



HAL
open science

Le béton de liège : Optimisation de la formulation et des performances thermiques

Ahmed Kamel Tedjditi

► **To cite this version:**

Ahmed Kamel Tedjditi. Le béton de liège : Optimisation de la formulation et des performances thermiques. Génie civil. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2021. Français. NNT : . tel-04200852

HAL Id: tel-04200852

<https://hal.science/tel-04200852>

Submitted on 8 Sep 2023

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

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

Copyright

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée en vue de l'obtention du **diplôme de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**
En : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par : TEDJDITI Ahmed Kamel

Sujet

Le béton de liège : Optimisation de la formulation et des performances thermiques

Thèse soutenue le 22 Juillet 2021, devant le jury composé de :

ALLAL Mohammed Amine	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
BELARBI Rafik	Professeur	La Rochelle Univ.	Co-Directeur de thèse
KENAI Saïd	Professeur	Univ. Blida	Examineur
SENHADJI Yassine	Professeur	Univ. Mascara	Examineur
BEZZAR Abdelillah	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
BOUHRAOUA Rachid Tarik	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité
TOUIL Brahim	MCB	Univ. Saida	Invité

May Allah freshen the affairs of a person who hears something from us and communicates it to others exactly as he has heard it (i.e., both the meaning and the words), for it may be that the recipient of knowledge understands it better than the one who has heard it."

*Mohammed the messenger of Allah
Peace be upon him*

أسير خلف ركاب النجب ذاع حج

مؤملاً كشف ما لا قيت من عوج

فإن لحقت لهم من بعد ما سبقوا

فكم لرب الورى في ذاك من فوج

وإن بقيت بظهم الأرض منقطعا

فما على أعرج في ذاك من حج

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma mère et mon père, qui baissaient leur voix afin que je puisse me concentrer et finir mes travaux de recherche dans le calme. Vous pensiez que je ne le savais pas ?! Je le savais, ça me faisait très mal mais je souhaitais faire votre joie. Je vous dis : Pardon, je ne pourrais jamais vous récompenser et je vous dédie le résultat que vous désiriez : le souhait est devenu une réalité, votre dernier fils est aujourd'hui docteur. Comme vous me dites toujours, vos prières me suivent là où je mets mes mains.

A mes frères et sœurs, Azzeddine, Abderrahim, Dalila et Samira. J'ai peut-être sacrifié le temps qui était destiné pour vous. Je m'excuse, je vous aime et je vous rappelle que sans votre soutien, je ne serais pas là aujourd'hui.

A mes amis ...

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin... le résultat est là.

Remerciements

يا ربّي لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك، لك الحمد حتى ترضى ولك الحمد إذا مرضيت ولك

الحمد بعد الرضا .

Alors que l'accomplissement d'un travail de thèse apparait comme un effort solitaire, nul doute que sans le soutien de différents acteurs qui m'ont permis de progresser dans cette sensible phase de « l'aspirant-chercheur », resterait un panier sans poignée.

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe Matériaux granulaires dans le laboratoire algérien Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (**EOLE**) en étroite collaboration avec le laboratoire français, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (**LaSIE**).

Au terme de cette thèse, je tiens d'abord à remercier chaleureusement celui qui s'est engagé à faire le coaching tout au long de cette expédition, mon directeur de thèse, Professeur **Fouad GHOMARI**. Son accueil, sa confiance, sa disponibilité, ses conseils avisés, son engagement, son expérience, sa rigueur scientifique et ses relectures méticuleuses m'ont été d'un grand secours. La liberté qu'il m'a accordé dans la gestion de mes travaux de recherche, son savoir-être et ses qualités humaines m'ont permis de grandir tant sur le plan professionnel que relationnel ; je lui exprime ici toute ma gratitude.

Je tiens à remercier très vivement celui qui a consacré un temps pour contribuer à la mission du coaching, mon co-directeur de thèse, Professeur **Rafik BELARBI**. Je le remercie pour l'excellence de son encadrement scientifique, son soutien, ses conseils, ses encouragements, son expertise ainsi que pour les moyens laboratoire qu'il m'a mis à ma disposition. Son accueil au LaSIE, sa modestie et ses qualités humaines ont permis de donner un caractère amical à la relation coach-apprenti.

Mes remerciements s'adressent aussi à celui qui a accepté de faire part de l'équipe de coaching, mon co-directeur de thèse, Professeur **Rachid Tarik BOUHRAOUA** pour ses conseils, son encadrement, sa disponibilité, son expérience dans le domaine des forêts et pour toutes les discussions qu'on a eu. L'effort qu'il a fait dans l'approvisionnement en matières premières m'a permis de gagner en efficacité. Pour tout cela, merci.

J'exprime ici ma gratitude à M. Mohammed Amine ALLAL, Professeur à l'université de Tlemcen de m'avoir fait l'honneur de présider un Jury de spécialistes.

Je présente mes vifs remerciements aux spécialistes, M. Saïd KENAI, Professeur à l'université de Blida, M. Yassine SENHADJI, Professeur à l'université de Mascara et M. Abdelillah BEZZAR, Professeur à l'université de Tlemcen pour m'avoir fait le plaisir d'accepter d'examiner et évaluer de mon travail de thèse. Leurs remarques constructives et leurs suggestions seront sans doute très utiles pour la suite de cette recherche.

Je voudrais également remercier M. Brahim TOUIL, Maître de conférences à l'université de Saïda d'avoir accepté de porter un jugement sur ce travail et d'avoir pris part au jury de soutenance.

Je tiens à exprimer également mes remerciements à tous les membres et doctorants du laboratoire EOLE. Un intérêt particulier au Docteur Omar TALEB pour son aide et sa collaboration qui m'ont été une aide précieuse pour pouvoir commencer le travail expérimental.

Au cours de ma thèse, j'ai réussi à visiter quelques laboratoires algériens. Ainsi, je tiens à remercier Professeur Mohammed MOULI, directeur du laboratoire LABMAT de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO) qui m'a apporté une aide considérable lors de la réalisation des essais de conductivité thermique. J'adresse par la même occasion mes remerciements au Docteur Z. BOUZID et Mr. Mimoun BELLAOUI qui m'ont ouvert les portes pour la réalisation des essais au MEB.

Au sein du laboratoire LaSIE, quelques docteurs m'ont donné un coup de pouce et aidé à la réussite de mon stage au laboratoire LaSIE. C'est la raison pour laquelle, je dois adresser mes remerciements aux Docteurs : Fouad BOUKHELF, Rachid CHERIF, Abderrahmene MERIOUA et Ferhat BENMAHIDDINE qui m'ont aidé lors des essais hygrothermiques. Un intérêt particulier au Docteur Eglé CONFORTO, l'une des meilleurs spécialistes au MEB, pour l'aide qu'elle m'a apporté lors de la réalisation des essais.

Mes profonds remerciements vont aussi à mes collègues et amis frères avec qui j'ai partagé des moments conviviaux durant mes années de thèse : Ilyes RIOUCHI, Abdelsemi TAIBI, Mohammed BARKA, Mohammed RACHEDI, Karim SEBAA, Abdelhafid NOUALI et Madjid AIT SALEM.

Une thèse génie civil ne peut se faire sans l'aide des techniciens et professionnels qui ont aussi réussi à mettre leur pierre à l'édifice. Je parle ici de Mr. Abdeldjalil MIMOUNI et les différents techniciens du laboratoire pédagogique Matériaux de Construction.

Enfin, j'adresse mes plus grands remerciements à ma famille notamment ma mère, mon père, ma grand-mère, mes frères et sœurs, mes neveux et mes nièces pour leur soutien moral et surtout leurs encouragements. Mes premiers et derniers remerciements vont à mes parents à qui je dois ce que je suis devenu ; je vous aime.

AHMED KAMEL TEDJDITI

Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire vise à formuler et optimiser la performance d'un béton biosourcé à base de granulats de liège. L'une des principales contributions de l'étude réside dans l'utilisation d'un nouveau type de liège : le liège mâle, qui présente un nombre d'applications limité du fait qu'il ne présente aucune valeur commerciale. Afin d'arriver à notre objectif, le travail expérimental s'est focalisé autour de trois points essentiels : Le premier point concerne l'optimisation du mode de malaxage. Pour ce faire, sept bétons contenant 50% de liège (en volume total des granulats) sont confectionnés en faisant varier l'ordre d'introduction des constituants, le temps de malaxage et la nature du malaxeur de malaxage. Le deuxième point est dédié à l'évaluation de la performance de bétons de liège dont le mode de malaxage a été optimisé. Dans cette partie, quatre bétons de liège contenant 25, 50, 75 et 100% de liège sont évalués en termes de consistance, propriétés physiques, conductivité thermique, microstructure et propriétés mécaniques. Le dernier point consiste à étudier l'incidence de l'eau efficace sur les performances précitées du béton de liège. A ce propos, neuf bétons ont été formulés en considérant trois différents niveaux d'absorption de liège ainsi que trois pourcentages de liège (25, 50 et 75%).

La première étape a montré l'impact de varier le protocole de malaxage sur la qualité du béton à l'état durci mais surtout sur son homogénéité à l'état frais. A l'issue de de cette première étape, nous avons conclu que le protocole de malaxage adéquat pour la formulation des bétons de liège consiste à (i) utiliser un malaxeur à axe verticale, (ii) introduire les granulats de liège avant la pâte cimentaire et (iii) malaxer le béton pendant 8 minutes. Pour tous les pourcentages de liège testés, les bétons de liège ont montré une bonne homogénéité et une masse volumique permettant de les classer comme étant des bétons légers.

Le béton à base de 25% de liège a révélé une conductivité thermique qui le qualifie comme béton de structure. En revanche ceux contenant 50% de liège et plus ont montré des conductivités thermiques et des performances mécaniques qui les prédestinent à l'isolation. Le BL100 a montré une performance thermomécanique qui rivalise avec celle des bétons biosourcés existants. Malgré leur bonne performance thermomécanique, l'interface entre le liège et la matrice cimentaire constitue un point de faiblesse pour les bétons de liège mâle étudiés. Les résultats relatifs à la dernière partie ont montré l'effet de considérer différents niveaux d'absorption de liège sur la performance du béton. En effet, Quel que soit le niveau considéré, la prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège permet d'améliorer la consistance du béton à l'état frais ainsi que sa performance hygrothermique à l'état durci. Aussi, pour des pourcentages de liège d'au moins 50%, il est clair qu'un niveau d'absorption correspondant à la saturation produit des bétons ayant une performance hygrothermique fortement améliorée. Cependant, il peut compromettre leur homogénéité et leur résistance à la compression. En somme, la considération d'un niveau correspondant à 2 heures d'absorption permet de combiner entre une performance hygrothermique améliorée et une bonne homogénéité.

Mots clés : Béton de liège, formulation, propriétés hygrothermiques, microstructure, optimisation, malaxage, propriétés mécaniques.

Abstract

The study presented in this manuscript aims to formulate and optimize the performance of a bio-based concrete incorporating cork aggregates. One main contribution of the study is the use of an innovative type of cork, namely virgin cork which has a limited number of applications because of its low economic value. For this purpose, the experimental work was focused on three essential points: The first point concerns the optimization of the mixing mode. For this, seven concretes containing 50% of cork aggregates (in total volume of aggregates) were prepared using different constituent's introduction order, different mixing time and different mixing tool. The second point is dedicated to the evaluation of the performance of cork concrete of which, the mixing mode was optimized. In this part, four cork concretes containing 25, 50, 75 and 100% of cork were evaluated in terms of consistency, physical properties, thermal conductivity, microstructure and mechanical properties. The last part of the experimental work examines the effect of considering cork absorption on the performance of cork concrete. To this end, nine concretes considering three different levels of cork absorption as well as three percentages of cork (25, 50 and 75%) were prepared.

The impact of varying the mixing protocol on the hardened quality of cork concrete but especially on its fresh homogeneity was clearly demonstrated. At the end of the first step, we concluded that the mixing protocol that will be used for the formulation of cork concretes consists of (i) using a vertical axis mixer, (ii) introducing the cork aggregates before the cement and sand and (iii) mixing the concrete for 8 minutes. For all the tested percentages of cork, cork concretes showed good homogeneity and a density which qualifies them as lightweight concretes.

Concrete with 25% of cork showed thermal conductivity which allows its use as structural concrete. On the other hand, those containing 50% of cork and more revealed thermal conductivities and mechanical performance allowing the use in several applications as insulation materials. The BL100 has shown thermomechanical performance rivalling that of the existing bio-based concrete. Despite their good thermomechanical performance, the ITZ between cork and cementitious matrix constitutes a drawback for the studied virgin cork concretes. Results obtained on the last part of the study showed the effect of considering different levels of cork absorption on the performance of concrete. In fact, regardless of the considered level, taking the cork absorption into account improves the consistency of concrete in the fresh state as well as its hygrothermal performance in the hardened state. For at least 50% of cork percentage, consideration of a level corresponding to saturation produces concretes with highly improved hygrothermal performance. However, it compromises their homogeneity and their compressive strength. In sum, the consideration of a level corresponding to 2 hours of cork absorption resulted in a concrete with an improved hygrothermal performance and good homogeneity.

Keywords: Cork concrete, formulation, hygrothermal properties, microstructure, optimization, mixing, mechanical properties.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى صياغة وتحسين أداء خرسانة قائمة على أساس حيوي متمثل في حبيبات الفلين. إن من بين المساهمات الرئيسية لهذه الدراسة يمكن ذكر تلك التي تتمثل في استخدام نوع جديد من الفلين: الفلين الذكر الذي يتميز بمحدودية عدد التطبيقات التي تسمح بحسن استغلاله وذلك بسبب قيمته المنخفضة. من أجل الوصول إلى الهدف المسطر، تم التركيز في العمل التجريبي على ثلاث نقاط أساسية: تتعلق النقطة الأولى بمحاولة تحسين عملية الخلط. لمن أجل ذلك، تم تحضير سبع خرسانات تحتوي على 50% من الفلين (من الحجم الإجمالي للحبيبات) حضرت بتغيير ترتيب إدخال المكونات، وقت الخلط وأداة الخلط. خصصت النقطة الثانية لتقييم أداء خرسانة فلين محضرة باستعمال طريقة التحضير الأكثر تناسبا. في هذا الجزء، تم تقييم أربع خرسانات تحتوي على 25، 50، 75 و 100% من الفلين الذكر من حيث الاتساق، الخصائص الفيزيائية، الناقلية الحرارية، البنية الدقيقة والخصائص الميكانيكية. النقطة الأخيرة من العمل التجريبي كانت عبارة عن دراسة تأثير مراعاة امتصاص حبيبات الفلين على أداء خرسانة الفلين. تحقيقا لهذه الغاية، تم اختبار تسعة أنواع خرسانية محضرة باعتبار ثلاثة مستويات مختلفة من امتصاص الفلين بالإضافة إلى ثلاثة نسب من الفلين (25، 50 و 75%).

بعد إجراء التحاليل، أظهرت الخطوة الأولى تأثير تغيير بروتوكول الخلط بشكل مباشر على جودة الخرسانة في الحالة الصلبة ولكن بشكل أكثر إثارة للاهتمام على تجانسها في الحالة الطازجة. سمحت نهاية هذه الخطوة الأولى باستنتاج أن بروتوكول الخلط المناسب لتحضير خرسانة الفلين يتمثل في (1) استخدام خلاط المحور الشاقولي، (2) إدخال مجاميع الفلين قبل الإسمنت والرمل و(3) خلط الخرسانة لمدة 8 دقائق. بالنسبة لجميع نسب الفلين المختبرة، أظهرت خرسانة الفلين تجانسًا جيدًا وكثافة تؤهلها لأن تصنف كخرسانة خفيفة الوزن.

لقد أبدت الخرسانة التي تحتوي على 25% من الفلين ناقلية حرارية تؤهلها للبقاء ضمن صنف الخرسانة الإنشائية. في المقابل، أظهرت تلك التي تحتوي على 50% من حبيبات الفلين وأكثر ناقلية حرارية وأداء ميكانيكية يسمحون باستخدامها ضمن عدة تطبيقات كخرسانات عازلة. إن الأداء الميكانيكي والحراري الذي أبان عنه BL100 يسمح له أن يكون منافسا جيدا للخرسانة الحيوية المذكورة في الدراسات السابقة. على الرغم من أدائها الحراري والميكانيكي الجيد، تمثل الواجهة الهشة الموجودة بين الفلين والمصفوفة الأسمنتية نقطة ضعف لخرسانة الفلين الذكر المدروسة في هذا العمل. لقد أبانت النتائج التي تم الحصول عليها في الجزء الأخير من العمل التجريبي تأثير تغيير مستويات امتصاص الفلين المعتمدة على أداء الخرسانة. بغض النظر عن مستوى الامتصاص الذي تم اعتباره، أثبتت هذه الدراسة أن أخذ امتصاص حبيبات الفلين في الاعتبار يحسن من قابلية عمل الخرسانة في الحالة الطازجة بالإضافة إلى أدائها الحراري في الحالة الصلبة. فيما يخص نسب الفلين التي لا تقل عن 50%، صحيح أن اعتبار مستوى امتصاص يوافق تشبع الفلين يمكن من الحصول على خرسانة ذات أداء هيدروحراري محسن إلا أنه يؤدي إلى خلل كبير في تجانسها بالإضافة إلى الإنقاص من مقاومتها للإنضغاط. على العموم، لقد مكنت هذه الخطوة الأخيرة من إظهار أن اعتبار مستوى يقابل ساعتين من امتصاص الفلين يجعل من الممكن الجمع بين أداء حراري حسن وتجانس جيد.

الكلمات المفتاحية: خرسانة الفلين، التشكيل، الخصائص الهيدروحرارية، البنية الدقيقة، تحسين، الخلط، الخصائص الميكانيكية.

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص.....	V
Table des matières	VI
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XIV
Nomenclature	XV
Introduction générale.....	1

Chapitre 1: De la place des bétons biosourcés.....	4
1.1. Contexte environnemental	5
1.1.1. Développement durable.....	5
1.1.2. Consommation énergétique	8
1.2. Réglementation thermique.....	9
1.2.1. Un bref historique	9
1.2.2. L'exemple de la réglementation thermique française.....	10
1.2.3. Réglementation algérienne.....	11
1.3. Haute qualité environnementale.....	12
1.3.1. Le programme ECO-BAT : un programme à multiplier	12
1.4. Confort thermique et désordres liées à l'humidité	13
1.4.1. Confort thermique.....	13
1.4.2. Désordres liés à l'humidité	14
1.5. Isolation thermique.....	15
1.5.1. De l'intérêt d'isolation.....	15
1.5.2. Techniques d'isolation.....	16
1.6. Agro-bétons : une réponse aux défis.....	17
1.6.1. De quoi s'agit-il ?.....	17
1.6.2. Pourquoi le recours aux bétons biosourcés ?.....	18
1.6.3. Différentes utilisations	19
1.6.4. Panorama des propriétés des bétons biosourcés	20
1.7. Conclusion.....	33

Chapitre 2: Le liège : une valorisation possible dans le béton. 34

2.1.	Place du chêne liège dans la forêt algérienne.....	35
2.2.	Le liège : une ressource prometteuse.....	37
2.2.1.	Formation et récolte.....	37
2.2.2.	Types de liège.....	39
2.2.3.	Morphologie microscopique.....	40
2.2.4.	Composition chimique.....	42
2.2.5.	Propriétés du liège.....	44
2.2.6.	Applications.....	45
2.2.7.	Production mondiale de liège et place de l'Algérie.....	48
2.3.	Etat des lieux sur les bétons et mortiers de liège.....	49
2.3.1.	Formulation et malaxage.....	50
2.3.2.	Propriétés des bétons et mortiers de liège.....	54
2.4.	Synthèse bibliographique, valeur du travail élaboré et démarche adoptée.....	66
2.4.1.	Synthèse bibliographique.....	66
2.4.2.	Démarche de travail.....	67
2.5.	Conclusion.....	67

Chapitre 3: Caractérisation des matières premières & procédures expérimentales.

.....	69
3.1.	Présentation de la campagne expérimentale.....	70
3.2.	Caractérisation des matières premières.....	71
3.2.1.	Ciment.....	71
3.2.2.	Eau.....	72
3.2.3.	Adjuvant.....	72
3.2.4.	Granulats minéraux.....	73
3.2.5.	Granulats de liège.....	75
3.3.	Composition des bétons.....	81
3.3.1.	Première partie.....	81
3.3.2.	Deuxième partie.....	82
3.4.	Préparation des éprouvettes.....	83
3.5.	Méthodes de caractérisation des bétons.....	84
3.5.1.	Ouvrabilité et inspection visuelle.....	84
3.5.2.	Propriétés physiques.....	84
3.5.3.	Propriétés thermiques.....	85
3.5.4.	Propriétés hydriques.....	88
3.5.5.	Microstructure.....	92
3.5.6.	Résistance à la compression.....	96
3.5.7.	Résistance à la flexion.....	96

3.6.	Conclusion.....	96
------	-----------------	----

Chapitre 4:	Optimisation du mode de malaxage et performance du béton de liège mâle.....	97
--------------------	---	----

4.1.	Influence du mode de malaxage	98
4.1.1.	Description de la démarche entreprise.....	98
4.1.2.	Ordre d'introduction des constituants.....	101
4.1.3.	Temps de malaxage.....	103
4.1.4.	Outil de malaxage	105
4.1.5.	Mode de malaxage approprié.....	107
4.2.	Le béton de liège mâle : quelle performance ?.....	108
4.2.1.	Ouvrabilité.....	109
4.2.2.	Masse volumique	110
4.2.3.	Vitesse ultrasonore	111
4.2.4.	Porosité accessible à l'eau	112
4.2.5.	Absorption par capillarité	113
4.2.6.	Conductivité thermique	115
4.2.7.	Microstructure	115
4.2.8.	Propriétés mécaniques.....	117
4.3.	Conclusion.....	121

Chapitre 5:	Effet de la prise en compte de l'absorption du liège pendant le malaxage	123
--------------------	--	-----

5.1.	Rappel de la démarche adoptée et des bétons préparés.....	124
5.2.	Ouvrabilité	124
5.3.	Masse volumique.....	125
5.4.	Microstructure.....	127
5.4.1.	Microscopie électronique à balayage.....	127
5.4.2.	Distribution de la taille des pores	131
5.4.3.	Volume cumulatif de mercure	133
5.4.4.	Porosité totale au mercure.....	135
5.5.	Propriétés hydriques	136
5.5.1.	Isothermes de sorption	136
5.5.2.	Perméabilité à la vapeur d'eau	141
5.5.3.	Valeur du tampon hydrique (MBV)	142
5.6.	Propriétés thermiques	144
5.6.1.	Conductivité thermique	144

5.6.2. Chaleur spécifique	145
5.7. Résistance à la compression	147
5.8. Conclusion.....	149
Conclusion générale et perspectives.....	151
Références Bibliographiques.....	155

Liste des figures

Figure 1.1. Piliers du développement durable.	6
Figure 1.2. Evolution des émissions des GES entre 1970 et 2010.	7
Figure 1.3. Répartition des émissions totales de GES entre les secteurs économiques en 2010.	7
Figure 1.4. Répartition de la consommation énergétique par secteur. A gauche en 1973, à droite en 2018.	8
Figure 1.5. Répartition de la consommation énergétique en Algérie.	9
Figure 1.6. Evolution des règlements thermiques français.	11
Figure 1.7. Plages d'humidité faible, élevée et optimal.	14
Figure 1.8. Exemples de pathologies liées à un excès d'humidité.	15
Figure 1.9. Sources de déperditions thermiques dans un logement.	16
Figure 1.10. Différents types d'isolation thermique.	17
Figure 1.11. Cycle de vie des matériaux biosourcés.	18
Figure 1.12. Différentes applications des bétons biosourcés.	19
Figure 1.13. Représentation schématique d'un milieu poreux.	21
Figure 1.14. Masse volumique des bétons biosourcés.	22
Figure 1.15. Distribution porale des bétons de chanvre contenant des ratios H/S différents.	23
Figure 1.16. Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des bétons biosourcés.	24
Figure 1.17. Influence de la température et l'âge sur la conductivité thermique des bétons de chanvre.	25
Figure 1.18. Mécanismes de fixation d'humidité.	26
Figure 1.19. Types d'isothermes d'adsorption.	26
Figure 1.20. Classification des phénomènes d'hystérésis.	27
Figure 1.21. Modes de diffusion de vapeur d'eau dans un pore.	28
Figure 1.22. Isothermes d'adsorption des (a) bétons biosourcés, (b) particules de maïs et tournesol.	29
Figure 1.23. Isotherme d'adsorption/désorption d'un béton de chanvre avant et après vieillissement.	29
Figure 1.24. Comparaison du MBV des bétons biosourcés de chanvre et de lin avec d'autres matériaux classiques.	30
Figure 1.25. Facteur de résistance à la diffusion de vapeur en fonction du pourcentage des végétaux.	31
Figure 1.26. Perméabilité à la vapeur des bétons de chanvre à différents âges.	31
Figure 1.27. Résistance à la compression des bétons biosourcés à base de palmier.	32
Figure 1.28. Variation de la courbe de capacité des bétons avec la variation du pourcentage de fibres de palmier.	32
Figure 1.29. Courbes de capacité des bétons biosourcés de chanvre et balle de riz en fonction des conditions de cure.	33
Figure 2.1. Répartition des espèces forestières en Algérie.	35
Figure 2.2. Répartition des forêts de chêne-liège en Algérie.	36
Figure 2.3. Répartition des forêts de chêne liège dans le bassin méditerranéen.	37

Figure 2.4. Représentation schématique d'une coupe transversale d'un tronc de chêne-liège.....	38
Figure 2.5. Procédure de récolte du liège.....	39
Figure 2.6. Différents types de liège.....	40
Figure 2.7. Microstructure de liège.....	41
Figure 2.8. Composition de la paroi de liège. (a) Image obtenue par un microscope électronique à transmission (MET), (b et (c) représentation schématique des différentes couches.....	42
Figure 2.9. Composés chimiques présents dans le liège.....	43
Figure 2.10. Fabrication des bouchons en liège.....	45
Figure 2.11. Utilisation des panneaux de liège dans le bâtiment.....	46
Figure 2.12. Utilisation du liège pour le design et la décoration.....	47
Figure 2.13. Exemples de béton de liège.....	47
Figure 2.14. Production mondiale de liège.....	48
Figure 2.15. Progression de la production de liège en Algérie.....	49
Figure 2.16. Affaissement des bétons contenant 0, 10 et 20% de liège.....	55
Figure 2.17. Masse volumique des composites de liège.....	56
Figure 2.18. Conductivité thermique des composites de liège.....	57
Figure 2.19. Chaleur spécifique des bétons de liège expansé.....	58
Figure 2.20. Isothermes d'adsorption pour les composites de liège.....	59
Figure 2.21. Perméabilité à la vapeur des mortiers de liège.....	60
Figure 2.22. Porosité des composites de liège en fonction du pourcentage de liège.....	61
Figure 2.23. microstructure des mortiers de liège-chaux.....	62
Figure 2.24. ITZ entre liège et matrice géopolymérique.....	63
Figure 2.25. Résistance à la compression des bétons en fonction du pourcentage de liège.....	64
Figure 2.26. Courbes contrainte-déformation des bétons en fonction du pourcentage de liège.....	65
Figure 2.27. Résistance à la flexion des composites de liège.....	66
Figure 3.1. Démarche suivie lors de l'élaboration de la campagne expérimentale.....	70
Figure 3.2. (a) ciment utilisé et (b) perméabilimètre Blaine.....	72
Figure 3.3. (a) Adjuvant utilisé et (b) essai d'étalement au mini-cône.....	73
Figure 3.4. Analyse granulométrique des granulats minéraux.....	73
Figure 3.5. Microstructure d'un granulats minéral à un agrandissement de $\times 2000$	74
Figure 3.6. Granulats de liège mâle provenant de Jijel, Algérie.....	75
Figure 3.7. Procédure de préparation des granulats de liège provenant d'Ahfir.....	76
Figure 3.8. Granulats de liège mâle provenant de la forêt d'Ahfir, Tlemcen.....	76
Figure 3.9. Analyse granulométrique des granulats de liège mâle.....	77
Figure 3.10. Détermination de la masse volumique des granulats de liège. (a) apparente et (b) absolue.....	78
Figure 3.11. Détermination de l'absorption des granulats de liège.....	79
Figure 3.12. Absorption des granulats de liège mâle utilisés.....	80
Figure 3.13. Microstructure d'un granulats de liège mâle à un agrandissement de $\times 2000$	81
Figure 3.14. Conservation des éprouvettes de béton de liège.....	84
Figure 3.15. Surfaçage des éprouvettes de béton de liège.....	84

Figure 3.16. Mesure de la vitesse ultrasonore.....	85
Figure 3.17. Mesure de conductivité thermique à l'aide du QUICKLINE-30.....	86
Figure 3.18. Représentation schématique du principe de mesure de la conductivité thermique	87
Figure 3.19. Dispositif de mesure de la chaleur spécifique.....	87
Figure 3.20. Représentation schématique du dispositif de mesure de la chaleur spécifique	88
Figure 3.21. Dispositif de mesure des isothermes de sorption.....	89
Figure 3.22. Principe de la méthode de la coupelle.....	90
Figure 3.23. Mesure expérimentale de la perméabilité à la vapeur d'eau.....	90
Figure 3.24. Mesure expérimentale de la MBV.....	91
Figure 3.25. Mesure expérimentale de la capillarité.....	92
Figure 3.26. Mesure expérimentale de la porosité accessible à l'eau.....	93
Figure 3.27. Dispositif de mesure de la porosité au mercure.....	94
Figure 3.28. MiniMEB de paillasse Hitachi-TM1000.....	95
Figure 3.29. MEB FEI Quanta 200 ESEM/FEG FEI.....	95
Figure 4.1. Ordres d'introduction utilisés.	99
Figure 4.2. Outils de malaxage utilisés.	99
Figure 4.3. Démarche entreprise pour l'optimisation du mode de malaxage.	100
Figure 4.4. Influence de l'ordre d'introduction sur l'homogénéité du béton de liège....	101
Figure 4.5. Influence de l'ordre d'introduction sur (a) l'affaissement et (b) la vitesse ultrasonore du béton de liège.....	102
Figure 4.6. Influence de l'ordre d'introduction sur la résistance à la compression et à la flexion du béton de liège.....	103
Figure 4.7. Influence du temps de malaxage sur l'homogénéité du béton de liège.....	104
Figure 4.8. Influence du temps de malaxage sur (a) l'affaissement et (b) la vitesse ultrasonore du béton de liège.....	104
Figure 4.9. Influence du temps de malaxage sur la résistance à la compression et à la flexion du béton de liège.....	105
Figure 4.10. Influence de l'outil de malaxage sur l'homogénéité du béton de liège.	106
Figure 4.11. Influence de l'outil de malaxage sur (a) l'affaissement et (b) la vitesse ultrasonore du béton de liège.....	106
Figure 4.12. Influence de l'outil de malaxage sur la résistance à la compression et à la flexion du béton de liège.....	107
Figure 4.13. Protocole de malaxage.....	108
Figure 4.14. Coupes utilisées pour vérifier l'homogénéité des bétons.....	108
Figure 4.15. Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de liège mâle.....	110
Figure 4.16. A gauche : masse volumique des bétons de liège mâle, à droite : flottabilité du BL100.....	111
Figure 4.17. Vitesse ultrasonore des bétons de liège mâle.....	112
Figure 4.18. Porosité des bétons de liège mâle.....	113
Figure 4.19. Gain massique en eau en fonction de la racine carrée du temps.	113
Figure 4.20. Absorption primaire et secondaire des bétons de liège mâle.....	114
Figure 4.21. Conductivité thermique des bétons de liège mâle.....	115
Figure 4.22. Image MEB de l'ITZ entre un granulat minéral et la matrice cimentaire. .	116

Figure 4.23. A gauche : Image MEB de l'ITZ entre un granulat de liège et la matrice cimentaire. A droite : Eau récupérée après immersion du liège.....	116
Figure 4.24. Résistance à la compression des bétons de liège mâle.....	117
Figure 4.25. Courbes de capacité des bétons de liège mâle.....	118
Figure 4.26. Module d'élasticité des bétons de liège mâle.....	119
Figure 4.27. Résistance à la flexion des bétons de liège mâle.....	120
Figure 5.1. Affaissement des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré.....	125
Figure 5.2. Relation entre la masse volumique et le pourcentage de liège dans le béton.....	126
Figure 5.3. Masse volumique des bétons de liège étudiés.....	127
Figure 5.4. Images MEBE du BL50E0.....	128
Figure 5.5. Images MEBE du BL50E2H.....	129
Figure 5.6. Images MEBE du BL50ESAT.....	130
Figure 5.7. Effet du pourcentage de liège sur la microstructure du béton. (a) BL25ESAT, (b) B50ESAT et (c) BL75ESAT.....	130
Figure 5.8. Distribution porale des différents bétons de liège. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.....	133
Figure 5.9. Volume de pore cumulatif des bétons de liège étudiés. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.....	135
Figure 5.10. Porosité totale des bétons de liège étudiés.....	136
Figure 5.11. Isothermes de sorption des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.....	138
Figure 5.12. Effet du pourcentage de liège sur les isothermes des bétons de liège.....	139
Figure 5.13. Simulation des isothermes des bétons de liège à l'aide du modèle GAB.....	140
Figure 5.14. Capacité de stockage d'humidité des bétons de liège étudiés.....	141
Figure 5.15. Isothermes de sorption des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré.....	142
Figure 5.16. MBV des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré.....	143
Figure 5.17. Relation entre la MBV et la porosité des bétons de liège.....	143
Figure 5.18. Conductivité thermique des bétons de liège étudiés.....	144
Figure 5.19. Comparaison de la conductivité thermique des bétons de liège étudiés avec d'autres matériaux.....	145
Figure 5.20. Chaleur spécifique des bétons de liège étudiés en fonction de la température. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.....	146
Figure 5.21. Chaleur spécifique des bétons de liège à 23 °C.....	147
Figure 5.22. Résistance à la compression des bétons de liège. (a) à 7 jours et (b) à 28 jours.....	148

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Les 14 cibles de la démarche HQE (Chamoin, 2013).....	12
Tableau 1.2. Performances mécaniques minimales des bétons de chanvre (Chamoin, 2013).....	20
Tableau 2.1. Propriétés du liège mâle et de reproduction.....	40
Tableau 2.2. Composition chimique du liège mâle et de reproduction.....	44
Tableau 2.3. Formulation des composites, types de liège et absorption du végétal dans la littérature.....	51
Tableau 2.4. Malaxage des composites de liège dans la littérature.....	53
Tableau 3.1. Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	71
Tableau 3.2. Composition chimique du ciment utilisé.....	71
Tableau 3.3. Composition chimique et PH de l'eau utilisée.....	72
Tableau 3.4. Propriétés physiques des granulats minéraux.....	74
Tableau 3.5. Masses volumiques apparente et absolues des granulats de liège.....	78
Tableau 3.6. Composition des bétons préparés lors de la première partie de la campagne en kg.....	82
Tableau 3.7. Composition des bétons préparés lors de la deuxième partie de la campagne en kg.....	83
Tableau 4.1. Bétons utilisés pour l'optimisation du mode de malaxage.....	101
Tableau 4.2. Effet du pourcentage de liège sur l'homogénéité du béton.....	109

Nomenclature

Abréviations

AIE : l'Agence Internationale de l'Energie

APRUE : l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'utilisation de l'Energie

AQC : l'Agence Qualité Construction

BBC : Bâtiment à Basse Consommation énergétique

BEPOS : Bâtiment à Energie Positive

BSE : Electrons rétrodiffusés.

CH : portlandite

CNUED : Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement

COP : Conférence des Parties

CSH : Silicates de calcium hydratés

DEPEB : Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments

DTR : Document Technique Réglementaire

DGF : Direction Générale des Forêts

ECS : Eau Chaude Sanitaire

ENG : Entreprise Nationale des Granulats

GAB : modèle Guggenheim-Anderson-de Boer

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

HQE : Haute Qualité Environnementale

HR : Humidité Relative

IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry.

ITZ : Zone de Transition Interfaciale

MBV : Moisture Buffer Value

MEB : Microscopie électronique à Balayage

MEBE : MEB en mode environnemental

MET : Microscopie électronique à Transmission

PIM : Porosité par Intrusion de Mercure

RILEM : Réunion Internationale des Laboratoires et Experts en Matériaux de construction

RT : réglementation thermique

SCIBS : Société des Ciments de Béni-Saf

SE : Electrons secondaires

HAM : Transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité.

Caractères grecs

<i>Désignation et description</i>	<i>Unité</i>
Δm : Changement de masse	[g]
r_p : Rayon du pore	[m]
γ_{Hg} : Tension superficielle du mercure	[N.m ⁻¹]
δ : Perméabilité à la vapeur d'eau	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]
λ : Conductivité thermique	[W/(m.°K)]
ρ_{abs} : Masse Volumique absolue	[Kg/m ³]
ρ_{app} : Masse Volumique apparente	[Kg/m ³]
v : Vitesse ultrasonore	[m/s]
θ : Angle de contact entre le mercure et le solide	[°]

Caractères latins

<i>Désignation et description</i>	<i>Unité</i>
P_{Hg} : Pression d'injection du mercure	[Pa]
A : Surface de l'échantillon	[m ²]
Ab_{24h} : Absorption à 24 heures	[%]
Ab_t : Coefficient d'absorption à l'instant t	[%]

C : Constante cinétique liée à la sorption dans la première couche	[-]
C : Gain massique	[kg/m ²]
C_m : Capacité de stockage d'humidité	[-]
C_p : Chaleur spécifique	[J/(g.°K)]
HR_{max} : Humidité relative maximale	[%]
HR_{min} : Humidité relative minimale	[%]
K : Constante cinétique liée à la sorption multicouche	[-]
L : Longueur de l'éprouvette	[m]
m : Capacité monocouche	[-]
M_{air} : Masse de l'échantillon à l'air libre	[g]
MBV : Valeur du tampon hydrique	[g/(m ² .%HR)]
M_{eau} : Masse de l'échantillon dans l'eau	[g]
M_s : Masse sèche de l'échantillon	[g]
M_t : Masse humide à l'instant t	[g]
P : Porosité	[%]
RH : Humidité relative	[-]
t : Temps nécessaire pour traverser une éprouvette	[s]
U : Teneur massique en eau à l'équilibre	[-]
V : Volume	[m ³]

Introduction générale

Après de nombreuses décennies de comportement irresponsable, l'homme a commencé à prendre conscience que le développement ne peut se faire au détriment de la planète terre. De cette conscientisation est née la notion de développement durable en 1987, qui a submergé par la suite les sociétés modernes.

Cette prise de conscience mondiale s'est traduite sur le terrain par la tenue de plusieurs conférences et congrès internationaux dont a découlé le protocole de Kyoto en 2005 et les Conférences des Parties (COPs), visant à réduire l'émission des Gaz à effet de serre et la consommation énergétique dans la majeure partie des pays du monde. L'Algérie, s'est inscrite dans cette démarche et s'est engagée pendant les dernières COPs à réduire respectivement de 9% et 22% sa consommation énergétique et l'émission des gaz à effet de serre.

Le secteur de la construction est au cœur de l'événement. A l'échelle mondiale, il est responsable de l'épuisement d'environ la moitié des ressources naturelles. De plus, en Algérie, il consomme environ 43% d'énergie pour assurer le confort des occupants.

Outre la nécessité de réduire sa consommation énergétique, l'Algérie doit faire aussi face à la nécessité de développer le parc immobilier, ce qui entraîne sans doute une augmentation de la consommation énergétique. Ainsi, l'enjeu est de taille et la recherche de nouvelles solutions permettant d'assurer une meilleure efficacité énergétique s'impose comme une urgence.

Pour pallier à la nécessité d'améliorer le rendement énergétique du secteur de la construction, plusieurs pays développés ont décidé de faire une actualisation continue de leurs réglementations thermiques en les adaptant à chaque fois pour devenir de plus en plus exigeantes. En contrepartie, la réglementation algérienne reste encore pauvre en termes d'exigences et constitue un autre paramètre qui contribue à la consommation élevée du secteur du bâtiment.

Face à la pauvreté du cadre réglementaire algérien, certains organes à l'image de l'Agence de la Promotion et la Rationalisation et l'Utilisation de l'Energie (APRUE) ont décidé de suivre une démarche connue sous le nom de Haute Qualité Environnementale (HQE), basée sur le principe de prise d'initiative tout en faisant appel à la responsabilité du maître d'ouvrage en termes d'écoconception, écogestion, confort des habitants ainsi que la qualité sanitaire. La stratégie adoptée par l'APRUE consiste à construire des bâtiments à basse consommation énergétique dans des régions bien déterminées afin de réaliser une action démonstrative de la faisabilité des projets à haute performance énergétique dans le pays.

La réalisation d'un tel type de construction nécessite d'un point de vue technique des solutions qui, en plus de la réduction de la consommation énergétique et l'impact environnemental assurent un confort élevé aux habitants. Parmi les solutions qui existent, une implantation réfléchie du bâtiment, une bonne isolation thermique et surtout un choix pertinent des matériaux de construction. Ainsi, pendant le choix des matériaux de

construction, il est clair qu'une réglementation tenant compte de leur impact environnemental et énergétique devient impérieuse.

Dans ce contexte, les bétons biosourcés (ou agro-bétons), peuvent constituer dans ce cas une réponse intéressante en raison de leurs performances recherchées. En effet, les bétons biosourcés possèdent de bonnes propriétés hygrothermiques, une légèreté appréciée par les maîtres-artisans, une possibilité de protéger les ressources minérales et enfin un potentiel intéressant dans le stockage du carbone se trouvant dans l'air environnant.

Les biomasses qui peuvent être incorporées dans le béton afin de produire un matériau biosourcé sont nombreuses. Les plus répandues et ayant fait l'objet d'applications diverses, sont : le chanvre, la paille, la balle de riz et le tournesol dont les performances élevées sont déjà connues. Cependant, le choix de la biomasse ne dépend pas que de ses qualités, mais aussi de son coût global allant de la récolte jusqu'à l'arrivée au chantier pour être incorporée dans le béton. Ainsi, le choix de la biomasse pour le développement des bétons biosourcés nécessite aussi une analyse des ressources forestières disponibles puisque les biomasses utilisées dans un pays peuvent ne pas être disponibles dans un autre. Parmi les biomasses qui peuvent être valorisées dans notre pays, le liège. En effet, l'Algérie occupe la troisième place au monde parmi les pays possédant cette ressource ; seulement elle est l'avant dernière en termes d'exploitation. La gestion de cette ressource dans le pays comme d'autres ressources d'ailleurs nécessitent une attention soutenue de la part des gestionnaires et souligne la nécessité de trouver des applications autres que la production des bouchons (l'étalon-Or) et les panneaux d'isolation qui nécessitent une qualité minimale à remplir.

Le liège a en réserve plusieurs propriétés qui en font de lui un matériau de qualité intéressante pour l'utilisation en tant que biomasse dans les bétons biosourcés. En effet, la légèreté, la capacité de résister aux chocs, la recyclabilité, l'excellente aptitude à l'isolation thermique et phonique (grâce à une morphologie microstructurale poreuse) et la durabilité (grâce à la composition chimique unique) sont tous des qualités très recommandées pour la préparation des matériaux de construction amis de la nature.

La valorisation du liège pour la production des bétons biosourcés a fait l'objet d'un nombre croissant de travaux de recherche durant la dernière décennie. Il faut néanmoins rappeler que le chêne-liège produit au cours de sa vie, trois types de liège qui diffèrent fortement en termes de régularité, de microstructure et de composition chimique : le liège mâle qui ne présente pas la qualité requise pour la production des bouchons à partir de la première récolte, le liège second à partir de la deuxième récolte et le liège de reproduction à partir de la troisième récolte et celles qui succèdent.

L'état de l'art sur les composites cimentaires biosourcés à base de liège, montre que :

- les travaux qui existent dans la littérature se sont focalisés sur des composites incorporant soit des granulats de liège de reproduction, issus de la production des bouchons (ayant subi un processus industriel) ou bien des granulats de liège expansé résultant des déchets de production de panneaux de liège et ayant subi un traitement thermo-aéroulique. Donc, au meilleur de nos connaissances, la valorisation du liège mâle dans une matrice cimentaire est une application qui n'a pas suscité l'intérêt des chercheurs.

- Bien que les travaux réalisés sur ces composites se sont généralement concentrés sur l'étude de l'effet du pourcentage et de la taille du liège, l'incidence du type et du dosage en liant ou même le prétraitement des granulats de liège, l'absence d'un protocole relatif au malaxage de ces bétons nouveaux et la controverse qui existe à propos de la prise en compte ou non de l'absorption en eau des granulats de liège avant la fabrication du béton constituent des points dont l'impact reste méconnu jusqu'à présent.

A ce titre et sur la base de l'étude bibliographique élaborée, ce travail mené au laboratoire se propose d'apporter une contribution dans la formulation et l'optimisation de la performance du béton à base de granulats de liège mâle. Pour ce faire, la recherche d'une démarche qui consiste à obtenir un béton homogène et stable a été notre priorité. Ensuite, une première évaluation de la performance thermomécanique des bétons incorporant du liège mâle (en volume total des granulats dans le béton) est entreprise en vue d'identifier les applications potentielles de ce nouveau béton. A la fin, l'incidence prise en compte de la quantité d'eau absorbée par les granulats de liège sur la performance des bétons confectionnés est vérifiée.

Le manuscrit est structuré en cinq chapitres, se déclinant comme suit :

Après cette partie introductive destinée à poser la problématique et mettre en relief les hypothèses liées au travail expérimental, le premier chapitre met en exergue le contexte environnemental, énergétique et réglementaire du secteur de la construction. Il présente ensuite, quelques notions sur le confort et l'isolation thermique. Enfin, ce chapitre se termine par une vue d'ensemble sur les propriétés des bétons biosourcés trouvés dans la littérature afin de montrer leur performance ainsi que l'intérêt qu'ils peuvent apporter au secteur du bâtiment.

Le deuxième chapitre met l'accent d'abord sur la disponibilité, les types, les propriétés ainsi que les applications du liège en tant que ressource. Par la suite, il présente un état de l'art sur les travaux réalisés pendant la dernière décennie sur les composites à base de liège. Cette étude bibliographique permet d'identifier les carences qui existent dans la littérature et aide à la fin du chapitre à fixer nos objectifs.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la campagne expérimentale réalisée. Il présente d'abord une caractérisation des matières premières utilisées pour la préparation des bétons de liège. Ensuite, il définit les différents bétons étudiés dans le cadre de ce travail. A la fin, on présente les différentes méthodes et procédures expérimentales utilisées pour la caractérisation des bétons de liège.

Le quatrième chapitre est consacré, dans sa première partie, à l'optimisation de l'opération de malaxage pour ces matériaux cimentaires innovants. Quant à la deuxième partie, elle se focalise sur la présentation de la performance thermomécanique des bétons à différents taux de liège.

Le cinquième et dernier chapitre s'intéresse aux résultats de l'effet de l'eau efficace dans les granulats de liège sur la performance thermo-hygro-mécanique des bétons incorporant trois pourcentages de liège. A la fin du chapitre, le niveau d'absorption en eau qui offre au béton les meilleures propriétés aux états frais et durcis est identifié.

Chapitre 1

De la place des bétons biosourcés.

Introduction

Ce premier chapitre s'intéresse à l'impérieuse nécessité de recourir aux matériaux biosourcés avec un éclairage relatif à leurs propriétés.

La protection de l'environnement qui passe par une gestion efficace de nos ressources naturelles particulièrement dans un secteur énergivore comme celui du bâtiment et son impact sur les réglementations techniques (introduction à la notion haute qualité environnementale) constituent la première partie de ce chapitre. En revanche, la deuxième partie est dédiée à la présentation de la notion du confort thermique et des avantages offerts par les bétons biosourcés. Enfin, ce chapitre est clôturé par un panorama sur les propriétés des bétons biosourcés, rencontrés dans la littérature.

1.1. Contexte environnemental

1.1.1. Développement durable

Dans sa quête à une qualité de vie meilleure, l'espèce humaine, depuis ses origines, a toujours cherché des solutions qui ont évolué avec les époques et les cultures. Pourtant la relation entre l'activité de l'être humain et son environnement existaient dans les cultures ancestrales (Rahim, 2015), et les solutions proposées sont généralement fondées sur des bases abstraites dont aucune ne se révèle sûre au point de garantir l'absolue pérennité du globe terrestre (Vauge, 2014). Donc, à l'exemple de la révolution industrielle qui a commencée à la fin du 18^{ème} siècle jusqu'à nos jours et qui a laissée des impacts considérables sur l'environnement, il nous aura fallu en tant qu'habitants de cette planète, de savoir que le défi est plutôt de tirer parti des connaissances accumulées durant les millénaires pour en conserver les acquis tout en revenant à l'étroite niche écologique que nous accorde la nature.

Dans ce contexte de conscientisation, la commission Bruntland en 1987, a été à l'origine d'un nouveau concept. Il s'agit en fait de la notion de « développement durable » qui est définie (selon le rapport de la norvégienne Gro Harlem Bruntland à l'Organisation des Nations Unies (Brundtland, 1987)) comme : « *Un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes en répartissant équitablement les fruits de la croissance, sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire leurs besoins* ».

La notion de développement durable, pour ne pas rester une simple rhétorique, nécessite la reconnaissance des tensions inévitables qui existent entre les trois dimensions économique, environnementale, et sociale (Martin, 2002) (Fig. 1.1). Il s'agit donc de réussir à assurer une justice sociale à travers des progrès économiques tout en sauvegardant l'équilibre écologique de la planète, c'est d'ailleurs l'enjeu majeur de ce début du XXI^{ème} siècle.

Depuis son apparition, la notion développement durable a inondé les sociétés modernes, ce qui a conduit par la suite à : la création du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) en 1988, la naissance du premier code de conduite environnemental en 1989 et l'organisation de la troisième Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED) en 1992 et puis l'établissement (1997) et l'entrée en vigueur (2005) du protocole de Kyoto visant la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES) dans environ 160 pays (Magniont, 2010).

L'année 2015 a aussi été une année marquante puisqu'elle a connu la tenue des premières marches mondiales pour le climat ainsi que le déroulement de la Conférence des Parties sur les changements climatiques à Paris (COP 21) fixant l'objectif de limiter le réchauffement climatique à 2 °C d'ici 2100. A l'image de tous les pays inscrits dans la démarche du développement durable, l'Algérie s'est engagée pendant le COP21 et puis le

COP22 à réduire les émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) de 7 à 22% sur la période 2020-2030.

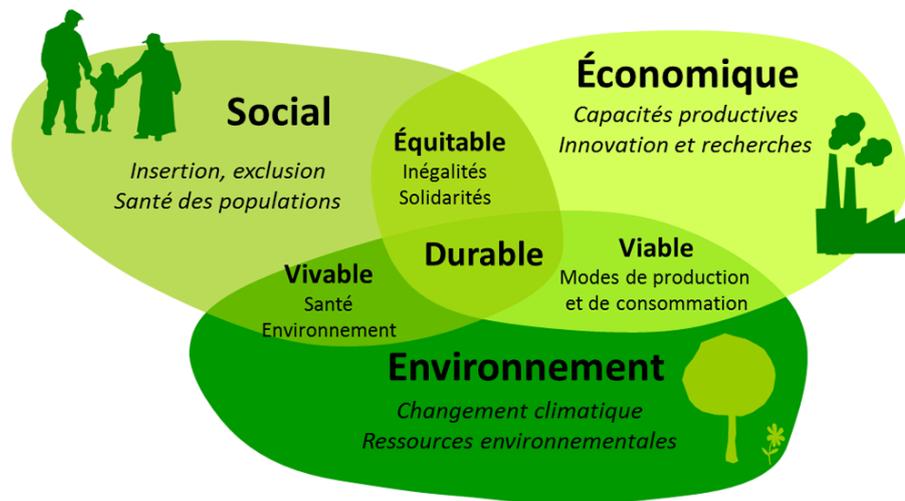


Figure 1.1. Piliers du développement durable (Source : site natureculture.org).

Afin de montrer l'importance du concept de développement durable, il paraît judicieux de rappeler que ce concept apparaît comme une réponse à des problématiques à l'échelle du globe tel que le bouleversement climatique qui se traduit par une hausse de la température de la planète, l'augmentation des niveaux des océans et l'extinction de quelques espèces vivantes. L'essentiel du dérèglement climatique, qui s'est intensifié après la deuxième guerre mondiale est, selon plusieurs experts, lié au développement exponentiel de l'activité humaine (d'une part par des émissions des GES de 1750 à 2011, qui se sont multipliées de manière dramatique au fil des 40 dernières années allant de 1970 à 2010 (Fig 1.2), mais encore par l'épuisement des ressources naturelles non-renouvelables). En effet, les derniers rapports du GIEC ont identifié une augmentation de température de l'ordre de 0.8 °C entre 1951 et 2010. En revanche, le quatrième rapport prévoit que les augmentations de température peuvent atteindre les 4.8 °C vers la fin du XXI^{ème} siècle (GIEC, 2014).

Il est maintenant établi que le chamboulement climatique est directement attribué à l'activité humaine. Il est cependant, primordial d'identifier qui des secteurs de l'énergie, l'industrie, le transport, l'agriculture et le bâtiment sont les plus impliqués dans ce changement climatique.

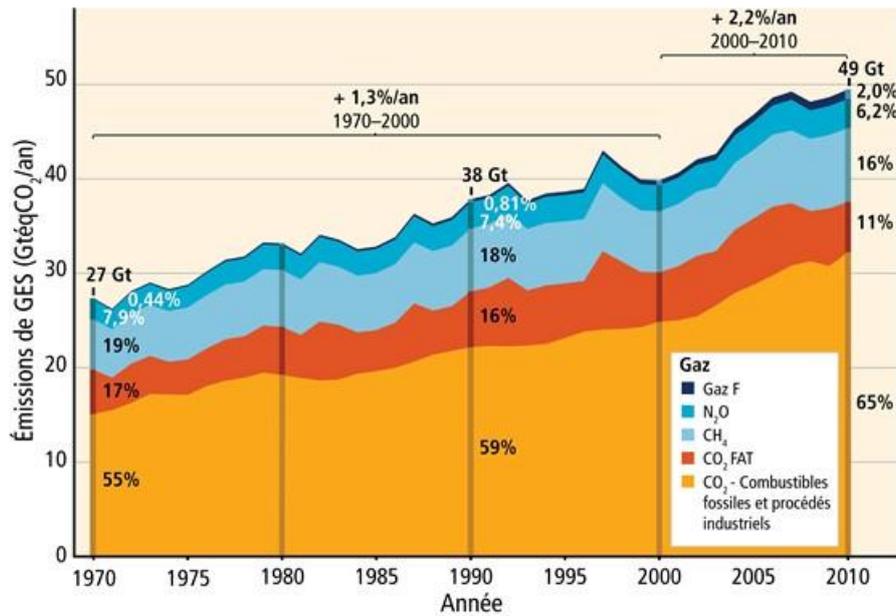


Figure 1.2. Evolution des émissions des GES entre 1970 et 2010 (GIEC, 2014).

Le secteur du bâtiment, comme le secteur industriel et agricole, est au cœur du développement durable et doit donc à son tour prendre conscience des chiffres alarmants puisque, sur le total des émissions de GES recensées en 2010, il a été montré que ce secteur est responsable de d'environ 20% du total des émissions à l'échelle mondiale (Fig. 1.3). Les émissions de GES générées par le bâtiment proviennent essentiellement de la combustion de l'énergie fossile durant son fonctionnement (chauffage, électricité, cuisson, eau chaude sanitaire (ECS)). Néanmoins, l'évaluation de l'impact environnemental du bâtiment devrait également considérer celles engendrées durant la phase de construction, de maintenance et même encore de déconstruction (Chamoïn, 2013).

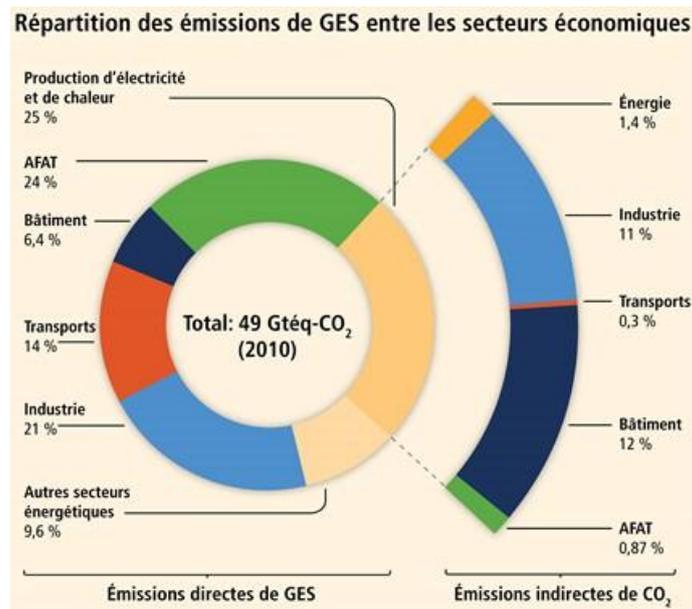


Figure 1.3. Répartition des émissions totales de GES entre les secteurs économiques en 2010 (GIEC, 2014).

Au niveau de la relation entre le secteur du bâtiment et le développement durable, les changements climatiques dues aux émissions de GES ne sont pas les seuls à prendre en compte. En effet, l'épuisement des ressources naturelles (nécessaires pour la fabrication des matériaux de construction) est aussi un facteur qui doit être reconnu car les chiffres sur la consommation des matières premières, qui évoluent aussi rapidement ces dernières années indiquent que les quantités utilisées dans le secteur du bâtiment représente environ la moitié des ressources naturelles consommés (Mnasri, 2016).

1.1.2. Consommation énergétique

A travers la section précédente, nous avons souligné que la démarche développement durable signifie un progrès économique tout en évitant que les ressources naturelles disponibles soient épuisées. Toutefois, les chiffres publiés par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) montrent que les statistiques relatives à la consommation énergétique mondiale suivent une allure remarquablement croissante. Avant l'ère de la révolution industrielle, la consommation énergétique mondiale ne dépassait pas les 305 Mtep. Cependant, le dernier rapport de l'AIE (IEA, 2020) montre que la consommation énergétique finale a franchi les 9937 Mtep en 2018. Par rapport à celle enregistrée pour l'année 1973 (4660 Mtep), cette consommation représente une hausse dépassant le double (Fig. 1.4). Selon le même rapport, avec 21% de la consommation totale d'énergie, le secteur résidentiel demeure à la troisième place dans le classement des secteurs énergivores après le secteur de l'industrie et du transport qui consomment, respectivement, 30 et 29%. Comparée avec celle saisie en début du siècle (2000), la consommation du secteur résidentiel a diminué d'environ 4%. Ceci parce que de nombreux pays ont commencé à développer des stratégies qui leur permettent d'atteindre une meilleure efficacité énergétique.

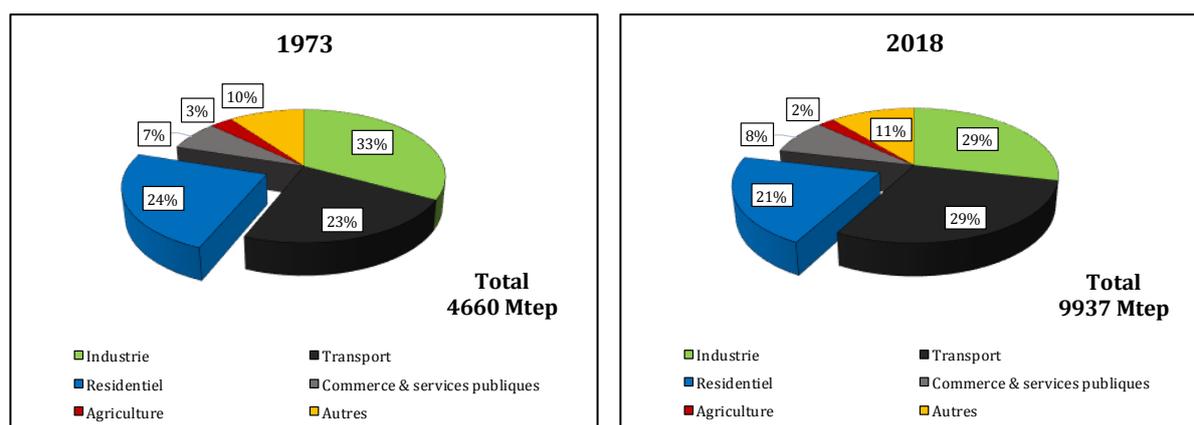


Figure 1.4. Répartition de la consommation énergétique par secteur. A gauche en 1973, à droite en 2018.

En Algérie, bien que la cinétique d'augmentation de l'énergie totale présente une tendance similaire à celle remarquée à l'échelle mondiale (la consommation énergétique a doublé entre 2004 et 2014), la part du secteur du bâtiment reste nettement supérieure. Selon les

statistiques de l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'utilisation de l'Energie (APRUE) en 2017 (APRUE, 2017), le secteur du bâtiment domine le classement des secteurs énergivores avec 43% de la consommation finale du pays (Fig. 1.5). L'Algérie, qui s'est engagée durant les COPs 21-22 à réduire sa consommation énergétique de 9% à l'horizon 2030, doit faire face non seulement à son climat semi-aride, mais aussi aux défis de développer son parc immobilier nécessitant sans doute une augmentation certaine de la consommation énergétique. L'enjeu économique est de taille, et donc la recherche d'une meilleure efficacité énergétique dans le bâtiment constitue un des plus grands défis pendant les prochaines années.

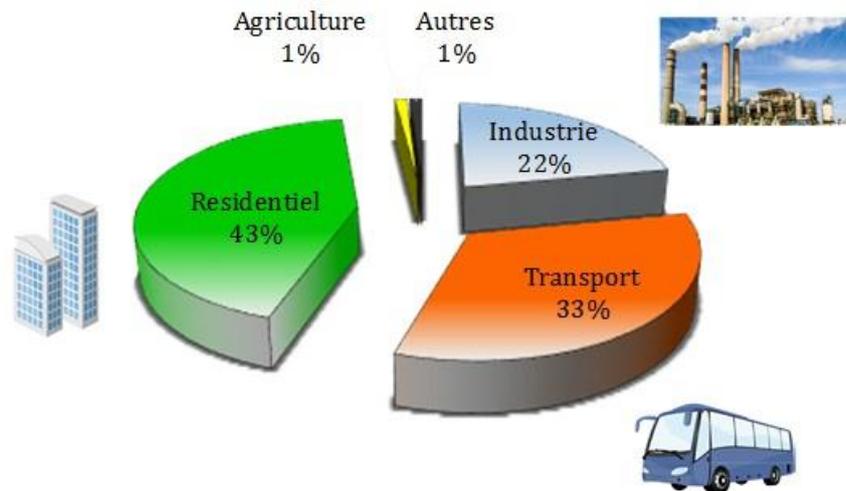


Figure 1.5. Répartition de la consommation énergétique en Algérie (APRUE, 2017).

1.2. Réglementation thermique

1.2.1. Un bref historique

Historiquement, c'est suite au choc pétrolier de 1973 que le monde a pris conscience de la nécessité de réduire sa consommation énergétique en générale, et dans le secteur du bâtiment en particulier (Belleudy, 2016). Ainsi, la législation qui est en charge de réglementer les impacts du secteur du bâtiment est relativement récente. En Europe, la naissance des règlements thermiques a commencé avant le début du XXI^{ème} siècle. Néanmoins, en 2002 la parution de la Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (DEPEB) qui impose aux États de se doter d'une série d'outils pour limiter la consommation des bâtiments (en instaurant notamment des exigences minimales pour les constructions neuves) a constitué une véritable révolution au niveau des règlements thermiques (Nozahic, 2012). Dès lors, les états de l'union européenne se retrouvaient face à la nécessité d'adapter leurs codes afin de répondre aux exigences minimales qui n'ont pas cessé d'être de plus en plus sévères.

1.2.2. L'exemple de la réglementation thermique française

En France, avant toute chose, il est primordial de rappeler que près de la moitié du parc bâti a été construite avant 1970, ceci signifie d'une part l'absence des dispositifs d'isolation thermique et indique d'autre part, que le flux de construction neuves est relativement faible (Chabannes, 2015).

Le premier choc pétrolier survenu en 1973 a conduit à l'instauration d'une première réglementation thermique (RT 1974) fixant des limites de déperditions de chaleur moyennant la mise en place d'une couche d'isolation au niveau des parois extérieures ainsi que l'installation de systèmes de renouvellement d'air. Applicable uniquement aux bâtiments d'habitation neufs, la RT 1974 avait pour objectif de baisser de 25% la consommation énergétique des bâtiments.

Quelques années après le deuxième choc pétrolier de 1979, la RT 1982 et puis la RT 1988 ont vu le jour. Par rapport à la RT 1974, la réglementation thermique RT 1988 qui s'est étendue aux bâtiments tertiaires, visait à réduire la consommation énergétique des bâtiments de 20% en définissant de nouveaux critères tels que le coefficient de déperdition de chaleur tenant compte des apports internes, de l'orientation du bâtiment et des apports solaires (Rahim, 2015).

En ajoutant une exigence sur le confort d'été, l'inertie thermique et la protection solaire, la RT 2000 avait pour objectif de réduire de 20% la consommation des logements. En 2005, en reprenant les bases de la RT 2000 mais avec prise en compte du bioclimatisme et des énergies renouvelables, la RT 2005 qui est applicable aux bâtiments neufs et existants cherchait une nouvelle fois à améliorer de 15% la performance énergétique des bâtiments.

Entrée en vigueur depuis Janvier 2013 et s'appliquant à tous les projets de construction en France, la RT 2012 exige une consommation maximale de 50 kWh/(m².an), portant sur le chauffage, la climatisation, la ventilation et la production de l'ECS. En visant des bâtiments neufs à énergie positive (BEPOS), c'est-à-dire produisant davantage d'énergie (chaleur, électricité) qu'ils en consomment pour leur fonctionnement, la RT 2020 devrait normalement entrer en vigueur cette année. L'objectif derrière est de généraliser les dits, Bâtiments à Basse Consommation (BBC). En résumé, entre 1974 et 2020, l'amélioration de la RT française a été clairement visible au fil du temps. En termes de chiffres, l'exigence réglementaire n'a pas été seulement réduite, mais plutôt elle est passée du négatif au positif (Fig. 1.6).

