

Ces graphes (Figure 5.2-5) sont disponibles en plus grand dans la section 3.2.3. L'objectif ici étant de les comparer entre eux.

La limite d'élasticité marque la transition entre le comportement élastique du matériau et son comportement plastique. La limite d'élasticité considérée ici est une limite à 0.2% de déformation (Figure 3.2-6). A nouveau, les deux mêmes compositions se distinguent par leurs performances : L15-C1-1H-15 et L30-C0-1H-15. Les autres compositions ont toutes des limites d'élasticité plus semblables, comprises entre 0.4 et 0.6 MPa. La composition contenant du sable jaune, L30-J1-1H-15 ainsi que celle ayant un temps de malaxage court, L30-C1-1H-5-(1) occupent le haut du classement.

Pour les deux autres caractéristiques, on observe ici un verdict un peu plus nuancé : les deux compositions L15 et C0 montrent à nouveau de bons résultats quant à la contrainte à la rupture mais occupent la fin du classement

portant sur la déformation à la rupture. Ainsi donc, ces deux compositions ont d'excellentes performances mécaniques globales mais manquent de ductilité. C'est là que se situe la force des autres compositions qui vont se déformer jusque trois fois plus avant de se rompre.

On remarque particulièrement les performances des compositions L30-C1-1H-15-(R50) et L50-C1-1H-15 qui allient une contrainte à la rupture fort élevée à une déformation à la rupture parmi les plus hautes du classement. Les compositions à fibre courte ou à confettis, M30-C1-1H-15 et P30-C1-1H-15 ainsi que la L30-C3-2H-15 et L30-J1-1H-15 sont les moins intéressantes : elles allient une contrainte à la rupture assez faible avec une déformation à la rupture parmi les plus faibles.

Enfin, les compositions ayant un temps de malaxage court 5-(1) & (2) ont des propriétés relativement bonnes. Il est intéressant de noter que leurs contraintes à la rupture respectives sont très proches mais que celle ayant eu un temps de trempage long (2) profite d'une ductilité plus élevée puisque sa déformation moyenne à la rupture en compression se situe autour de 20% contre 15% pour l'autre. Lorsqu'on compare les fractions volumiques, comme expliqué plus haut, on observe moins de sable et moins de chaux dans le mélange (2).

Une dernière variable qu'on peut obtenir avec l'essai de compression uni-axial est le **coefficient de Poisson**. Ce coefficient est obtenu comme le rapport des déformations transversales sur les déformations longitudinales lors de la phase élastique. Sur la Figure 3.2-20, les valeurs moyennes de Poisson varient entre 0.02 et 0.08, aucune des compositions ne se distingue particulièrement, toutes donnent des valeurs de coefficient de poisson assez étalée et parfois même négative. Ceci voudrait dire que le matériau semble globalement compressible et que la compression n'engendre pas de dilatation latérale conséquente. En plasticité, la déformation diamétrale est conséquente et a été observée lors des essais.

5.2.1.3 ESSAIS DE FLUAGE :

L'essai de fluage n'étant pas complet, il est difficile d'en tirer des conclusions valables pour l'ensemble des compositions ou de les comparer sur ce critère. On note néanmoins que la vitesse de déformation du fluage secondaire était à chaque fois inférieure à 10^{-8} [–/sec] ce qui fait environ 1% de déformation tous les 10 jours sous 0.5MPa de contrainte constante.

Des essais plus longs, avec un protocole plus rigoureux, portant sur l'ensemble des compositions et sur de multiples échantillons, à différents niveaux de contrainte seraient nécessaire pour obtenir une information plus fiable quant au comportement de fluage de SPALCO.

5.2.1.4 ESSAIS DE POINÇONNEMENT :

A l'instar de l'essai de fluage, celui de poinçonnement fourni peu de résultats. L'objectif principal de cet essai était de quantifier la recouvrance du matériau : on peut conclure que celle-ci est faible voire nulle. En effet, on observe tout au plus 0,2mm de recouvrance sur certains échantillons.

5.2.1.5 SECHAGE ET DENSITE :

Les échantillons sous forme de brique prennent environ 20 jours pour sécher et atteignent le poids sec final à 30 jours. Entre le 20^{ème} et 30^{ème} jour les échantillons ne perdent plus que quelques grammes. C'est la composition P30-C1-1H-15 qui nécessite le plus long temps séchage.

En analysant le temps de séchage on observe que la composition 5-(1) sèche plus vite que la composition 5-(2), ce qui confirme qu'il y a plus d'eau dans la composition avec un temps de trempage plus long.

D'autre part les graphes indiquent également une perte de poids variant entre 15% et 60% selon les compositions. Sans surprise, la composition au plus haut taux de papier, la L50 est celle qui perd le plus de poids durant le séchage. Cela s'explique par le fait que le papier ajouté dans le mélange est imbibé d'eau. Plus de papier signifie donc plus d'eau dans le mélange. A l'opposé, la composition sans papier, L0, n'a que l'eau

additionnelle (ajoutée au moment du malaxage) à évacuer. Elle est donc celle qui perd le moins de poids au cours du séchage.

L'analyse du graphe de densité découle logiquement de ce qui vient d'être dit concernant le séchage. Ainsi, la composition contenant le moins de papier est la plus dense, avec plus de 1200 kg/m³ tandis que la composition contenant 50% de papier pèse presque moitié moins : 650kg/m³. Toutes les autres compositions à l'exception de la L30-C0-1H-15, se trouvent dans un intervalle assez serré compris entre 800 et 900kg/m³. A titre de comparaison, le béton se situe autour de 2500 kg/m³ tandis que le bois de structure a une densité qui varie entre 350 et 800 kg/m³.

5.2.1.6 ISOLATION ACOUSTIQUE :

Les résultats des essais d'isolation acoustique sont à considérer avec prudence puisque les essais ont été fait de façon artisanale. Seul le premier essai, celui qui concerne les bruits aériens, sera pris en compte puisque celui qui porte sur les bruits de choc ne donne pas de résultats fiables à cause des imprécisions de mesure de l'application et d'un protocole discuté précédemment dans la section 3.7.3.

Dans les essais d'isolation acoustique, il y a deux caractéristiques qu'on peut ressortir. Premièrement la capacité du matériau à réduire l'intensité sonore et ensuite le type de fréquences qui passent à travers le SPALCO.

Dans le tableau suivant, les compositions sont reprises dans l'ordre décroissant de réduction d'intensité. En parallèle on compare la quantité de papier et la densité de chaque type de SPALCO. Une observation globale, montre qu'au niveau des fréquences, certaines compositions coupent les hautes fréquence lors de l'essai. Ceci est aussi mis en avant dans le Tableau 5.2-1.

Composition	Réduction sonore [dB]	Densité [Kg/m ³]	Quantité de papier [%]	Capacité à couper les hautes fréquences
L15-C1-1H-15	30	1200	15	++
L30-C1-1H-15-(R50)	27	850	30	++
L30-C0-1H-15	19	980	30	+
P30-C1-1H-15-(E)	17	400	30	+
Liège	17	200	/	+
L30-C1-1H-5-(1)	11.5	870	30	+
L30-C3-2H-15	11.5	820	30	-
L30-C1-1H-15	11	820	30	-
M30-C1-1H-15	10	900	30	+
Laine de roche	9	155	/	-
L50-C1-1H-15	6	650	50	-
L30-J1-1H-15	3.5	860	30	-
Cellulose	2	35	/	+

Tableau 5.2-1 : Résultats de l'essai acoustique sur les bruits aériens

Les matériaux avec peu de papier et une haute densité sont en tête de classement, cependant la composition P30-(E) a de bons résultats avec une densité deux à trois fois plus faible.

Il semblerait donc que la densité joue un rôle primordial : plus elle est élevée plus les performances acoustiques sont intéressantes. Par ailleurs, on observe également que la présence de sable jaune dans la composition à la place du sable concassé induit une isolation acoustique aux bruits aériens bien plus faible. La structure très poreuse du P30-C1-1H-15-(E) explique probablement ses bonnes performances tandis que la présence d'éléments recyclé dans le L30-C1-1H-15-(R50) semble lui conférer des propriétés acoustiques plus qu'intéressantes.

Il est toutefois important de préciser que ces tests ont été menés sur un seul échantillon de chaque composition. Il est nécessaire de poursuivre l'expérience sur un nombre plus large d'échantillons pour valider la tendance des résultats.

5.2.1.7 ISOLATION THERMIQUE :

La conductivité thermique des différents échantillons testés est indiquée en orange sur le graphe présenté à la Figure 5.2-6. Comme discuté dans la section Discussion sur la méthodologie :3.8.3, cette conductivité mesurée ne peut pas être comparée aux valeurs standards d'autres matériaux car le test utilisé ne correspond pas à la norme. Ainsi, on peut voir que la conductivité thermique de la composition P30-C1-1H-15-(E) est fortement inférieure à celle des autres compositions. A l'opposé, les compositions L15-C1-1H-15 et L30-C0-1H-15 obtiennent des valeurs de conductivité thermique fort élevées. Parmi les autres compositions, on remarque tout de même les compositions L30-C1-1H-15, L30-C1-1H-15-(R50), L50-C1-1H-15 et M30-C1-1H-15 qui ont toutes un λ compris entre 0,36 et 0,38.

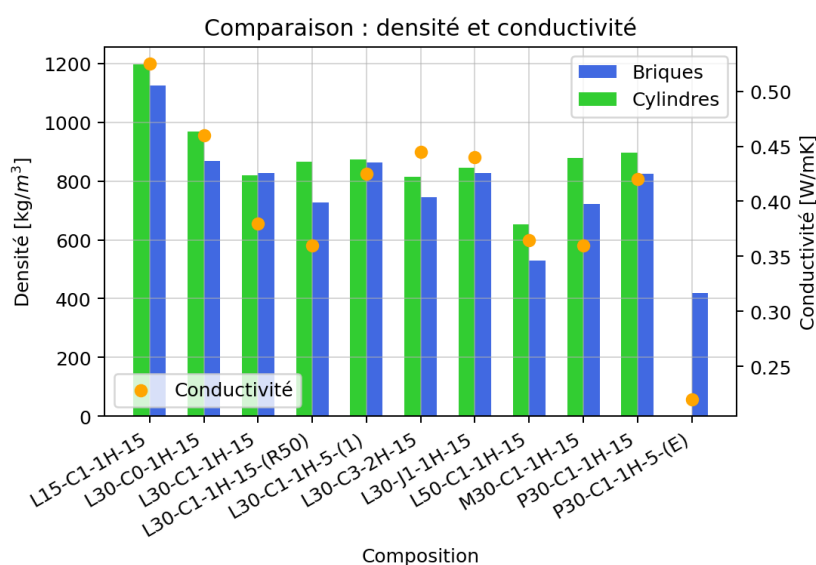


Figure 5.2-6 : Influence de la densité sur la conductivité thermique

Une comparaison entre la densité et la conductivité thermique du SPALCO, montre la corrélation entre ces deux paramètres. Moins le matériau est dense plus il a tendance à être isolant.

Une seconde observation (Figure 5.2-7) sur la quantité de sable et de chaux, montre une tendance : de manière générale, il semble que la matrice produite par la chaux ainsi que les grains de sables conduise bien la chaleur.

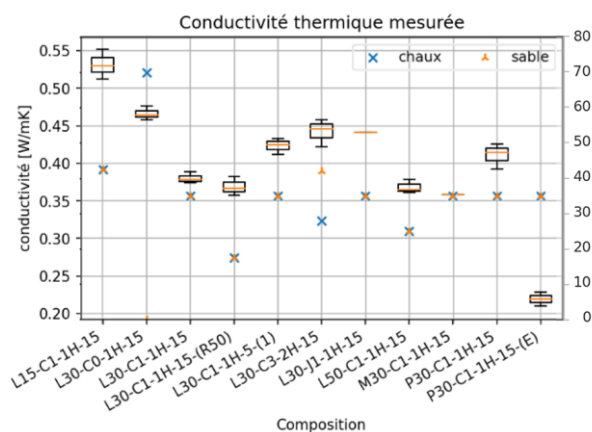


Figure 5.2-7 : Influence de la quantité de sable et de chaux sur la conductivité thermique

À l'inverse, le papier ou les granulats de matériau recyclé permettraient une transmission de la chaleur plus faible. On observe aussi que le mélange classique contenant des confettis (P30-C1-1H-15) a de moins bonnes propriétés d'isolation thermique que les autres longueurs de papier (L30-C1-1H-15 ou M30-C1-1H-15). Cela peut être dû au fait que la petite taille des bouts de papier permet de créer une matrice plus continue et donc un meilleur 'réseau' de transmission de la chaleur au sein du matériau.