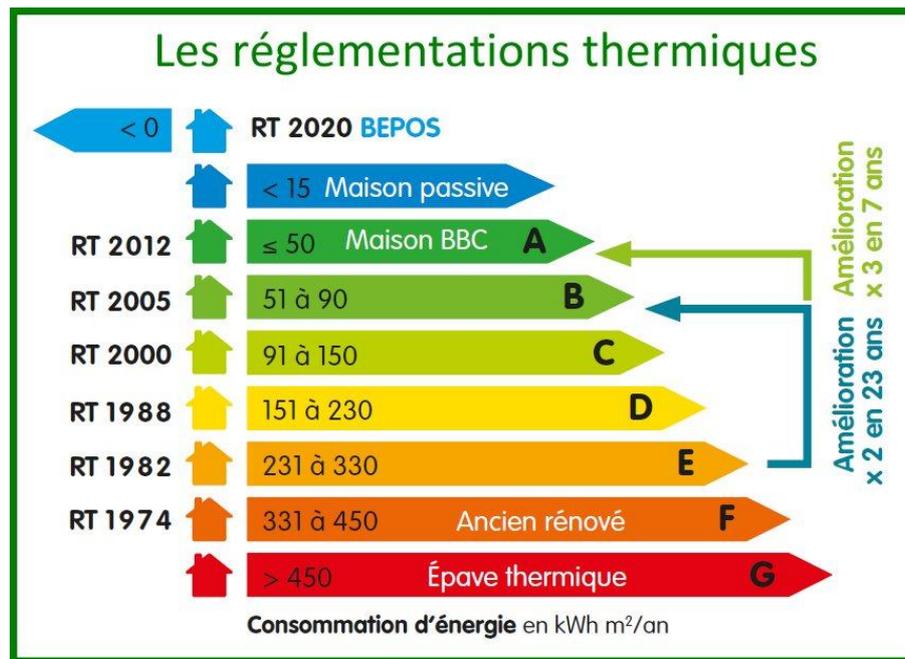


Figure 1.6. Evolution des règlements thermiques français (Source : 360m2.fr).

1.2.3. Réglementation algérienne

Dans la section 1.1.2, il a été mis en évidence que le secteur du bâtiment demeure à la tête du classement des secteurs énergivores en Algérie. Ainsi, depuis quelques années, le gouvernement algérien s'est lancé dans une politique de maîtrise de l'énergie à travers la mise en place des lois portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs. La réglementation thermique algérienne, contrairement à la RT française qui a connue plusieurs améliorations, reste encore maigre en matière d'exigences. La première RT algérienne date de 1999 où le ministère du logement et de l'urbanisme a élaboré le premier code énergétique algérien du bâtiment. Ce code, qui est divisé en deux documents techniques réglementaires (DTR) : un pour l'hiver DTR C2.3 et un deuxième pour l'été DTR C3.4, visait à baisser la consommation destinée au chauffage de 20-30% (Imessad et coll., 2017). Après plus de 16 ans, à la suite de la COP21 où l'Algérie s'est engagée à réduire sa consommation énergétique, une nouvelle version de la RT algérienne a été établie. Par rapport à la première RT, la nouvelle version de la réglementation a montré les modifications suivantes :

- Renforcement des exigences,
- Définition d'un nouveau zonage thermique.

Le suiveur des engagements algériens durant les événements sur la l'efficacité énergétique peut clairement observer la volonté d'aller vers une stratégie d'amélioration de l'efficacité énergétique. Cependant, il faut savoir que l'adaptation de la réglementation thermique s'impose comme l'une des premières étapes à entamer afin d'arriver aux objectifs tracés.

1.3. Haute qualité environnementale

Dans une optique d'aller vers une qualité environnementale permettant de maîtriser les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur tout en assurant un environnement intérieur satisfaisant, la démarche Haute qualité environnementale (HQE) a vu le jour en 1990 et pris, d'année en année, une ampleur grandissante (Bennai, 2018). Contrairement à la réglementation thermique qui présente un aspect obligatoire, la démarche HQE est fondée sur le principe du volontariat ; en faisant appel à la responsabilité du maître d'ouvrage en termes d'économie d'énergie, d'impact sanitaire et de confort (Rahim, 2015). Très utile, cette démarche vise 14 cibles environnementales regroupées en deux domaines (Environnement intérieur et environnement extérieur) et quatre familles, à savoir : l'écoconstruction, l'éco-gestion, le confort et la santé (Tableau 1.1).

Tableau 1.1. Les 14 cibles de la démarche HQE (Chamoin, 2013).

Maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur		Créer un environnement intérieur satisfaisant	
Cibles d'écoconstruction	1. Relation harmonieuse des Bâtiments avec l'environnement immédiat	Cibles de confort	8. Confort hygrométrique
	2. Choix intégré des produits et des matériaux de construction		9. Confort acoustique
	3. Chantier à faibles nuisances		10. Confort visuel
4. Gestion de l'énergie	11. Confort Olfactif		
Cibles d'éco-gestion	5. Gestion de l'eau	Cibles sanitaires	12. Qualité sanitaire des espaces
	6. Gestion des déchets d'activité		13. Qualité sanitaire de l'air
	7. Gestion de l'entretien et de la maintenance		14. Qualité sanitaire de l'eau

1.3.1. Le programme ECO-BAT : un programme à multiplier

Face à la pauvreté du cadre réglementaire en Algérie, quelques organes ont décidé d'adopter la démarche HQE à travers la mise en place de programmes de bâtiments à basse consommation énergétique. Le programme Eco-Bat lancé par l'APRUE et portant sur la réalisation de 600 logements à haute performance énergétique est un exemple qui devrait être multiplié. L'APRUE, derrière le lancement de ce programme, voulait atteindre les objectifs suivants :

- L'amélioration du confort thermique dans les logements et la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation,
- La mobilisation des acteurs du bâtiment autour de la problématique de l'efficacité énergétique,
- La réalisation d'une action démonstrative, preuve de la faisabilité des projets à haute performance énergétique en Algérie,
- La provocation d'un effet d'entraînement des pratiques de prise en considération des aspects de maîtrise de l'énergie dans la conception architecturale.

Les 600 logements visés à travers ce programme sont implantés dans des wilaya pilotes et doivent obéir aux principes de confort thermique et d'économie d'énergie dans la conception architecturale, le choix des matériaux de construction ainsi que dans les détails de mise en œuvre (Source : aprue.org.dz).

1.4. Confort thermique et désordres liées à l'humidité

1.4.1. Confort thermique

Selon l'ouvrage de Thellier et coll., 2012 cité dans (Batier, 2016), la moitié de la population mondiale vit dans des villes et passe près de 90% de son temps à l'intérieur des bâtiments. Les bâtiments jouent donc le rôle de vraies machines thermiques ayant l'objectif de fournir les meilleures conditions climatiques au profit de l'être humain.

Assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur c'est autrement dit satisfaire les besoins des occupants, donc assurer leur confort. Illustré dans le monde de l'habitat par un logement confortable où les occupants se sentent bien, le confort thermique est défini comme un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique. Contrairement à ce qui est généralement pensé, le confort thermique est une notion complexe car elle ne signifie pas une simple régulation de la température de l'air intérieur mais plutôt les paramètres suivants (Roulet, 2008):

- Température de l'air et des surfaces environnantes,
- Vitesse relative de l'air et le degré de turbulence,
- Humidité relative, pression de vapeur d'eau ou même la qualité d'air que l'on respire.

Concernant la régulation de la température, elle peut se faire via la maîtrise de l'échange et la diffusion de chaleur entre la bâtiment et l'individu. Ces échanges se manifestent selon 3 principes (Denis Lucas, 2015) :

- Conduction : qui s'effectue par contact direct, et qui dépend de la nature des matériaux de surface,
- Convection : qui se manifeste à cause d'un problème d'étanchéité à l'air générant un mouvement d'air,
- Rayonnement : qui est directement lié aux matériaux de surface du mur, les composants de la structure ainsi que le niveau d'isolation.

Bien qu'il soit difficilement ressenti en cas des humidités relatives variant entre 40 et 60% à l'intérieur du logement, l'impact de l'humidité sur le confort des habitants existe. Ainsi, une humidité trop faible (< 30%) ou trop élevée (> 70%) augmente sans doute les risques de problèmes d'inconfort.

Un air sec permet à certains virus de se développer, multiplie les irritations accrues aux pollutions d'air intérieur du fait d'un affaiblissement du seuil de perception des odeurs et provoque les rhinites allergiques, l'asthme et les infections respiratoires. A contrario, un degré d'humidité élevé donne naissance à un développement important des microbes et des mites, favorise les interactions chimiques et entraîne aussi les allergies et l'asthme.

Entre ceci et cela, un confort optimal et un air sain peuvent être identifiés pour des humidités relatives oscillant entre 40 et 60% (Fig. 1.7).

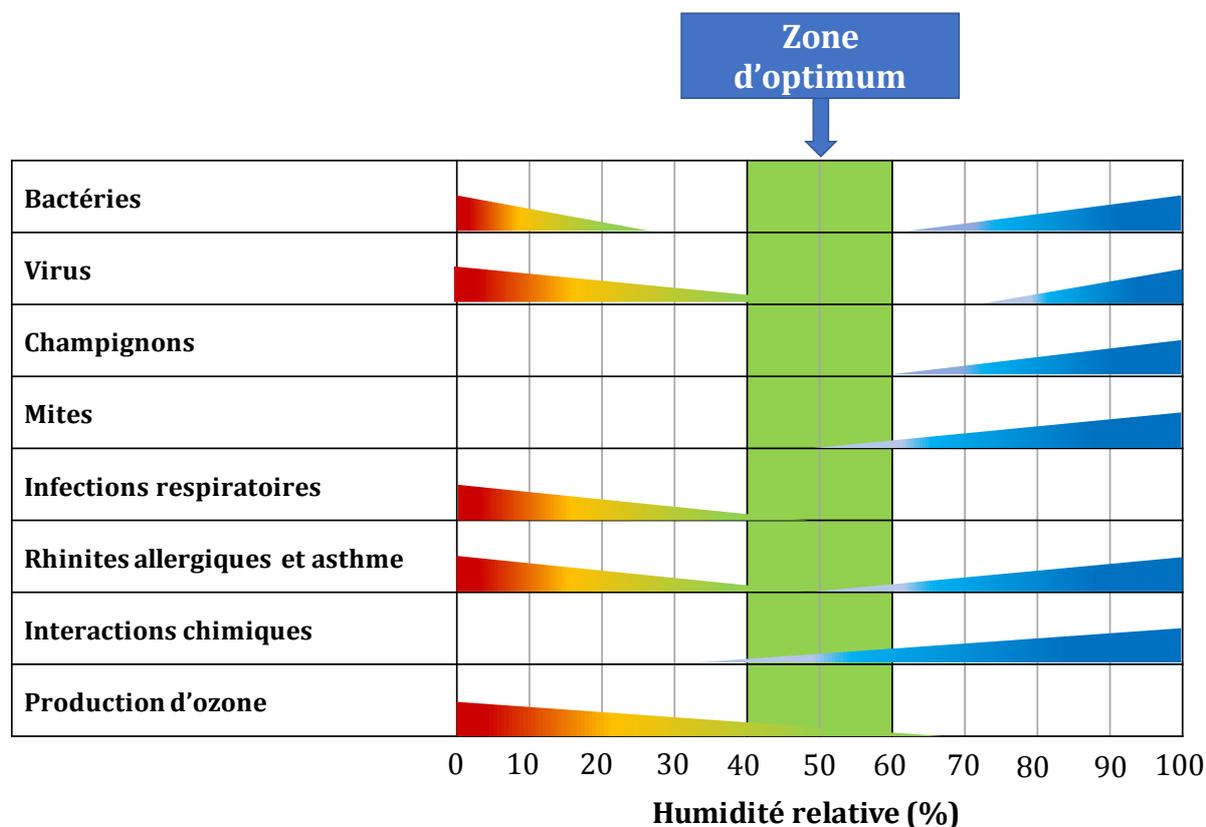


Figure 1.7. Plages d'humidité faible, élevée et optimale.

1.4.2. Désordres liés à l'humidité

En plus de l'état d'inconfort que peut causer la variation de l'humidité dans un bâtiment, une augmentation de l'humidité relative à l'intérieur de ce bâtiment présente une action directe sur l'enveloppe qui présente un terrain de transfert de chaleur et de masse. En effet, l'humidité qui peut être d'origine extérieure (pluie, neige, remontée capillaire...) ou intérieure (à partir de l'activité des usagers) représente une vraie source de pathologies au niveau des parois et cause dans de nombreux cas des désordres pouvant aller jusqu'à la ruine du bâtiment (Bennai, 2018; Berger, 2014). Ainsi, on trouve dans ce qui va suivre les principaux ennuis qui peuvent être causés par une hygrométrie défavorable (Fig. 1.8) (Ferroukhi, 2015):

- Altération des performances thermiques,
- Dégradations structurelles par baisse de performances mécaniques et des variations dimensionnelles,
- Manifestation des cycles gel/dégel qui finissent par une altération de l'ambiance,
- Corrosion des aciers,
- Création d'un climat favorable à la croissance de divers micro-organismes et des moisissures parfois toxiques ou allergènes,

- Décollement des peintures et des crépis.



(a) apparition de moisissures (source : francehumidie.fr)



(b) décollement de peinture (source : maison et travaux.fr)

Figure 1.8. Exemples de pathologies liées à un excès d'humidité.

1.5. Isolation thermique

1.5.1. De l'intérêt d'isolation

D'un point de vue technique, les solutions et les produits technologiques sont favorisés tant pour réduire la consommation énergétique du bâtiment. En effet, une implantation réfléchie, une isolation performante et un choix pertinent des matériaux sont autant de solutions qui peuvent non seulement réduire la facture énergétique mais aussi : améliorer le confort thermique, limiter les déperditions énergétiques et minimiser l'impact sur l'environnement (Nguyen, 2013).

Dans une maison mal isolée, l'enveloppe représente une véritable passoire thermique. Les déperditions thermiques sont importantes et peuvent engendrer des consommations d'énergie importantes pour le chauffage autant que pour la climatisation. Ces déperditions peuvent se manifester à plusieurs endroits du bâtiment. Selon Beguin (Beguin, 2006), elles sont de l'ordre de 30% au niveau des toits, 25% pour les murs, 20% pour les renouvellements d'air, 13% pour les ouvertures, 7% pour les sols et 5% pour les ponts thermiques (Fig. 1.9).

Comme résultat, avec une bonne isolation thermique des différents éléments de l'enveloppe, des économies d'énergies pouvant atteindre les 60% peuvent être réalisées (Sotehi, 2010).

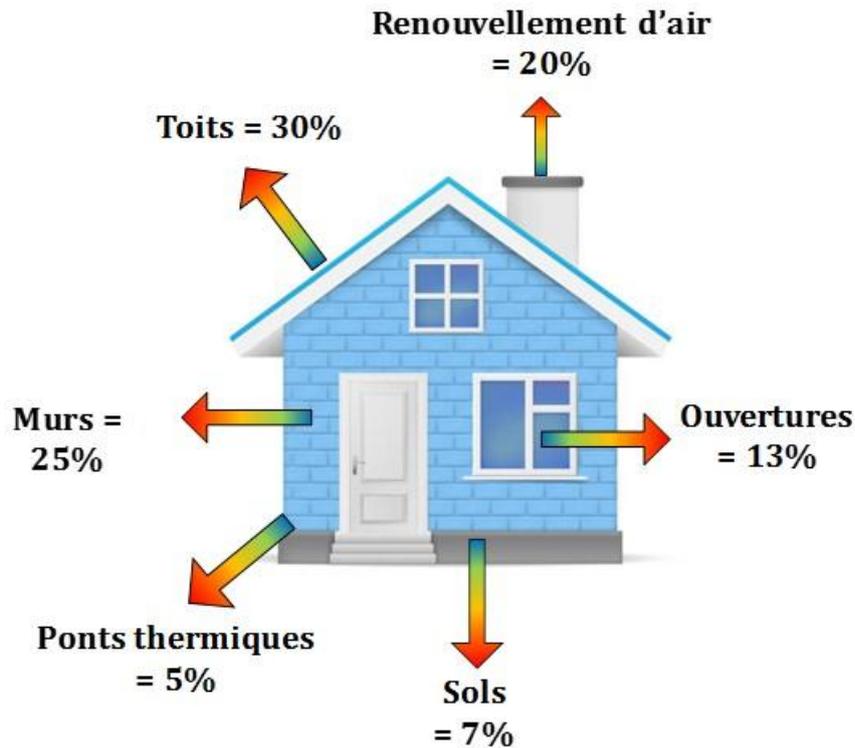


Figure 1.9. Sources de déperditions thermiques dans un logement.

1.5.2. Techniques d'isolation

Selon le type de construction et des éléments à isoler, on peut distinguer trois types d'isolation thermique (Fig.1.10), à savoir : isolation intérieure, extérieure et répartie.

1.5.2.1. Isolation intérieure

Très répandu, ce type d'isolation peut être appliqué à l'isolation des murs et des toits en faisant appel à une application directe de l'isolant (panneaux, laines minérales ou végétales ...) sur la face intérieure de la paroi. Il permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire. En revanche, l'utilisation de cette isolation conduit à la réduction de l'espace intérieur, nécessite le traitement des ponts thermiques et doit être accompagnée d'une isolation des combles pour traiter les déperditions par la toiture.

1.5.2.2. Isolation extérieure

Comme son nom l'indique, l'isolation extérieure se fait en appliquant une couche d'isolant (minéral, végétal ou synthétique) de faible épaisseur sur le côté extérieur du mur du logement. Comparée à l'isolation intérieure, elle est considérée plus efficace puisqu'elle possède l'avantage d'éliminer la quasi-totalité des ponts thermiques et de ne pas réduire la surface intérieure de l'édifice. Cependant, en plus d'être plus onéreuse, elle présente l'inconvénient d'être difficile à appliquer sur certains anciens bâtiments.

1.5.2.3. Isolation répartie

Commençant à avoir un marché de plus en plus vaste, l'isolation répartie consiste à incorporer des matériaux d'origine minérale, végétale ou pétrochimique dans leur composition. Ce sont des matériaux (bétons ou mortiers composites) légers qui possèdent des performances thermiques très intéressantes. Ce type d'isolation est généralement destiné aux constructions neuves. Bien que les matériaux utilisés pour cette isolation peuvent être de natures différentes, ceux qui ont une nature végétale restent les plus renouvelables, les plus recyclables et ne présentent aucune nocivité envers la santé publique.

Les prochains paragraphes font donc l'objet de discussion autour de ce type de composites biosourcés.

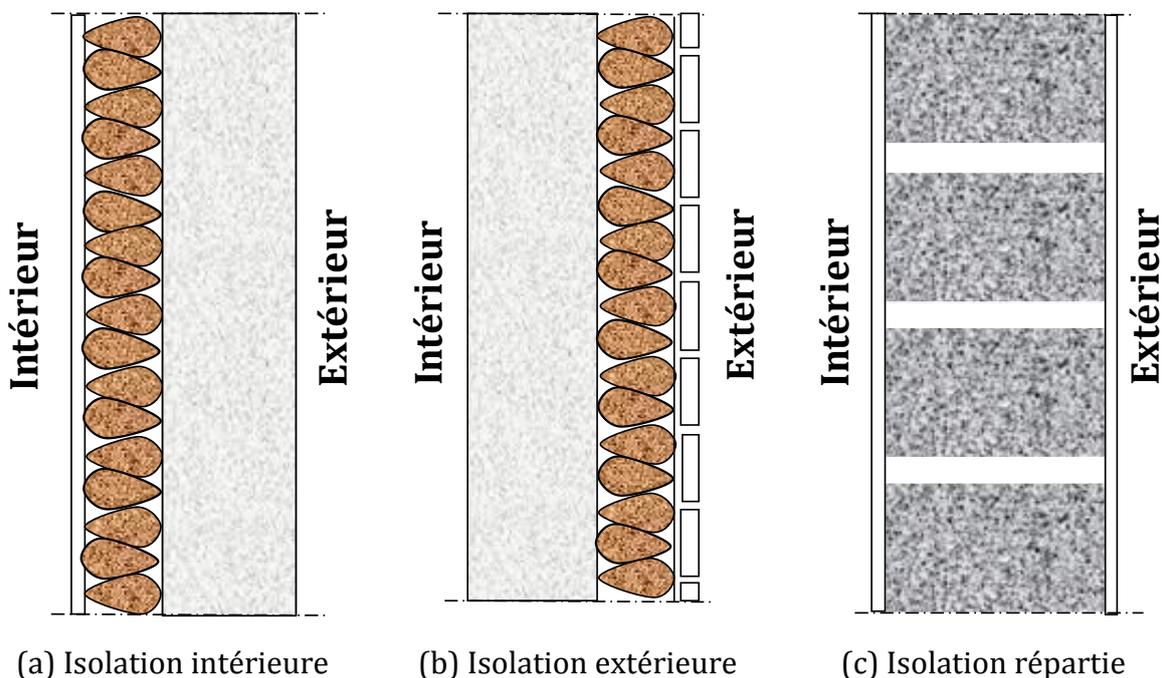


Figure 1.10. Différents types d'isolation thermique.

1.6. Agro-bétons : une réponse aux défis

1.6.1. De quoi s'agit-il ?

Le recours aux matériaux biosourcés représente aujourd'hui une solution prometteuse qui permet de faire face au pari de la réduction de l'empreinte environnementale du bâtiment (Dutreix et coll., 2020). Par définition, un matériau de construction est reconnu comme étant biosourcé (ou agro-matériau) lorsqu'il incorpore dans sa composition, une part d'une ou plusieurs biomasses d'origine animale ou végétale (Umurigirwa-Vasseur, 2014).

1.6.2. Pourquoi le recours aux bétons biosourcés ?

Que ce soit pour les travaux de rénovation thermique des bâtiments ou de constructions neuves, une grande vigilance doit être accordée pendant le choix des matériaux de construction constituant nos habitations de manière générale.

A cet égard, les bétons biosourcés représentent une réponse potentielle en termes de matériaux capables de remplir les critères de constructions durables et ayant une faible consommation énergétique, combinant ainsi les bénéfices environnementaux et ceux économiques. En effet, ces bétons disposent de plusieurs propriétés qui en font des matériaux de choix, en l'occurrence (Beaussire, 2020) :

- Un comportement hygrothermique permettant une bonne gestion du transfert d'humidité,
- Grâce à leur déphasage important, ils contribuent considérablement à l'amélioration du confort d'été,
- Par leur légèreté, ils offrent un confort de pose apprécié des artisans et des compagnons qui assurent leur mise en œuvre,
- Car ils intègrent des matières premières renouvelables, ils permettent de protéger les ressources minérales menacées d'épuisement telles que les graviers et sables.

Au-delà des qualités précédemment citées, l'utilisation de matériaux biosourcés, par le biais de la biomasse qui possède un grand potentiel de stockage de carbone, concourt considérablement à la réduction de l'impact environnemental des bâtiments. L'analyse du cycle de vie des matériaux biosourcés révèle que ces derniers permettent un stockage de CO₂ pendant plusieurs décennies. En fin de vie, ce carbone peut être valorisé via une deuxième vie (réemploi) dans d'autres constructions (Fig. 1.11).

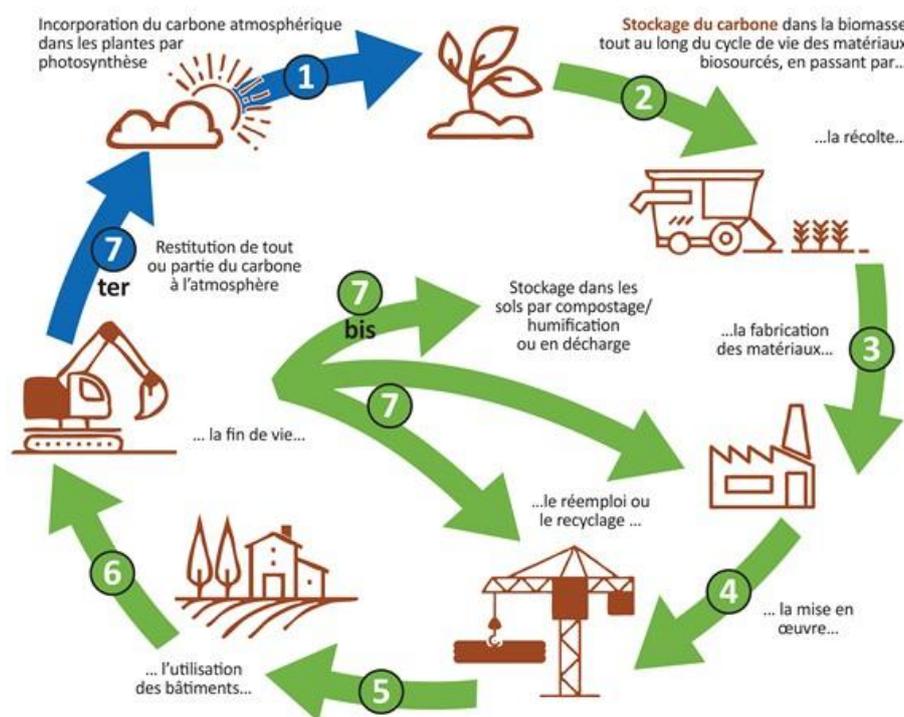


Figure 1.11. Cycle de vie des matériaux biosourcés (Nomadéis et Rémy, 2020).

1.6.3. Différentes utilisations

Grâce à leurs avantages multiples, les bétons biosourcés trouvent aujourd'hui un marché de plus en plus grandissant. Qu'il s'agisse de la rénovation du bâti ancien ou pour les constructions nouvelles, ce type de matériaux trouve aujourd'hui de nombreuses applications en tant que matériaux d'enveloppe, notamment pour les travaux d'isolation (sous-toiture, plancher et sol), pour la réalisation des cloisons et des parois extérieures (blocs de béton ou béton banché) ou même pour les enduits muraux isolants et décoratifs (Ingrand et coll., 2013; Umurigirwa-Vasseur, 2014) (Fig. 1.12).

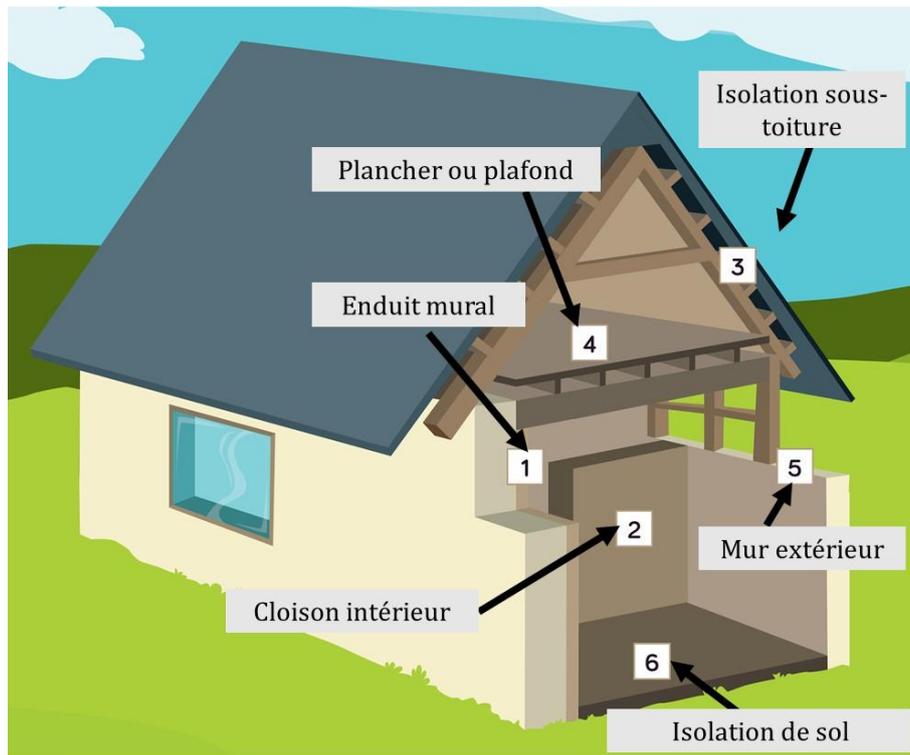


Figure 1.12. Différentes applications des bétons biosourcés (Ingrand et coll., 2013).

Les bétons biosourcés peuvent être mis en œuvre de plusieurs manières, à savoir, par banchage, projection ou même par préfabrication sous formes de blocs qui vont être maçonnés sur chantier. Les techniques de banchage et préfabrication sont généralement destinées pour l'utilisation en constructions neuves. En revanche, les bétons projetés sont fréquemment utilisés dans des applications de rénovation (Chabannes, 2015).

Il est vrai que les applications des bétons biosourcés sont nombreuses. Cependant, en fonction de l'application visée, les bétons utilisés doivent montrer des caractéristiques hygrothermiques et des performances mécaniques minimales recommandées par les règles professionnelles. Par exemple, en France, selon les recommandations proposées par l'organisme Construire en chanvre et acceptées par l'Agence Qualité Construction (AQC), pour la réalisation d'un mur banché, il faut que le béton présente respectivement un minimum de 0.2 MPa et 15 MPa pour la résistance à la compression et le module d'élasticité (Tableau 1.2).

Tableau 1.2. Performances mécaniques minimales des bétons de chanvre (Chamoin, 2013).

Performance	Mur	Toit	Sol
Résistance à la compression (MPa)	> 0,2	> 0,05	> 0,3
Module d'élasticité (MPa)	> 15	> 3	> 15

1.6.4. Panorama des propriétés des bétons biosourcés

Après avoir présenté leur intérêt, leurs applications ainsi que leurs performances mécaniques minimales recommandées, nous nous intéresserons dans les lignes qui vont venir à une présentation des propriétés physiques, hygrothermiques, microstructurales et mécaniques des bétons biosourcés rencontrés dans la littérature. Le panorama qu'on va présenter ici concerne les propriétés de différents matériaux, à savoir : Le béton de chanvre, le béton de lin, le béton de paille et le béton de bois... etc.

1.6.4.1. Propriétés physiques

1.6.4.1.1. Milieu poreux

Dans le domaine de la physique du bâtiment, les matériaux qu'on utilise généralement pour la construction de nos maisons sont désignés comme étant des milieux poreux ou mieux encore, des endroits de manifestation de différents transferts de chaleur, d'air et de masse.

Un milieu poreux, comme son nom l'indique, est défini comme étant un solide formé d'une matrice rigide comportant des vides (isolés ou connectés) où peuvent se trouver une ou plusieurs phases fluides (liquides, gaz, vapeur), composant ainsi un espace poreux (Fig. 1.13) (Issaadi, 2016). Connus par sa forme géométrique complexe, le milieu poreux peut être décrit par le biais de différentes caractéristiques offrant l'information sur l'espace poral disponible (porosité et distribution porale) ainsi que sa géométrie (surface spécifique, tortuosité, etc.) (Ferroukhi, 2015).

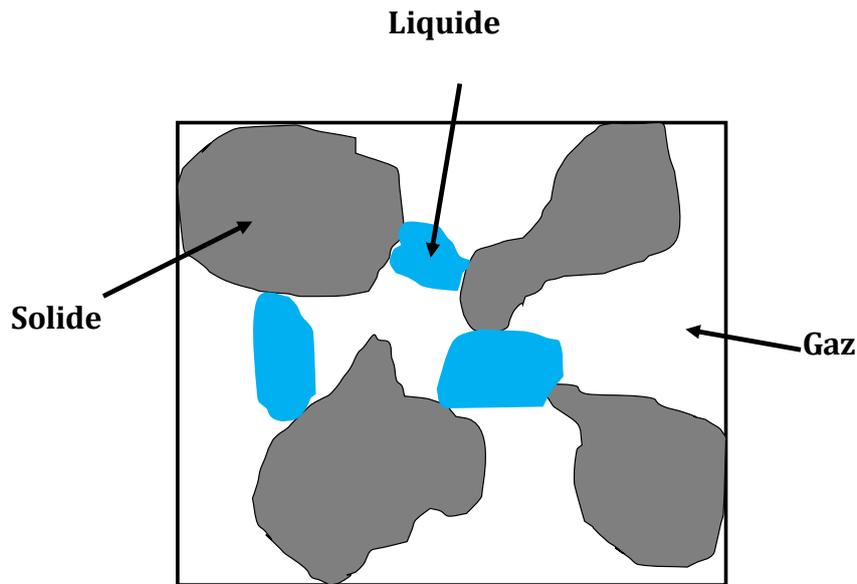


Figure 1.13. Représentation schématique d'un milieu poreux.

1.6.4.1.2. Masse volumique

La masse volumique est une propriété physique qui a fait couler beaucoup d'encre dans la littérature consultée sur les bétons biosourcés. Alors que celle des bétons ordinaires varie entre 2200 et 2600 kg/m³, la masse volumique des bétons biosourcés se situe largement au-dessous de 2000 kg/m³ et franchie dans plusieurs cas des valeurs inférieures à 500 kg/m³.

En fonction du type de la biomasse utilisée et son pourcentage, du type du liant minéral considéré ainsi que la méthode de mise en œuvre et de conservation des bétons, la masse volumique varie de manière remarquable (Chabannes, 2015). En utilisant des pourcentages massiques (11,5, 14,5 et 17,5%) et des tailles de lin variables, la masse volumique des bétons de lin a été évaluée par Benmahiddine et coll. (Benmahiddine et coll., 2020b). Au cours de cette étude, les auteurs ont trouvé que la masse volumique des bétons de lin varie entre 460 et 665 kg/m³. Alors que la taille des particules de lin (désigné par l'indice i dans un béton F_{ij}) n'a pas montré une grande influence, le pourcentage de ces derniers (défini par l'indice j , de manière que $j=1$ signifie un pourcentage de 11,5%, $j=2$ pour un pourcentage de 14,5% et $j=3$ correspond à 17,5% de lin) a engendré des différences de l'ordre de 27% quand ce pourcentage est passé de 11,5 à 17,5% (Fig. 1.14.a). Les auteurs de cette étude ont expliqué la variation de la masse volumique par la grande différence qui existe entre la masse volumique des particules végétales (environ 140 kg/m³) et celle du liant qui tourne autour de 1200 kg/m³.

Dans une autre étude, Belhadj et coll. (Belhadj et coll., 2016) ont rapporté que suivant la quantité des particules de paille d'orge introduite, la masse volumique des bétons de sable montrait des différences pouvant dépasser les 150 kg/m³. Par exemple, en partant de 0 à 15 kg/m³ de particules végétales, la masse volumique est passée de 2000 kg/m³ à environ 1850 kg/m³ (Fig. 1.14.b).

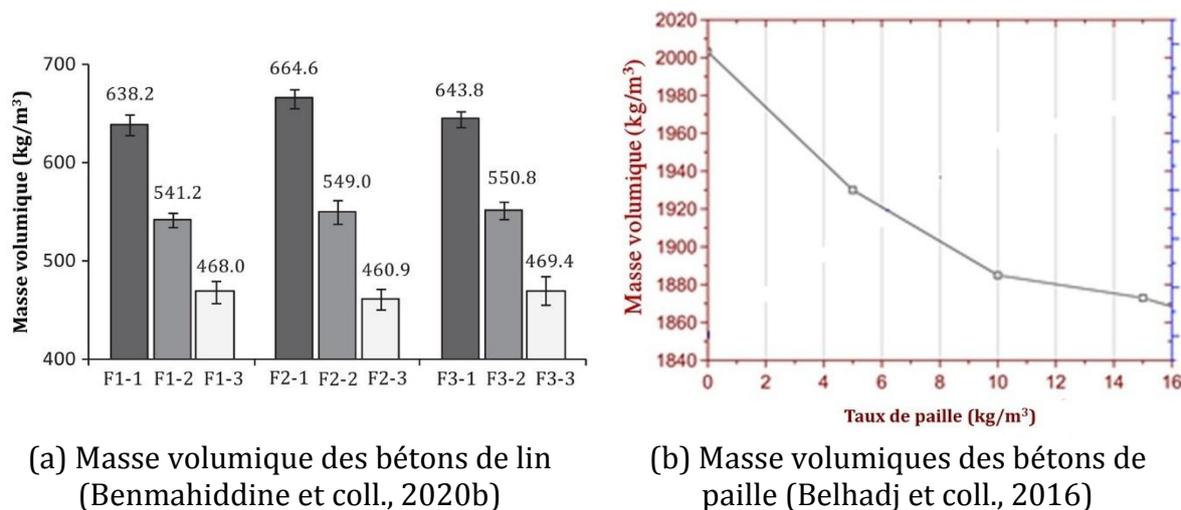


Figure 1.14. Masse volumique des bétons biosourcés.

1.6.4.1.3. Porosité

Durant les études réalisées jusque lors sur les bétons biosourcés, la porosité était un paramètre récurrent vu son importance dans la compréhension des différentes propriétés de transfert. En fonction de la formulation et de la méthode de détermination (porosité à l'eau, porosité au mercure ou tomographie aux rayons X) les bétons biosourcés présentent des porosités élevées variant entre 60 et 90% (Benmahiddine et coll., 2020a; Bourdot et coll., 2017; Lagouin et coll., 2019).

En obtenant une porosité de 58% pour un béton biosourcé à base de fibres de palmier dattier, Haba et coll. (Haba et coll., 2017) ont souligné que les bétons biosourcés qu'ils ont préparés présentent des valeurs très similaires à celles obtenues pour des bétons à base d'un autre béton à base de chanvre, confirmant donc que les bétons biosourcés présentent de fortes porosités. Ceci, selon Haba et coll. (Haba et coll., 2017) est attribué à la nature morphologique très poreuse des particules végétales.

A travers les études réalisées dans la littérature, les auteurs ont remarqué que cette porosité couvre une large gamme de pores et englobe dans la majorité des cas, trois classes définies par l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). On parle ici des gammes de micropores ($< 1\mu\text{m}$), mésopores (entre 1 et $150\mu\text{m}$) et macropores ($> 150\mu\text{m}$) (Laborel-Préneron et coll., 2018; Lagouin et coll., 2019).

Pour des bétons de chanvre-amidon, Bourdot et coll. (Bourdot et coll., 2017) ont annoncé que la porosité accessible qui est de l'ordre de 89% ne peut pas être associée à la porosité de l'amidon qui a une faible porosité. Elle est surtout attribuée à la porosité qui existe entre les granulats de chanvre et le liant. Cette dernière s'ajoute à la porosité intra-granulaire des particules de chanvre. La distribution porale des différents bétons produits a révélé que les trois classes de porosité existaient. Cependant leur proportion au sein des mélanges variait en fonction du taux de chanvre (HS8 : des bétons avec un ratio chanvre/amidon H/S = 8 et HS10 : des bétons avec des H/S = 10). L'augmentation du taux des particules végétales, en plus de l'augmentation de la porosité totale des bétons cause une multiplication de la quantité de micropores dans le mélange. La présence des

microporosités et des macroporosités était, selon Bourdot et coll. (Bourdot et coll., 2017) aussi fortement liée au pourcentage de chanvre (Fig.1.15).

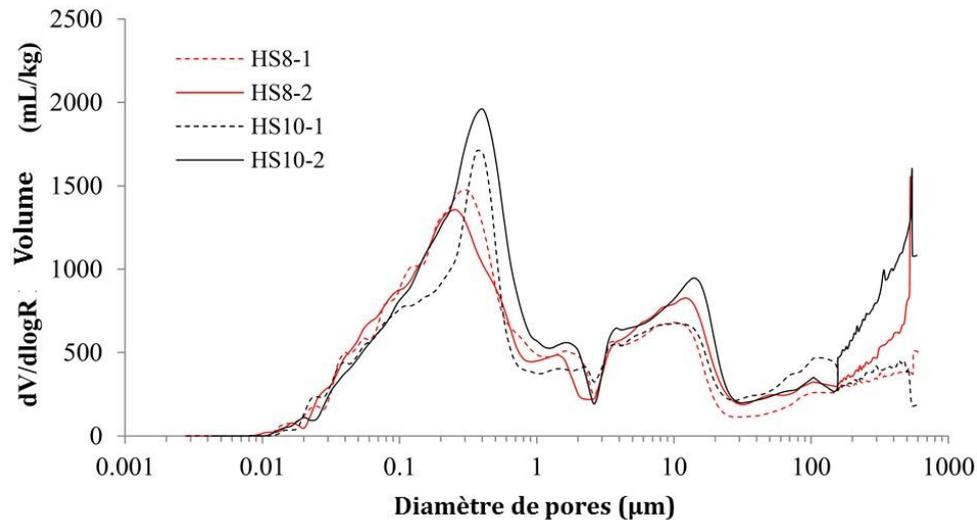


Figure 1.15. Distribution porale des bétons de chanvre contenant des ratios H/S différents (Bourdot et coll., 2017).

1.6.4.2. Propriétés thermiques

Etant une propriété thermique très importante dans le choix des matériaux de construction, la conductivité thermique a fait l'objet d'évaluation dans de nombreux travaux de recherches. Lors de ces travaux, il a été prouvé que cette propriété peut être liée à plusieurs paramètres, notamment, la masse volumique, la température, le dosage en liant ainsi que le pourcentage de particules lignocellulosiques (Cérézo, 2005).

Pour un béton de chanvre, Bourdot et coll. (Bourdot et coll., 2017) et Bennai et coll. (Bennai et coll., 2018), ont démontré que la conductivité thermique varie entre 0,07 et 0,14 W/(m.°K). En revanche, pour des bétons à base de tournesol, il a été rapporté que cette dernière oscille entre 0,06 et 0,18 W/(m.K) (Brouard et coll., 2018; Magniont, 2010). Les résultats trouvés sur les bétons biosourcés confirment le grand pouvoir isolant de ces derniers, ce qui favorise davantage leur utilisation pour les différents travaux de construction.

En plus de la conductivité thermique, la chaleur spécifique est aussi un paramètre qui a été couramment évalué. Par définition, la chaleur spécifique exprime la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré, la température d'un matériau donné. Donc, plus cette propriété est grande, plus le matériau a besoin de l'énergie pour se chauffer et donc, plus il est isolant.

Le travail bibliographique mené par Jami et coll. (Jami et coll., 2019) sur les propriétés des bétons à base de chanvre a aussi montré que le béton de chanvre possède une bonne capacité à retarder les phénomènes de transfert thermique. Ceci est principalement le résultat de sa chaleur spécifique élevée variant entre 1700 et 1900 J/(kg.°K) pour des humidités allant de 50 à 90%, selon les résultats rapportés dans le même travail. Les résultats de la chaleur spécifique viennent donc confirmer la bonne performance des bétons biosourcés.

Essayant de trouver une relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des bétons biosourcés, l'étude bibliographique réalisée par Brouard et coll. (Brouard et coll., 2018) a révélé l'existence d'une relation quadratique forte entre la masse volumique et la conductivité thermique des bétons biosourcés. Cette relation a été trouvée pour des masses volumiques variant entre 200 et 800 kg/m³.

Dans une vision similaire, le travail bibliographique que nous avons réalisé a permis de trouver une relation parfaitement exponentielle pour une plage de masse volumique plus importante (100-1700 kg/m³). La relation qu'on a réussi à tracer est en bonne concordance avec ceux établies précédemment par Brouard et coll. (Brouard et coll., 2018) (quadratique) et Lagouin et coll. (Lagouin et coll., 2019) (linéaire) pour des plages de masse volumique inférieure à 800 kg/m³. En revanche, au-delà de cette valeur la relation a tendance à être plutôt exponentielle (Fig. 16).

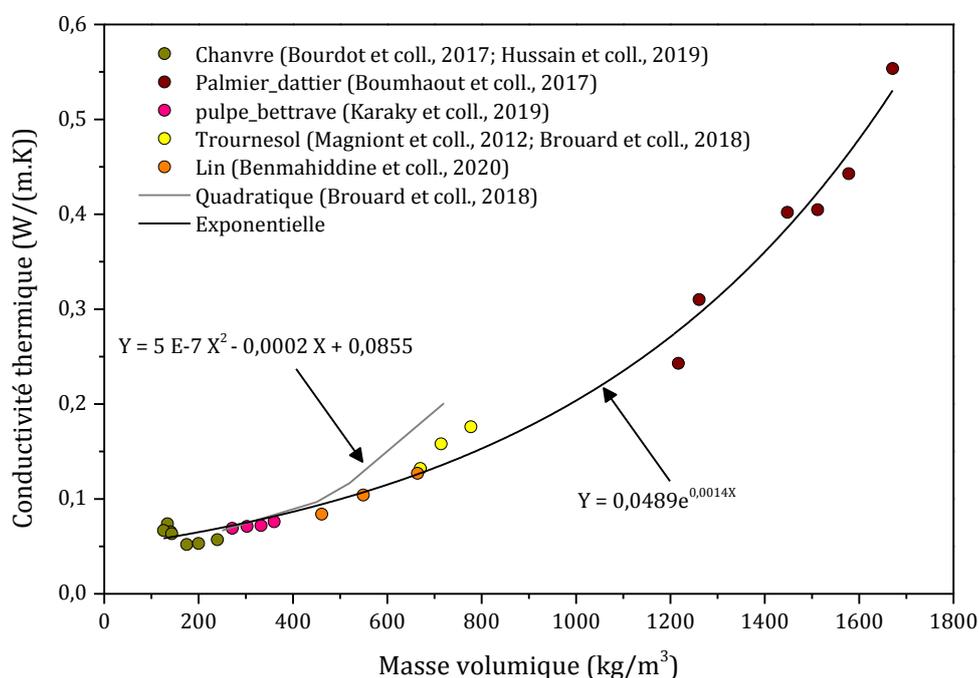


Figure 1.16. Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des bétons biosourcés.

Souvent, la conductivité thermique ainsi que la chaleur spécifique des bétons sont mesurées pour une température de l'ordre de 23 °C. Cependant, il a été démontré que ces propriétés peuvent varier en fonction de la température. Dans une plage de température variant entre 10 et 30 °C, Bennai et coll. (Bennai et coll., 2018), ont conclu que la conductivité thermique du béton de chanvre varie suivant une relation linéaire de telle manière que plus la température augmente, la conductivité thermique augmente aussi (Fig. 1.17).

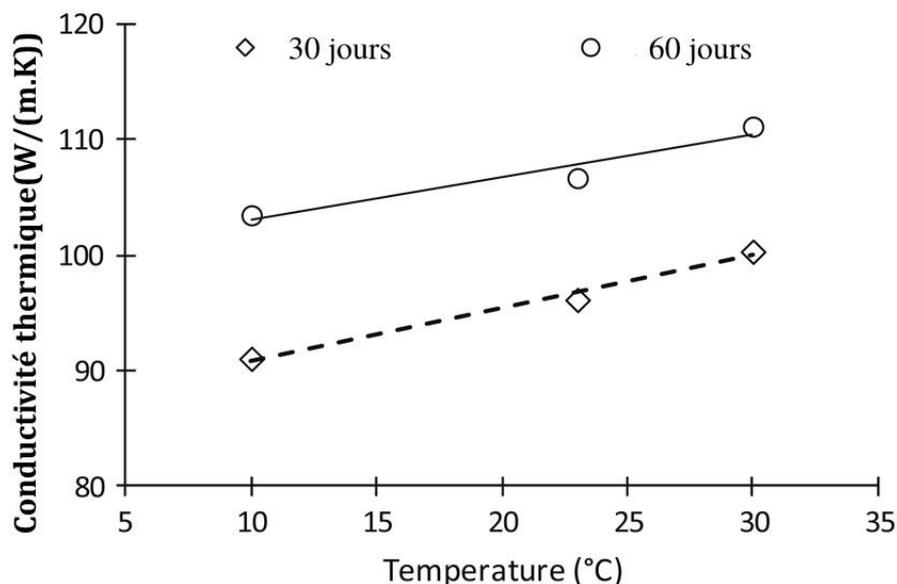


Figure 1.17. Influence de la température et l'âge sur la conductivité thermique des bétons de chanvre (Bennai et coll., 2018).

1.6.4.3. Propriétés hydriques

Avant de commencer la présentation des résultats de la littérature sur les propriétés hydriques des bétons biosourcés, il est judicieux de présenter les mécanismes régissant le stockage (fixation) et la diffusion de l'humidité dans les milieux poreux. Cette partie sera utile pour la compréhension et la justification des résultats recueillis ou même obtenus dans notre étude et qui seront présentés dans les prochains chapitres.

1.6.4.3.1. Stockage d'humidité dans les milieux poreux

Les bétons biosourcés, similairement à tous les matériaux poreux, disposent d'une habilitation d'échanger de l'humidité relative avec le milieu environnant. Lorsque ce matériau est en contact avec un air dont son humidité augmente au voisinage de la surface du matériau, les molécules d'eau présentes dans cet air viennent se fixer sur la surface de la matrice solide du matériau ; ce phénomène réversible est appelé l'adsorption.

Pendant ce phénomène d'adsorption, les molécules d'eau se mettent couche après couche à la surface des pores sous l'impact des forces de Van Der Waals. Au prorata de la hausse d'humidité, l'adsorption peut être résumée en trois étapes, à savoir : (i) une adsorption monocouche sous forme de vapeur pour les faibles humidités relatives, (ii) une adsorption multicouches correspondante à l'empilement d'autres couches de molécules sur la première couche, constituant donc une phase liquide et (iii) condensation capillaire pour des humidités relatives importantes (Fig. 1.18) (Rahim, 2015).

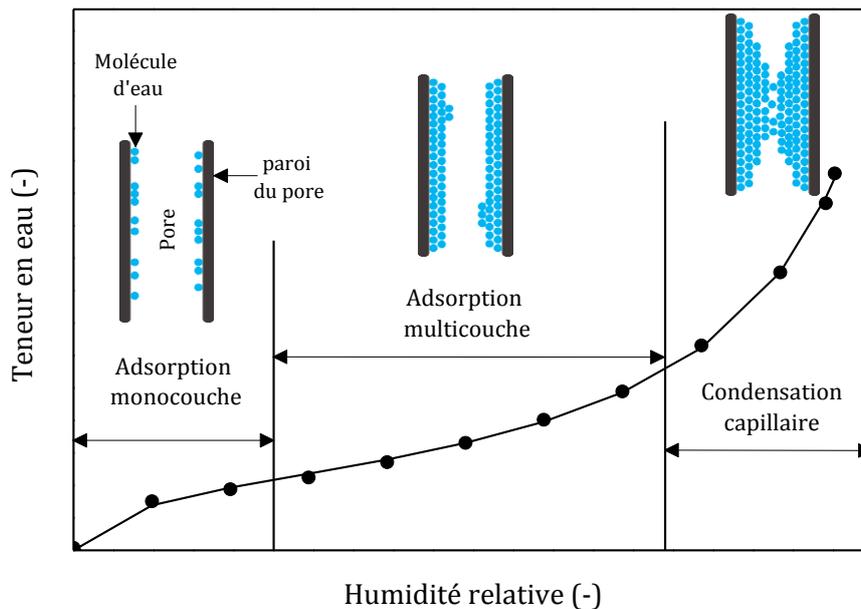


Figure 1.18. Mécanismes de fixation d’humidité.

Pendant les travaux de Sing et coll. (Sing et coll., 1984), il a été prouvé que pour des matériaux différents, les isothermes peuvent présenter différentes allures. En fonction de l’allure obtenue, les isothermes d’adsorption peuvent être classifiés en six catégories illustrées dans la Fig. 1.19.

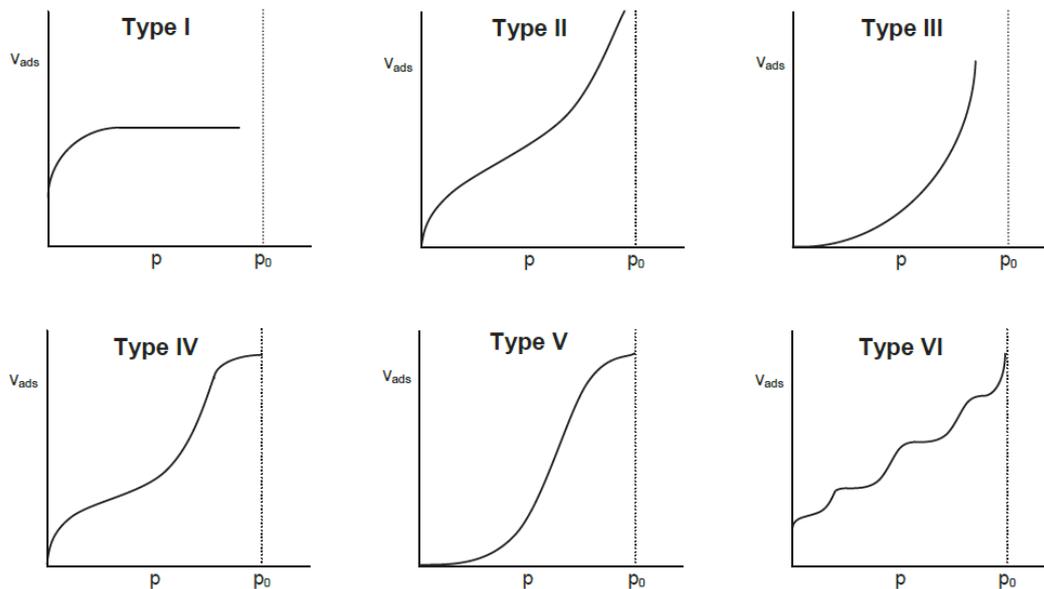


Figure 1.19. Types d’isothermes d’adsorption (Sing et coll., 1984).

Alors que l’augmentation de l’humidité relative déclenche le phénomène d’adsorption, une diminution au niveau de cette dernière entraîne un départ d’une quantité de l’eau contenue dans le matériau, engendrant donc une diminution de la teneur en eau de ce matériau, on parle ici du phénomène de désorption.

Assemblées dans une seule courbe de variation de teneur en eau en fonction de l'humidité relative, les isothermes d'adsorption et de désorption indiquent pour une égale humidité relative, des teneurs en eau différentes. Ce phénomène est connu sous le nom du phénomène d'hystérésis.

Les phénomènes physiques capables de justifier ce processus peuvent être nombreux, cependant, les principaux facteurs auxquels est attribué ce phénomène d'hystérésis sont l'angle de contact ainsi que l'effet de bouteille d'encre causé par la variation de la section des pores (Bellini, 1992 ; Musy and Souter, 1991 cités dans (Ferroukhi, 2015)).

Il est à noter que la forme et la taille de la boucle d'hystérésis varient d'un matériau à un autre en fonction de sa microstructure. L'IUPAC (Sing et coll., 1984) classifie ce phénomène sous quatre types corrélés à différentes formes de pores. Il s'agit des classes H1, H2, H3 et H4 montrés dans la Fig. 1.20.

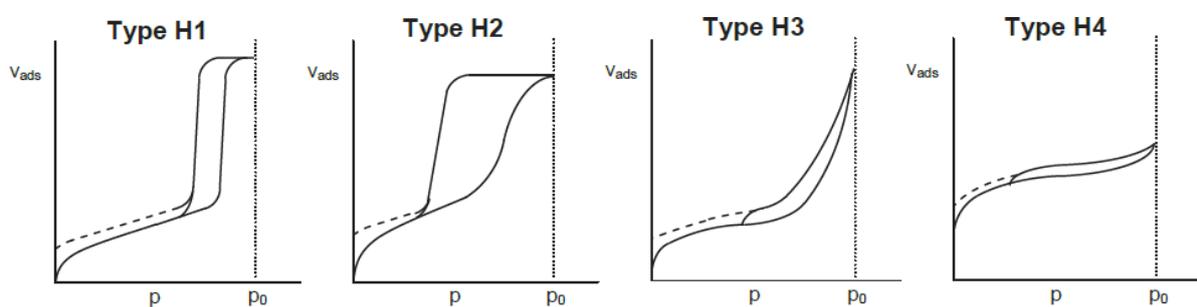


Figure 1.20. Classification des phénomènes d'hystérésis (Umurigirwa-Vasseur, 2014).

1.6.4.3.2. Mécanismes de diffusion d'humidité dans les milieux poreux

Comme la majorité des phénomènes de transfert, la diffusion de la vapeur d'eau dans les matériaux poreux de manière générale, et dans les bétons biosourcés de façon spécifique est fortement influencée par la taille et la distribution des pores à l'intérieur du matériau. En effet, en fonction de la taille des pores, la diffusion de la vapeur d'eau se produit suivant trois modes différents, en l'occurrence (Fig. 1.21) :

- Pour des pores ayant un diamètre supérieur à 10^{-6} m, les transferts de la vapeur d'eau sont motorisés par la collision entre les molécules sans interaction avec la matrice solide. Ce mode est connu sous le nom de la diffusion moléculaire.
- Avec l'existence d'une interaction avec la matrice solide en plus de la collision intermoléculaire, le transfert connu sous le nom de transfert KNUDSEN devient important lorsque la taille des pores est inférieure à 10^{-8} m.
- Les molécules de vapeur d'eau peuvent aussi être transportées selon un troisième type de transfert, en l'occurrence, par déplacement sur la surface des pores sous l'effet d'une certaine énergie d'activation permettant la libération et le saut des particules adsorbées (Duong, 1998 cité dans (Ferroukhi, 2015)).

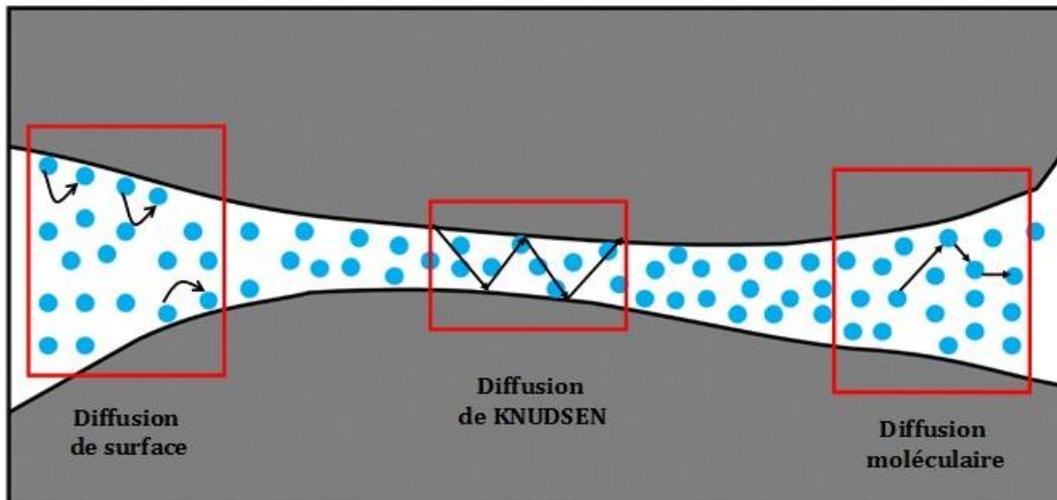


Figure 1.21. Modes de diffusion de vapeur d'eau dans un pore.

1.6.4.3.3. Isothermes de sorption des bétons biosourcés

Qualifiés en tant que carte d'identité hydrique du matériau, les isothermes de sorption de vapeur d'eau constituent un élément très important dans la caractérisation des propriétés hydriques des bétons biosourcés. Comme expliqué dans les paragraphes précédents, la courbe d'isotherme donne l'information sur la quantité de l'eau contenue dans un matériau en fonction de la variation de l'humidité relative. Les courbes isothermes ont été déterminées dans la littérature pour plusieurs bétons biosourcés. Pour la majorité de ces bétons, les études effectuées ont montré qu'en phase d'adsorption, les isothermes obtenues suivent généralement une allure similaire au type II, illustré dans la Fig. 1.19, ceci correspond aux matériaux macroporeux (Lagouin et coll., 2019). Quant au phénomène d'hystérésis, on trouve que ce type de matériau possède plutôt des hystérésis appartenant à la classe H4 (Fig. 1.20).

Selon les résultats publiés par Lagouin et coll. (Lagouin et coll., 2019), les valeurs maximales de la teneur en eau sont fortement influencées par le type du liant aussi bien que le type de la biomasse utilisée. Pour les basses humidités relatives, la bibliographie établie par Lagouin et coll. (Lagouin et coll., 2019) a montré que des bétons formulés à base de végétaux différents ont présentés des teneurs en eau similaires. Néanmoins, dans la région de condensation capillaire, des différences remarquables ont été enregistrées (Fig. 1.22-a). En effet, à 95% d'humidité relative, les résultats de la campagne expérimentale menée par Lagouin et coll. (Lagouin et coll., 2019) a montré que les bétons de tournesol formulés en utilisant de la chaux présentent des teneurs en eau inférieures à celles obtenues pour une utilisation du métakaolin comme liant. De plus, bien que les isothermes des végétaux seuls aient révélé que la teneur en eau des particules de maïs est supérieure à celle obtenue pour les granulats de tournesol (Fig. 1.22-b), les bétons à base de tournesol ont montré des teneurs en eau plus importantes que celles obtenues dans le cas des bétons de maïs. Selon ces auteurs, une explication probable de ces résultats est le remplissage des pores de maïs de large taille par le liant.

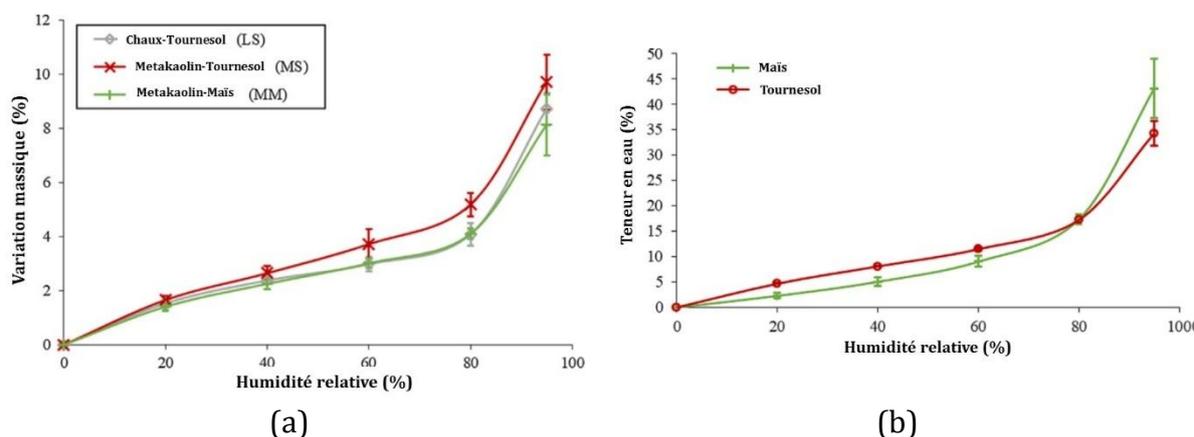


Figure 1.22. Isothermes d’adsorption des (a) bétons biosourcés, (b) particules de maïs et tournesol (Lagouin et coll., 2019).

Dans une autre étude entreprise par Benmahiddine et coll. (Benmahiddine et coll., 2020a), les résultats obtenus ont montré, en plus de l’existence du phénomène d’hystérésis (Type H4), l’influence que peut présenter le vieillissement des bétons de chanvre sur leur capacité d’absorber ou dégager l’humidité.

Le vieillissement en utilisant différents cycles d’immersion/séchage engendre une différence entre les teneurs en eau enregistrées pour les bétons vieillis et celles du béton témoin, ceci a été surtout observé dans la plage des humidités relatives importantes. En effet, dans cette région de condensation capillaire, le vieillissement des bétons de chanvre a engendré, pour une égale humidité relative, une diminution de la teneur en eau enregistrée (Fig. 23).

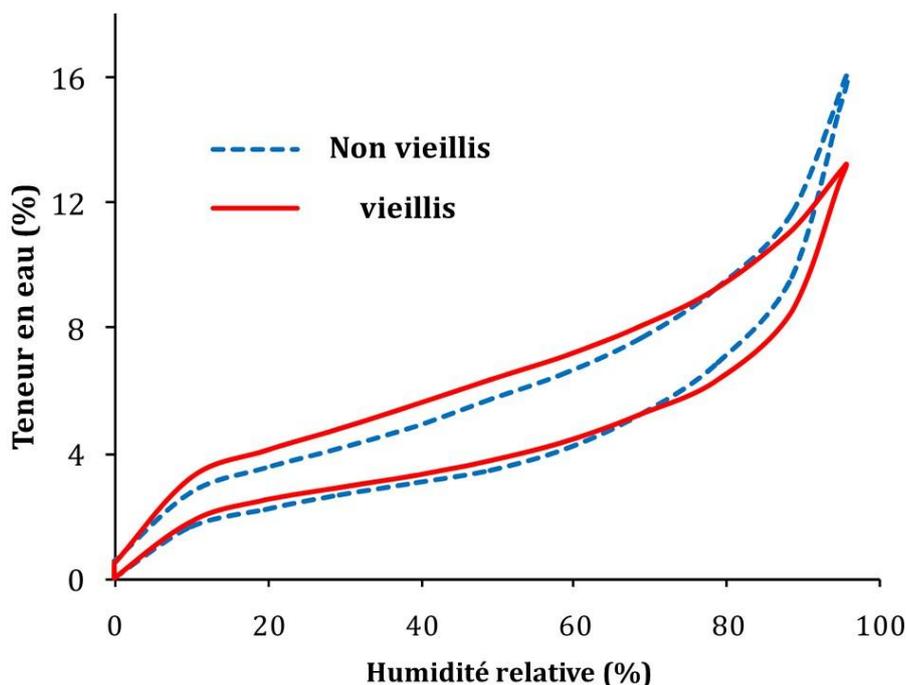


Figure 1.23. Isotherme d’adsorption/désorption d’un béton de chanvre avant et après vieillissement (Benmahiddine et coll., 2020a).

1.6.4.3.4. Valeur du tampon hydrique (MBV)

Au-delà des isothermes de sorption qui représentent le caractère hygroscopique des bétons biosourcés, la valeur du tampon hydrique (MBV : Moisture Buffer Value) est aussi un paramètre intéressant dans l'analyse comportementale des bétons biosourcés. La MBV caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air ambiant (Chabannes, 2015).

Cette propriété a été déterminée pour différents matériaux biosourcés et les résultats ont montré que similairement aux isothermes de sorption, cette propriété peut varier pour un béton donné en fonction de la nature du végétal ainsi que du type et du dosage en liant. La campagne expérimentale menée par Rahim et coll. (Rahim et coll., 2015) a révélé que similairement aux bétons de chanvre, les bétons biosourcés à base de particules de lin présente une excellente capacité de régularisation d'humidité. Comparée avec celle du béton cellulaire qui a une MBV de 1,0 g/(m². %RH) et appartient à la classe des matériaux ayant une bonne capacité de régularisation, les bétons de chanvre et de lin produits lors de l'exploration de Rahim et coll. (Rahim et coll., 2015) ont une capacité de régularisation qui dépasse le double. Les valeurs de MBV obtenues sont respectivement de 2,02 et 2,27 g/(m². %RH) pour le béton de chanvre (HLC) et de lin (FLC). Ceci offre une idée sur le degré de confort hydrique que peut créer l'utilisation des bétons biosourcés au niveau de l'enveloppe des bâtiments (Fig. 1.24).