Cette observation peut être confirmée avec les images de tomographie présentées à la Figure 5.2-8 :

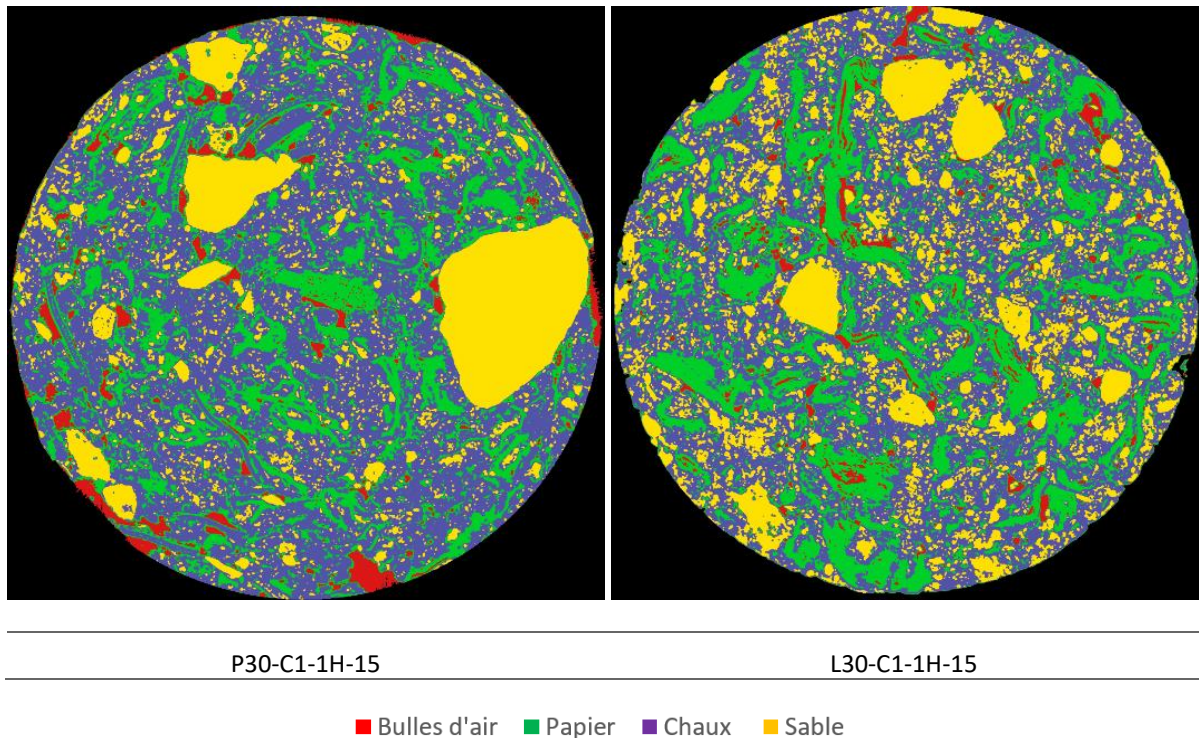


Figure 5.2-8 : Tomographie – influence de la longueur des fibres de papier sur la continuité de la matrice [46]

L'image de droite, comprenant les papiers longs, présente une matrice (composée de sable et de chaux) plus discontinue que celle présente sur l'image de gauche. Les grosses taches jaunes, sont des cailloux présents de temps en temps dans le mélange car le sable concassé provenant de la filière de recyclage n'a pas toujours une granularité uniforme.

D'autre part, la composition la plus isolante, P30-C1-1H-15-(E), dans laquelle une grande quantité d'eau indéfinie a été ajoutée au mélange, présente une image de tomographie suivante (Figure 5.2-9) :

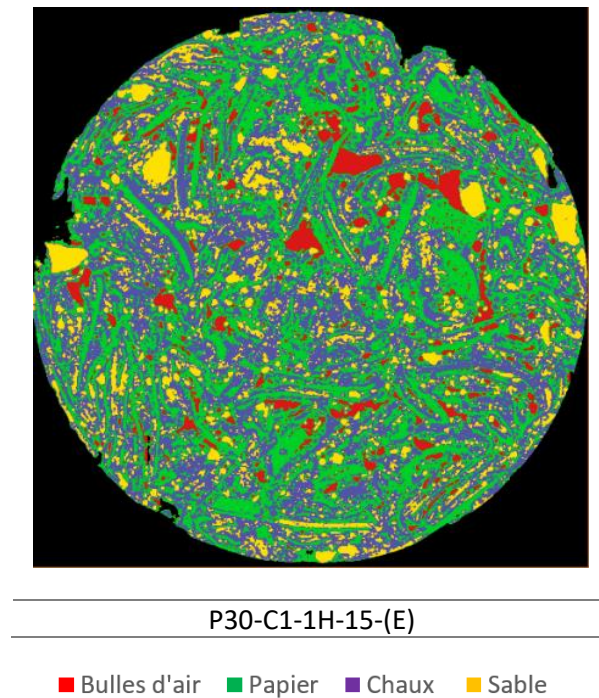


Figure 5.2-9 : Tomographie – composition P30-C1-1H-15-(E) [46]

En vert, on voit la présence bien répartie du papier, qui permettrait donc de couper les flux de chaleurs. En rouge, on remarque les bulles d'air bien dispersées qui participent au caractère isolant puisque l'air conduit moins la chaleur que le sable et la chaux. Enfin on observe que la matrice est moins continue d'où les bonnes propriétés thermiques de cette composition.

5.2.2 RECAPITULATIF DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES

Chaque paramètre influence de manière positive ou négative les différents essais. Dans cette section les points les plus importants de cet impact sont présentés :

Longueur du papier :

Les fibres longues (L) augmentent la capacité du SPALCO à se déformer en compression, elles apportent la ductilité et renforcent le matériau lorsque la matrice fissure en flexion. Les papiers longs permettent de rendre la matrice discontinue et donc de diminuer sa conductivité thermique. La densité des éléments contenant des longues fibres est généralement inférieure.

A l'opposé, les confettis (P) étant plus petits, ils permettent d'obtenir une matrice plus continue, ce qui confère une bonne résistance en compression mais de piètres performances d'isolation thermique.

Les papiers moyens (M) n'apportent aucune propriété intéressante.

Quantité de papier :

Plus la quantité de papier est importante, plus la masse volumique est faible. Ce qui est intéressant pour la mise en œuvre, le transport et l'utilisation des ressources. Cette densité joue aussi un rôle dans la capacité d'isolation thermique, plus la composition est légère, meilleures sont les capacités d'isolation thermique. La densité à l'effet inverse sur les performances d'isolation acoustique, ainsi un matériau plus lourd isolera mieux.

De plus, les fibres longues améliorent la ductilité du matériau, donc plus il y en a, mieux c'est. Mais plus il y a de papier, moins bonne est la résistance mécanique du SPALCO.

Type de sable

Le sable jaune montre des performances globalement inférieures à celles du sable concassé. Tant en termes d'isolation acoustique qu'en termes d'isolation thermique, le sable jaune a un impact négatif sur les performances. Tout juste, en compression, apporte-t-il une limite d'élasticité légèrement supérieure.

Quantité de sable :

Le sable apporte, dans le SPALCO, la résistance mécanique, plus il y a de sable plus le module de Young est élevé. La matrice formée de sable et de chaux semble apporter un comportement plutôt fragile au matériau.

D'un point de vue de l'isolation thermique, le sable donne de mauvaises performances car il est le composant ayant la meilleure conductivité. Il augmente aussi la densité, ce qui est négatif pour la facilité de mise en œuvre mais positif pour sa capacité d'isolation acoustique.

Quantité de chaux :

La chaux est le liant du composite SPALCO, elle augmente sa résistance. Plus il y a de chaux, plus la contrainte à la rupture en flexion augmente ainsi que le module de Young. Mais moins il y a de chaux, plus la ductilité est élevée et meilleures sont les performances en isolation thermique.

La chaux est un élément essentiel pour assurer la cohésion du composite et faire en sorte que les différents composants travaillent ensemble. Il faut donc trouver le bon équilibre entre une quantité de chaux suffisante pour assurer la tenue mécanique du matériau et une quantité pas trop grande pour limiter l'impact environnemental, la densité et maximiser les performances thermiques.

Temps de malaxage :

L'analyse globale des résultats montre que le temps court de malaxage apporte des meilleures propriétés au matériau. Cette constatation est le résultat inverse de celui présenté précédemment dans la section 2.1 : *Elaboration du matériau*. Cela est dû au fait que les essais préliminaires ont été fait avec des papiers de taille moyenne (M). Lors du mélange les papiers longs semblent réagir différemment au malaxage. Ainsi, un malaxage long réduit leurs performances en tenue mécanique, affectant particulièrement la résistance en flexion, la limite d'élasticité et la ductilité.

Quantité d'eau dans le mélange :

Une quantité importante d'eau dans le mélange augmente la porosité du matériau, cela le rend plus friable et diminue drastiquement sa résistance mécanique, voir la rend nulle. Cependant, cette structure poreuse, permet au matériau de mieux absorber le son et d'avoir d'excellents résultats en termes de performances thermiques.

Composition recyclée :

Ce paramètre est primordial dans la logique de circularité de ce matériau. Les constatations permettent quelques premières suggestions :

Puisque la composition R50 contient 50% de matière recyclée, la quantité de chaux « neuve » est réduite de 50% par rapport à la composition de référence, L30-C1-1H-15. La chaux déjà présente dans la matière recyclée est considérée comme inerte puisqu'elle a déjà fait sa prise.

La matrice discontinue due à une quantité de chaux faible et aux agrégats de matériaux recyclés engendre une bonne isolation thermique et acoustique mais réduit la résistance en flexion. A l'inverse, le module de Young et la limite d'élasticité en compression restent dans la bonne moyenne et la ductilité est parmi les meilleures.

5.2.3 CARTES : SITUATION DU SPALCO

Cette section présente des cartes qui permettent de situer les différentes compositions de SPALCO à l'issue de cette campagne d'essais.

La première carte (Figure 5.2-10) met en relation les caractéristiques des matériaux avec l'énergie grise nécessaire à leur production. Pour SPALCO, l'énergie grise a été évaluée à environ 1MJ/Kg par Pierre Bollen sur base des travaux de ER Grist et KA Paine [50]. Cette valeur est actuellement une approximation, qui ne tient pas compte de la variation des paramètres dans les différentes compositions.

Les valeurs de résistance en compressions obtenue pour le SPALCO, sont dans la section visée, cette section avait été sélectionnée afin que le SPALCO soit aussi bon ou meilleur que les matériau comparables (Tableau 1.2-1 : Propriétés des Eco-matériaux). Comme décrit précédemment, deux compositions (L15 et C0) ont de meilleurs résultats que ceux attendu. Cependant sur cette carte, la valeur d'énergie grise pour le SPALCO est identique pour chaque composition, ce qui ne désavantage pas ces deux compositions avec plus de chaux, qui est l'élément le plus énergivore.

Résistance en compression en fonction de l'énergie grise de production

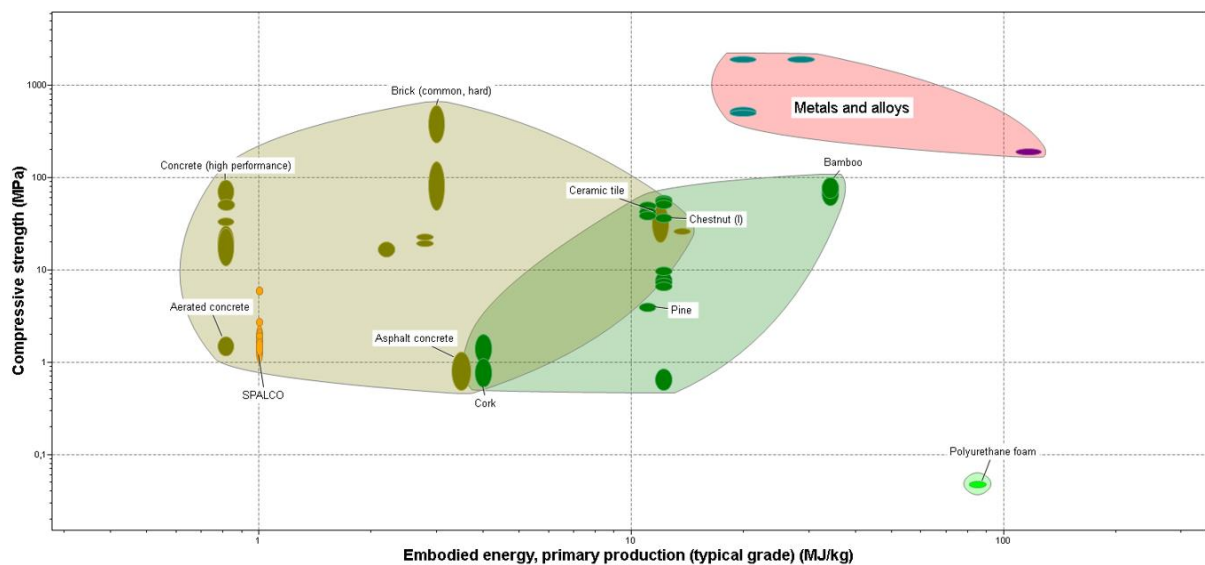


Figure 5.2-10 : La résistance en compression du SPALCO versus les matériaux de construction

La seconde carte (Figure 5.2-11) insiste sur les caractéristiques mécaniques du matériau en comparant sa résistance en flexion et celle en compression. Plus les compositions sont dans le coin en haut à droite, meilleures sont leurs caractéristiques mécaniques. Hormis les compositions L15 et C0, c'est la composition L30-C1-1H-5 qui combine au mieux les paramètres de traction et compression. Mais dans l'optique d'utiliser le SPALCO comme chappe, c'est la composition R50, qui s'en sort le mieux, avec les meilleures caractéristiques de compression.

Ensuite, c'est intéressant d'observer que le béton cellulaire est tout à fait comparable au SPALCO. Tandis que les compositions L15 et C0 se rapprochent du plâtre et d'un béton classique, mais tout de même avec des propriétés deux fois plus petites en compression.

Résistance en compression en fonction de la résistance en traction

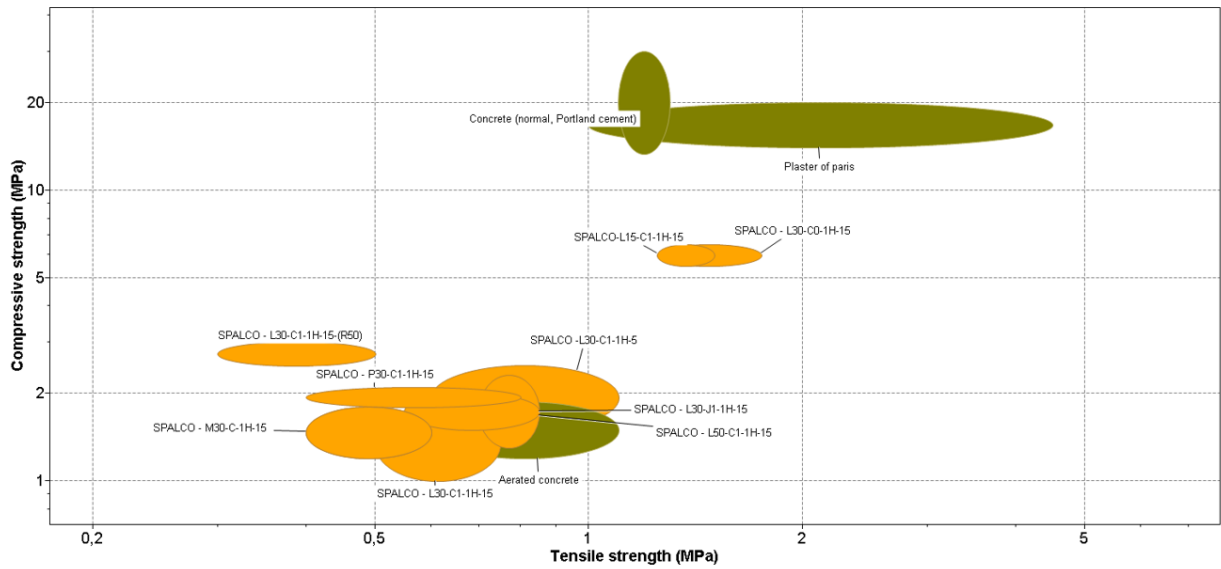


Figure 5.2-11 : La résistance en compression versus la résistance en traction du SPALCO

Ce graphe (Figure 5.2-12) compare donc la capacité à réduire le son et la capacité à isoler thermiquement. On observe que la composition qui s’en sort le mieux dans les deux domaines est la R50.

Capacité thermique en fonction de la réduction acoustique

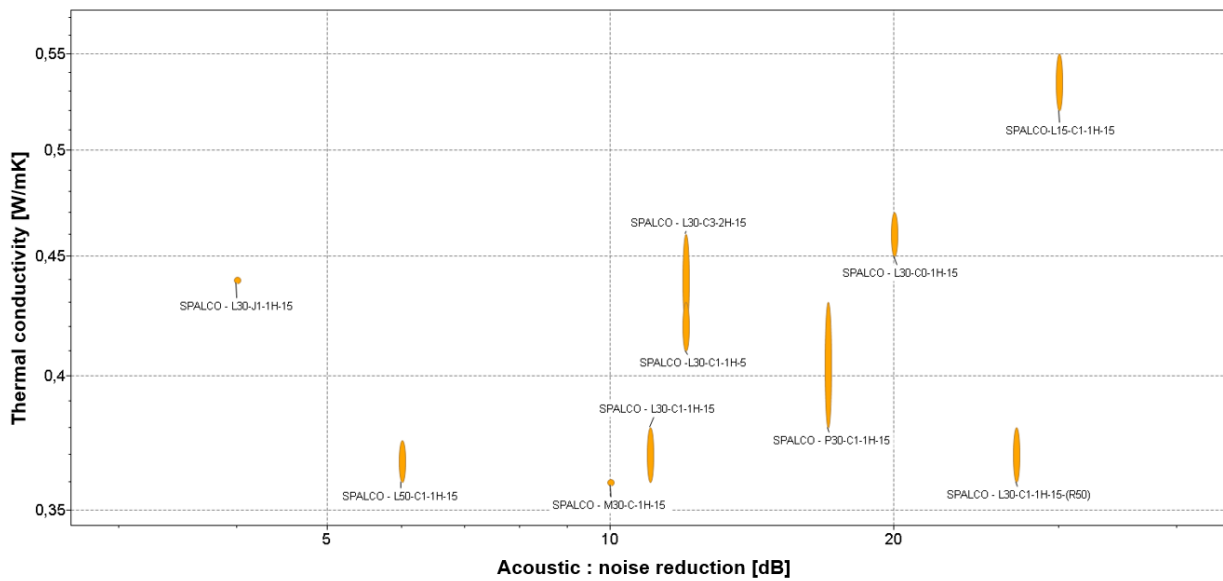


Figure 5.2-12 : La conductivité thermique versus la réduction acoustique du SPALCO

La conductivité thermique est liée à la densité, cette tendance a été mise en avant dans la discussion ci-dessus. Sur la carte ci-dessous (Figure 5.2-13), on observe une certaine linéarité dans cette tendance :

La conductivité thermique en fonction de la densité

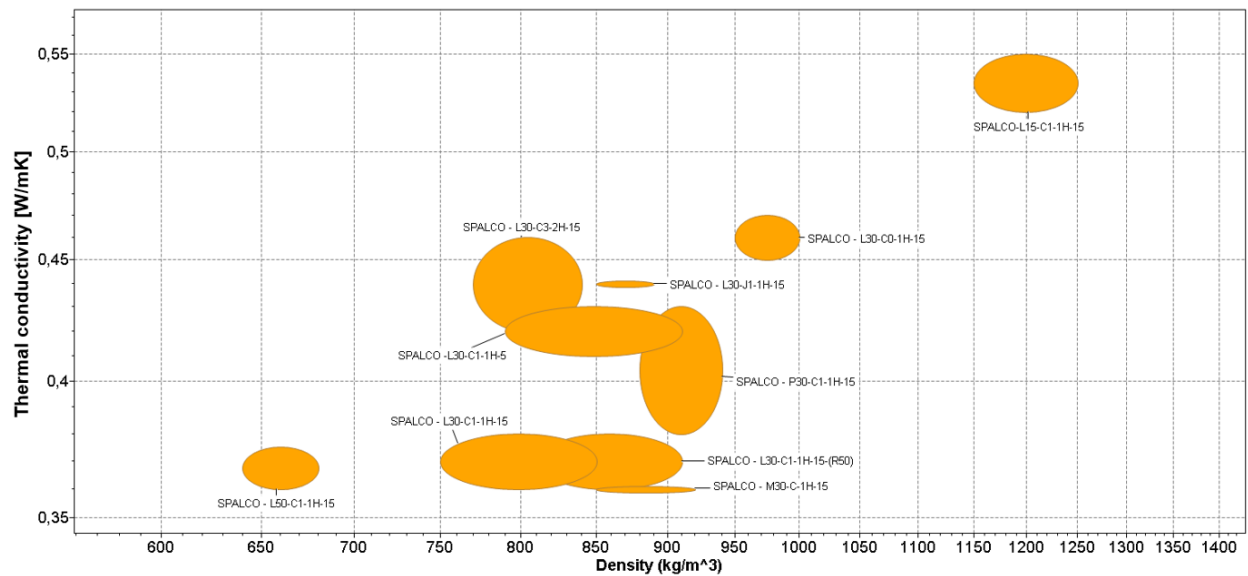


Figure 5.2-13 : La conductivité thermique du SPALCO en fonction de sa densité

Cette vision graphique des résultats soutient l'analyse de l'impact des paramètres effectuée dans la section précédente (5.2). Comme souhaité, le SPALCO a des meilleures propriétés environnementales que la plupart des matériaux de constructions, tout en gardant des propriétés mécaniques intéressantes.

5.3 COMPOSITION IDEALE

Maintenant que l'influence des paramètres est comprise, déterminons la composition qui sort du lot. Une première approche va mettre en avant, via un système de points, la composition qui répond le mieux aux critères imposés afin d'utiliser le matériau comme chape. Ensuite une suggestion de la composition idéale est présentée.

5.3.1 CALCUL DE LA MEILLEURE COMPOSITION

Cette analyse consiste à déterminer, parmi les 13 compositions testées, celle qui allie de façon optimale les différentes caractéristiques. Pour ce faire, pour chacun des critères, une note sur 10 sera donnée à chaque composition : 0 pour le plus mauvais, 10 pour le meilleur, et une note proportionnelle à chacun des autres. Ensuite, une moyenne pondérée permettra d'obtenir un classement des différentes compositions. Il s'agit, bien sûr, d'un classement subjectif puisque la pondération est arbitraire. Cependant, en ajustant les poids en accord avec les objectifs du matériau, on peut obtenir un classement cohérent. Les résultats et les poids choisis sont donnés à la Figure 5.3-1 et dans le Tableau 5.3-1.

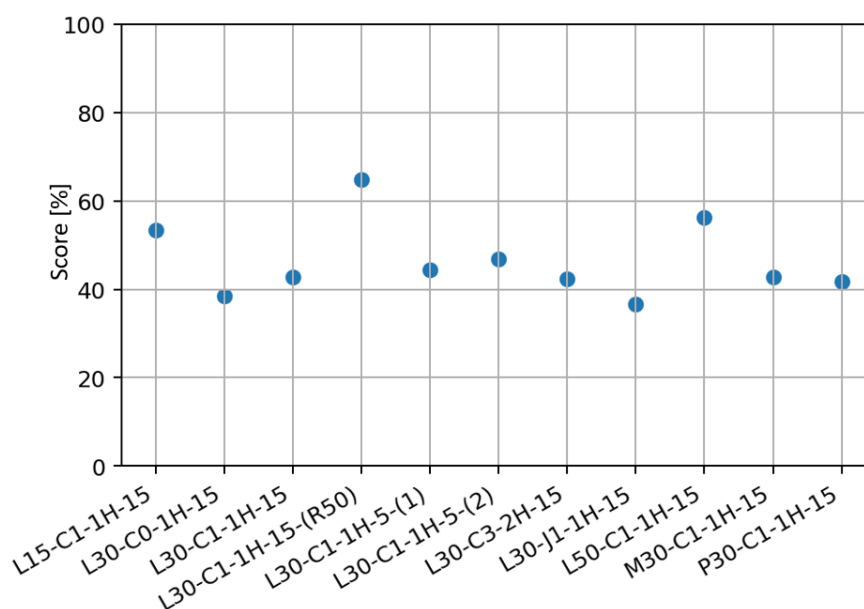


Figure 5.3-1 : Score global pondéré des différentes composition

DENSITÉ	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES		ISOLATION THERMQUE	ISOLATION ACOUSTIQUE	IMPACT ENVIRONNEMENTAL
10%	30%		20%	20%	20%
E	E-CDC	$\sigma_{\text{él}}$	$\sigma_{\text{max,flexion}}$	$\sigma_{\text{max,compression}}$	$\epsilon_{\text{max,compression}}$
3%	3 %	5%	5%	7%	7%

Tableau 5.3-1 : Pondération des différentes caractéristiques

Le poids donné à chaque caractéristique est justifié de la façon suivante :

- Densité [10%] : ce paramètre détermine la facilité de mise en œuvre et la masse total des éléments de SPALCO. Il influence aussi directement l'utilisation des ressources et donc l'impact environnemental.
- Caractéristiques mécaniques [30%] : ce paramètre est celui qui a le plus de poids car, les applications possibles de SPALCO dans le secteur de la construction nécessitent une résistance mécanique suffisante. Bien qu'il ne soit pas destiné à être un matériau porteur, il doit tout de même répondre à certaines exigences et être autoportant. Par exemple, pour une chape, la résistance en compression est primordiale.
- Isolation thermique [20%] : L'isolation thermique est un enjeu majeur des bâtiments futurs, dès lors, il est important que SPALCO puisse proposer cette caractéristique s'il vient à être employé comme mur de façade non-porteur ou comme chape dans un plancher contre terre.
- Isolation acoustique [20%] : le poids de ce paramètre est défini afin que SPALCO puisse prétendre à être un isolant acoustique performant. Des panneaux de SPALCO pourraient être utilisés dans des cloisons ou des complexes de sol pour limiter la diffusion sonore entre deux pièces.
- Impact environnemental [20%] : Ce paramètre tient seulement compte de l'impact de la chaux, seul élément du mélange qui ne provient pas de la filière de recyclage. Moins il y a de chaux, plus faible sera l'empreinte carbone du SPALCO. L'énergie nécessaire au mélange et au transport aura aussi un impact sur l'environnement mais elle sera identique quelle que soit la composition choisie.

On observe alors un trio qui sort en tête de cette analyse : la composition recyclée **L30-C1-1H-15-(R50)**, dont les performances sont presque toujours au-dessus de la moyenne et dont la composante recyclée renforce le côté durable et circulaire du matériau, la composition **L15-C1-1H-15** qui profite d'excellentes performances mécaniques et acoustiques et enfin la composition **L50-C1-1H-15** qui marque des points par son faible impact environnemental (peu de chaux dans le mélange), ses bonnes performances en flexion ou en isolation thermique. Les autres compositions ne se distinguent pas particulièrement.

5.3.2 SUGGESTION DE LA COMPOSITION IDEALE

Après avoir analysé sous tous leurs aspects les paramètres du SPALCO, il est possible, pour chacun d'eux, de définir la variante optimale, et donc de dessiner le portrait-robot de la composition idéale d'après nos observations. Ce portrait-robot a été réalisé à l'aide du tableau présenté dans l'annexe II et qui reprend chaque paramètre et ses influences sur les propriétés du matériau de façon exhaustive.

Concernant le papier, les longues bandes et un haut pourcentage de papier dans le mélange ont un impact positif sur les performances, permettant de garantir une tenue mécanique moyenne, une grande ductilité, une densité assez faible et des performances en isolation thermique vraiment intéressantes. Concernant, le sable, il est ici confirmé que le sable concassé est plus intéressant que le sable jaune. De plus, il semblerait qu'une proportion de chaux légèrement plus élevée que celle de sable pourrait apporter des propriétés optimales. Des nouveaux essais sont nécessaires pour valider cette hypothèse. Le temps de malaxage court montre des performances supérieures au temps de malaxage long avec les fibres longues. Enfin, la présence de matériau recyclé dans le mélange a prouvé son efficacité lors de cette campagne d'essai.

Ainsi donc, la composition idéale se composerait d'un mélange de 50% de bandes de papier longues, de sable concassé avec un rapport sable/chaux de 2/3 auquel on adjoint 50% de matière recyclée. Le tout sera malaxé durant un temps court de 5min pour obtenir une composition idéale nommée **L50-C2-3H-5-(R50)**.

5.4 AMÉLIORATIONS

Dans cette section seront abordées les améliorations possibles que nous avons identifiées au cours de ce mémoire. Elles concernent chacune des phases du processus : de la production des échantillons à l'analyse des résultats.

Composition du matériau

Pour limiter encore l'impact environnemental, il serait intéressant de voir si la chaux employée ici (composée en fait de chaux et de ciment) pourrait être remplacée par une chaux pure, produite localement et ayant un impact environnemental minimal.

Par ailleurs, la variabilité de la granulométrie du sable de concassage n'est pas étudiée dans ce mémoire. Il faudrait probablement étudier l'impact d'une granulométrie plus restreinte pour mieux fixer les paramètres du matériau final.