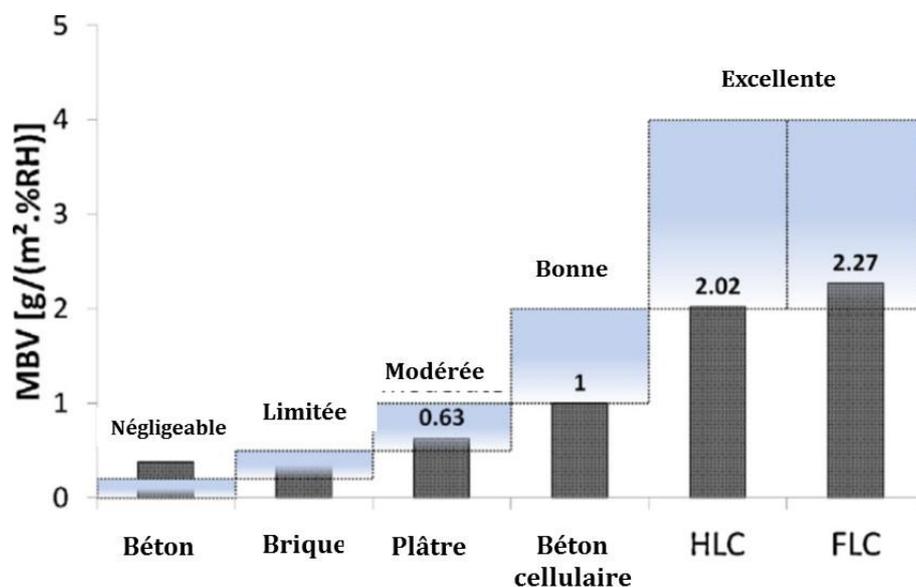


Figure 1.24. Comparaison du MBV des bétons biosourcés de chanvre et de lin avec d'autres matériaux classiques (Rahim et coll., 2015).

1.6.4.3.5. Perméabilité à la vapeur

En termes d'analyse du comportement hydrique, la perméabilité à la vapeur d'eau s'impose comme la propriété la plus importante à mesurer pour les matériaux d'enveloppe, y compris les bétons biosourcés (Issaadi, 2016). Le coefficient de perméabilité à la vapeur (δ) permet d'avoir une idée sur la capacité du matériau à évacuer

l'humidité. En effet, il exprime la quantité de vapeur transmise par le matériau, par unité d'épaisseur, de temps et de pression.

Pour des bétons de terre biosourcés préparés à base de paille (S3 (3%) et S6 (6%)), épi de maïs (CC3 (3%) et CC6 (6%)), et de chanvre (H3 (3%) et H6 (6%)), il a été rapporté que la perméabilité à la vapeur varie entre 28 e^{-12} et $41 \text{ e}^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ en fonction du type et du pourcentage de particules végétales (Laborel-Préneron et coll., 2018). Ces résultats se sont traduits sur la Fig. 1.25 par les valeurs de résistance à la vapeur qui variaient entre 4,8 et 7,0, notant que plus la résistance est faible, plus le matériau est évacuateur.

D'autres résultats provenant des travaux réalisés par Bennai et coll. (Bennai et coll., 2018) confirment la bonne capacité évacuatrice des bétons biosourcés. Il s'agit cette fois de bétons de chanvre qui ont montré des perméabilités à la vapeur variant entre 20 e^{-12} et $32 \text{ e}^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, au prorata de l'âge de cure. Dans cette étude, Bennai et coll. (Bennai et coll., 2018) ont démontré que l'âge de cure est aussi un autre paramètre qui peut changer la valeur de la perméabilité à la vapeur d'un béton de chanvre. En effet, ces perméabilités étaient de l'ordre de $20,1 \text{ e}^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ à 7 jours de cure. Cependant, elles ont pris des valeurs de $23,8$ et $32,2 \times 10^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ après respectivement des cures de 30 et 60 jours. Ceci indique que cette propriété est inversement liée à l'âge de cure (Fig. 1.26).

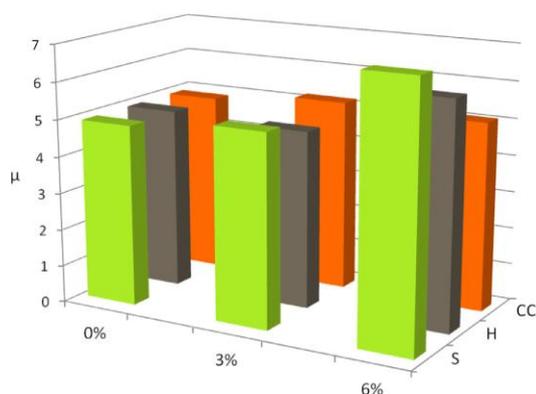


Figure 1.25. Facteur de résistance à la diffusion de vapeur en fonction du pourcentage des végétaux (Laborel-Préneron et coll., 2018).

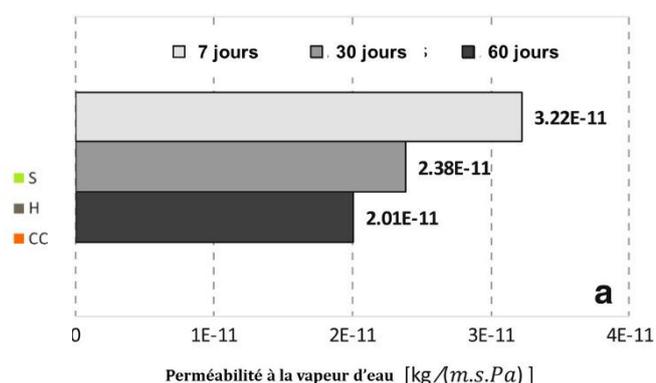


Figure 1.26. Perméabilité à la vapeur des bétons de chanvre à différents âges (Bennai et coll., 2018).

1.6.4.4. Résistance à la compression

Comme souligné dans les paragraphes précédents, même si les résistances mécaniques ne sont pas les plus importantes, les bétons biosourcés doivent remplir certaines exigences vis-à-vis de leur comportement à la compression. Si la forte porosité permet d'obtenir des propriétés hygrothermiques intéressantes, il en va différemment pour les propriétés mécaniques en compression (Brouard, 2018). Dans une optique visant à faire la vérification des résistances minimales et d'aller de plus en plus vers des bétons biosourcés ayant des résistances permettant de les utiliser comme matériaux porteurs, la résistance à la compression est un paramètre qui a été récurrentement déterminé au cours des travaux sur ce type de bétons.

Le type et le taux de biomasse, le type et le dosage en liant, ainsi que le type de cure utilisée sont tous des paramètres pouvant influencer la valeur de la résistance à la compression. Dans un travail mené par Belakroum et coll. (Belakroum et coll., 2018) sur un béton biosourcé à base de chaux et de fibres de palmier dattier, il a été trouvé que la résistance à la compression des bétons étudiés varie entre 0,2 et 0,6 MPa (Fig. 1.27). Bien que l'augmentation du taux de fibres de palmier dattier engendre une chute au niveau de la résistance en compression, elle engendre une amélioration remarquable au niveau de la ductilité des bétons biosourcés ont rapporté Belakroum et coll. (Belakroum et coll., 2018) (Fig. 1.28).

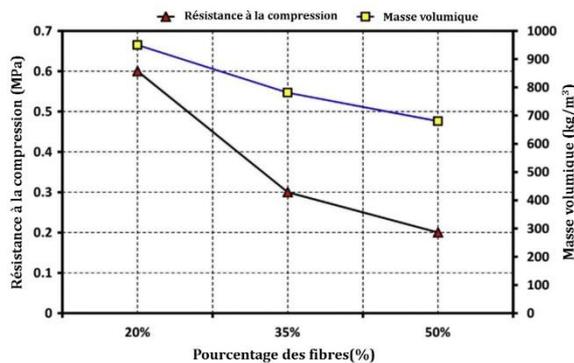


Figure 1.27. Résistance à la compression des bétons biosourcés à base de palmier (Belakroum et coll., 2018).

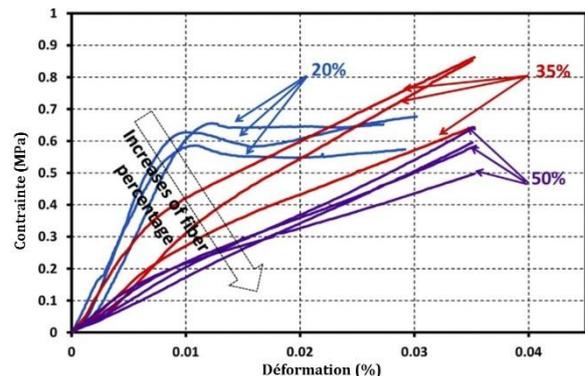


Figure 1.28. Variation de la courbe de capacité des bétons avec la variation du pourcentage de fibres de palmier (Belakroum et coll., 2018).

Pour des bétons formulés à base d'amidon et de chanvre, Le et coll. (Le et coll., 2014) ont conclu que les résistances en compression de ce type de béton oscillent entre 0,4 et 0,5 MPa. En revanche, pour des bétons de chanvre utilisant la chaux comme liant, Shea et coll. (Shea et coll., 2012) ont affirmé que les résistances obtenues sont situées entre 0,1 et 0,8 MPa.

Concernant le comportement mécanique global, les bétons de chanvre (LHC) et de riz (LRC) étudiés par Chabannes et coll. (Chabannes et coll., 2014) ont montré un comportement similaire commençant par une partie élastique, puis une partie élastoplastique où le liant et l'interface entre ce dernier et la biomasse sont progressivement endommagés, transformant ainsi la charge aux particules végétales. La contrainte maximale correspondante en effet à la rupture est atteinte pour des taux de déformation élevés. Pour les bétons de chanvre, la résistance à la compression selon le travail de Chabannes et coll. (Chabannes et coll., 2014) tourne autour de 0,33 MPa, tandis que celle des bétons de riz correspond à des valeurs de l'ordre de 0,48 MPa.

Tout en soulignant que les résistances à la compression des bétons biosourcés testés n'ont pas été significativement affectées par les conditions de cure utilisées (ISC : pour une cure à 50% d'humidité et 20 °C de température et O : pour une cure dans des conditions extérieures), l'influence des conditions de cure a été clairement visible sur les rigidités des bétons préparés dans la campagne expérimentale de Chabannes et coll. (Fig. 1.29).

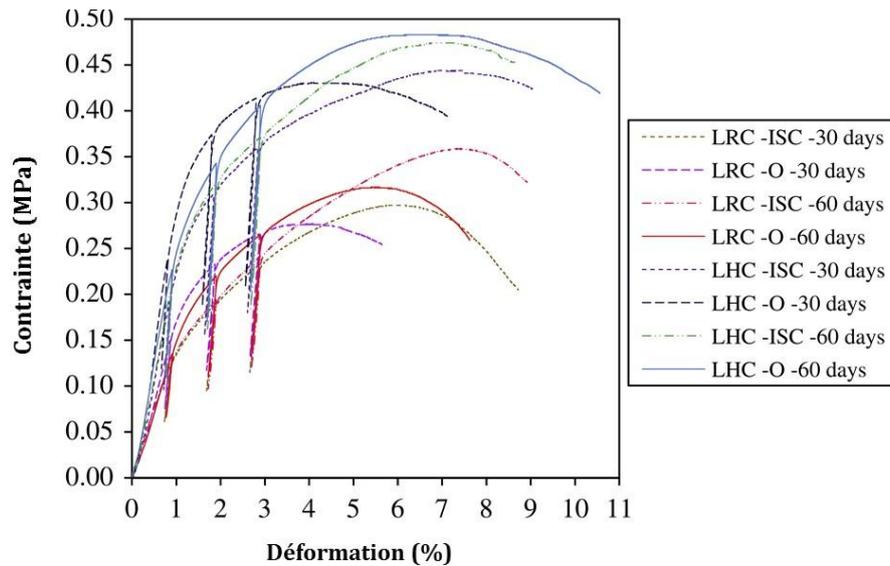


Figure 1.29. Courbes de capacité des bétons biosourcés de chanvre et balle de riz en fonction des conditions de cure (Chabannes et coll., 2014).

1.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre qui visait le positionnement du travail dans son contexte général, la nécessité de réduire l'impact environnemental et la consommation énergétique du secteur de la construction a été établie.

Ce chapitre a ensuite souligné le retard pris par l'Algérie en matière de réglementation thermique, par rapport à celle en France qui est en évolution continue, et ce malgré ses engagements pour réduire la consommation énergétique de 9% d'ici 2030.

La nécessité de bien isoler ainsi que les techniques utilisées pour atteindre un confort thermique élevé ont été mises en relief. L'enseignement tiré de ce qui précède est que les bétons biosourcés ont un bel avenir devant eux car ils utilisent des matériaux renouvelables et réussissent à combiner les bénéfices environnementaux avec ceux économiques.

L'état de l'art élaboré à la fin du chapitre a révélé que malgré les propriétés hygrothermiques et mécaniques intéressantes que présentent les matériaux à base de chanvre, lin, balle de riz, paille... la disponibilité de ces matériaux présente un véritable frein contre leur utilisation dans les constructions algériennes. Donc, pour être efficace, l'utilisation des matériaux de construction biosourcés nécessite avant toute chose le recours à des matériaux locaux permettant de réduire la facture liée au transport de la biomasse. Partant de ce principe, dans le prochain chapitre, une analyse permettant d'identifier les ressources disponibles dans la forêt algérienne paraît judicieuse avant la présentation de la ressource utilisée dans le présent travail.

Chapitre 2

Le liège : une valorisation possible dans le béton.

Introduction

Après avoir discuté la place et les avantages de bétons biosourcés dans le chapitre précédent, ce chapitre est consacré d'une part à la présentation de la ressource végétale utilisée et d'autre part, à un état des lieux sur les composites biosourcés incorporant cette ressource. Le chapitre commence d'abord par un aperçu de la mosaïque végétale que présente la forêt algérienne ainsi que la répartition de ces ressources. La partie qui succède la présentation des espèces dominantes est dédiée à la présentation de la ressource liège, des endroits où elle se trouve, ses types, ses propriétés, ses avantages et ses applications. Soulignant que la dernière partie du chapitre concerne un état de l'art sur les travaux traitant des composites de liège. Cette partie présente les différentes propriétés hygrothermiques, microstructurales et mécaniques des bétons et mortiers de liège.

2.1. Place du chêne liège dans la forêt algérienne

Après avoir eu son indépendance, l'Algérie a adopté une politique forestière visant à remettre la forêt à la place qu'elle mérite lui permettant de jouer des rôles de protection, de production et de promotion sociale. Au regard de son importance pour un pays qui essayait de développer de nouveau son économie, l'intégration de la forêt dans un plan global de gestion économique était aussi une des voies qu'a pris l'Algérie quelques années après son indépendance à travers : (i) la protection et la mise en valeur des forêts existantes (ii) l'extension du patrimoine forestier par reboisement ainsi que (iii) la lutte contre l'érosion (Limam, 2017).

Ainsi, au-delà de sa fonction de sociale, la forêt présente aussi la fonction de production qui, pour la forêt algérienne reste relativement faible à cause des biens et service non marchands qu'elle procure, d'où la nécessité de les valoriser.

Connue par un climat diversifié, la forêt algérienne est par ailleurs exceptionnellement riche en diversité biologique. Sur un patrimoine forestier qui s'étale sur une superficie de 4 100 000 ha, soit un taux de 16% du nord algérien, on trouve des forêts naturelles, des maquis, des reboisements et des vides. Selon les statistiques de la Direction Générale des Forêts (DGF), cette surface qui tend à couvrir un territoire plus important dans les années à venir, s'étend sur 1,427 millions d'hectares de forêts naturelles (35%), 1,662 million d'hectares de maquis (40%), 718 000 hectares de reboisement (18%) et 240 000 hectares de vides (5%)(Abbas, 2013).

Selon un recensement réalisé en 2008, les forêts dites économiques couvrent plusieurs espèces appartenant à la forêt méditerranéenne dont le pin d'Alep, le chêne liège, le chêne vert, le chêne Zeen et l'Afares ainsi que le pin maritime. Le même recensement note que les espèces prédominantes qui sont le pin d'Alep et le chêne liège occupent respectivement 62% et 25% de la surface des forêts, soit des superficies de 881 000 ha et 357 000 ha (Fig. 2.1).

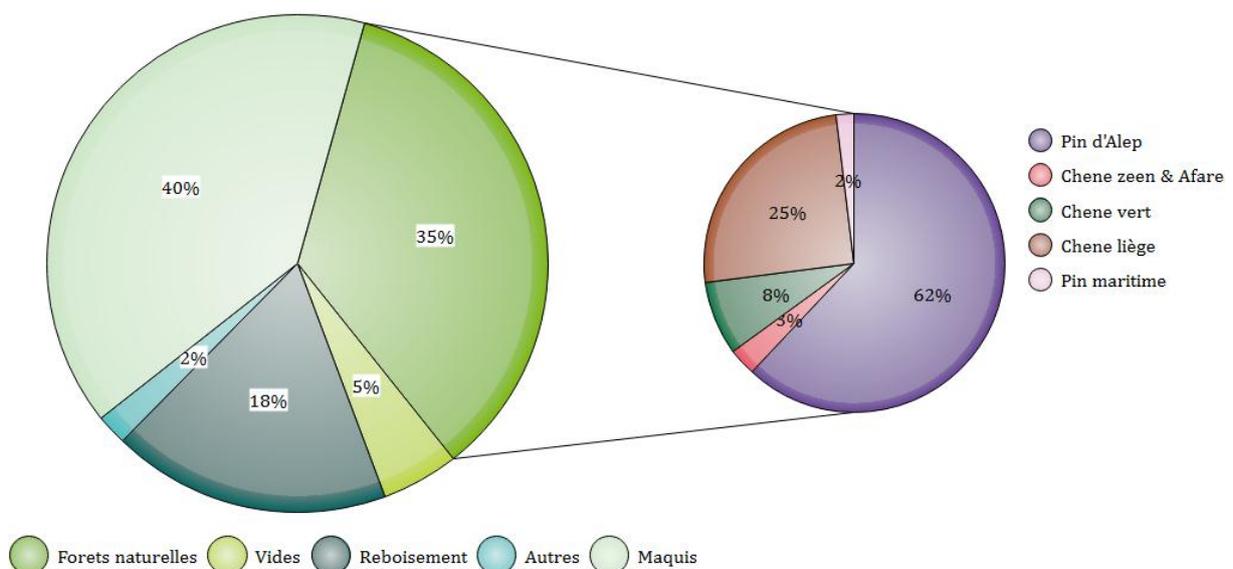


Figure 2.1. Répartition des espèces forestières en Algérie.

Avec une surface totale de 357 582 ha, le chêne liège demeure la deuxième position dans le classement des ressources forestières algériennes en termes de superficie. Quant à leur emplacement, les subéraies de chêne liège sont réparties en trois grandes zones dans le nord algérien, à savoir, la région de l'est, du centre et de l'ouest. Au nord-est, le chêne liège s'épanouit sur des terrains siliceux faisant partie du littoral oriental ayant un climat allant de sub-humide à humide. Cette zone dite « région de chêne liège », forme un bloc en un seul tenant qui s'étale jusqu'aux frontières tunisiennes. Au centre, un autre tenant de densité moins importante prospère sur des terrains gréseux dont un climat sub-humide est dominant. Le troisième bloc, est finalement formé de quelques îlots isolés au niveau du montagnard et du littoral occidental (Fig. 2.2)(Dehane et Ghefar, 2017).

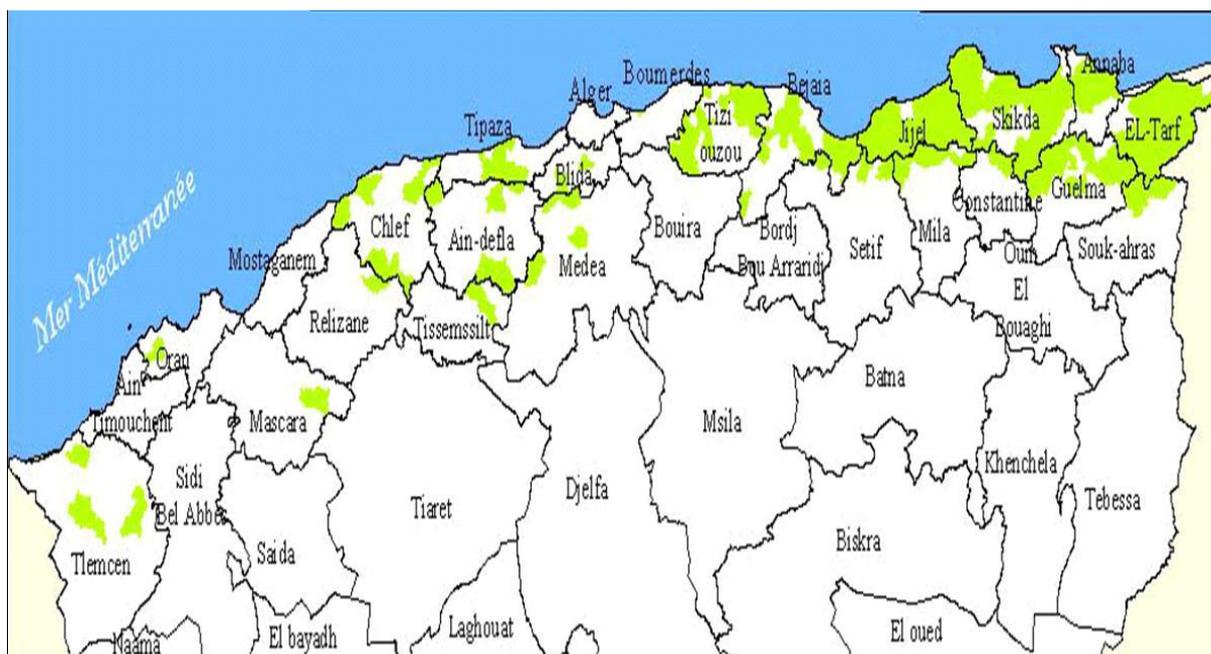


Figure 2.2. Répartition des forêts de chêne-liège en Algérie (Dehane et Ghefar, 2017).

Au niveau international, l'arbre chêne liège constitue un élément très important de la mosaïque d'essences forestières qui constituent la forêt méditerranéenne. En effet, malgré leur superficie relativement restreinte, les subéraies de chêne liège représentent environ 9% de la superficie totale de la forêt méditerranéenne. Ces subéraies sont réparties autour de sept pays dont : le Portugal qui est le leader mondial avec 33% du patrimoine mondial, l'Espagne, l'Algérie, l'Italie, le Maroc, la Tunisie et la France (Fig. 2.3). L'analyse de la Fig. 2.3, révèle qu'après le Portugal et l'Espagne qui comptent à eux seuls 56% du total des subéraies, l'Algérie vient en troisième position dans le classement des pays possesseurs de chêne liège et présente environ 18% de la superficie totale des subéraies dans le monde (Garavaglia et Besacier, 2012). Cette statistique confirme donc de nouveau la place de cette ressource ainsi que le potentiel important que possède l'Algérie en termes de marge de développement de la filière, d'où la nécessité de faire une analyse des statistiques que réalise notre pays en termes de développement et d'exploitation.

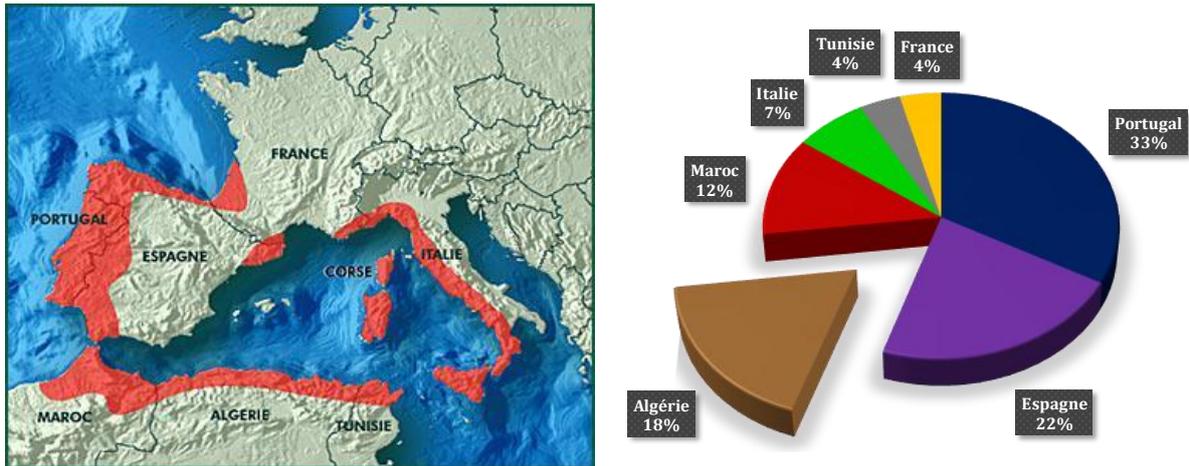


Figure 2.3. Répartition des forêts de chêne liège dans le bassin méditerranéen (Garavaglia et Besacier, 2012).

2.2. Le liège : une ressource prometteuse

2.2.1. Formation et récolte

A travers la section précédente, l'importance du chêne liège pour la forêt algérienne a été souligné. Ce chêne liège, en plus de sa capacité de produire des glands, présente un autre potentiel, on parle ici du liège.

Le liège que nous connaissons en tant que bouchons de bouteilles est obtenu usuellement à partir de l'écorce extérieure du chêne liège chaque 9 à 12 années en fonction de la culture des régions (Silva et coll., 2005). Il s'agit donc d'une couche protectrice séparant les cellules vivantes de l'arbre de l'environnement extérieur. Par définition, le liège est un tissu appelé botaniquement phellème, issu du méristème suber phelloderme du chêne liège et fait partie du périderme du système d'écorce qui entoure la tige, les branches et les racines (Knapic et coll., 2016; Pereira, 2007).

C'est le phellogène (cambium) qui présente la capacité de génération de cellules par division cellulaire. Après cette division, les cellules n'acquièrent pas leurs dimensions finales, ainsi elles continuent leur croissance engendrant l'épaississement du tissu phellogène et l'augmentation du périmètre de l'arbre. Cette croissance se fait en général, dans la période allant d'Avril à Octobre. Durant la période hivernale, cette croissance s'arrête tout en créant des zones sombres marquant le liège produit chaque année (Fig. 2.4) (Silva et coll., 2005).

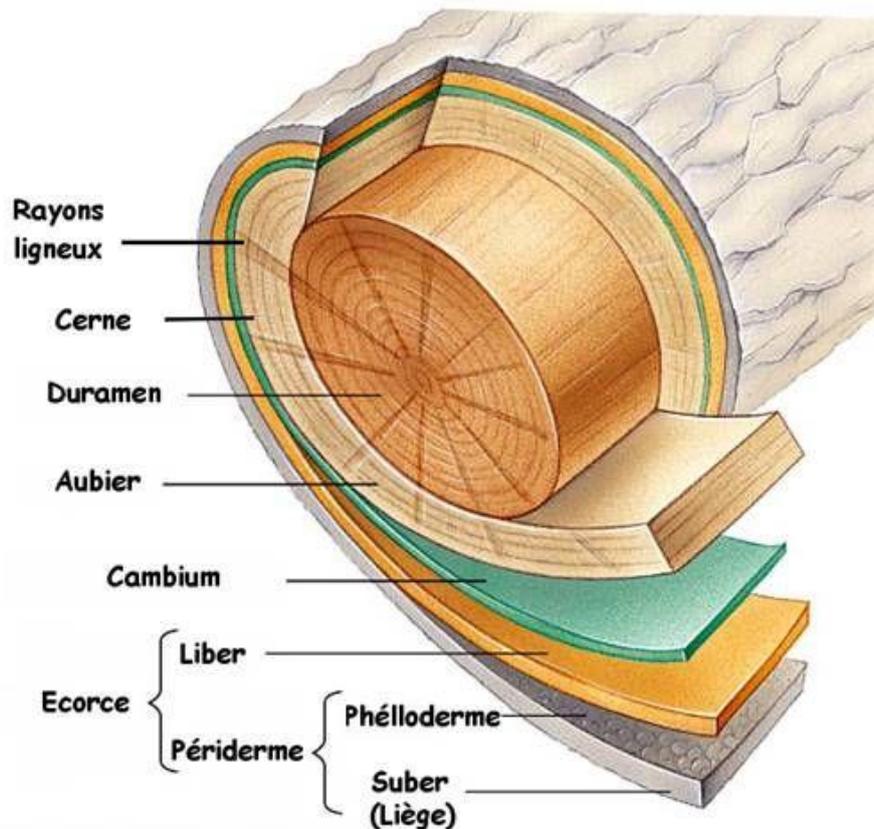


Figure 2.4. Représentation schématique d'une coupe transversale d'un tronc de chêne-liège (Source : pinterest.com).

Après l'atteinte d'un diamètre d'environ 25 cm, les arbres de chêne liège font l'objet d'une première récolte de liège. La récolte ou le décapage du liège se fait généralement de manière manuelle, en réalisant des coupes à travers la couche de liège afin de pouvoir obtenir des planches rectangulaires et en les tirant à la main en dehors de l'arbre (Fig. 2.5). L'opération profite de la fragilité du phellogène et des couches cellulaires de liège qui viennent d'être formées, ceci permet d'arracher la couche de liège de l'arbre sans pour autant endommager l'écorce interne et le cambium. C'est la raison pour laquelle, il est recommandé que l'arbre soit physiologiquement actif, ceci correspond à la période où les cellules mères phellogènes et les cellules phellémiques récemment formées sont turgescentes et les parois cellulaires sont minces et fragiles. Ceci signifie que la séparation de la couche de liège pourra se faire en appliquant une tension modérée dans la direction radiale.



Figure 2.5. Procédure de récolte du liège (Manuel, 2012).

2.2.2. Types de liège

En moyenne, un arbre chêne-liège a une durée de vie qui varie entre 250 et 350 années. Cependant, plus l'arbre avance dans l'âge, plus l'activité du phellogène diminue et plus le liège diminue en épaisseur. Par conséquent, un âge de 150 à 200 ans semble être la limite pour qu'un arbre soit rentable.

Comme mentionné dans la section précédente, une fois l'arbre atteint 25 cm de diamètre, l'opération de récolte de liège pourra avoir lieu de manière régulière chaque 9 à 12 années. Le chêne liège produit au cours de sa vie différents types de liège. En allant d'une récolte à une autre, une différence significative peut être remarquée entre la première récolte et la troisième et celles qui succèdent. En fait, en fonction du numéro de la récolte, on peut distinguer trois qualités de liège, en l'occurrence : le liège mâle obtenu à partir de la première récolte, le liège second à partir de la deuxième récolte et le liège de reproduction à partir de la troisième récolte et celles qui suivent (Fig. 2.6).

Le liège mâle présente une structure, une masse volumique et une épaisseur irrégulière. Il est dur-rugueux, friable, contenant des fractures profondes et peut être utilisé généralement pour les panneaux de liège, les joints d'étanchéité et les semelles de chaussures après trituration. Contrairement au liège mâle, le liège second présente une meilleure régularité mais toujours une qualité insuffisante pour produire les bouchons de liège. Bien que tous les types de liège puissent être utilisés pour produire des granulats de liège, c'est seulement à partir de la troisième récolte (liège de reproduction) qu'on peut

obtenir un liège qui peut être utilisé pour la production de bouchons de liège, l'application la plus rentable jusqu'à maintenant dans le marché du liège (Tableau 2.1) (Silva et coll., 2005).

Tableau 2.1. Propriétés du liège mâle et de reproduction.

Type de liège	Nature de la surface (Silva et coll., 2005)	Masse volumique (kg/m ³) (Fortes et Rosa, 1988)	Microstructure (Pereira, 2007)
Liège mâle	Rugueuse	160-240	- Structure irrégulière, - Distorsion dans l'alignement radial des rangées des cellules, - Cellules ondulées.
Liège de reproduction	Lisse et sans tâches	120-180	- Structure régulière - Amélioration au niveau des ondulations des cellules.



Liège mâle

Liège second

Liège de reproduction

Figure 2.6. Différents types de liège (Pereira, 2007).

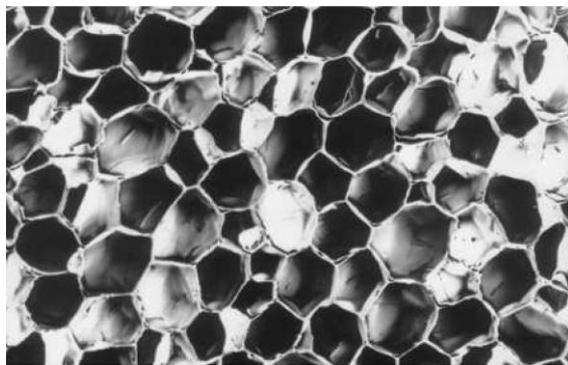
2.2.3. Morphologie microscopique

Etant donné que le liège est considéré comme un matériau cellulaire, dans la science des matériaux, un matériau cellulaire est défini comme un matériau composé d'éléments cellulaires vides ouverts ou fermés, avec une fraction de solide inférieure à 30% du volume total. Dans ce type de matériau, la forme, les dimensions et leur variabilité ainsi que l'arrangement des cellules ont une incidence directe sur les propriétés finales du matériau. Pour cette raison, on pense qu'il est primordial de commencer par une description de la microstructure du liège avant d'entamer la présentation de ses qualités.

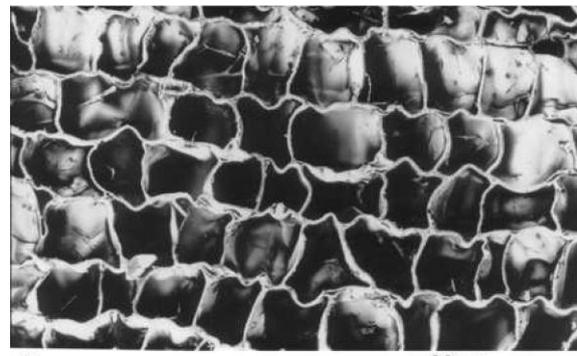
2.2.3.1. Forme des cellules

La microstructure du liège a été examinée pour la première fois par Robert Hooke (1665), qui a souligné sa structure cellulaire. Bien que la régularité de l'arrangement cellulaire du liège puisse être chambardée par la présence de discontinuités d'origine biologique ou accidentelles (qui varient d'un type à un autre), il est admis que ce matériau présente en général une structure alvéolaire régulière qui ressemble à un nid d'abeille, composée de cellules fermées, disposées de manière compacte et sans espace intercellulaire. Les cellules ont généralement la forme de prismes rectangulaires emballés de la base à la base dans des colonnes parallèles à la direction radiale. Les cellules communiquent entre elles à l'aide des alvéoles et des canaux lenticulaires dont le nombre, la taille et le volume peuvent considérablement varier en fonction du type de liège, la saison de sa récolte ainsi que sa qualité industrielle (Gil, 2008; Pereira, 2007; Silva et coll., 2005).

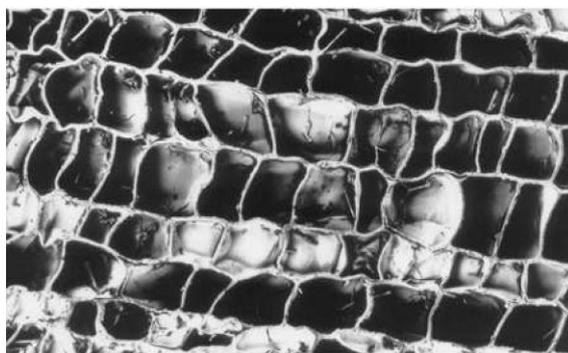
Des résultats obtenus par Pereira (Pereira, 2007) montrent que la structure du liège, observée à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) change en fonction de la direction choisie (radiale, axiale ou tangentielle) lors de la réalisation des analyses. Dans la direction radiale, les cellules du liège ont la forme de polygones de 4 à 9 côtés et forment un réseau qui ressemble à un nid d'abeille (Fig. 2.7-a). Différemment, les directions axiale et tangentielle ont une forme générale similaire qui ressemble à un mur de briques où les cellules de 6 côtés sont organisées dans des rangées parallèles (Fig. 2.7-b,c). La structure tridimensionnelle obtenue par reconstruction des structures planes dans les trois directions est donc montrée dans la Fig. 2.7-d.



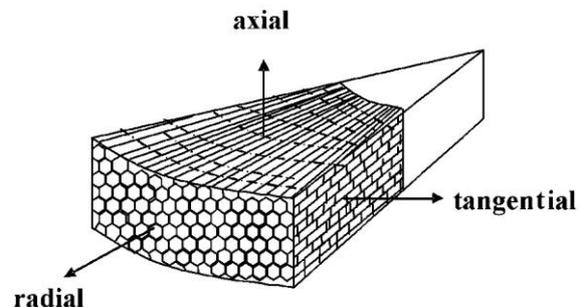
(a) Direction radiale (Pereira, 2007)



(b) Direction tangentielle (Pereira, 2007)



(c) Direction axiale (Pereira, 2007)



Représentation schématique de la Structure tridimensionnelle (Silva et coll., 2005)

Figure 2.7. Microstructure du liège.

Les cellules de liège sont creuses et fermées, contenant à l'intérieur un gaz similaire à l'air, jouant un rôle principal dans les propriétés du matériau et représentant environ 90% du volume de la cellule. L'air contenu dans la cellule est entouré d'une paroi mince, constituée de cinq couches, à savoir : i) deux couches de nature cellulosique dites parois tertiaires couvrant les cavités cellulaires, ii) deux couches subéreuses (constituées de subérine et colles) appelées parois secondaires et offrant la caractéristique d'imperméabilité à la cellule et iii) une couche dite lamelle médiane contenant une paroi primaire séparant les murs des deux cellules (Gil, 2008) (Fig. 2.8).

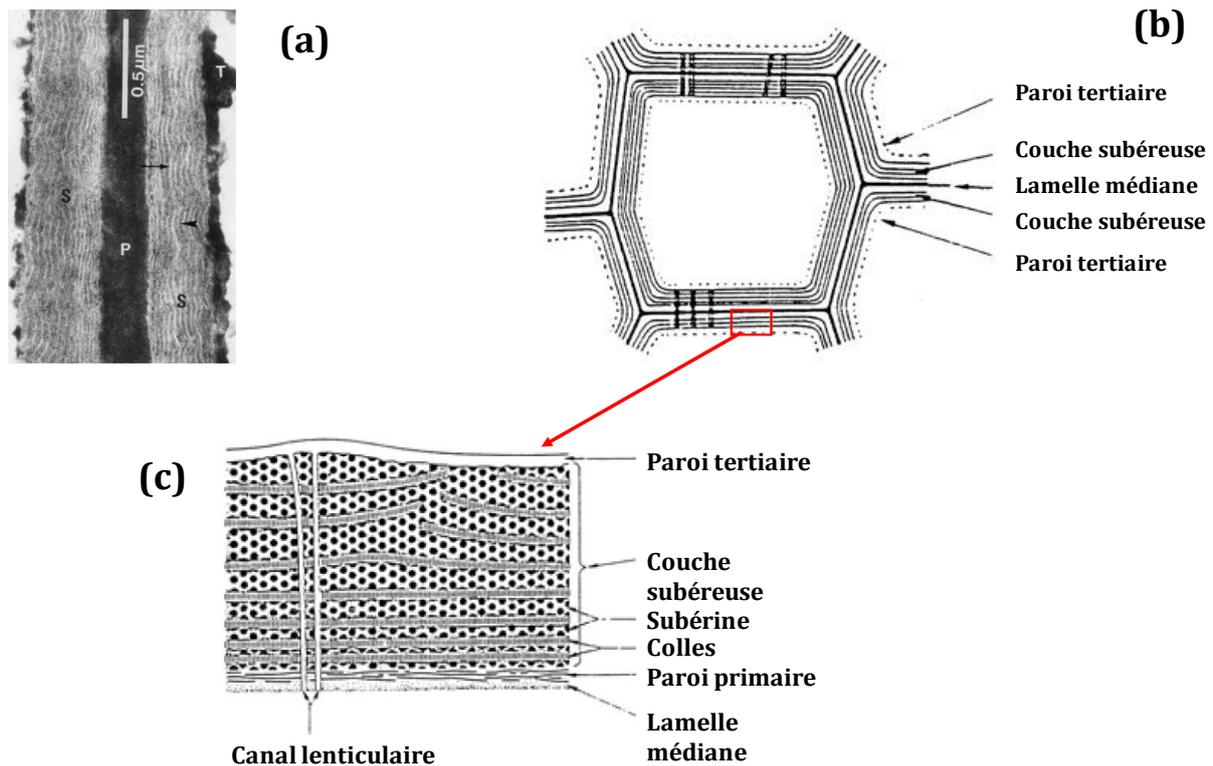


Figure 2.8. Composition de la paroi de liège. (a) Image obtenue par un microscope électronique à transmission (MET) (Pereira, 2007), (b et (c) représentation schématique des différentes couches (Gil, 2008).

2.2.4. Composition chimique

Il est vrai que les propriétés des matériaux cellulaires dépendent de leur microstructure. En revanche, cette microstructure est directement liée à la composition chimique des parois de cellules, c'est-à-dire des matériaux qui les composent, de leur taux ainsi que de leur distribution dans le solide. Par conséquent, on trouve que plusieurs propriétés des matériaux cellulaires y compris le liège (inertie chimique et biologique, durabilité...) sont fortement liées à cette composition chimique (Pereira, 2007). Par ailleurs, grâce à sa composition chimique, il est admis que le liège limite la perte d'eau, contrôle le transfert de gaz et ne permet pas le passage de grosses molécules et micro-organismes vers l'arbre. La composition chimique du liège a été largement discutée dans la littérature et il a été trouvé que cette dernière dépend du climat, de la taille de l'arbre ainsi que le type de liège

(mâle ou reproduction). Quel que soit le type de liège, le mur de la cellule est généralement constitué de composés structuraux ainsi que des composés non-structuraux (Fig. 2.9) :

- Composés structuraux qui sont responsables de la construction du mur et par conséquent de la définition de la forme de cellule. Ainsi, difficilement enlevés, leur extraction affecte fortement la structure de la cellule. Selon l'ordre de leur taux de présence dans la composition chimique, ces composés sont la subérine, la lignine et les polysaccharides (cellulose et hémicellulose).
- Composés non-structuraux qui sont facilement solubles. Ils sont présents sous forme de composés organiques légers appelés extractibles ainsi que des minéraux non-organiques.

La subérine, le composant principal se trouve dans la couche subéreuse avec les colles et est responsable des propriétés élastiques du matériau, de sa flexion ainsi que de l'effondrement des parois cellulaires. La lignine qui est un polymère isotrope constitue la couche médiane du mur cellulaire et est responsable de la rigidité des cellules, de leur résistance à la compression ainsi que de leur assemblage continu. Les polysaccharides jouent un rôle relativement mineur dans la construction de la paroi cellulaire du liège et se trouvent dans la paroi tertiaire du mur. Elles sont présentes en faibles quantités, d'ailleurs c'est l'une des différences majeures entre le liège et les autres matériaux lignocellulosiques (Panesar et Shindman, 2012).

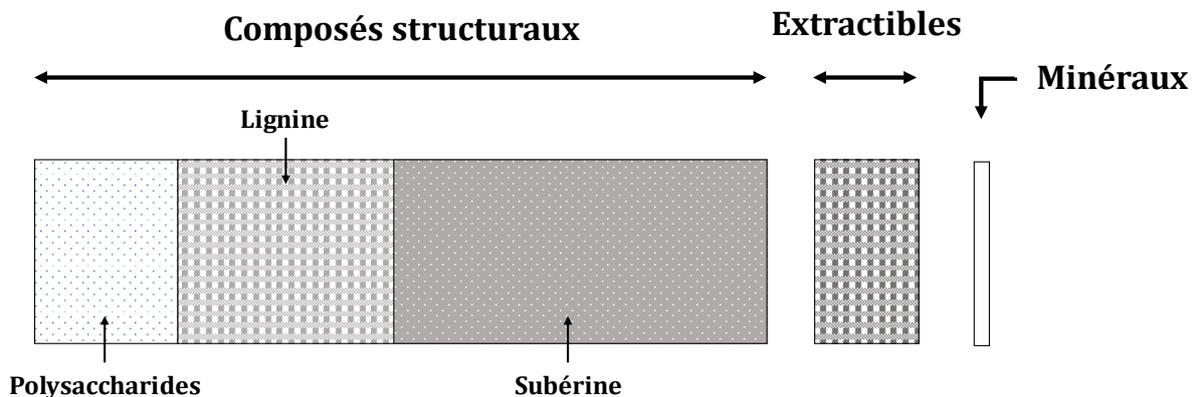


Figure 2.9. Composés chimiques présents dans le liège (Pereira, 2007).

Quant au taux de chaque constituant dans le liège, dans la littérature ce taux change en fonction du type de liège. Le liège mâle, comparé avec le liège de reproduction contient en moyenne plus de subérine et d'extractibles. Selon les travaux réalisés par Pereira, 1981 (cité dans (Silva et coll., 2005)) et Caldas et coll., 1986 (cité dans (Silva et coll., 2005)), le liège mâle contient environ 45% de subérine, 21 à 27% de lignine, 12 à 13% de polysaccharides ainsi que 10 à 19% de matières extractibles. En contrepartie, le liège de reproduction peut contenir entre 33 et 48% de subérine, 26 à 29% de lignine, 12 à 25% de polysaccharides et 8 à 13% de matières extractibles. Rappelant que la composition chimique est responsable des différentes propriétés de liège, ceci confirme encore une fois les différences qui peuvent exister entre les différents types de liège en terme de performance.

Tableau 2.2. Composition chimique du liège mâle et de reproduction.

Auteur	Type de liège	Subérine	Lignine	Polysaccharides	Extractibles	Cendres	Autres
Pereira, 1981	Mâle	45	21	13	19	1,2	0,8
	Reproduction	33,5	26	25	13	2,5	-
Caldas et coll., 1986	Mâle	45	27	12	10	5	-
	Reproduction	48	29	12	8,5	2,1	-

2.2.5. Propriétés du liège

Grâce à sa microstructure poreuse et sa composition chimique unique, le liège, ce matériau noble possède plusieurs propriétés qui en font de lui un matériau de qualité. Dans ce qui suit, on va s'intéresser à présenter celles qui sont communément discutées dans les travaux sur le liège (Gil, 2009, 2008; Manuel, 2012; Silva et coll., 2005; Sotchi, 2010) :

- **Légèreté** : avec une masse volumique qui varie en fonction de son type entre 120 et 240 kg/m³ seulement, le liège présente une légèreté très intéressante.
- **Elasticité et flexibilité** : à cause de la présence de subérine dans sa composition chimique, il se comprime rapidement dans sa limite élastique, mais il reprend de manière instantanée presque 85% de son volume initial. Cette propriété est très indispensable pour la fabrication des bouchons en liège.
- **Mauvaise combustibilité** : comme plusieurs écorces végétales, il nécessite une quantité importante d'oxygène pour être brûlé. Etant donné que la propagation du feu se fait de l'extérieur vers l'intérieur, lors de la combustion la surface extérieure du liège se carbonise formant ainsi une couche qui empêche la propagation du feu.
- **Réduction du CO₂** : le liège constitue un vrai puit de carbone. Sur toute sa durée de vie, il présente la capacité de stocker du CO₂ et donc il participe à réduire la quantité des gaz à effet de serre. A elles seules, les forêts de chêne-liège séquestrent environ 5% des émissions du Portugal.
- **Renouvelable et recyclable** : Suite à la fin de vie de l'élément qui contient le liège (Bâtiment, Bouteille...), il peut être viable de récupérer la totalité des produits à base de liège (Panneaux d'isolation, bouchons...) pour leur utilisation dans des applications identiques car ils restent pratiquement inchangés.
- **Durabilité** : en raison de sa composition chimique, le liège présente une inertie chimique et biologique importante, ceci limite le risque d'attaques chimiques et biologiques et lui offre une bonne durabilité.
- **Absorption élevée au choc**,
- **Excellente performance thermique et acoustique** : le liège doit sa forte capacité d'isolation thermique et acoustique à sa forte porosité ainsi qu'à sa microstructure très complexe. En effet, plus la microstructure est complexe, plus le flux met du temps à traverser le matériau. Dans la littérature, il est rapporté que la conductivité thermique du liège tourne autour de 0,04 W/(m.K), ce qui signifie une valeur très

proche de celle du meilleur isolant, en l'occurrence, l'air qui présente une conductivité de l'ordre de 0,026 W/(m.K) à l'état sec.

2.2.6. Applications

Le fait de combiner entre diverses qualités : une grande légèreté, une absorption d'énergie élevée, une capacité d'isolation excellente et un bilan environnemental positif, le liège est destiné pour une variété d'applications. Il est vrai que l'utilisation du liège pour la production des bouchons reste l'étalon-or des applications de liège. Cependant, les applications qui découlent des déchets issus de la production des bouchons ainsi que des lièges mâle et second qui ne présentent pas la qualité suffisante pour la production de bouchons ne peuvent pas être négligées. Ainsi, ce qui va suivre décrit les principales applications de ce matériau noble.

2.2.6.1. Bouchons

Comme précisé, l'utilisation du liège pour la production des bouchons de bouteilles est l'application référence. Après la récolte du liège de reproduction, les planches de liège sont d'abord stockées jusqu'à leur stabilisation. Une fois stabilisé, le liège est bouilli dans l'eau afin d'expanser les lenticelles pour le rendre plus plat et plus lisse. Suite à l'ébullition, les planches sont séchées et conservées dans un environnement à température et humidité contrôlées. Finalement les planches sont perforées, les bouchons sont obtenus et la quantité de déchets estimée à 75% de la matière première est récupérée (Fig. 2.10) (Karade, 2016). Il est utile de rappeler que pour la production des bouchons, seul le liège de reproduction qui présente une qualité supérieure peut être utilisé. Les lièges mâle et second qui ne présentent pas la qualité suffisante ne peuvent être pas valorisés dans ce type d'application.



(a) traitement du liège



(b) perforation des plaques



(c) bouchons de liège

Figure 2.10. Fabrication des bouchons de liège (Source : Amorimcork.com).

2.2.6.2. Panneaux d'isolation

Après la récupération des déchets issus de la production des bouchons, ces derniers peuvent être broyés, mélangés avec d'autres granulats de liège mâle et second et revalorisés dans d'autres applications telles que les agglomérés (panneaux) de liège,

utilisés pour des objectifs d'isolation (thermique et acoustique) dans le bâtiment (Fig. 2.11). Les panneaux d'isolation sont présents sous deux types, à savoir, l'aggloméré blanc et l'aggloméré expansé. L'aggloméré blanc est obtenu en général en ajoutant un liant aux granulés et en procédant à un chauffage du mélange à 60-70 °C. A l'opposé, bien que la production des agglomérés expansés ne requière pas l'ajout d'un liant, elle exige d'exposer les granulats de liège à une température de 350 °C et à une pression de 300 kPa pour obtenir l'auto expansion et le collage (Moreira et coll., 2014). Après cette opération, la microstructure et les propriétés des granulats de liège sont modifiés.

Pareil à la fabrication du bouchon, l'utilisation du liège pour la fabrication de panneaux d'isolation ne permet pas de valoriser la totalité du liège. En réalité près de 40% de la matière première sera éliminé à cause de la non-atteinte de la qualité nécessaire pour faire un produit fini (Brás et coll., 2013).

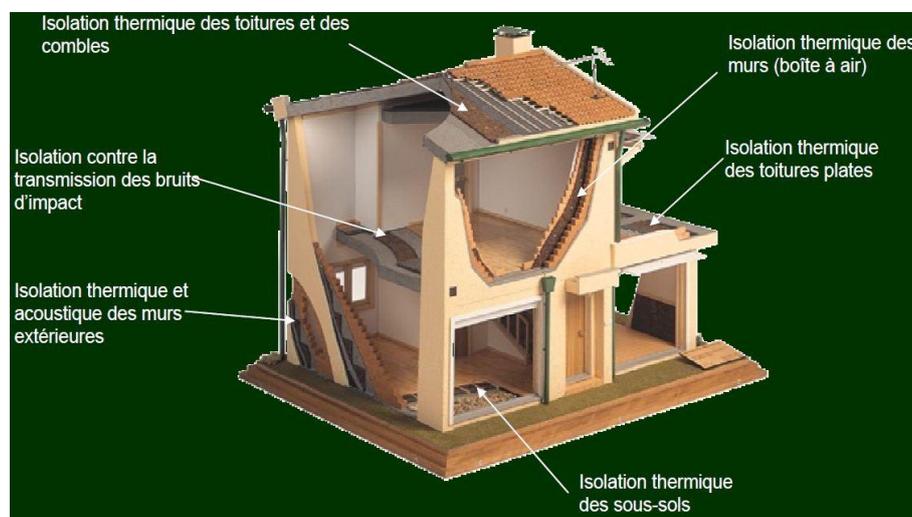


Figure 2.11. Utilisation des panneaux de liège dans le bâtiment (Manuel, 2012).

2.2.6.3. Autres applications

Etant donné que les deux précédentes applications ne peuvent pas mettre la totalité du liège en valeur, l'utilisation de ce matériau noble dans d'autres applications s'avère nécessaire. Parmi les applications, on trouve l'utilisation des granulats issus de la production des bouchons pour la manufacture d'éléments de décoration des maisons, le design d'objets ainsi que pour la fabrication des sandales et des chaises (Fig. 2.12).



Figure 2.12. Utilisation du liège pour le design et la décoration (source : planeteliege.com).

2.2.6.4. Bétons et mortiers de liège : une application prometteuse

Parmi les applications qui ont aussi vu le jour récemment et qui reçoivent un regain d'intérêt important ces dernières années, on trouve l'utilisation du liège en tant qu'ingrédient pour le développement des bétons et des mortiers légers à performance hygrothermique améliorée (Fig. 2.13). Ce type de composites a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches qui ont conclu que l'utilisation de liège dans ce type d'applications semble avoir un avenir prospère. En outre, après la rétrospective qui va être réalisé sur les statistiques de production de liège en Algérie dans la section suivante, quelques travaux élaborés sur les bétons et mortiers de liège seront présentés.



(a) échantillons de béton de liège
(Boussetoua et coll., 2017)



(b) Parpaing en béton de liège (source :
auteur)

Figure 2.13. Exemples de béton de liège.

2.2.7. Production mondiale de liège et place de l'Algérie

La production mondiale de liège, apprend-on, tourne sensiblement autour de 300 000 à 350 000 tonnes/an. Avec une exploitation d'environ 85% de son potentiel de production de liège, le Portugal représente à lui seul 55% de la production mondiale et demeure à la tête du classement mondial des pays producteurs devant l'Espagne, le Maroc, l'Italie, la Tunisie, l'Algérie et en dernière position la France (Manuel, 2012). Malgré son fort potentiel et des innombrables opportunités de valorisation qu'elle dispose, la filière liège algérienne reste loin de jouer le rôle qu'elle pourrait dans le développement de l'économie forestière et agricole. Ceci peut être clairement observé sur la Fig. 2.14 qui montre encore une fois qu'en termes de statistiques, l'Algérie occupe l'avant dernière place dans le classement des pays producteurs.

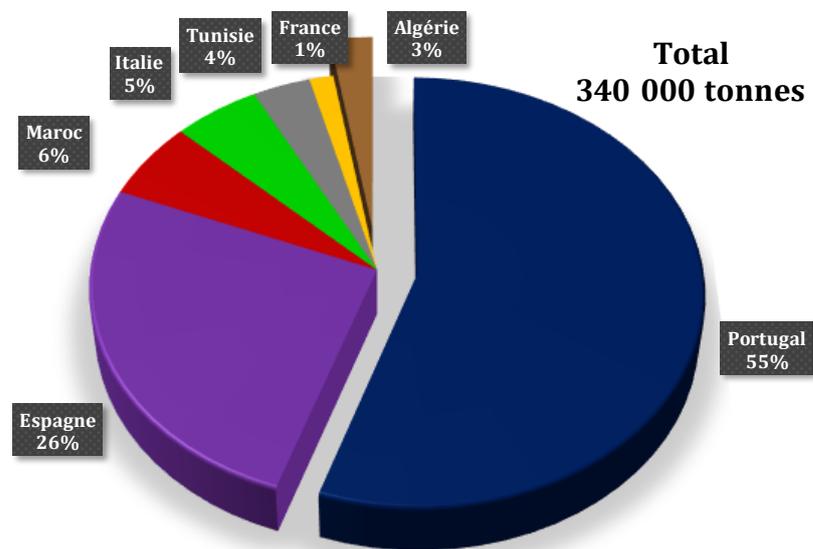


Figure 2.14. Production mondiale de liège.

Revenant un peu en arrière, la filière liège algérienne va de nos jours d'un passé très florissant vers un avenir incertain. Pourtant elle avoisinait les 553 000 quintaux en 1937 et les 350 000 quintaux en 1965, la production algérienne a enregistré une baisse remarquable sur les 50 ans qui ont succédé l'indépendance. Les chiffres indiquent que cette production n'a pas pu dépasser les 33 000 quintaux en 2012 (Fig. 2.15), exportés sous forme de liège brut ou granulé (2%), bouchons (70%) ou même encore des agglomérés (28%) (Abbas, 2013; Dehane et coll., 2013; Lachibi et Chehat, 2009). Un exemple concret résumant la souffrance de cette filière ces dernières années est le fait que 55% des unités de transformation de liège activant sur la région de Jijel ont cessé leur activité dans une période ne dépassant pas les huit années. Cherchant à comprendre les causes qui étaient derrière cette régression alarmante au niveau de la filière liège algérienne, certains travaux de recherche ont rapporté que cette dernière est due principalement aux points suivants (Bouhraoua, 2014) :

- Augmentation du taux de liège mâle qui présente une très faible valeur commerciale comparé avec le liège de reproduction,
- Mauvaise exploitation du liège,
- Vieillesse des peuplements et régénération déficiente,
- Manque des plans de gestion subéricole,
- Incendies récurrents qui ont ravagé plus de 200 000 ha sur une période de 27 ans (1985-2012).

Pour conclure, l'analyse faite dans cette partie a souligné la régression que connaît l'Algérie en termes de production et d'exploitation de liège. La mauvaise exploitation du liège et la concentration sur des applications restreintes étaient des facteurs fatals. Par conséquent, la remise en valeur de cette filière passe obligatoirement par l'orientation vers une nouvelle stratégie s'appuyant sur la bonne gestion subéricole et la recherche de nouvelles applications pouvant valoriser les différents types de liège.

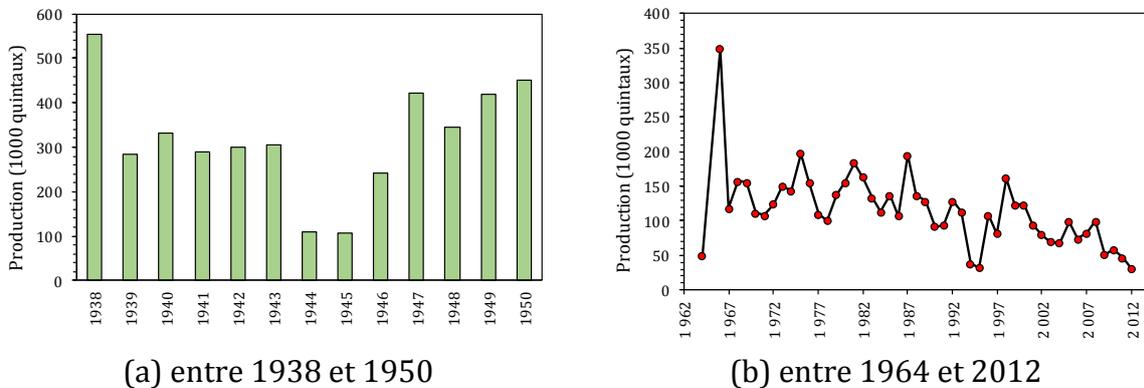


Figure 2.15. Progression de la production de liège en Algérie.

2.3. Etat des lieux sur les bétons et mortiers de liège

L'utilisation ou mieux encore la valorisation du matériau liège dans les composites cimentaires biosourcés destinés à des applications de construction est une solution prometteuse, permettant de contribuer à la fois à la résolution de quelques problèmes liés au développement durable, à l'efficacité énergétique et au confort des habitants. Pendant la dernière décennie, les bétons et les mortiers à base de liège ont reçu une attention particulière, ceci peut être clairement remarqué à travers le nombre de travaux de recherche qui ne cesse de s'accroître. Le but de cette section est de présenter une revue bibliographique exhaustive sur les différents travaux réalisés jusqu'à présent sur les composites de liège, commençant par leur formulation et leur malaxage et arrivant à leur caractérisation physique, hygrothermique, mécanique et microstructurale.

2.3.1. Formulation et malaxage

2.3.1.1. Formulation

Si on parle de définition, les composites cimentaires de liège sont des mélanges composés généralement d'un liant, d'eau, de granulats de liège pouvant avoir différentes tailles, dans la majorité de cas de granulats minéraux en faible quantité et d'un superplastifiant. Dans la littérature existante, la formulation des composites cimentaires à base de liège a reçu peu d'intérêt. Le type de liège utilisé et son pourcentage, le type de liant et son pourcentage ainsi que la prise en compte ou pas de l'absorption en eau des granulats de liège lors de la formulation sont tous des paramètres qui peuvent varier remarquablement d'une formulation à une autre. Les granulats de liège de reproduction issus de la production des bouchons naturels ou achetés depuis des entreprises de valorisation et les déchets des panneaux de liège expansés sont les types de granulats qui sont généralement utilisés. Ces granulats sont introduits dans le béton ou le mortier en effectuant soit des remplacements volumiques des granulats minéraux ou de la matrice, soit des remplacements massiques du liant. Les pourcentages testés dans la littérature couvrent un large intervalle. Pour les remplacements volumiques, cet intervalle varie entre 0 et 100%, tandis que pour les remplacements massiques il atteint un maximum de 30%, ceci à cause du manque considérable enregistré sur la quantité du liant. Quant à lui, le liant le plus utilisé est bien le ciment portland. Cependant, d'autres liants présentant un impact moins important sur l'environnement tel que la chaux et le plâtre ou bien des géopolymères inorganiques ont été également utilisés pour la fabrication des composites de liège. Sachant que le liège a la capacité d'absorber des quantités d'eau dépassant son poids initial, la prise en considération de ce paramètre pendant la formulation des composites de liège constitue un paramètre important qu'on doit définir minutieusement avant d'entamer la formulation des composites de liège. En effet, malgré son importance, ce paramètre a été un point de controverse entre les différentes campagnes expérimentales entreprises jusqu'à maintenant. Certains auteurs ont décidé de formuler leurs composites en utilisant des granulats de liège secs tout en ajoutant l'eau correspondante à leur absorption maximale (Karade, 2016). Dans d'autres travaux, les granulats de liège ont été introduits après avoir subi une saturation préalable (Panesar et Shindman, 2012; Ziregue et coll., 2016). Dans une autre catégorie de travaux constituant une part importante des travaux consultés, les granulats de liège ont été introduits dans leur état tel que reçus (légèrement humides ou secs) sans prise en compte de leur absorption en raison des problèmes qui peuvent être engendrés par l'excès d'eau. En gros, les différents paramètres utilisés dans la littérature pour la formulation des bétons, mortiers et chapes de liège sont résumés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3. Formulation des composites, types de liège et absorption du végétal dans la littérature.

Auteur	Type de composite	Type et taille de granulats de liège	Pourcentage de liège	Type de remplacement	Type de Liant	Absorption de liège
(Panesar et Shindman, 2012)	Mortier	Déchets de bouchons (liège de reproduction) Taille : (0,5-1), (2-3) et (3-5) mm.	0, 10 et 20%	Remplacement volumique du sable	Ciment portland	Granulats secs, surface saturée
(Panesar et Shindman, 2012)	Béton	Déchets de bouchons (liège de reproduction) Taille : (0,5-1), (3-5), (3-8) et (8-14) mm.	0, 10 et 20%	Remplacement volumique du sable, gravier ou sable et gravier	Ciment portland	Granulats secs, surface saturée
(Brás et coll., 2013)	Mortier	Déchets de bouchons (liège de reproduction) Taille : 0,5-2 mm	10, 20, 40, 50, 70 et 80%	Remplacement massique du sable	Ciment portland CEM-II BL 32,5N	Granulats secs sans prise en compte de l'absorption
(Moreira et coll., 2014)	Chape	Déchets de liège expansé à 350 °C et 300 kPa (liège de reproduction) Taille : (3-5) et (5-10) mm	80%	Remplacement volumique du sable	Ciment portland CEM-II BL 32,5N	Granulats de liège secs sans prise en compte de l'absorption. Des corrections ont été faites sur l'eau au moment du malaxage pour obtenir une consistance ferme
(Cherki et coll., 2014)	Enduit de plâtre	Déchets de production des bouchons (liège de reproduction) Taille : (2,5-5), (5-6,3) et (8-12,5) mm	Maximum que peut contenir un moule de 100 * 100 * 20 mm ³	Remplacement du volume apparent du plâtre	Plâtre	Granulats secs sans prise en compte de l'absorption
(Karade, 2016)	Mortier	Déchets issus de la production des bouchons (liège de reproduction) Taille moyenne : 0,1, 0,8 et 2,5 mm	10, 20, 30, 40, 50 et 60%	Remplacement massique du ciment	Ciment portland	Granulats secs + addition de l'eau de saturation

(Ziregue et coll., 2016)	Béton	Granulats expansés issus de la production de panneaux de liège algériens	0, 20, 30, 40, 50 60 et 70%	Remplacement volumique de la matrice	Ciment portland CEM-II B 42,5R	Granulats saturés pendant 48h
(Boussetoua et coll., 2017)	Béton	Granulats de liège naturel achetés du sud français	0, 25, 50 et 75%	Remplacement volumique du sable	Ciment portland CEM-II BL 32,5N	Granulats secs sans prise en compte de l'absorption
(Barnat-Hunek et coll., 2017)	Mortier	Déchets de liège expansé Taille : (0,5-1) et (1-2) mm	10 et 20%	En pourcentage de la quantité totale du mortier.	Chaux hydratée et ciment portland CEM-I 35.2R	Granulats légèrement humides (6%) sans prise en compte de l'absorption
(Novais et coll., 2019)	Mortier de polymère inorganique	Déchets de liège expansé Taille : non spécifiée	65, 79, 85, 88, 90 et 92%	Remplacement volumique du liant	Géopolymère inorganique (Métakaolin)	Granulats tels que reçus sans prise en compte de l'absorption
(Borges et coll., 2018)	Enduit	Granulats de liège expansé Taille : 0.5-2 mm	40, 60 et 100%	Remplacement volumique du sable	Ciment et cendres volantes	Non spécifié
(Gomes et coll., 2019)	Enduit	Déchets de liège naturel (liège de reproduction) Taille : (1-2) et (1.5-2) mm	70 et 80%	Remplacement volumique des granulats	Ciment portland CEM-II BL 32,5N	Non spécifié
(Jerónimo et coll., 2020)	Mortier	Déchets- micro granulats de liège naturel (liège de reproduction) Taille : 0,02, 0,04, 0,06 et 0,1 mm	2, 4, 6 et 8%	Remplacement massique du liant	Chaux hydraulique	Granulats tels que reçus sans prise en compte de l'absorption de liège en gardant un rapport Eau/Ciment constant
(Liu et coll., 2021)	Mortier	Granulats de liège expansé Taille : 0,5-2 mm	0, 10, 20, 30, 40 et 50%	Remplacement volumique du sable	Ciment portland	Granulats tels que reçus sans prise en compte de l'absorption de liège en gardant un rapport Eau/Ciment constant

2.3.1.2. Malaxage

Les propriétés des bétons biosourcés dépendent non seulement de la composition et du taux de chaque constituant, mais également de la méthode avec laquelle ces constituants sont mélangés. Ainsi, le mode de malaxage est lui aussi un paramètre très important dans la préparation et l'optimisation des propriétés des composites cimentaires de liège. Toutefois, en dépit de son importance, jusqu'à présent il n'existe pas un protocole permettant de décrire la méthode de malaxage des composites de liège.

Allant de l'outil de malaxage et passant par le temps et l'ordre d'introduction des constituants, les travaux de littérature ont révélé une grande divergence entre les méthodes utilisées pour la fabrication de ce type de composites, sujet de notre intérêt. Bien que certains chercheurs aient souligné que les méthodes de malaxage établies pour la préparation des bétons et mortiers ordinaires ne sont pas adaptées à la préparation des composites de liège (Moreira et coll., 2014), plusieurs chercheurs ont décidé d'obéir aux prescriptions des normes existantes pour la fabrication des bétons et mortiers de liège (Barnat-Hunek et coll., 2017; Gomes et coll., 2019; Jerónimo et coll., 2020; Panesar et Shindman, 2012), négligeant les hétérogénéités qui peuvent être engendrées et leurs effets sur les propriétés des mélanges. Dans une autre catégorie de travaux, les chercheurs ont décidé d'introduire la totalité des constituants secs et d'ajouter l'eau graduellement (Boussetoua et coll., 2017; Liu et coll., 2021). De manière différente, d'autres auteurs ont préféré tester plusieurs modes de malaxage pour pouvoir choisir le mode de malaxage permettant d'obtenir des mélanges homogènes. On parle ici de Brás et coll. (Brás et coll., 2013) et Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) qui finalement ont décidé d'adapter des modes de malaxage qui consistent à diviser l'opération de malaxage en 4 étapes (en anglais: Four stages method). Pour résumer, pour la préparation des composites de liège, des malaxeurs ayant différentes formes, des temps variants entre 2 et 14 min et des ordres d'introduction prévoyant l'introduction des granulats de liège en premier avant ou avec les granulats minéraux, sinon à la fin de la procédure de malaxage après l'introduction de tous les constituants ont été utilisés. Les modes de malaxage trouvés dans la littérature sont résumés en détail dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4. Malaxage des composites de liège dans la littérature.

Auteur	Type du composite	Mode de malaxage
(Panesar et Shindman, 2012)	Mortier	Selon les recommandations de la norme ASTM C305
(Panesar et Shindman, 2012)	Béton	Selon les recommandations de la norme CSA A23.2-2C
(Brás et coll., 2013)	Mortier	1) Malaxage manuel du sable + liège + ciment 2) Ajout de 90% d'eau et malaxage pendant 3 min (après 1min l'adjuvant est ajouté) 3) Ajout de la quantité d'eau restante après 3 min 4) Malaxage du mélange pendant 2 min

Auteur	Type du composite	Mode de malaxage
(Moreira et coll., 2014)	Chapes	1) Dans un malaxeur, les granulats de liège sont mis en place et suivis de 3min de malaxage. 2) le sable et ciment sont incorporés et malaxés pendant 5 min 3) 50% d'eau et malaxage pendant 3 min 4) la moitié de l'eau qui reste et malaxage pendant 3 min
(Karade, 2016)	Mortier	1) Malaxage manuel du liège + ciment 2) Ajout de l'eau efficace et l'eau d'absorption du liège 3) Malaxage jusqu'au revêtement total du liège
(Ziregue et coll., 2016)	Béton	1) Malaxage du sable + ciment pendant 1 min 2) Ajout de 2/3 de l'eau et malaxage pendant 2 min 3) Ajout du reste de l'eau + superplastifiant et malaxage 1 min 4) Ajout du liège progressivement et malaxage pendant 4 min
(Boussetoua et coll., 2017)	Béton	1) Malaxage du sable + liège + ciment 2) Ajout de l'eau progressivement jusqu'à obtention d'un mélange homogène
(Barnat-Hunek et coll., 2017)	Mortier	Selon les recommandations de la norme EN 196-1 :2006
(Novais et coll., 2019)	Mortier de polymère inorganique	1) Ajout du liège à la suspension de polymère inorganique préparée au préalable, 2) Malaxage mécanique pendant 1 min.
(Borges et coll., 2018)	Enduit	Non spécifié
(Gomes et coll., 2019)	Enduit	Selon les recommandations de la norme EN-196-1
(Jerónimo et coll., 2020)	Mortier	Selon les recommandations de la norme EN-1015-11
(Liu et coll., 2021)	Mortier	1) Malaxage à sec du sable + ciment + granulats de liège dans le mélangeur à coulis de ciment pendant 10 minutes. 2) Ajout de l'eau et de l'agent réducteur d'eau progressivement pendant le processus de mélange.
(Merabti et coll., 2020)	Mortier	1) Malaxage des constituants secs pendant 2 minutes 2) Ajout de l'eau graduellement et malaxage pendant 2 minutes

2.3.2. Propriétés des bétons et mortiers de liège

2.3.2.1. Consistance

Pourtant sa valeur est tranchante pour définir le mode de mise en œuvre des composites cimentaires de liège, la consistance au sens large et de manière précise l'affaissement (pour le béton) et l'étalement (pour le mortier) de ce type de composites n'a pas été suffisamment évalué dans les travaux réalisés jusqu'à présent. La totalité des travaux

consultés s'accordent sur le fait que l'incorporation du liège diminue la consistance des composites de liège (Brás et coll., 2013; Gomes et coll., 2019; Jerónimo et coll., 2020; Panesar et Shindman, 2012). Par exemple, dans une étude visant à étudier l'effet de la taille et du pourcentage de liège, tout en soulignant l'absence d'une relation claire entre la taille ou le pourcentage du liège avec l'affaissement des bétons qu'ils ont préparés, Panesar et Shindman (Panesar et Shindman, 2012) ont conclu que l'incorporation de 10% (bétons désignés de C2 à C8) et 20% (C9) de particules de liège diminue remarquablement l'affaissement des bétons. L'affaissement du béton témoin (C1) était de 155 mm. Cependant, cet affaissement n'a pas dépassé des valeurs de 40 et 10 mm quand le taux du liège est passé à 10 et 20%, respectivement (Fig. 2.16).

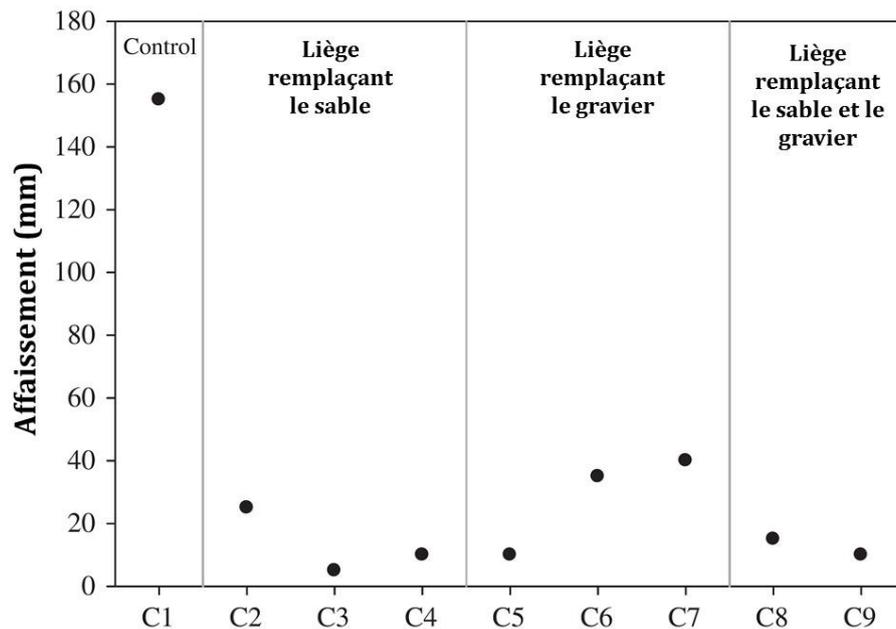


Figure 2.16. Affaissement des bétons contenant 0, 10 et 20% de liège (Panesar et Shindman, 2012).

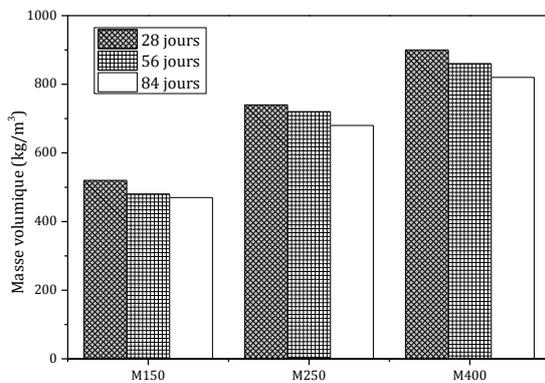
2.3.2.2. Masse volumique

La masse volumique (density en anglais) est la propriété permettant de savoir si le mélange appartient à la gamme des bétons ordinaires ou légers. Contrairement à la consistance, la masse volumique est la propriété qui est évaluée dans la totalité des travaux rencontrés sur les composites cimentaires à base de liège. Ces travaux ont montré qu'en plus du pourcentage de liège, cette masse volumique est liée au dosage du liant dans le composite. Dans la campagne expérimentale entreprise par Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) et visant à évaluer l'impact du dosage en ciment sur les propriétés hygrothermiques des chapes contenant 80% de liège comme substituant au sable, ont montré que l'incorporation du liège et la diminution du dosage en ciment conduisent à la diminution de la masse volumique des composites. Le mélange contenant 400 kg/m³ de ciment (M400) a montré une masse volumique de 900 kg/m³ à 28 jours. Comparée à cette valeur, les mélanges incorporant 250 (M250) et 150 kg/m³ (M150) de ciment ont

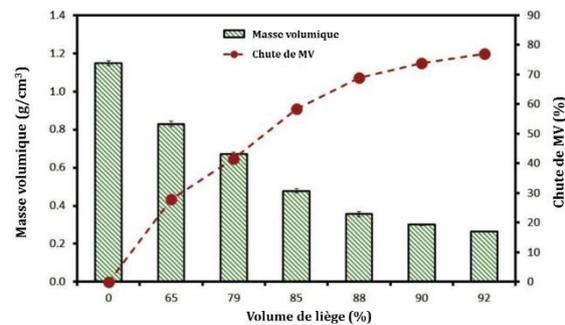
présenté des masses volumiques de l'ordre de 740 et 520 kg/m³, ceci correspond à des diminutions de 18 et 42% (Fig. 2.17-a).

Novais et coll. (Novais et coll., 2019) qui visaient l'élaboration de composites inorganiques à base de liège ont aussi confirmé que l'incorporation de liège réduit considérablement la masse volumique des composites. En effet, les composites formulés sans granulats de liège ont montré une masse volumique de 1150 kg/m³. Cependant, l'incorporation de liège en volumes variant entre 65 et 92% a causé des diminutions minimales de 30%. Pour 92% de liège, la diminution enregistrée au niveau de la masse volumique était de l'ordre de 78% (Fig. 2.17-b). La diminution, selon ces auteurs est attribuée à la faible masse volumique du liège comparée avec le liant inorganique et le sable.

Dans l'ensemble, qu'ils s'agissent de bétons ou mortiers de liège, les travaux consultés indiquent que les composites de liège présentent en général des masses volumiques qui sont linéairement liées avec le pourcentage de liège incorporé. De plus, ces masses volumiques sont inférieures à 2000 kg/m³, ce qui les classifie comme composites légers par excellence.



a) influence du dosage en ciment (Moreira et coll., 2014)



b) influence du pourcentage de liège (Novais et coll., 2019)

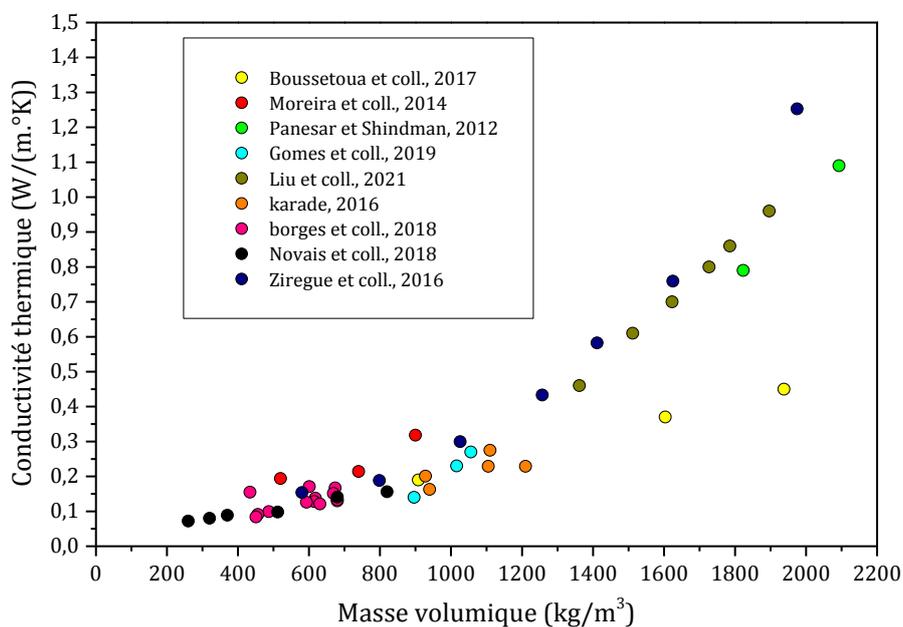
Figure 2.17. Masse volumique des composites de liège.

2.3.2.3. Propriétés thermiques

La conductivité thermique est la propriété thermique la plus étudiée dans la littérature. Elle varie selon la formulation dans un intervalle allant de 0,05 à 1,0 W/(m.K). Une étude récente réalisée par Karade (Karade, 2016) montre que la conductivité thermique des composites contenant du liège comme substitution massique (de 10 à 67%) du ciment varie en fonction du taux de liège incorporé entre 0,05 et 0,3 W/(m.K). Dans une deuxième étude très récente visant à faire une étude comparative entre la capacité isolante des composites à base de liège et ceux contenant du polystyrène, Borges et coll. (Borges et coll., 2018) ont formulé des mortiers de liège incorporant 40, 60 et 100% de liège comme substitution volumique aux granulats. A la fin de cette étude, ces chercheurs ont rapporté que les mortiers préparés ont une excellente conductivité thermique. Cette conductivité était de 0,099, 0,138 et 0,167 W/(m.K) pour des mortiers contenant 100, 60 et 40% de liège respectivement, soulignant ainsi que l'augmentation du taux de liège améliore la conductivité thermique des composites. En utilisant un liant de type géopolymère

inorganique et des volumes de liège variant entre 65 et 92%, Novais et coll. (Novais et coll., 2019) ont réussi à formuler des composites ayant de très faibles conductivités thermiques appartenant à l'intervalle 0,07-0,156 W/(m.K).

Les travaux permettant de lier la conductivité thermique à la masse volumique sont aussi nombreux et montrent que la diminution au niveau de la masse volumique signifie une diminution de la conductivité thermique, donc une amélioration de la capacité isolante des composites de liège. La Fig. 2.18 présente la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des composites de liège sur la base des différents résultats issus de la littérature. On observe une forte relation entre ces deux paramètres, ceci est dû au fait que la diminution de la masse volumique signifie une augmentation du volume d'air au sein du composite. Sachant que l'air sec est le meilleur isolant naturel, plus la quantité de vides est importante dans le mélange, plus la conductivité thermique est faible.



L'exploration menée par Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016), visant à étudier l'influence du pourcentage du liège expansé sur les propriétés hygrothermiques des bétons de liège a démontré que l'augmentation du taux de liège dans le mélange entraîne une augmentation de la chaleur spécifique. La relation entre la chaleur spécifique et le pourcentage de liège, selon Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016), a une forme exponentielle. Ainsi, en fonction du taux de liège, les bétons de liège ont montré des valeurs qui vont de 1250 à 1780 J/(g.K). En plus du pourcentage de liège, cette étude a aussi montré que les conditions de cure ont aussi une incidence sur la valeur finale de la chaleur spécifique. Ceci est montré sur la Fig. 2.19 qui indique que la cure dans l'eau (ENV2) donne des chaleurs spécifiques supérieures par rapport à une cure sèche dans les conditions du laboratoire (ENV1).

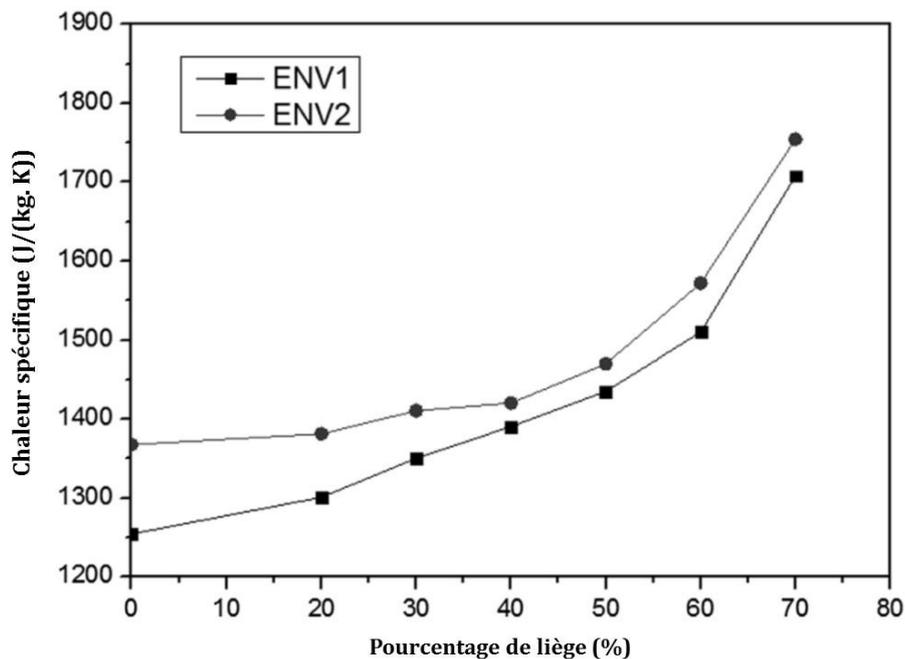


Figure 2.19. Chaleur spécifique des bétons de liège expansé (Ziregue et coll., 2016).

2.3.2.4. Propriétés hydriques

De manière similaire aux propriétés de transfert thermique, les travaux de littérature entrepris jusqu'à maintenant confirment que les propriétés de transfert hydrique sont liées à la composition des composites de liège.

Bien que la valeur de la teneur en eau à une humidité relative donnée peut être influencée par le dosage en liant et en liège, les travaux réalisés par Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) et Boussetoua et coll. (Boussetoua et coll., 2017) ont précisé que l'allure de l'isotherme pendant la phase d'adsorption est similaire pour tous les composites formulés, présentant trois phases d'adsorption. Cette isotherme commence par une phase d'adsorption monocouche se traduisant par une faible augmentation de la teneur en eau avec l'augmentation progressive de l'humidité relative dans un intervalle inférieur à 34% d'Humidité Relative (HR). Pour des humidités situées entre 34 et 85%, l'augmentation de la teneur en eau suit une pente plus importante à cause d'une adsorption multicouches.

Après cette valeur d'humidité, les isothermes montrent une hausse importante de la teneur en eau avec la variation de l'humidité relative, ceci est due au phénomène de condensation capillaire.

Les travaux consultés dans la littérature révèlent que le passage de 25% à 75% de liège engendre une augmentation de l'ordre de 80% au niveau de la teneur en eau des bétons de liège. En effet, à 95% d'humidité relative, cette teneur en eau était de 2% pour le mélange C25 (contenant 25% de liège). Elle est cependant passée à une valeur de 3,6% pour le béton C75 contenant 75% de liège (Fig.2.20-a) (Boussetoua et coll., 2017).

La campagne expérimentale menée par Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) et ayant pour objectif d'étudier l'effet du dosage en ciment sur les propriétés hygrothermiques des chapes légères a révélé que l'augmentation du dosage en ciment provoque l'augmentation de la teneur en eau des chapes à une humidité donnée. Ainsi, pour une humidité relative de 93%, Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) ont enregistré une teneur en eau maximale de 5,8% pour les chapes contenant 400 kg/m³ de ciment (M400). Néanmoins, en diminuant le dosage en ciment à 250 et 150 kg/m³, ces auteurs ont enregistré respectivement des teneurs en eau de l'ordre de 4,6 et 3,8% (Fig. 2.20-b). Il est utile aussi de noter que Moreira et coll., 2014 n'ont pas réussi à expliquer le phénomène qui, dans une lecture, peut être due à la nature microporeuse des pores de la pâte cimentaire qui permet la manifestation des phénomènes de condensation capillaire.

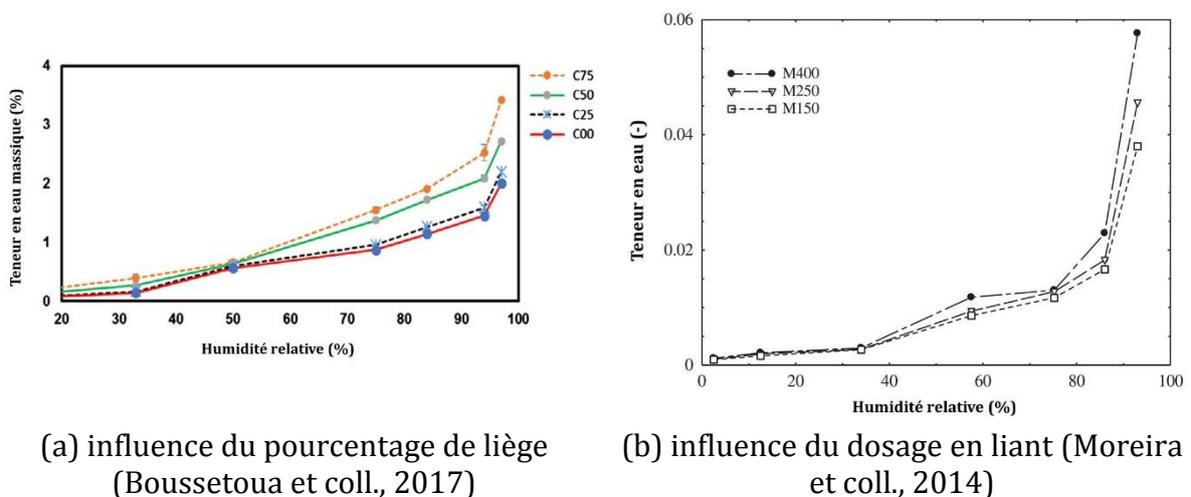


Figure 2.20. Isothermes d'adsorption pour les composites de liège.

La perméabilité à la vapeur qui est un très fort indicateur sur la capacité du matériau à évacuer de l'humidité a été aussi un paramètre qui était présent dans la littérature traitant des composites de liège. Sur la base des travaux de Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014), Boussetoua et coll. (Boussetoua et coll., 2017) et Hunek et coll. (Barnat-Hunek et coll., 2017), l'un peut admettre que ce paramètre, en plus du pourcentage de liège, du dosage et du type de liant, peut être influencé par une hydrophobisation préalable des granulats de liège.

En effectuant une hydrophobisation des granulats de liège expansés à l'aide d'une solution comprenant une résine méthyl siliconée (mortiers dénotés par 1 à leur fin), une émulsion aqueuse de résine méthyl siliconée et de solvants organiques utilisés comme additif

(mortiers dénotés par 2 à leur fin) ou au moyen d'alkylalcoxy-silane de bas poids moléculaire (mortiers dénotés par 3 à leur fin), des mortiers contenant 10% de liège et la chaux (C1L, C1L.1, C1L.2 et C1L.3), des mortiers avec 20% de liège et de la chaux (C2L, C2L.1, C2L.2 et C2L.3) et des mortiers avec 20% de liège et du sable à la place de la chaux (C2S, C2S.1, C2S.2 et C2S.3) sont préparés par Hunek et coll. (Barnat-Hunek et coll., 2017). Les résultats obtenus par ces auteurs ont montré que la perméabilité à la vapeur des mortiers préparés varie entre $1,8 \cdot 10^{-12}$ et $11,9 \cdot 10^{-12} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$. Les mortiers contenant des granulats de liège non traités C2L, C1L et C2S ont donné respectivement des perméabilités à la vapeur de d'ordre de 11,9, 9,4 et 6,1 $\cdot 10^{-12} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, indiquant ainsi que l'augmentation du taux de liège engendre une hausse de la perméabilité à la vapeur et confirmant les résultats obtenus par Boussetoua et coll. (Boussetoua et coll., 2017). Dans le travail réalisé par Barnat-Hunek et coll. (Barnat-Hunek et coll., 2017), l'hydrophobisation a causé la diminution de la perméabilité à la vapeur des mortiers de liège expansés. Par exemple pour les mortiers C2L, en fonction de la méthode d'hydrophobisation appliquée, des diminutions de l'ordre 64, 59 et 73% ont été enregistrées pour les traitements notés respectivement 1, 2 et 3 (Fig. 2.21).

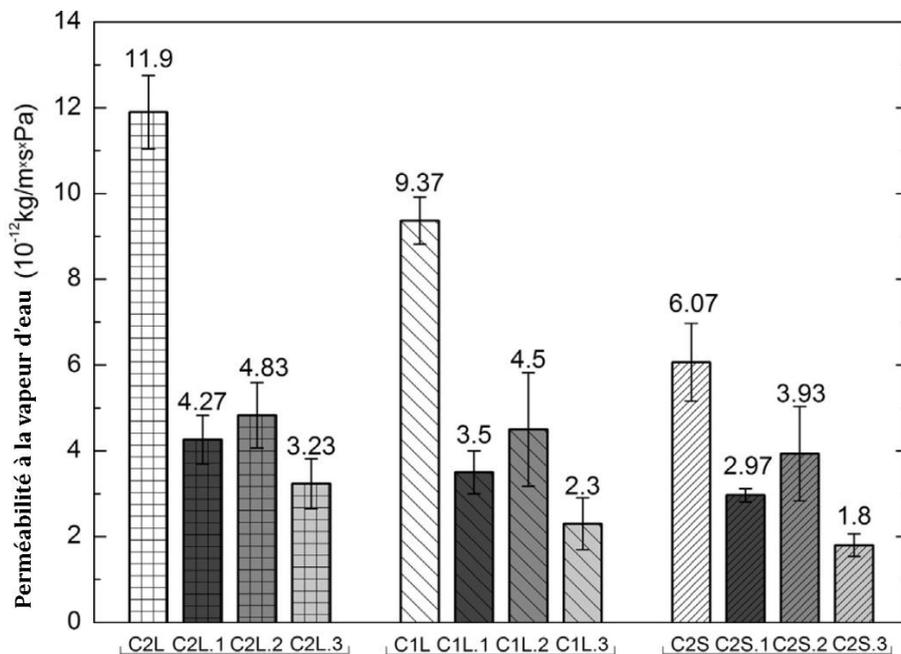
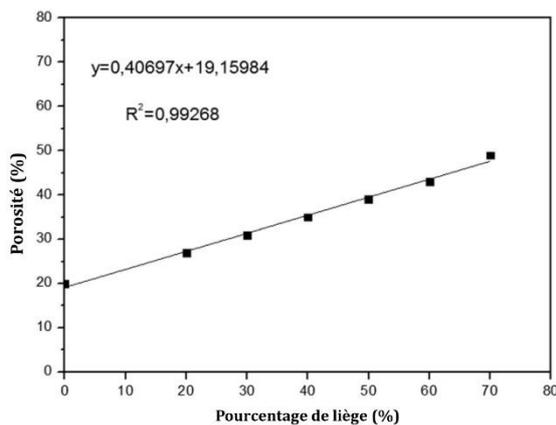


Figure 2.21. Perméabilité à la vapeur des mortiers de liège (Barnat-Hunek et coll., 2017).

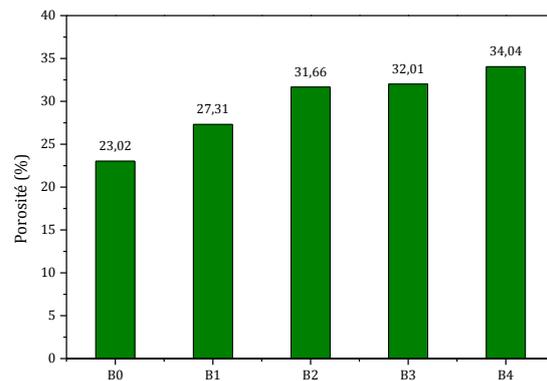
2.3.2.5. Porosité et microstructure

La porosité des composites de liège, malgré son importance pour la compréhension des phénomènes de transferts hygrothermiques, n'a pas eu la place qu'elle mérite dans les travaux de littérature. Cependant, il a été prouvé que sa valeur est relativement élevée par rapport à la porosité des composites utilisés couramment dans la construction (béton, brique, mortier classique). En effet, pour des composites de liège incorporant des pourcentages volumiques de liège variant entre 10 et 70% (Barnat-Hunek et coll., 2017; Brás et coll., 2013; Ziregue et coll., 2016) et des pourcentages massiques inférieurs à 8% (Jerónimo et coll., 2020), les travaux consultés dans la littérature montrent que cette

porosité ouverte varie entre 0 et 55%. Une des plus importantes informations à saisir pour ce paramètre est qu'indépendamment du type de composite et de sa formulation, plus le taux de liège augmente dans le composite, plus sa porosité augmente. Ceci a été démontré par l'étude de Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016) sur des bétons de liège contenant des volumes de liège allant de 20 à 70%. Lors de cette étude, ces chercheurs ont rapporté que la porosité des bétons contenant seulement 20% de liège était de 25%. En revanche, quand le pourcentage est passé à 70%, cette porosité a presque doublé pour franchir une valeur de 49% (Fig. 2.22-a). Similairement aux bétons de liège, les mortiers de liège préparés par Jeronimo et coll., 2020 et contenant une masse de liège de 2% (B1) ont révélé une porosité de 27,3%. Néanmoins, en augmentant le pourcentage à 4 (B2), 6 (B3) et 8% (B4), cette porosité a augmenté pour prendre respectivement des valeurs de 31, 32 et 34%. Une autre information qui ressort des résultats obtenus par Jeronimo et coll. (Jerónimo et coll., 2020) est que la variation du pourcentage de liège présente aussi un impact sur le diamètre des pores moyen, qui en fonction du pourcentage variait entre 25 et 458 nm (Fig. 2.22-b). Ces constats sont, selon Jeronimo et coll. (Jerónimo et coll., 2020), dus à la nature poreuse des particules de liège qui, en augmentant la porosité intraparticulaire cause une augmentation de la porosité totale.



(a) substitution volumique (Ziregue et coll., 2016)



(b) substitution massique (Jerónimo et coll., 2020)

Figure 2.22. Porosité des composites de liège en fonction du pourcentage de liège incorporé.

Pareil que pour la porosité, quoique la microstructure soit un paramètre décisif pour la bonne compréhension du comportement des composites de liège, l'on tend à mentionner que ce paramètre n'a pas reçu l'attention suffisante dans la littérature existante sur ce type de composites. En s'appuyant sur le peu de travaux qui ont évalué la microstructure des composites de liège à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB), on peut dans un premier temps dire que le type du liant et le pourcentage de liège sont les paramètres qui peuvent causer des changements au niveau de la microstructure des composites.

L'étude réalisée récemment par Hunek et coll. (Barnat-Hunek et coll., 2017) a évalué la microstructure des mortiers contenant avec de la chaux, 10% (C1L) et 20% (C2L) de liège (Fig. 2.23). Pour les mortiers désignés C1L, une structure dense et riche en ettringite, portlandite et CSH a été observée. De plus, l'analyse de la Zone de Transition Interfaciale (ITZ) entre les granulats de liège expansés et la matrice chaux-ciment a révélé que les

granulats de liège ont présenté une bonne adhérence avec la matrice choisie. En contrepartie, le mortier C2L contenant 20% de liège a montré l'apparition de microfissures au niveau de l'ITZ entre le liège et la matrice cimentaire. En outre, comparé avec le C1L, ce mortier a aussi montré la naissance de plusieurs pores ayant des diamètres de 200 à 527 μm . Malgré l'absence de plus amples explications des phénomènes qui se sont manifestés, l'étude réalisée par Hunek et coll. (Barnat-Hunek et coll., 2017) a permis de souligner l'effet du pourcentage de liège sur la microstructure des mortiers de liège. Ceci peut constituer une explication partielle de l'augmentation de la porosité en augmentant le taux de liège.

En essayant d'analyser la microstructure d'un mortier formulé en introduisant 65% de liège expansé dans un liant à base de polymère inorganique, Novais et coll. (Novais et coll., 2019) se sont concentrés sur la qualité de l'ITZ liège-matrice. Tout en soulignant que la matrice qu'ils ont développée présente un aspect dense avec l'absence de pores de grande taille, Novais et coll. (Novais et coll., 2019) ont aussi réussi à montrer l'absence d'une interface poreuse entre le liège et la matrice (Fig.2.24).

Il est important de rappeler que le nombre d'échantillons testé reste faible ; ces résultats ne peuvent donc pas être généralisés pour les différents types de composites de liège.

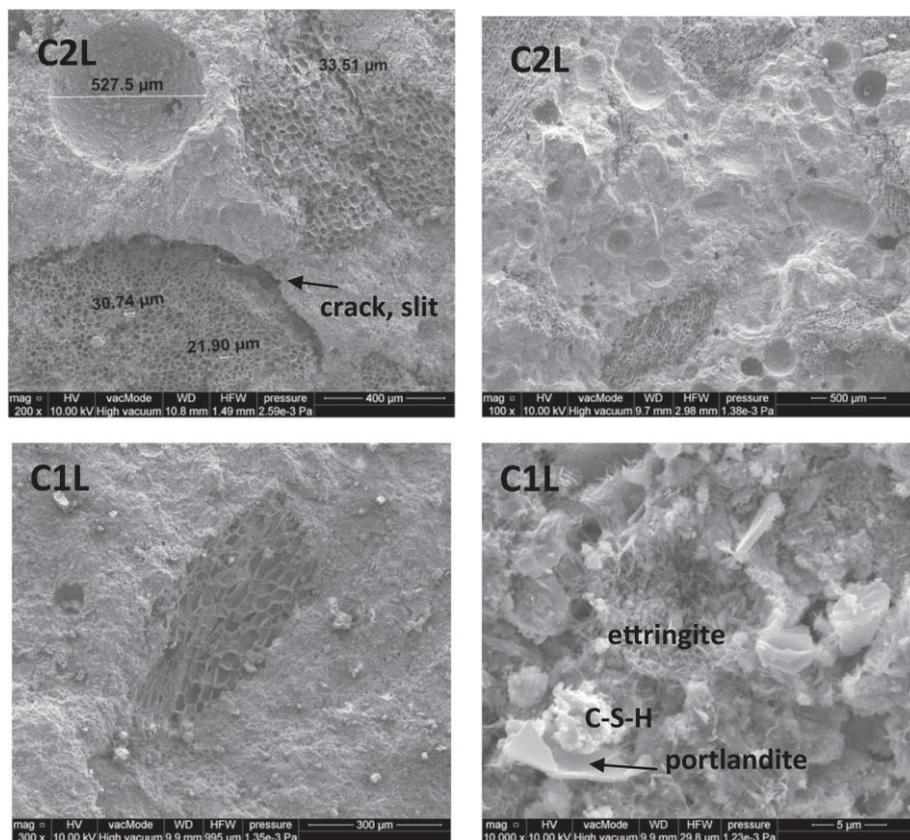


Figure 2.23. microstructure des mortiers de liège-chaux (Barnat-Hunek et coll., 2017)

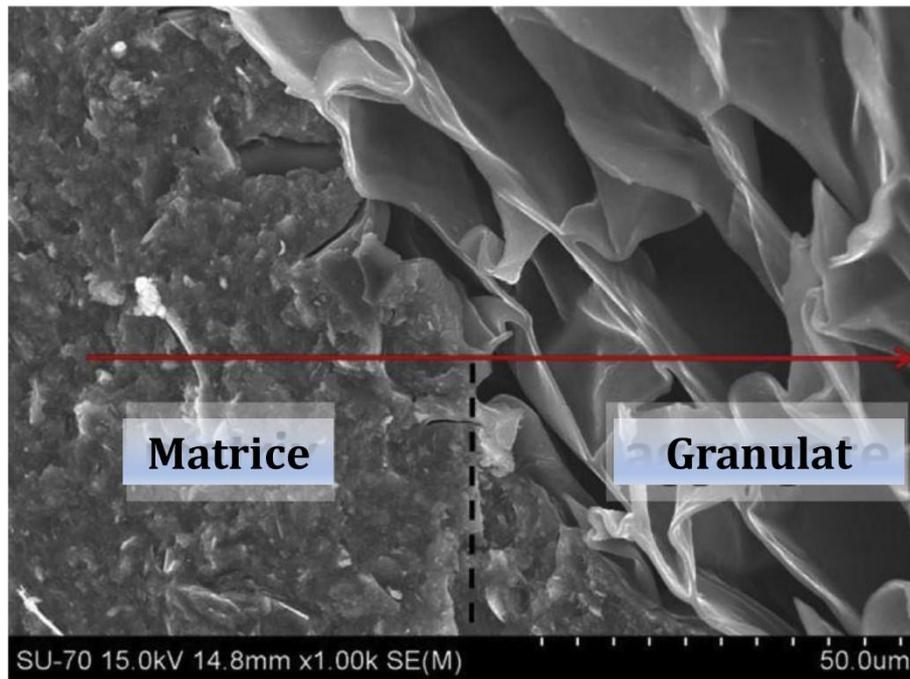


Figure 2.24. ITZ entre liège et matrice géopolymérique (Novais et coll., 2019).

2.3.2.6. Propriétés mécaniques

2.3.2.6.1. Résistance à la compression

Vu son importance pour la détermination des applications des composites de liège, la résistance à la compression est une propriété qui est évaluée dans la majorité des travaux de la littérature. Dans ces travaux, les auteurs ont rapporté qu'en raison de leur porosité élevée, l'incorporation du liège entraîne une diminution remarquable de la résistance à la compression. Cette résistance varie en fonction de la formulation entre 0,12 et 22,6 MPa pour des pourcentages de liège allant de 10 à 80% (Fig. 2.25). En général, pour des pourcentages de liège inférieurs à 30%, les composites de liège présentent des résistances permettant de les utiliser comme matériaux de structure. Au-delà de ce pourcentage, les composites ont généralement des résistances qui les qualifient comme matériaux d'isolation. A l'issue de la campagne menée par Bras et coll. (Brás et coll., 2013), les chercheurs ont précisé que la résistance à la compression des mortiers de référence (qui ne contiennent pas de liège) était de 24,4 MPa. Toutefois, l'introduction du liège en volumes de 10, 20, 40, 50, 70 et 80% a donné des mortiers ayant respectivement des résistances de 15,4, 16,1, 10,0, 6,0, 4,4 et 3,9 MPa à 28 jours. Similairement à ceux trouvés par Brás et coll. (Brás et coll., 2013), les résultats publiés par Panesar et Shindman (Panesar et Shindman, 2012) sur des bétons de liège indiquent que l'incorporation de 10 et 20% de liège génère des diminutions de 64 et 85%, ce qui signifie que les bétons de liège incorporant 10 et 20% avaient des résistances respectivement de 17,8 et 7,1 MPa à 28 jours. En tentant d'aller vers des composites contenant des volumes élevés de liège, Borges et coll. (Borges et coll., 2018), en incorporant des volumes de 40, 60 et 100% de

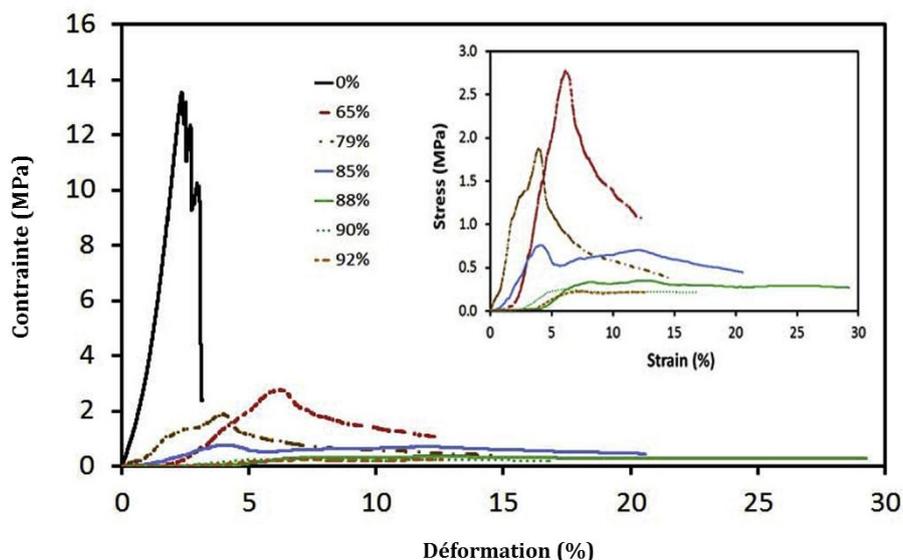


Figure 2.26. Courbes contrainte-déformation des bétons en fonction du pourcentage de liège (Novais et coll., 2019).

2.3.2.6.2. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est aussi un paramètre qui a été mis en avant lors des travaux sur les composites de liège. La comparaison entre les résultats de la littérature montre que la résistance à la flexion est légèrement influencée par le type du liant utilisé. Novais et coll. (Novais et coll., 2019), qui ont utilisé un liant de type géopolymère inorganique (métakaolin), ont trouvé que la résistance à la flexion des composites incorporant des volumes allant de 65 à 92% de liège expansé varie entre 0,3 et 1,5 MPa. Dans une autre étude réalisée par Borges et coll. (Borges et coll., 2018), des composites formulés avec 60 et 100% de liège expansé mais en utilisant du ciment comme liant, ont révélé des résistances très proches de celles obtenues dans la campagne entreprise par Novais et coll. (Novais et coll., 2019). En effet, les résistances obtenues étaient de 0,93 et 0,64 MPa pour les mortiers contenant 60 et 100%, respectivement.

Contrairement au type de liant, l'augmentation du pourcentage de liège engendre des diminutions remarquables au niveau de la résistance à la flexion des bétons et mortiers de liège. Ceci a été prouvé à travers les études menées par Bras et coll. (Bras et coll., 2013), Karade (Karade, 2016), Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016), Boussetoua et coll. (Boussetoua et coll., 2017) et Novais et coll. (Novais et coll., 2019) qui ont signalé que pour des volumes de liège variant entre 10 et 92%, les chutes de résistance à la flexion peuvent atteindre un maximum de 91% (Fig.2.27). Ces constats, selon les chercheurs peuvent être associés à la porosité élevée du liège ainsi qu'à la faible adhérence de ce dernier avec la matrice cimentaire, surtout pour des taux élevés.

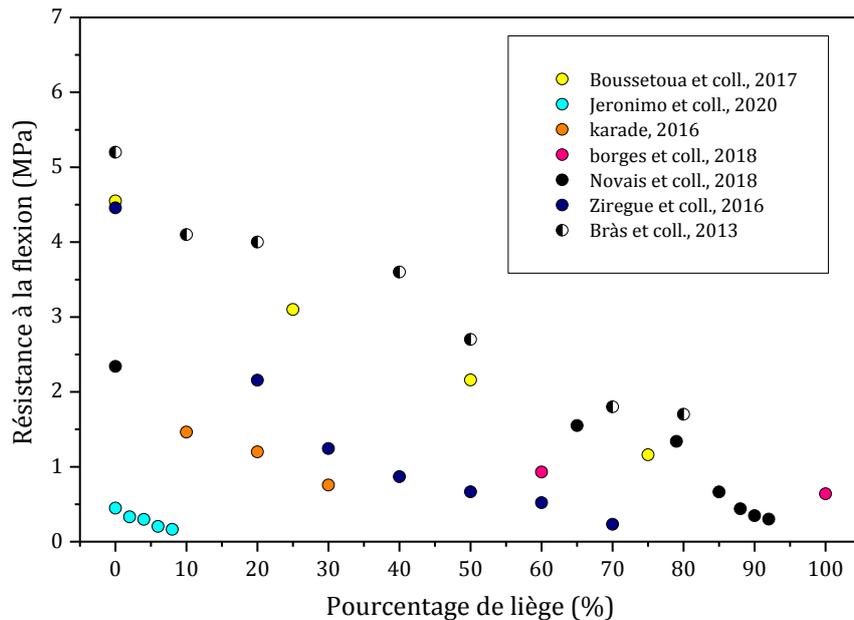


Figure 2.27. Résistance à la flexion des composites de liège.

2.4. Synthèse bibliographique, valeur du travail élaboré et démarche adoptée

2.4.1. Synthèse bibliographique

A travers le premier chapitre, le contexte général, la nécessité d'utiliser les matériaux biosourcés dans la construction ainsi que certaines de leurs propriétés ont été mis en évidence. Sachant que les bétons biosourcés font en général, appel à des matériaux locaux, une analyse des ressources disponibles en Algérie a été aussi faite. Cette analyse a montré que malgré son grand potentiel productif en liège, notre pays demeure à l'avant-dernière place dans le classement des pays producteurs de cette ressource. Par la suite, les différents types de liège, leurs caractéristiques, leurs avantages ainsi que les différentes applications qu'ils trouvent dans le bâtiment ont aussi été introduits. Enfin, pour avoir une idée claire sur les travaux réalisés jusqu'à l'heure actuelle sur les bétons et mortiers de liège, une analyse bibliographique exhaustive concernant les travaux réalisés sur ce type de matériaux a été élaborée.

L'analyse bibliographique réalisée a révélé que les travaux de littérature sur les composites de liège se sont focalisés sur l'étude des paramètres suivants :

- Effet du taux de liège,
- Utilisation des granulats de liège expansés,
- Effet de la taille de liège,
- Effet du type (ciment, plâtre, chaux et liant géo-polymérique) et du dosage en liant,
- Effet de l'hydrophobisation des granulats de liège

De plus, les composites de liège qui ont fait l'objet de travaux antérieurs dans la littérature étaient des composites qui incorporent soit des granulats de liège de **reproduction** issus de la production des bouchons (ayant subi un processus industriel) soit des **granulats de liège expansé** résultant des déchets de production de panneaux de liège et ayant subi une

température de 350 °C et une pression de 300 kPa. Donc, au meilleur de nos connaissances, pourtant sa qualité lui offre une gamme restreinte d'applications, aucun des travaux réalisés n'a étudié le potentiel du liège **mâle** dans une matrice cimentaire, afin d'améliorer certaines propriétés des bétons ou mortiers utilisés dans la construction.

2.4.2. Démarche de travail

Sur la base de l'analyse bibliographique réalisée, nous avons noté un certain nombre de carences auxquels nous avons décidé d'apporter des réponses dans la présente étude. Il s'agit de :

1) Attendu que l'augmentation du taux de liège mâle dans la forêt algérienne est l'un des facteurs causant la régression de production de liège en Algérie, et que notre pays essaie de développer une stratégie permettant de réduire sa consommation énergétique de 9% d'ici 2030, l'incorporation du liège mâle dans une matrice cimentaire pour produire des composites à performance hygrothermique améliorée s'impose comme une des solutions pouvant à la fois améliorer le rendement énergétique des bâtiment et contribuer à la création de nouvelles voies valorisant ce matériau naturel qui présente une très faible valeur commerciale. De ce fait, la présente étude vise le développement et l'optimisation de la performance d'un nouveau béton léger incorporant des granulats de liège mâle et destiné à des applications dans le secteur du bâtiment.

2) Etant donné que les composites de liège constituent une nouvelle catégorie de matériaux de construction, la littérature existante sur ces derniers indique que jusqu'au moment de la rédaction de ce manuscrit, il n'existe pas une norme qui décrit la méthode de préparation et de malaxage des bétons et mortiers de liège. En effet, dans la littérature, certains auteurs ont mentionné que la méthode de malaxage des bétons ordinaires ne peut pas être adaptée aux bétons de liège à cause de la faible densité de ce dernier (qui peut créer des problèmes d'hétérogénéité). De plus, une grande divergence entre les modes de malaxage utilisés pour la préparation des bétons de liège a été noté. Par conséquent, dans une optique d'éviter les problèmes d'hétérogénéité à cause du mauvais malaxage du béton, nous allons dans la présente étude commencer par la recherche du mode de malaxage adéquat pour la préparation de nos bétons de liège.

3) Au-delà du problème de malaxage des bétons de liège, nous avons noté que la négligence ou la prise en compte de l'absorption des granulats de liège au moment de la formulation des bétons de liège a constitué une vraie controverse. Jusqu'à présent, l'effet de ce paramètre sur les performances des composites de liège à l'état frais et durci reste inconnu. Par conséquent, après l'optimisation du mode de malaxage et l'évaluation de la performance des bétons de liège mâle, l'impact de la prise en compte de l'absorption de liège lors de la formulation des bétons sera évalué afin de mieux comprendre son comportement et optimiser sa performance.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, la première partie a été dédiée à une analyse des ressources végétales disponibles dans la forêt algérienne. Cette analyse a révélé que l'Algérie dispose d'un fort potentiel productif de liège. Cependant, la filière liège reste loin de jouer son rôle dans le développement économique et enregistre dans ces dernières années des régressions

alarmantes sur les chiffres de production. Ainsi notre pays occupe l'avant-dernière place dans le classement des pays producteurs de liège. L'une des causes principales derrière cette régression est l'augmentation du taux de liège mâle qui ne présente pas la qualité suffisante pour la production de bouchons, l'application la plus rentable.

Dans la deuxième partie du chapitre, gardant en tête les multiples avantages que présente le liège, un état des lieux sur les travaux réalisés vis-à-vis des bétons et mortiers de liège a été effectué. Cette partie a montré que les travaux réalisés se sont focalisés sur l'utilisation des granulats de liège issus des déchets de production de bouchons (liège de reproduction) ou bien de la fabrication des panneaux d'isolation expansés (mélange de liège traité à 350 °C et 300 kPa). Autrement dit, l'utilisation du liège mâle comme granulats dans les composites cimentaires est une application n'ayant eu que très peu d'intérêt. L'état des lieux réalisé a aussi révélé que malgré les performances mécaniques et hygrothermiques que montrent les composites de liège, l'opération de malaxage et la prise en compte de l'absorption du liège lors de leur préparation restent des paramètres à effets inconnus jusqu'à présent.

Sur la base du travail bibliographique réalisé, la présente étude s'assigne l'objectif de développer un nouveau béton de liège à base de granulats de liège mâle dont la formulation sera optimisée par le choix du mode de malaxage adéquat et l'étude des effets de pourcentage de liège et de la prise en compte de l'absorption des granulats végétaux. Dans le prochain chapitre, une caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de nos bétons et une présentation des méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ces bétons seront présentées.

Chapitre 3

Caractérisation des matières premières & procédures expérimentales.

Introduction

Après l'état de l'art présenté dans la première partie du mémoire, ce chapitre est consacré à la présentation de la campagne expérimentale réalisée dans le cadre de cette thèse. Nous commençons par une présentation de la démarche globale où on résume les différentes étapes de la campagne. Nous procédons par la suite, à la présentation et la caractérisation des différentes matières premières utilisées pour la préparation des bétons, en l'occurrence : le liant, le superplastifiant les granulats minéraux ainsi que les granulats de liège. Après la caractérisation des matières premières, les différentes formulations préparées ainsi que la fabrication des éprouvettes de béton seront mises en avant. La dernière partie du chapitre est dédiée à la description des différentes méthodes expérimentales utilisées pour évaluer la performance des bétons de liège.

3.1. Présentation de la campagne expérimentale

Sur la base de l'état de l'art présenté lors de la première partie, la campagne expérimentale réalisée dans le cadre de notre travail vise principalement le développement, la compréhension du comportement et l'optimisation des performances d'un béton biosourcé à base d'un nouveau type de granulat : le liège mâle. Rappelant des limites identifiées sur la préparation des composites de liège dans le corpus de la littérature existant, la campagne expérimentale présentée dans ce manuscrit est divisée en deux grandes parties (Fig. 3.1) :

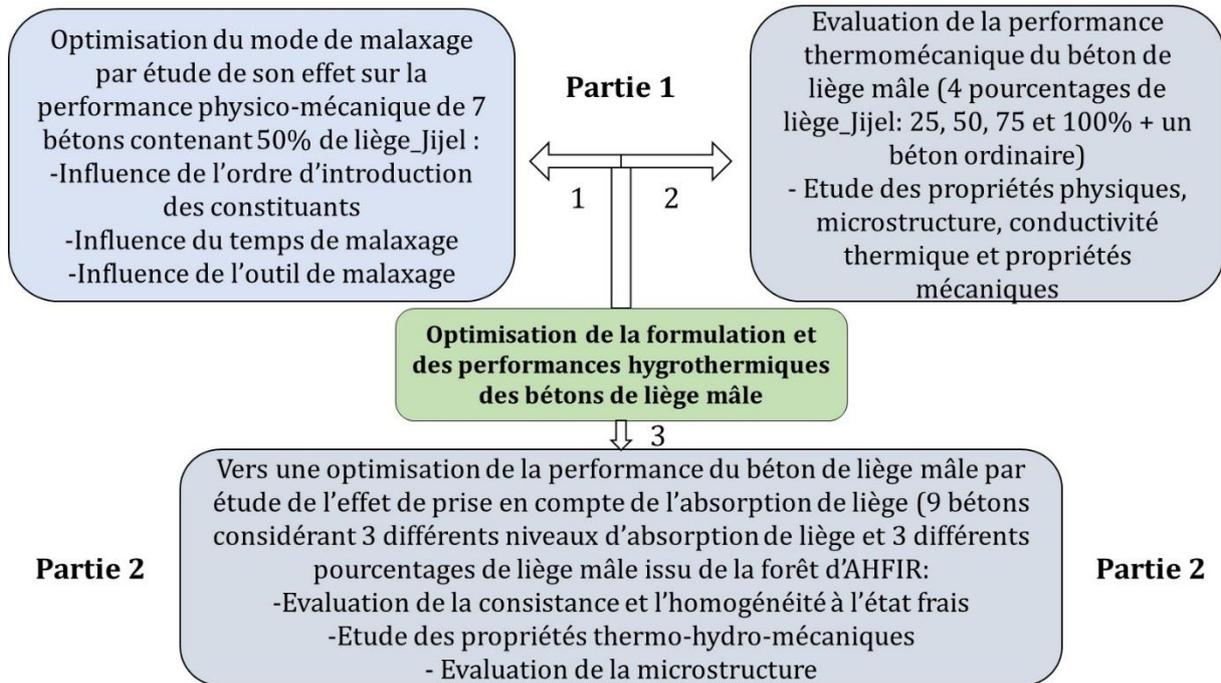


Figure 3.1. Démarche suivie lors de l'élaboration de la campagne expérimentale.

- Une première partie : divisée elle-même en deux, à savoir : (i) une première destinée à l'optimisation du mode de malaxage du béton de liège par l'étude de l'influence du type du malaxeur, du temps de malaxage et de l'ordre d'introduction des constituants. (ii) une deuxième visant à évaluer la performance thermomécanique des bétons de liège mâle dont l'opération de malaxage est optimisée. Cette partie consiste à déterminer l'effet d'introduction de différents pourcentages de liège mâle dans le béton.
- Une deuxième partie : dont l'objectif est de mieux comprendre le comportement du béton de liège à travers l'étude de l'impact de l'eau efficace absorbée par les granulats de liège. En effet, les bétons de liège mâle sont formulés en utilisant des granulats de liège secs auxquelles différentes quantités d'eau correspondantes à différents niveaux d'absorption sont ajoutées. Finalement, les performances thermo-hydro-mécanique ainsi que la microstructure des différents bétons sont évaluées.

3.2. Caractérisation des matières premières

Dans cette première partie du chapitre, une présentation et une caractérisation des propriétés physiques et microstructurales des matières premières utilisées pour la formulation de nos bétons de liège sera faite. Il s'agit du liant (ciment), de l'eau, des granulats minéraux (sable et graviers) et des granulats végétaux (liège).

3.2.1. Ciment

Tout au long de la campagne expérimentale, le liant utilisé est un ciment portland composé CPJ CEMII/A-P 42,5N conforme à la norme algérienne NA 442/213 (Fig 3.2-a). Il est produit par la Société des Ciments de Béni-Saf (SCIBS) localisée à Béni-Saf dans la wilaya de Ain-Temouchent. La masse volumique apparente (ρ_{app}) déterminée à l'aide de la norme NF P18-558, la masse volumique absolue (ρ_{abs}) suivant la norme NF P 15-471 et la surface spécifique Blaine mesurée à l'aide d'un perméabilimètre Blaine (Fig. 3.2-b) sont résumées au Tableau 3.1, tandis que la composition chimique réalisée au sein de l'entreprise Lafarge Holcim est présentée dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.1. Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{abs} (kg/m ³)	Surface spécifique (cm ² /g)
1011	3124	3142

Tableau 3.2. Composition chimique du ciment utilisé.

Composition chimique (%)	
SiO ₂	22,24
Al ₂ O ₃	7,11
Fe ₂ O ₃	4,76
CaO	56,99
MgO	1,51
K ₂ O	0,42
Na ₂ O	0,59
SO ₃	2,05
P ₂ O ₅	0,16
TiO ₂	0,41
LoL	2,60
Autres	1,16
Perte au feu %	2,42



(a)



(b)

Figure 3.2. (a) Ciment utilisé et (b) perméabilimètre Blaine.

3.2.2. Eau

Pour le gâchage des bétons préparés, une eau potable présentant une composition chimique conforme aux recommandations de la norme (BS EN 1008, 2002) a été utilisée. La composition chimique obtenue à 20 °C ainsi que le pH de cette eau sont consignés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3. Composition chimique et pH de l'eau utilisée (mg/l).

Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH (-)
110,621	42,282	-	-	99,400	312,740	473,515	8,0

3.2.3. Adjuvant

Un adjuvant de type superplastifiant polycarboxylate de deuxième génération a été utilisé. Cet adjuvant est commercialisé par l'entreprise Orachem Concrete® (domiciliée à Boutlélis, Wilaya d'Oran) sous l'appellation ORAFLOW THM 17200 (Fig. 3.3-a). Afin de déterminer le dosage de saturation du superplastifiant, nous avons utilisé l'essai d'étalement au mini-cône suivant le protocole décrit par Kantro (Kantro, 1980) (Fig. 3.3-b). A cause des variations qu'on a enregistré sur la qualité du ciment et la concentration de l'adjuvant fourni, nous avons trouvé que le dosage en superplastifiant optimal variait de 0,5 et 0,7% de la masse du liant, respectivement pour la première et la deuxième partie de la campagne expérimentale.

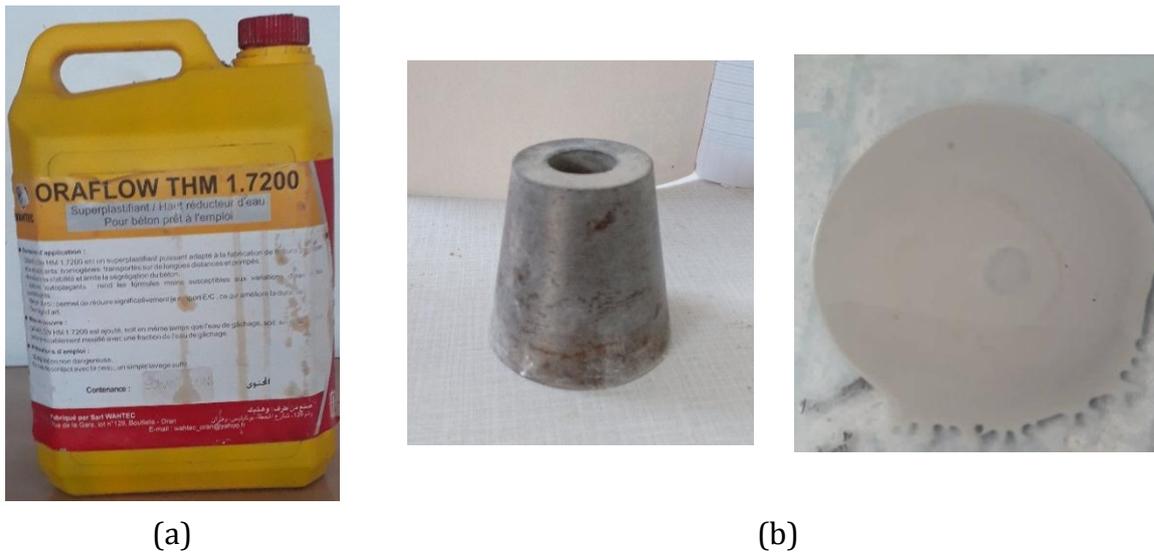


Figure 3.3. (a) Adjuvant utilisé et (b) essai d'étalement au mini-cône.

3.2.4. Granulats minéraux

Les granulats minéraux (Sable et graviers) que nous avons utilisé sont des granulats calcaires concassés provenant de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG®) localisée à Sidi-Abdelli, wilaya de Tlemcen. Trois classes granulaires ont été utilisés pour la formulation des bétons, il s'agit du sable 0-4 mm, du gravier 4-8 mm et du gravier 8-16 mm. Les résultats de l'analyse granulométrique, déterminée conformément aux prescriptions de la norme (BS EN 933-1, 2012) sont présentés à la Fig. 3.4. Tous les granulats présentent des granulométries continues. Il est à noter que le sable utilisé présente une quantité de fines (< 80µ) de l'ordre de 18%.

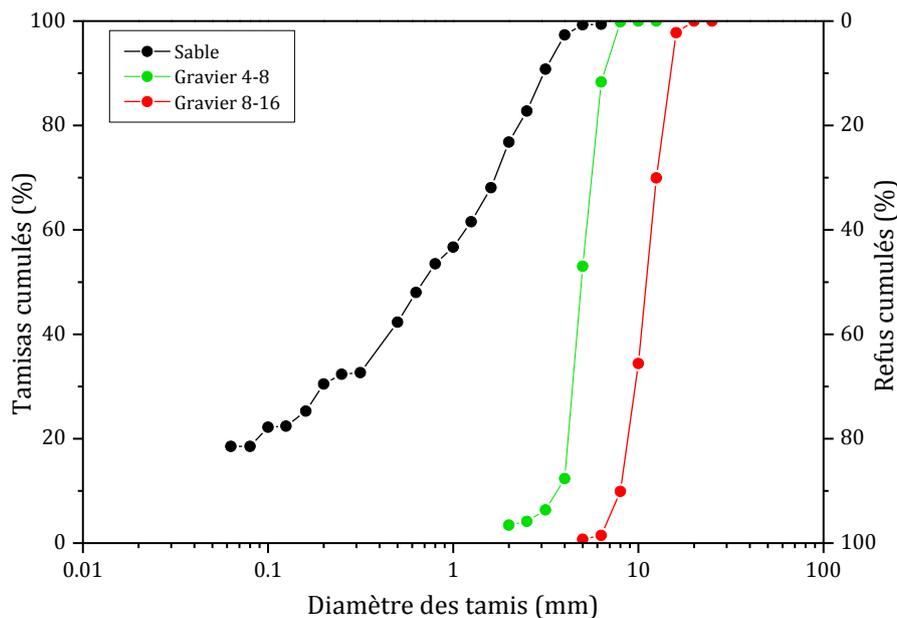


Figure 3.4. Analyse granulométrique des granulats minéraux, provenant de l'ENG Sidi-Abdelli.

Les masses volumiques apparentes ont été évaluées suivant la norme (BS EN 1097-3, 1998), tandis que les essais de masse volumique absolue et l'absorption en eau à 24h ont été réalisés selon les protocoles décrits dans la norme (BS EN 1097-6, 2013). Les résultats sur les masses volumiques apparente et absolue ainsi que l'absorption en eau (Ab_{24h}) sont récapitulés au niveau du Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Propriétés physiques des granulats minéraux.

Granulat	ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{abs} (kg/m ³)	Ab_{24h} (%)
Sable	1636,4	2701,1	1,71
Gravier 4-8	1310,9	2592,2	1,59
Gravier 8-16	1179,6	2580,0	1,22

Afin d'examiner la microstructure des granulats minéraux, une investigation à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) a été faite sur un granulat de gravier 8-16 mm à un agrandissement de 2000 fois. L'image MEB obtenue est montrée dans la Fig. 3.5. Cette image montre que les granulats minéraux présentent une microstructure plutôt dense et de forme très variable, dont le diamètre varie entre 2 et 7 μm . Les pores qui sont présents en très faibles quantités présentent des diamètres qui avoisinent les 2 μm .

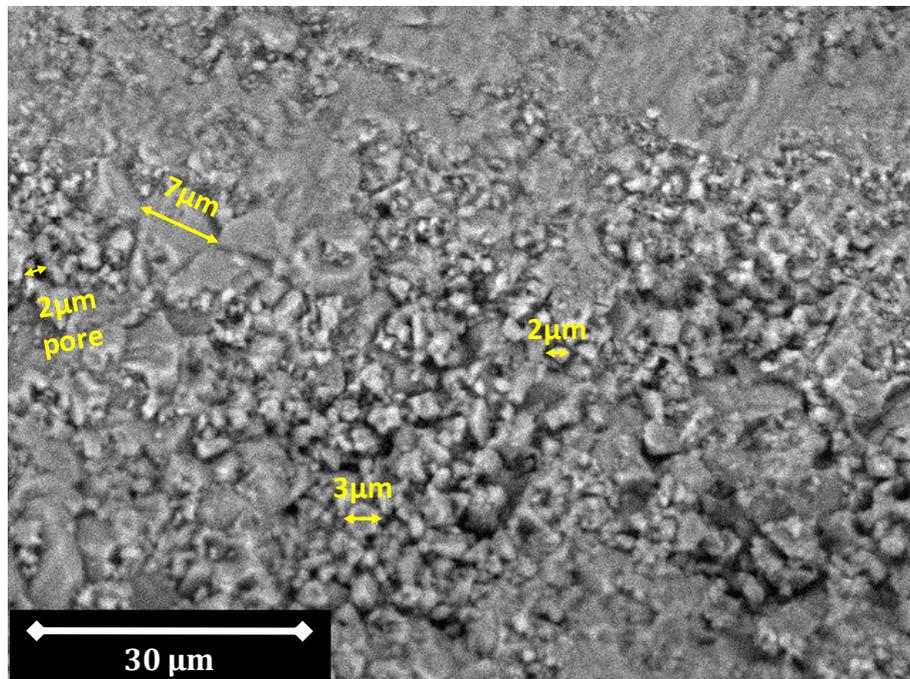


Figure 3.5. Microstructure d'un granulat minéral à un agrandissement de $\times 2000$.