Méthode de production

Tout le processus est actuellement artisanal. Par exemple, sur la Figure 3.6-2 : Densité - comparatif entre les briques (type A) et les cylindres (type C), on observe que les briques ont une densité toujours plus faible que celle des cylindres. Comme les propriétés du matériau sont influencées par le moulage il serait utile de créer un processus plus uniforme, avec un pressage mesuré et quantifié.

Le second point qui pourrait être développé est le contrôle de la quantité d'eau totale dans le mélange. Actuellement, le papier repose 24h afin de s'imbiber d'eau, ensuite, il est plus ou moins égoutté avant d'être incorporé au mélange. Une quantité d'eau additionnelle, définie et constante, est ajoutée au mélange. On comprend donc que plus il y a de papier, plus il y aura d'eau dans le mélange, dû à l'absorption. Cette quantité pourrait être mieux analysée afin de maîtriser la porosité du matériau.

Essais

En ce qui concerne les essais, la discussion sur la méthode et les améliorations possibles sont reprises après la présentation des résultats de chaque essai.

Pour mieux analyser le modèle de fissuration et l'énergie lié à cette fissure, il serait intéressant de faire des essais de ténacité. Afin de mieux comprendre la capacité du SPALCO à résister à la fissuration. L'essai de Charpy est un des essais qui donne une valeur de l'énergie absorbée.

En ce qui concerne les essais de tomographie, il pourrait être intéressant d'analyser des coupes perpendiculaires au sens du moulage. En effet, les sections de cylindre analysées sont toujours dans le plan dans lequel la compression a été effectuée lors du moulage. De cette manière une meilleure analyse de l'arrangement des bouts de papier pourrait être faite.

Analyse et discussion

Une analyse faisant appel à une méthode statistique plus rigoureuse permettrait de confirmer les hypothèses émises dans le cadre de notre discussion. De plus, pour certaines caractéristiques, il serait intéressant de produire un set d'échantillons plus large pour confirmer les observations que nous avons effectuées jusqu'à présent.



SPALCO est un nouveau matériau de construction qui a pour ambition de venir proposer une alternative aux matériaux traditionnels et qui s'inscrit dans la logique actuelle qui tend à diminuer l'impact environnemental des bâtiments. SPALCO est l'acronyme de « Sand, Paper, Lime Composite » qui résume bien la composition du matériau. Ses propriétés sont celles d'un matériau non-porteur destiné à l'isolation acoustique et thermique. Le potentiel de la circularité pour limiter l'utilisation des ressources et l'impact sur l'environnement étant important, SPALCO est composé en majorité de déchets et a pour but de pouvoir être réutilisé ou recyclé après usage.

Ce mémoire avait pour but d'explorer les différentes compositions et d'arriver à déchiffrer l'impact des différents paramètres qui entrent en compte dans la composition sur les performances du matériau. Ainsi, 13 compositions ont été réalisées et les échantillons de chacune d'elles ont été testés pour définir leurs caractéristiques mécaniques et leurs propriétés d'isolation acoustique et thermique. Certains échantillons ont également été analysés en tomographie, dans le cadre d'un mémoire conjoint, afin de comprendre les mécanismes internes au matériau qui régissent ses propriétés.

De cette campagne d'essais ressort une analyse complète de l'influence de chacun des paramètres des compositions sur les performances du matériau. Ceci permet d'identifier le portrait-robot de la composition idéale et d'orienter les recherches futures sur le matériau. Selon notre analyse, la composition idéale de SPALCO allierait des fibres de papier longues, comptant pour 25% du poids sec du matériau, du sable concassé à hauteur de 10% et de la chaux à concurrence de 15%. Les 50% restants seraient du SPALCO recyclé et concassé, sous la forme de granulats. Cette composition aurait des performances mécaniques dans la moyenne haute de ce que nous avons pu mesurer, et suffisantes pour les applications visées, tout en ayant un impact environnemental très faible et des performances en isolation thermique et acoustique comparables voire supérieures à des matériaux traditionnels concurrents.

Cette analyse nécessite une campagne d'essai centrée sur cette composition idéale et quelques variations de celle-ci pour être confirmée et affinée.

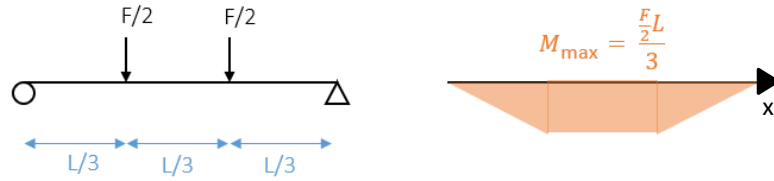
- [1] U. N. Environment, « 2021 Global Status Report for Buildings and Construction », *UNEP - UN Environment Programme*, 19 octobre 2021. <http://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction> (consulté le 14 avril 2022).
- [2] « Renovation and decarbonisation of buildings », *European Commission - European Commission*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_6683 (consulté le 4 avril 2022).
- [3] « new_circular_economy_action_plan.pdf ». Consulté le: 31 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/jrc/communities/sites/default/files/new_circular_economy_action_plan.pdf
- [4] « Eco-matériaux et matériaux bio-sourcés | Build Green », 30 janvier 2017. <https://www.build-green.fr/les-eco-materiaux-et-materiaux-biosources/> (consulté le 20 février 2022).
- [5] « Les écomatériaux - Réseau Eco Habitat », 29 septembre 2015. <https://www.reseau-ecohabitat.fr/ecomateriaux/> (consulté le 20 février 2022).
- [6] « Chaux Compagnons | Briques de Chanvre ». https://chauxcompagnons.com/portfolio_page/taf-7/ (consulté le 2 avril 2022).
- [7] « iso hemp-bloc-chanvre-7-fiche-produit.pdf ». Consulté le: 9 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://maisoncodistribution.com/wp-content/uploads/2020/05/iso-hemp-bloc-chanvre-7-fiche-produit.pdf>
- [8] « n_114.pdf ». Consulté le: 9 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.materiaux-naturels.fr/doc/product/n_114.pdf
- [9] « Panneaux pour isolation acoustique Acoustix Pan-terre ». <https://www.acoustix.be/fr/isolation-acoustique/acoustix-panterre> (consulté le 19 février 2022).
- [10] « Acoustix | Cluster Eco-construction ». <https://clusters.wallonie.be/ecoconstruction/fr/membre/acoustix> (consulté le 19 février 2022).
- [11] « Fabrication des panneaux Acoustix Pan-terre ». <https://www.acoustix.be/fr/isolation-acoustique/actualites/fabrication-panneaux-acoustix-pan-terre> (consulté le 2 avril 2022).
- [12] « Dalles de sol en liège - Kurkfabriek Van Avermaet ». <https://www.kurk.be/fr/produits-en-li%C3%A8ge/dalles-de-sol-en-liege/> (consulté le 4 juin 2022).
- [13] « Caractéristiques et propriétés du liège ». <https://www.liege24.fr/proprietes-du-liege/> (consulté le 3 avril 2022).
- [14] « Propriétés du liège », *ICSuro*. <https://www.icsuro.com/fr/proprietats-del-suro-2/> (consulté le 3 avril 2022).
- [15] « Caractéristiques techniques de notre liège », *La maison du liège*. <https://lamaisonduliege.com/caracteristiques-techniques-de-notre-liege/> (consulté le 3 avril 2022).
- [16] « Liège (matériau) », *Wikipédia*. 20 avril 2022. Consulté le: 21 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Li%C3%A8ge_\(mat%C3%A9riau\)&oldid=193017052](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Li%C3%A8ge_(mat%C3%A9riau)&oldid=193017052)
- [17] L. Nouvelle, « Vicat mélange bois et ciment dans un béton aux performances thermiques améliorées », janv. 2021, Consulté le: 2 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/editorial/idee-verte-vice-melange-bois-et-ciment-dans-un-beton-aux-performances-thermiques-ameliorees.N1046659>
- [18] « Beton_de_bois_cle01d256.pdf ». Consulté le: 2 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/Beton_de_bois_cle01d256.pdf
- [19] « BTONLin : CMEG et l'ESITC Caen développent le premier béton à base de lin ». <https://www.echosciences-normandie.fr/articles/btonlin-cmeg-et-l-esitc-caen-developpent-le-premier-beton-a-base-de-lin> (consulté le 2 avril 2022).
- [20] T. R. Contributor Rise, « What is Papercrete? », *Rise*, 24 décembre 2019. https://www.buildwithrise.com/stories/what_is_papercrete (consulté le 3 avril 2022).
- [21] H. Zaki, I. Gorgis, et S. Salih, « Mechanical properties of papercrete », *MATEC Web Conf.*, vol. 162, p. 02016, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201816202016.

- [22] R. B. Alshahwany, R. N. Wadie, Z. A. Mohammed, et S. A. Ahmed, « Properties of Papercrete Concrete Containing Crushed Concrete Waste As Coarse Aggregate », *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 745, n° 1, p. 012125, mars 2020, doi: 10.1088/1757-899X/745/1/012125.
- [23] « Chape sèche: égalisation et isolation avec granules | Laterlite », *Laterlite*, <https://www.laterlite.fr/applications/chapes-ravoirages-rattrapages-niveau-planchers/chape-seche-egalisation-isolation/> (consulté le 20 avril 2022).
- [24] « Des systèmes reconnus dans la construction sèche présentant des qualités coupe-feu et d'isolation phonique », à *EI*, p. 6.
- [25] « Chape sèche en plâtre armé - Knauf Brio – Chape sèche en plâtre – Knauf ». <https://www.knauf.fr/solutions/produit/chape-seche-en-platre-arme-knauf-brio> (consulté le 19 février 2022).
- [26] V. Eldijk, « Rigidur® Floor E 20 », 11 avril 2019. <https://pro.gyproc.be/fr/les-produits/rigidur-floor-e-20> (consulté le 19 février 2022).
- [27] « Tradecowall - Société Coopérative pour le TRAitement des DEchets de CONstruction en WALLonie », *Tradecowall*. <https://www.tradecowall.be/> (consulté le 1 juin 2022).
- [28] « ft_tradi_chaux_xha_092015_fr.pdf ». Consulté le: 1 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.holcim.be/sites/belgium/files/atoms/files/ft_tradi_chaux_xha_092015_fr.pdf
- [29] M. Horvath, « Développement d'un matériau composite de construction durable, à haut potentiel de réemploi ou recyclage, sur base de déchets de fibres recyclées, sable et chaux. (à paraître) ». Université Catholique de Louvain.
- [30] P. Latteur, « Syllabus : LGCIV1022 - Mécanique des structures ». UCLouvain.
- [31] CSTC, « Isolement au bruit aerien : grandeurs acoustiques de base », Aout 2020, [En ligne]. Disponible sur: https://www.cstc.be/media/03anmvuk/grandeurs_iselement_bruit_aerien.pdf
- [32] CSTC, « Isolement au bruit de choc : grandeurs acoustiques de base », Aout 2020, [En ligne]. Disponible sur: https://www.cstc.be/media/nnhbejx5/grandeurs_iselement_bruit_choc.pdf
- [33] « Acoustique du bâtiment », *CSTC*. <https://www.cstc.be/normalisation-certification/antenne-normes/en-quoi-consiste-l-antenne-normes-acoustique-les-objectifs/acoustique-du-batiment/> (consulté le 1 juin 2022).
- [34] ImagineDragons, *Imagine Dragons - Radioactive*, (10 décembre 2012). Consulté le: 14 mars 2022. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=ktvTqknDobU>
- [35] 100% informatique,  *Test d'audition à domicile - 1 Hz à 20 000 Hz - Spectre complet de l'audio humain* , (3 décembre 2020). Consulté le: 14 mars 2022. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=WpWYXsD81k>
- [36] *Son d'aspirateur - 1h*. Consulté le: 14 mars 2022. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=TURm4G5ZRBu>
- [37] Le Rieur, *Bruit d'applaudissement*, (28 janvier 2015). Consulté le: 14 mars 2022. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=iFyiMbA3rTw>
- [38] G. Roy, « Equations et données pour l'essais thermique ». UCLouvain.
- [39] « FIGURE 1.10-Diagramme en boîte à moustaches des MRE d'un modèle... », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-en-boite-a-moustaches-des-MRE-dun-modele-destination_fig9_303447451 (consulté le 26 mai 2022).
- [40] « Limite d'élasticité, Rapport des limites d'élasticité, Limite d'élasticité conventionnelle », *Limite d'élasticité, Rapport des limites d'élasticité, Limite d'élasticité conventionnelle*. <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-traction/limite-delasticite/> (consulté le 17 mai 2022).
- [41] H. Altenbach et J. Eisenräger, « Introduction to Creep Mechanics », 2019, p. 1-9. doi: 10.1007/978-3-662-53605-6_155-1.
- [42] L. Naze, « 1 FLUAGE : DEFORMATION A HAUTE TEMPERATURE », p. 5.
- [43] « Les essais de fluage [Au cœur des matériaux cristallins] ». <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM6uc4-1.html> (consulté le 15 mai 2022).

- [44] « Contact de Hertz », *Wikipédia*. 24 octobre 2021. Consulté le: 18 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Contact_de_Hertz&oldid=187404012
- [45] É. Larousse, « Définitions : tomographie - Dictionnaire de français Larousse ». <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/tomographie/78359> (consulté le 26 mai 2022).
- [46] A. de Briey, « Tomographic analysis of a new eco-circular composite material for construction application (à paraître) ». Université Catholique de Louvain.
- [47] « Calculator for Engineers - Stress Transformation : Stresses on an inclined plane ». <https://civilengineer.webinfolist.com/mech/stress-trans.php> (consulté le 3 juin 2022).
- [48] « Figure 1.2 : Trois modes élémentaires de sollicitation d'une fissure... », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Trois-modes-elementaires-de-sollicitation-dune-fissure-tridimensionnelle-Mode-I-mode_fig3_319469030 (consulté le 30 mai 2022).
- [49] « Propagation des fissures de fatigue ». https://www.simulationmatériaux.com/Fatigue/fatigue_des_structures-propagation_des_fissures_de_fatigue.php (consulté le 3 juin 2022).
- [50] E. R. Grist, K. A. Paine, A. Heath, J. Norman, et H. Pinder, « The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes », *Journal of Cleaner Production*, vol. 93, p. 26-37, avr. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.047.
- [51] M. N. Diffusion JLL, « CHANVRIBLOC - Brique isolante en chanvre », *Matériaux Naturels*. <https://www.materiaux-naturels.fr/produit/114-chanvribloc-brique-isolante-en-chanvre> (consulté le 9 février 2022).
- [52] « Qu'est-ce que la brique chaux-chanvre ? Comment l'utiliser ? » <https://www.isolation-sonore.com/blog/brique-chaux-chanvre-structures-longue-duree/> (consulté le 9 février 2022).
- [53] « Béton de chanvre en brique MULTICHANVRE de Vieille Matériaux | Alsabrico ». <https://www.alsabrico.fr/construire/gros-oeuvre/briques-ecologiques/beton-de-chanvre-en-brique-multichanvre-de-vieille-materiaux.html> (consulté le 10 février 2022).
- [54] « produits.pdf ». Consulté le: 19 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.febecel.be/pdf/produits.pdf>
- [55] « Écomatériaux », *Wikipédia*. 16 mars 2022. Consulté le: 2 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89comat%C3%A9riaux&oldid=191950011>
- [56] Gullyweb, « La Technologie du Béton de Bois avec CCB Greentech - TimberRoc », *CCB GREENTECH - Béton de bois - Solutions murs – Planchers – Façades béton - Carbone 0 - Lignoroc - TimberRoc*. <https://ccbgreentech.com/> (consulté le 2 avril 2022).
- [57] « Bétons de bois : un béton écologique aux multiples avantages | Maison Responsable », 3 décembre 2021. https://www.maison-responsable.fr/construire-renover/materiaux-durables/beton_de_bois/ (consulté le 2 avril 2022).
- [58] « Le béton de bois, un matériau écologique ! », *Honéo - Construction de bâtiments bioclimatiques*. <http://localhost:3000/blog/le-beton-de-bois-un-materiau-ecologique> (consulté le 2 avril 2022).
- [59] C. Longin, « TECHNOLOGIE TimberRoc », p. 40.
- [60] « Lin, bois et chanvre : des fibres bâtisseuses », *Maison & Travaux*, 28 mars 2016. <https://www.maison-travaux.fr/maison-travaux/materiaux/lin-bois-et-chanvre-des-fibres-batisseuses-72936.html> (consulté le 2 avril 2022).
- [61] « Papercrete », *Wikipedia*. 5 octobre 2021. Consulté le: 2 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Papercrete&oldid=1048420286>
- [62] « Liant papier », *Wikipédia*. 7 février 2021. Consulté le: 2 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liant_papier&oldid=179684533
- [63] « 2018.fibra_bd_0.pdf ». Consulté le: 2 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.architectes.org/sites/default/files/atoms/files/2018.fibra_bd_0.pdf
- [64] « LIEGE-panneaux.pdf ». Consulté le: 3 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.eco-logis.com/Fiches_infos_PDF/LIEGE-panneaux.pdf
- [65] happhoadmin7, « Papercrete – An Alternative Building Material », *Happho*, 24 avril 2017. <https://happho.com/papercrete-alternative-building-material/> (consulté le 3 avril 2022).

- [66] « Mohr-Coulomb Model.pdf ». Consulté le: 15 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur:
<http://edge.rit.edu/edge/P18416/public/Detailed%20Design%20Documents/Mohr-Coulomb%20Model.pdf>
- [67] « Liant papier — Ekopedia ». https://www.ekopedia.fr/wiki/Liant_papier (consulté le 23 avril 2022).

I. DÉMONSTRATION CALCUL DES DÉFORMATIONS EN FLEXION



Le moment dans l'échantillon en fonction de x vaut :

$$M = \begin{cases} \frac{F}{2}x & x \in \left[0; \frac{L}{3}\right] \\ \frac{FL}{6} & x \in \left[\frac{L}{3}; \frac{2L}{3}\right] \\ \frac{F}{2}(L-x) & x \in \left[\frac{2L}{3}; L\right] \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

En sachant que

$$M = EI \frac{d^2v}{dx^2} \quad (\text{I.2})$$

En intégrant une première fois, on trouve :

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{EI} \begin{cases} \frac{F}{4}x^2 + a_1 & x \in \left[0; \frac{L}{3}\right] \\ \frac{FL}{6}x + a_2 & x \in \left[\frac{L}{3}; \frac{2L}{3}\right] \\ \frac{F}{2}\left(Lx - \frac{x^2}{2}\right) + a_3 & x \in \left[\frac{2L}{3}; L\right] \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

On peut imposer les conditions suivantes :

- La dérivée de la déflexion v est nulle au milieu de la poutre
- Continuité de la courbure en $x = L/3$ et $2L/3$

Ce qui donne :

$$\bullet \quad \frac{FL\left(\frac{L}{3}\right)}{6} + a_2 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad a_2 = -\frac{FL^2}{12} \quad (\text{I.4})$$

$$\bullet \quad \frac{F\left(\frac{L}{3}\right)^2}{4} + a_1 = \frac{FL\left(\frac{L}{3}\right)}{6} + a_2 \quad \Leftrightarrow \quad a_1 = -\frac{FL^2}{18} \quad (\text{I.5})$$

En intégrant une seconde fois, on obtient (la première équation suffit) :

$$v(x) = \frac{1}{EI} \begin{cases} \frac{Fx^3}{12} - \frac{FL^2}{18}x + b_1 \\ \dots \\ \dots \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

On impose les conditions suivantes :

- Déflexion nulle à l'appuis extérieur
- Déflexion égale au déplacement de la traverse δ_t en $x = L/3$

Ce qui donne :

$$\bullet \quad b_1 = 0 \quad (I.7)$$

$$\bullet \quad \delta_t = \frac{1}{EI} \left(\frac{F(\frac{L}{3})^3}{12} - \frac{FL^2(\frac{L}{3})}{18} \right) \quad (I.8)$$

C'est cette dernière équation qui sert à trouver la relation recherchée :

$$\delta_t = \frac{1}{EI} \frac{FL^3}{27} \left(-\frac{5}{12} \right) \quad (I.9)$$

On la combine avec les trois équations qui découlent de nos hypothèses et qui permettent de remplacer le module de Young :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \sigma = \frac{My}{I} \quad M = \frac{FL}{6}$$

Ce qui donne :

$$E = \frac{My}{\varepsilon I} = \frac{FLy}{6\varepsilon I} \quad (I.10)$$

On obtient :

$$\delta_t = \frac{6\varepsilon}{FLy} \frac{FL^3}{27} \left(-\frac{5}{12} \right) \quad (I.11)$$

Et pour finir, la relation recherchée :

$$\varepsilon = \frac{54 \delta_t y}{-5L^2} \quad (I.12)$$

II. TABLEAU COMPLÉMENTAIRE – ANALYSE DES COMPOSITIONS

Les tableaux ci-dessous reprennent de façon très synthétique mais néanmoins exhaustive, l'influence de chaque paramètre et de ses variations sur les propriétés du matériau. Pour chaque variation du paramètre, une note d'impact est donnée, variant de -3 à 3. -3 signifie un impact négatif fort, 0 aucun impact, et 3 un impact positif fort. Une note de confiance indique à quelle point l'affirmation est fiable. Cette note est comprise entre 1 et 3. Enfin, une dernière colonne indique les améliorations nécessaires pour augmenter le niveau de confiance.

Taille du papier

Caract.	Influence	Impact	Conf	Améliorations
Petit	Therm : influence négative des confettis → matrice plus continue	-1	2	+ d'échantillons en thermique
Moyen	Flex : influence négative en flexion	-1	2	+ de compos avec du M
	Therm : influence positive	1	2	
Long	Flex : longues fibres → meilleure répartition des contraintes	2	2	Analyse tomo + profonde
	Densité : densité inférieure	1	3	
	Therm : influence positive → matrice moins continue	1	1	

Quantité de papier

Caract	Influence	Impact	Conf	Améliorations
15%	Flex et Comp : influence positive sauf niveau ductilité	-2	3	+ d'échantillons 15%
	Densité : bcp plus dense → lourd	-2	3	/
	Acou : lourd → meilleure isolation	3	1	Améliorer le test
	Therm : mauvaise isolation	-3	2	+d'échantillons
30%	Flex : influence légèrement négative : moins de matrice et pas assez de fibres	-1	2	/
	Acou : légèrement positif	1	2	Améliorer le test
	Therm : légèrement positif	1	3	
50%	Flex : bcp de fibres → répartition des contraintes	1	2	+ d'échantillons
	Comp : module de young plus faible, très grande ductilité	-1	2	
	Densité : léger	2	3	+ d'échantillons
	Acou : léger → mauvaise isolation	-1	1	Améliorer le test
	Therm : bcp de papier → bonne isolation	2	2	

Type de sable

Caract	Influence	Impact	Conf	Améliorations
Jaune	Comp : bonne élasticité	1	3	Améliorer le test
	Acou : mauvaise performance	-2	1	
	Therm : mauvaise performance	-1	2	
Concassé	/	0	0	

Quantité de sable et de chaux

Caract	Influence	impact	Conf	Améliorations
1-1	/	0	0	
3-2	Flex : mauvaise performance	-1	2	+ d'échantillons
	Therm : plus de sable → meilleure conduction → moins bonne isolation	-1	2	idem
0-1	Flex : bonne performance	1	3	
	Comp : plus de chaux → meilleur squelette, meilleure rigidité, ductilité ok	2	3	
	Densité : lourd	-1	3	
	Acou : lourd → isolation intéressante	1	1	Améliorer le test
	Therm : matrice continue → mauvaise isolation	2	2	Tester plus d'échantillons

Temps de malaxage

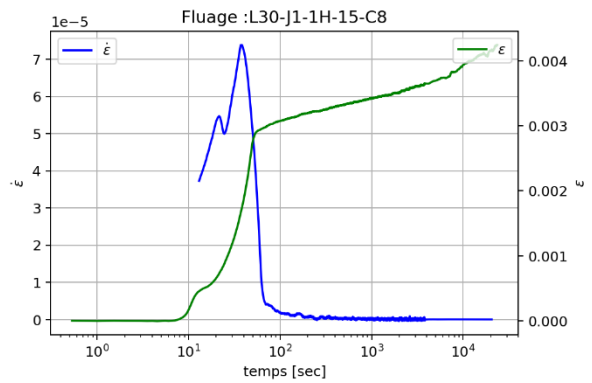
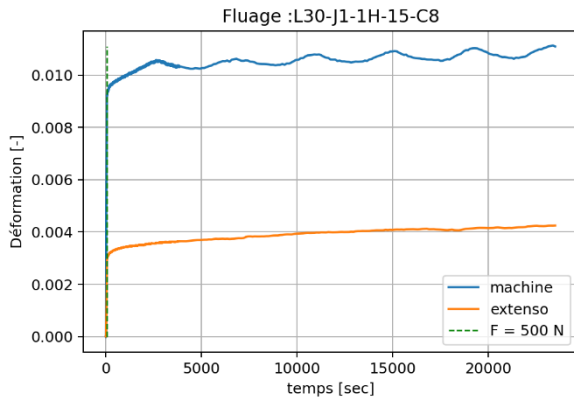
Caract	Influence	impact	Conf	Améliorations
5 [min]	FLEX : influence positive : moins de mélange → fibres moins enroulées ?	2	2	Plus d'échantillons
	Comp : limite d'élasticité haute et bonne ductilité	2	2	Idem
	Therm : performance légèrement inférieure	1	2	Idem
15 [min]	/	0	0	

Autres caractéristiques

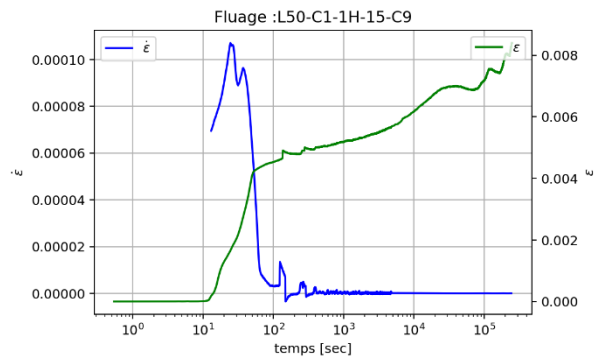
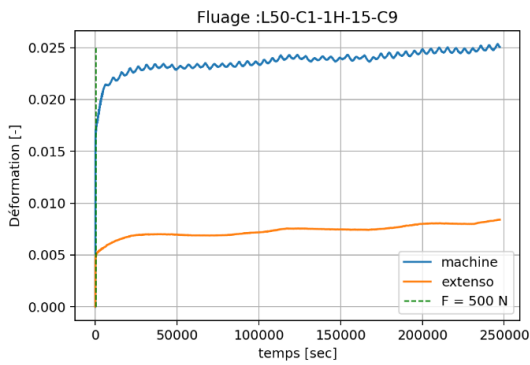
Caract	Influence	impact	Conf	Améliorations
Grande qté d'eau	Flex & Comp : grande porosité, matériau très friable, tenue mécanique nulle	-3	3	
	Acou : Structure poreuse → bonne absorption du son	2	1	Améliorer le test
	TH : Structure poreuse très aérée → excellente performance	3	2	+ d'échantillons
Trempage 48h	Comp : module de Young et limite d'élasticité légèrement inférieurs à la moyenne mais ductilité intéressante	-1	2	+ d'échantillons
50% SPALCO recyclé	Flex : Matrice moins rigide (peu de chaux active) → mauvais en flexion	-2	2	+ d'échantillons et vérifier l'explication avec tomo
	Comp : Module de Young et limite d'élasticité moyenne, très grande ductilité	2	3	
	Acou : très bonne isolation.	3	1	Améliorer le test
	TH : bonne isolation → matrice discontinue due à une qté de chaux faible et aux agrégats de matériau recyclé	2	2	+ d'échantillons et vérifier l'explication avec tomo