3.2.5. Granulats de liège

Quant aux granulats de liège mâle utilisés, ils présentent des classes granulaires similaires aux granulats minéraux : 0-4 mm, 4-8 mm et 8-16 mm. L'utilisation du liège mâle dans la préparation de bétons constitue en elle-même une première originalité du travail.

3.2.5.1. Provenance et préparation

Le liège utilisé pour l'optimisation du mode de malaxage et l'évaluation de la performance thermomécanique (partie 1) est un liège mâle provenant de la Wilaya de Jijel et fourni par la société Jijel SIBL® après trituration à l'usine sous forme d'un vrac contenant différentes tailles de liège. Après tamisage, les trois classes granulaires de liège mâle sont obtenues. Ces classes sont désignées dans la suite du manuscrit, liège_Jijel 0-4 mm, liège_Jijel 4-8 mm et liège_Jijel 8-16 mm (Fig. 3.6).



Figure 3.6. Granulats de liège mâle provenant de Jijel, Algérie.

Différemment aux granulats utilisés pour l'élaboration de la première partie expérimentale, des granulats de liège ayant pour origine la forêt d'Ahfir située à une dizaine de kilomètres au sud de la ville de Tlemcen ont été utilisés pendant la partie liée à l'effet de prise en compte de l'absorption du liège (partie 2). Après recueil et tri des morceaux de liège au sein de la forêt d'Ahfir, les morceaux recueillis sont triturés à l'aide d'un broyeur que nous avons conçu spécialement pour le concassage du liège. Une fois triturés, les granulats de liège sont écrêtés par tamisage en trois classes granulaires désignées liège_Ahfir 0-4 mm, liège_Ahfir-4-8 mm et liège_Ahfir 8-16 mm. Le processus d'obtention des granulats de liège mâle de la forêt d'Ahfir est récapitulé dans la Fig. 3.7, tandis que les différentes classes du liège d'Ahfir sont montrés au niveau de la Fig. 3.8.



(1) Récolte



(2) Tri



(3) Concassage



(4) Tamisage

Figure 3.7. Procédure de préparation des granulats de liège provenant de la forêt d'Ahfir.



Liège_Ahfir 0-4 mm



Liège_Ahfir 4-8 mm



Liège_Ahfir 8-16 mm

Figure 3.8. Granulats de liège mâle provenant de la forêt d'Ahfir, wilaya de Tlemcen.

3.2.5.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des granulats de liège utilisés pendant le travail expérimental a été déterminée en accord avec les recommandations de la norme (BS EN 933-1, 2012). Cependant, à cause de la faible masse volumique du liège comparée avec celle des granulats minéraux, l'utilisation des masses similaires à celles utilisées pour la réalisation

de l'analyse granulométrique des granulats minéraux rend la tâche difficile. C'est la raison pour laquelle, lors de la réalisation de l'analyse granulométrique des granulats de liège, seulement une masse qui correspond au volume d'un tamis a été testée. Ce volume, en fonction de la classe granulaire du liège, varie entre 160 et 180 g pour chaque classe de liège.

Les courbes granulométriques des différents granulats de liège utilisés lors de ce travail expérimental sont illustrées dans la Fig. 3.9. Au regard de ces résultats, on peut constater que pour les classes granulaires 4-8 mm et 8-16 mm, les différents lièges utilisés ne présentent qu'une faible différence en comparaison avec les granulats minéraux ayant la même taille, en l'occurrence, les graviers 4-8 mm et 8-16 mm. En revanche, par rapport au sable, bien que les granulats désignés liège_Ahfir 0-4 mm contiennent une quantité de particules fines, ces granulats présentent une différence non négligeable au niveau de la granulométrie. De manière très claire, les granulats notés liège_Jijel 0-4 mm présentent une granulométrie qui reste loin d'être similaire à celle du sable et même à celle du liège_Ahfir 0-4 mm.

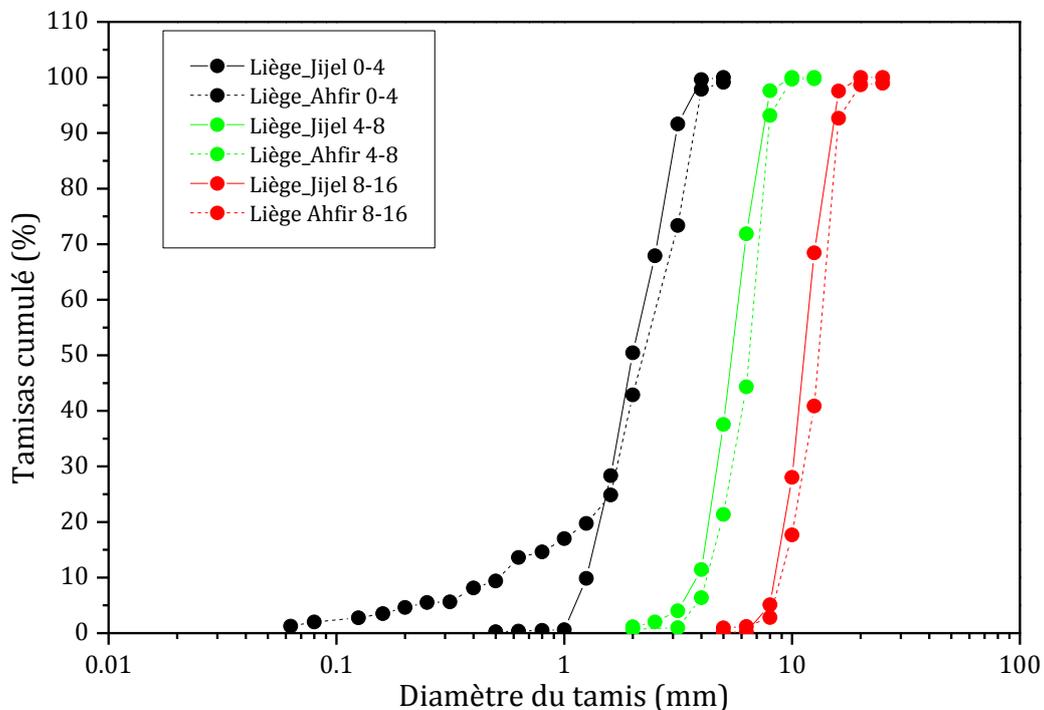


Figure 3.9. Analyse granulométrique des granulats de liège mâle.

3.2.5.3. Masse volumique

Les masses volumiques apparente et absolue des différents granulats de liège ont été déterminées à l'aide des méthodes employées pour la détermination des masses volumiques des granulats minéraux. Ceci signifie que la masse volumique apparente a été mesurée selon les prescriptions de la norme (BS EN 1097-3, 1998) (Fig. 3.10-a), et la masse volumique absolue a été mesurée en utilisant la méthode du ballon décrite dans la norme (BS EN 1097-6, 2013) (Fig. 3.10-b). Pour la méthode du ballon, la masse d'échantillon testée était de 30 g pour chaque essai.

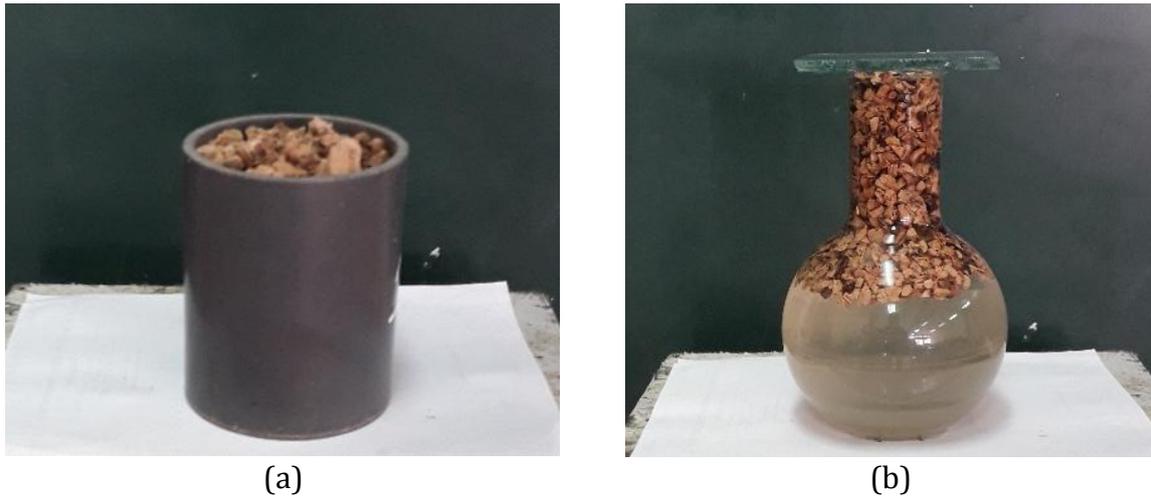


Figure 3.10. Détermination de la masse volumique des granulats de liège. (a) apparente et (b) absolue.

Les masses volumiques des différents granulats de liège, obtenues sur la moyenne d'un minimum de trois échantillons différents sont regroupées dans le Tableau 3.5. Les résultats obtenus montrent la grande différence qui existe entre la masse volumique des granulats minéraux et celle du liège. Par exemple, le rapport entre la masse volumique du liège_Jijel 0-4 mm et celle du sable tourne autour de 0,05, indiquant que la masse volumique du sable est environ 20 fois plus grande que celle d'un liège ayant une classe granulométrique similaire.

Tableau 3.5. Masses volumiques apparente et absolue des granulats de liège.

Granulat	ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{abs} (kg/m ³)
Liège_Jijel 0-4 mm	88,9	157,3
Liège_Jijel 4-8 mm	83,8	171,6
Liège_Jijel 8-16 mm	86,0	195,1
Liège_Ahfir 0-4 mm	110,9	189,5
Liège_Ahfir 4-8 mm	97,3	199,7
Liège_Ahfir 8-16 mm	93,8	208,2

3.2.5.4. Absorption

A cause de leur grande légèreté, la détermination de la capacité d'absorption des granulats de liège mâle n'a pas pu être effectuée conformément à la norme servant à évaluer l'absorption des granulats minéraux. De plus, il n'existe aucune norme qui dicte la méthode à suivre pour déterminer l'absorption des granulats végétaux en général, y compris ceux à base de liège. En contrepartie, dans un ouvrage publié récemment par la Réunion Internationale des Laboratoires et Experts en Matériaux de construction

(RILEM) (Amziane et Collet, 2017), sur la base des travaux de littérature réalisés, un protocole expérimental décrivant une méthode pour la détermination de ce paramètre a été établi. Par conséquent, suivant ce protocole, l'absorption des différents granulats de liège a été déterminée comme suit (Fig. 3.11) :

D'abord les granulats sont séchés sous une température de 60 °C jusqu'à stabilisation de leur masse. Ensuite, ils sont entièrement immergés dans l'eau pendant 4, 8, 15, 30 min, 1, 2, 4, 24, 48 h et puis chaque 24h jusqu'à la saturation. Après chaque période d'immersion indiquée, les granulats de liège sont sortis, séchés superficiellement à l'aide d'une essoreuse à salade et pesés afin de déterminer leur masse humide au temps t. Enfin, le coefficient d'absorption à chaque instant t est déterminé par le biais de l'éq. 3.1.

$$Ab_t(\%) = \frac{M_t - M_s}{M_s} * 100 \quad (3.1)$$

où :

Ab_t est le coefficient d'absorption à l'instant t (%), M_t est la masse humide à l'instant t (g) et M_s est la masse sèche de l'échantillon (g).

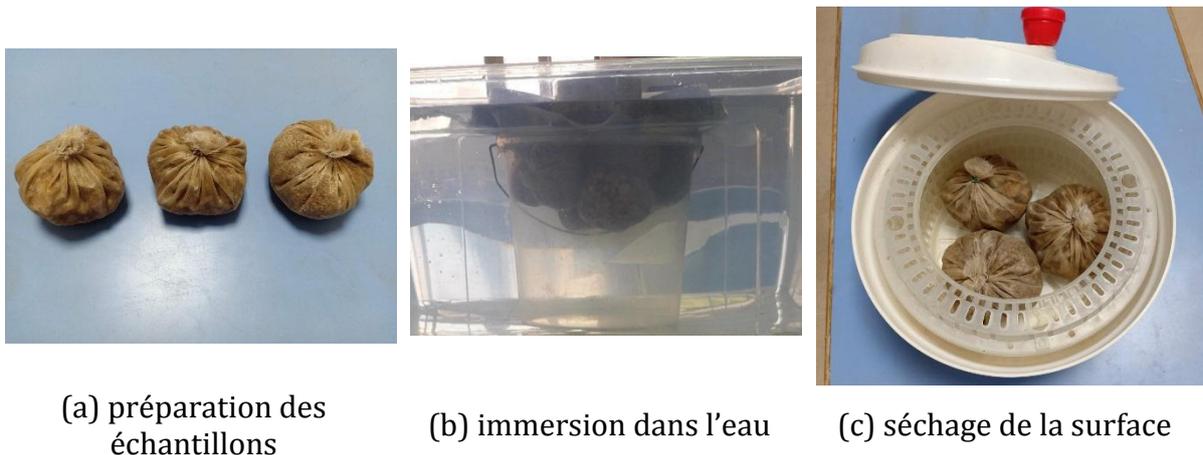


Figure 3.11. Détermination de l'absorption des granulats de liège.

Les courbes qui résument le coefficient d'absorption des différents granulats de liège à différents instants sont illustrées dans la Fig. 3.12. Au regard de ces courbes, on peut remarquer que les deux types de liège présentent des cinétiques d'absorption similaires. Pendant les premières deux heures, on remarque une augmentation drastique de l'absorption en fonction du temps. Passé ces deux heures, l'absorption continue de manière relativement lente jusqu'à atteindre la saturation respectivement après 4 et 6 jours d'immersion pour le liège de Jijel et le liège d'Ahfir. Comparée avec l'absorption des granulats minéraux qui ne dépasse pas les 2%, les résultats d'absorption montrent que similairement à la majorité des biomasses rencontrées dans la littérature, le liège utilisé dans cette étude peut absorber jusqu'au double de son poids initial (un maximum de 199% et 211% respectivement pour le liège de Jijel et d'Ahfir). Il convient aussi de noter que l'absorption du liège varie en fonction de la classe granulaire de manière que plus les

granulats ont des diamètres faibles, plus leur absorption est importante. Par conséquent, l'absorption maximale a été toujours enregistrée pour les granulats de liège 0-4 mm.

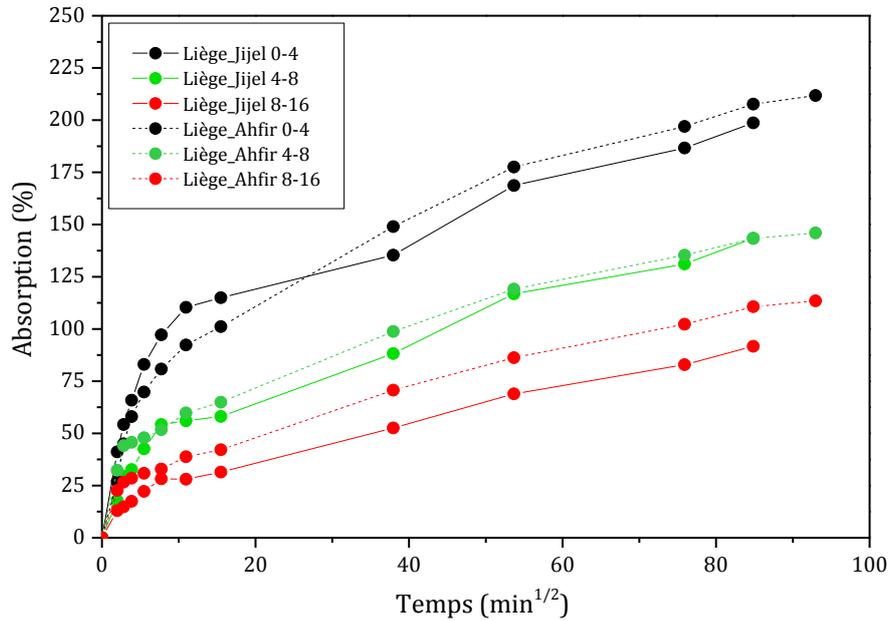


Figure 3.12. Absorption des granulats de liège mâle utilisés.

3.2.5.5. Microstructure

En utilisant de la microscopie électronique à balayage (miniMEB Hitachi-TM1000) sur un granulat de liège_Ahfir 8-16 mm, la microstructure du liège mâle a été analysée avec un agrandissement de 2000 fois. En bon accord avec la bibliographie, l'image MEB présentée dans la Fig. 3.13 indique que le liège utilisé présente une microstructure qui ressemble à un nid d'abeille. Les cellules de liège montrent une forme ondulée avec un diamètre qui varie entre 20 et 50 μm . En résumé, la grande différence structurelle qui existe entre les granulats végétaux et minéraux permet d'expliquer partiellement l'écart important entre les propriétés des deux granulats.

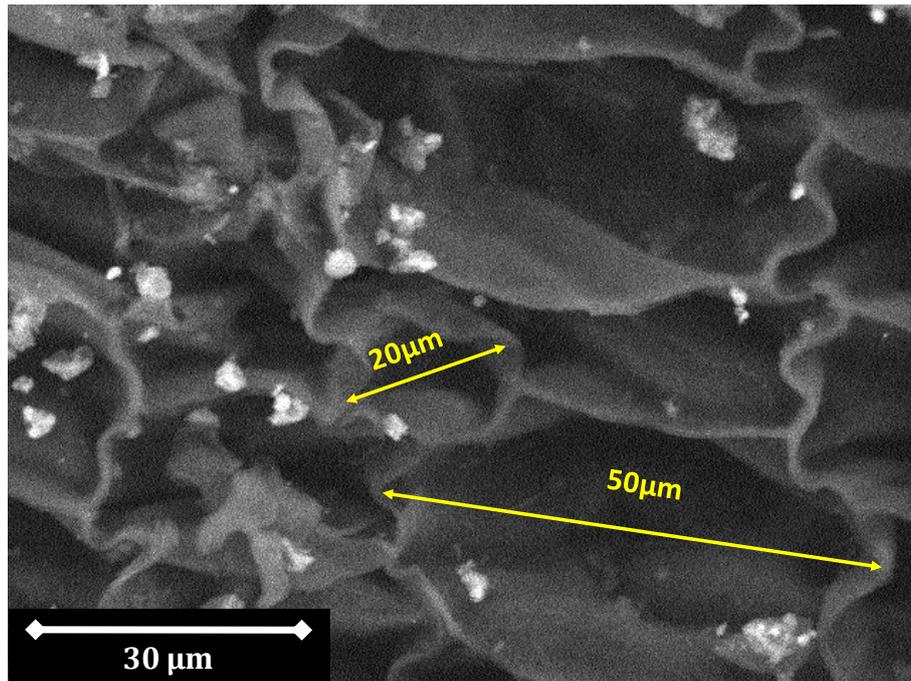


Figure 3.13. Microstructure d'un granulat de liège mâle d'Ahfir 8-16 mm à un agrandissement de $\times 2000$.

3.3. Composition des bétons

Le principe de formulation des bétons de liège étudiés dans la présente campagne expérimentale repose sur la réalisation de remplacements volumiques des granulats minéraux présents dans un béton ordinaire par des granulats de liège mâle. D'abord la formulation d'un béton ordinaire à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse a été étudiée. Cette formulation est utilisée comme référence dans notre campagne expérimentale. De plus, en partant de cette formulation et en remplaçant un pourcentage de granulats minéraux (en volume) par son équivalent en granulats de liège mâle, différentes compositions de bétons de liège ont été obtenues. Dans une optique visant à ne pas trop modifier la compacité initiale, chaque classe de granulats minéraux est remplacée par les granulats de liège ayant la même classe granulaire. Autrement dit, le sable est remplacé par le liège 0-4 mm, le gravier 4-8 mm par le liège 4-8 mm et le gravier 8-16 mm par le liège 8-16 mm.

3.3.1. Première partie

Dans la première partie dédiée à l'optimisation du mode de malaxage et à l'évaluation thermomécanique du béton de liège, à côté de la formulation de référence, quatre types de béton contenant en volume total de granulats : 25, 50, 75 et 100% de liège_Jijel ont été confectionnés. Pour l'optimisation du mode de malaxage, sept (07) bétons incorporant 50% de liège_Jijel ont été utilisés.

En s'appuyant sur les résultats de l'essai d'étalement au mini-cône, le dosage de superplastifiant de l'ordre de 0,5% a été utilisé. En se référant à certains travaux de littérature (Boussetoua et coll., 2017; Moreira et coll., 2014; Panesar et Shindman, 2012)

et gardant en tête que la saturation des granulats végétaux avant leur incorporation peut modifier leur composition chimique et leur microstructure (Traoré et coll., 2018), dans cette première partie, les granulats de liège ont été incorporés dans leur état tel que reçus (sec), sans prise en compte de leur absorption en eau. De ce fait, puisque seule l'absorption en eau des granulats minéraux est considérée, plus le pourcentage de liège augmente, plus la quantité des granulats minéraux diminue et donc plus la quantité d'eau totale dans le mélange diminue par rapport à la formulation de référence. Les détails des compositions utilisées dans cette première partie du travail sont récapitulés dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6. Composition des bétons préparés lors de la première partie de la campagne en kg.

Béton	Référence	BL 25	BL 50	BL 75	BL 100
Pourcentage du liège (%)	0	25	50	75	100
Ciment	350	350	350	350	350
Eau	157,4	157,4	157,4	157,4	157,4
Eau granulats minéraux	28	21	14	7	-
Eau totale	185,4	178,4	171,4	164,4	157,4
Superplastifiant	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Sable	780,6	585,5	390,3	195,2	-
Gravier 4-8	348,0	261,0	174,0	87,0	-
Gravier 8-16	729,3	547,0	364,7	182,3	-
Liège_Jijel 0-4	-	10,6	21,2	31,8	42,4
Liège_Jijel 4-8	-	5,6	11,1	16,7	22,2
Liège_Jijel 8-16	-	13,3	26,6	39,9	53,2

3.3.2. Deuxième partie

Afin d'étudier l'impact de la prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège sur la performance du béton et par la suite optimiser la quantité d'eau destinée à cette absorption, neuf (09) formulations ont été préparées dans la deuxième partie du travail. En utilisant des granulats de liège secs, trois différents niveaux d'absorption de liège, dont l'eau qui leur correspond est ajouté durant le malaxage des granulats, ont été considérés. Il s'agit de : (i) E0 : sans prise en compte de l'absorption du liège (en partant du même principe utilisé lors de la première partie du travail expérimental), (ii) E2H : en ajoutant l'eau qui correspond à 2h d'absorption du liège (ce choix a été fait car les 2h correspondent au début de la phase caractérisée par une cinétique d'absorption relativement lente) et (iii) Esat : en considérant la quantité d'eau qui correspond à la saturation du liège (en se basant sur les travaux de Karade (Karade, 2016) sur des composites de liège et de Chabannes et coll. (Chabannes et coll., 2014) sur des composites à bases de balle de riz.

Dans l'objectif d'évaluer l'impact de ce paramètre en fonction du pourcentage de liège incorporé dans le béton, trois pourcentages de liège ont été aussi testé pour chaque niveau

d'absorption considéré, en l'occurrence : 25, 50 et 75% du liège_Ahfir. En raison de la variation qui peut être remarquée au niveau de la composition du ciment et de ces caractéristiques, dans cette deuxième partie, nous étions obligés d'augmenter le dosage de superplastifiant à 0,7% pour retrouver la consistance du béton de référence (ordinaire). Le résumé des compositions de bétons étudiés dans cette deuxième partie est présenté dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7. Composition des bétons préparés lors de la deuxième partie de la campagne en kg.

Béton	BL25 E0	BL25 E2H	BL25 Esat	BL50 E0	BL50 E2H	BL50 Esat	BL75 E0	BL75 E2H	BL75 Esat
Liège (%)	25	25	25	50	50	50	75	75	75
Ciment	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Eau efficace	178,4	178,4	178,4	171,4	171,4	171,4	164,4	164,4	164,4
Eau du liège	-	21,3	52,7	-	42,6	105,5	-	63,9	158,3
Eau de gâchage	178,4	199,7	231,1	171,4	214,0	276,9	164,4	228,3	322,7
Superplastifiant	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
Sable	585,5	585,5	585,5	390,3	390,3	390,3	195,2	195,2	195,2
Gravier 4-8	261,0	261,0	261,0	174,0	174,0	174,0	87,0	87,0	87,0
Gravier 8-16	547,0	547,0	547,0	364,7	364,7	364,7	182,3	182,3	182,3
Liège_Ahfir 0-4	12,8	12,8	12,8	25,7	25,7	25,7	38,5	38,5	38,5
Liège_Ahfir 4-8	6,5	6,5	6,5	12,9	12,9	12,9	19,4	19,4	19,4
Liège_Ahfir 8-16	14,4	14,4	14,4	28,8	28,8	28,8	43,1	43,1	43,1

3.4. Préparation des éprouvettes

Une fois l'opération de malaxage des bétons achevée, nous avons procédé à la mise en œuvre des bétons préparés dans des moules cylindriques (110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur) et prismatiques (100 * 100 * 400 mm³). Le remplissage a été fait en fonction de la consistance du béton soit par vibration moyennant une table vibrante ou bien par piquage à l'aide d'une tige métallique. Après démoulage, les éprouvettes ont été assujetties à une cure totalement humide pendant 28 jours dans un réservoir d'eau (en s'inspirant de la méthode de cure utilisée pour les bétons ordinaires). Enfin, elles ont été retirées du réservoir pour subir les essais de caractérisation à l'état durci (Fig. 3.14). Il est aussi utile de noter que pour certaines éprouvettes, un surfaçage était nécessaire avant de procéder à la réalisation d'essais de caractérisation. Ce surfaçage a été effectué en procédant au découpage d'une partie à l'aide d'une scie à béton (Fig. 3.15).



Figure 3.14. Conservation des éprouvettes de béton de liège.



Figure 3.15. Surfaçage des éprouvettes de béton de liège.

3.5. Méthodes de caractérisation des bétons

3.5.1. Ouvrabilité et inspection visuelle

L'ouvrabilité des bétons préparés a été évaluée durant toute la campagne expérimentale par le biais de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme (BS EN 12350-2, 2009).

A travers une inspection visuelle qui consiste à vérifier s'il y a eu des phénomènes d'instabilité, l'homogénéité des bétons de liège a aussi été investiguée à l'état frais.

3.5.2. Propriétés physiques

3.5.2.1. Masse volumique

La mesure de la masse volumique a été réalisée suivant la norme (BS EN 12390-7, 2009) sur des éprouvettes cylindriques de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur. En procédant à un pesage de l'éprouvette et une mesure de ses dimensions, la masse volumique des bétons a été calculée comme étant la moyenne de trois échantillons différents en utilisant l'éq. 3.2.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

Avec : ρ est la masse volumique (kg/m^3), M est la masse de l'échantillon (kg) et V est le volume (m^3) de l'échantillon.

3.5.2.2. Vitesse ultrasonore

L'essai d'évaluation de la vitesse ultrasonore du béton est un test permettant, à travers des mesures non destructives, d'avoir une idée sur certaines de ses propriétés physiques

(porosité et capacité d'isolation) ou même sur quelques propriétés mécaniques comme la résistance à la compression et le module d'élasticité. Suivant la norme (BS EN 12504-4, 2004), l'essai consiste à mesurer le temps nécessaire pour traverser une éprouvette de longueur connue. Par la suite, la vitesse ultrasonore est calculée en utilisant l'éq. 3.3.

$$v = \frac{L}{t} \quad (3.3)$$

Où :

v est la vitesse ultrasonore (m/s), L est la longueur de l'éprouvette (m) et t est le temps nécessaire pour traverser l'éprouvette (s).

Dans notre campagne expérimentale, l'essai est réalisé à l'aide d'un appareil de mesure ultrasonique PunditLab, sur des éprouvettes cylindriques faisant 110 mm en diamètre et 220 mm en épaisseur (Fig. 3.16). La valeur finale est calculée comme étant la moyenne des valeurs obtenues sur trois éprouvettes différentes.



Figure 3.16. Mesure de la vitesse ultrasonore.

3.5.3. Propriétés thermiques

3.5.3.1. Conductivité thermique

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de mesure de la conductivité thermique (plaque chaude, fil chaud, boîte chaude, flash), le travail entrepris par Gomes et coll. (Gomes et coll., 2019) a montré que la relation entre une conductivité thermique mesurée en régime permanent et une autre en régime transitoire est parfaitement linéaire.

Dans le présent travail, les essais de conductivité thermique (λ) ont été effectués en utilisant un appareil de mesure portatif QUICKLINE-30® permettant la mesure de la conductivité thermique pour plusieurs types de matériaux incluant les matériaux poreux (Fig 3. 17).



Figure 3.17. Mesure de la conductivité thermique à l'aide du QUICKLINE-30 (Laboratoire LABMAT, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran).

L'appareil en question permet de faire des mesures de conductivité thermique en régime transitoire basé sur l'analyse de la température d'un échantillon soumis à des sollicitations de flux thermique. Le système de transfert de chaleur du procédé transitoire à disque chaud comprend un système vertical et cylindrique, qui assure à la fois le chauffage et la thermométrie (Hussain et coll., 2019; Wang et coll., 2019). Ainsi, le flux de chaleur est généré en excitant électriquement une résistance électrique introduite à l'intérieur de la sonde qui est directement en contact avec l'échantillon (Fig. 3.18). En exploitant la courbe de variation de cette température en fonction du temps, l'appareil calcule et affiche la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon à la fin du test. Les échantillons que nous avons utilisés pour la mesure de conductivité thermique des bétons que nous avons préparés sont des éprouvettes de forme cylindrique (110 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur) et prismatiques (100 * 100 * 50 mm³). La valeur moyenne de la conductivité thermique est calculée comme étant la moyenne de différents échantillons.

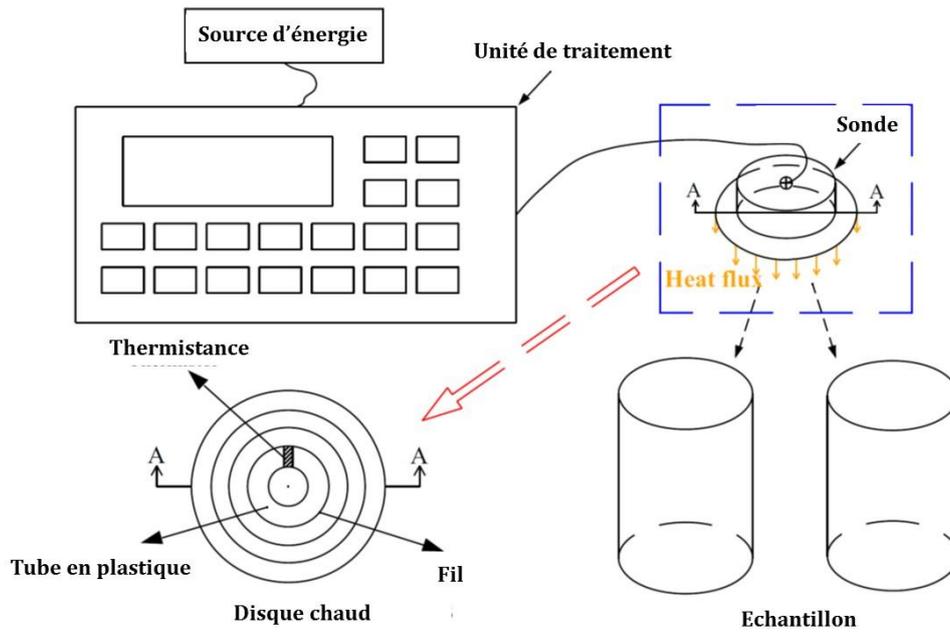


Figure 3.18. Représentation schématique du principe de mesure de la conductivité thermique (Wang et coll., 2019).

3.5.3.2. Chaleur spécifique

Les mesures de la chaleur spécifique ont été effectuées en utilisant un calorimètre adiabatique à flux de chaleur BT 2.15 basée sur le principe de Calvet (Fig. 3. 19).



Figure 3.19. Dispositif de mesure de la chaleur spécifique (Laboratoire LaSIE, La Rochelle Université).

Ce type de calorimètres est doté de thermopiles 3D couvrant l'intégralité de la zone où le phénomène thermique se manifeste, ceci permet de capter la totalité du flux de chaleur produit lors des échanges thermiques. Un échantillon cylindrique de 10 mm de diamètre et 40 mm de hauteur est initialement séché à une température de 40 °C. L'échantillon placé dans la cellule de mesure est ensuite introduit dans l'appareil régulé en début à -20°C et contenant une cellule de mesure et une cellule référence (Fig. 3.20). A l'aide d'un cryostat relié au calorimètre, la température varie dans une plage allant de -10 à 40 °C (-10 °C pour 1h, puis une progression linéaire de -10 à 40 °C pendant 24h et finalement 40 °C pour 5h). En effectuant des enregistrements automatiques de la chaleur échangée par l'échantillon, la chaleur spécifique est calculée et affichée à la fin de l'essai en fonction de la température.

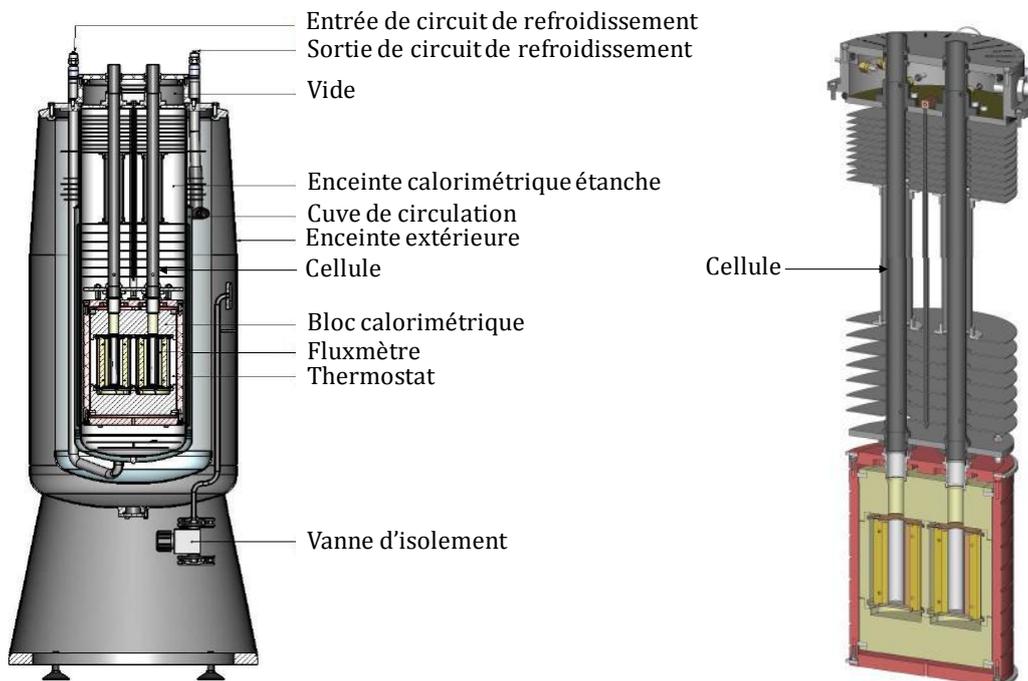


Figure 3.20. Représentation schématique du dispositif de mesure de la chaleur spécifique (Issaadi, 2016).

3.5.4. Propriétés hydriques

3.5.4.1. Isothermes

Les isothermes de sorption de vapeur d'eau constituent une carte d'identité hydrique des matériaux poreux. Elles offrent l'information sur la capacité du matériau à retenir (adsorption) ou à perdre (désorption) de l'eau en fonction de l'humidité relative de l'air. Classiquement, les isothermes d'adsorption/désorption sont mesurées à l'aide de la méthode des solutions salines décrite dans la norme (BS EN ISO 12571, 2000). Cette méthode, malgré son efficacité, est souvent critiquée à cause de sa lenteur qui peut être amplifiée en fonction de la nature du matériau. Pour cela, de nouveaux dispositifs sophistiqués ont vu le jour, permettant de réduire considérablement le temps de mesure

et la taille de l'échantillon tout en gardant un niveau de fiabilité très élevé. Ces dispositifs sont basés sur des mesures soit gravimétriques, soit volumétriques. Parmi ces dispositifs, le ProUmid SPS®, basé sur une méthode de mesure gravimétrique, a été utilisé pour la détermination des isothermes dans ce travail (Fig. 3. 21). Les échantillons de béton sont d'abord séchés sous une température de 40 °C. Ensuite, sous une température de 23 °C, ils sont mis dans le dispositif expérimental qui permet d'appliquer une série croissante ou décroissante d'humidités relatives (allant de 0 à 96% en appliquant un pas de 8%). A chaque taux d'humidité relative, après l'atteinte de l'équilibre que nous avons fixé à 0,001% entre deux mesures espacées d'une heure, la teneur en eau du matériau est déterminée après un pesage automatique de l'échantillon par le biais d'une balance de précision 0,00001 g.



Figure 3.21. Dispositif de mesure des isothermes de sorption (Laboratoire LaSIE, La Rochelle Université).

3.5.4.2. Perméabilité à la vapeur

Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau fournit l'information sur sa capacité d'évacuer l'humidité. La caractérisation de la diffusion de vapeur d'eau dans les matériaux de construction se fait en général à l'aide de la méthode de la coupelle décrite dans la norme (BS EN ISO 12572, 2001). La méthode consiste à exposer le matériau à un gradient de pression de vapeur constant. Ce gradient est créé en appliquant, à température égale, deux hygrométries différentes à l'intérieur et à l'extérieur de la coupelle contenant l'échantillon. Dans ce travail, l'humidité relative à l'intérieur de la coupelle (93%) est assurée par le biais d'une solution saline KNO_3 , tandis que celle qui caractérise l'extérieur de la coupelle (50%) est régulée grâce à la régulation de l'humidité de l'enceinte climatique (Fig. 3.22).

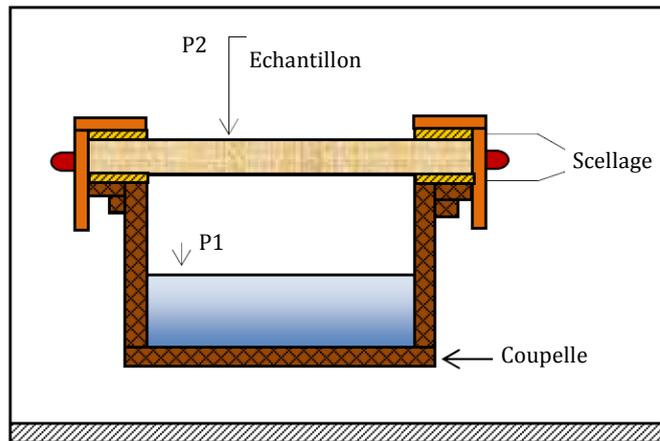


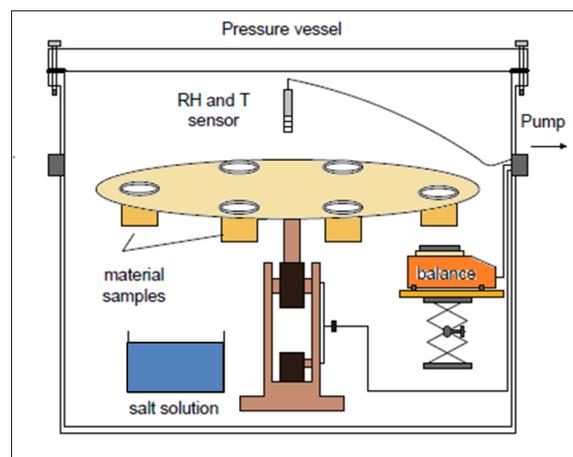
Figure 3.22. Principe de la méthode de la coupelle (Bennai, 2018).

Le dispositif utilisé pour la mesure de la perméabilité à la vapeur est un Gravitest[®], Gintronic composé d’une enceinte climatique à température et humidité réglées et permettant d’analyser six échantillons à la fois. Grâce à sa performance élevée, ce dispositif présente l’avantage d’effectuer une mesure automatique de l’échantillon en utilisant une balance intégrée, de précision 0,00001 g (Fig. 3.23).

L’échantillon de 80 mm de diamètre et 10-20 mm d’épaisseur est d’abord conditionné à 23 °C et 50% jusqu’à stabilisation de sa masse. Ensuite, il est latéralement étanchéifié à l’aide de la résine époxy afin de garantir un transfert unidirectionnel et puis, placé dans une coupelle contenant la solution saline et scellé. Enfin la coupelle et l’échantillon sont placés dans l’enceinte climatique réglée à 23 °C et 50% HR. Après un suivi de la masse de l’échantillon jusqu’à atteindre l’équilibre défini dans l’appareil (différence de masse de 0,1% entre deux mesures espacées de 24h), la perméabilité à la vapeur (δ) est calculée à la fin des essais comme la moyenne d’au moins deux différents échantillons.



(a) Dispositif de mesure Gintronic GraviTest



(b) Représentation schématique (Issaadi, 2016)

Figure 3.23. Mesure expérimentale de la perméabilité à la vapeur d’eau (Laboratoire LaSIE, La Rochelle Université).

3.5.4.3. Valeur du tampon hydrique (MBV)

La MBV (Moisture Buffer Value) est une propriété qui caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air environnant (Chabannes, 2015). Cette notion est utilisée pour se référer à la quantité d'eau transportée à l'intérieur ou à l'extérieur du matériau par unité de surface, pendant une période de temps donnée, quand ce matériau est exposé à une variation cyclique de l'humidité relative de l'air qui l'entoure.

Expérimentalement, la MBV qui est exprimée en $g/(m^2 \cdot \%HR)$ se mesure suivant un protocole proposé par le projet Nordtest (Rode et coll., 2007). Dans notre travail, la MBV est déterminée pour des échantillons de béton de liège en utilisant une enceinte climatique CTS® et une balance avec une précision de 0,01 g sur des échantillons cylindriques mesurant 110 mm en diamètre et 50 mm en hauteur (Fig. 3.24). En premier, les surfaces latérale et inférieure de l'échantillons sont imperméabilisées par le biais d'une feuille en aluminium afin d'assurer un transfert unidirectionnel à travers la surface ouverte de l'échantillon. Après un séchage à 40 °C et une stabilisation à 23 °C et 50% d'humidité, l'exposition à une sollicitation cyclique d'humidité est lancée. Cette sollicitation cyclique correspond à une répétition (à 23 °C jusqu'à l'équilibre) de plusieurs cycles de 8h à 75% de HR et 16h à 33% de HR. Pour chaque cycle, la valeur du MBV est donc calculée en utilisant l'éq. 3.4 :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{max} - HR_{min})} \quad (3.4)$$

Avec : Δm est le changement de masse déterminé comme la moyenne entre le gain durant l'absorption et la perte durant le séchage (g), A est la surface de l'échantillon (m^2), HR_{max} est l'humidité relative maximale (75%) et HR_{min} est l'humidité relative minimale (33%).



(a) enceinte climatique utilisée pour la mesure de la MBV



(b) échantillons utilisés

Figure 3.24. Mesure expérimentale de la MBV (Laboratoire LaSIE, La Rochelle Université).

3.5.4.4. Absorption capillaire

Les mesures de l'absorption des bétons par capillarité sont entreprises suivant la norme (ASTM C 1585-04, 2004) sur trois différents échantillons mesurant 100 * 100 * 50 mm³. Avant de commencer les essais, les échantillons sont d'abord latéralement imperméabilisés à l'aide d'une résine époxy afin d'assurer un transfert unidirectionnel. Les échantillons sont initialement séchés à 60 °C pour déterminer leur masse sèche. Par la suite, ils sont immergés dans l'eau (dans un bac contenant une grille) à une profondeur de 5 mm +/- 2 mm et pesés après plusieurs échéances de temps jusqu'à stabilisation de leur masse (Fig. 3.25). A chaque échéance de temps, le gain massique est calculé en utilisant l'éq. 3.5 :

$$C = \frac{M_t - M_s}{A} * 100 \quad (3.5)$$

Avec : C est le gain massique (kg/m²), Ms est la masse sèche des échantillons (kg), Mt est la masse des échantillons humides à l'instant t (kg) et A est la surface de l'échantillon en contact avec l'eau (m²).

En exploitant la courbe $C = f(\sqrt{t})$, l'absorption primaire est calculée comme étant la pente de la courbe entre 5 min et 6h, tandis que l'absorption secondaire est définie par le calcul de la pente de cette courbe entre 1 et 6 jours.



Figure 3.25. Mesure expérimentale de la capillarité.

3.5.5. Microstructure

3.5.5.1. Porosité accessible à l'eau

Les essais de porosité accessible à l'eau sont réalisés conformément aux prescriptions de la norme AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 2007). La valeur finale de la porosité est calculée comme étant la moyenne de trois différents échantillons cubiques ayant 50 mm de côté. Initialement, afin de déterminer la masse sèche, les échantillons sont séchés dans un four

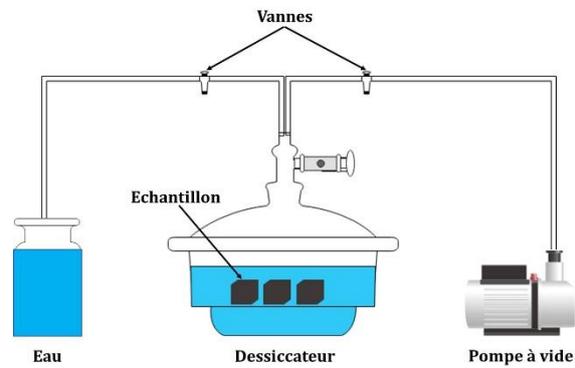
sous une température de 60 °C jusqu'à stabilisation de leur masse (la stabilisation est définie comme une différence $\leq 0,05\%$ entre deux pesées espacées de 24h). Ensuite, ils sont dégazés (24h) et saturés (72h) dans un dessiccateur lié à une pompe à vide (Fig. 3.26). Une fois la saturation est faite, les échantillons sont retirés du dessiccateur et puis pesés dans l'air et dans l'eau à l'aide d'une pesée hydrostatique. Enfin la porosité des bétons est calculée à l'aide de l'éq. 3.6 :

$$P = \left(\frac{M_{air} - M_s}{M_{air} - M_{eau}} \right) * 100 \quad (3.6)$$

Avec : P est la porosité (%), M_s est la masse de l'échantillon à l'état sec (g), M_{air} est la masse de l'échantillon à l'air libre (g) M_{eau} est la masse de l'échantillon dans l'eau (g).



(a) dispositif de mesure



(b) représentation schématique

Figure 3.26. Mesure expérimentale de la porosité accessible à l'eau.

3.5.5.2. Porosité au mercure

La porosité au mercure offre en plus de la porosité totale, l'information sur la distribution des pores au sein du matériau. Cet essai a été effectué en utilisant un porosimètre à intrusion au mercure de type Autopore V 9600 Micromeritics® (Fig. 3.27). Ce type de porosimètres présente l'avantage d'aller à des pressions pouvant franchir les 412 MPa. Par conséquent, il couvre une large gamme de pores ouverts ayant des diamètres allant de 3 nm à 360 μm . A cause de son caractère non mouillant, le mercure peut pénétrer au sein des pores sous l'effet d'une pression appliquée par l'appareil. Cette pression, plus elle est importante, plus le mercure peut remplir des pores de petits diamètres. Ayant la pression d'intrusion et supposant que le pore est de forme cylindrique, on peut remonter au diamètre du pore correspondant en utilisant la relation développée par Washburn et donnée par l'éq. 3.7 :

$$P_{Hg} = \frac{2\gamma_{Hg}\cos\theta}{r_p} \quad (3.7)$$

Avec : P_{Hg} est la pression d'injection (Pa), γ_{Hg} est la tension superficielle du mercure ($N.m^{-1}$), θ est l'angle de contact entre le mercure et le solide ($^{\circ}$) et r_p est le rayon du pore (m). Les essais sont réalisés sur des échantillons parallélépipédiques de 13 à 18 mm de côté, séchés sous vide à une température de 40 °C. Ces conditions sont choisies à cause des fissures qui peuvent être créées ainsi que l'accélération de la formation des produits d'hydratation, phénomènes pouvant modifier la microstructure des matériaux.



Figure 3.27. Dispositif de mesure de la porosité au mercure (Laboratoire LaSIE, La Rochelle Université).

3.5.5.3. Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage est une technique permettant d'obtenir une image de la surface de l'échantillon avec une haute résolution permettant d'atteindre quelques nanomètres et une grande profondeur de champ (Chabannes, 2015). Cette technique est basée sur le principe d'interaction entre les électrons produits par le microscope et le matériau analysé (Conforto, 2019). La technique du MEB a été utilisée dans notre campagne expérimentale à des fins d'analyse de la qualité de la matrice cimentaire des bétons, de la qualité de l'interface granulats de liège-matrice ainsi que pour mesurer la taille des pores et suivre l'évolution de la microstructure du liège au sein du béton.

Pendant la première partie de la campagne expérimentale, un miniMEB de paillasse Hitachi-TM1000 utilisant un mode « pression contrôlée » et pouvant aller jusqu'à 10000 fois d'agrandissement a été employé (Fig. 3.28). Cet appareil permet d'obtenir des images en électrons rétrodiffusés (BSE : Backscattered Electrons) en appliquant une tension d'accélération de 15 keV sur des échantillons parallélépipédiques d'environ 20 mm de côté et qui ne nécessite pas un traitement préalable.



Figure 3.28. MiniMEB de paillasse Hitachi-TM1000 (Laboratoire LRM, Faculté des sciences, Université de Tlemcen).

Le MEB utilisé dans la deuxième partie de la campagne est un MEB FEI Quanta 200 ESEM/FEG FEI couplé à un EDAX GENESIS EDS pour les microanalyses aux rayons X (Fig. 3.29). Ce MEB utilise le mode environnemental (MEBE) qui présente l'avantage d'analyser les échantillons sans procéder à une préparation préalable, ceci signifie qu'aucun artefact n'est introduit à la surface de l'échantillon, gardant ainsi sa porosité, sa rugosité et sa composition chimique. Contrairement au Hitachi-TM1000, ce MEB permet d'obtenir à la fois des images en électrons secondaires (SE : Secondary Electrons) et en BSE. Les analyses ont été faites sur des échantillons parallélépipédiques d'environ 20 mm de côté, en appliquant une tension d'accélération de 20 keV et une faible pression de vapeur de l'ordre de 1,6 mbar.



Figure 3.29. MEB FEI Quanta 200 ESEM/FEG FEI (Laboratoire LaSIE, La Rochelle Université).

3.5.6. Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression des bétons étudiés dans notre campagne expérimentale est faite conformément à la norme (BS EN 12390-3, 2009). La valeur finale est calculée comme étant la moyenne de différents échantillons cylindriques faisant 110 mm en diamètre et 220 mm en hauteur. En s'inspirant de la méthode utilisée par Le et coll., 2014 (Le et coll., 2014), le module d'élasticité statique est déterminé à travers l'exploitation des essais de résistance à la compression, comme étant la pente de la phase élastique linéaire allant de 15 à 50% de la courbe contrainte-déformation.

3.5.7. Résistance à la flexion

L'essai de résistance à la flexion trois points a été réalisé à l'âge de 28 jours suivant la norme (BS EN 12390-5, 2009), en utilisant un portique d'essai universel. Des éprouvettes prismatiques de 100 * 100 * 400 mm³ sont préparées et testées. Pour chaque formulation, les valeurs obtenues correspondent à la moyenne de trois différents spécimens.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, la campagne expérimentale réalisée dans ce travail a été mise en relief. La caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation des bétons de liège a montré que pour de classes granulaires 4-8 mm et 8-16 mm, les granulats de liège mâle utilisés (liège_Jijel et liège_Ahfir) ont montré des granulométries similaires à celles des graviers minéraux. Cependant, pour la classe granulaire 0-4 mm, les granulats de liège (surtout le liège_Jijel 0-4 mm) ont montré un manque en fines par rapport au sable qui contient plus de 18% de particules fines. Au niveau de la microstructure, les granulats de liège mâle ont montré une différence importante en comparaison avec celle des granulats minéraux. En effet, en plus de leur forme ondulée, les cellules de liège sont composées majoritairement de vide. L'effet de cette microstructure poreuse sur la masse volumique des granulats de liège est important. Ceci peut être visible sur la différence importante entre la masse volumique des granulats de liège et celle des granulats minéraux (environ 10 et 20 fois) qui peut être à l'origine de problèmes d'hétérogénéité lors de la préparation des bétons de liège. En plus de la faible masse volumique des particules de liège, les essais d'absorption ont montré la grande absorption en eau des granulats de liège mâle qui peut dépasser le double de leur poids initial.

En raison de la complexité des bétons de liège, le recours à des techniques très avancées pour la caractérisation de ses propriétés hygrothermiques ainsi que microstructurales était nécessaire.

Après la description de la campagne expérimentale, le prochain chapitre fera l'objet des résultats obtenus sur la première partie de cette campagne, autrement dit, l'effet du mode de malaxage et la performance thermomécanique des bétons de liège mâle seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Optimisation du mode de malaxage et performance du béton de liège mâle

Introduction

Après la description de la démarche que nous avons adoptée, la caractérisation des différentes matières premières et la méthode de formulation et caractérisation des bétons, ce chapitre fait l'objet d'une présentation des résultats de la première partie de la campagne expérimentale. Dans une optique visant à déterminer le protocole de malaxage adéquat pour la préparation des bétons de liège proposés, l'effet du mode de malaxage sur quelques propriétés fraîches et durcies d'un béton contenant 50% de liège mâle est présenté. Une fois le protocole de malaxage sera fixé, une présentation de l'effet du pourcentage de liège mâle est faite dans le but de déterminer le niveau de performance obtenu avec l'introduction de différents pourcentages de liège mâle. Cette étude sera utile dans le choix des applications où les bétons de liège mâle peuvent être utilisés.

4.1. Influence du mode de malaxage

4.1.1. Description de la démarche entreprise

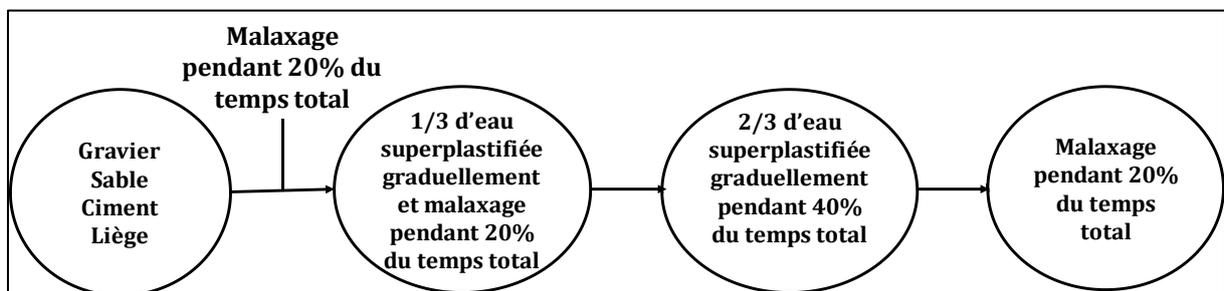
L'influence du mode de malaxage a été étudiée dans l'objectif de déterminer le mode de malaxage adéquat pour la formulation de nos bétons de liège. L'étude réalisée a porté sur la détermination de l'impact de l'ordre d'introduction des constituants, du temps de malaxage et enfin l'outil de malaxage.

L'influence de ces paramètres est étudiée à travers l'évaluation de la consistance des bétons, l'homogénéité à l'état frais ainsi que les résistances mécaniques. Afin d'arriver à notre objectif, nous avons testé trois ordres d'introduction des constituants, trois temps de malaxage ainsi que trois outils de malaxage.

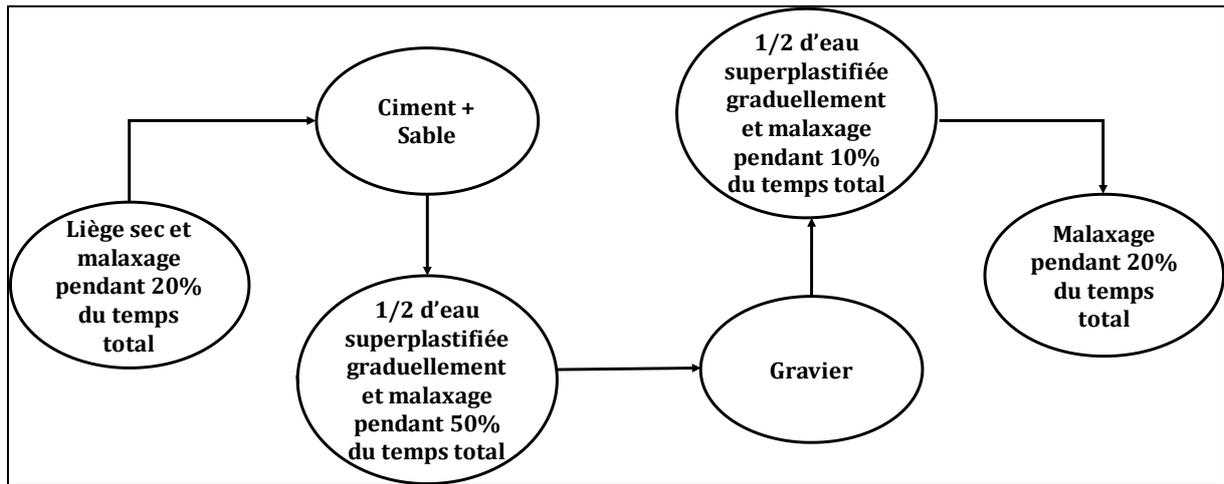
En ce qui concerne l'ordre de malaxage, tout en fixant un temps de malaxage de 5 minutes et un malaxeur à axe vertical, les trois ordres testés sont définis comme suit (Fig. 4.1) :

- Ordre 1 : C'est un ordre d'introduction similaire à celui utilisé pour le malaxage des bétons ordinaires. Cet ordre qui préconise le malaxage des constituants secs et l'ajout de l'eau progressivement est inspiré des travaux de Boussetoua et coll. (Boussetoua et coll., 2017) sur des bétons de liège et vise à vérifier si le mode de malaxage des bétons ordinaires est adéquat à la préparation des bétons de liège,
- Ordre 2 : Cet ordre consiste à introduire les granulats de liège mâle au début du malaxage avant le ciment et les granulats minéraux. Cet ordre a été inspiré de la méthode de malaxage adapté par Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) pour la préparation des chapes de liège.
- Ordre 3 : Dans cet ordre, les granulats de liège sont incorporés après le malaxage du sable et ciment, mais avant l'incorporation des graviers. Ce choix a été fait dans le but d'empêcher la montée des granulats de liège en surface en raison de leur faible masse volumique par rapport aux granulats minéraux.

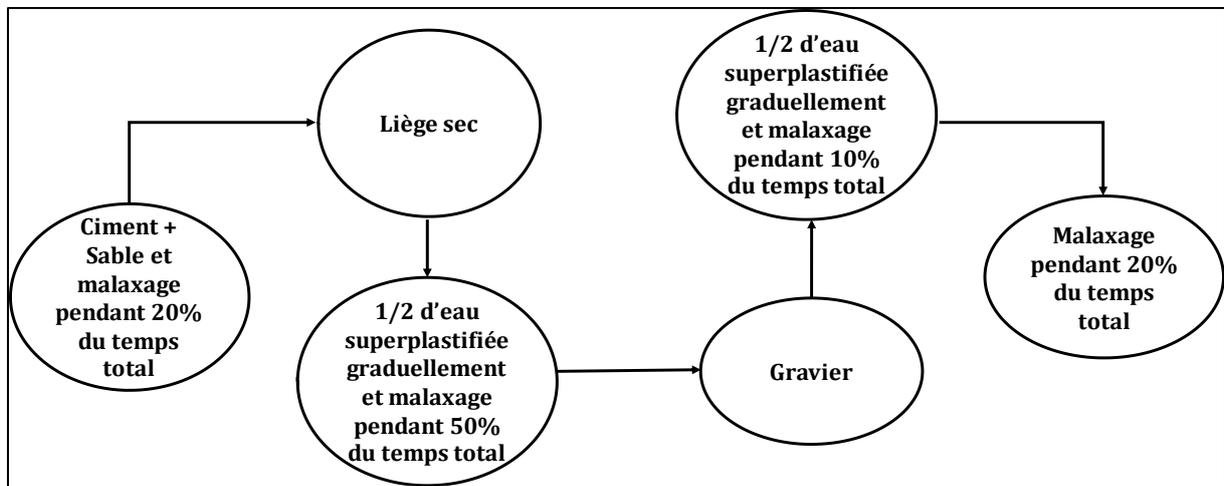
Quant au temps de malaxage, son effet a été étudié en fixant l'ordre d'introduction ainsi que l'outil de malaxage. Les trois temps testés sont : (i) 5 minutes qui est en général le temps utilisé pour la préparation des bétons ordinaires, (ii) 8 minutes, en s'inspirant des travaux de Bràs et coll. (Bràs et coll., 2013) et Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016) et finalement (iii) 11 minutes. Les 11 minutes ont été choisies afin d'assurer une meilleure homogénéisation du mélange à l'intérieur de l'outil de malaxage.



(a) ordre 1



(b) ordre 2



(c) ordre 3

Figure 4.1. Ordres d'introduction utilisés.

Pour l'étude de l'effet de l'outil de malaxage, l'ordre d'introduction ainsi que le temps de malaxage ont été fixés pour les trois outils de malaxage. Ces outils sont (Fig. 4.2) : (i) un malaxeur à axe vertical, (ii) une bétonnière et (iii) un mélangeur double.



(a) Malaxeur à axe vertical



(b) Bétonnière



(c) Mélangeur double

Figure 4.2. Outils de malaxage utilisés.

Comme souligné dans les paragraphes précédents, pour l'étude de l'effet de chacun des paramètres, les deux autres paramètres ont été fixés. La démarche adoptée est une démarche qui vise à étudier l'effet de chacun des paramètres de malaxage dans le but de faire un choix optimal à la fin. Pour résumer, dans notre démarche expérimentale, nous avons commencé d'abord par l'étude de l'effet de l'ordre d'introduction, puis le temps de malaxage et en dernier lieu l'outil de malaxage (Fig. 4.3).

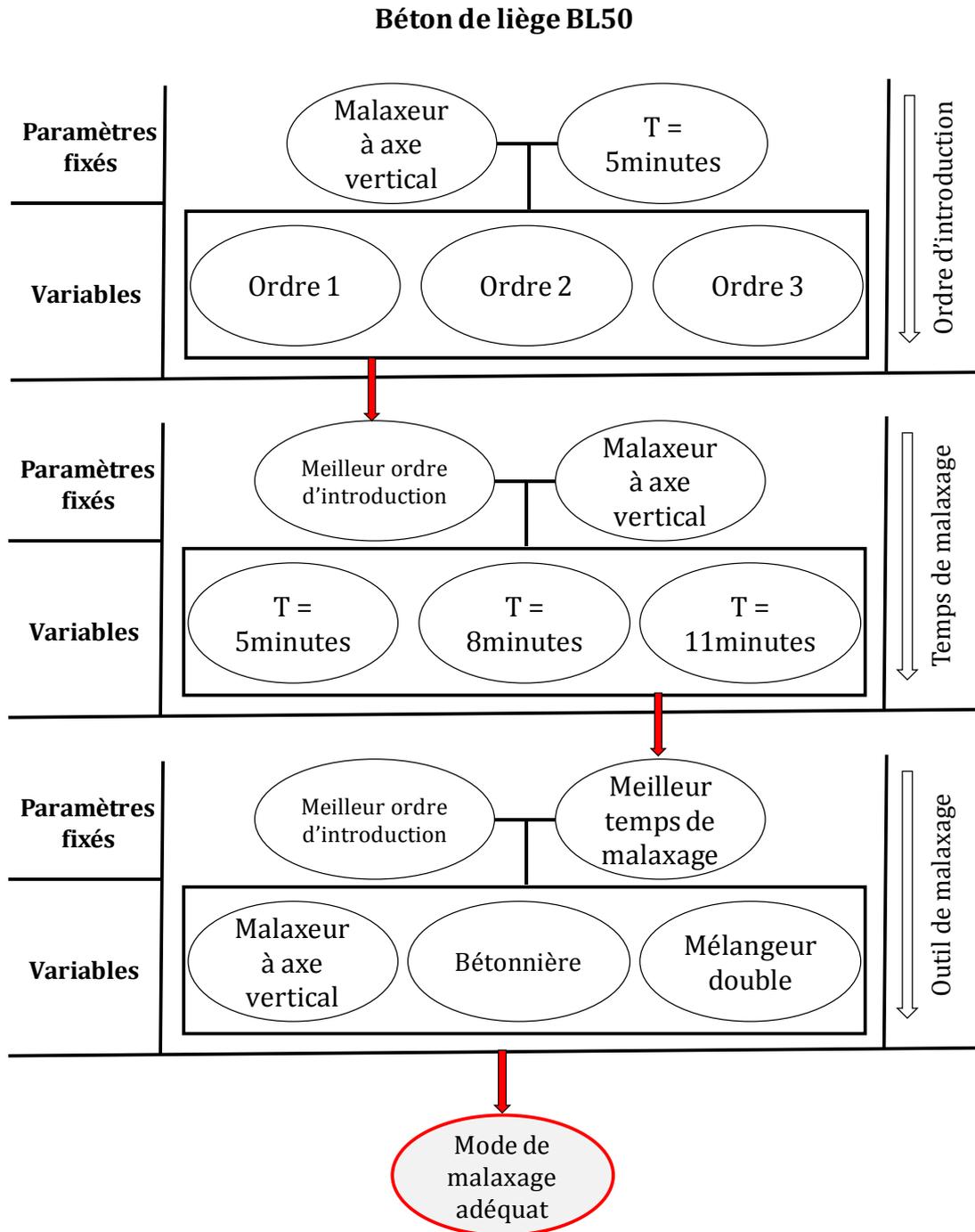


Figure 4.3. Démarche entreprise pour l'optimisation du mode de malaxage.

Rappelant donc que l'étude a été réalisée sur un béton contenant un volume de 50% de liège_jijel (BL50), sept différents bétons ont été produit en utilisant différents modes de

malaxage. La désignation de ces bétons ainsi que les paramètres de malaxage utilisés pour leur préparation sont résumés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1. Bétons utilisés pour l’optimisation du mode de malaxage.