III. FLUAGE - RÉSULTATS COMPLETS ET DÉTAILLÉS

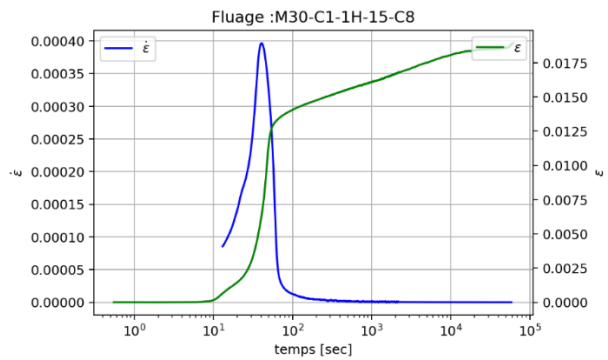
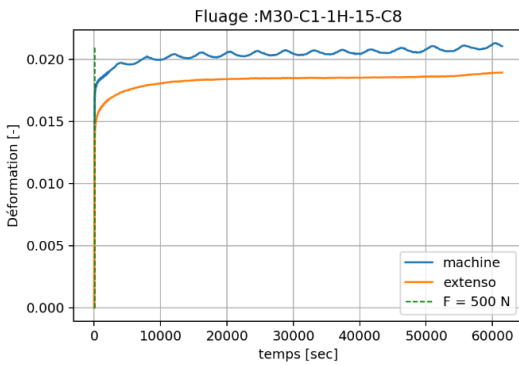
L30-J1-1H-15



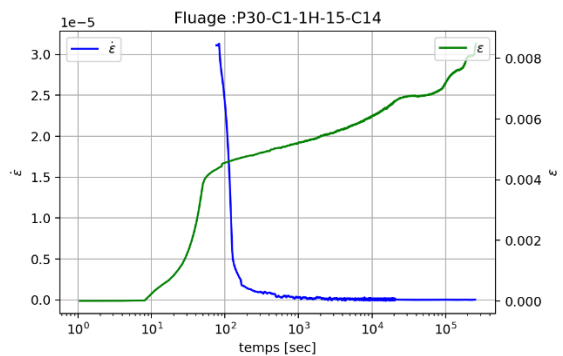
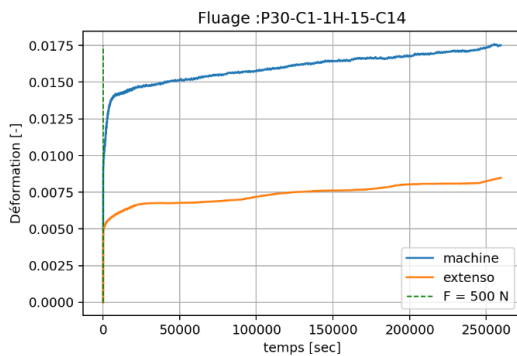
L50-C1-1H-15



M30-C1-1H-15

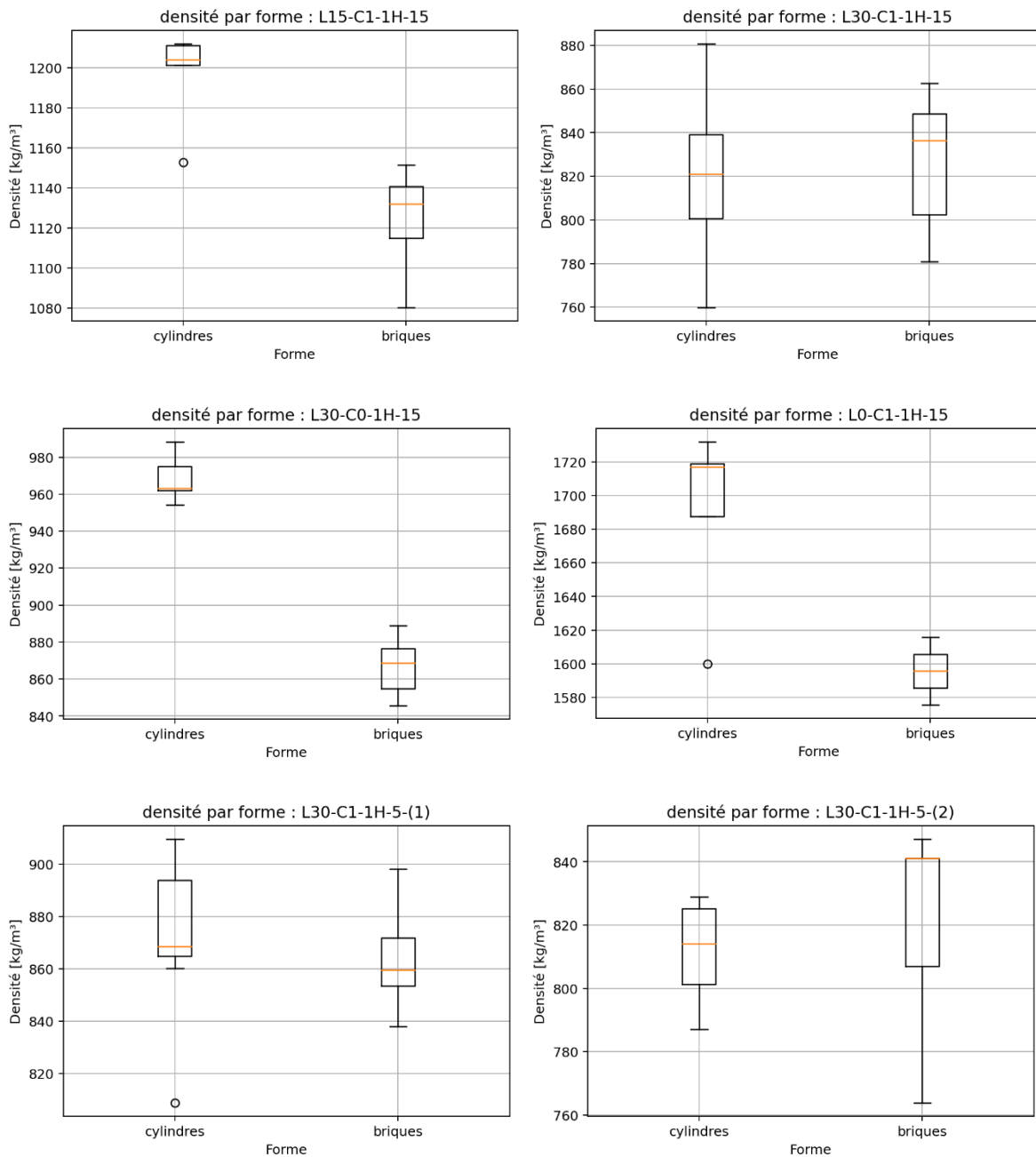


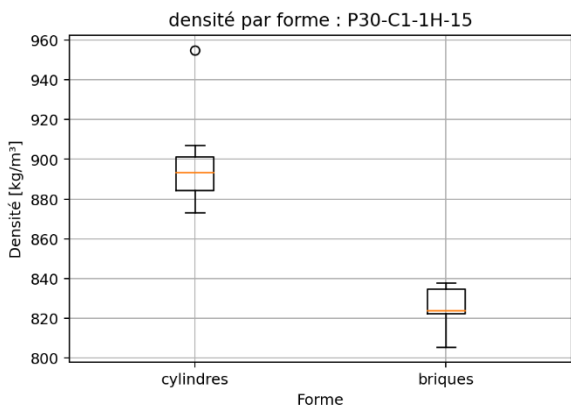
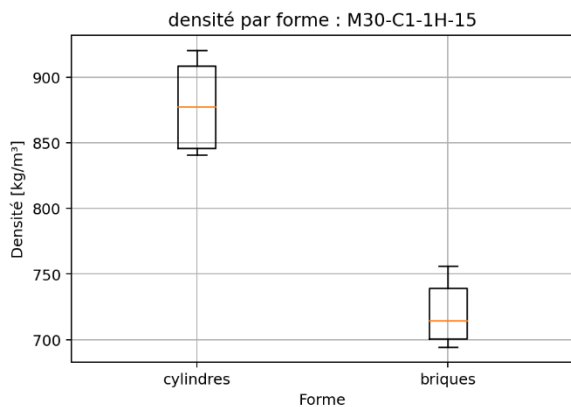
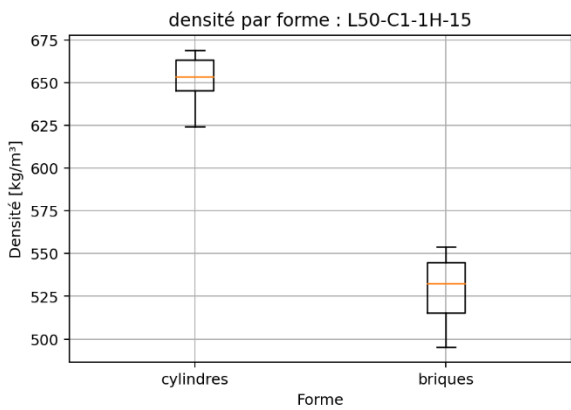
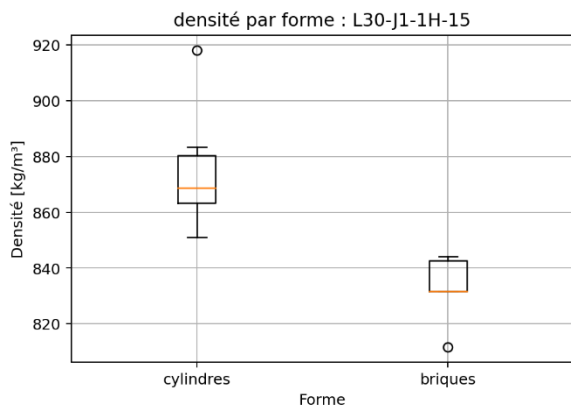
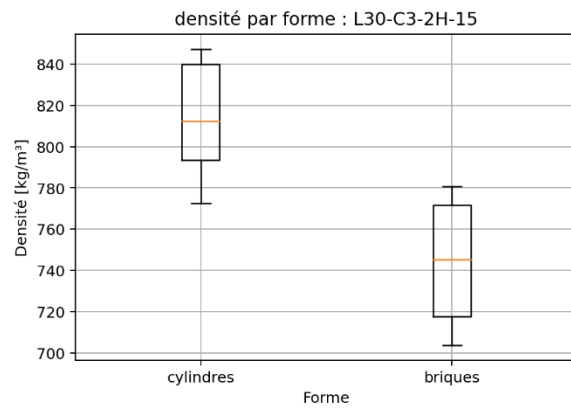
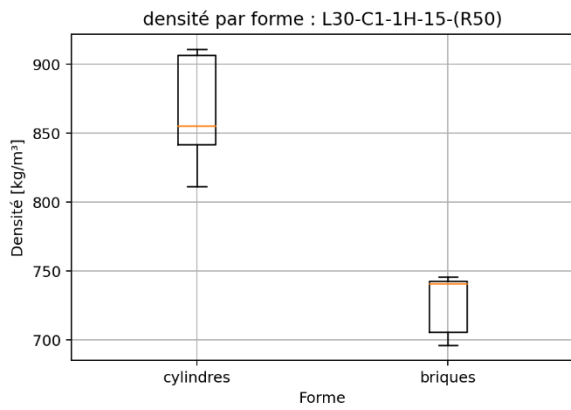
P30-C1-1H-15



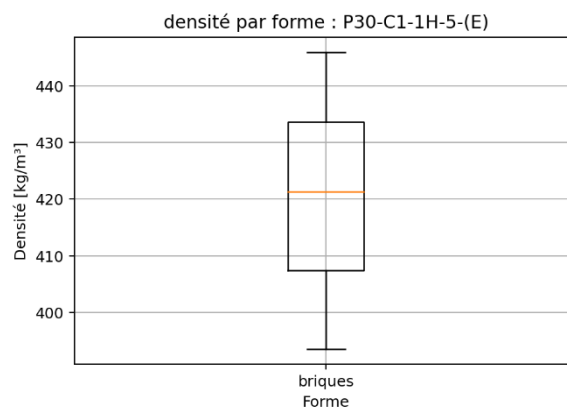
IV. DENSITÉ – RÉSULTATS DÉTAILLÉS

Les graphes présentés dans cette annexe détaillent la dispersion des résultats de densité pour chaque composition, sous la forme de briques (A) et de cylindres (C).





Pour la composition P30-C1-1H-5-(E), aucun essai de compression n'a été réalisé, donc aucun échantillon cylindrique a été mesuré. C'est pourquoi les seules données sont celles de la densité des briques :



V. COMPORTEMENT DU COMPOSITE - ANALOGIE

Voici une petite analogie pour mieux comprendre le comportement du matériau composite et la forme de ses cycles de charge-décharge. Soit un ressort placé à l'intérieur d'une canette (voir Figure 5.4-1). Si vous marchez sur la canette, le ressort va se comprimer et la canette va se déformer. Les premiers instants, la déformation sera réversible (donc élastique) pour les 2 matériaux. Ensuite, la canette va s'écraser puisque la force appliquée dépasse la force qu'elle peut supporter. Le ressort va se comprimer mais est toujours dans sa phase élastique (la déformation est réversible : il reprendra sa forme si la force qui le comprime disparaît)

Lors de la décharge, si vous retirez votre pied, on va assister à deux phénomènes. Au tout début, un petit recouvrement plastique va avoir lieu : la canette se détend un tout petit peu la force qui la comprimait diminue. Le ressort accompagne ce mouvement. Ensuite, le ressort étant toujours comprimé à l'intérieur de la canette déformée, il va appliquer une force sur la canette pour tenter de reprendre sa forme initiale. La canette entre alors en traction et se plastifie à nouveau pour suivre le mouvement du ressort.