Désignation	Outil de malaxage	Temps de malaxage	Ordre d’introduction
BL50MVT501	Malaxeur à axe vertical	5 minutes	Ordre 1
BL50MVT502	Malaxeur à axe vertical	5 minutes	Ordre 2
BL50MVT503	Malaxeur à axe vertical	5 minutes	Ordre 3
BL50MVT802	Malaxeur à axe vertical	8 minutes	Ordre 2
BL50MVT1102	Malaxeur à axe vertical	11 minutes	Ordre 2
BL50BTT802	Bétonnière	8 minutes	Ordre 2
BL50MDT802	Mélangeur double	8 minutes	Ordre 2

4.1.2. Ordre d’introduction des constituants

Les résultats que nous avons obtenus sur l’effet de l’ordre d’introduction montrent que l’ordre d’introduction des constituant présente un effet remarquable sur les propriétés des bétons de liège à l’état frais et durci.

A l’état frais, l’ordre 1 qui est utilisé pour le malaxage des bétons ordinaires ainsi que l’ordre 3 qui consiste à incorporer le liège après le sable et le ciment ont causé des phénomènes de ségrégation au niveau des bétons produits. Comparé avec les ordres 1 et 3, l’utilisation de l’ordre 2 pour le malaxage des bétons de liège a montré plutôt un béton de liège qui a une meilleure homogénéité avec pratiquement l’absence des phénomènes de ségrégation (Fig. 4.4).



Figure 4.4. Influence de l’ordre d’introduction sur l’homogénéité du béton de liège.

L'affaissement des bétons au cône d'Abrams est lié à leur homogénéité. L'impact de l'ordre d'introduction des constituants sur l'affaissement des bétons de liège BL50 testés est clairement visible dans la Fig. 4.5-a. Les résultats montrent que le meilleur affaissement (100 mm) est obtenu pour l'ordre 2 (BL50MVT502) qui consiste à introduire les granulats de liège en premier. Comparé à ce maximum, le malaxage suivant l'ordre 1, malgré les problèmes de ségrégations qu'il a montrés, a révélé seulement une faible différence en montrant un affaissement de 90 mm (BL50MVT501). En revanche, l'incorporation des granulats de liège après le ciment et le sable suivant l'ordre 3 (BL50MVT503), en plus des phénomènes de ségrégation, a conduit à une diminution de 35% au niveau de la consistance du béton, ce qui a engendré beaucoup de difficultés lors de la mise en œuvre des bétons préparés suivant cet ordre d'introduction.

A l'état durci, comme montré sur les Figs. 4.5-b et 4.6, l'ordre d'introduction n'a pas montré un impact significatif sur les valeurs de la vitesse ultrasonore (qui varie entre 2680 et 2754 km/s) et de la résistance à la flexion (qui oscille entre 2,31 et 2,52 MPa), ceci traduit l'absence d'une claire relation entre l'ordre d'introduction et ces deux propriétés.

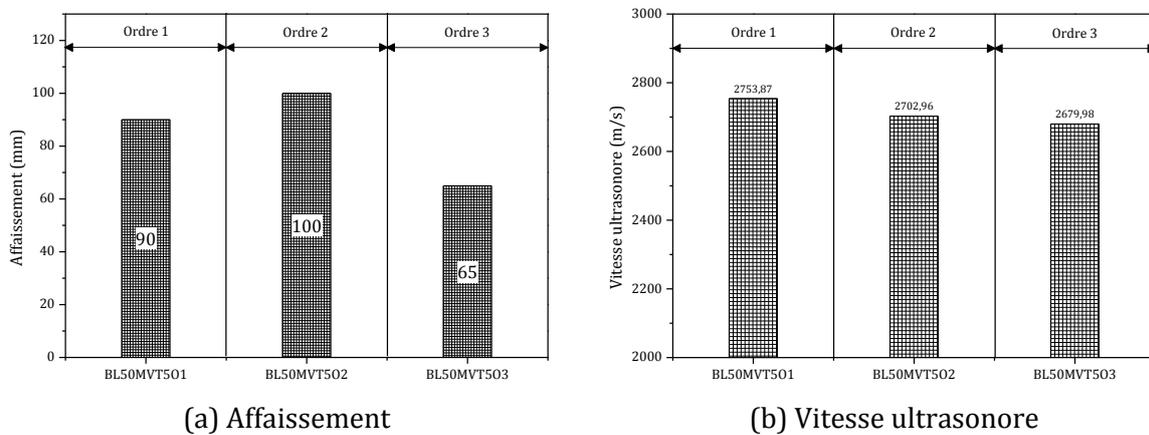


Figure 4.5. Influence de l'ordre d'introduction sur (a) l'affaissement et (b) la vitesse ultrasonore du béton de liège.

Avec le changement de l'ordre d'introduction des constituants pendant le malaxage, des différences remarquables ont été enregistrées au niveau des valeurs de la résistance à la compression des bétons de liège à 28 jours. Le malaxage du liège en même temps avec les autres constituants secs suivant l'ordre 1 (BL50MVT501) a montré une résistance de 1,82 MPa. Toutefois, l'incorporation de ces particules végétales avant ou après le sable et le ciment a conduit à des améliorations importantes au niveau de cette propriété. Les résultats obtenus sur la résistance à la compression confirment la bonne performance du béton BL50MVT502 à l'état frais en montrant une valeur de 4,24 MPa. Comparée avec celles obtenues pour les autres ordres d'introduction, cette valeur présente des différences de 57% et 25% par rapport à celles obtenues respectivement pour les bétons BL50MVT501 et BL50MVT503 (Fig. 4.6).

Les résultats obtenus à l'état durci peuvent être associés à l'homogénéité et à la consistance des bétons à l'état frais. En effet, la bonne performance à l'état frais conduit à une grande facilité de mise en œuvre ainsi qu'une bonne répartition des granulats dans la matrice cimentaire.

Quant à la bonne performance de l'ordre 2 par rapport aux autres ordres d'introduction, nous pouvons avancer que le fait d'introduire les granulats de liège en premier avant le sable et le ciment permet d'assurer un enrobage correct de ces derniers, conduisant ainsi

à une bonne homogénéité et à une bonne consistance à cause de la réduction des frottements entre les granulats.

Etant donné que la meilleure consistance, la meilleure homogénéité et la meilleure résistance à la compression sont obtenues pour un malaxage qui préconise l'ordre 2 comme ordre d'introduction, cet ordre sera utilisé dans la suite de la campagne de recherche du mode de malaxage adéquat pour la préparation des bétons de liège.

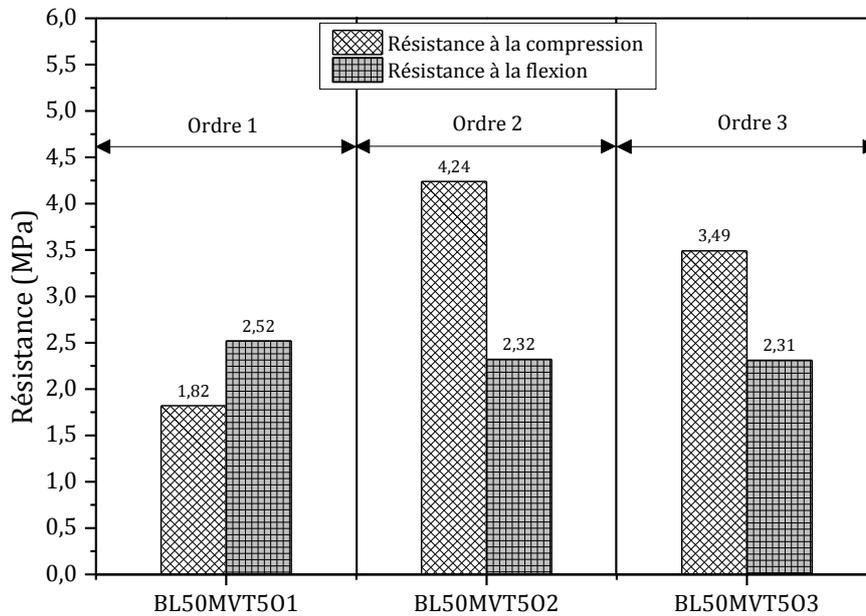


Figure 4.6. Influence de l'ordre d'introduction sur la résistance à la compression et à la flexion du béton de liège.

4.1.3. Temps de malaxage

L'ordre d'introduction le plus adéquat étant connu, nous allons maintenant présenter l'influence du temps de malaxage sur les propriétés des bétons de liège. Pour l'étude de ce paramètre, nous avons gardé le malaxeur à axe vertical comme outil de malaxage.

L'homogénéité et la consistance, comme paramètres décisifs dans le choix du temps de malaxage adéquat, ont montré que l'augmentation du temps de malaxage de 5 à 8 minutes a été remarquablement bénéfique pour l'homogénéité du béton de liège (Fig. 4.7). Ceci a été traduit par une amélioration de la consistance du béton. A vrai dire, contre un béton qui a présenté 100 mm d'affaissement pour 5 minutes de malaxage (BL50MVT502), l'utilisation d'un temps de malaxage de 8 minutes a engendré un béton (BL50MVT802) présentant un affaissement de 120 mm et une facilité de mise en œuvre prometteuse, cela signifie une amélioration de 20% au niveau de la consistance du béton (Fig. 4.8-a). Alors que l'amélioration des propriétés fraîches lors de l'augmentation du temps de malaxage de 5 à 8 minutes était significative, l'utilisation de 11 minutes au lieu de 8 minutes n'a pas offert une grande amélioration en terme d'homogénéité. De plus, bien que faible, elle a montré une diminution au niveau de la consistance où le béton BL50MVT1102 a atteint un affaissement de 110 mm.

Ce résultat peut être expliqué par le fait que malgré le gain en terme d'homogénéité que peut offrir un temps de malaxage supérieur, il peut être derrière une diminution de la quantité d'eau destinée à l'ouvrabilité du béton. Ceci est dû à la grande capacité

d'absorption du liège qui augmente avec le temps, donc plus le temps de malaxage est important, plus la quantité d'eau absorbée par le liège est importante aussi, et donc plus l'effet sur la consistance est observé.



Figure 4.7. Influence du temps de malaxage sur l'homogénéité du béton de liège.

En terme de vitesse ultrasonore qui est un bon indicateur de la porosité du matériau et sa répartition, les résultats trouvés indiquent l'absence d'une vraie corrélation entre cette propriété et le temps de malaxage. Bien que les valeurs obtenues pour les trois temps testés ne montrent pas de grandes divergences, il est important de noter que la vitesse minimale est enregistrée pour un temps de malaxage de 5 minutes. Par rapport à cette dernière, notons que le maximum a été obtenu pour 8 minutes de malaxage, le malaxage pour 8 et 11 minutes a exprimé respectivement des hausses de 2,4% et 1,0% (Fig. 4.8- b).

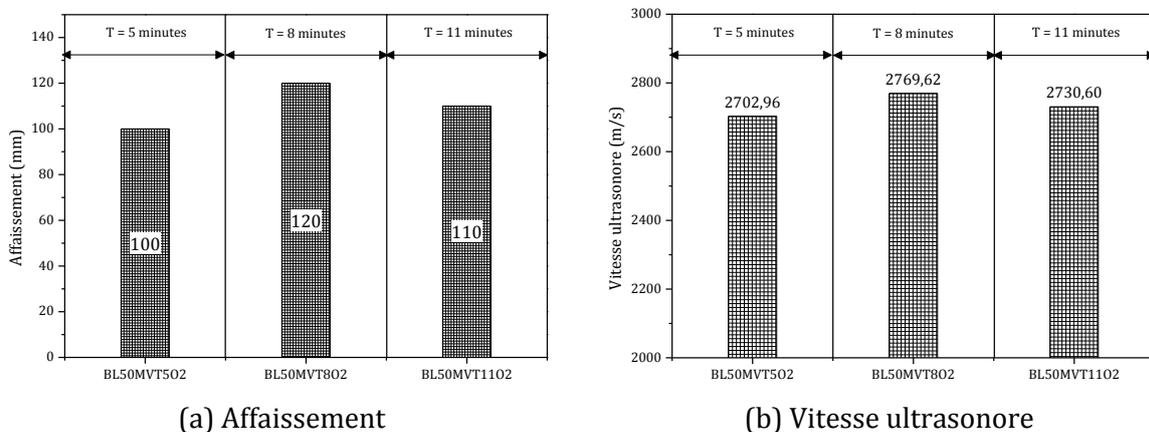


Figure 4.8. Influence du temps de malaxage sur (a) l'affaissement et (b) la vitesse ultrasonore du béton de liège.

La fluctuation des résistances mécaniques en fonction du temps de malaxage utilisé pour la préparation du béton de liège est illustrée dans la Fig. 4.9.

Comme on peut le voir, la résistance à la compression maximale est obtenue pour un malaxage de 5 minutes. L'augmentation du temps de malaxage à 8 et 11 minutes a engendré respectivement une diminution de 16 et 20%. Malgré ces diminutions, la résistance à la compression du béton de liège est restée dans un intervalle restreint variant entre 3,37 et 4,24 MPa. Il convient de noter que la différence entre BL50MVT802

et BL50MVT1102 reste non significative puisque ces bétons ont montré respectivement une résistance à la compression de 3,53 et 3,37 MPa.

Quant aux résultats de résistance à la flexion, la Fig. 4.9 signale l'absence d'une relation claire qui montre l'influence du temps de malaxage sur la valeur de cette propriété. La résistance à la flexion des bétons de liège dont les temps de malaxage varient entre 5 et 11 minutes sont comprises entre 2,25 et 2,47 MPa. La valeur maximale est enregistrée pour un temps de malaxage de 8 minutes (BL50MVT802) et elle présente des différences de 0,15 et 0,22 MPa par rapport aux bétons préparés respectivement par malaxage pendant 5 et 11 minutes.

Pris ensemble, les résultats obtenus sur l'impact du temps de malaxage soulignent que le malaxage des bétons de liège pour 8 et 11 minutes offre des performances fraîches similaires et intéressantes. De plus, malgré la diminution de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation du temps de malaxage, seulement de faibles différences sont enregistrées sur ce paramètre ainsi que sur la résistance à la flexion et la vitesse ultrasonore.

Sur la base des résultats obtenus à l'état frais, et dans une optique visant à optimiser l'énergie de malaxage et à faciliter le processus industriel de préparation de ces bétons, un temps de malaxage de 8 minutes est choisi comme optimum et sera utilisé dans la suite de notre campagne expérimentale.

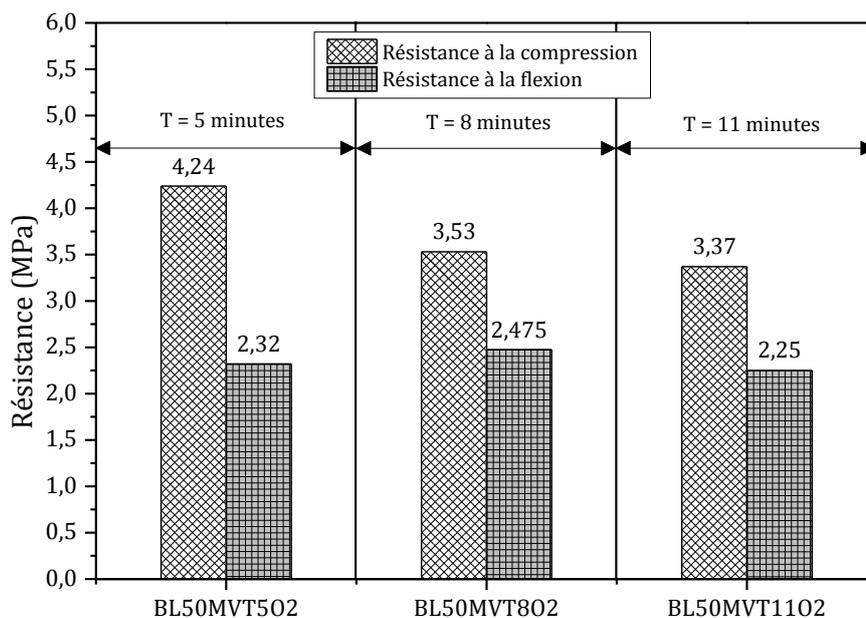


Figure 4.9. Influence du temps de malaxage sur la résistance à la compression et à la flexion du béton de liège.

4.1.4. Outil de malaxage

Nous allons dans cette section présenter l'influence de l'outil de malaxage sur les propriétés du béton de liège étudié. L'utilisation d'un outil de malaxage autre que le malaxeur à axe vertical a montré un changement remarquable au niveau de l'homogénéité du béton de liège. Qu'il s'agisse de la bétonnière ou du mélangeur double, les phénomènes de ségrégation étaient fortement présents. La séparation de la pâte et la remontée des granulats de liège en surface sont les principaux phénomènes observés. Contrairement au

béton préparé à l'aide du malaxeur à axe vertical, les difficultés rencontrées lors de la réalisation de l'essai d'affaissement pour les bétons BL50BTT802 et BL50MDT802 sont à mentionner. Ceci était à l'origine d'une difficulté importante au moment de la mise en œuvre des bétons préparés (Fig. 4.10).



Figure 4.10. Influence de l'outil de malaxage sur l'homogénéité du béton de liège.

En plus de cette instabilité, la maniabilité du béton BL50MVT802 préparé par le biais d'un malaxeur à axe vertical était nettement supérieure à celles des deux autres bétons (BL50BTT802 et BL50MDT802). Cette dernière (120 mm) a révélé un accroissement respectivement de 45,8% et 16,7% par rapport à ceux des bétons malaxés par bétonnière et mélangeur double (Fig. 4.11-a).

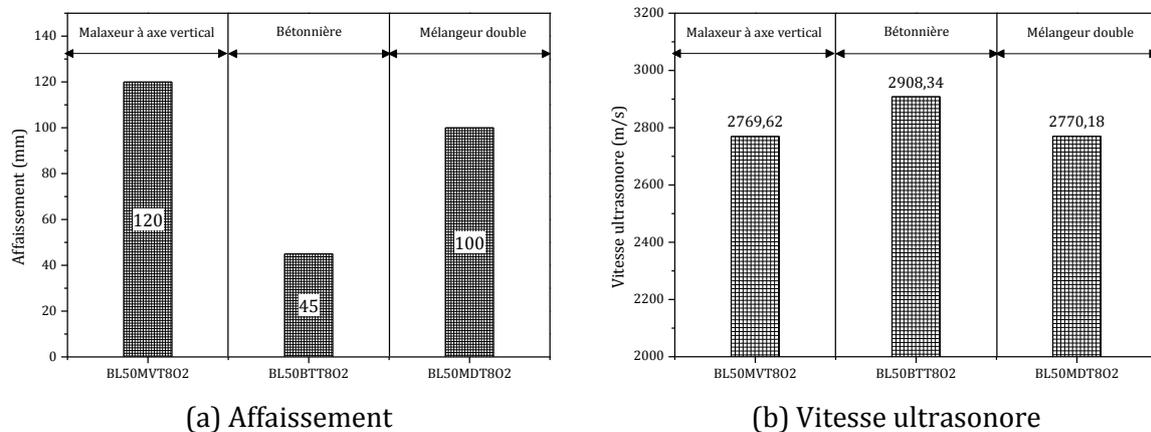


Figure 4.11. Influence de l'outil de malaxage sur (a) l'affaissement et (b) la vitesse ultrasonore du béton de liège.

Par rapport aux résultats du malaxeur vertical (BL50MVT8), l'utilisation de la bétonnière pour le malaxage du béton de liège a offert une résistance à la compression meilleure (10%), une résistance à la flexion pratiquement similaire (Fig. 4.12) et une vitesse ultrasonore légèrement supérieure (5%) (Fig. 4.11-b). Contrairement à la bétonnière, le malaxage à l'aide du mélangeur double a engendré plutôt une diminution de 30% au niveau de la résistance à la compression (2,48 MPa), en comparaison avec le malaxeur à axe vertical (3,53 MPa). En revanche, les résultats de résistance à la flexion et de la vitesse

ultrasonore n'ont montré aucune différence significative entre les valeurs obtenues par malaxeur à axe vertical et celles relevées pour le mélangeur double.

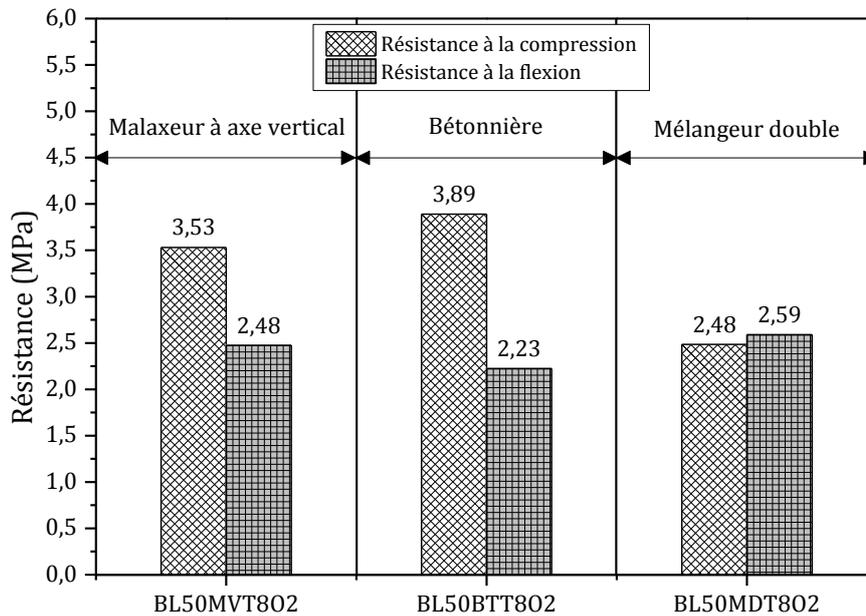


Figure 4.12. Influence de l'outil de malaxage sur la résistance à la compression et à la flexion du béton de liège.

Il est vrai que l'utilisation de la bétonnière a permis d'améliorer la performance mécanique du béton de liège à l'état durci. Cependant, similairement au mélangeur double, son utilisation peut compromettre la performance fraîche du béton de liège ainsi que sa mise en œuvre.

Par conséquent, l'on peut partiellement conclure que le malaxeur à axe vertical est l'outil de malaxage le plus adéquat pour la préparation des bétons de liège développés dans cette étude. Ainsi pour la suite de nos travaux, ce sera ce type de malaxeur qui va être utilisé pour la préparation de nos bétons de liège.

4.1.5. Mode de malaxage approprié

Sur la base des résultats obtenus, surtout à l'état frais, le mode de malaxage qui a donné les meilleures performances est décrit par l'utilisation d'un malaxeur vertical comme outil de malaxage, un ordre d'introduction qui consiste à introduire le liège en premier ainsi qu'un temps de malaxage de 8 minutes. Ce mode est illustré dans la Fig. 4.13 et sera utilisé dans la suite du programme expérimental.

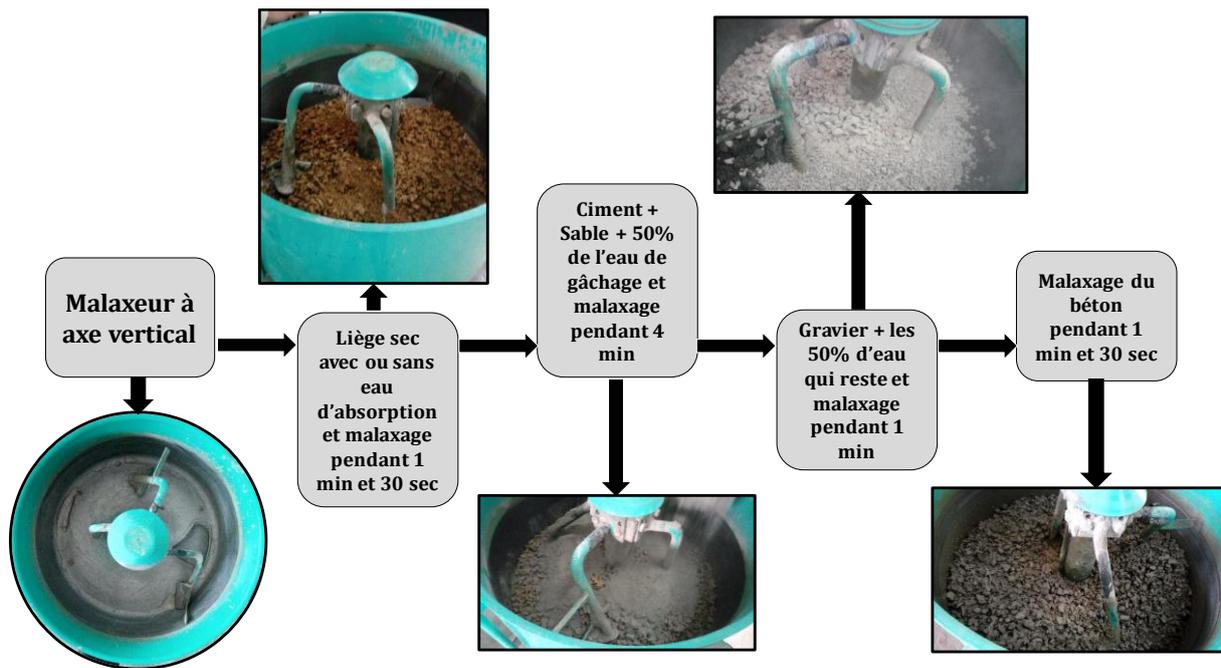


Figure 4.13. Protocole de malaxage.

4.2. Le béton de liège mâle : quelle performance ?

Avant de procéder à la présentation des résultats obtenus sur les différentes propriétés, on voit qu'il est judicieux de commencer par un bref rappel des différents bétons étudiés à ce stade. Il s'agit de cinq types de bétons incorporant des pourcentages de 0, 25, 50, 75 et 100% de liège_Jijel et désignés respectivement, Référence, BL25, BL50, BL75 et BL100. Il est aussi important de signaler qu'avant d'entreprendre la caractérisation des bétons de liège mâle proposés, une vérification de leur homogénéité à l'état durci a été faite sur des éprouvettes cylindriques de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur. La vérification a été faite dans le sens transversal en faisant des coupes (inférieure, médiane et supérieure) à différentes hauteurs de l'éprouvette cylindrique. Dans le sens longitudinal, la vérification est faite en faisant une coupe verticale comme montré dans la Fig. 4.14.

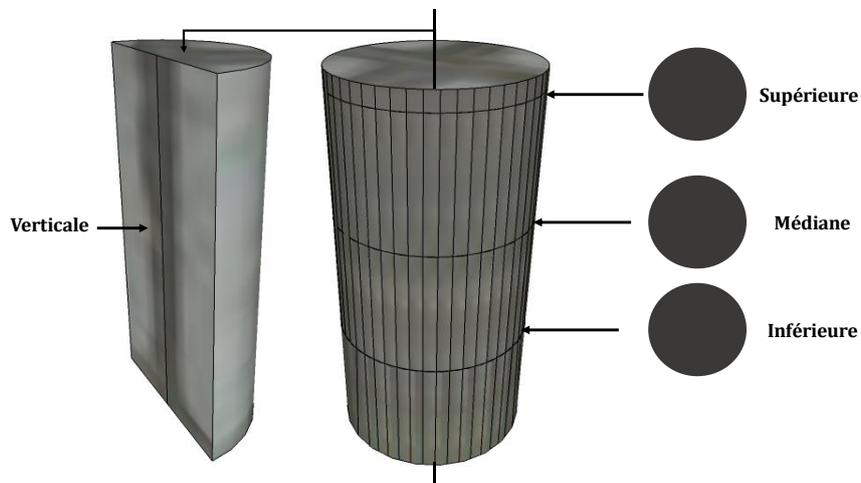
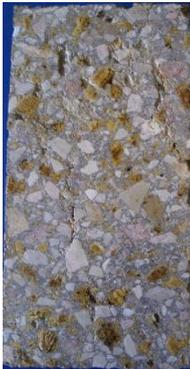


Figure 4.14. Coupes utilisées pour vérifier l'homogénéité des bétons.

Les différentes coupes transversales ainsi que les coupes verticales des cinq types de bétons préparés sont illustrées dans le Tableau 4.2. Comme le montre cette figure, tous les types de bétons de liège préparés présentent une bonne répartition des granulats minéraux et végétaux à travers les différentes sections transversales. De plus, les sections verticales révèlent en plus de la bonne répartition, l'absence d'une séparation entre les phases lourdes (granulats minéraux) et légères (granulats de liège) malgré les gradient observé entre leurs masses volumiques, confirmant ainsi l'adéquation du mode de malaxage choisi avec les différents bétons de liège proposés dans cette première partie de l'étude.

Tableau 4.2. Effet du pourcentage de liège sur l'homogénéité du béton.

	Référence	BL25	BL50	BL75	BL100
Supérieure					
Médiane					
Inférieure					
Verticale					

4.2.1. Ouvrabilité

La Fig. 4.15 présente la variation de l'affaissement des bétons de liège mâle en fonction du pourcentage de liège.

Comme on peut le voir, le pourcentage de liège mâle utilisé joue un rôle déterminant dans la maniabilité des mélanges. Suivant une relation quasi linéaire, l'affaissement des bétons de liège mâle diminue avec l'augmentation du pourcentage de liège. Par exemple, l'affaissement du béton de référence (contenant 0% de liège vierge) était de 170 mm. Cependant, cet affaissement est devenu 32 mm lorsque la quantité de liège mâle est passée à 100%. Le béton est passé d'une consistance fluide à une consistance ferme. Cela peut être expliqué en partie par une réduction du volume de la pâte (due au remplacement des agrégats minéraux contenant une quantité considérable de particules fines (18%), par son équivalent en granulats de liège mâle qui ne contiennent pratiquement pas de fines (comme montré dans le chapitre 3). Les résultats peuvent aussi être expliqués par l'hydrophilie des granulats de liège qui peuvent absorber une quantité de l'eau destinée à l'ouvrabilité des bétons, conduisant à une réduction de l'affaissement du béton avec l'augmentation du pourcentage de liège mâle.

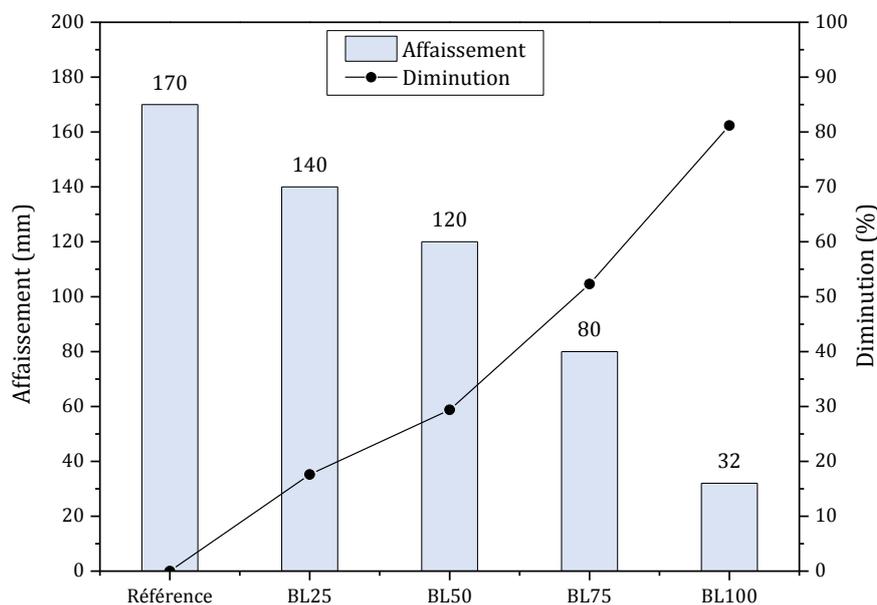


Figure 4.15. Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de liège mâle.

4.2.2. Masse volumique

La Fig. 4.16 montre la fluctuation de la masse volumique des mélanges de béton de liège mâle en fonction du pourcentage de liège incorporé dans la masse.

De manière similaire à la variation de la consistance, les résultats indiquent que la masse volumique diminue suivant une relation parfaitement linéaire avec l'augmentation de la quantité de liège mâle dans le béton. Ce constat est conforme avec ceux trouvés dans la littérature par plusieurs auteurs (Boussetoua et coll., 2017; Ziregue et coll., 2016). Cette masse volumique est passée de 2383,7 kg/m³ pour le béton de référence à 716,5 kg/m³ pour le BL100, soit une diminution de 70%. En introduisant le liège mâle, tous les composites produits ont montré des masses volumiques inférieures à 2000 kg/m³, ce qui permet de les classer dans la gamme des bétons légers (Prusty et Patro, 2015).

Il convient de souligner que le mélange contenant 100% de granulats de liège mâle a montré une masse volumique inférieure à celle de l'eau. Cela lui offre la caractéristique de flottabilité sur l'eau.

Les résultats obtenus peuvent être justifiés par la différence importante entre la masse volumique des granulats minéraux (environ 1400 kg/m^3) et celle des granulats de liège mâle qui avoisine 85 kg/m^3 . En effet, cet écart important est attribué à la grande différence qui existe entre la microstructure des granulats minéraux et celle des granulats de liège qui montrent une morphologie contenant environ 90% de vide.

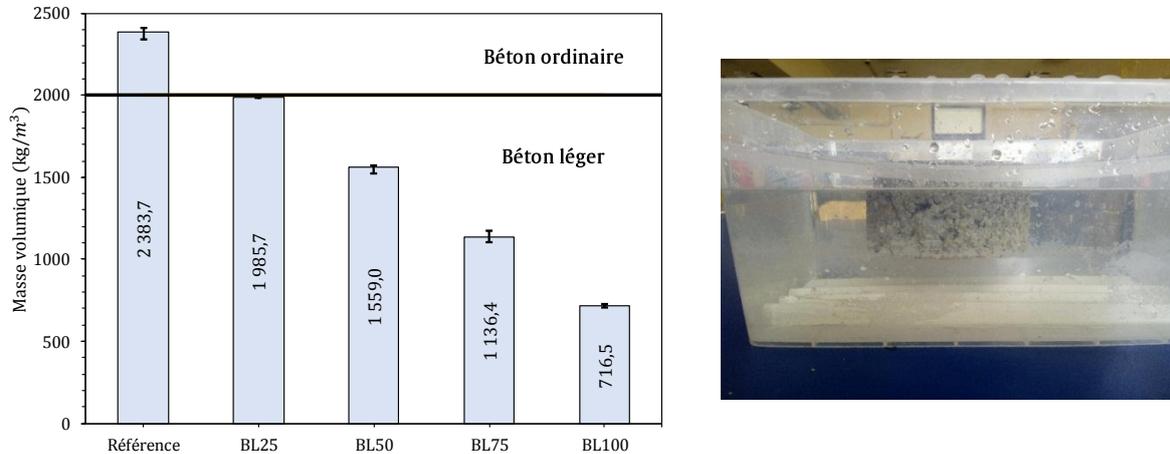


Figure 4.16. A gauche : masse volumique des bétons de liège mâle, à droite : flottabilité du BL100.

4.2.3. Vitesse ultrasonore

L'évolution de la vitesse ultrasonore des bétons de liège mâle en fonction de la variation de leur masse volumique souligne l'existence d'une relation linéaire (Fig. 4.17).

Malgré le manque en terme de valeur de vitesse ultrasonore des bétons de liège dans la littérature, les résultats obtenus semblent être en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature pour un autre type de composites à base de granulats de PVC expansé (Latroch et coll., 2018). La valeur enregistrée pour le béton de référence est d'environ 4539 m/s . Toutefois, l'incorporation de liège mâle a montré une diminution de 15,7, 40, 63,6 et 90,2% pour les bétons contenant respectivement 25, 50, 75 et 100% de liège mâle.

Les valeurs obtenues signifient que l'incorporation de granulats de liège mâle retarde la transmission des ondes sonores à travers le béton, cela implique une augmentation de la quantité de vides et une amélioration des performances d'isolation du béton.

Ces résultats peuvent être liés à la nature poreuse du liège mâle ainsi qu'à la forme ondulée des cellules qui le constituent.

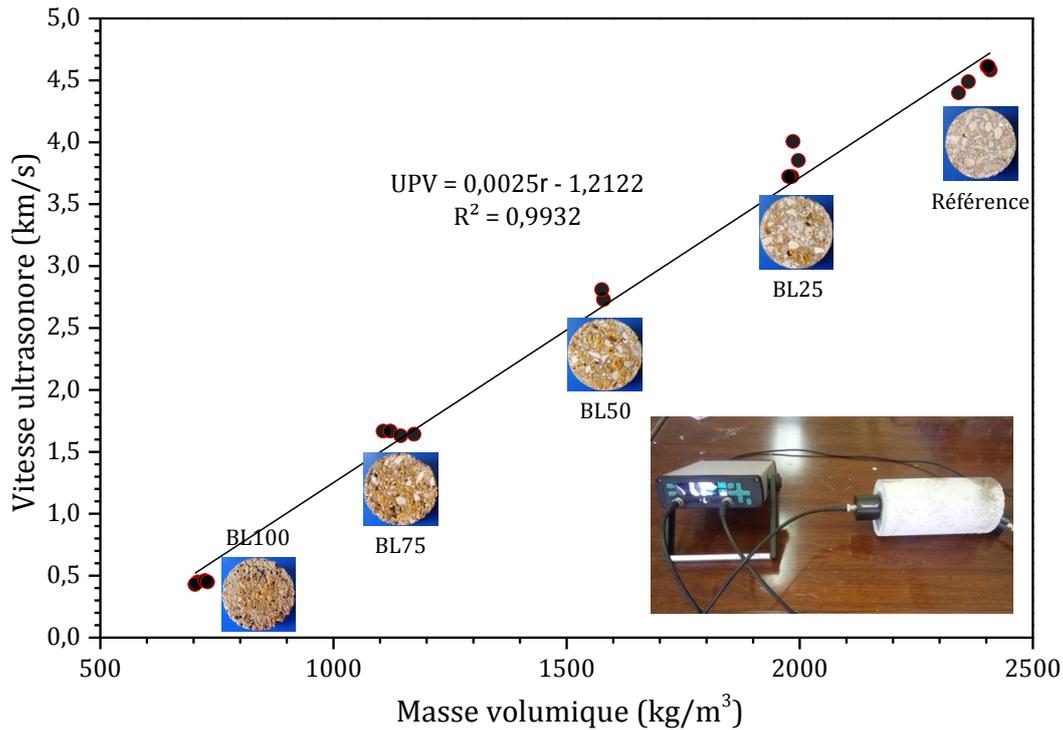


Figure 4.17. Vitesse ultrasonore des bétons de liège mâle.

4.2.4. Porosité accessible à l'eau

A partir de la Fig. 4.18, on peut observer la variation de la porosité accessible à l'eau des différents mélanges de béton étudiés en fonction du pourcentage de liège mâle. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation du liège mâle dans le béton augmente sa porosité totale suivant une relation exponentielle.

En effet, en fonction du pourcentage de liège mâle, nous avons trouvé que la porosité des bétons béton varie entre 0,15 et 0,86. La substitution des agrégats minéraux par des agrégats de liège mâle a entraîné respectivement, par rapport au béton de référence, une augmentation de 26, 84, 125 et 470% au niveau de la porosité des bétons de liège BL25, BL50, BL75 et BL100. La porosité élevée obtenue pour les bétons de liège mâle peut éventuellement entraîner une amélioration de la performance hygrothermique des bétons. En contrepartie, elle peut aussi faciliter la pénétration de gaz et de fluides, affectant ainsi la durabilité des bétons.

L'augmentation de la porosité du béton à cause de l'utilisation de particules de liège mâle peut être fortement associée à la grande porosité des granulats de liège mâle, comparée avec celle des granulats minéraux.

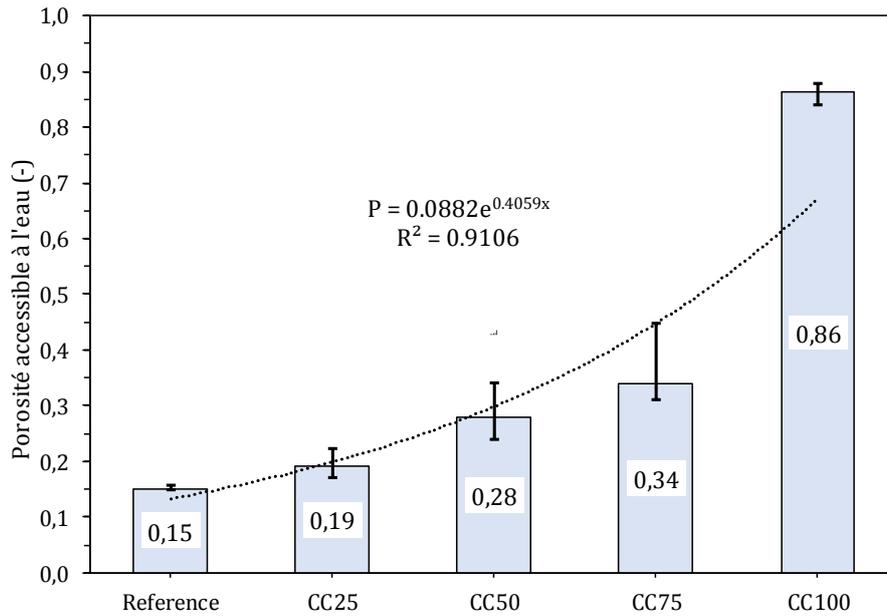


Figure 4.18. Porosité des bétons de liège mâle.

4.2.5. Absorption par capillarité

La Fig. 4.19 illustre les courbes du gain massique en eau des bétons testés en fonction de la racine carrée du temps. Les courbes tracées sont toutes caractérisées par la présence de deux segments de droite. La pente de la première ligne constitue le coefficient d'absorption primaire, tandis que la pente de la deuxième ligne représente le coefficient d'absorption secondaire.

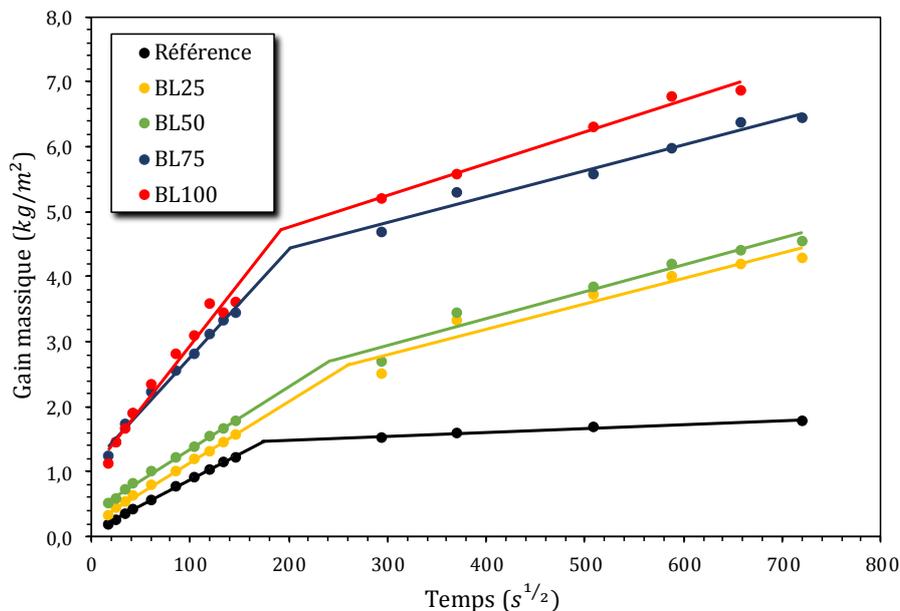


Figure 4.19. Gain massique en eau des bétons de liège en fonction de la racine carrée du temps.

Ce qui est curieux dans les résultats illustrés, c'est la similitude entre les courbes des bétons BL25 et BL50 et entre BL75 et BL100. L'explication que nous pouvons apporter pourrait être assimilée à la diminution du volume de pâte avec l'augmentation de la quantité de liège mâle. Par rapport aux bétons BL25 et BL50, la diminution du volume de la pâte est claire dans le cas des bétons BL75 et BL100. En revanche, il semblerait qu'il y ait un besoin certain de mener une étude plus approfondie en mettant davantage l'accent sur la caractérisation de la microstructure liée aux phénomènes de transfert. Cela signifie une enquête sur d'autres paramètres qui peuvent probablement définir les causes qui sont derrière les résultats obtenus. Il s'agit de la distribution des pores, les isothermes de sorption et la microtomographie aux rayons X.

L'exploitation des courbes de gain massique en fonction du temps a permis de calculer l'absorption d'eau primaire et secondaire des différents bétons étudiés (Fig. 4.20).

Les résultats montrent que l'ajout de 25 et 50% de liège mâle dans le béton conduit à augmenter l'absorption primaire de seulement 16,7 et 20,5%. Cependant, l'addition de 75 et 100% de liège mâle accroît l'absorption primaire de 7,98 à respectivement 16,51 et 19,30 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, soit une augmentation de 106,8 et 141,8%. Contrairement à l'absorption primaire, l'ajout de seulement 25% de liège mâle augmente fortement l'absorption secondaire. Au-delà de ce pourcentage, le coefficient d'absorption secondaire a révélé une faible variation où sa valeur est restée entre 3,89 et 4,86 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. Nos résultats diffèrent des résultats de la littérature pour des composites contenant du liège expansé (Barnat-Hunek et coll., 2017; Moreira et coll., 2014). L'augmentation de l'absorption d'eau par l'ajout de liège mâle peut être attribuée à la microstructure en nid d'abeille du liège, qui diffère complètement de celle des agrégats minéraux (comme expliqué dans le chapitre 3). En effet, cette dernière lui permet une capacité d'absorption élevée variant entre 68 et 169% selon nos résultats.

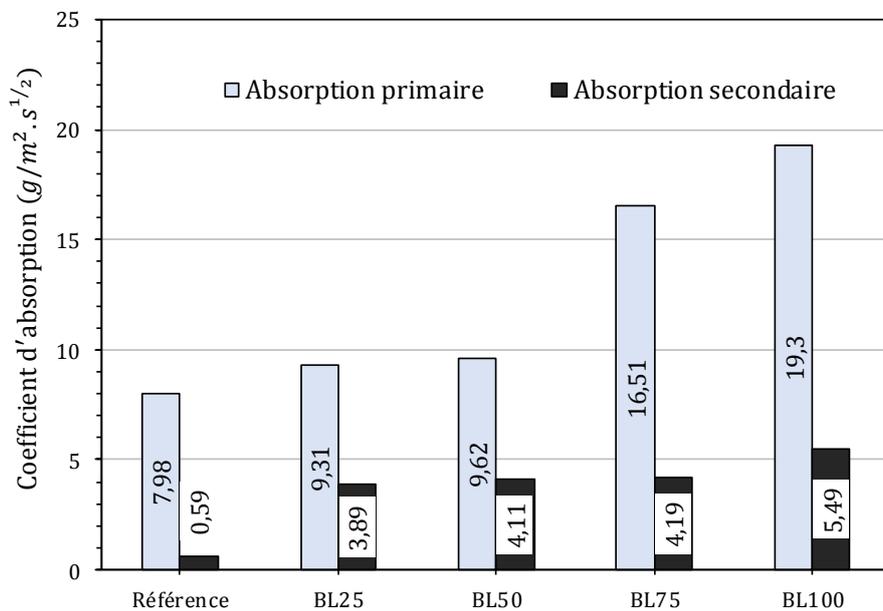


Figure 4.20. Absorption primaire et secondaire des bétons de liège mâle.

4.2.6. Conductivité thermique

Les résultats de la conductivité thermique obtenue pour les différents bétons manufacturés sont affichés sur la Fig. 4.21. A partir de cet histogramme, nous pouvons observer que la conductivité thermique des bétons de liège mâle testés dans notre étude est comprise entre 0,04 et 1,43 W/(m.°K). Ainsi, par rapport au béton de référence, le remplacement des granulats minéraux par des granulats de liège mâle a engendré une diminution pouvant dépasser les 98% dans le cas du BL 100.

Ces résultats peuvent être en partie liés à la porosité des mélanges qui elle-même présente une tendance similaire à la conductivité thermique. En effet, l'augmentation de la porosité signifie une augmentation de la quantité de l'air dans le béton. Sachant que l'air sec est le meilleur isolant, l'augmentation du taux de cet air dans le béton conduit donc à l'amélioration de son pouvoir isolant en raison de la diminution de sa conductivité thermique sèche.

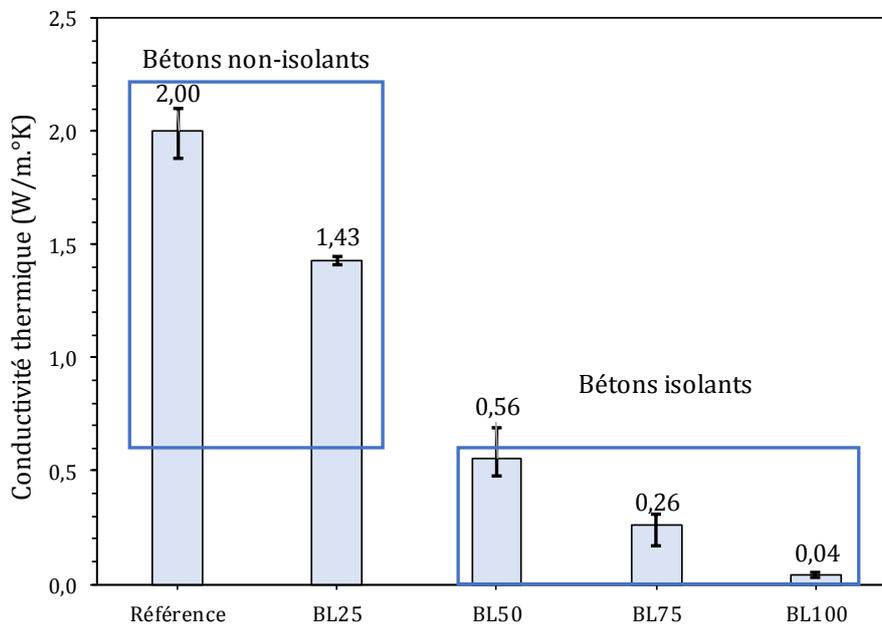


Figure 4.21. Conductivité thermique des bétons de liège mâle.

Par rapport aux résultats trouvés dans d'autres travaux incorporant des granulats de liège expansé ou des déchets industriels (Boussetoua et coll., 2017; Moreira et coll., 2014), l'incorporation de liège mâle a donné des résultats encourageants. Sur la base de ces résultats, le BL50, le BL75 et le BL100 peuvent être classés comme matériaux d'isolation thermique, tandis que le BL25 reste dans la classe des matériaux de structure.

4.2.7. Microstructure

Dans une optique visant une meilleure compréhension des résultats obtenus sur les bétons de liège mâle produits ainsi que du changement remarquable de leur comportement par rapport au béton ordinaire, une investigation au niveau de la zone de transition interfaciale (ITZ) entre les deux types de granulats utilisés et la matrice cimentaire a été réalisée à l'aide d'une microscopie électronique à balayage. Les images MEB ont été prises à un agrandissement de 300 fois.

Pour le béton de référence contenant seulement des granulats minéraux, l'image MEB affichée dans la Fig. 4.22 montre une bonne ITZ présentant seulement une fine couche poreuse d'environ 13 μm d'épaisseur entre le granulat minéral et la matrice cimentaire, qui elle-même a montré un aspect dense avec la présence d'une faible quantité de pores.

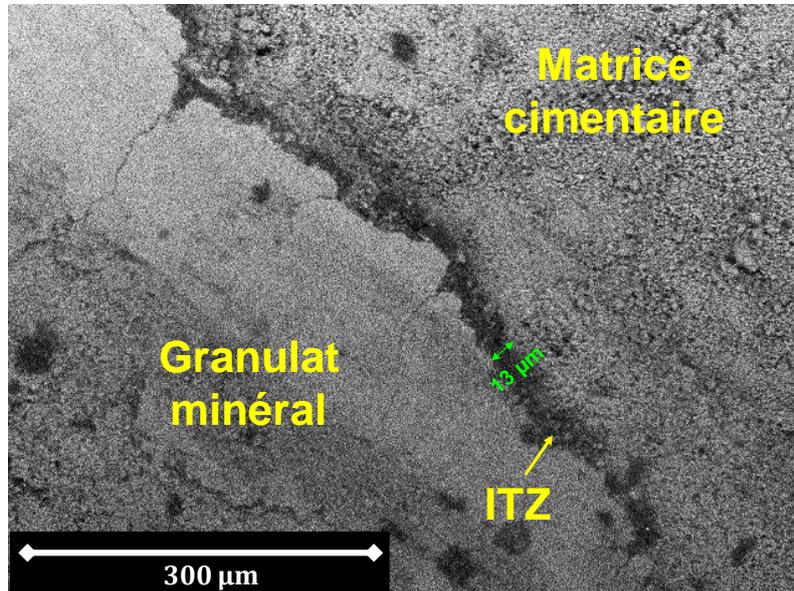


Figure 4.22. Image MEB de l'ITZ entre un granulat minéral et la matrice cimentaire.

Contrairement à celle observée dans le cas du béton de référence, l'image MEB obtenue sur un béton de liège mâle BL50 a révélé l'existence d'une ITZ assez médiocre avec un aspect poreux entre le granulat de liège mâle et la matrice cimentaire (Fig. 4.23). La largeur de cette couche poreuse varie approximativement entre 90 et 150 μm . En plus de son aspect poreux, l'ITZ a montré une faible diminution des produits d'hydratation de ciment à côté du granulat de liège. Cela signifie une inhibition de l'hydratation du ciment et supporte l'idée que l'interface faible constitue une des raisons principales qui sont à l'origine des faibles performances mécaniques et de la forte porosité des bétons de liège mâle par rapport à celles du béton de référence.

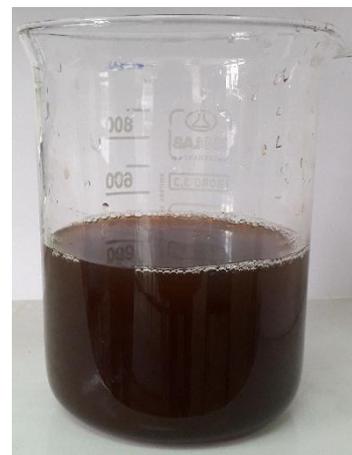
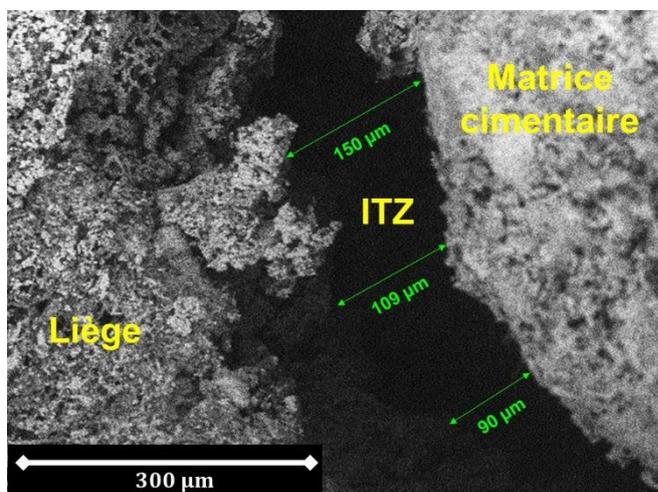


Figure 4.23. A gauche : Image MEB de l'ITZ entre un granulat de liège et la matrice cimentaire. A droite : Eau récupérée après immersion du liège.

L'inhibition de l'hydratation du ciment à cause de l'incorporation de granulats de liège mâle peut être associée à : (i) la forte absorption des granulats de liège qui peuvent entrer en compétition avec l'eau destinée à l'hydratation du ciment en absorbant une quantité de cette dernière, engendrant ainsi une hydratation incomplète. (ii) la libération de quelques composés chimiques présents dans les granulats de liège (polysaccharides, tanins, polyphénols...) par relargage après absorption de l'eau de gâchage. En effet, la libération de ces composés chimiques peut être visible après immersion du liège dans l'eau. Ceci a été traduit par une couleur brune à l'eau contenant le liège (Fig. 4.23.b)

4.2.8. Propriétés mécaniques

4.2.8.1. Résistance à la compression et module d'élasticité

La Fig. 4.24 fournit les résultats de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de liège mâle.

Les résultats montrent que pour une augmentation du pourcentage de liège mâle, la résistance à la compression diminue suivant une relation exponentielle. Lorsque la quantité de liège mâle a augmenté de 0 à 100%, la résistance à la compression a diminué de 31,4 MPa à 0,5 MPa, cela représente une diminution de 98%. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux trouvés par Moreira et coll. (Moreira et coll., 2014) et Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016) pour des composites à base de liège expansé.

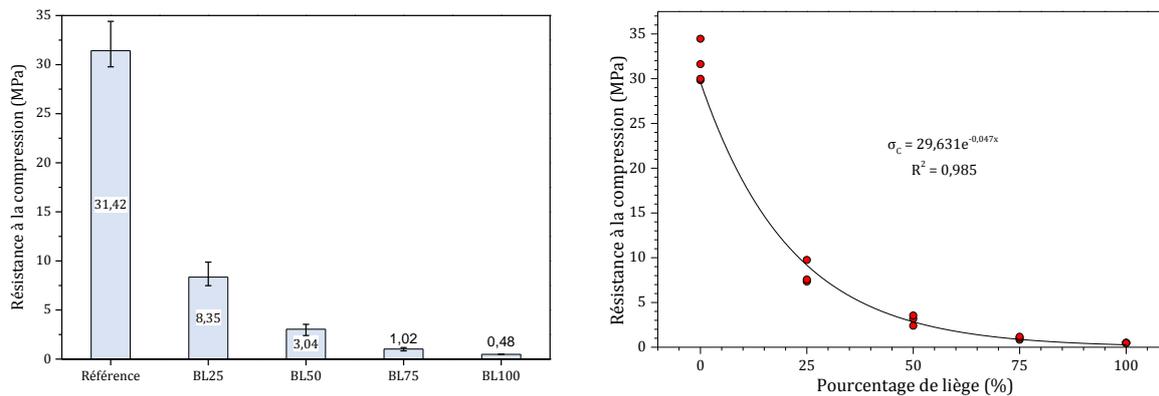


Figure 4.24. Résistance à la compression des bétons de liège mâle.

Les résultats sur les résistances à la compression semblent suggérer qu'à l'exception du BL25, les bétons développés ne présentent pas la résistance suffisante pour être utilisés dans la réalisation d'éléments structuraux. Cependant, pour l'utilisation comme matériaux non-structuraux, les bétons de liège produits ont montré des propriétés mécaniques compétitives par rapport aux autres agro-composites trouvés dans la littérature (Brouard et coll., 2018; Hussain et coll., 2019).

La diminution de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation du pourcentage de liège mâle peut être expliquée en partie par la nature poreuse de ces derniers, qui leur donne une faible résistance à la compression. En effet, plus le béton contient du liège mâle, plus sa porosité est importante et donc moins il est résistant à la compression.

La Fig. 4.25 montre les courbes de contrainte-déformation (courbes de capacité) des différents mélanges des bétons produits.

Comme illustré, toutes les courbes commencent par une phase linéaire croissante qui exprime le comportement élastique de tous les bétons dans cette partie. Bien que les contraintes élastiques des mélanges soient différentes, les déformations élastiques correspondantes sont presque égales et restent inférieures à 2 ‰. Après cette phase de comportement élastique, le béton de référence, le BL25 et le BL50 ont montré une chute brusque au niveau de la contrainte, indiquant que le phénomène de rupture est atteint directement après la phase élastique, à la différence des bétons BL75 et BL100 qui montrent plutôt l'existence d'un palier plastique qui augmente avec l'augmentation du pourcentage de liège mâle dans le béton.

Ce comportement peut être justifié par le fait qu'après la rupture de la matrice et de l'ITZ, ce sont les granulats de liège mâle qui reprennent les charges de compression. Etant connus par leur grande compressibilité sans se rompre, les granulats de liège offrent donc le comportement plastique au béton avant de finir par se détériorer.

Les résultats obtenus semblent suggérer que les bétons à pourcentage de liège mâle supérieur à 50% présentent une bonne capacité à se déformer de manière plastique, ce qui permet de réfléchir à leur contribution (en tant que matériaux de remplissage) au comportement global des structures en cas de charges latérales (séisme). Néanmoins, ceux contenant 50% de liège mâle et moins présentent seulement de très petits paliers plastiques et restent donc dans la gamme des bétons fragiles.

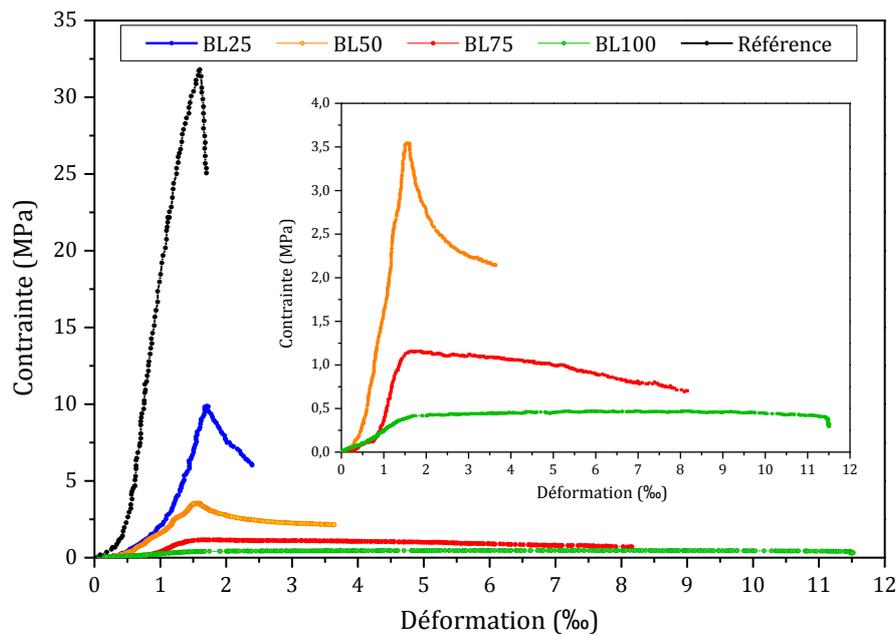


Figure 4.25. Courbes de capacité des bétons de liège mâle.

Les modules d'élasticité calculés comme étant la pente de la partie élastique comprise entre 15 et 50% de la contrainte maximale sont présentés sur la Fig. 4.26.

Les résultats ont révélé que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation progressive du pourcentage des granulats de liège mâle. Ce résultat est principalement lié à la grande porosité et à la capacité de déformation importante que possèdent les granulats de liège. A échelle plus fine, ceci est expliqué par la structure des murs des cellules de liège et leur composition chimique qui leur confère une élasticité importante grâce à la forte présence de subérine.

Les résultats indiquent que le module d'élasticité des bétons de liège mâle testés oscille entre 0,33 et 7,67 GPa pour des pourcentages de liège variant entre 25 et 100%.

La Fig. 4.26 montre l'existence d'une relation linéaire entre ces deux paramètres. La diminution enregistrée par rapport au béton de référence (34,72 GPa) est respectivement de 77,9, 91,6, 96,2 et 99% pour BL25, BL50, BL75 et BL100. Malgré ces réductions remarquables, le module d'élasticité (rigidité) des bétons de liège mâle développés dans notre étude restent nettement supérieurs à ceux trouvés dans la littérature pour d'autres bétons biosourcés à base de balle de riz et de chanvre (Chabannes et coll., 2014).

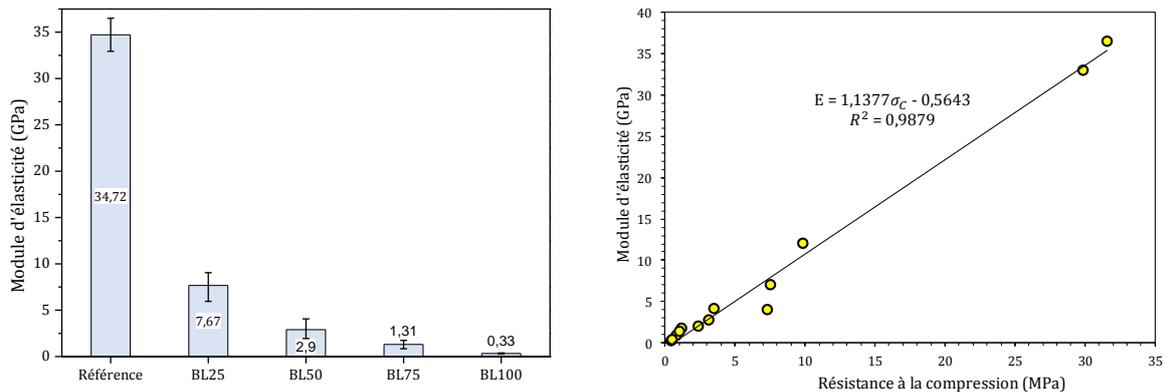


Figure 4.26. Module d'élasticité des bétons de liège mâle.

4.2.8.2. Résistance à la flexion

La variation de la résistance à la flexion avec le pourcentage de liège mâle est mise en évidence sur la Fig. 4.27. Cette variation suit la même tendance observée pour la variation de la résistance à la compression, c'est-à-dire une diminution exponentielle avec l'augmentation du pourcentage de liège mâle. La résistance à la flexion des bétons de liège mâle manufacturés est comprise entre 0,72 et 4,07 MPa. Il convient de noter que la substitution complète des granulats minéraux par des granulats de liège mâle a engendré une diminution maximale d'environ 90% au niveau de la résistance à la flexion.

Les résistances à la flexion obtenues sont proches de celles trouvées dans la littérature pour des mélanges à base de liège et qui varient entre 0,25 et 4,6 MPa selon le type (naturel ou expansé) et le pourcentage de liège utilisés (Boussetoua et coll., 2017; Ziregue et coll., 2016).

Les résultats obtenus pour les résistances à la flexion peuvent être en relation avec la microstructure des bétons préparés, en particulier l'ITZ entre le liège mâle et la matrice cimentaire. En effet, la multiplication des ITZ poreuses signifie une réduction de l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire qui est l'un des principaux paramètres gouvernant la résistance mécanique du béton.

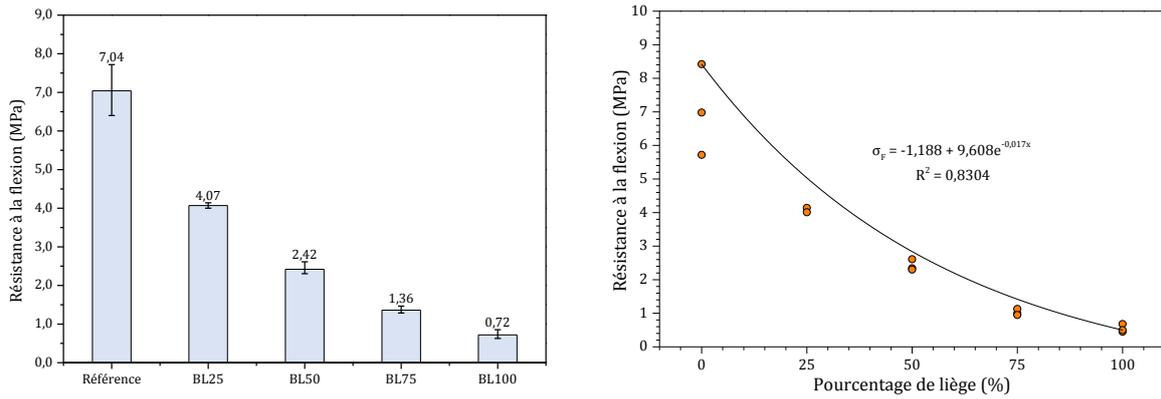


Figure 4.27. Résistance à la flexion des bétons de liège mâle.

4.2.8.3. Rapport des résistances à la compression sur la flexion

La Fig. 4.28 présente le rapport résistance à la compression / résistance à la flexion (appelée aussi ténacité) des mélanges développés en fonction du pourcentage de liège mâle.

Les résultats obtenus démontrent que la ténacité des bétons de liège diminue de façon quadratique avec l'augmentation de la quantité de liège mâle présente dans la masse du béton. Lorsque le pourcentage de liège est inférieur à 50%, la ténacité est restée toujours supérieure à 1,25. Cependant, elle atteint des valeurs de 0,75 et 0,67 quand la quantité de liège mâle est incorporé respectivement à 75 et 100%, c'est-à-dire lorsque la quantité de granulats de liège mâle est devenue supérieure à la quantité de granulats minéraux.

Ce résultat est une conséquence du fait que les granulats minéraux présentent de meilleures résistances à la compression que les résistances à la traction. Néanmoins, la résistance à la traction des granulats de liège mâle sont bien supérieures à leur résistance à la compression, c'est la raison pour laquelle l'augmentation du pourcentage de liège mâle signifie une diminution du ratio compression / flexion (Silva et coll., 2005).

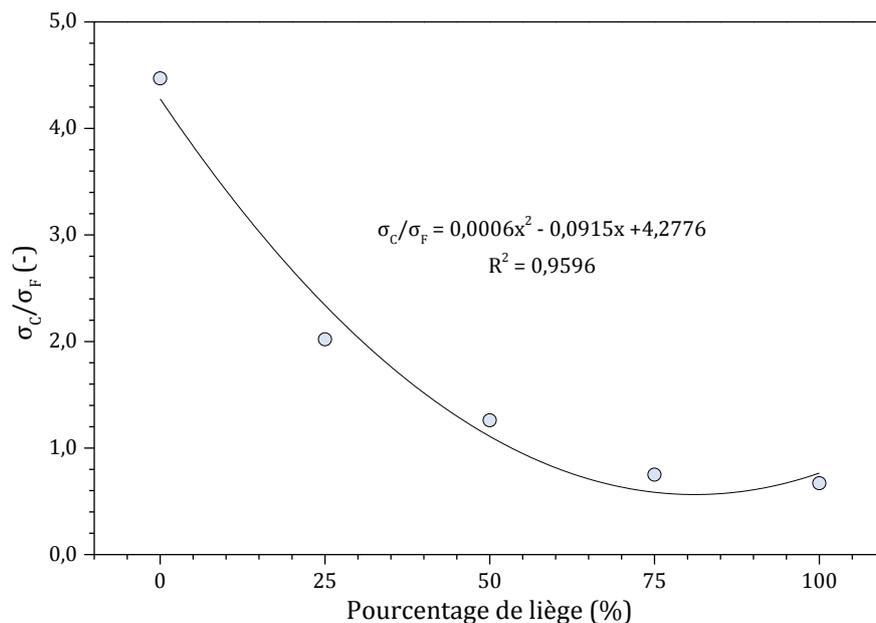


Figure 4.28. Rapport entre résistance à la compression et à la flexion des bétons de liège mâle.

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, l'effet du mode de malaxage ainsi que la performance thermomécanique des bétons de liège mâle ont été mis en évidence.

Les résultats obtenus montrent l'effet que présente la méthode de malaxage sur les propriétés du béton de liège à l'état frais et durci. Il est vrai qu'à l'état durci, seulement de petites différences ont été observées entre les différents modes de malaxage testés. Cependant, à l'état frais, l'homogénéité du béton de liège a révélé une forte dépendance au mode de malaxage utilisé. En résumé, à l'issue de la partie liée au malaxage, nous avons rendu compte que parmi les modes de malaxage testés, (i) l'utilisation d'un malaxeur à axe vertical, (ii) l'introduction des granulats de liège avant le sable et le ciment pour assurer un meilleur enrobage et (iii) le malaxage pendant 8 minutes constituent le mode de malaxage le plus adéquat.

Concernant l'effet du pourcentage de liège mâle, les résultats ont révélé que tout en gardant une bonne homogénéité, l'augmentation du taux de liège mâle a engendré une diminution au niveau de l'ouvrabilité et de la masse volumique du béton. Pour un remplacement maximal en liège mâle (100%) les bétons ont montré un aspect ferme avec un affaissement de 32 mm ainsi qu'une légèreté intéressante qui leur permet de flotter sur l'eau (une masse volumique de 720 kg/m^3). Ceci est synonyme d'une réduction importante de la pénibilité de travail pour des utilisations en tant que blocs de remplissage.

A la différence du béton ordinaire qui présente une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$, les bétons de liège mâle proposés ont montré des conductivités thermiques comprises entre $0,04$ et $1,43 \text{ W/(m.K)}$ en fonction du pourcentage de liège. Le BL25 a donné une conductivité qui le qualifie comme matériau de structure. En revanche les BL50, BL75 et BL100 remplissent les exigences minimales pour l'utilisation en tant que matériaux d'isolation. Bien que l'incorporation du liège mâle ait engendré une diminution importante des résistances mécaniques (pour un remplacement de 100%, le béton de liège a montré respectivement des résistances de $0,48$ et $0,72 \text{ MPa}$ pour la compression et la flexion), les bétons de liège proposés montrent des valeurs supérieures à celles recommandées pour l'utilisation des bétons biosourcés dans des applications de murs, toitures ou sols.

L'investigation réalisée sur la microstructure et quelques indicateurs de durabilité (porosité et absorption) a révélé que l'utilisation du liège mâle conduit à une augmentation de la porosité et de l'absorption des bétons, diminuant ainsi la durabilité des bétons. Pour des pourcentages allant de 25 à 100% de liège, la porosité des bétons variait entre $0,19$ et $0,86$ tandis que l'absorption primaire variait entre $9,3$ et $19,3 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$. De plus, l'ITZ entre la matrice et les granulats de liège mâle a montré un aspect poreux avec des pores dont l'épaisseur variait entre 90 et $150 \text{ }\mu\text{m}$.

Malgré la bonne performance thermomécanique des bétons de liège mâle proposés, l'étude réalisée dans cette partie reste incapable de fournir des informations sur le comportement hydrique ainsi que d'autres informations liées à la microstructure, telle que la distribution des pores des bétons de liège. En plus de l'aspect lié à la faible ITZ, face à l'absence d'une recommandation qui régit la préparation des bétons de liège, l'utilisation des granulats de liège dans leur état sec et sans prise en compte de leur absorption a causé une remarquable diminution de la maniabilité des bétons, une difficulté de mise en œuvre ainsi que de nombreuses conséquences sur la microstructure des bétons préparés. De ce fait, visant une meilleure compréhension du comportement des bétons de liège et une optimisation de ses performances, le prochain chapitre traite

Chapitre 4 Optimisation du mode de malaxage et performance du béton de liège mâle

de l'effet de la prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège lors de la préparation des bétons.

Chapitre 5

Effet de la prise en compte de l'absorption en eau du liège pendant le malaxage

Introduction

Le travail bibliographique réalisé notamment dans le deuxième chapitre a permis de souligner la controverse qui existe vis-à-vis de la prise en compte ou non de l'absorption en eau des granulats de liège lors de la préparation des composites cimentaires de liège. De plus, après avoir arrêté le mode de malaxage adéquat pour la préparation des bétons de liège, l'étude de l'effet du pourcentage de liège mâle présentée dans le chapitre précédent a souligné les différents problèmes rencontrés causés par la non prise en compte de l'absorption en eau du liège. Le présent chapitre présente les résultats de l'étude de l'effet de prise en compte de l'absorption en eau du liège sur les performances du béton de liège mâle. Gardant en tête le grand impact du pourcentage de liège, trois niveaux d'absorption en eau sont préconisés en faisant une variation du pourcentage des granulats de liège. Après une évaluation de la qualité à l'état frais, nous présentons les résultats des propriétés microstructurales et thermo-hydro-mécaniques des bétons de liège étudiés.

5.1. Rappel de la démarche adoptée et des bétons préparés

Pour l'étude de l'effet de prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège lors de la préparation des bétons de liège, des bétons ont été préparés en utilisant des granulats de liège mâle secs (ayant pour origine la forêt d'Ahfir) auxquels trois différentes quantités d'eau correspondantes à trois différents niveaux d'absorption sont ajoutées au moment du malaxage. Tout en s'inspirant de nos premiers travaux présentés dans le chapitre précédent, le premier niveau d'absorption correspond à la non prise en compte de l'absorption du liège, c'est-à-dire qu'aucune quantité d'eau n'est ajoutée aux granulats de liège secs lors de la préparation des bétons, cet état est désigné par E0. Rappelant qu'un temps de deux heures correspondant au début de la phase d'absorption lente des granulats de liège, le deuxième type de bétons est préparé en ajoutant aux granulats de liège secs, la quantité de l'eau qui correspond à 2 heures de leur absorption en eau, au moment du malaxage (E2H). Le troisième type de bétons est un béton préparé en ajoutant aux granulats de liège secs, la quantité d'eau qui correspond à leur saturation. Ce dernier choix est alimenté d'une part, par les travaux réalisés par Karade (Karade, 2016) et d'autre part par le fait que la saturation préalable des granulats de liège risque de modifier leur composition chimique avant leur introduction dans le béton.

Connaissant maintenant l'effet considérable de la variation du pourcentage de liège, l'étude de l'effet de prise en compte de l'absorption en eau a été faite en utilisant pour chaque niveau d'absorption, trois différents pourcentages volumiques de liège, à savoir 25, 50 et 75%.

Notons que la composition des neuf (09) bétons de liège utilisés dans cette partie de l'étude est donnée dans le chapitre 3 (section 3.3.2), la désignation de ces bétons indique le pourcentage ainsi que le niveau d'absorption considéré. Par exemple, le béton labellisé BL25E0 désigne un béton qui contient 25% de liège_Ahfir (en volume total de granulats) et néglige l'absorption de ce liège.

5.2. Ouvrabilité

La Fig. 5.1 fournit des données sur l'affaissement des différents bétons de liège produits. Au regard de cette figure, on peut observer que les valeurs d'affaissement sont remarquablement affectées par le niveau considéré d'absorption du liège. A pourcentage de liège égal, les résultats ont révélé qu'un niveau d'absorption croissant entraîne une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Cependant, en fonction du pourcentage de liège dans le béton, les différences maximales entre les affaissements de bétons contenant un pourcentage similaire de liège varient entre 53 et 88%.

À propos de la relation entre l'effet de la prise en compte de l'absorption de liège et le pourcentage de ce dernier, il a été constaté que contrairement aux bétons étiquetés E0 et ESAT qui ont montré des changements remarquables dans leur affaissement avec la variation du pourcentage de liège, les bétons labellisés E2H ont présenté des affaissements presque similaires, quel que soit le pourcentage de liège.

Une explication probable des résultats obtenus dans le cas des mélanges E0 peut être la forte absorption du liège. En effet, cela conduit à une compétition entre les granulats de liège et l'eau destinée à l'ouvrabilité du béton, ce qui se traduit donc par une diminution au niveau de l'affaissement du béton avec l'augmentation progressive de la quantité de liège.

Les résultats obtenus pour les bétons E2H semblent indiquer que l'ajout d'eau correspondante à 2 heures d'absorption de liège assure une absorption de liège dans le

béton sans nuire à l'eau responsable de son ouvrabilité. Ceci engendre par conséquent des affaissements presque similaires pour les différents pourcentages de liège.

Dans le cas des bétons labellisés ESAT, l'affaissement maximal (184 mm) est obtenu pour un béton contenant 50% de liège. Ces résultats peuvent être fortement attribués à l'excès d'eau remarqué dans le cas des bétons incorporant un pourcentage de liège élevé. Ceci a entraîné de nombreuses difficultés au moment de la réalisation de l'essai d'affaissement pour les bétons BL50ESAT et BL75ESAT à cause des phénomènes d'instabilité enregistrés. En outre, les résultats obtenus sur l'affaissement indiquent que les bétons préparés couvrent différentes classes de consistance. Par exemple, à 50% de liège, on peut noter que le BL50E0 appartient à la classe des bétons fermes. Néanmoins, BL50E2H et BL50ESAT appartiennent, respectivement, aux bétons plastiques et fluides. Constatant que tous les bétons E2H présentent une bonne homogénéité à l'état frais, un niveau d'absorption correspondant à 2 heures apparaît comme le niveau le plus adéquat pour la préparation des bétons de liège.

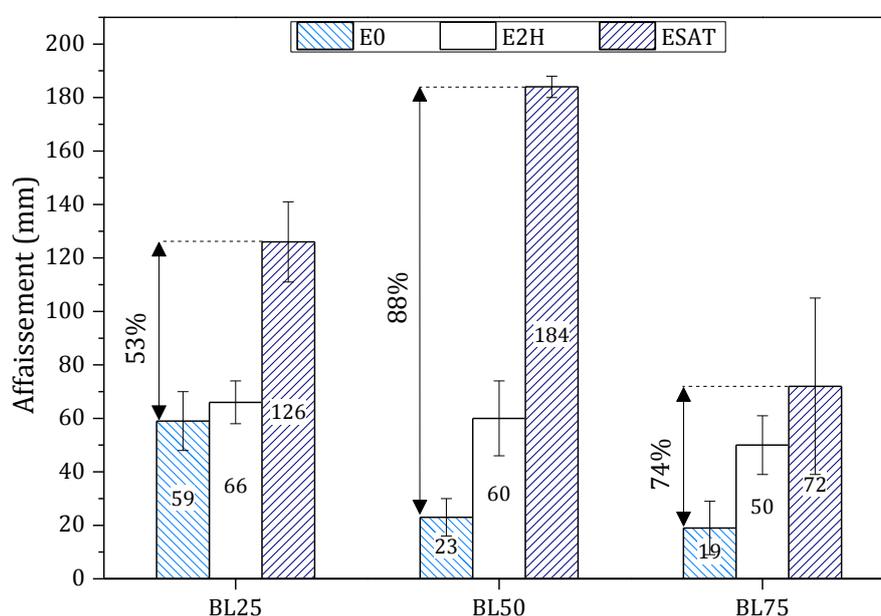


Figure 5.1. Affaissement des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré.

5.3. Masse volumique

Les Figs. 5.2-3 présentent les résultats de la masse volumique des bétons de liège étudiés à l'âge de 28 jours. Comme on peut le voir, les données présentées dans cet histogramme indiquent que tous les bétons de liège étudiés ont montré une masse volumique inférieure à 2000 kg/m³ et appartiennent donc à la classe des bétons légers (Chabannes et coll., 2014; Prusty et Patro, 2015).

En bon accord avec ceux trouvés par Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016) qui ont trouvé que la masse volumique des bétons de liège expansé est linéairement liée au pourcentage de liège, les résultats présentés ici ont aussi révélé qu'avec une augmentation successive de la quantité de liège, une diminution linéaire a été enregistrée au niveau de la masse volumique des bétons de liège (Fig. 5.2).

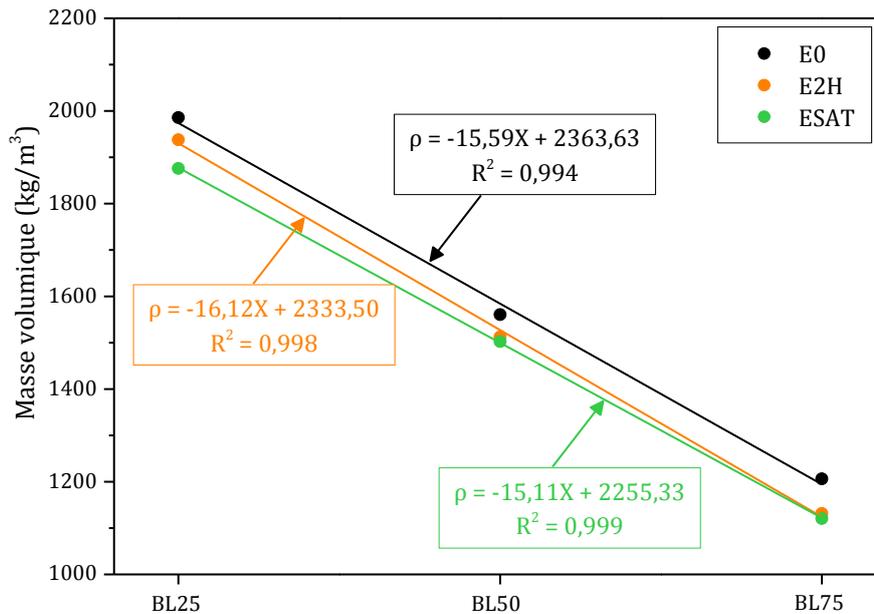


Figure 5.2. Relation entre la masse volumique et le pourcentage de liège dans le béton.

Concernant l'effet de la prise en compte de l'absorption en eau du liège, les résultats de la masse volumique signalent la présence de légères différences entre les bétons dont les niveaux d'absorption considérés sont différents. Alors que les masses volumiques les plus faibles ont été obtenues pour les bétons ESAT, les masses volumiques maximales ont été enregistrées pour les bétons négligeant l'absorption de liège, c'est-à-dire les bétons E0. L'ajout d'eau correspondante à la saturation de liège a en effet engendré des chutes maximales variant entre 3,7% et 7,1%. De manière similaire, lors de la considération d'un niveau correspondant à 2 heures d'absorption, les différences sont devenues respectivement : 2,4, 3,1 et 6,2% pour les BL25, BL50 et BL75 (Fig. 5.3).

Il semble possible que les résultats obtenus soient associés partiellement à la nature poreuse des granulats de liège qui engendre une augmentation de la quantité d'air dans le béton avec l'augmentation de leur pourcentage (comme expliqué pour les résultats du chapitre 4).

Quant à la légère différence due à la prise en compte de l'absorption en eau du liège, elle peut être expliquée par la différence qui existe en terme de dispersion des granulats de liège dans la matrice cimentaire, cela provoque une différence au niveau du volume et de la répartition des pores dans le béton, conduisant ainsi à une différence de masse volumique des bétons de liège.

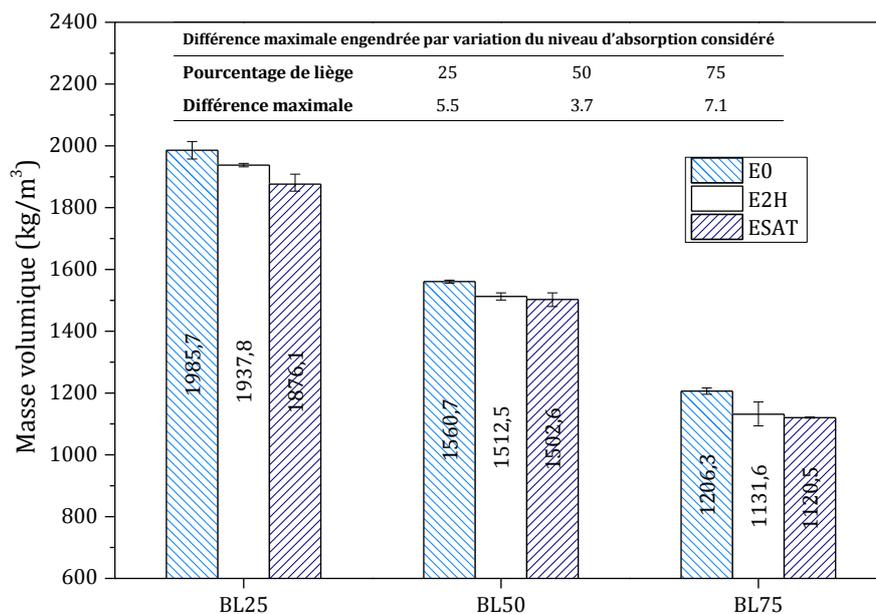


Figure 5.3. Masse volumique des bétons de liège étudiés.

5.4. Microstructure

5.4.1. Microscopie électronique à balayage

Dans cette investigation microstructurale, l'effet de la prise en compte de l'absorption en eau du liège a été évalué à travers : (i) la qualité de la matrice cimentaire, (ii) la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le liège et la matrice cimentaire et (iii) la qualité des agrégats de liège.

Soulignant que les BL25, BL50 et BL75 ont montré un comportement similaire vis-à-vis du niveau d'absorption considéré, les résultats mis en évidence ici se sont limités à la présentation des micrographies de MEBE (Microscopie Electronique à Balayage en mode Environnemental) des BL50 contenant 50% de liège. Par conséquent, les Figs. 5.4-6 illustrent les résultats de l'investigation MEBE menée sur les bétons BL50E0, BL50E2H et BL50ESAT.

Pour le béton préparé en négligeant l'absorption (BL50E0), la matrice a montré un aspect généralement dense avec la présence de quelques fissures à côté de l'ITZ liège-matrice (Fig. 5.4-a,e). Cette matrice a montré également l'existence de petites quantités de pores d'environ 110 μm de diamètre. L'ITZ du béton BL50E0, bien qu'elle présente un aspect dense dans certaines localités, l'adhérence entre les particules de liège et la matrice cimentaire reste de mauvaise qualité dans la majorité des endroits observés (Fig. 5.4-a,b,c,f). Ainsi, deux types d'ITZ ont été identifiées, à savoir : des ITZ denses et des ITZ poreuses présentant une couche de séparation d'une épaisseur qui varie entre 36 et 125 μm . Quant aux produits d'hydratation développés à proximité de l'ITZ, en fonction de la qualité de l'ITZ, différents produits ont été détectés : dans la région de l'ITZ dense, on remarque une claire dominance du gel CSH accompagnée d'une présence de vides (Fig. 5.4-g). Cependant, dans la région de l'ITZ poreuse, nous avons noté une forte présence de l'ettringite ainsi qu'une diminution de la quantité des CSH (Fig. 5.4-d). En ce qui concerne la qualité du liège dans le béton BL50E0, la Fig. 5.4-a,b,e montre qu'à l'exception de quelques fissures trouvées à proximité de l'ITZ poreuse, les particules

végétales de liège mâle n'ont montré pratiquement aucun endommagement à l'intérieur du béton.

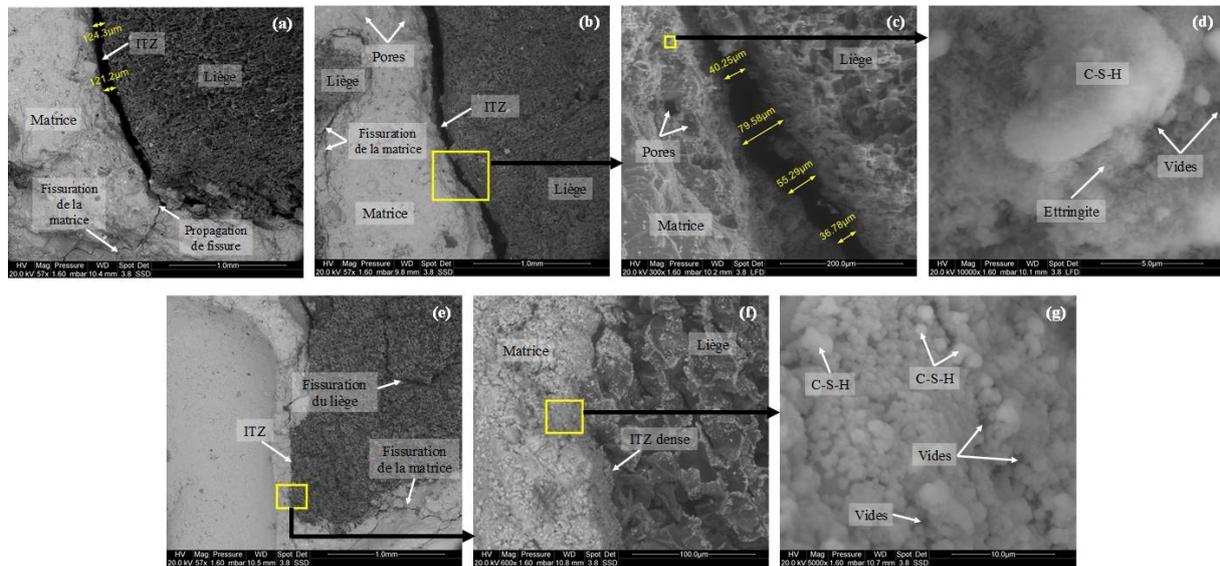


Figure 5.4. Images MEBE du BL50E0.

Si l'on se tourne maintenant vers les mélanges préparés en tenant compte de l'absorption du liège, à savoir BL50E2H et BL50ESAT, ces bétons ont indiqué une nette modification de la matrice, par rapport au BL50E0. Cette modification est illustrée par une augmentation de la quantité de pores dans la matrice des deux bétons. Le BL50E2H a développé une matrice poreuse présentant quelques fissures à proximité de l'ITZ (Fig. 5.5-a,b), tandis que le BL50ESAT a présenté une matrice complètement fissurée (Fig. 5.6-a,b,d). Concernant la taille des pores, une augmentation significative a été enregistrée avec l'augmentation du niveau d'absorption considéré. A cet égard, le BL50E2H et BL50ESAT ont développé respectivement des pores avec des diamètres allant de 189 à 496 µm (Fig. 5.5-a, c) et de 232 à 466 µm (Fig. 5.6-a).

Une remarque importante qui ressort de la Fig. 5.5 est le colmatage de l'ITZ observé pour une considération de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption (BL50E2H). En effet, le BL50E2H a présenté une bonne ITZ entre la matrice cimentaire et le liège et a développé en plus des grandes quantités de gel CSH et d'ettringite, peu de vides séparant les produits d'hydratation (Fig. 5.5-c,f). L'un des résultats surprenants est que la prise en compte de l'eau de saturation a engendré une ITZ médiocre ayant une épaisseur comprise entre 86 et 116 µm (Fig. 5.6-a,b,d). Des observations plus approfondies menées dans cette ITZ ont révélé une forte présence d'ettringite et de portlandite (CH) (Fig. 5.6-c). De plus, alors que la quantité de CSH était remarquable dans le cas de BL50E0 et BL50E2H, la diminution de la quantité de CSH dans la région ITZ était clairement perceptible pour le béton BL50ESAT, ceci est synonyme d'une inhibition de l'hydratation du ciment.

A propos de l'interprétation de ces résultats, plusieurs facteurs peuvent expliquer les observations notées : (i) D'abord, étant connu par sa sensibilité à l'eau, le liège présente une possibilité de variation volumique en fonction de la quantité d'eau absorbée lors de la phase d'absorption. Plus la quantité d'eau absorbée est importante, plus les variations volumiques sont importantes aussi. Par conséquent, le départ de l'eau absorbée après

séchage du béton induit un rétrécissement du liège, causant ainsi une décohésion entre ce dernier et la matrice cimentaire, (ii) De plus, même si la prise en compte de l'absorption de liège permet de fournir suffisamment d'eau pour une meilleure hydratation du ciment, la libération de composés chimiques de liège en raison de son relargage est connue pour gêner le processus d'hydratation du ciment (Brás et coll., 2013; Panesar et Shindman, 2012). Il est important de noter que la quantité de composés chimiques libérés s'aggrave avec l'augmentation de la quantité d'eau absorbée.

Cela permet de comprendre pourquoi le BL50ESAT illustre moins de produits d'hydratation ainsi qu'une ITZ médiocre. Prises ensemble, les analyses MEBE semblent indiquer que la prise en compte de l'absorption en eau du liège a généré une modification de la microstructure du béton, c'est une découverte clé pour l'explication des propriétés hygrothermiques et mécaniques qui seront présentées dans les prochaines sections.

Au départ, nous pensions que la prise en compte de l'absorption en eau du liège ne va pas impacter la qualité des granulats de liège dans le béton. Cependant, à partir de cette investigation, nous nous sommes rendu compte qu'elle a généré une transformation significative au niveau de leur morphologie.

L'impact de la prise en compte de l'absorption dans le cas des bétons E2H était généralement négligeable et il s'est traduit par la formation de microfissures dans les granulats de liège. Néanmoins, la considération d'un niveau d'absorption correspondant à la saturation de liège a généré un liège fortement endommagé et présentant des phénomènes de migration de la matrice cimentaire. En effet, cette migration de matrice cimentaire vers les pores de liège (appelée généralement minéralisation du végétal (Delannoy, 2019; Nozahic, 2012) implique une rigidification d'une partie du liège, facilitant donc sa rupture et réduit ainsi ses propriétés mécaniques. Dans le cas du BL50ESAT par exemple, ce phénomène a causé l'apparition de fissures de 214 à 306 μm d'épaisseur au niveau du granulat de liège, ce qui risque de réduire la performance mécanique des bétons développant ces phénomènes (Fig. 5.6-a, e).

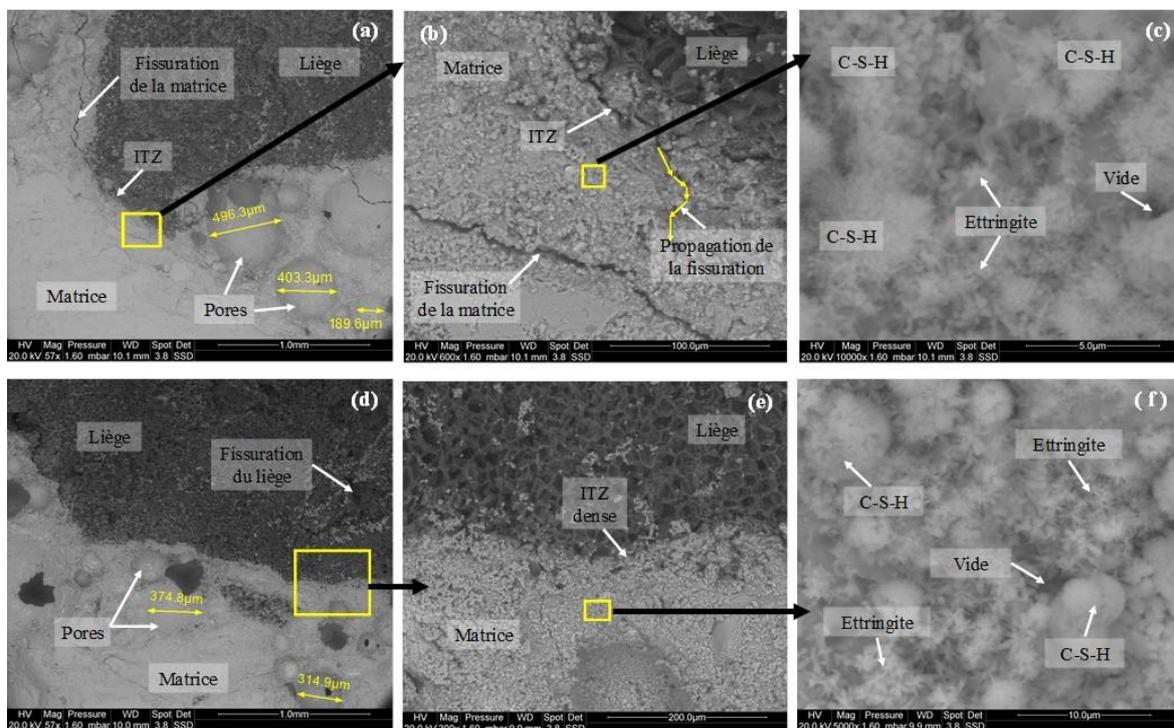


Figure 5.5. Images MEBE du BL50E2H.

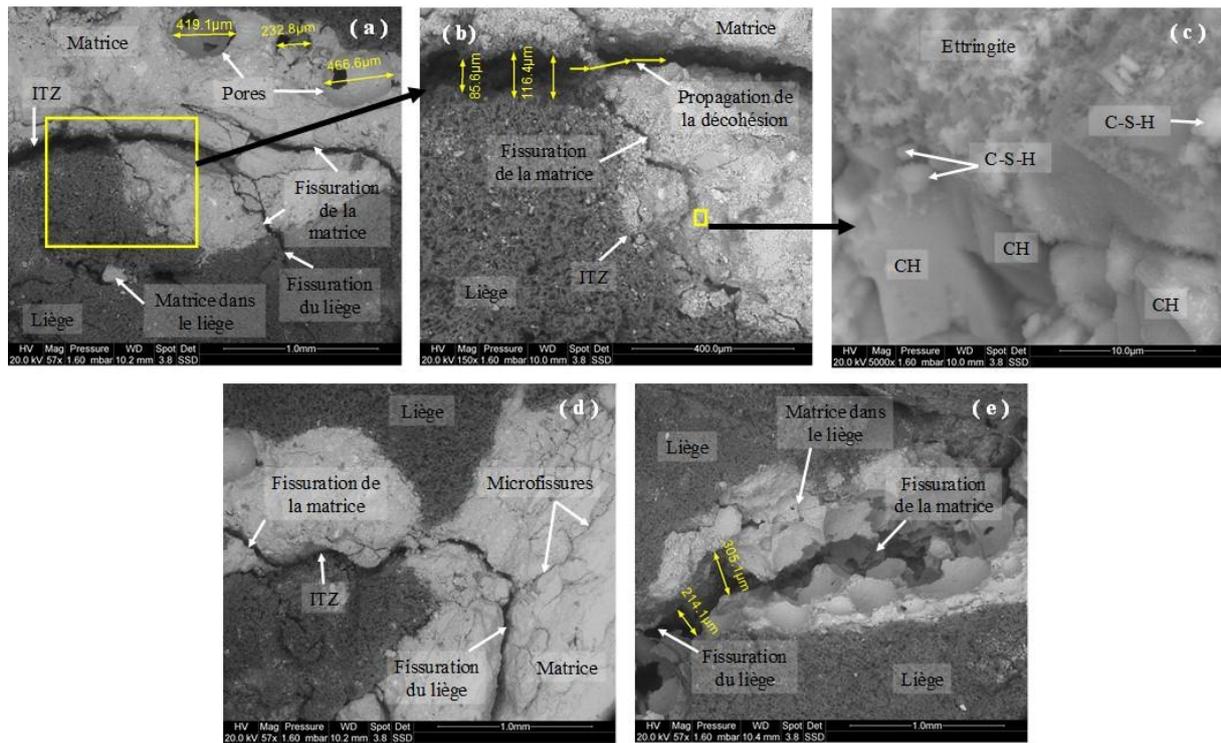


Figure 5.6. Images MEBE du BL50ESAT.

Avant de clore la discussion sur la microstructure des bétons de liège, il est utile de se pencher sur l'impact du pourcentage de liège sur le développement de l'ITZ entre le granulat de liège et la matrice cimentaire.

De la Fig. 5.7, il ressort qu'avec une augmentation successive du pourcentage de liège, la couche séparant le liège de la matrice s'est déplacée vers une épaisseur supérieure. Dans le cas du BL25ESAT, l'épaisseur de cette couche varie seulement entre 15 et 17 µm. Néanmoins, elle varie respectivement entre 86 à 116 µm et 68 à 130 µm pour le BL50ESAT et BL75ESAT.

Une explication possible de ces résultats peut être le fait que l'augmentation du pourcentage de liège amplifie la quantité des composés chimiques libérés par le liège dans le béton, inhibant d'une part le colmatage de l'ITZ matrice-liège et augmentant d'autre part l'épaisseur de cette couche séparatrice.

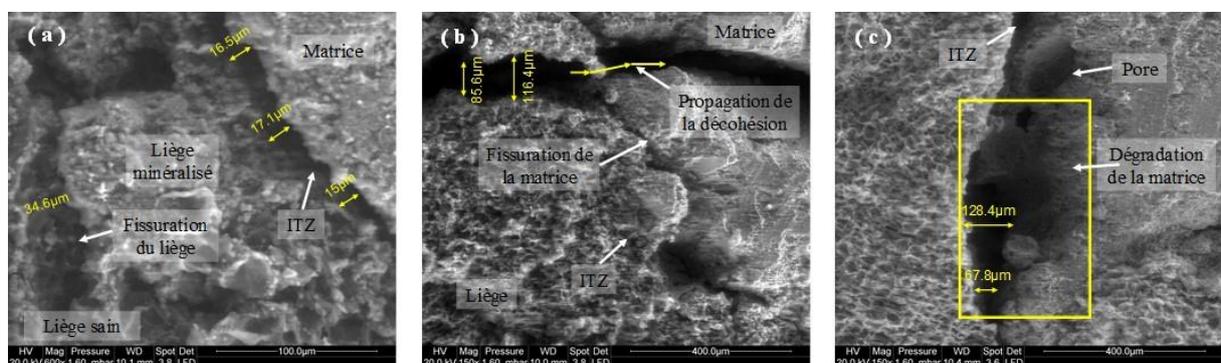


Figure 5.7. Effet du pourcentage de liège sur la microstructure du béton. (a) BL25ESAT, (b) B50ESAT et (c) BL75ESAT.

5.4.2. Distribution de la taille des pores

La Fig. 5.8 met en avant la distribution de la taille des pores pour les neuf bétons étudiés. Les résultats obtenus indiquent que l'augmentation du niveau d'absorption considéré est généralement associée à une modification de la distribution de la taille des pores. En outre, ces résultats montrent que l'effet de prise en considération de l'absorption dépend directement du pourcentage des granulats de liège incorporés dans le béton.

Pour les bétons contenant 25% de liège (BL25), la distribution de la taille des pores présente une forme bimodale (Fig. 5.8.a). Les premiers pics sont observés dans la gamme allant de 50 à 70 nm, tandis que les seconds sont plutôt situés entre 500 et 700 nm. Pour ce pourcentage de liège (25%), on peut remarquer que les bétons BL25E2H et BL25ESAT présentent des distributions de la taille des pores presque identiques dans des gammes de pores situées entre 3 à 100 nm et supérieures à 2 μm . Cependant, pour des diamètres de pores oscillant entre 0,1 et 1,5 μm , le BL25E2H est resté souvent au-dessus de BL25ESAT, cela signifie que BL25E2H contient plus de porosité ouverte dans la gamme de micropores et mésopores attribuées principalement à la microstructure des granulats de liège (Bourdote et coll., 2017; Lagouin et coll., 2019).

Comparé aux bétons qui prennent en considération l'absorption du liège (BL25E2H et BL25ESAT), le BL25E0 a montré l'existence de pores dont le diamètre est supérieur à 150 μm . Ces pores, selon Bourdote et coll. (Bourdote et coll., 2017) sont classifiés dans la gamme des macropores (> 150 μm) qui sont attribués généralement à l'arrangement des granulats végétaux dans la matrice cimentaire. Ceci souligne l'impact que présente la prise en compte de l'absorption en eau sur la dispersion des granulats de liège dans le béton.

Par rapport à ce qui a été trouvé pour les mélanges BL25, les essais de Porosité par Intrusion de Mercure (PIM) des bétons incorporant 50 et 75% de liège ont indiqué des changements significatifs en terme de forme des courbes de distribution porale. En effet, les BL50 ont montré des courbes monomodales, tandis que les BL75 ont révélé, en fonction de l'eau d'absorption ajoutée, des courbes monomodales et bimodales. Que ce soit pour les BL50 ou les BL75, la considération de l'eau qui correspond à la saturation du liège a engendré une augmentation importante du volume de micropores et mésopores situés entre 0,2 et 2 μm .

À 50% de liège, comparés au BL50E0, les bétons BL50E2H et BL50ESAT ont indiqué l'absence de la plage des micropores inférieurs à 50 nm, cependant, ils ont mis en évidence la naissance de la plage de macropores qui est absente dans le cas du BL50E0. En terme de diamètre de pore critique, aucune différence significative n'a été trouvée entre les différents mélanges BL50 puisque tous les maxima ont été trouvés dans la plage allant de 500 à 700 nm (Fig. 5.8-b).

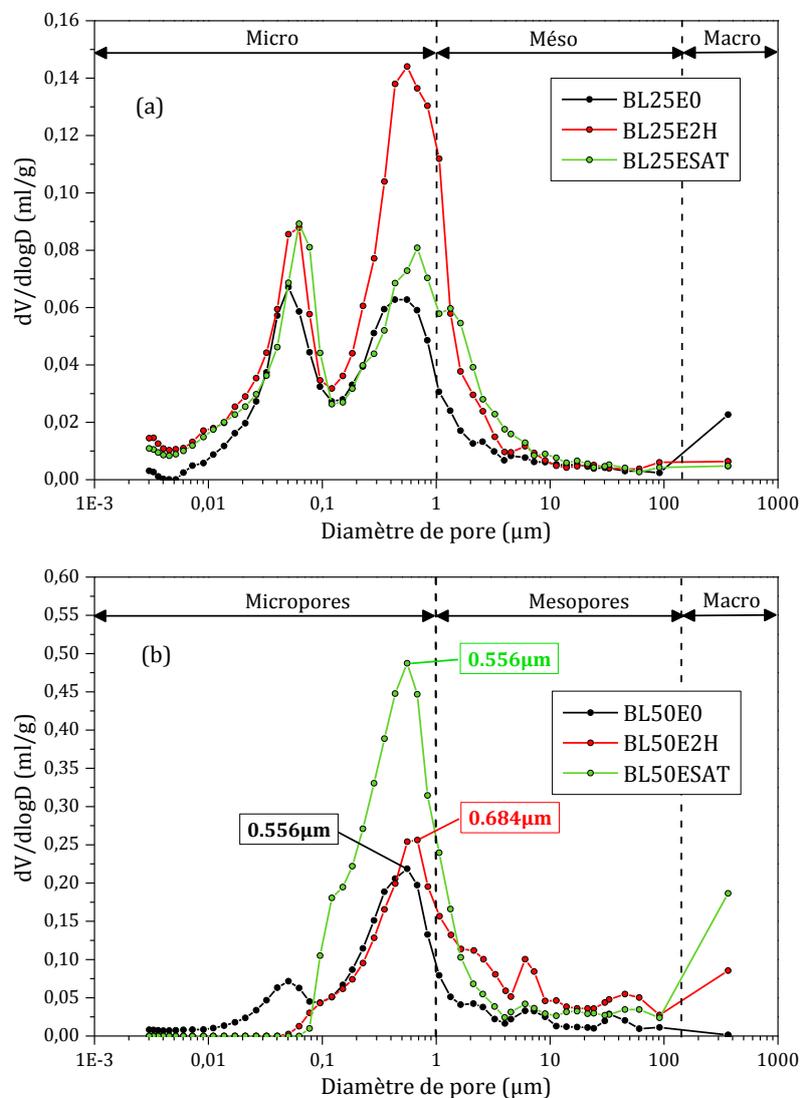
A 75% de liège, il est intéressant de souligner que la prise en compte de l'absorption de liège a entraîné d'une part, l'élimination des micropores inférieurs à 0,1 μm et d'autre part la création d'une nouvelle gamme de mésopores supérieurs à 3 μm (Fig. 5.8-c).

Les courbes des bétons BL75E0 et BL75E2H montrent une distribution bimodale. Pour le BL75E0, les deux pics appartiennent à la classe des micropores (40 et 433 nm). Cependant, dans le cas du BL75E2H, le premier pic appartient à la classe des micropores (682 nm) tandis que le deuxième se situe dans la gamme des mésopores (30 μm). Contrairement à ce qui a été trouvé pour les deux bétons précédents, le mélange désigné BL75ESAT a présenté une courbe monomodale avec un pic correspondant à 556 nm de diamètre et appartenant ainsi à la classe des micropores.

En général, les résultats obtenus sur la distribution porale pourraient être justifiés par la modification de la microstructure de liège à cause de l'absorption/relargage. En effet, puisque de la composition chimique est l'élément responsable de la microstructure de liège, la modification de cette microstructure varie en fonction du niveau d'absorption considéré qui influe directement sur la composition chimique.

En plus de la microstructure du liège qui régit à la fois la microporosité et la mésoporosité, la dispersion des granulats de liège dans la matrice cimentaire ainsi que la qualité des ITZ constituent des paramètres qui jouent un rôle important dans la définition de la macroporosité des bétons ; ceci justifie les divergences trouvées au niveau de la quantité de pores ayant des diamètres supérieurs à 150 μm .

Les évidences rapportées dans cette section suggèrent que la prise en compte de l'absorption en eau du liège joue un rôle important dans le développement du réseau poral des bétons de liège et par conséquent les propriétés de transport. C'est la raison pour laquelle, une évaluation exhaustive des propriétés hygrothermiques des bétons préparés sera faite dans la suite du chapitre.



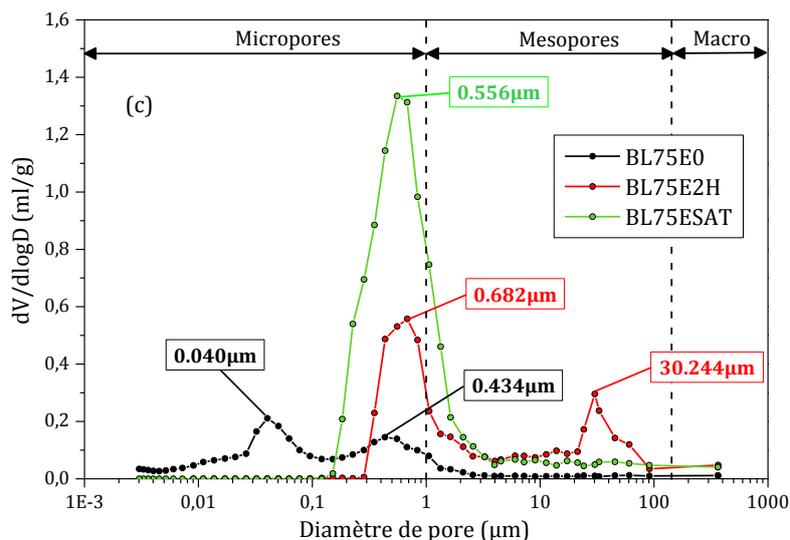


Figure 5.8. Distribution porale des différents bétons de liège. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.

5.4.3. Volume cumulatif de mercure

Les courbes de volume cumulatif de mercure des pores en fonction du diamètre des pores sont illustrées sur la Fig. 5.9.

Les courbes de tous les mélanges présentent des formes similaires commençant par une petite augmentation du volume cumulatif avec la diminution du diamètre des pores jusqu'à atteindre un diamètre de pore seuil, où les courbes exposent une augmentation remarquable de leurs pentes. Après cette augmentation, les courbes maintiennent une valeur quasi constante du volume cumulatif, indiquant l'atteinte d'un état d'équilibre en raison du remplissage de la majorité des pores.

L'abscisse de l'intersection entre la pente initiale et secondaire définit le diamètre de pore accessible, qui signifie le pore permettant la pénétration de gaz et de liquides dans le béton. Le diamètre de pore accessible a été calculé pour tous les bétons étudiés et les résultats ont indiqué que la prise en compte de l'absorption conduit à une augmentation de ce dernier. A ce stade, il est utile de mentionner l'absence de différences significatives entre le diamètre de pore accessible des bétons E2H et ESAT incorporant des pourcentages similaires de liège. De plus, la variation du pourcentage de liège n'a engendré aucun changement significatif sur les valeurs de pores accessibles, cela signifie que le diamètre de pore accessible dépend seulement de la microstructure du liège et non pas de son pourcentage.

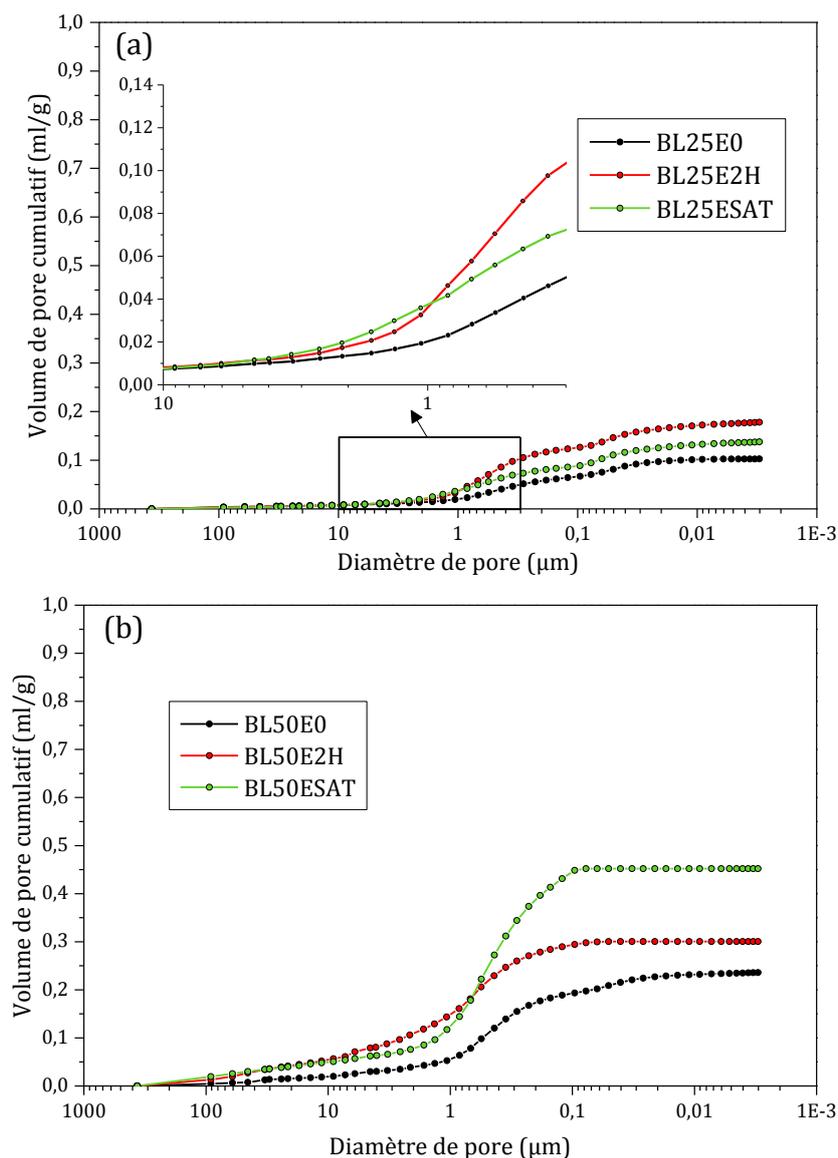
En ce qui concerne le volume de mercure introduit, il est évident d'observer qu'à l'exception des bétons BL25 qui ont manifesté une valeur maximale pour BL25E2H, les plus grands volumes ont été obtenus pour les bétons étiquetés ESAT.

Pour un pourcentage donné de liège, le volume de mercure introduit change sensiblement avec le niveau d'absorption considéré. Par exemple, la comparaison entre les volumes introduits dans le cas des BL50 (Fig. 5.9-b) révèle que pour une négligence de l'absorption de liège (BL50E0), le volume de mercure introduit est d'environ 0,23 ml/g. Cependant, l'addition d'eau correspondante à 2 heures d'absorption (BL50E2H) et à la saturation (BL50ESAT) a donné respectivement des valeurs de 0,3 et 0,46 ml/g.

Les résultats sur les courbes cumulatives indiquent que pour un même niveau d'absorption, l'augmentation du pourcentage de liège provoque une augmentation

substantielle du volume de mercure introduit, en particulier dans le cas des bétons désignés E2H et ESAT.

L'une des raisons probables des résultats obtenus sur le volume cumulé de mercure peut être les changements dans la microstructure de liège ainsi que sa dispersion dans la matrice cimentaire avec le changement du niveau d'absorption considéré. En effet, la considération de l'eau qui correspond à la saturation du liège était à l'origine de phénomènes d'instabilité ainsi que de nombreuses difficultés de mise en œuvre dans le cas des BL50ESAT et BL75ESAT. De plus, connaissant la nature poreuse du liège, il paraît évident que l'augmentation de son pourcentage dans le béton induit une augmentation du volume de mercure introduit.



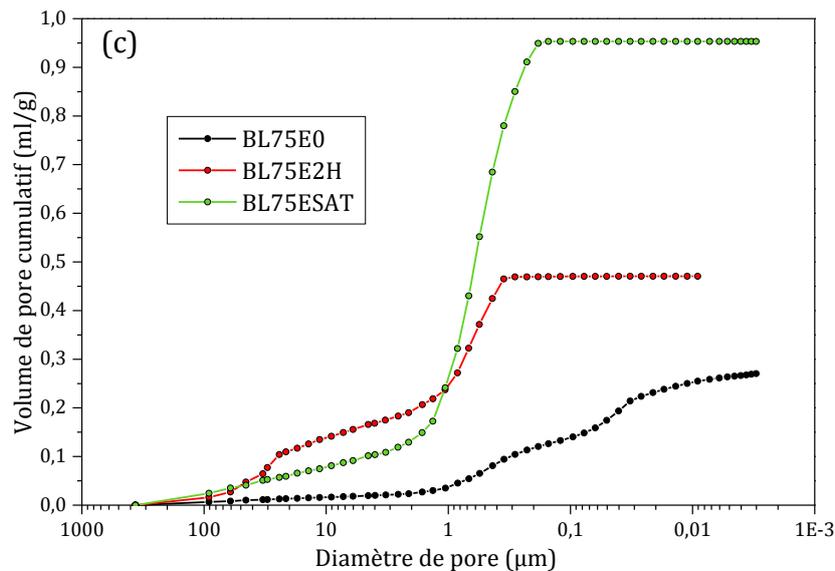


Figure 5.9. Volume de pore cumulé des bétons de liège étudiés. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.

5.4.4. Porosité totale au mercure

Les résultats obtenus sur la porosité totale au mercure des bétons de liège sont présentés sur la Fig. 5.10.

A partir de cet histogramme, on peut clairement remarquer que la prise en compte de l'absorption de liège présente un impact significatif sur la porosité totale des bétons contenant des granulats de liège. La porosité des mélanges préparés varie entre 20 et 51%. Par exemple, dans le cas des BL25, cette porosité a montré une valeur d'environ 20,5% pour BL25E0. Cependant, elle a révélé respectivement une valeur de 30,9 et 26,3% pour BL25E2H et BL25ESAT.

A pourcentage de liège égal, à l'exception des bétons incorporant 25% de liège, les porosités maximales sont obtenues pour les bétons considérant l'eau correspondante à la saturation des granulats de liège (ESAT). Ce verdict semble indiquer que l'impact de la considération de l'eau d'absorption de liège dépend relativement du pourcentage de liège incorporé.

Concernant l'influence du pourcentage de liège sur la porosité du béton, les données présentées confirment que l'augmentation de la quantité de liège est toujours associée à une augmentation de la porosité du béton. Par exemple, la porosité du BL25ESAT qui contient 25% de granulats de liège est de 26,3%. Néanmoins, elle est de 51,4% dans le cas du B75ESAT contenant 75% de liège. Ces résultats soutiennent largement ceux obtenus dans le chapitre précédent sur la porosité accessible à l'eau ainsi que ceux obtenus dans une étude réalisée par Ziregue et coll. (Ziregue et coll., 2016), qui ont trouvé une forte corrélation entre la porosité ouverte et le pourcentage de liège.

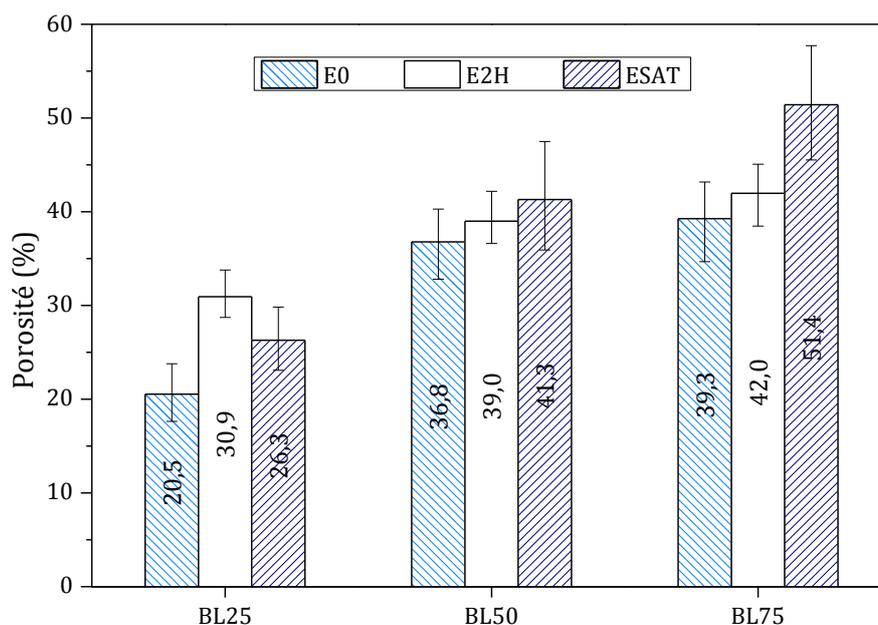


Figure 5.10. Porosité totale des bétons de liège étudiés.

5.5. Propriétés hydriques

5.5.1. Isothermes de sorption

5.5.1.1. Résultats expérimentaux

La Fig. 5.11 présente les isothermes d'adsorption/désorption des différents bétons de liège étudiés. Ces résultats montrent que tous les bétons présentent une relation non linéaire entre la teneur en eau massique et l'humidité relative de l'air. Il est important de noter que toutes les courbes obtenues présentent une boucle d'hystérésis pendant la phase de désorption. L'épaisseur de cette boucle varie avec le niveau d'absorption considéré ainsi que le pourcentage de liège. Dans la littérature, ce phénomène d'hystérésis est associé en partie au phénomène dit « bouteille d'encre » qui se manifeste suite à une mauvaise évacuation de l'eau piégée dans les pores de grande taille en raison d'une non-atteinte de la pression nécessaire pour l'évacuation des petits pores (Bennai, 2018; Maaroufi, 2019). Un autre paramètre qui mérite d'être souligné est l'angle de contact de l'eau avec le pore, qui varie en fonction de la direction du ménisque, créant ainsi une différence entre la quantité d'eau adsorbée et celle évacuée.

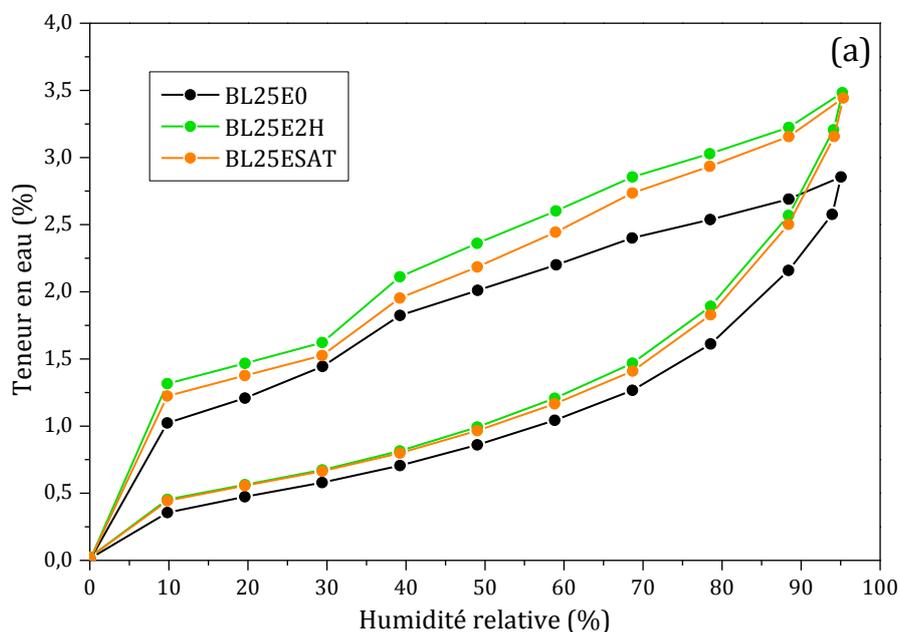
A propos des différences enregistrées entre les épaisseurs des boucles d'hystérésis, elles peuvent être probablement liées à la morphologie complexe des granulats de liège, qui change en fonction du niveau d'absorption considéré. Une autre interprétation possible peut être dictée par les différences enregistrées entre les distributions porales des bétons produits (Fig. 5.8). En effet, une observation attentive des résultats des isothermes a mis en évidence que la taille de la boucle d'hystérésis est liée fortement à la quantité des micropores et mésopores présents dans le béton de manière que plus la quantité des pores appartenant à ces gammes augmente, la taille de la boucle augmente aussi. Ce constat, confirme la forte relation qui existe entre les résultats d'isothermes et les ceux de la PIM.

Dans l'ensemble, les isothermes des bétons de liège produits ont révélé des formes similaires et selon la classification IUPAC, ils appartiennent au type H4, le type fréquemment rencontré pour les bétons biosourcés (Sing et coll., 1984).

Afin d'évaluer l'effet de la prise en compte de l'absorption en eau du liège sur la variation de ces isothermes, une comparaison entre les bétons contenant un pourcentage similaire de liège tout en considérant des niveaux différents d'absorption de liège est présentée sur la Fig. 5.11-a-c.

D'après les données de ces courbes, on peut voir que la considération de l'eau correspondante à l'absorption du liège présente un impact significatif sur la valeur de la teneur en eau. Les résultats indiquent que pour une valeur d'humidité relative donnée, surtout dans les endroits de condensation capillaire (> 70% de HR), à mesure que le niveau d'absorption considéré augmente, la teneur en eau augmente aussi. Par exemple, dans le cas de mélanges contenant 50% de liège, à 95% d'humidité relative, BL50E0 a montré une teneur en eau de 3,5%. Cependant, BL50E2H et BL50ESAT ont atteint respectivement des teneurs en eau de 6,2% et 7,4%, soit une augmentation de 77% et 111% par rapport au BL50E0.

Les résultats obtenus peuvent être attribués à la distribution porale des bétons de liège et à la nature des pores qui constituent leur porosité. En effet, les résultats des isothermes sont en très grand accord avec la distribution porale des bétons dans une mesure où les valeurs des teneurs en eau, dans la zone de condensation capillaire, augmentent avec l'augmentation de la quantité des micropores et mésopores dans le béton (Fig. 5.8), gammes régissant la fixation de l'humidité dans cette zone de condensation capillaire (Sing et coll., 1984).



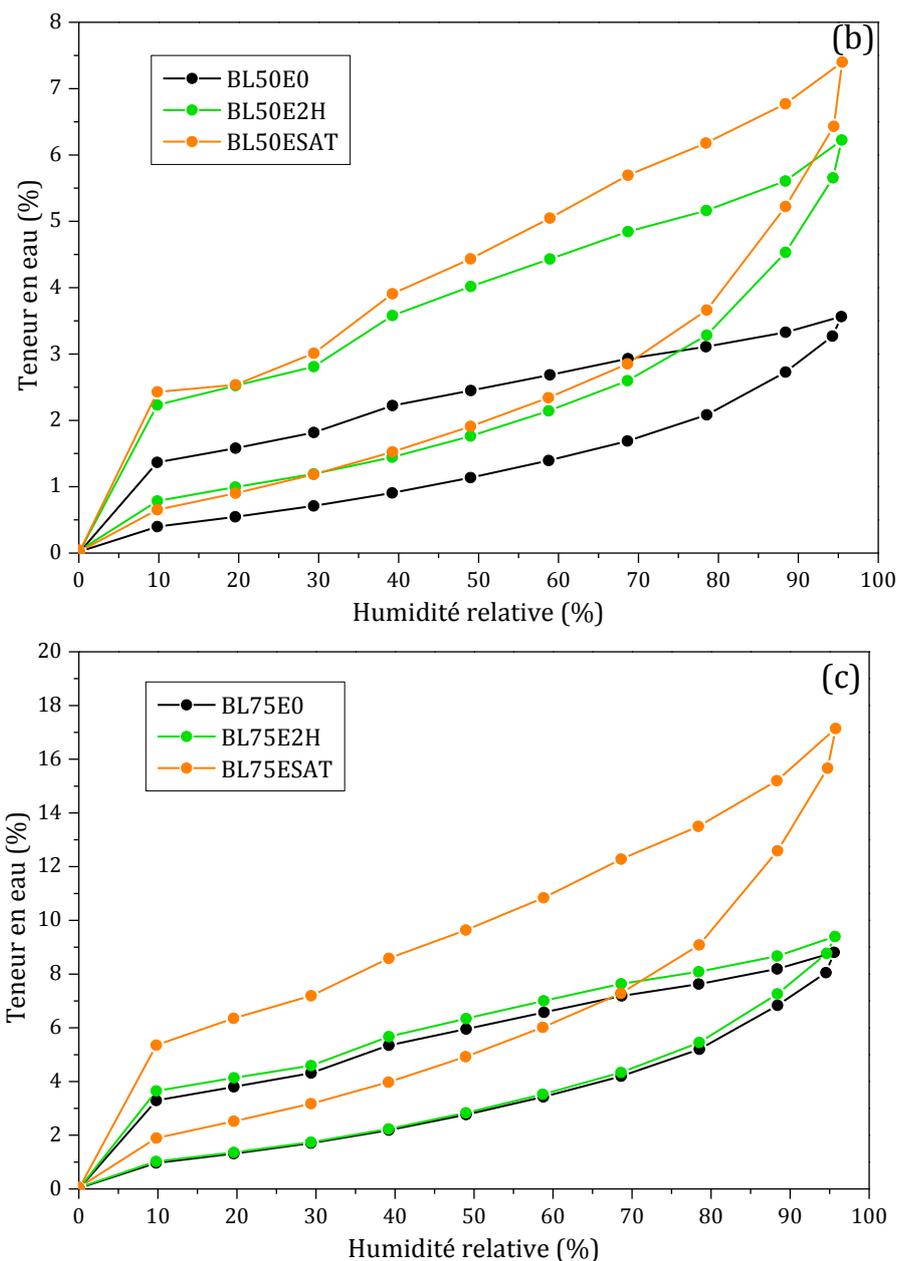


Figure 5.11. Isothermes de sorption des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.

En ce qui concerne l'impact du pourcentage de liège, les données des trois bétons préparés en considérant un niveau égal d'absorption de liège sont présentées sur la Fig. 5.12. Sur cette figure, il est clair que l'augmentation du pourcentage de liège dans le béton induit l'augmentation de la teneur en eau massique. La valeur maximale est enregistrée à 95% d'humidité relative pour le mélange BL75ESAT et est d'environ 17,1%. A un taux égal d'humidité relative, ce maximum a manifesté une baisse de 57% et 80% lorsque le pourcentage de liège est devenu respectivement 50% et 25%.