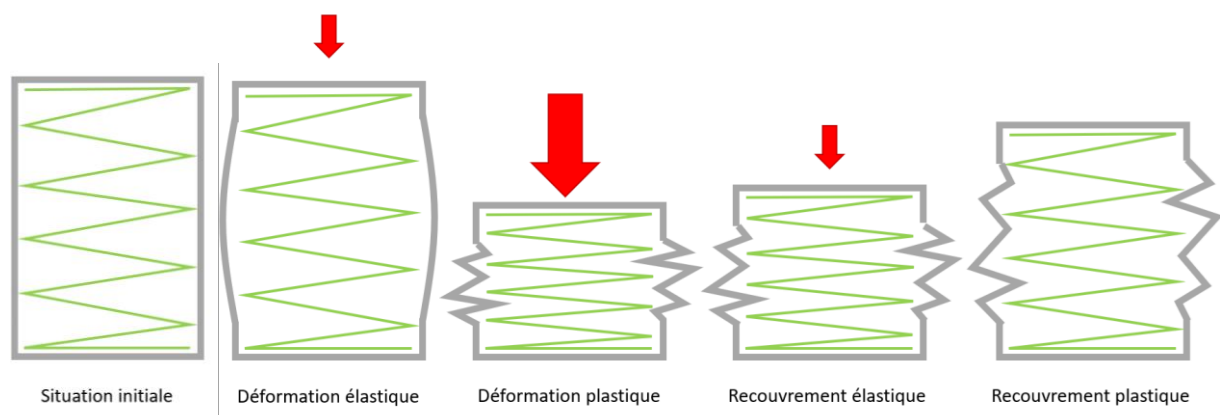


Figure 5.4-1 : Analogie de la canette pour expliquer le fonctionnement du matériau composite

Si on observe ce phénomène sur le graphe contrainte déformation, voilà les états qu'on obtient :

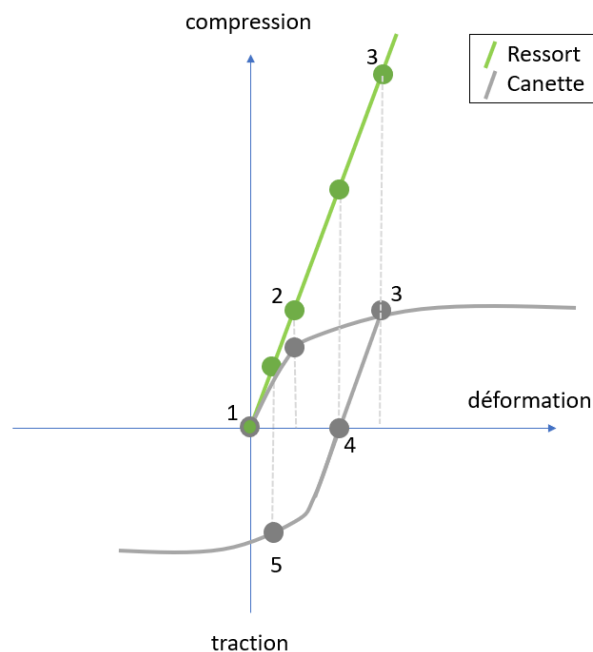
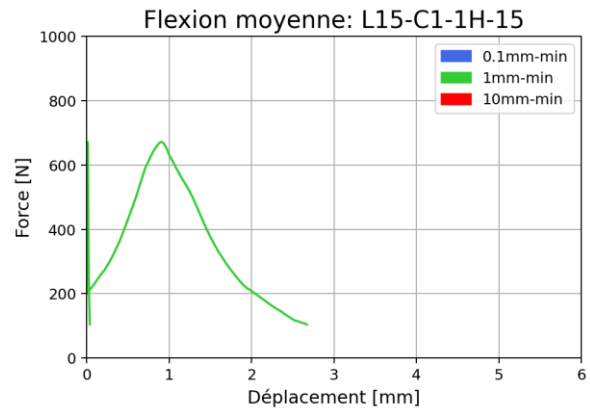
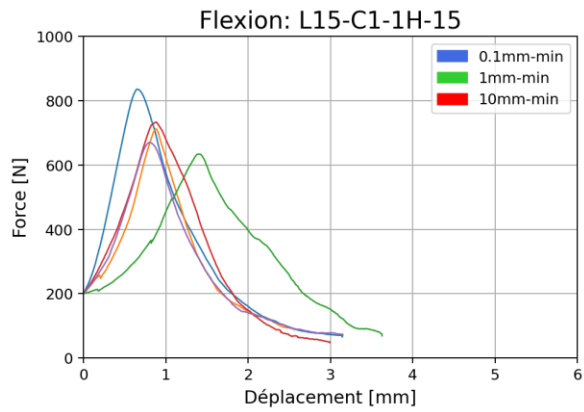


Figure 5.4-2 : Schéma représentant les différents états de contrainte de la canette et du ressort

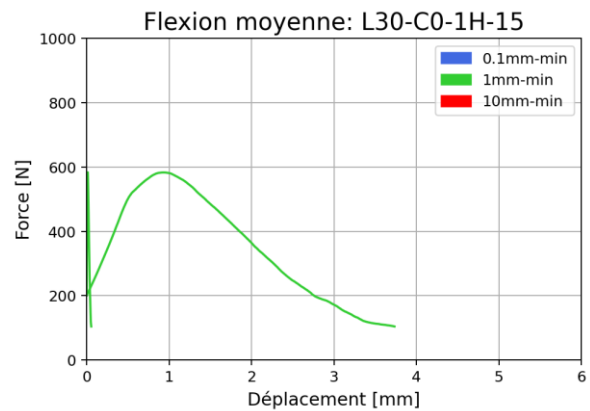
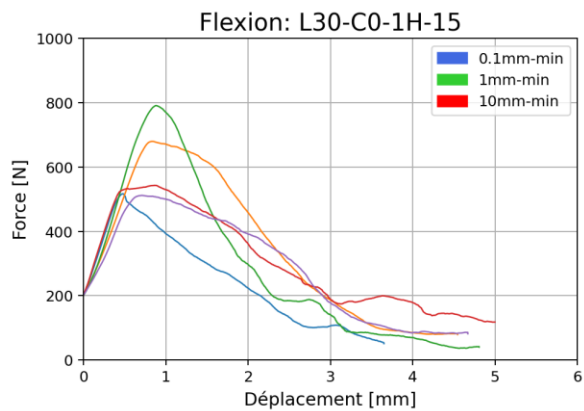
Dans SPALCO, la matrice a le même rôle que le ressort : très rigide et avec une limite d'élasticité très haute, elle reste longtemps dans un régime élastique. A l'inverse, le papier va se comporter comme la canette : il va rapidement se plastifier car sa limite d'élasticité est beaucoup plus faible. En revanche il profite d'une grande ductilité et va pouvoir se déformer beaucoup avant de rompre.

VI. FLEXION : GRAPHES FORCE-DÉPLACEMENT

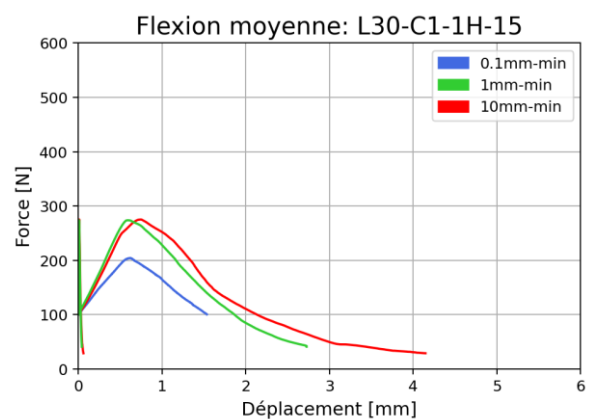
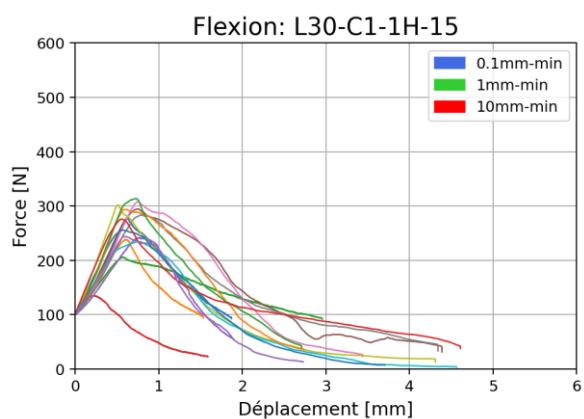
L15-C1-1H-15



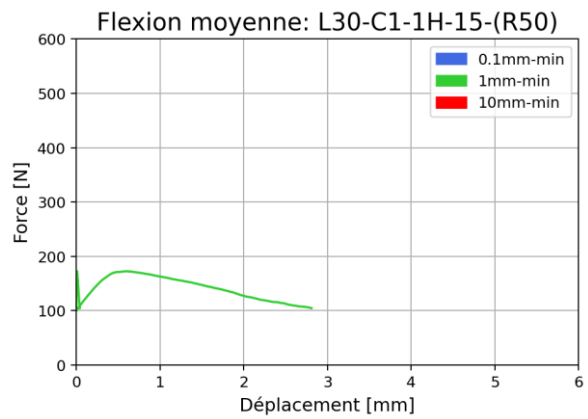
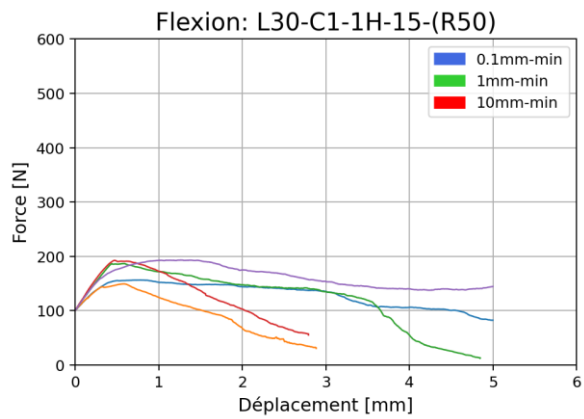
L30-C0-1H-15



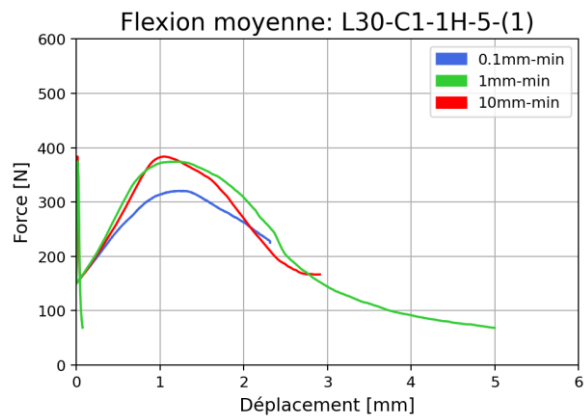
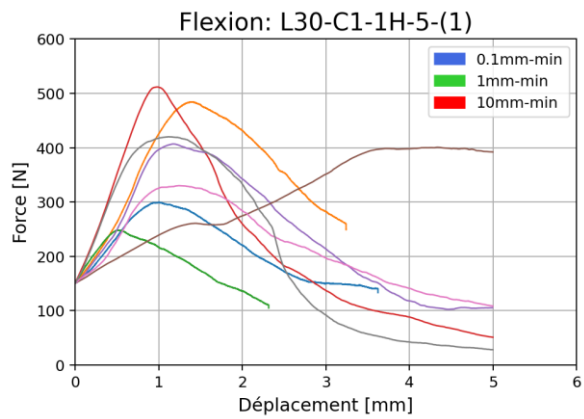
L30-C1-1H-15



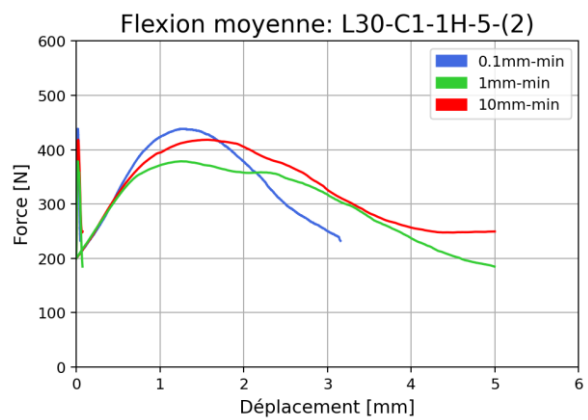
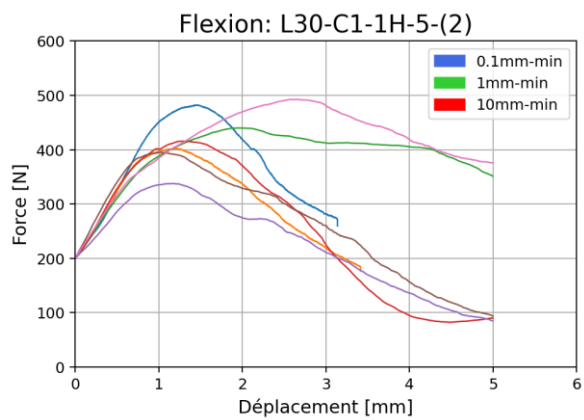
L30-C1-1H-15-(R50)



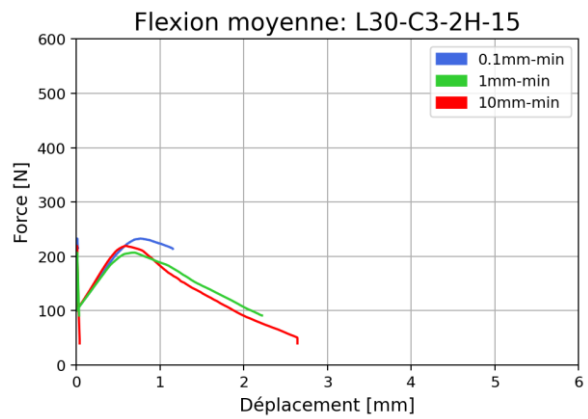
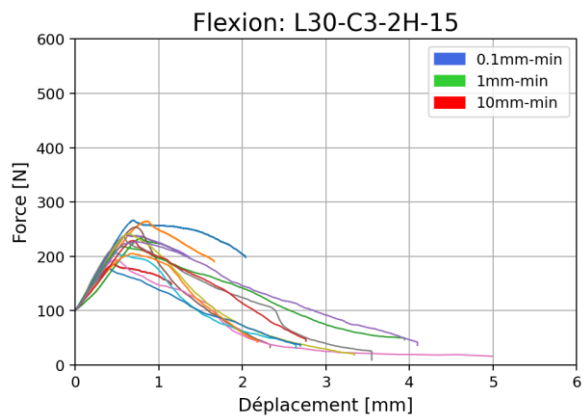
L30-C1-1H-5-(1)