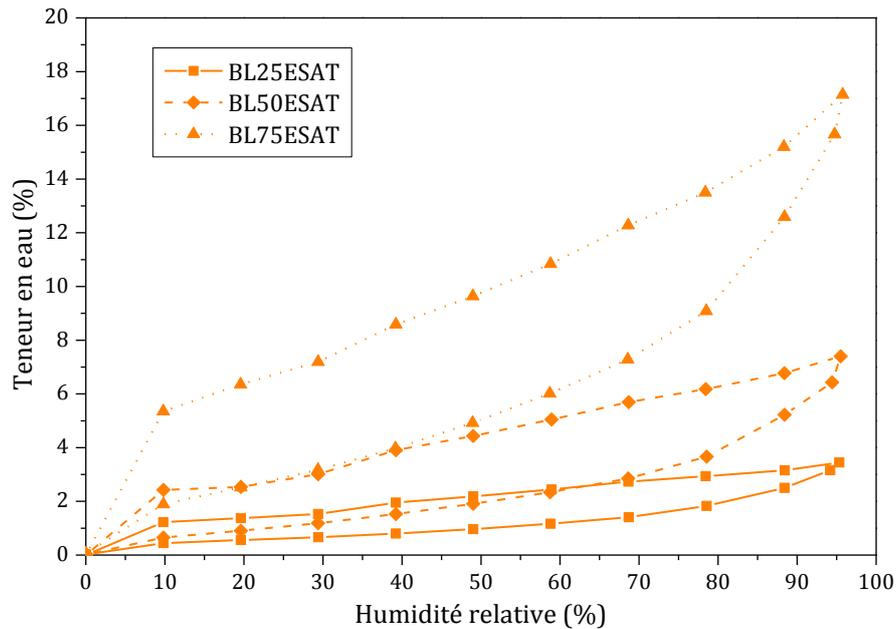


Figure 5.12. Effet du pourcentage de liège sur les isothermes des bétons de liège.

5.5.1.2. Simulation

Compte tenu de l'importance des isothermes de sorption pour l'étude hydrique des matériaux de construction, une simulation de ces courbes a été réalisée afin d'enrichir les bases de données et donc de faciliter leur reproduction dans la modélisation hygrothermique des bétons de liège. Les simulations ont été effectuées par ajustement des courbes expérimentales en utilisant le modèle Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) décrit dans l'Eq. (5.1).

$$U = \frac{m \cdot C \cdot K \cdot RH}{(1 - K \cdot RH)(1 - K \cdot RH + K \cdot C \cdot RH)} \quad (5.1)$$

Avec : U est la teneur massique en eau à l'équilibre (-), RH est l'humidité relative (-), m est la capacité monocouche, C est la constante cinétique liée à la sorption dans la première couche (-) et K est la constante cinétique liée à la sorption multicouche (-).

Les paramètres d'ajustement du modèle GAB, obtenus pour les différents résultats expérimentaux des bétons étudiés sont résumés dans le tableau illustré au niveau de la Fig. 5.13. Cette figure met également en évidence les tracés de trois simulations choisies, à savoir, BL25E0, BL25E2H et BL25ESAT.

Ces résultats semblent suggérer que le modèle GAB peut reproduire parfaitement les isothermes de sorption des bétons de liège étudiés. Ce verdict est fortement étayé par les valeurs des coefficients de corrélation qui affichent un minimum de 0,997.

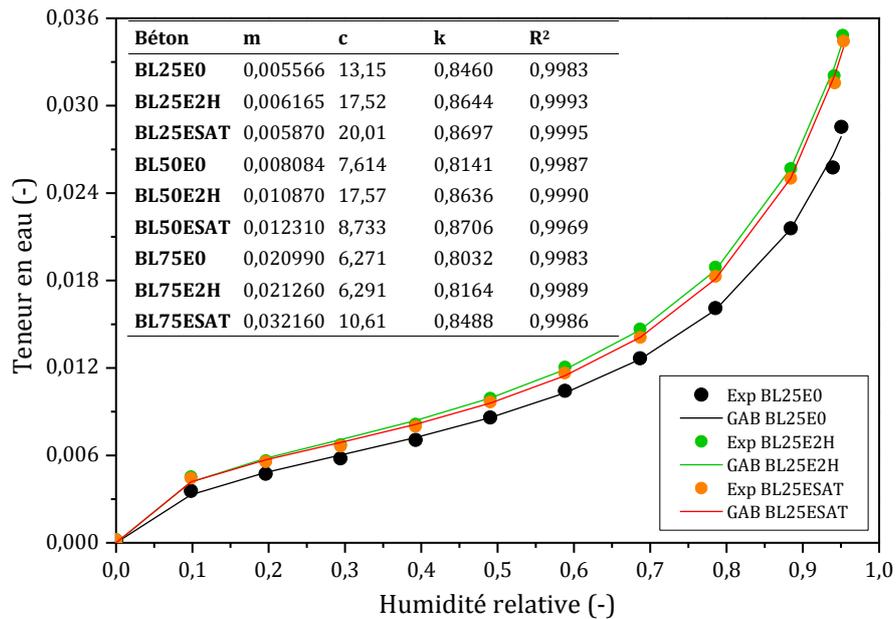


Figure 5.13. Simulation des isothermes des bétons de liège à l'aide du modèle GAB.

5.5.1.3. Capacité de stockage d'humidité

Par exploitation des courbes des isothermes, la capacité de stockage d'humidité des bétons préparés a été déduite. Ce paramètre, qui est un paramètre d'entrée crucial pour l'exécution de la modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité (HAM) est défini comme étant la pente de l'isotherme de sorption durant la phase d'adsorption. Mathématiquement, ce paramètre peut être déduit par le biais de l'Eq. (5.2).

$$C_m = \frac{\partial U}{\partial RH} \tag{5.2}$$

Avec : C_m est la capacité de stockage d'humidité (-), U est la teneur en eau massique (kg/kg) et RH est l'humidité relative (%).

La Fig. 5.14 fournit la capacité de stockage d'humidité des différents bétons de liège testés en fonction de l'humidité relative. Les résultats soulignent qu'à l'exception du béton BL75ESAT, tous les autres bétons de liège testés ont exposé des capacités de stockage quasi similaires et pratiquement constantes sur l'intervalle des humidités relatives inférieures à 70%. A l'opposé, pour des humidités relatives élevées (> 80%), en gardant une similarité entre les différents bétons, les valeurs de C_m ont présenté un comportement différent puisqu'elles ont exprimé une augmentation spectaculaire avec l'augmentation de l'humidité relative dans cet intervalle. Il convient de mentionner que l'augmentation du pourcentage de liège a entraîné une augmentation de la capacité de stockage de l'humidité du béton. Néanmoins, le taux de cette augmentation est fortement influencé par le niveau d'absorption considéré. Ceci souligne la nécessité de prendre en compte ce dernier lors de la modélisation des phénomènes de transfert dans les bétons de liège.

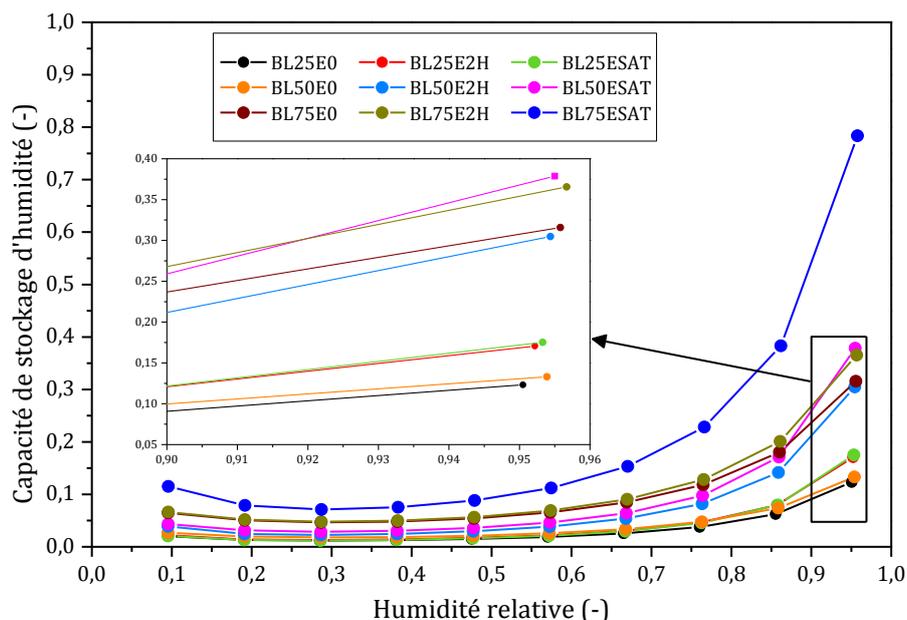


Figure 5.14. Capacité de stockage d'humidité des bétons de liège étudiés.

5.5.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

La Fig. 5.15 expose les résultats de la perméabilité à la vapeur d'eau (par coupelle humide) des bétons de liège étudiés.

Les résultats de la perméabilité à la vapeur d'eau sont fortement liés au pourcentage de liège. Pour les mélanges BL25 et BL50, on peut voir que les valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau varient uniquement entre $0,6 \text{ e}^{-12}$ et $4,2 \text{ e}^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Cependant, en comparant ces valeurs à celles obtenues pour les mélanges BL75, ces derniers ont présenté une augmentation substantielle puisqu'elles sont passées à des valeurs comprises entre $44,0 \text{ e}^{-12}$ et $81,8 \text{ e}^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Confrontées avec celles trouvées pour des composites de liège expansé et avec d'autres matériaux biosourcés (Laborel-Préneron et coll., 2018; Moreira et coll., 2014), la perméabilité à la vapeur trouvée pour les bétons contenant 75% de liège illustre une capacité d'évacuation prometteuse de la vapeur d'eau et encourage l'utilisation de ce béton en tant que matériau d'enveloppe dans les constructions.

Concernant la question principale qui est liée à l'effet de la prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège, les résultats montrent que l'augmentation du niveau d'absorption considéré induit une hausse inévitable de la perméabilité à la vapeur d'eau. Cela signifie que les valeurs maximales sont enregistrées pour les bétons marqués par un ESAT, préparés en considérant l'eau de saturation du liège.

Il convient de noter que pour des bétons incorporant un pourcentage de liège égal, l'effet de la prise en compte de l'absorption des granulats de liège est fortement lié au pourcentage de liège incorporé. Par exemple, la différence maximale obtenue dans le cas des bétons BL25 est d'environ 76%. Néanmoins, cette différence est de l'ordre de 46% pour les bétons BL75.

Une explication possible des résultats obtenus sur la perméabilité à la vapeur pourrait être la nature poreuse et la morphologie complexe des granulats de liège qui changent en fonction de la quantité d'eau échangée (absorbée et libérée) par ce dernier, engendrant par conséquent des variations au niveau du réseau poral des bétons préparés. Il est vrai

que la porosimétrie au mercure fournit l'information sur la nature et la distribution des pores dans le béton. Cependant, étant limitée à une gamme de pores restreinte, cette technique ne permet pas d'obtenir l'information sur les pores inférieurs à 3 nm qui jouent un rôle non négligeable dans les phénomènes de diffusion de vapeur d'eau. Ainsi, afin de faire une meilleure interprétation des résultats sur cette propriété, le recours à d'autres techniques avancées (telles que la technique 3flex ou la microtomographie X) permettant de fournir l'information sur la distribution des pores inférieurs à 3 nm est recommandée pour les prochains travaux.

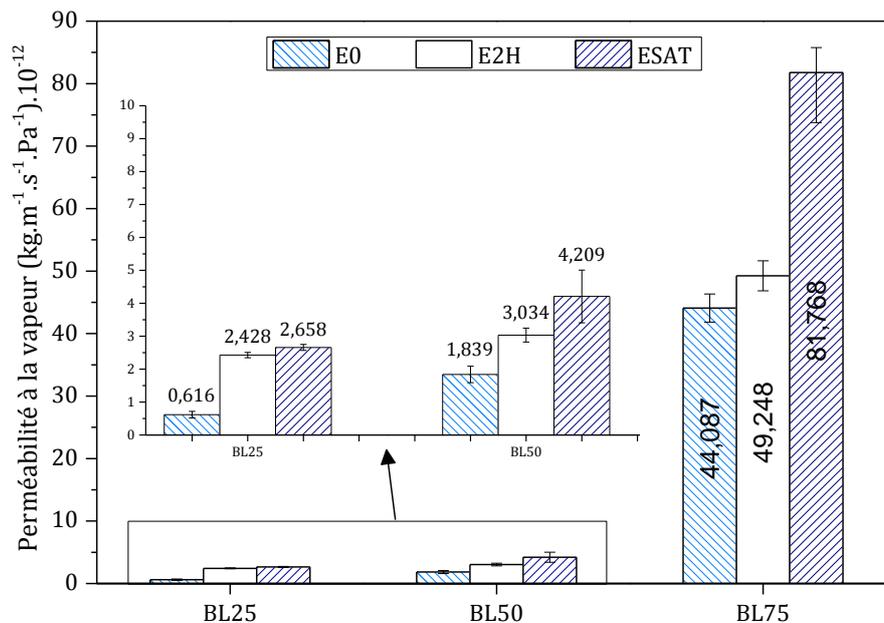


Figure 5.15. Isothermes de sorption des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré.

5.5.3. Valeur du tampon hydrique (MBV)

Les résultats sur la valeur du tampon hydrique des différents bétons de liège étudiés sont présentés dans la Fig. 5.16.

Au regard de ces résultats, nous pouvons constater que la MBV des bétons de liège montre une tendance similaire à celle obtenue dans le cas des résultats de la porosité au mercure. Par conséquent, le traçage de la MBV en fonction de la porosité des bétons a permis d'identifier l'existence d'une bonne relation linéaire entre ces deux propriétés (Fig. 5.17). Ce constat semble souligner que les résultats obtenus sur la MBV devraient être dus à la porosité des bétons qui représente une pièce maîtresse dans les phénomènes de transfert de masse.

Les résultats ont prouvé encore une fois l'impact non négligeable du niveau d'absorption considéré sur les propriétés hydriques des bétons de liège. Par exemple, dans le cas des bétons BL25, l'ajout de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption de liège a permis d'augmenter la MBV de 0,426 (BL25E0) à 0,626 (BL25E2H), cela signifie une augmentation d'environ 47% et indique une MBV égale à celle obtenue pour BL50E0, qui contient un pourcentage plus élevé de liège. Autrement dit, la considération de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption a permis d'obtenir une MBV similaire, tout en utilisant différents pourcentages de liège.

En gros, en tenant compte de l'absorption en eau du liège, le pouvoir tampon des bétons de liège est passé respectivement d'une classe limitée à modérée et de modérée à bonne pour les mélanges BL25 et BL75. Concernant les bétons contenant 50% de liège, bien que la prise en compte de l'absorption de liège a généré respectivement des augmentations de 14% et 18% pour E2H et ESAT, les bétons de liège sont restés toujours dans la classe de capacité tampon modérée selon la classification de Rode et coll. (Rode et coll., 2007).

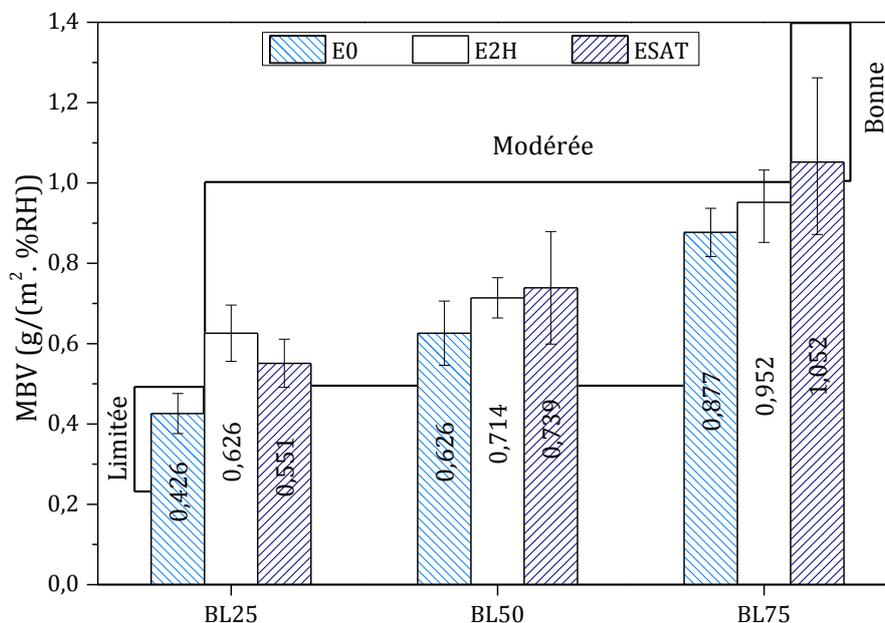


Figure 5.16. MBV des bétons de liège en fonction du niveau d'absorption considéré.

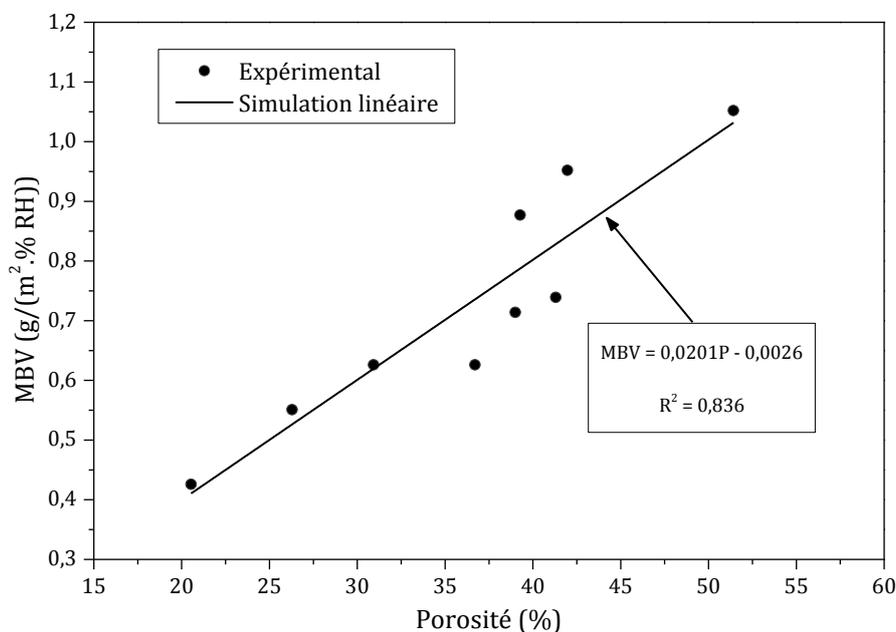


Figure 5.17. Relation entre la MBV et la porosité des bétons de liège.

5.6. Propriétés thermiques

5.6.1. Conductivité thermique

La Fig. 5.18 résume les données obtenues sur la conductivité thermique des bétons de liège testés.

La conductivité thermique des bétons étudiés dans ce chapitre couvre un intervalle important compris entre 0,14 et 1,22 W/(m. ° K). Plus le pourcentage de liège est élevé, plus la conductivité thermique du béton montre des valeurs faibles.

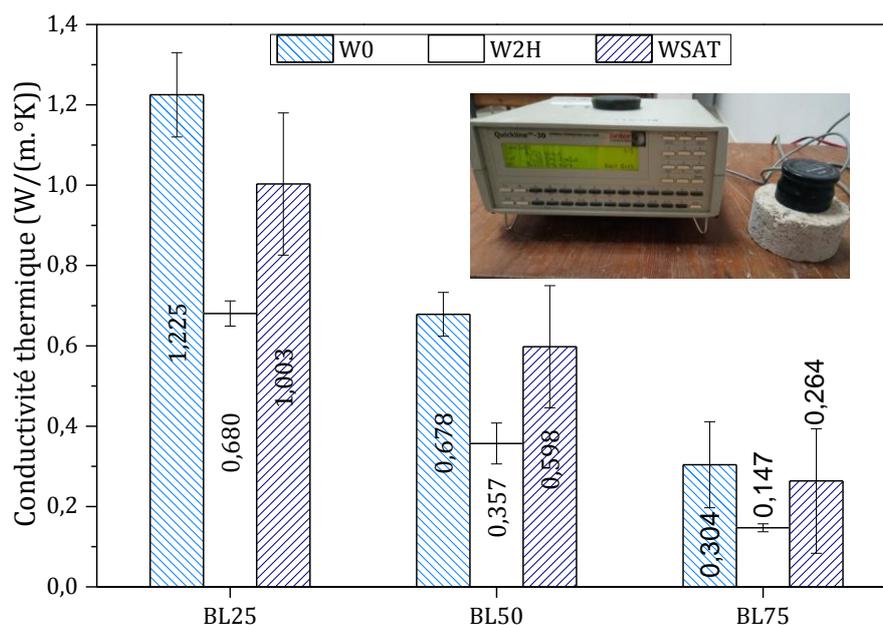


Figure 5.18. Conductivité thermique des bétons de liège étudiés.

En très bon accord avec les résultats obtenus, des études antérieures ont montré que pour des pourcentages de liège inférieurs à 80%, la conductivité thermique des composites de liège se situe entre 0,19 et 1,43 W / (m. ° K) (Boussetoua et coll., 2017; Liu et coll., 2021; Moreira et coll., 2014; Panesar et Shindman, 2012). De plus, le graphique de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique (Fig. 5.19) met en évidence que ces résultats corroborent bien ceux enregistrés pour d'autres bétons biosourcés présentés dans le premier chapitre ainsi qu'avec le modèle proposé par Asadi et coll. (Asadi et coll., 2018) pour différents types de bétons. Bien que les BL25 n'ont pas montré des valeurs qui leur permettent une utilisation en tant qu'isolants, les bétons BL50 et surtout BL75, ont montré des conductivités thermiques très encourageantes pour une utilisation en tant que matériaux d'enveloppe à pouvoir isolant.

En ce qui concerne la problématique principale de ce chapitre, nous avons remarqué que la considération de l'absorption en eau du liège pendant le malaxage a un impact important sur la conductivité thermique des bétons de liège. La remarque la plus intéressante dans ces résultats est qu'indépendamment du pourcentage de liège, les conductivités thermiques minimales sont obtenues pour les bétons désignés E2H. Par rapport aux bétons étiquetés E0 (formulés en négligeant l'absorption de liège) qui ont donné la plus grande conductivité thermique, les bétons E2H ont présenté respectivement des baisses de 44%, 47% et 52% pour les bétons BL25, BL50 et BL75.

Les résultats sur la conductivité thermique pourraient être attribués en partie à la morphologie poreuse, complexe et sensible à l'eau des agrégats de liège (comme expliqué dans les chapitres 2 et 3). En effet, bien que la porosité totale soit un paramètre avec un grand impact, la complexité du réseau porale, sa distribution dans le milieu poreux, sa tortuosité et sa surface spécifique sont des paramètres qui présentent un effet décisif sur la valeur finale de la conductivité thermique. C'est la raison pour laquelle, pour deux matériaux poreux ayant une porosité totale similaire, on peut enregistrer deux conductivités thermiques très dispersées.

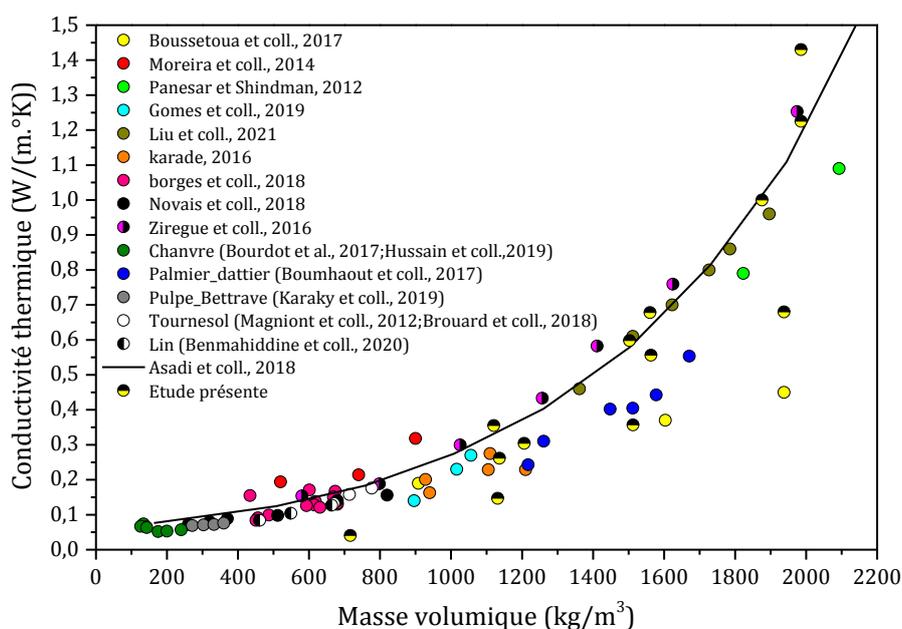


Figure 5.19. Comparaison de la conductivité thermique des bétons de liège étudiés avec d'autres matériaux.

5.6.2. Chaleur spécifique

La Fig. 5.20-a-c illustre la variation de la chaleur spécifique des bétons de liège étudiés en fonction des températures variant entre 0 et 40 °C.

Comme illustré, la chaleur spécifique de tous les bétons liège testés expose une augmentation linéaire parfaite avec la hausse de la température. Les pentes des relations linéaires tracées varient en fonction du pourcentage de liège et de la considération de son absorption.

Ce qui est important de reconnaître ici est que les bétons ESAT ont toujours montré les valeurs maximales de chaleur spécifique. Néanmoins, les bétons E2H et E0 ont révélé pratiquement des valeurs similaires, ceci signifie que l'ajout de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption ne présente pas un impact significatif sur la chaleur spécifique des bétons de liège. Par exemple, lors du passage d'un béton E0 à un béton ESAT, la chaleur spécifique du BL75 a montré une augmentation de 11%. En contrepartie, par rapport à celle du BL75E2H, Cp du BL75E0 a présenté une diminution de seulement 2,7% (Fig. 5.21).

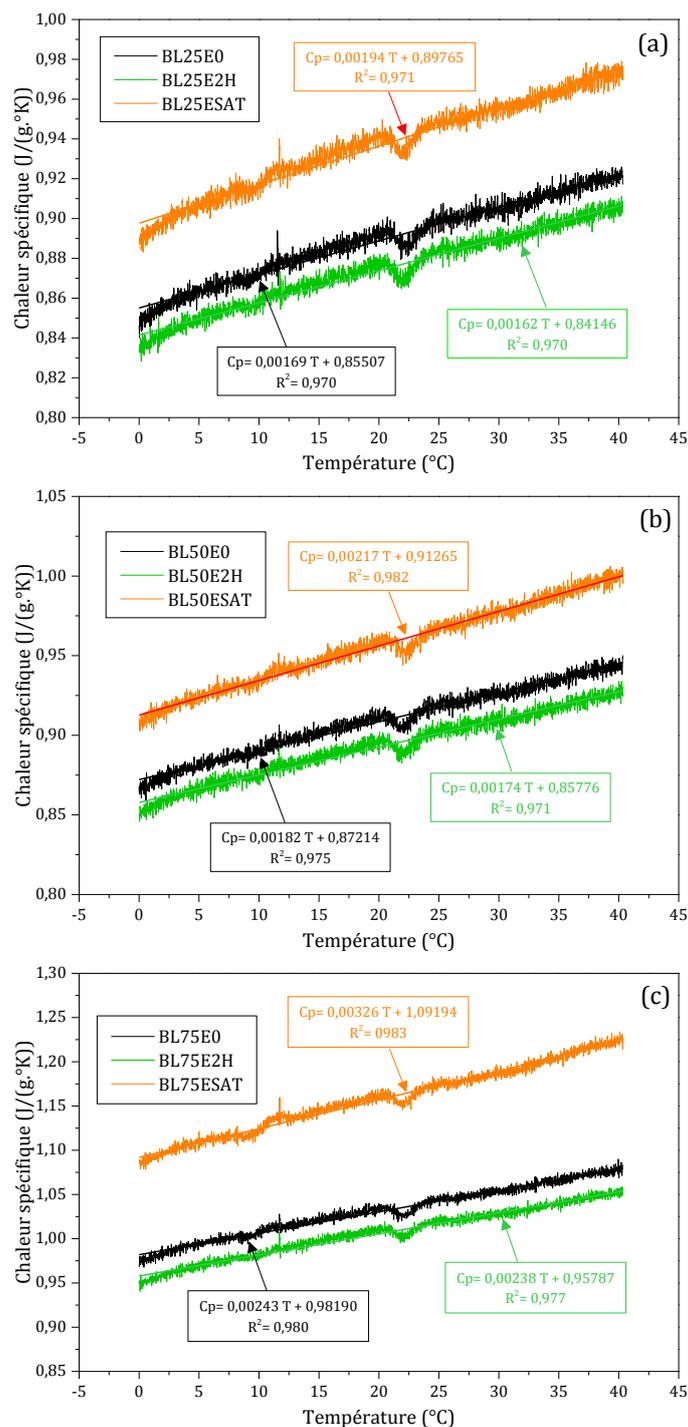


Figure 5.20. Chaleur spécifique des bétons de liège étudiés en fonction de la température. (a) BL25, (b) BL50 et (c) BL75.

L'augmentation de la chaleur spécifique des bétons (à 23 °C) avec le pourcentage de liège peut être visible sur la Fig. 5.21. Par exemple, le passage de 25% à 75% de liège a entraîné des hausses qui varient entre 16,9% et 23,2% au prorata du niveau d'absorption considéré. En résumé, à 23 °C, la chaleur spécifique des bétons produits (incorporant moins de 80% de liège) varie entre 0,889 et 1,159 J/(g·°K). Ces résultats corroborent bien ceux trouvés très récemment dans la littérature pour des bétons contenant 50% de liège et moins (Liu et coll., 2021; Merabti et coll., 2020) et variant entre 0,68 et 1,02 J/(g·°K).

Les résultats de la chaleur spécifique sont probablement liés à la microstructure des bétons ainsi qu'à leur composition chimique. En fait, il semble possible que la prise en compte de l'absorption en eau du liège soit accompagnée, en plus des modifications microstructurales, d'un changement au niveau de la composition chimique globale qui présente un effet sur la valeur de la chaleur spécifique. Ce verdict, bien qu'il soit traduit par une variation négligeable dans le cas des bétons E2H, il a montré un impact direct dans le cas des ESAT qui ont montré des variations importantes au niveau des ITZ ainsi qu'au niveau de la qualité du liège (comme expliqué dans la section 5.4), ceci permet d'expliquer la différence qui existe entre la chaleur spécifique des bétons ESAT et les autres bétons.

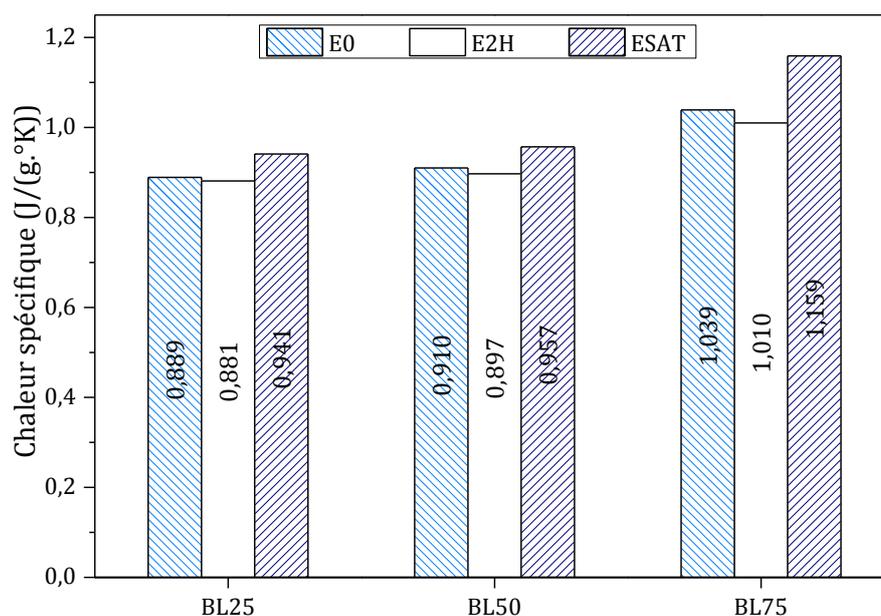


Figure 5.21. Chaleur spécifique des bétons de liège à 23 °C.

5.7. Résistance à la compression

Les graphiques regroupant les résultats de la résistance à la compression des bétons de liège formulés à 7 et 28 jours sont présentés dans la Fig. 5.22.

Indépendamment de l'âge de durcissement et du pourcentage de liège, l'augmentation du niveau d'absorption considéré entraîne une diminution de la résistance à la compression des bétons de liège. Ceci signifie que les valeurs maximales de résistance à la compression sont obtenues pour les bétons de référence E0. Par rapport aux bétons E0 et en fonction du pourcentage de liège et l'âge de durcissement, les bétons E2H et ESAT ont affiché des chutes allant respectivement de 15% à 50% et de 41% à 74%.

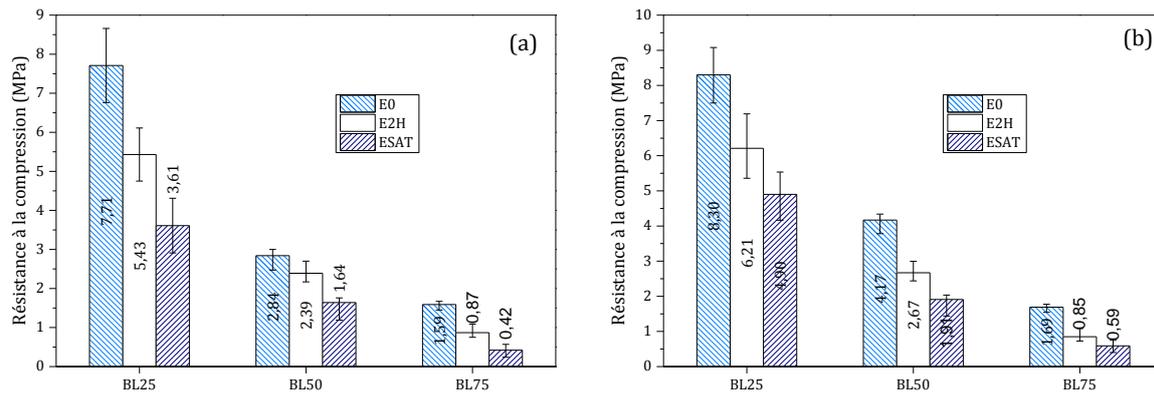


Figure 5.22. Résistance à la compression des bétons de liège. (a) à 7 jours et (b) à 28 jours.

Ces résultats pourraient être associés aux différences enregistrées en termes de microstructure des bétons. Il est vrai que les bétons E0 ont révélé une mauvaise ITZ entre le liège et la matrice. Cependant, bien que l'addition de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption engendre une amélioration de l'ITZ, cette dernière peut être à l'origine d'une augmentation de la quantité des composés chimiques libérés par le liège dans le béton (tanins, polyphénols...), causant une augmentation du volume et de la taille des pores par inhibition de l'hydratation du ciment (traduite par une réduction des CSH). Ceci affecte par conséquent la qualité de la matrice cimentaire qui est un paramètre clé dans le développement de la résistance à la compression du béton.

Concernant les bétons ESAT, la diminution pourrait être liée en partie à l'affaiblissement de la qualité de l'ITZ matrice-liège qui est responsable de la transmission des charges de la matrice vers les granulats. En outre, l'augmentation de la quantité de composés chimiques libérés par le liège dans le béton a montré encore une fois son impact sur la qualité de la matrice cimentaire de ce type de béton (comme expliqué dans la section 5.4). Une dernière cause qui a peut-être engendré la diminution de la résistance à la compression dans le cas des bétons labellisés ESAT réside dans le phénomène de minéralisation du liège. En effet, comme expliqué auparavant, cette minéralisation provoque, en plus de la multiplication des fissures, la migration de la matrice cimentaire dans le liège (Fig.8-a, e), rigidifiant une partie du végétal et engendrant la diminution de sa performance mécanique.

Avec de légères variations au niveau du pourcentage de diminution en fonction du pourcentage de liège et du niveau d'absorption considéré, les résistances à la compression ont révélé des tendances similaires en passant de 7 à 28 jours. Tel qu'illustré, de 7 à 28 jours, les bétons de liège ont exprimé une légère amélioration de leurs résistances à la compression. Par exemple, les bétons étiquetés E2H montrent respectivement des hausses de 14, 12 et 3% pour les bétons BL25, BL50 et BL75.

À propos de l'effet de l'augmentation du pourcentage de liège, les résultats obtenus soutiennent ceux trouvés dans le chapitre précédent dans la partie qui lie de manière exponentielle la résistance à la compression des bétons de liège avec le pourcentage de liège introduit.

En résumé, malgré la diminution enregistrée à cause de la prise en compte de l'eau d'absorption du liège, les bétons étudiés ont montré des résistances à la compression très encourageantes en donnant des valeurs allant respectivement de 3,6 à 8,3, de 1,6 à 4,2 et de 0,4 à 1,7 MPa pour les BL25, BL50 et BL75.

5.8. Conclusion

L'étude mise en évidence dans ce chapitre a été réfléchi afin d'étudier l'impact du niveau considéré d'absorption en eau du liège lors de la préparation des bétons à base de granulats de liège. L'investigation réalisée sur neuf bétons de liège mâle considérant trois différents niveaux d'absorption pour trois pourcentages de liège a permis dès lors de tirer les enseignements suivants :

Quelque soient le pourcentage de liège utilisé ainsi que le niveau d'absorption considéré, la prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège conduit à une amélioration de l'affaissement des bétons de liège. Bien que la considération d'un niveau d'absorption correspondant à la saturation du liège ait toujours engendré le plus grand affaissement, elle a causé des phénomènes de ségrégation dans le cas des bétons incorporant des pourcentages élevés de liège. En contrepartie, la considération d'un niveau qui correspond à 2 heures d'absorption a donné des bétons de liège couplant à la fois la consistance améliorée avec la très bonne homogénéité.

De manière intéressante, tous les bétons de liège ont montré des masses volumiques inférieures à 2000 kg/m^3 , ce qui les qualifie comme étant bétons légers permettant de réduire le poids des structures lors de l'utilisation comme matériaux de construction. Quant à l'effet de prise en compte de l'absorption, ce paramètre n'a engendré que de légères différences qui ne dépassent pas les 7%.

L'investigation de la microstructure par MEB a souligné la différence qui existe entre des bétons incorporant un pourcentage de liège similaire ; mais considérant différents niveaux d'absorption. Bien que la considération d'un niveau correspondant à 2 heures d'absorption améliore la qualité de l'ITZ entre le liège et la matrice cimentaire, elle risque de compromettre la qualité de la matrice cimentaire par augmentation de la quantité de composés chimiques libérés par le liège dans le béton. De manière différente à ce que nous pensions au début, la considération de l'eau correspondante à la saturation de liège a généré une ITZ plus médiocre que celle obtenue par négligence de l'absorption.

De manière similaire aux résultats obtenus par MEB, l'exploration réalisée par porosité au mercure a révélé la prise en compte de l'absorption de liège engendre des changements remarquables au niveau de la distribution porale des bétons de liège. En effet, la prise en compte de l'absorption implique une augmentation de la quantité des micropores et des mésopores au sein du béton de liège, gammes de pores qui jouent un rôle important dans les phénomènes de transfert hygrothermiques.

A propos des propriétés hydriques des bétons de liège proposés, nous avons remarqué qu'ils présentent une valeur tampon et une perméabilité à la vapeur qui augmentent avec le pourcentage de liège. Les BL25 et les BL50 ont montré une performance faible à moyenne. Cependant, les BL75 ont révélé une performance hydrique qui rivalise avec celles des bétons biosourcés rencontrés dans la littérature.

Les propriétés hydriques montrent aussi une sensibilité vis-à-vis du niveau d'absorption de liège considéré. Pour les bétons contenant 50 et 75% de liège, un niveau d'absorption améliore sensiblement la MBV et la perméabilité à la vapeur d'eau des mélanges.

Hormis l'impact du pourcentage de liège ainsi que la prise en compte de son absorption, les isothermes de tous les bétons de liège produits suivent le type H4 décrit par l'IUPAC et obéissent parfaitement au modèle GAB.

De manière intéressante, quel que soit le pourcentage de liège incorporé, l'ajout de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption de liège produit les bétons de liège qui ont les meilleures conductivités thermiques. Malgré l'amélioration remarquée avec la prise en compte de l'absorption en eau du liège, les conductivités obtenues pour tous les BL25 ainsi que le BL50E0 et le BL50ESAT sont comprises entre 0,6 et 1,23 W/(m.°K) et ne permettent pas leur utilisation en tant que matériaux d'isolation. A l'opposé, le BL50E2H et tous les BL75 ont montré des conductivités thermiques encourageantes, variant entre 0,14 et 0,35 W/(m.°K) et remplissant les exigences fixées par la RILEM pour l'utilisation en tant que matériaux d'isolation.

Alors que la prise en considération de l'absorption en eau n'a pas engendré des variations significatives au niveau de la chaleur spécifique des bétons de liège préparés, il est important de souligner d'une part que les meilleures chaleurs spécifiques sont enregistrées pour une prise en compte de l'eau correspondante à la saturation de liège, et d'autre part que l'augmentation du pourcentage de liège entraîne des améliorations qui peuvent dépasser les 23%.

Contrairement à ce qui est admis dans la littérature sur les bétons biosourcés, cette recherche révèle que la prise en compte de l'absorption en eau du liège provoque une diminution de la résistance à la compression des bétons de liège. Malgré cette diminution les, bétons de liège étudiés dans ce chapitre et contenant 75% de liège et moins ont montré des résistances à la compression comprises entre 0,8 et 9,0 MPa. Ceci signifie que la résistance de ces bétons dépasse suffisamment les valeurs minimales exigés pour l'utilisation des bétons biosourcés au niveau des murs, toits et sols.

Conclusion générale et perspectives

De dimensions importantes, le développement durable est une notion qui préoccupe les spécialistes de la construction. D'abord, parce que le secteur de la construction est énergivore ; mais aussi parce qu'il contribue à l'épuisement d'une part importante des ressources naturelles. Ainsi, face aux contraintes liées à la réduction de l'impact environnemental de ce secteur, l'utilisation des bétons à base de matières biosourcés s'impose comme solution d'avenir. De plus, connus par leur bonne performance hygrothermique, l'utilisation des matériaux biosourcés permet de garantir un confort thermique intéressant tout en réduisant le prix de la facture énergétique du bâtiment. Etant donné que l'utilisation des bétons biosourcés nécessite le choix de matériaux qui ont un faible coût de transport, le développement de ce type de béton exige entre autres l'utilisation de biomasses locales.

Dans ce travail, la formulation et l'optimisation de la performance d'un béton biosourcé à base de granulats de liège mâle a été réalisée. Le choix de ce type de liège est alimenté par l'absence de tentatives de valorisation de cette biomasse dans le béton malgré le peu d'applications qu'il connaît. Dans un premier temps et dans le but d'établir un protocole de malaxage des bétons de liège, une étude de l'effet de variation des paramètres de malaxage (ordre d'introduction des constituants, temps de malaxage, outil de malaxage) a été élaborée. Ensuite, une évaluation de la performance thermomécanique de bétons contenant différents pourcentages de liège mâle a été réalisée. Finalement, dans une optique d'optimiser la performance des bétons de liège proposés et de mieux comprendre leur comportement, l'impact de la prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège pendant la préparation des bétons a été investiguée.

En gros, à la fin de l'exploration entreprise, les conclusions suivantes peuvent être dressées :

De manière intéressante, tous les bétons de liège manufacturés dans la campagne expérimentale présentent une masse volumique inférieure à 2000 kg/m^3 et appartiennent par conséquent à la classe des bétons légers.

La variation des paramètres de malaxage présente un impact sur la qualité du béton de liège à l'état durci mais surtout à l'état frais :

- Le malaxage suivant le protocole utilisé pour la préparation des bétons ordinaires ou même en incorporant le liège après la pâte cimentaire ont donné des bétons de liège dont l'homogénéité est compromise. En revanche, l'incorporation des granulats de liège avant tout les autres constituants a montré une bonne stabilité à l'état frais ainsi qu'une bonne qualité à l'état durci.
- L'utilisation d'un temps de malaxage de 8 minutes permet à la fois d'optimiser la qualité du béton de liège et l'énergie nécessaire pour sa préparation.
- L'utilisation d'une bétonnière ou même un mélangeur à double bras semble inadéquat pour la préparation du béton de liège. Ceci a été démontré par les phénomènes d'instabilité remarqués sur les bétons de liège à l'état frais ainsi que les

difficultés de leur mise en œuvre. En contrepartie, la qualité du béton obtenu par un malaxage en utilisant un malaxeur à axe vertical est encourageante.

- Sur la base des observations faites et des résultats obtenus, le mode de malaxage choisi pour la formulation des bétons de liège proposé dans cette étude consiste à : (i) utiliser un malaxeur à axe vertical, (ii) introduire les granulats de liège avant le sable et le ciment pour assurer un meilleur enrobage et (iii) malaxer le mélange pendant 8 minutes.

L'évaluation de la performance des bétons de liège à différents pourcentages de liège mâle a révélé une variation remarquable de cette dernière avec l'augmentation du pourcentage de liège dans le béton :

- Le béton avec 25% de liège mâle a montré une bonne consistance, une porosité moyenne et une performance mécanique faible pour l'utilisation en tant que matériau porteur. En comparaison avec le béton ordinaire, malgré la forte amélioration de la conductivité thermique, le BL25 n'a pas montré la performance thermique qui le qualifie pour l'utilisation en tant que matériaux d'isolation.
- Contrairement au BL25, les bétons de liège mâle avec un pourcentage de liège supérieur ou égal à 50% ont montré (i) une réduction remarquable au niveau de la consistance, (ii) une porosité qui favorise le transfert de chaleur et de masse ainsi que (iii) des performances mécaniques prometteuses pour l'utilisation en tant que matériaux non-structuraux. Quant à la performance thermique, les bétons BL50, BL75 et BL100 ont montré des conductivités thermiques qui leur permettent d'être utilisés comme matériaux d'isolation dans différentes applications incluant les blocs de remplissage, les chapes isolantes et les matériaux d'isolation des sols. Le BL100 a montré une conductivité thermique très prometteuse en comparaison avec les bétons biosourcés qui existent dans la littérature ou même dans le marché des matériaux biosourcés.
- L'investigation réalisée à l'aide de la microscopie électronique à balayage a montré que les bétons de liège mâle proposés présentent une ITZ médiocre entre le granulat de liège et la matrice cimentaire. Cette ITZ présente une couche de vide avec une épaisseur qui varie entre 90 et 150 μm et contribue à l'affaiblissement de la performance mécanique et de la durabilité du béton.

Partant de la controverse qui existe dans la littérature ainsi que des problèmes rencontrés à cause de la non prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège, la dernière partie du travail a permis de souligner l'impact remarquable de la variation du niveau d'absorption (des granulats de liège) considéré sur la performance thermo-hydro-mécanique du béton de liège :

- L'effet de la prise en compte de l'absorption en eau du liège ne dépend pas fortement du pourcentage de liège dans le béton. Par ailleurs, avec la variation du niveau d'absorption considéré, la même tendance a été remarquée pour tous les pourcentages de liège testés pour la majorité des propriétés évaluées.

- Quel que soit le niveau d'absorption considéré, la prise en compte de l'absorption des granulats de liège induit une amélioration de la consistance du béton de liège et permet de multiplier les techniques de mise en œuvre des bétons de liège. Cependant, pour des pourcentages de liège élevés, l'amélioration de la consistance est accompagnée par des phénomènes de ségrégation et par la suite des difficultés de mise en œuvre.
- En terme de microstructure, des différences remarquables ont été enregistrées entre les bétons de liège incorporant des pourcentages de liège égaux mais des niveaux d'absorption différentes. Alors que la considération de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption de liège entraîne une amélioration de l'ITZ liège-matrice, la considération d'un niveau d'absorption correspondant à la saturation du liège engendre une ITZ dont la qualité est plus faible que celle observée dans le cas du béton négligeant cette absorption.
- Indépendamment du pourcentage de liège et fortement liée aux changements de la microstructure, de la distribution porale ainsi que la porosité totale du béton, la performance hydrique du béton de liège a montré une amélioration avec l'augmentation du niveau d'absorption considéré. Par exemple pour un BL75, l'ajout de l'eau correspondante à la saturation de liège a permis d'amener la MBV du béton d'une capacité modérée à une bonne capacité de réguler l'humidité. De plus, il a engendré une augmentation de 46% au niveau de la capacité du béton à évacuer l'humidité (perméabilité à la vapeur). Une conclusion importante est que pour la capacité de réguler l'humidité, la prise en compte de l'absorption de liège a permis d'obtenir pour des bétons incorporant des pourcentages de liège différents, des MBV similaires.
- La considération de l'eau correspondante à 2 heures d'absorption entraîne des améliorations significatives au niveau de la conductivité thermique des bétons de liège et engendre des mélanges qui présentent les meilleures performances thermiques. En grand accord avec les résultats trouvés dans la première partie, seuls les bétons contenant 50% de liège et plus, présentent des conductivités thermiques remplissant les exigences fixées pour l'utilisation en tant que bétons d'isolation.
- Différemment à la conductivité thermique, la prise en compte de l'absorption en eau du liège n'a pas engendré des améliorations importantes au niveau de la chaleur spécifique des bétons de liège.
- La prise en compte de l'absorption en eau des granulats de liège entraîne une diminution au niveau de la performance mécanique des bétons de liège. Néanmoins, la résistance à la compression des bétons proposés est comprise entre 0,8 et 9,0 MPa, valeurs qui dépassent largement celles recommandées pour l'utilisation des bétons biosourcés dans les murs, les toits ou même les sols.
- En résumé, malgré les améliorations enregistrées au niveau de la performance des bétons de liège par la considération d'un niveau d'eau qui correspond à la saturation du liège, les phénomènes de ségrégation observés au niveau du

BL50ESAT et BL75ESAT représentent de véritables freins face à l'utilisation de ces bétons dans des applications réelles. En revanche, en plus de l'amélioration de leur performances hygrothermique, l'homogénéité des bétons E2H représente une vraie motivation pour la considération d'un niveau d'absorption qui correspond à 2 heures d'absorption dans les prochains travaux sur les bétons de liège.

En résumé, la campagne expérimentale réalisée a réussi d'abord à définir un mode de malaxage spécifique à la préparation des bétons de liège. De plus, par le biais d'une évaluation de la performance de plusieurs bétons de liège, les applications possibles pour les bétons de liège proposés ont été identifiées. Finalement, dans une optique qui vise l'amélioration (optimisation) de la performance du béton de liège, un niveau d'absorption de liège a été recommandé à la fin de la campagne, il s'agit d'une quantité d'eau qui correspond à 2 heures d'absorption de liège.

Pour une performance hygrothermique qui remplit les exigences minimales recommandées pour les bétons isolants, l'étude présente montre qu'il faut utiliser des pourcentages de liège supérieurs à 50%.

Etant limitée à l'étude expérimentale l'effet de certains paramètres aidant à optimiser la performance thermo-hygro-mécanique à l'échelle du matériau, la présente étude constitue un premier pas dans la voie de l'utilisation du béton de liège mâle en tant que matériau de construction à pouvoir isolant. Ainsi, cette étude ouvre grand la porte sur de futurs travaux :

- Etude de l'effet de la cure utilisée pour la conservation des bétons de liège,
- Etude de l'apport du prétraitement des granulats de liège dans l'amélioration de l'interface granulat de liège-matrice cimentaire,
- Suivi de la variation volumique et de la microstructure des granulats de liège dans le béton en fonction du temps,
- Etude de l'évolution des résistances mécaniques à des âges plus importants que 28 jours,
- Etude exhaustive de l'effet de l'incorporation du liège sur l'hydratation du liant,
- Evaluation de l'effet du vieillissement sur la performance du béton de liège,
- Modélisation à l'échelle de la paroi, des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les bétons de liège,
- Evaluation de la performance du béton de liège dans un bâtiment réel (échelle 1),
- Réalisation d'une étude microstructurale plus approfondie et permettant de mieux comprendre la complexité du réseau poral des bétons de liège par des techniques avancées tel que la microtomographie-X et la 3 flex,
- Evaluation de la performance d'un béton à base de liège mâle mais incorporant un autre type de liant ayant un impact environnemental moins important que le ciment portland (plâtre, terre, chaux...).

*Références Bibliographiques***Articles**

Asadi, I., Shafigh, P., Abu Hassan, Z.F. Bin, Mahyuddin, N.B., 2018. Thermal conductivity of concrete – A review. *J. Build. Eng.* 20, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.002>

Barnat-Hunek, D., Siddique, R., Łagód, G., 2017. Properties of hydrophobised lightweight mortars with expanded cork. *Constr. Build. Mater.* 155, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.052>

Belakroum, R., Gherfi, A., Kadja, M., Maalouf, C., Lachi, M., El Wakil, N., Mai, T.H., 2018. Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime. *Constr. Build. Mater.* 184, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.196>

Belhadj, B., Bederina, M., Makhoulfi, Z., Dheilily, R.M., Montrelay, N., Quéneudéc, M., 2016. Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Constr. Build. Mater.* 113, 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.067>

Benmahiddine, F., Bennai, F., Cherif, R., Belarbi, R., Tahakourt, A., Abahri, K., 2020a. Experimental investigation on the influence of immersion/drying cycles on the hygrothermal and mechanical properties of hemp concrete. *J. Build. Eng.* 32, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101758>

Benmahiddine, F., Cherif, R., Bennai, F., Belarbi, R., Tahakourt, A., Abahri, K., 2020b. Effect of flax shives content and size on the hygrothermal and mechanical properties of flax concrete. *Constr. Build. Mater.* 262, 120077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120077>

Bennai, F., Issaadi, N., Abahri, K., Belarbi, R., Tahakourt, A., 2018. Experimental characterization of thermal and hygric properties of hemp concrete with consideration of the material age evolution. *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung* 54, 1189–1197. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2221-2>

Borges, A., Flores-Colen, I., de Brito, J., 2018. Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay. *Constr. Build. Mater.* 191, 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.043>

Bourdot, A., Moussa, T., Gacoin, A., Maalouf, C., Vazquez, P., Thomachot-Schneider, C., Bliard, C., Merabtine, A., Lachi, M., Douzane, O., Karaky, H., Polidori, G., 2017. Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy Build.* 153, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>

Boussetoua, H., Maalouf, C., Lachi, M., Belhamri, A., Moussa, T., 2017. Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 8189, 1–16. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1397551>

Brás, A., Leal, M., Faria, P., 2013. Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Constr. Build. Mater.* 49, 315–327.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006>

Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Ranganathan, N., Méo, S., 2018. Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Constr. Build. Mater.* 161, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>

Chabannes, M., Bénézet, J.C., Clerc, L., Garcia-Diaz, E., 2014. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Constr. Build. Mater.* 70, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025>

Cherki, A.B., Remy, B., Khabbazi, A., Jannot, Y., Baillis, D., 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Constr. Build. Mater.* 54, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076>

Dehane, B., Bouhraoua, R.T., Belhoucine, L., Hamani, F.Z., 2013. La filière liège algérienne, entre passé et présent. *forêt méditerranéenne* 2, 143–152.

Dehane, B., Ghefar, M., 2017. Etude de la variabilité de croissance du liège dans le Nord Algérien. *Geo-Eco-Trop.* 41, 39–54.

Fortes, M.A., Rosa, M.E., 1988. Densidade da cortiça: factores que a influenciam. *Cortiça* 593, 65–68.

Gil, L., 2009. Cork composites: A review. *Materials (Basel)*. 2, 776–789. <https://doi.org/10.3390/ma2030776>

Gomes, M.G., Flores-Colen, I., Melo, H., Soares, A., 2019. Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders. *Constr. Build. Mater.* 198, 786–795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.151>

Haba, B., Agoudjil, B., Boudenne, A., Benzarti, K., 2017. Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete. *Constr. Build. Mater.* 154, 963–971. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.025>

Hussain, A., Calabria-Holley, J., Lawrence, M., Jiang, Y., 2019. Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Constr. Build. Mater.* 212, 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029>

Imessad, K., Kharchi, R., Bouchaib, S., Chenak, A., Hakem, S., Hamidat, A., Larbi-youcef, S., Sami, S., Sahnoune, F., 2017. Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment. *Rev. des Energies Renouvelables* 20, 591–597.

Jami, T., Karade, S.R., Singh, L.P., 2019. A review of the properties of hemp concrete for green building applications. *J. Clean. Prod.* 239, 117852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>

Jerónimo, A., Soares, C., Aguiar, B., Lima, N., 2020. Hydraulic lime mortars incorporating micro cork granules with antifungal properties. *Constr. Build. Mater.* 255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119368>

Karade, S.R., 2016. Potential of cork cement composite as a thermal insulation material. *Key Eng. Mater.* 666, 17–29. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.666.17>

Kantro D.K., 1980. Influence of water -reducing admixtures on properties of cement paste – A miniature slump test. *Cement, Concrete and aggregates* 2 (2), 95-108).

Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J.S., Pereira, H., 2016. Cork as a building material: a review. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74, 775–791. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1076-4>

Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.E., 2018. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy Build.* 178, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>

Lachibi, M., Chehat, F., 2009. Situation actuelle de la subéraie algérienne et possibilités de mise en valeur de la filière liège, in: *Les Actes Du Med Suber 1 : 1ère Rencontre Méditerranéenne Chercheurs-Gestionnaires-Industriels Sur La Gestion Des Subérais et La Qualité Du Liège*. Tlemcen, pp. 82–89.

Lagouin, M., Magniont, C., Sénéchal, P., Moonen, P., Aubert, J.E., Laborel-préneron, A., 2019. Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes. *Constr. Build. Mater.* 222, 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>

Latroch, N., Benosman, A.S., Bouhamou, N.E., Senhadji, Y., Mouli, M., 2018. Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride. *Constr. Build. Mater.* 175, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.173>

Le, A.T., Gacoin, A., Li, A., Mai, T.H., Rebay, M., Delmas, Y., 2014. Experimental investigation on the mechanical performance of starch – hemp composite materials. *Constr. Build. Mater.* 61, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.084>

Limam, A., 2017. *Élaboration et caractérisation d'un nouveau panneau composite isolant à base de Pin d'Alep et de liège*. These de doctorat - Université M'hamed Bougara-Boumerdes, Algérie.

Liu, Y., Cao, Z., Wang, Y., Wang, D., Liu, J., 2021. Experimental study of hygro-thermal characteristics of novel cement-cork mortars. *Constr. Build. Mater.* 271, 121901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121901>

Maaroufi, M., 2019. *Modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction – Incidence de l'hystérésis*. These de doctorat - Université de La Rochelle, France.

Magniont, C., 2010. *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. These de doctorat - Université Toulouse III - Paul Sabatier, France.

Merabti, S., Kenai, S., Belarbi, R., Khatib, J., 2020. Thermo-mechanical and physical properties of waste granular cork composite with slag cement Thermo-mechanical and physical properties of waste granular cork composite with slag cement. *Constr. Build. Mater.* 272, 121923. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121923>

Mnasri, F., 2016. *Etude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes: application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments*. Université de Lorraine, France.

Moreira, A., António, J., Tadeu, A., 2014. Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. *Cem. Concr. Compos.* 49, 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012>

Nguyen, L.H., 2013. Bétons de structures à propriétés d'isolation thermique améliorée: Approche expérimentale et modélisation numérique. These de doctorat - Université de Cergy-Pontoise, France.

Novais, R.M., Senff, L., Carvalheiras, J., Seabra, M.P., Pullar, R.C., Labrincha, J.A., 2019. Sustainable and efficient cork - inorganic polymer composites: An innovative and eco-friendly approach to produce ultra-lightweight and low thermal conductivity materials. *Cem. Concr. Compos.* 97, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.024>

Panesar, D.K., Shindman, B., 2012. Cement & Concrete Composites The mechanical , transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cem. Concr. Compos.* 34, 982–992. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>

Prusty, J.K., Patro, S.K., 2015. Properties of fresh and hardened concrete using agro-waste as partial replacement of coarse aggregate - A review. *Constr. Build. Mater.* 82, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.063>

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A.D., Promis, G., Laidoudi, B., Crigny, A., Dupre, B., Langlet, T., 2015. Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy Build.* 88, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>

Rode, C., Peuhkuri, R., Time, B., Svennberg, K., Ojanen, T., 2007. Moisture buffer value of building materials. *J. ASTM Int.* 4, 1–12.

Shea, A., Lawrence, M., Walker, P., 2012. Hygrothermal performance of an experimental hemp - lime building. *Constr. Build. Mater.* 36, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123>

Silva, S.P., Sabino, M.A., Fernandes, E.M., Correlo, V.M., Boesel, L.F., Reis, R.L., 2005. Cork: Properties, capabilities and applications. *Int. Mater. Rev.* <https://doi.org/10.1179/174328005X41168>

Sing, K.S.W., Everett, D.H., Haul, R.A.W., Moscou, L., Pierotti, R.A., Rouquérol, J., Siemieniewska T, 1984. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure Appl. Chem.* 57, 603–619. <https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac198557040603>

Traoré, Y., Messan, A., Hannawi, K., Gerard, J., Prince, W., Tsobnang, F., 2018. Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical properties of lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 161, 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.155>

Vauge, C., 2014. Sustainable development, a new challenge for humanism. *Int. Rev. Educ.* 60, 327–338. <https://doi.org/10.1007/s11159-013-9366-0>

Wang, C., Lai, Y., Zhang, M., Li, S., 2019. A generalized thermal conductivity model of geomaterials based on micro-structures. *Acta Geotech.* 14, 1423–1436. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0728-4>

Ziregue, A., Khenfer, M.M., Quéneudec-T'Kint, M., Montrelay, N., 2016. Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *J. Adhes. Sci. Technol.* 30, 934–946. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1129882>

Communications

- Abbas, M., 2013. Incidence économique des feux de forêts sur les subéraies, in: Journées d'étude Sur La Réhabilitation Des Suberaies Incendrées et Reboisement. Tlemcen, Algérie, p. 37.
- Bouhraoua, R.T., 2014. Le chêne-liège face au feu de 2012: Etat des lieux de 2 années après: Cas de l'Algérie Par, in: Vivexpo. Vives, Portugal, p. 46.
- Garavaglia, V., Besacier, C., 2012. State of Mediterranean forests, in: Vivexpo. Vives, Portugal, p. 21.
- Manuel, C., 2012. Amorim Isolamentos, S.A., in: Vivexpo. p. 71.
- Thellier, F, MONCHOUX Fr, et BEDRUNE JP., 2012. « Le confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant ! » Dans : Bâtiment-Énergie. JEEA 2012. Université de Cergy Pontoise

Thèses

- Batier, C., 2016. Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen: D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales. These de doctorat - Université de Montpellier, France.
- Belleudy, C., 2016. Modélisation des transferts d'air et leur impact sur le comportement hygrothermique de l'enveloppe des bâtiments. These de doctorat - Université Grenoble Alpes, France.
- Bennai, F., 2018. Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé. These de doctorat - Université de La Rochelle, France.
- Berger, J., 2014. Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments: Application des méthodes de réduction de modèle. These de doctorat- Université de Grenoble, France.
- Brouard, Y., 2018. caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat. Université de Tours, France.
- Cérézo, V., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. These de doctorat - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Chabannes, M., 2015. Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction. These de doctorat - Université de Montpellier, France.
- Chamoin, J., 2013. Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. These de doctorat - Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France.
- Delannoy, G., 2019. Durabilité d'isolants à base de granulats végétaux. These de doctorat - Université Paris-Est, France.

Ferroukhi, M.Y., 2015. Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité. These de doctorat - Université de La Rochelle, France.

Issaadi, N., 2016. Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste. These de doctorat - Université de La Rochelle, France.

Nozahic, V., 2012. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal : application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce /. These de doctorat - UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT II, France.

Rahim, M., 2015. Analyse et caractérisation du comportement hygrothermique de parois agro-sourcées à l'échelle 1 : expérimentation et modélisation. Université de Picardie Jules Verne, France.

Sotehi, N., 2010. Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. These de doctorat - Université Mentouri-Constantine, Algérie.

Umurigirwa-Vasseur, B.S., 2014. Elaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre- amidon pour le Bâtiment. These de doctorat - Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, France.

Normes

BS EN 1008, 2002. Mixing water for concrete — Specification for sampling , testing and assessing the suitability of water , including water recovered from processes in the concrete industry , as mixing water for concrete.

BS EN ISO 12571, 2000. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties.

BS EN ISO 12572, 2001. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties.

AFPC-AFREM, 2007. Durabilité des bétons : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte rendu des Journées Techniques.

BS EN 1097-3, 1998. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids, British Standard Institution.

BS EN 12504-4, 2004. Testing concrete — Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, British Standard Institution.

ASTM C 1585-04, 2004. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. Am. Soc. Test. Mater. 1–6.

BS EN 12350-2, 2009. Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test, British Standard Institution.

BS EN 12390-3, 2009. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.

BS EN 12390-5, 2009. Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test

specimens, British Standard Institution.

BS EN 12390-7, 2009. Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete, British Standard Institution.

BS EN 933-1, 2012. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1 : Determination of particle size distribution – Sieving method, British Standard Institution.

BS EN 1097-6, 2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption.

Rapports

Ameziane, S., Collet, F., 2017. Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM. Springer.

APRUE, 2017. FINAL ENERGY CONSUMPTION - Key figures (en français).

Beaussire, C., 2020. Commande publique et matériaux biosourcés.

Brundtland, 1987. Rapport Brundtland - Notre avenir à tous, Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies.

Conforto, E., 2019. Formation MEB: Microscopie Électronique à Balayage, Microanalyse-X & EBSD. La Rochelle, France.

Denis Lucas, R., 2015. Eco-guide des matériaux pour une construction durable.

Dutreix, N., Baecher, C., Laulan, G., Lacoste, T., Gandara, A., 2020. Les matériaux de construction biosourcés dans la commande publique.

GIEC, 2014. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse.

IEA, 2020. Key World Energy Statistics, International Energy Agency.

Nomadéis, Rémy, J., 2020. Biosourcés & géosourcés.

Ouvrages

Beguin, D., 2006. Guide de l'écoconstruction, AREL, ADEM. ed.

Gil, L., 2008. Cork as building material, Portuguese. ed. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican05021885-7774csupp>

Ingrand, E., Michaud, F., Boutin, J.-L., 2013. Le chanvre Poitevin pour le bâtiment: Guide d'application.

Martin, J.-Y., 2002. Développement durable? Doctrines, pratiques, évaluations, IRD Editions. ed, Nature Sciences Sociétés. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.6757>

Pereira, H., 2007. Cork: Biology, Production and Uses, Cork: Biology, Production and Uses. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52967-1.X5000-6>

Roulet, C.-A., 2008. Conditions de confort et de logement sain.