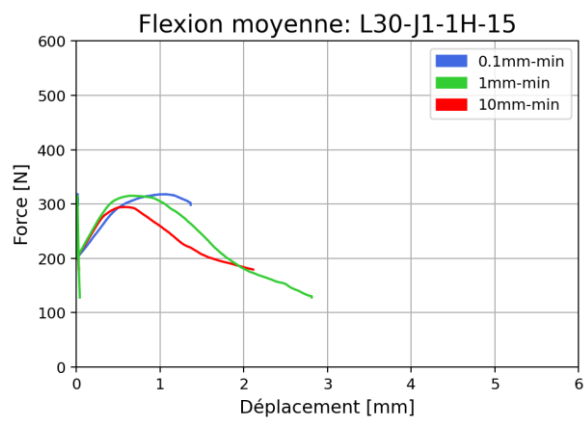
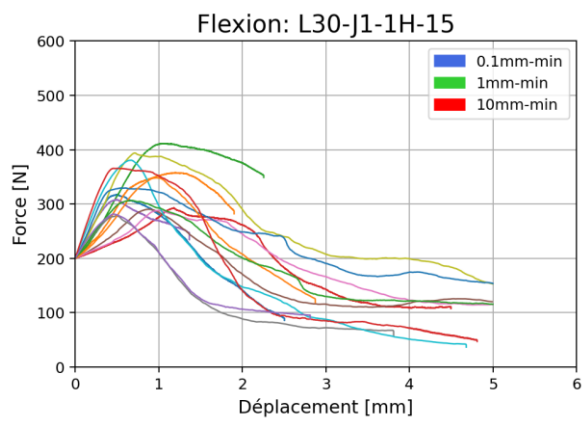
L30-C1-1H-5-(2)



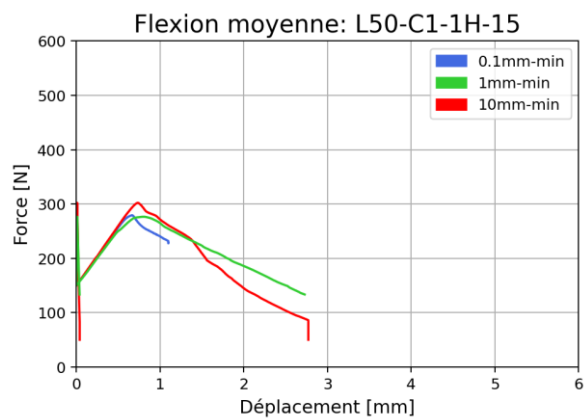
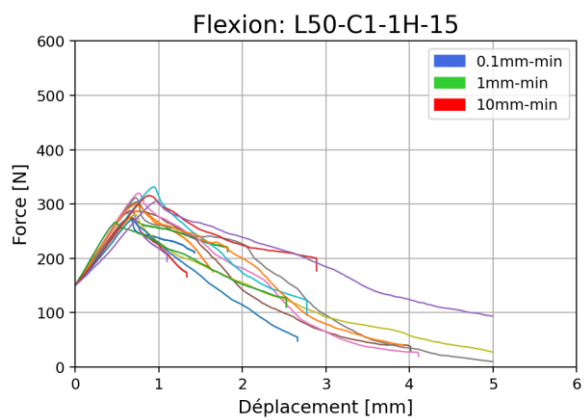
L30-C3-2H-15



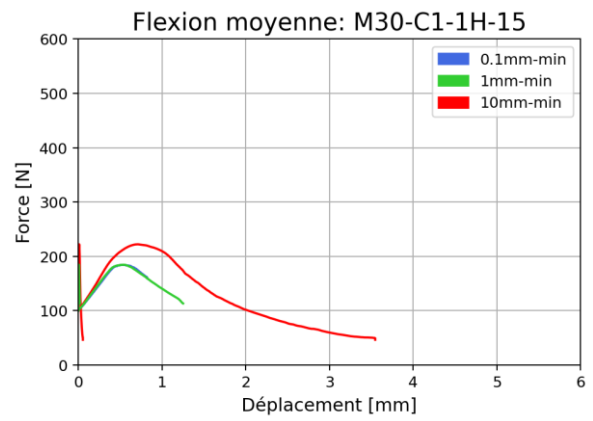
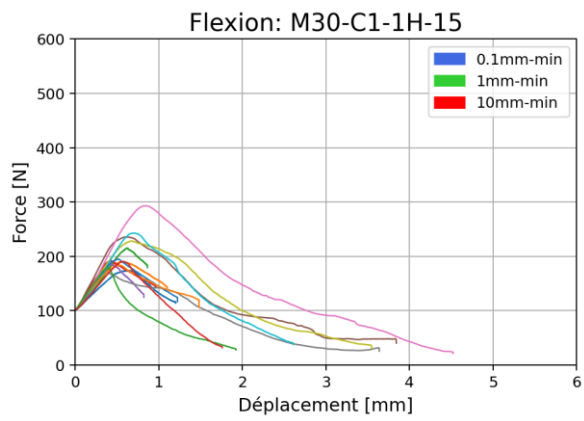
L30-J1-1H-15



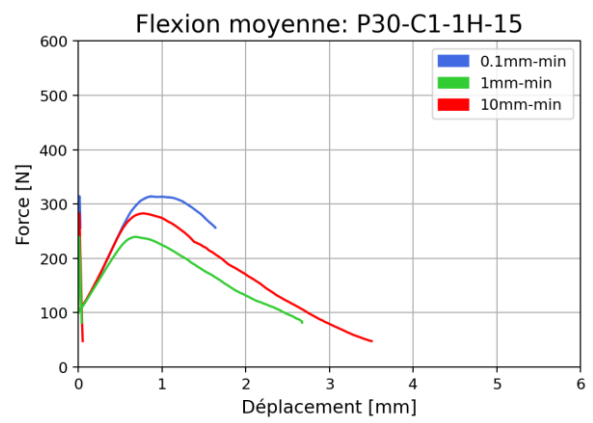
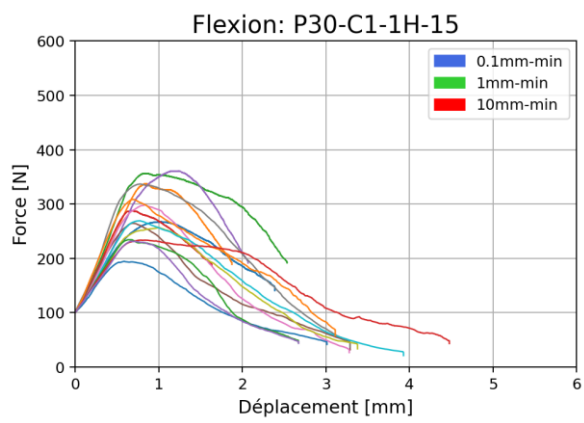
L50-C1-1H-15



M30-C1-1H-15



P30-C1-1H-15



VII. MOHR-COULOMB : DÉMONSTRATION

Mohr-Coulomb représente les états de contrainte du matériau (Figure 4.1-1) sur un plan dont les axes sont la contrainte normale et la contrainte tangentielle (Figure 4.1-2). Sur ce plan, sont tracé deux demi-cercles qui représentent l'état de contrainte ultime en traction et en compression. La droite tangente à ces deux cercles, donnée par l'équation (4.1) marque la limite des états de contrainte possible dans le matériau avant rupture.

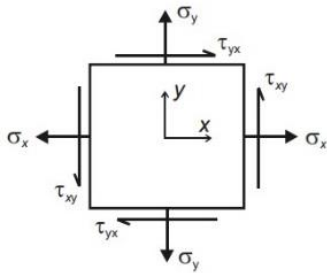


Figure 5.4-3 : Etat plan de contraintes [47]

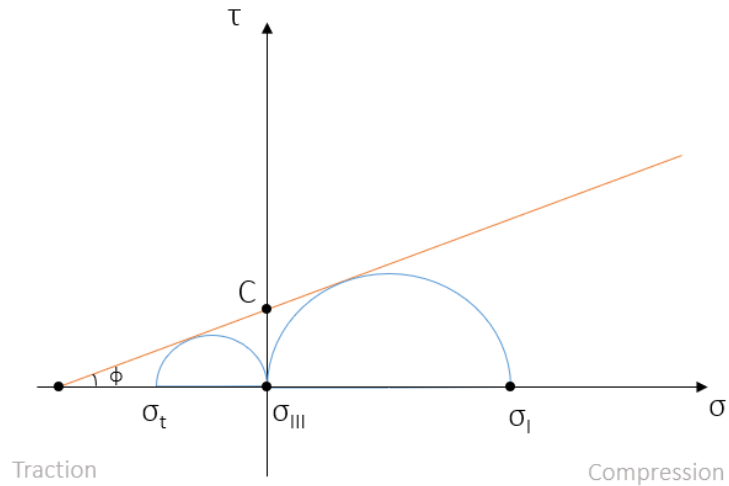


Figure 5.4-4 : Schéma du plan de Mohr-coulomb

L'équation de la droite de Mohr-Coulomb (VII.1) permet de définir celle-ci en fonction de l'angle de frottement ϕ et de la cohésion C définis sur la Figure 4.1-2.

$$\tau = \sigma \tan \phi + C \quad (\text{VII. 1})$$

Le demi-cercle de droite, passe par $\sigma_{III} = (0,0)$ car il représente l'état de contrainte à la rupture sur base des données de compression uni-axiale. Nous avons donc $\sigma_I = \frac{F_{max}}{Section} =$ contrainte max de compression uni-axiale.

Le demi-cercle de gauche, passe par $\sigma_{III} = (0,0)$ et σ_t qui est la contrainte maximale en traction dans la fibre inférieure lors de l'essai de flexion 4 points. Cette contrainte peut être calculée de la manière suivante :

$$\sigma_{traction} = \frac{M_{max} y}{I} = \frac{\frac{F_{max} L}{6} \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{F_{max} L}{bh^2} \quad (\text{VII. 2})$$

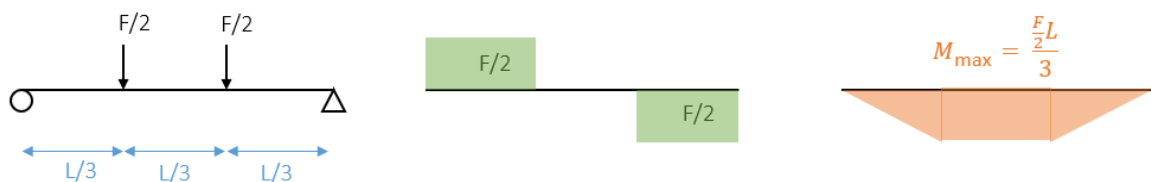


Figure 5.4-5 : graphes des efforts internes en flexion 4 points

A l'aide de la géométrie (Figure 5.4-4) on peut ensuite calculer l'angle de frottement interne du matériau, et la cohésion.

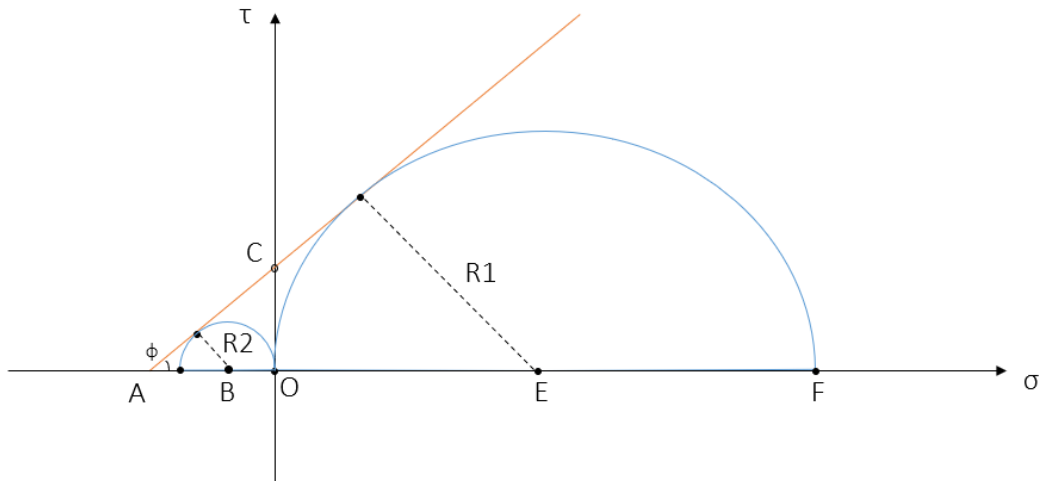


Figure 5.4-6 : Variables de référence

Angle de frottement :

$$\begin{cases} \phi = \sin^{-1}\left(\frac{R1}{|AE|}\right) \\ \phi = \sin^{-1}\left(\frac{R2}{|AB|}\right) \end{cases} \quad (\text{VII.3})$$

Comme :

$$|AB| = |AE| - R1 - R2 \quad (\text{VII.4})$$

On peut simplifier le système :

$$\begin{cases} \phi = \sin^{-1}\left(\frac{R1}{|AE|}\right) \\ \phi = \sin^{-1}\left(\frac{R2}{|AE| - R1 - R2}\right) \end{cases} \quad (\text{VII.5})$$

De cette manière on peut isoler l'angle de frottement et la longueur AE :

$$|AE| = \frac{R1^2 + R1 \cdot R2}{R1 - R2} \quad (\text{VII.6})$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{R1}{\frac{R1^2 + R1 \cdot R2}{R1 - R2}}\right) \quad (\text{VII.7})$$

Les rayons des cercles correspondent à la moitié des contraintes correspondantes.

$$R1 = \frac{\sigma_c}{2} \text{ et } R2 = \frac{\sigma_t}{2} \quad (\text{VII.8})$$

Enfin la cohésion peut se calculer à l'aide de l'expression suivante :

$$C = \tan(\phi) \cdot |AO| \text{ avec } |AO| = |AE| - |R1|. \quad (\text{VII.9})$$

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl