

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

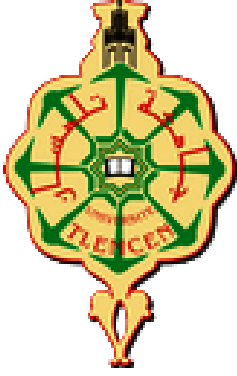
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structure

Par : DIB Mohammed Riad et AMARA Abdelkarim

Sujet

Influence du mode de malaxage sur les propriétés du béton de liège

Soutenu publiquement, le 25 / 06 / 2018, devant le jury composé de :

M. CHERIF E.H.	Chargé de cours	Univ. Tlemcen	Président
M. GHOMARI F.	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. TALEB O.	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Melle. SAIL L.	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Examineur 1
M. TOUIL B.	Maître de conférences B	Univ. Saida	Examineur 2
M. BOUHRAOUA R.T.	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité 1
M. TEDJDITI A.K.	Doctorant	Univ. Tlemcen	Invité 2

After climbing a great hill, one only finds that there are many more hills to climb.

Nelson Mandela

Remerciements

Ce projet a été élaboré au sein du laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE) de la faculté de technologie de l'université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen. Ce travail n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, de plusieurs personnes.

Tout d'abord, nous adressons nos remerciements à nos encadrants **M. Ghomari Fouad** (*Professeur à l'université de Tlemcen et directeur du laboratoire EOLE*) et **M. Taleb Omar** (*Maitre de conférences à l'université de Tlemcen*) pour la confiance et le soutien qu'ils nous ont accordés le long de ce travail. Nous les remercions infiniment pour le partage de leur brillant savoir, leur modestie et leur précieux conseils qui ont conduit au succès de cette étude.

Nous tenons à remercier les membres de jury : **Melle Sail Latifa** (*Maitre de conférences à l'université de Tlemcen*) et **M. Touil Brahim** (*Maitre de conférences à l'université de Saida*) d'avoir accepté d'évaluer notre travail et **M. Cherif El Hacene** (*Chargé de cours à l'université de Tlemcen*) d'avoir accepté de présider ce jury.

Nous adressons nos remerciements à **M. Tedjditi Ahmed Kamel** (*Doctorant à l'université de Tlemcen*) de nous avoir aidés et d'avoir participé à la progression et l'achèvement de ce mémoire. Nous avons travaillé ensemble sans compter les heures. Nous le remercions également pour son amabilité.

Nous remercions tous les membres du laboratoire EOLE.

Nous tenons aussi à remercier tous les enseignants du département de génie civil, qui nous ont suivi durant notre formation.

Nous adressons nos vifs remerciements à nos familles qui nous ont soutenus et encouragés. Nous remercions plus précisément, nos parents, nos grand-parents et nos frères et sœurs. Leurs prières et leurs encouragements, nous ont aidé à surmonter tous les obstacles.

Nous tenons à remercier tous nos amis ainsi que tous les étudiants de la promotion STR (2017-2018).

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Le malaxage du béton a pour objectif de mélanger un ensemble de constituants afin d'obtenir un mélange homogène. L'intégration d'un constituant de nature végétale et de faible densité « le liège » dans le béton, pose la question de l'homogénéité d'un tel mélange. Ce travail a donc pour objectif d'étudier l'influence du mode de malaxage sur les propriétés d'un éco-béton à base de liège.

Cette étude a nécessité une caractérisation des matériaux utilisés. C'est une étape indispensable pour la formulation de notre béton de référence. La composition de ce dernier est déterminée avec la méthode de Dreux-Gorisse. Ainsi, nous avons réussi à obtenir des bétons de liège en substituant un volume de granulats de sable et graviers par un volume de granulats de liège ayant les mêmes classes granulaires. Nous avons effectué dans un premier temps, une variation des paramètres de malaxage (ordre d'introduction des constituants, temps de malaxage et outil de malaxage) sur un béton où les granulats minéraux sont substitués à 50% par les granulats végétaux. Après optimisation de ces paramètres de malaxage, nous avons procédé à la substitution des granulats minéraux dans les pourcentages suivants : 25, 75 et 100%. L'ensemble des formulations testées ont fait l'objet d'une caractérisation à l'état frais (ouvrabilité au cône d'Abrams et essai rhéologique) et à l'état durci à 28 jours (masse volumique, résistance à la compression et la traction par flexion).

Finalement, l'analyse des résultats nous a permis de constater que l'augmentation du pourcentage de liège a une incidence directe sur l'affaiblissement de l'ensemble des caractéristiques du béton. En revanche, le mode de malaxage influe peu sur les propriétés du béton de liège à l'état durci, principalement la résistance mécanique à la compression. Cependant, le mode de malaxage a une influence importante sur le béton de liège à l'état frais.

Mots clés : Liège, Béton allégé, Malaxage, Rhéologie, Résistance mécanique.

ملخص

إن الغرض من خلط الخرسانة هو الحصول على مادة متجانسة بعد خلط مجموعة من المكونات. إن دمج مكون ذو طبيعة نباتية وذو كثافة منخفضة "الفلين" يطرح تساؤلات حول انسجامه في الخلطة الخرسانية. يهدف هذا العمل إذا إلى دراسة تأثير طريقة الخلط على خواص الخرسانة الاقتصادية القائمة على الفلين.

تطلبت هذه الدراسة وصف المواد المستخدمة والتي تعتبر خطوة أساسية لصياغة الخرسانة المرجعية الخاصة بنا. لقد قمنا بتحديد تركيبة هذه الأخيرة باستخدام طريقة « Dreux-Gorisse ». وهكذا نجحنا في الحصول على خرسانة الفلين عن طريق استبدال حجم من الرمل والحصى بحجم من نفس الفئات من حبوب الفلين. في الأول أجرينا تنوعاً لعوامل الخلط (ترتيب إدخال المكونات، مدة الخلط وأداة الخلط) على الخرسانة التي تحتوي على 50٪ من الفلين. في الخطوة الثانية وبعد تحسين عوامل الخلط قمنا باستبدال الرمل والحصى على النسب التالية 25، 75 و 100٪. كان الهدف من جميع التشكيلات الخرسانية هو دراسة خصائص الخرسانة في حالتها الطازجة (الركود والريولوجيا) ثم في حالتها الصلبة بعد 28 يوماً (الكثافة، قوة الضغط وقوة الشد عن طريق الانحناء).

في الأخير، بين تحليل النتائج أن الزيادة في نسبة الفلين لها تأثير مباشر في إضعاف جميع خصائص الخرسانة. في المقابل أظهرت النتائج أن أسلوب الخلط له تأثير ضئيل على خصائص خرسانة الفلين في الحالة الصلبة خاصة المقاومة الميكانيكية للضغط في حين أن نمط الخلط له تأثير كبير على خرسانة الفلين في الحالة الطازجة.

الكلمات المفتاحية: الفلين، الخرسانة المخففة، الخلط، الريولوجيا، المقاومة الميكانيكية.

Abstract

The purpose of concrete-mixing is to get an homogeneous material after mixing a set of constituent. The introduction of a vegetal granulates which presents a low density, causes questions about its compatibility in the concrete mix. Therefore, this study aims to study the influence of the mixing mode on the properties of a cork-based eco-concrete.

This project required a characterization of the used materials. It is an essential step for the formulation of our reference concrete. Its composition is defined with the Dreux-Gorisse method. Thus, we succeeded in obtaining cork concretes by substituting a volume of sand and gravel by a volume of cork aggregates having the same granulates classes. Firstly, we carried out a variation of the mixing parameters (introduction order of the constituents, mixing time and mixing tool) on a concrete with 50% of cork substitution. All the formulations tested were the subject of concrete characterization in the fresh (slump & rheology) and hardened states at 28 days (density, compressive strength and flexural tensile).

Finally, the analysis of the results showed that the increase in the percentage of cork has a straight impact on the weakening of all the characteristics of the concrete. In contrast, the mixing mode has a little effect on the properties of the cork concrete in the hardened state, mainly the compressive strength. However, the mixing mode has a significant influence on the fresh properties of cork concrete.

Key words: cork, Lightweight Concrete, Mixing, Rheology, Mechanical strength.

Sommaire

Sommaire	VII
Liste des Figures	XI
Liste de Tableaux.....	XV
Introduction générale.....	1
Chapitre I	3
Etat de l'art.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Le bâtiment et l'énergie	4
I.2.1. Développement durable et conséquences.....	4
I.2.2. Consommation énergétique.....	5
I.2.3. Participation énergétique du secteur bâtiment.....	6
I.3. L'isolation thermique dans le bâtiment	7
I.3.1. Isolation par l'intérieur.....	8
I.3.2. Isolation par l'extérieur	9
I.3.3. Isolation intégrée au matériau porteur.....	9
I.4. Les bétons légers	9
I.4.1. Généralités	9
I.4.2. Types des bétons légers	10
I.4.3. Propriétés des bétons légers.....	11
I.4.4. Littérature sur les bétons allégés	12
I.5. Le liège.....	13
I.5.1. Localisation du chêne liège	13
I.5.2. Provenance du liège	15
I.5.3. Structure du liège	16
I.5.4. Composition chimique du liège.....	16
I.5.5. Propriétés du liège	18

I.5.6. Béton de liège.....	19
I.6. Conclusion	20
Chapitre II	21
Malaxage et Rhéologie	21
II.1. Introduction.....	22
II.2. Malaxage des bétons ordinaires	22
II.2.1. Généralités	22
II.2.2. Rôle des constituants de béton.....	23
II.2.3. Malaxage	26
II.3. Malaxage des bétons légers	30
II.3.2. Béton de liège.....	31
II.4. Rhéologie.....	32
II.4.1. Contrainte de cisaillement τ [Pa]	32
II.4.2. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s^{-1}].....	33
II.4.3. Viscosité μ [Pa.s]	33
II.4.4. Seuil de cisaillement τ_0 [Pa].....	33
II.4.5. Comportement rhéologique.....	33
II.4.6. Rhéomètre à béton	34
II.4.7. Méthode de Lanos.....	35
II.5. Conclusion	35
Chapitre III	37
Matériaux et Méthodes.....	37
III.1. Introduction.....	38
III.2. Caractérisation des matériaux	38
III.2.1. Eau	38
III.2.2. Ciment	39
III.2.3. Adjuvants.....	39

III.2.4. Granulats minéraux	41
III.2.5. Granulats végétaux.....	45
III.3. Composition du béton.....	48
III.3.1. Béton de référence.....	49
III.3.2. Bétons de liège	49
III.3.3. Fabrication des éprouvettes.....	51
III.4. Caractérisation du béton à l'état frais.....	52
III.4.1. Mesure de la consistance	52
III.4.2. Rhéologie.....	53
III.5. Caractérisation du béton à l'état durci	54
III.5.1. Mesure de la résistance mécanique à la compression.....	54
III.5.2. Mesure de la résistance à la traction par flexion	56
III.5.4. Homogénéité.....	56
III.6. Conclusion	57
Chapitre IV.....	59
Résultats et Discussion.....	59
IV.1. Introduction	60
IV.2. Méthodologie.....	60
IV.3. Influence de l'ordre d'introduction.....	63
IV.3.1. A l'état frais	63
IV.3.2. A l'état durci.....	64
IV.3.3. Homogénéité.....	65
IV.3.4. Interprétation des résultats	66
IV.4. Influence du temps de malaxage	67
IV.4.1. L'état frais.....	67
IV.4.2. A l'état durci.....	68
IV.4.3. Homogénéité.....	68

IV.3.4. Interprétation des résultats	70
IV.5. Influence de l'outil de malaxage	70
IV.5.1. L'état frais.....	70
IV.5.2. A l'état durci.....	72
IV.5.3. Homogénéité.....	72
IV.5.4. Interprétation des résultats	74
IV.6. Application : Evolution des propriétés des bétons en fonction du pourcentage de liège.....	74
IV.6.1. A l'état frais	74
IV.6.2. A l'état durci.....	76
IV.6.3. Homogénéité.....	81
IV.7. Conclusion	82
Conclusions et Perspectives	83
Annexe 1.....	85
Références bibliographiques	86

Liste des Figures

Figure I.1 : Consommation énergétique au niveau mondial (IEA, 2017).	6
Figure I.2 : Les plus grandes utilisations finales de l'énergie au monde par secteur (IEA, 2017)	6
Figure I.3 : Répartition de la consommation finale d'énergie en Algérie par secteur d'activité (APRUE, 2015a).	7
Figure I.4 : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation (Beguin D, 2006)...	8
Figure I.5 : Représentation schématique des différents types de bétons légers (Cerezo V, 2005).....	10
Figure I.6 : Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen (Benazza Bouregba M, 2017).....	13
Figure I.7 : Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen occidental (Garavaglia V et Besacier C, 2012).....	14
Figure I.8 : Aire de réparation du chêne liège en Algérie (Bouhraoua R, 2014).	14
Figure I.9 : Structure cellulaire du liège (Silva S P et al., 2005).	16
Figure I.10 : Représentation schématique de la disposition cellulaire d'une section de liège (Silva S P et al., 2005).	16
Figure I.11 : Détail des parois de la structure cellulaire du liège montrant ses principaux composants (Silva S P et al., 2005).....	18
Figure II.1 : Composition du béton ordinaire.....	22
Figure II.2 : Composition des nouveaux bétons.	23

Figure II.3 : Variation de l'ouvrabilité des bétons en fonction du dosage en eau, (Ngoc D L, 2007).	24
Figure II.4 : Variation des paramètres rhéologiques du béton en fonction du dosage en eau, (Ngoc D L, 2007).	25
Figure II.5 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du dosage en eau, (Ngoc D L, 2007).	25
Figure II.6 : Variation des paramètres rhéologiques du béton en fonction du dosage en superplastifiant (Ngoc D L, 2007)	26
Figure II.7 : Variation de la densité des mélanges en fonction du temps de malaxage, (Ngoc D L, 2007).	28
Figure II.8 : Matériel de malaxage des bétons.	28
Figure II.9 : Malaxage en deux phases, (Ngoc D L, 2007).	29
Figure II.10 : Courbes reflétant le comportement rhéologique de divers fluides, (Benaïcha M, 2013).	34
Figure II.11 : Rhéogramme du corps Newtonien et de Bingham, (Benaïcha M, 2013).	34
Figure III.1 : Caractérisation de la masse volumique apparente du ciment.	39
Figure III.2 : Superplastifiants utilisés pour les bétons confectionnés.....	40
Figure III.3. Essai d'étalement au mini-cône.	40
Figure III.4 : Courbes d'étalement au mini cône en fonction de la teneur en adjuvant.....	41
Figure III.5 : Courbes granulométriques des trois granulats testés.	42
Figure III.6 : Essais de caractérisation physique des granulats testés,	42
Figure III.7 : Table à secousses et piston de 20 Kg (méthode LPC n°61).....	43
Figure III.8 : Absorption des granulats minéraux	44
Figure III.9 : Foisonnement du sable	45

Figure III.10 : Classes de granulats de liège utilisés.	45
Figure III.11 : Courbes d'analyse granulométrique des granulats de liège utilisés.....	46
Figure III.12 : Méthode du ballon.....	47
Figure III.13 : Immersion des échantillons de liège dans l'eau pendant 24h.....	48
Figure III.14 : Mise en œuvre des bétons dans leurs moules	51
Figure III.15 : Conservation des éprouvettes au laboratoire par immersion dans l'eau.	52
Figure III.16 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	52
Figure III.17 : Mesure des caractéristiques rhéologiques des bétons étudiés.....	53
Figure III.18 : Pesée des éprouvettes en béton.....	54
Figure III.19 : Essai de compression des éprouvettes cylindriques du béton.	55
Figure III.20 : Essai de traction par flexion du béton	56
Figure III.21 : Cisaillement des éprouvettes avec la scie à béton	57
Figure III.22 : Eprouvettes cylindriques en béton de liège coupées en six morceaux.....	57
Figure IV.1 : Ordres d'introduction des constituants du béton à base de 50% de liège.	61
Figure IV.2 : Différents outils de malaxage testés,.....	61
Figure IV.3 : Organigramme du programme expérimental.....	62
Figure IV.4 : Ouvrabilité des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur.....	63
Figure IV.5 : Résistances mécaniques conventionnelles des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur.	64
Figure IV.6 : Ouvrabilité des bétons à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage.	67
Figure IV.7 : Résistances mécaniques conventionnelles des bétons à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage.....	68

Figure IV.8 : Ouvrabilité des bétons à base de 50% de liège en fonction du moyen de malaxage utilisé.....	71
Figure IV.9 : Bétons à l'état frais confectionnés à l'aide des différents outils de malaxage. ..	71
Figure IV.10 : Résistances mécaniques conventionnelles des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'outil de malaxage.....	72
Figure IV.11 : Ouvrabilité mesurée au cône d'Abrams, des différentes bétons testés.	75
Figure IV.12 : Influence des paramètres rhéologiques des différents bétons testés en fonction du taux de granulats de liège substitué.....	76
Figure IV.13 : Masse volumique en fonction des bétons testés en fonction du pourcentage de liège substitué.	77
Figure IV.14 : Flottement du béton à base de granulats végétaux (à 100 %).	77
Figure IV.15 : Eprouvettes à fort taux de substitution de granulats de liège ($\geq 75\%$).....	78
Figure IV.16 : Résistance à la compression à 28 jours des bétons de liège en fonction du pourcentage de liège substitué.....	79
Figure IV.17 : Résistance à la flexion à 28 jours des bétons de liège en fonction du pourcentage de liège substitué.....	80
Figure IV.18 : Résistance à la compression à 28 jours des bétons de liège en fonction de la masse volumique.....	80

Liste de Tableaux

Tableau I.1 : Superficie, en hectares, des principales essences forestières en Algérie (Benazza Bouregba M, 2017).....	15
Tableau I.2 : Pourcentages massiques des différents constituants du liège (Boulahia H, 2016).....	17
Tableau III.1 : Composition chimique de l'eau utilisé.	38
Tableau III.2 : Masses volumiques du ciment CPJ-CEM II/A utilisé.....	39
Tableau III.3 : Masses volumiques des granulats minéraux utilisés.	43
Tableau III.4 : Compacité des granulats minéraux.	43
Tableau III.5 : Propreté des granulats utilisés.	44
Tableau III.6 : Coefficient d'absorption des granulats minéraux utilisés.....	44
Tableau III.7 : Masses volumiques des granulats végétaux.	47
Tableau III.8 : Compacité des granulats végétaux.....	47
Tableau III.9 : Coefficients d'absorption des granulats de liège utilisés.....	48
Tableau III.10 : Composition d'un mètre cube du béton de référence.	49
Tableau III.11 : Désignation des différentes formulations.....	50
Tableau III.12 : Composition des mélanges.....	51
Tableau IV.1 : Classes du temps de malaxage.....	60
Tableau IV.2 : Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur.	66
Tableau IV.3 : Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des bétons à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage.	69

Tableau IV.4 : Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'outil de malaxage.	73
Tableau IV.5 : Effet de la maturation dans l'eau des éprouvettes de bétons de liège.	78
Tableau IV.6 : Classification fonctionnelle des bétons légers selon RILEM	79
Tableau IV.7. Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des divers bétons de liège.	81

Introduction générale

Contexte d'étude

Nombreux sont les pays qui se sont inscrits dans la démarche du développement durable et ratifier le protocole de Kyoto (Japon, 1997) sur les changements climatiques et continuent à participer aux Conférences des Parties (COP¹) qui ont été récemment organisées à Marrakech au Maroc (COP22, 2016), à Bonn en Allemagne (COP23, 2017) et Katowice en Pologne, (COP24, 2018) sous l'égide des Nations Unies, afin de participer à l'effort global qui consiste à réduire l'émission des Gaz à effet de serre (GES).

L'Algérie adhère à cette démarche en s'engageant, à l'horizon 2030, à réduire jusqu'à 9% de sa consommation énergétique. Cet engagement est accompagné d'une série d'actions qui relèvent de la stratégie du gouvernement algérien à trouver les alternatives nécessaires dans les programmes quinquennaux qui se succèdent. Dans ce contexte, l'Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Energie (APRUE) qui a pour mission principale, la mise en œuvre de la politique nationale de maîtrise de l'énergie à travers la promotion de l'efficacité énergétique, a lancé des programmes dédiés aux secteurs fortement énergivores ; on cite à titre d'exemple le programme Eco-Bat pour le secteur résidentiel où selon les statistiques de l'APRUE, ce secteur est à l'origine de 36% de la consommation d'énergie finale en Algérie. Le programme Eco-Bat porte sur la réalisation de 600 logements à haute performance énergétique par l'OPGI² dont l'objectif est l'amélioration du confort thermique dans les logements et la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation.

En vue de s'associer à cet effort national sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment, le présent travail, à dominante expérimental, s'inscrit dans le cadre des activités de recherche du laboratoire EOLE³ et précisément de l'équipe n° 3 dont l'un des sujets d'intérêts est l'étude et la promotion des éco-matériaux. Puisque le concept de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment s'appuie sur l'isolation thermique des bâtiments, une thèse de doctorat est lancée en 2017 pour développer un éco-béton à matrice végétale, dont l'utilisation potentielle est la réalisation de matériaux de construction destinés à l'amélioration de l'isolation des enveloppes de bâtiments. Il est clair, que l'isolation thermique des bâtiments peut être rapportée (isolation par l'intérieur ou par l'extérieur, avec l'utilisation de matériaux synthétiques ou naturels) ou intégrée (consiste à utiliser des matériaux légers).

¹ **COP** : Conférence des parties de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (en anglais : Conference of Parties),

² **OPGI** : Office de Promotion et de Gestion Immobilières,

³ **EOLE** : Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (laboratoire n°5 de l'université de Tlemcen).

Objectif

Ce projet a pour objectif d'intégrer dans la masse du béton ordinaire, des granulats de liège produits par des entreprises nationales. On s'attend à avoir une remontée des granulats légers lors de l'action de malaxage du béton par rapport aux granulats conventionnels ; le résultat au final serait un béton de nature hétérogène. Le défi à relever consiste à identifier les moyens et les outils qui permettent l'obtention d'un mélange homogène, connaissant le gradient de densité entre les granulats issus de roches naturelles et les granulats de liège issus du règne végétal.

Moyens et Programme expérimental

Il s'agit d'utiliser les moyens expérimentaux du laboratoire EOLE et du laboratoire de matériaux de construction (MDC) de la faculté de Technologie de l'université de Tlemcen ; notamment ceux qui participent à la réalisation du programme expérimental que nous avons adopté. Il s'agit de rechercher le meilleur compromis en étudiant les paramètres liés au malaxage des matériaux granulaires comme l'outil de malaxage, le temps de malaxage ou l'ordre d'introduction des matériaux dans le malaxeur. Il s'agit ensuite d'identifier les caractéristiques physiques et rhéologiques des divers mélanges composites à l'état frais ainsi que les caractéristiques physico-mécaniques de ces mélanges à l'état durci. Ces mélanges sont obtenus en substituant graduellement les granulats minéraux par les granulats de liège.

Chapitre I

Etat de l'art

Contenu

I.1. Introduction.....	4
I.2. Le bâtiment et l'énergie.....	4
I.3. L'isolation thermique dans le bâtiment.....	7
I.4. Les bétons légers.....	9
I.5. Le liège.....	13
I.6. Conclusion.....	20

I.1. Introduction

Le phénomène du dérèglement climatique, a contraint le secteur résidentiel, connu pour être énergivore, à développer des programmes permettant la maîtrise de la consommation énergétique. La réflexion autour de l'utilisation des bétons légers et particulièrement ceux à base de granulats végétaux pour améliorer l'isolation thermique dans les bâtiments est une alternative pour une meilleure efficacité énergétique. Parmi les matériaux végétaux utilisés dans la fabrication des bétons légers, le liège qui semble être un matériau très intéressant grâce à la grande diversité de ses caractéristiques.

Dans ce premier chapitre, nous présentons dans un premier temps les concepts de base liés au contexte de notre étude. Nous indiquons pourquoi il est nécessaire de maîtriser l'énergie dans le secteur du bâtiment afin qu'il devienne énergétiquement efficace en se focalisant sur les avantages de l'isolation thermique. Par la suite, nous présentons une analyse bibliographique, les différents types de bétons légers ainsi que leurs propriétés. A la fin, nous nous focaliserons sur le matériau végétal : le liège, où nous mettons en évidence sa structure, sa composition chimique ainsi que ses propriétés et nous terminerons par la citation de quelques travaux réalisés sur les bétons à base de granulats de liège.

I.2. Le bâtiment et l'énergie

I.2.1. Développement durable et conséquences

Le changement climatique est devenu une des priorités des Nations Unies depuis plusieurs décennies. Les principales causes responsables de ce changement, selon plusieurs experts, sont l'exploitation des richesses de la terre de façon excessive conduisant à des émissions de gaz à effet de serre (GES), dans l'atmosphère. Le phénomène du changement climatique se manifeste de différentes manières, telles que : l'instabilité du régime des précipitations, les inondations, la sécheresse, les incendies des forêts, etc. De grandes catastrophes causant des désordres écologiques se manifestent de plus en plus actuellement et risquent de menacer sérieusement l'existence humaine. Le phénomène le plus redoutable, engendré par le changement climatique, est le réchauffement des eaux océaniques. Ce dernier cause une élévation du niveau des mers suite à la fonte des glaciers au niveau des calottes Nord et Sud. Selon (changement-climatique.fr), l'apparition des « réfugiés climatiques » aura lieu probablement pendant le 21^{ème} siècle. La meilleure façon pour remédier à ces phénomènes catastrophiques est de trouver des solutions écologiques au développement économique croissant, permettant ainsi de minimiser les impacts environnementaux. Le compromis de ces solutions est de garder le confort moderne tout en appliquant le principe de précaution qui était souvent négligé.

Le "développement durable", concept édicté en 1987 dans le rapport Brundtland, est la solution la plus répandue depuis la prise de conscience à l'échelle internationale de la nécessité d'agir contre le désastre du changement climatique. « Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland, 1987).

Le concept de développement durable est maintenant intimement lié à toutes les actions de développement humain ; notamment celles qui concernent les secteurs les plus énergivores et les plus polluants devant prendre en considération la préservation de l'environnement.

Ces secteurs portent atteinte à l'environnement soit par épuisement des richesses naturelles comme la destruction des forêts, l'exploitation des énergies fossiles, etc., soit par la pollution de l'atmosphère par les rejets des émissions des GES comme le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). Pour pallier à ces nuisances, la démarche du développement durable préconise la promotion et l'utilisation des énergies propres et renouvelables et la maîtrise énergétique. Les énergies renouvelables (EnR) sont :

- L'énergie solaire,
- L'énergie éolienne,
- La géothermie (la chaleur de la terre),
- L'énergie biomasse (issue des matières organiques),
- L'énergie hydraulique (courant marin, les marées et les chutes d'eau).

L'application de ces énergies renouvelables diminue l'amplification du réchauffement climatique en limitant les émissions polluantes et engendrant peu ou pas de déchets.

La maîtrise énergétique désigne le fait d'utiliser moins d'énergie qu'avant pour fournir des services énergétiques équivalents (2020energy.eu). Ce qui signifie que cette dernière vise à minimiser l'énergie pour avoir un résultat égal à celui d'avant et cela grâce au développement de la technologie.

I.2.2. Consommation énergétique

Vu l'accroissement démographique et les avancées technologiques que connaît le monde actuellement, la consommation énergétique se multiplie jour après jour. Selon l'International Energy Agency (IEA), la consommation en énergie a été doublée dans un intervalle d'environ 40 ans, entre 1973 et 2015 (IEA, 2017) (Figure I.1).

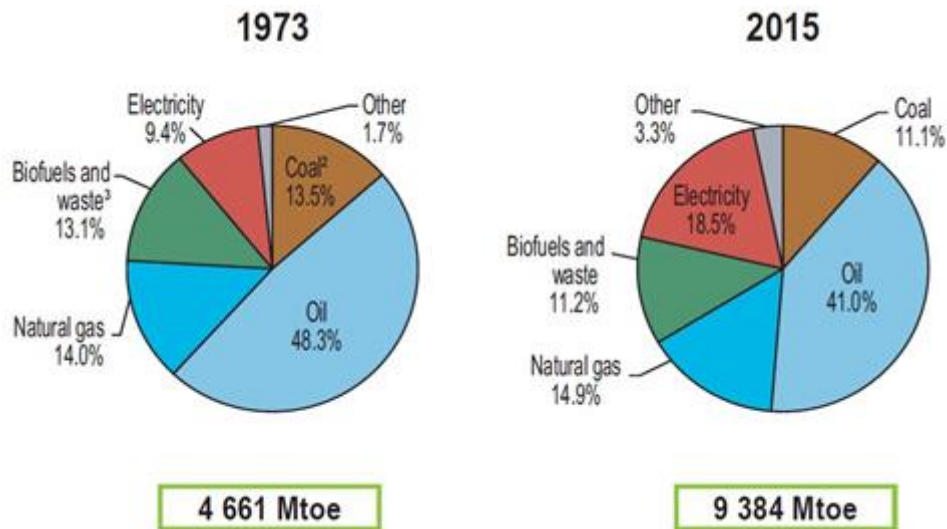


Figure I.1 : Consommation énergétique au niveau mondial (IEA, 2017).

I.2.3. Participation énergétique du secteur bâtiment

D'après l'IEA et à l'échelle internationale, le secteur résidentiel est classé en 3^{ème} position après le secteur du transport et le secteur de l'industrie dans le classement des secteurs les plus consommateurs d'énergie (Figure I.2) (IEA, 2017).

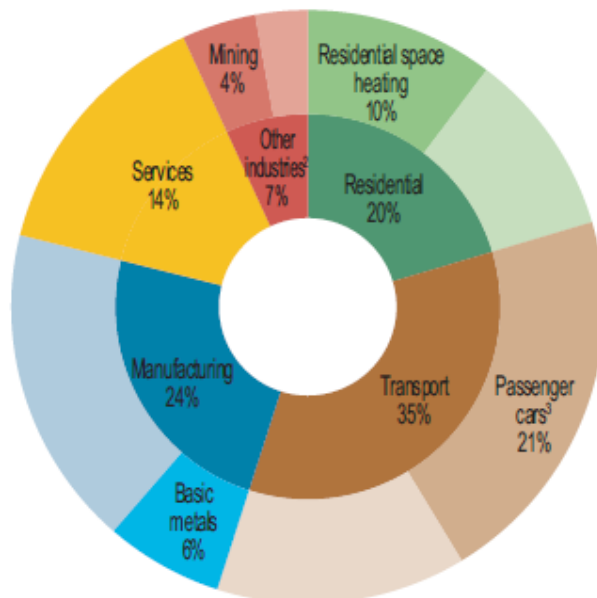


Figure I.2 : Les plus grandes utilisations finales de l'énergie au monde par secteur (IEA, 2017).

Quant à l'Algérie et selon l'APRUE, 36% de la consommation finale d'énergie est absorbée par le secteur résidentiel qui vient en deuxième position dans le classement des secteurs consommateurs d'énergie après le secteur du transport (APRUE 2015a) (Figure I.3).

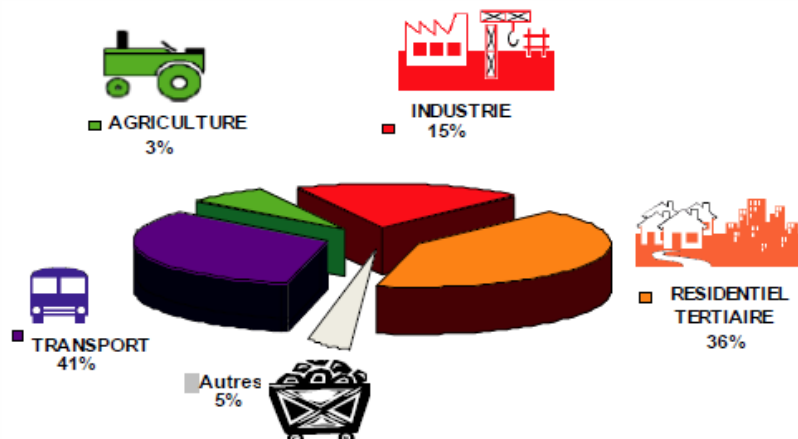


Figure I.3 : Répartition de la consommation finale d'énergie en Algérie par secteur d'activité (APRUE, 2015a).

L'Algérie a lancé une stratégie d'énergie verte en mettant en place un programme ambitieux de développement des EnR et d'efficacité énergétique en février 2011. Ce programme a été révisé en mai 2015 et a été placé au rang de priorité nationale en février 2016. La vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables, comme le solaire, et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Le programme d'efficacité énergétique doit réaliser des économies d'énergies de l'ordre de 63 millions de Tonne équivalent pétrole (TEP) à l'horizon 2030 pour l'ensemble des secteurs qui ont un impact significatif sur la demande d'énergie, à leur tête le bâtiment et le transport et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique, les chauffe eau solaires, etc. Il permettra également de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes.

Le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements. L'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie. Selon (APRUE, 2017b), d'ici 2030 plus de 30 millions de TEP seront économisées concernant le secteur bâtiment, dont l'objectif de l'isolation thermique est d'atteindre un gain cumulé évalué à plus de 7 millions de TEP.

I.3. L'isolation thermique dans le bâtiment

L'efficacité énergétique peut être appliquée dans le bâtiment par différentes méthodes, les plus efficaces sont :

- Une bonne conception architecturale,
- Un bon choix des matériaux de construction
- Une bonne isolation thermique.

La conception thermique dans un bâtiment réduit les déperditions de chaleur et économise des consommations d'énergie importantes pour le chauffage et la climatisation. De même, une bonne isolation thermique alliée à une bonne ventilation élimine les coûts d'entretien, les risques d'humidité et augmente la durée de vie de la maison (Beguin D, 2006).

En plus, des avantages de l'isolation thermique sur les plans environnemental et économique, l'isolation thermique offre un meilleur confort de vie aux habitants par leur protection d'une manière automatique et passive des facteurs climatiques tels que la pluie, le vent, le rayonnement solaire et le chaud ou froid de diverses parois.

Dans les bâtiments, on constate une surconsommation énergétique de 60% due aux déperditions de chaleur des toits et des murs. La Figure I.4 illustre la répartition des déperditions de chaleur dans une habitation non isolée. Les valeurs des déperditions thermiques sont approximativement de l'ordre de 30 % pour les toits, 25% pour les murs, 20% pour le renouvellement d'air, 13% pour les portes et fenêtres, 7% pour les sols et 5% pour les ponts thermiques. De ce fait, une remarquable réduction d'énergie dans une habitation peut être réalisée grâce à une bonne isolation des parois.

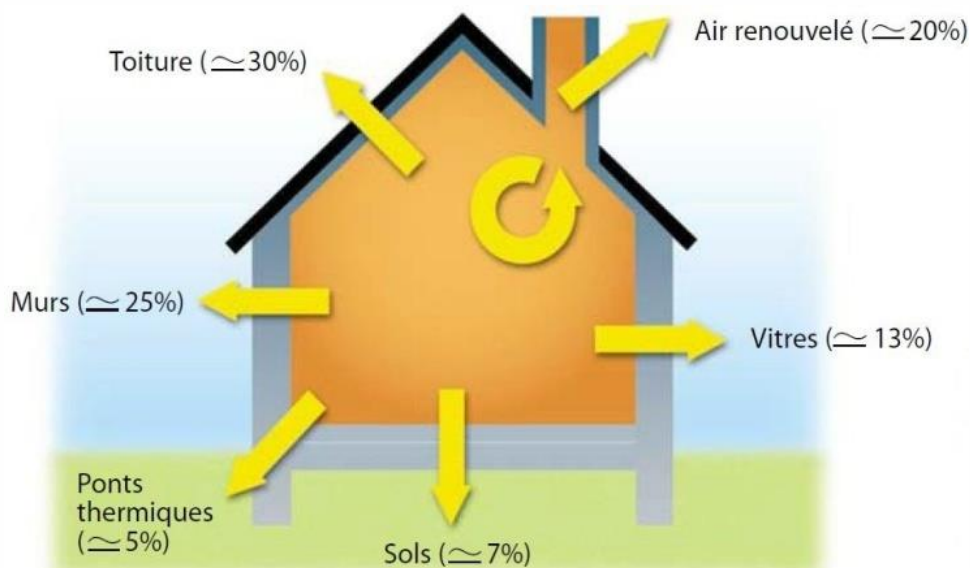


Figure I.4 : Répartition des déperditions thermiques dans une habitation (Beguin D, 2006).

Il existe trois types d'isolation des parois : l'isolation intérieure, l'isolation extérieure et l'isolation intégrée au matériau porteur.

I.3.1. Isolation par l'intérieur

C'est le type le plus facile, il ne nécessite que des travaux à l'intérieur du logement. Sa mise en œuvre est simple, il suffit de mettre l'isolant au niveau de la face intérieure du mur. Les seuls défauts de ce type d'isolation sont la réduction de l'espace intérieur et le traitement des ponts thermiques dus à cette isolation (Sotehi N, 2010).

I.3.2. Isolation par l'extérieur

Contrairement à l'isolation intérieure, l'isolation par l'extérieur consiste à mettre un isolant sur le côté extérieur du mur de l'habitation avec une épaisseur plus faible. Cette technique a l'avantage d'éliminer les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment et de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation. Cependant, elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices complexes. En outre, elle nécessite une protection contre les intempéries (Sotehi N, 2010).

Les deux types d'isolations, par l'intérieur et par l'extérieur, sont réalisés en utilisant de nombreux isolants et de différentes natures. Ces isolants sont classés en trois catégories :

- Isolants synthétiques,
- Isolants minéraux,
- Isolants d'origine végétale et animale.

On distingue le polystyrène (PS) et le polyuréthane (PU) dans la catégorie des isolants synthétiques. La laine de verre, la laine de roche et la perlite appartiennent à la catégorie des isolants minéraux. Cependant, les laines minérales sont déclarées cancérigènes par l'organisation mondiale de la santé (OMS).

Dans la catégorie des isolants végétaux, le chanvre, le lin, le coton, la paille, la laine de bois et le liège sont les plus utilisés. Les différents isolants précités peuvent être utilisés sous leurs forme naturelle ou issus des déchets industriels (Beguin D, 2006).

I.3.3. Isolation intégrée au matériau porteur

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure. Cette technique fait appel aux bétons légers qui sont connus par leur faible masse volumique et leur bonne isolation thermique. Cette méthode d'isolation performante et durable est généralement utilisée en construction neuve (Sotehi N, 2010).

I.4. Les bétons légers

I.4.1. Généralités

Le béton est le matériau de construction le plus employé. Il est composé d'un mélange de granulats minéraux rigides, de sable, de ciment et d'eau. Des adjuvants en faibles quantités peuvent être additionnés à cette formulation de base afin d'obtenir certaines qualités telle que la fluidité, l'accélération ou le retardement du temps de prise, etc. Des matériaux tels que les ronds d'acier peuvent y être intégrer pour améliorer les caractéristiques mécaniques du complexe.

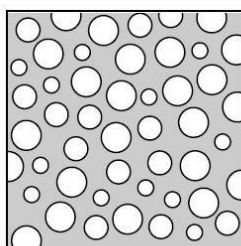
Grâce à ses propriétés performantes, le béton est consacré à une utilisation structurelle. Sa masse volumique élevée, qui varie de 2200 à 2600 Kg/m³, lui permet d'être un bon isolant acoustique. En revanche, c'est un matériau moins intéressant sur le plan de l'isolation thermique (Cerezo V, 2005). C'est la raison pour laquelle que de nouveaux bétons dits légers sont apparus. Les bétons légers ont une masse volumique beaucoup plus faible par rapport aux bétons traditionnels, généralement inférieur à 1800 Kg/m³ (Herihiri O, 2010). Ils offrent une isolation thermique supérieure à celle des bétons conventionnels, tout en gardant une certaine limite inférieure des performances mécaniques. Ces performances permettent à cette famille de béton d'éviter l'utilisation d'une isolation thermique supplémentaire (Cerezo V, 2005).

La faible masse volumique et la bonne isolation thermique sont les raisons principales pour lesquelles les bétons légers existent. Toutefois, les bétons légers présentent d'autres avantages tels que : la résistance au feu, la résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction (Agoumimelcha A et Ouannoughi B, 2017).

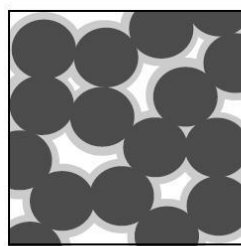
I.4.2. Types des bétons légers

Le béton léger est obtenu par diminution de la masse volumique, en remplaçant une quantité de la masse par une quantité d'air soit dans la forme générale, ou entre les gros granulats ou encore dans les granulats (Figure I.5). Pour chaque cas, on distingue un type de béton léger : (1) béton cellulaire, (2) béton caverneux et (3) le béton allégé.

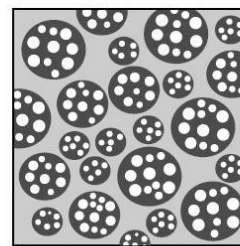
Le béton cellulaire est obtenu par incorporation des bulles d'air alors que le béton caverneux est obtenu par élimination des éléments fins. Pour le béton allégé, il est obtenu par substitution des granulats traditionnels par des granulats légers (Cerezo V, 2005).



(1) Béton cellulaire



(2) Béton caverneux



(3) Béton de granulats légers

Figure I.5 : Représentation schématique des différents types de bétons légers (Cerezo V, 2005).

I.4.3. Propriétés des bétons légers

Les principales propriétés des bétons légers sont les suivantes :

i., La porosité : le béton est constitué par des éléments solides et des vides. Des vides sont formés lors de la prise du ciment par l'apparition d'un volume d'air microscopique (air intra-liant). D'autres vides sont présents à l'intérieur des granulats, ce sont des vides intra-particules remplis d'air qui sont d'ailleurs la cause de la grande porosité des bétons légers (Cerezo V, 2005).

ii., La légèreté : la faible masse volumique est une caractéristique essentielle des bétons légers. Elle dépend du type et des proportions des granulats légers. Elle facilite la mise en œuvre lorsque le béton léger est manufacturé sous forme de parpaing. La faible masse volumique contribue aussi à la diminution du poids total du bâtiment (Cerezo V, 2005).

iii., La perméabilité à l'eau : La perméabilité est la capacité de passage d'un fluide au sein d'un matériau. Cette propriété existe seulement si le matériau possède beaucoup de pores connectés entre eux. La porosité et la perméabilité permettent le passage de l'eau sous forme liquide (absorption) ou vapeur (sorption). Les deux propriétés : porosité et perméabilité sont liées mais la première n'implique pas forcément la deuxième.

L'absorption est la migration d'un liquide de l'extérieur vers l'intérieur grâce au phénomène de remontée capillaire. Ce phénomène n'est possible que si les pores communiquent entre eux. Par exemple, dans le cas d'un béton cellulaire les pores ne sont pas reliés ce qui empêche le développement du phénomène d'absorption. Ceci dit, la sensibilité à l'eau d'un béton léger diffère en fonction des caractéristiques des granulats légers employés (Cerezo V, 2005).

iv., Propriété thermique : Cette caractéristique est évaluée par la conductivité thermique λ , qui est une grandeur intrinsèque du matériau. La conductivité thermique dépend des constituants et de la microstructure du béton léger. Une faible conductivité thermique dans un matériau indique que c'est un bon isolant. La conductivité thermique change avec la variation de la masse volumique. Si la masse volumique diminue, la conductivité diminue aussi (Cerezo V, 2005).

v., Propriété acoustique : L'isolation acoustique vise à limiter la transmission des sons de part et d'autre d'un matériau. Cette isolation est généralement réalisée par :

(1) Des matériaux de forte densité car leur inertie fait qu'ils sont plus difficilement mis en mouvement par les ondes acoustiques.

(2) La limitation de la transmission du son en imperméabilisant la surface du matériau.

(3) L'absorption en utilisant la capacité d'amortissement des sons par dissipation visqueuse (Cerezo V, 2005).

vi., Comportement et performance mécanique : La porosité des granulats légers cause une diminution de l'adhérence entre les granulats et le mortier, ce qui justifie leur faible résistance mécanique. Par conséquent, la fissuration se développe autour des grains. Une fois les granulats écrasés, le mortier finit par céder. Contrairement au béton de construction classique à base des granulats rigides, ce n'est pas la liaison entre le liant et le granulat léger qui s'annule mais c'est plutôt le grain qui se rompt.

Finalement, les résistances mécaniques à la compression, à la flexion et à la traction sont considérées comme des propriétés secondaires puisque l'utilisation des bétons légers n'est plutôt pas adaptée à une application structurelle. Cependant, un minimum de résistance mécanique reste nécessaire (Cerezo V, 2005).

Enfin, la densité, la résistance à la compression et la conductivité thermique ont une corrélation directe. Plus la densité diminue, la résistance à la compression et la conductivité thermique deviennent plus faible ce qui rend le matériau plus isolant. Ce résultat est justifié par une augmentation des pores à l'intérieur du béton.

I.4.4. Littérature sur les bétons allégés

Nous présentons, dans ce qui suit et de manière chronologique, les résultats de certains travaux de recherche réalisés sur des bétons allégés à base de particules végétales.

(Magniont C, 2010) a choisi d'utiliser deux types de fibres végétales dans le béton : fibre de chanvre et fibre de tournesol. Dans cette étude, deux applications ont été visées : la première est l'utilisation dans des plaques de parement ou comme un enduit projeté renforcé par des fibres végétales, la seconde, est la fabrication de blocs autoporteurs à isolation répartie incluant des granulats végétaux. L'auteur a montré que les performances des mélanges aux plus faibles masses volumiques sont compatibles avec une utilisation en isolation répartie. Ainsi, les valeurs de conductivité thermique des différentes formulations testées ont confirmé l'influence prépondérante de la masse volumique sur le pouvoir isolant de tels composites. Par contre, la nature des granulats n'a pas eu d'impact sur les résultats.

(Tran Le A D, 2010) a trouvé que la conductivité thermique d'un béton de chanvre à base d'amidon est inférieure à celle d'un béton de chanvre à base de ciment. De plus, c'est un bon régulateur hydrique.

(Glé P, 2013) a utilisé le béton de chanvre sous forme de plaque pour être utilisé comme isolant dans les toits, les sols et aussi comme des enduits. Il a effectué des essais de

résistance mécanique, des essais thermiques, acoustiques et de porosité. Ces essais ont montré que le béton de chanvre conduit à une bonne isolation thermique et absorption acoustique ayant été améliorée de 50%.

(Akkaoui A, 2014) a étudié le béton léger à base des granulats de bois. Son objectif est d'évaluer et d'analyser son comportement sous des sollicitations mécaniques et thermiques en variant le rapport de remplacement C/B (ciment/granulats de bois). Les résultats expérimentaux ont montré l'importance de la teneur en liant. Plus cette teneur en liant est élevée, meilleures sont les propriétés mécaniques (résistance en compression et module de Young). Par contre, les performances thermiques diminuent. Toutefois, il est à noter que les déformations de retrait de séchage ne semblent pas être influencées par la quantité de liant.

I.5. Le liège

I.5.1. Localisation du chêne liège

La forêt algérienne se situe sur la partie du nord du pays limitée par les montagnes de l'Atlas saharien avec une superficie de 4,1 millions d'hectares soit un taux de boisement de 16,4%. Néanmoins, seuls 1.3 millions d'hectares représentent véritablement la forêt. Elle fait partie de la forêt méditerranéenne, qui couvre environ 85 millions d'hectares soit 2% de la surface forestière mondiale. La forêt algérienne est constituée par une variété d'essences appartenant à la flore méditerranéenne, le chêne liège fait partie des subéraies typiques à cette région (Berriah A, 2014) (Figure I.6).



Figure I.6 : Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen (Benazza Bouregba M, 2017).

En termes de statistique, l'Algérie est parmi les pays qui disposent d'une importante forêt de chêne liège par rapport au total des subérais autour du bassin méditerranéen. Elle occupe la troisième place avec un pourcentage de 18% après le Portugal et l'Espagne (Garavaglia V et Besacier C, 2012) (Figure I.7).

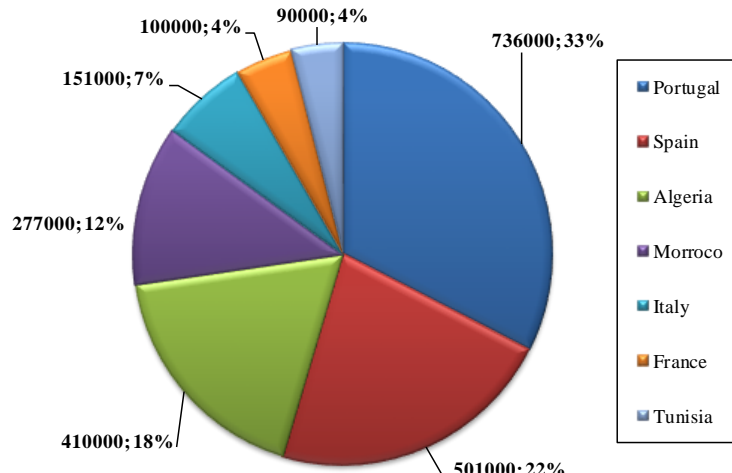


Figure I.7 : Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen occidental (Garavaglia V et Besacier C, 2012).

Le chêne liège domine les essences forestières algériennes après le Pin d'Alep (Tableau I.1). Il est localisé au nord algérien essentiellement dans le Tell Oriental jusqu'à la frontière tunisienne. La partie occidentale possède quelques aires isolées dont les plus importantes sont les monts de Tlemcen, de région d'Oran, Mascara, Ténès et l'Ouarsenis (Figure I.8).

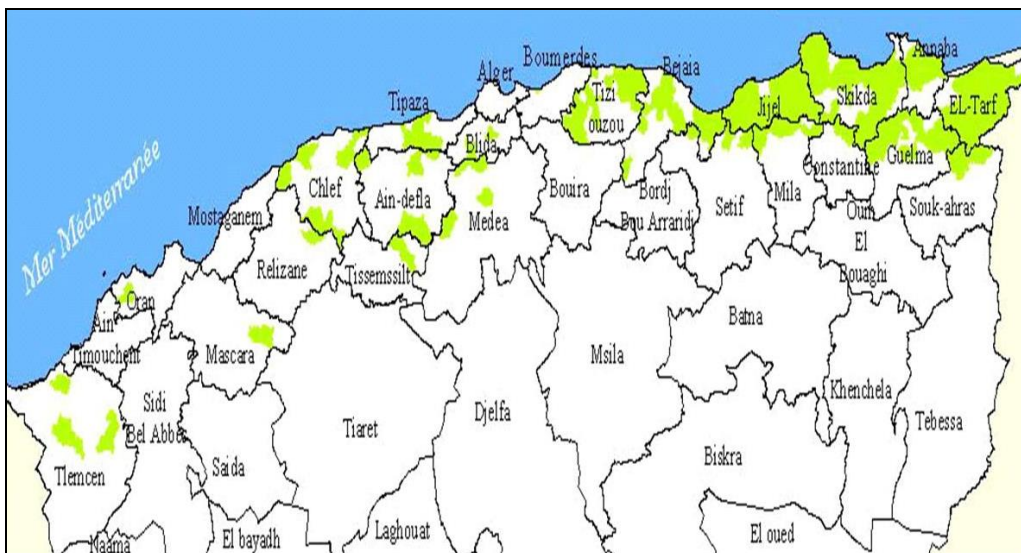


Figure I.8 : Aire de répartition du chêne liège en Algérie (Bouhraoua R, 2014).

Tableau I.1 : Superficie, en hectares, des principales essences forestières en Algérie (Benazza Bouregba M, 2017).

Essences forestières	1955 (BOUDY)	1985 (SEIGUE)	1997 (GHAZI et LAHOUATI)	2007 (DGF)
Pin d'Alep	852 000	855 000	800 000	881 000
Chêne liège	426 000	440 000	463 000	229 000
Chêne vert	679 000	680 000	354 000	108 000
Chêne zeen et afarès	-	67 000	65 000	48 000
Genévriers	279 000	-	217 000	-
Thuya de Berbérie	157 000	160 000	143 000	-
Cèdre de l'Atlas	45 000	30 000	12 000	16 000
Pin maritime	-	12 000	38 000	31 000
Spin de Numidie		300	-	-
Maquis	780 000	-	-	1 662 000

Le chêne liège est une essence forestière nécessaire pour l'équilibre environnemental. C'est un bon absorbant d'oxyde de carbone (CO₂). Grâce aux caractéristiques uniques de son écorce, il est considéré comme une barrière contre le feu. Après l'extraction du liège endommagé par le feu, la suberaie peut commencer un nouveau cycle de production de liège (Silva S P et coll., 2005).

I.5.2. Provenance du liège

Le liège est l'écorce du chêne liège, peut être récolté pour la première fois vers l'âge de 25 ans puis chaque 9-12 ans dès que l'arbre atteint 25 centimètres de diamètre ; c'est un matériau renouvelable. Durant les cycles de vie du chêne liège, qui peut vivre 200 à 500 ans, trois qualités de tissus subéreux sont distinguées : (1) Le liège male (ou le liège vierge) qui est de moindre qualité, (2) le premier liège de reproduction depuis la deuxième récolte et (3) le deuxième liège de reproduction depuis la troisième récolte et plus. Les deux dernières sont dites « liège femelle », qui sont de meilleure qualité. La qualité du liège s'améliore au fil des prélèvements au cours de la vie du chêne liège.

Le liège male est irrégulier dans sa structure, épais, dense et rugueux, n'ayant pas les qualités pour être commercialisé, il est utilisé pour la fabrication des panneaux isolants ou dans l'industrie des sandales. Le liège femelle, dès la première récolte est de meilleure qualité, il est beaucoup plus régulier, lisse et intact (Silva S P et coll., 2005).

I.5.3. Structure du liège

Le liège révèle une structure alvéolaire identique à celle d'un nid d'abeille avec une absence d'espaces intercellulaires (Figure I.9). Cette structure cellulaire contient entre 30 et 43 millions de cellules. Le tissu subéreux contient 89,7% de matière gazeuse (Pintus A, 2012).

Malgré l'orientation aléatoire des parois cellulaires latérales (parallèles à la direction radiale), le liège est considéré comme un matériau transversalement isotrope (Figure I.10).

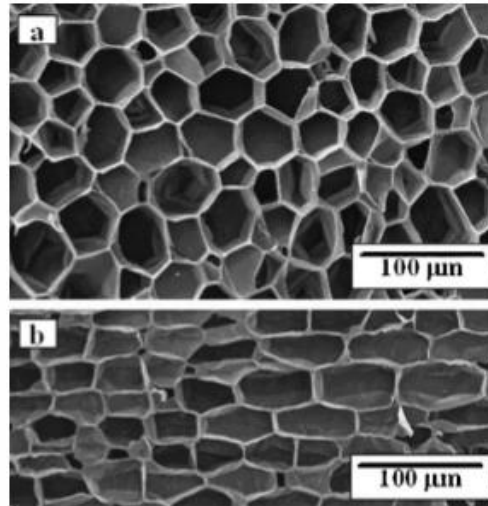


Figure I.9 : Structure cellulaire du liège (Silva S P et al., 2005).
a) Section radiale - b) Section tangentielle.

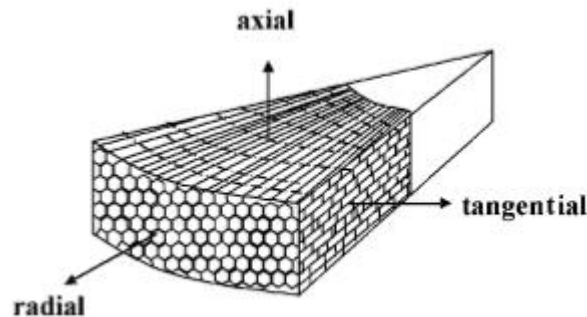


Figure I.10 : Représentation schématique de la disposition cellulaire d'une section de liège (Silva S P et al., 2005).

I.5.4. Composition chimique du liège

Des travaux effectués sur la composition chimique du liège ont trouvé que les constituants de ce matériau dépendent de plusieurs facteurs tels que : l'origine géographique et génétique, le climat, le sol, les conditions de croissances, l'âge et les dimensions de l'arbre. Donc, cette composition diffère d'un arbre à un autre ; mais aussi dans le même arbre, entre

le bas et le haut. Probablement, cette composition dépend aussi du nombre d'extraction du liège, puisque son arrangement s'améliore en fonction de ce même paramètre (Silva S P et al., 2005).

Le Tableau I.2 représente le classement des différents constituants du liège avec un ordre décroissant par rapport à leur participation massique.

Tableau I.2 : Pourcentages massiques des différents constituants du liège (Boulahia H, 2016).

Constituants (%)	Liège naturel
Subérine	45-46
Lignine	24-25
Polysaccharides (cellulose et hémicellulose)	10-12
Extractibles	8-10
Cendres	3-5
Cires	5-6
Tannins	3-5
Autres	2-3

La structure cellulaire de la paroi de liège se compose principalement par un milieu riche en lignine, sous forme de lamelle et c'est l'élément qui apporte la rigidité à la structure. Une paroi secondaire, plus épaisse formée de subérine avec une quantité abondante et des lamelles de cire. La troisième paroi est composée par le polysaccharide, qui donne une rigidité structurelle à la cellule de liège et empêche son effondrement (Figure I.11) (Silva S P et al., 2005).

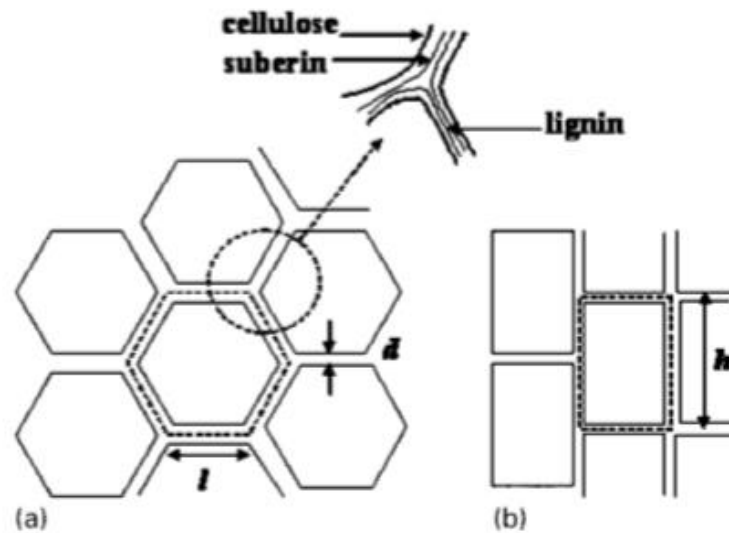


Figure I.11 : Détail des parois de la structure cellulaire du liège montrant ses principaux composants (Silva S P et al., 2005).

a) Section radiale, b) Coupe tangentielle/axiale.

l : bord de la base du prisme, d : épaisseur du mur, h : hauteur du prisme

I.5.5. Propriétés du liège

Le liège a souvent été connu par sa destination vers la production de bouchons, ainsi que pour quelques applications d'isolement. Dans les deux dernières décennies (1990-2010), le liège a connu une crise suite à l'apparition des alternatives en matières synthétiques, qui sont économiquement plus avantageuses. Récemment, le liège a commencé à retrouver sa position mais comme un matériau innovant convenable au développement durable. Il est employé dans différents domaines tels que l'industrie, le sport, l'environnement, l'aérospatial et le bâtiment.

La composition chimique du liège est complexe et reste toujours considérée comme un domaine de recherche. Cette composition offre au liège la particularité d'être respectueux de l'environnement (naturel, renouvelable et recyclable). Le liège offre une gamme de propriétés physiques et mécaniques avantageuses pour le domaine du bâtiment, à savoir :

Légèreté : Sa faible densité est due à la forte teneur en gaz de ses petites cellules.

Isolation thermique : grâce à sa légèreté et sa composition unique, le liège est l'un des meilleurs isolants avec une conductivité thermique de l'ordre de 0,045 W/(m.K). Cette dernière est proche à la conductivité thermique de l'air sec qui égale à 0,025 W/(m.K).

Isolation acoustique : le liège est un mauvais conducteur de son, donc un bon isolant acoustique.

Elasticité - Capacité d'amortissement – souplesse : le liège ne subit aucune déformation permanente sous l'action de compression en raison de sa mémoire élastique. C'est donc un excellent isolant vibratoire.

Imperméabilité aux liquides et aux gaz : l'imperméabilité du liège est due à la contre pression du gaz et aux substances grasses (subérine) existantes dans les cellules.

Résistance au feu : ignifuge, il nécessite énormément d'oxygène pour prendre feu. Autant, il se carbonise en surface ce qui contraint la combustion (retardateur naturel de la progression du feu).

Sans réaction aux produit chimique : sans réaction avec les produits chimiques, le liège ne produit pas d'émissions toxiques.

Durabilité : grâce à toutes ces qualités, le liège conserve ses caractéristiques dans le temps. (Imputrescible)

Recyclable : grâce à sa durabilité, le liège peut être réutilisé dans différentes applications.

[Sotehi N, 2010], [C. Manuel - Amorim - Vivexpo 2012], [A. Pintus - AGRIS - Vivexpo 2012] (Silva S P., 2005)

I.5.6. Béton de liège

Nous présentons ci-dessous une synthèse de quelques travaux de recherche qui ont abordé le sujet du béton de liège.

(Aziz M A et coll., 1979) a évalué plusieurs paramètres du béton de liège (ciment, liège et de l'eau). Il a abouti qu'un serrage par vibration est beaucoup plus adaptés a ce béton et a aussi trouvé que l'augmentation du pourcentage du liège conduit à une diminution de la résistance mécanique à la compression et de la conductivité thermique.

(Branco et coll, 2007) dans ce document, les auteurs ont varié : (1) la provenance du liège, naturel et expansé, (2) la tailles des granulats de liège et (3) le pourcentage de substitution. Le remplacement des granulats de liège a été effectué soit par rapport au sable ou par rapport au gravier soit le sable et gravier en même temps. Les résultats ont montré que plus le taux de remplacement augmente plus la résistance diminue d'une façon remarquable pour les deux types de granulats. Il est à noter que le liège expansé a conduit à des pertes de résistance plus importante.

(Moreira A et coll., 2014), ont étudié différentes caractéristiques des chapes à base de granulats de liège (ciment, sable, liège et de l'eau). Ils ont trouvé que l'addition du liège affecte les propriétés des chapes par une diminution de la masse volumique, de la résistance à la compression et de la conductivité thermique.

(Chadi Maalouf et coll, 2015), ce travail porte sur les mortiers de liège. Les auteurs ont expérimenté deux doses de substitution en liège, 50% et 75% par rapport au sable. La conclusion révélée de cette étude est que la composition de 75% a permis la réduction de la consommation d'énergie de 29% en comparant avec la consommation d'énergie des briques creuses.

(Ziregue A et coll., 2016), ont étudié un béton à base des chutes de granulats de liège provenant de la fabrication des panneaux d'isolation. Ils ont trouvé qu'il existe un effet significatif de l'ajout des granulats de liège sur la diminution de la densité du béton et sur l'amélioration de l'isolation thermique ainsi que sur la diminution des performances mécaniques.

(Boussetoua H et coll., 2017), ont trouvé que l'augmentation de la quantité du liège dans un béton (liège, sable, ciment et eau) a tendance à diminuer la densité et à réduire la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Ils ont conclu qu'un béton de liège peut être utilisé comme un isolant thermique ou comme un matériau structural selon sa teneur en liège.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit des notions générales sur les alternatives nécessaires à la haute performance énergétique dans le bâtiment ayant pour objectif une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. Nous nous sommes ensuite focalisés sur les éco-matériaux et spécialement les éco-bétons utilisant les particules végétales et qui sont au stade des applications de laboratoire. A la fin, nous avons identifié le végétal, sujet de notre intérêt, le liège issu de la cueillette du chêne liège ; une essence largement répandue dans la forêt algérienne ; mais aussi dans les monts de Tlemcen.

Le recueil bibliographique élaboré nous a permis de présenter une synthèse des travaux de recherche réalisés sur les bétons allégés à base de particules végétales. Ces travaux concernent l'étude de leurs performances mécaniques, thermiques ou acoustiques et qui se sont révélées intéressantes sur le plan de la construction durable. Cependant, nous avons gardé pour le chapitre suivant, la présentation des travaux liés au malaxage des bétons incorporant les granulats de liège.

Chapitre II

Malaxage et Rhéologie

Contenu

II.1. Introduction.....	22
II.2. Malaxage des bétons ordinaires.....	22
II.3. Malaxage des bétons légers.....	30
II.4. Rhéologie.....	32
II.5. Conclusion.....	35

II.1. Introduction

Le malaxage est une action importante, son résultat conditionne les propriétés du béton. Son objectif principal est d'homogénéiser un mélange qui se compose de différents constituants. La maîtrise du mode de malaxage dépend de plusieurs paramètres, particulièrement : le temps de malaxage, l'ordre d'introduction des constituants et l'outil de malaxage. En outre, l'emploi de nouveaux constituants tel que le liège engendre généralement des variations sur la qualité de malaxage. Par conséquent, une adaptation du mode de malaxage est recommandée. La qualité du malaxage est jugée selon la satisfaction des propriétés du béton à l'état frais et durci. A l'état frais le béton est considéré comme un fluide. En plus de son ouvrabilité, le béton est caractérisé par ses paramètres rhéologiques : sa viscosité et son seuil de cisaillement. Ce chapitre est organisé comme suit. Dans la première partie, nous abordons le malaxage dans les bétons ordinaires. Ensuite, nous présentons le résultat d'une recherche bibliographique sur le malaxage des bétons légers en générale et des bétons de liège en particulier. La dernière partie de ce chapitre est dédiée à la définition des principaux paramètres de la rhéologie.

II.2. Malaxage des bétons ordinaires

II.2.1. Généralités

Le béton est un matériau indispensable dans la construction des ouvrages en génie civil, comme les bâtiments, les ponts, les barrages, les châteaux d'eau, etc. Le matériau de construction « Béton » a vécu plus d'un siècle dans lequel il a connu un large domaine d'applications.

Le béton usuel est composé de quatre constituants principaux : le ciment, l'eau, le sable et le gravier (Figure II.1). Le sable et le gravier forment le squelette granulaire du béton, le ciment et l'eau forment la pâte qui a pour rôle de coller les granulats et d'assurer le durcissement du béton.

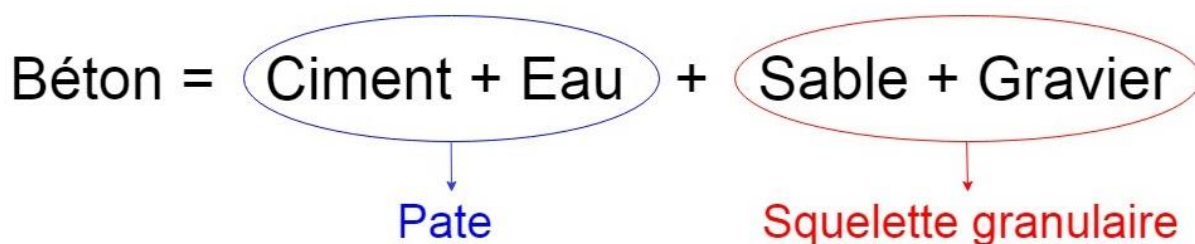


Figure II.12 : Composition du béton ordinaire.

Un bon béton dépend non seulement de sa formulation ; mais aussi de sa confection. La formulation du béton permet la détermination des dosages des différents constituants. Il existe des dizaines de formulations, on peut citer à titre d'exemple : la formulation de Bolomey, La Valette, Dreux Gorisse, Baron Lesage, etc. (Boukli Hacene S M A, 2009).

Des progrès dans la formulation des bétons ont permis l'apparition de nouveaux bétons, qui permettent de satisfaire de nouvelles exigences telles que les bétons auto-plaçants ou les bétons auto-nivelants qui ne nécessitent pas de moyens de serrage ou encore des bétons de hautes performances, caractérisés par une des performances mécaniques exceptionnelles (Ductal). Ce développement du béton a été rendu possible grâce à l'apparition de constituants innovants tels que les adjuvants, les additions minérales, les fibres métalliques et synthétiques (Figure II.2).

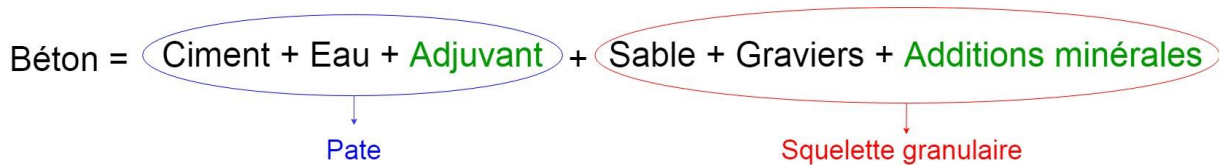


Figure II.2 : Composition des nouveaux bétons.

Ces nouveaux constituants de béton ont perfectionné la compacité des bétons et ont développé certaines propriétés de béton comme : la résistance mécanique, la consistance (l'ouvrabilité), la durabilité, résistance au feu, etc.

Une modification dans la composition du béton, même légère, permet de modifier les caractéristiques du mélange. Toutefois, d'autres paramètres peuvent aussi significativement influencer les propriétés du béton, comme le mode de malaxage (Ngoc D. L., 2007).

II.2.2. Rôle des constituants de béton

Chaque constituant de béton présente des caractéristiques différentes ce qui donne à chacun un rôle bien précis dans le mélange :

II.2.2.1. Rôle du squelette granulaire :

Le squelette granulaire est un ensemble de granulats solides de différentes tailles dont les diamètres varient du micron au centimètre (additions minérales, sable, graviers). Une quantité de vides réduite dans le mélange est un signe d'une compacité élevée. La compacité a une influence importante sur l'ouvrabilité du béton, cela permet d'optimiser la quantité de pâte nécessaire pour envelopper les granulats et éviter les frictions entre eux, ce qui permet d'améliorer l'ouvrabilité. De plus, une élévation de la compacité du squelette granulaire engendre de meilleures propriétés mécaniques (Ngoc D.L., 2007).

II.2.2.2. Rôle du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, fabriqué à base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. La pâte de ciment fait prise et durcit progressivement. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. Plusieurs types de ciment existent et diffèrent par leurs compositions chimiques et minérales. Généralement, les CEM-II sont les ciments les plus utilisés dans notre pays pour un béton courant. Ce sont des ciments constitués par un faible taux d'ajouts (< 15%) (BOUKLI HACENE S.M.A., 2009).

II.2.2.3. Rôle de l'eau :

L'eau joue plusieurs rôles, d'abord dans l'hydratation du ciment ou de certaines additions minérales, dans le mouillage des granulats, et dans la fluidité du béton. L'eau, permet d'améliorer l'ouvrabilité du béton en réduisant ses paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique). La Figure II.3, présente la variation de l'affaissement en fonction du dosage en eau d'un béton ordinaire et d'un Béton de Hautes Performances (BHP). La variation des paramètres rhéologiques de Bingham en fonction de la quantité d'eau est présentée sur la Figure II.4 (Ngoc D L, 2007).

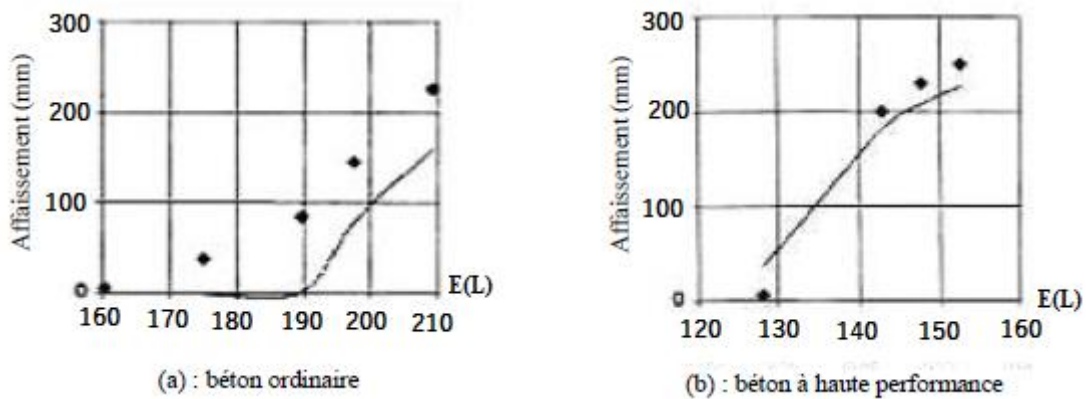


Figure II.3 : Variation de l'ouvrabilité des bétons en fonction du dosage en eau, (Ngoc D L, 2007).

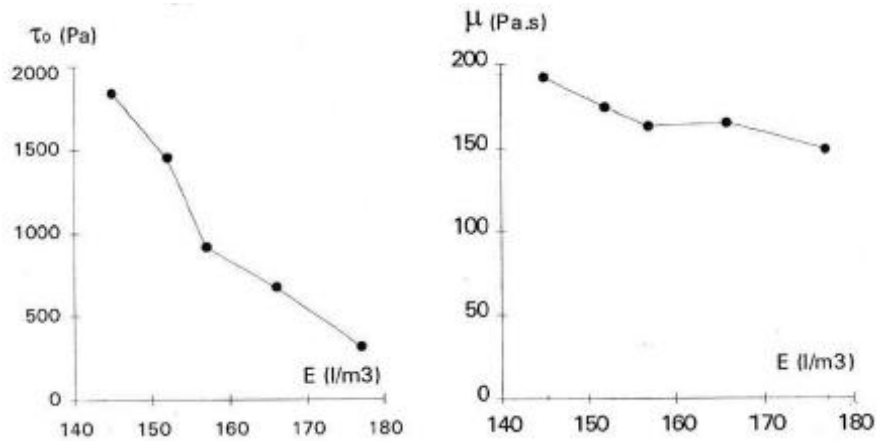


Figure II.4 : Variation des paramètres rhéologiques du béton en fonction du dosage en eau, (Ngoc D L, 2007).

Le rapport E/C (Eau/Ciment) est un facteur majeur influant la résistance mécanique. Un excès d'eau augmente la porosité du squelette solide du béton et diminue donc la résistance en compression. La Figure II.5, présente la variation de la résistance à la compression de trois bétons : ordinaire, BAP et BHP, en fonction de la quantité d'eau de gâchage. On constate que la résistance mécanique du béton décroît de manière proportionnelle avec l'accroissement de la quantité d'eau. Selon Salembier, cité dans la thèse de (Ngoc D L, 2007), 10 % de la quantité d'eau en excès diminue la résistance mécanique d'environ 12 %.

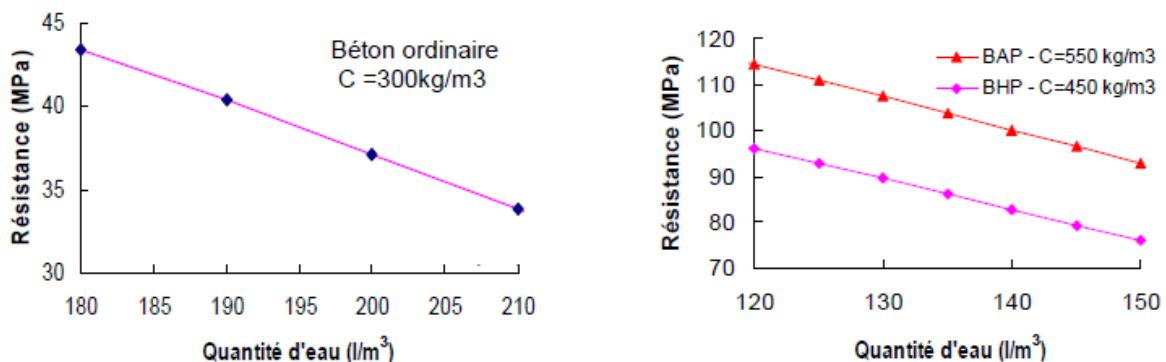


Figure II.5 : Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du dosage en eau, (Ngoc D L, 2007).

Aussi, la présence d'eau en excès peut réduire les forces de cohésion internes du béton provoquant un phénomène de ségrégation. Ceci cause une perte d'homogénéité du béton, due à la répartition irrégulière surtout des constituants les plus grossiers (Ngoc D L, 2007).

II.2.2.4. Rôle des adjuvants :

Les adjuvants sont des produits incorporés dans le mélange du béton lors du malaxage ou avant sa mise en œuvre. Ces produits apportent des modifications aux propriétés du béton, notamment à l'état frais. Il existe plusieurs types d'adjuvants : plastifiants/superplastifiants,

réducteurs d'eau, rétenteurs d'eau, entraîneurs d'air, accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise, etc.

La Figure II.6 montre l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. L'augmentation du superplastifiant permet de diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Cependant, il est à souligner que son effet sur la viscosité reste modeste (Ngoc D L, 2007).

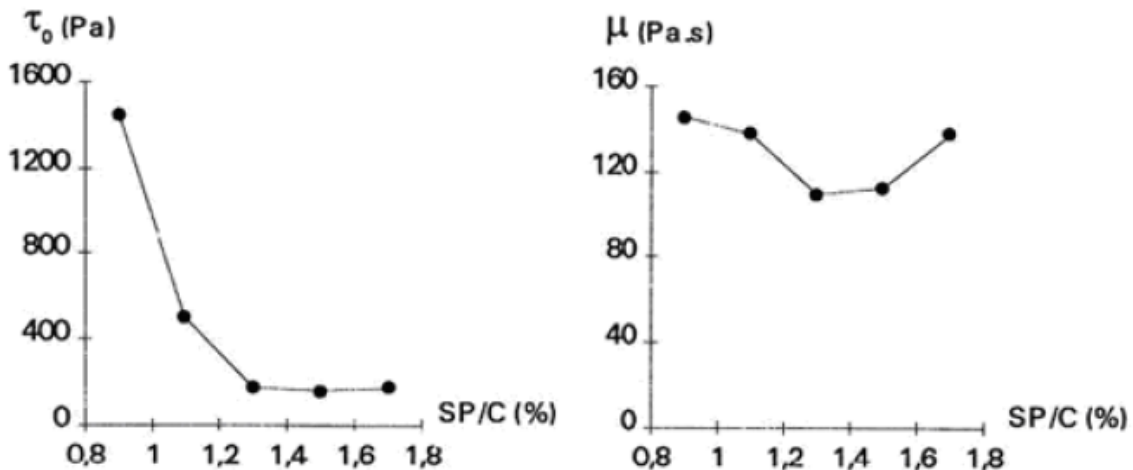


Figure II.6 : Variation des paramètres rhéologiques du béton en fonction du dosage en superplastifiant (Ngoc D L, 2007)

II.2.2.5. Rôle des additions minérales :

Les additions minérales sont des fines dont le diamètre des grains est généralement inférieur à 125 μm , tels que : les fillers calcaires, les cendres volantes, les fumées de silice, etc. Ces additions sont intégrées dans un mélange de béton en combinaison avec les superplastifiants, notamment dans la fabrication des bétons innovants (BAP, BHP, ...). A l'état durci, ces fines favorisent l'hydratation du ciment portland et améliorent la compacité. Certaines additions telles que les fillers calcaires peuvent améliorer la résistance au jeune âge, d'autres telles que la pouzzolane, ont un effet plus prononcé à long terme.

II.2.3. Malaxage

Pour être correctement utilisable, le béton doit satisfaire certaines exigences d'ouvrabilité, de performance mécanique et de durabilité. L'ouvrabilité et les caractéristiques rhéologiques du béton doivent être contrôlées et adaptées aux moyens de mise en œuvre. Pour répondre à toutes ces exigences, le mélange du béton doit être le plus homogène possible. Cette homogénéité est l'objet de malaxage, qui à partir des constituants de différentes tailles et natures, initialement séparés, doit former un matériau homogène et stable. Le malaxage est donc une phase de transition d'un mélange granulaire vers un fluide, grâce à l'ajout d'eau et d'éventuels adjuvants. Les fines cimentaires sont entourées par de

l'eau en formant la pâte et chaque granulat est enveloppé par la pâte de manière à éviter tous contacts entre eux, en plus les gros constituants sont entourés par les plus petits constituants. Cette structure permet un mouvement relativement facile entre les composants du matériau. Elle assure par conséquent une bonne maniabilité. L'opération de malaxage influe significativement sur les caractéristiques du béton (David M, 2014) (Ngoc D L, 2007). Donc, l'atteinte des propriétés désirées d'un béton nécessite la maîtrise du procédé de malaxage. Dans ce domaine, les recherches montrent que la dispersion des constituants évolue progressivement au cours du malaxage suivant deux niveaux différents :

i, Homogénéisation à l'échelle macroscopique : cette phase, correspondante à une échelle d'observation supérieure à la taille des gros granulats, est exprimée par la répartition homogène des constituants dans la cuve du malaxeur. Un mélange triphasique (solide, liquide et gaz) est rapidement obtenu avec la répartition régulière des constituants les plus gros après 10 à 30 s de malaxage (Ngoc D L, 2007).

ii, Homogénéisation à l'échelle microscopique : la deuxième phase, correspondant à une échelle d'observation à la taille des grains de ciment, consiste à disperser les éléments fins dans le mélange. En fait, les particules fines (ciment, addition) forment des agglomérats en présence de l'eau. Leur dispersion nécessite un taux de cisaillement et un temps de malaxage suffisants pour fragmenter ces unités. La dispersion des éléments fins à l'échelle microscopique est donc plus longue par rapport à la première phase.

L'obtention d'une structure optimale est conditionnée à la fois par la composition du mélange ainsi que par les paramètres caractéristiques du mode de malaxage, à savoir : le temps de malaxage, l'outil de malaxage, la vitesse de malaxage et l'ordre d'introduction des constituants. Deux bétons d'une même composition peuvent ne pas présenter les mêmes propriétés en changeant le mode de malaxage (Ngoc D L, 2007).

II.2.3.1. Temps de malaxage :

C'est un paramètre prédominant pour l'homogénéisation du béton lors du malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière induit une défloculation des agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air piégés. Ceci accroît la densité et la compacité du béton (Figure II.7).

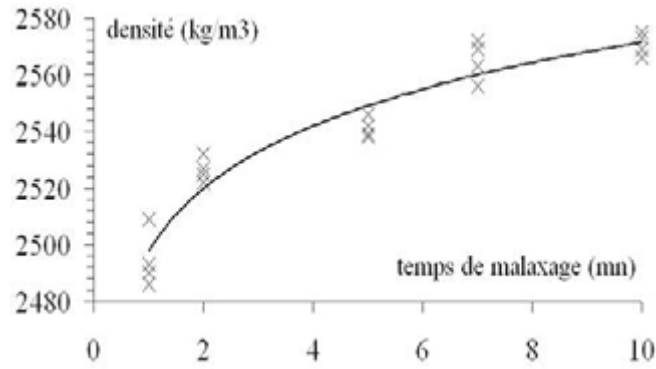


Figure II.7 : Variation de la densité des mélanges en fonction du temps de malaxage, (Ngoc D L, 2007).

Bien que l'effet du temps de malaxage se manifeste sur l'aspect d'optimisation de la microstructure du béton, les paramètres rhéologiques n'évoluent pas toujours de manière significative en fonction du temps de malaxage. Cependant, une perte de la maniabilité du béton peut être observée lors de la prolongation du temps de malaxage (Ngoc D L, 2007).

II.2.3.2. Outil de malaxage :

Un outil de malaxage est composé d'un système de pales et d'une cuve destinée à contenir les matériaux à mélanger. Les pales sont soit fixées sur la cuve telle qu'une bétonnière (Figure II.8-a) ou mobiles, reliées à un axe à moteur comme dans le cas des malaxeurs à axe vertical (Figure II.8-b).

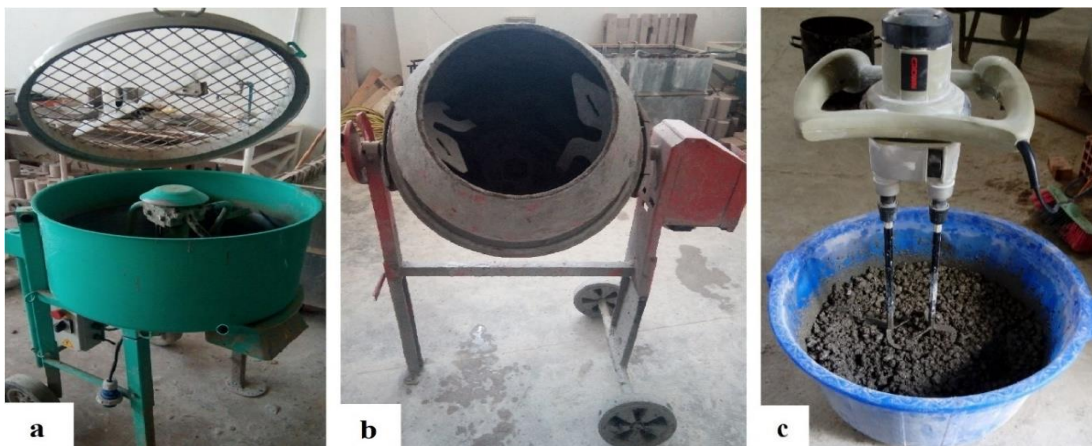


Figure II.8 : Matériel de malaxage des bétons.

Le système des pales assure l'homogénéisation du mélange au cours du malaxage en mettant en mouvement les constituants. La complexité de cette opération réside dans le fait que les constituants ne présentent pas les mêmes aptitudes d'homogénéisation face à un système de malaxage.

En effet, les différents malaxeurs, se distinguent par le mode de mouvement des pales, qui ne conduit pas à la même façon d'homogénéiser le mélange. Les conséquences immédiates sont alors une variation possible des propriétés d'une même formule de béton. Par exemple, une bétonnière n'a pas la même capacité de disperser les constituants qu'un mélangeur (Ngoc D L, 2007).

II.2.3.3. Ordre d'introduction des constituants :

Lors du malaxage, le béton se structure progressivement vers un état homogène optimal. Par conséquent, l'état d'hétérogénéité du mélange au démarrage du malaxage influence évidemment le temps nécessaire pour arranger les constituants afin d'obtenir une structure optimisée. Le temps de malaxage peut donc être optimisé avec un mode de remplissage spécifique. Pour des bétons traditionnels, l'introduction du ciment doit être légèrement retardée par rapport au granulat. Un malaxage à sec est toujours bénéfique à l'efficacité du malaxage, l'eau est incorporée après les constituants solides. Enfin, les adjuvants sont généralement introduits avec l'eau (Boukli Hacene S M A, 2009).

Toutefois, aucune loi générale ne permet de définir de manière optimale un protocole de fabrication. L'optimisation du processus est empirique. Le moment et le mode d'introduction des constituants influent indubitablement sur l'efficacité du malaxage.

Ces dernières années, de nouvelles techniques de malaxage sont utilisées, à savoir, en anglais : Two stages method (Abd el hakam A & al, 2012) (Ngoc D L, 2007), three stages method et four stage method (Parameshwar N. H. & Subhash C. Y., 2017). Il s'agit d'un malaxage en deux phases, trois phases et quatre phases. Chaque phase doit comprendre une introduction de constituants et un temps de malaxage c'est-à-dire le passage d'un état à un autre. Par exemple pour un malaxage en deux phases, la première consiste à homogénéiser une partie de l'eau avec les granulats et le ciment. La deuxième phase homogénéise ce mélange en ajoutant le reste d'eau et les autres constituants (Figure II.9) (Ngoc D L, 2007).

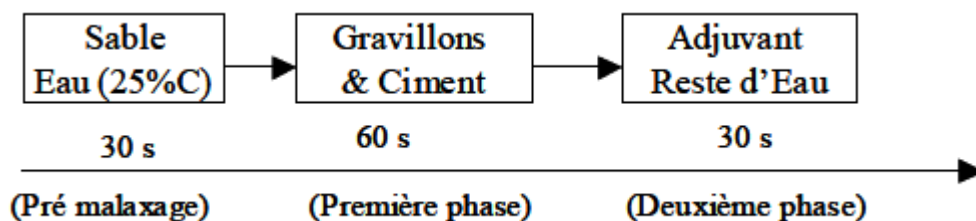


Figure II.9 : Malaxage en deux phases, (Ngoc D L, 2007).

Cette méthode permet d'enrober la surface des granulats par une couche de pâte de ciment à faible E/C (lors de la première phase de malaxage). Ceci conduit à améliorer la liaison granulat-pâte et donc la résistance du béton. La couche mince de la pâte qui enveloppe les granulats durant la première phase joue le rôle de lubrifiant pour les granulats dans la deuxième. Ceci augmente alors la mobilité du mélange et accroît donc l'ouvrabilité du béton. Selon, l'expérience de A.K. Tamimi, cité dans la thèse de (Ngoc D L, 2007) à ce sujet, montre que le malaxage en deux phases permet d'augmenter la résistance en compression d'environ 15% pour le béton ordinaire, et de 12,5% pour le béton contenant de la fumée de silice. L'affaissement au cône d'Abrams de ces bétons est également fortement amélioré par rapport à la méthode de fabrication conventionnelle (Ngoc D L, 2007).

Les malaxages en trois et quatre phases sont généralement utilisés pour étudier l'effet d'un constituant sur l'ensemble du mélange (Parameshwar N. H. & Subhash C. Y., 2017).

II.3. Malaxage des bétons légers

Nous venons de montrer que le malaxage reste une opération qui affecte le résultat du mélange. Cette dernière est encore plus délicate dans le cas des bétons légers. Leur processus de malaxage n'est pas assez maîtrisé. Nous présentons dans ce qui suit, une étude bibliographique relative aux méthodes de malaxage de ces nouveaux bétons.

(CEREZO V., 2005) a utilisé un malaxeur à train valseur d'une capacité de 80 litres pour la mise en œuvre de son béton de chanvre. Il commence par un malaxage à sec des particules pendant deux minutes, puis il ajoute l'eau de pré-mouillage et malaxe pendant cinq minutes. Il continue ensuite, à malaxer durant deux minutes, après avoir ajouté le liant. Enfin, il ajoute l'eau de gâchage et malaxe le mélange pendant cinq autres minutes.

(MAGNIONT C., 2010) pour l'élaboration de son béton de tournesol, elle commence aussi par un malaxage à sec de tous les constituants pendant 30 secondes puis elle ajoute l'eau et malaxe pendant 30 secondes. Ensuite, elle ajoute l'adjuvant directement dans la pâte fraîche et malaxe pendant 30 secondes. Elle effectue une homogénéisation manuelle du mélange pendant 1 minute. Enfin, elle malaxe le tout à grande vitesse pendant 30 secondes.

(NOZAHIC V., 2012) commence par l'introduction des granulats et l'eau de pré-mouillage et effectue un malaxage de 30 secondes. Il introduit les particules de chènevotte et les tiges de tournesol puis il effectue un malaxage de 4 minutes et 30 secondes. Ensuite, il arrête le malaxage, introduit le liant pendant une minute et reprend le malaxage pendant 2 minutes. A la fin, il introduit l'eau de gâchage pendant une durée de 30 seconde et termine par un malaxage de 5 minutes.

(Glé P., 2014) réalise son béton à base de fibres de chanvres dans une bétonnière à pales fixes et à tambour rotatif. Il malaxe environ 3 minutes après avoir introduit l'eau et tout le liant. Il introduit par la suite les chènevottes et procède au malaxage du mélange environ 5 minutes jusqu'à obtenir un mélange bien homogène.

(UMURIGIRWA-VASSEUR B., 2014) entame son mélange en introduisant les chènevottes puis le liant et les malaxes pendant 5 minutes. Après, Il arrête le malaxage pendant 1 minute pour homogénéiser le mélange manuellement. Enfin, il effectue un malaxage de 5 minutes.

(AKKAOUI A., 2014) utilise un malaxeur standard de 20 litres pour la confection d'un béton léger à base de granulats de bois. Il commence par introduire le ciment et l'eau. Le malaxage dans cette étape est effectué en trois temps : 30s, 30s et 1 minute à cause de la nécessité d'intervention en arrêtant le malaxeur. Il introduit ensuite, deux tiers des granulats avec un malaxage de 30s pour chaque tiers. Il introduit à la fin le troisième tiers des granulats et effectue un malaxage fractionné de 1min, 1min et 2min avec une intervention entre chaque deux temps.

(CHABBANNES M., 2015) a travaillé sur un agro-béton à base de granulats de chènevottes et de balles de riz. Il introduit les particules végétales et l'eau de pré-mouillage dans un malaxeur de 40 litres et active le malaxeur durant cinq minutes. Il active ensuite le malaxeur durant deux minutes après avoir ajouté la chaux. Il termine avec un dernier malaxage de cinq minutes après avoir introduit la quantité d'eau restante. Après ces étapes de malaxage, il mesure l'affaissement du béton ; s'il n'atteint pas la valeur souhaitée, il ajoute un superplastifiant et reprend le malaxage pendant 1 minute.

[ACHOUR A., 2017] : a étudié des mortiers à base de fibres végétales DOUM et DISS. Pour le mode de malaxage, il s'est inspiré des travaux de Kriker (cité dans la thèse de Achour). Il commence par imbiber les fibres dans 10% du volume total de l'eau de gâchage pendant 5 minutes, ensuite, il malaxe le sable et 30% d'eau pendant 30 secondes. Puis, il ajoute les fibres progressivement avec 30% de l'eau en conservant le malaxage à 3 minutes. A la fin, il ajoute le ciment et le reste de l'eau progressivement en conservant le malaxage pendant 2 minutes et demi.

II.3.2. Béton de liège

Dans cette partie, nous citons les méthodes de malaxage concernant des bétons à base de granulats de liège.

(Aziz et coll., 1979) a commencé d'abord par un malaxage à sec du ciment avec les granulats de liège puis il a ajouté l'eau et a effectué un malaxage de l'ensemble des constituants.

(Panesar D K et Shindman B., 2012) a confectionné des mortiers à base de liège en suivant les recommandations des normes ASTM C305 et CSA A32.2-2C.

(Bras et coll., 2013) a adopté la méthode de malaxage suivante : malaxage de toute la quantité du liant avec le sable, le liège et 90% de la quantité d'eau pendant 3 minutes, sachant que l'ajout de l'adjuvant (haut réducteur d'eau) se fait après 1minute du début du malaxage. A la fin, ajout de la quantité d'eau restante et continuation du malaxage pendant 2 minutes.

(Moreira et coll., 2014) a commencé par malaxer les granulats de liège pendant 3 minutes. Puis il a introduit le sable et le ciment suivi par 5 minutes de malaxage. Ensuite, il a ajouté 50% de la quantité d'eau suivi par un malaxage de 3 minutes. Il a terminé par un malaxage de 3 minutes après avoir ajouté la quantité d'eau restante.

(Matos et coll., 2015) a mélangé le sable et le gravier avec 25% de la quantité d'eau durant 2 minutes et 30 secondes, puis il a arrêté le malaxage pendant 2 minutes et 30 secondes. En dernier, il a introduit le ciment, les additions (fillers) et le liège avec le reste de l'eau et le superplastifiant et a malaxé pendant 8 minutes.

(Ziregue et coll., 2016) a commencé par le malaxage du sable avec le ciment pendant 1 minute, puis il a ajouté les deux tiers de la quantité d'eau suivi par un malaxage de 2 minutes. Après, il a ajouté le reste de la quantité d'eau avec le superplastifiant suivi par un malaxage d'une minute. Enfin, il a ajouté progressivement la quantité du liège et a mixé pendant 4 minutes.

(Boussetoua et coll., 2017) a commencé par l'introduction du sable, liège et le ciment, puis il a ajouté l'eau progressivement jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.

II.4. Rhéologie

La rhéologie, mot inventé en 1929 par Bingham, est généralement définie comme « l'étude de la déformation de la matière » (Fergusson, 1991).

En se rapportant aux racines grecques du mot, le verbe « rhein » signifie s'écouler et le mot « logos » peut être traduit par étude ; c'est donc la science qui étudie l'écoulement et les déformations de la matière et plus généralement la viscosité, l'élasticité et la plasticité des matériaux sous l'action de contraintes. D'une façon générale, le but principal de la rhéologie est d'étudier la réponse différente que chaque fluide oppose aux sollicitations mécaniques qu'il subit. Pour le béton, la rhéologie désigne généralement l'étude de l'ouvrabilité de ce matériau ; c'est-à-dire à l'état frais où il est considéré comme fluide. La caractérisation rhéologique du béton à cet état dépend principalement de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement. La contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement sont des paramètres nécessaires pour établir des rhéogrammes ou courbes d'écoulement. Ces dernières permettent de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement du matériau (TALEB O., 2017).

II.4.1. Contrainte de cisaillement τ [Pa]

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Ce mouvement provoque l'apparition d'une contrainte tangentielle à la surface de la couche (ADJOU DJ M., 2015). Cette contrainte de cisaillement τ [Pa] est la force que l'on exerce par unité de la surface cisailée :

$$\tau = dF/dS \dots\dots\dots(Eq. 1)$$

II.4.2. Vitesse de cisaillement γ' [s^{-1}]

Appelée également vitesse de déformation, taux de cisaillement ou plus souvent gradient de vitesse, il s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives du matériau cisailé, qui représente donc la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement (BENAICHA M., 2013).

$$\gamma' = dV/dY \dots\dots\dots(Eq. 2)$$

II.4.3. Viscosité μ [Pa.s]

La viscosité d'un fluide est la propriété inverse de la fluidité. C'est la caractéristique de résistance au glissement ou à la déformation d'un fluide. Ces forces de résistance proviennent du fait que les couches des fluides en mouvement ne peuvent pas glisser indépendamment et librement les unes sur les autres. Ce qui donne naissance à des forces de frottement qui s'opposent directement à l'écoulement (BENAICHA M., 2013).

II.4.4. Seuil de cisaillement τ_0 [Pa]

Le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la contrainte de cisaillement minimale pour initier l'écoulement d'un matériau ou le stopper. En dessous du seuil de cisaillement, le matériau se comporte comme un solide élastique et ne s'écoule pas. Pour des contraintes plus élevées, le matériau s'écoule comme un fluide visqueux d'une façon irréversible. Diverses appellations existent dans la littérature parmi lesquelles le point de fluage, le seuil de plasticité, le seuil de cisaillement, le seuil de rigidité et la contrainte seuil (TALEB O., 2017)

II.4.5. Comportement rhéologique

Un fluide indiquant un seuil de cisaillement nul est dit Newtonien. Dans ce cas, la relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement est linéaire et passe par l'origine (Figure II.10). L'équation rhéologique d'un corps newtonien s'écrit comme suit :

$$\tau = \mu \gamma' \dots\dots\dots(Eq. 3)$$

Dans le cas contraire, un fluide montrant un seuil de cisaillement avant écoulement est dit non Newtonien ou plasto-visco-élastique. De même, un comportement non linéaire est aussi dit non-Newtonien. Ce dernier comportement représente les matériaux granulaires, nous distinguons :

1. fluides Rhéofluidifiants ou également pseudo-plastiques : la viscosité de ces fluides diminue si la contrainte augmente (Figure II.10),

2. fluides Rhéoépaississants : la viscosité de ces fluides s'accroît lorsque la contrainte augmente (Figure II.10),

3. Un cas particulier de comportement non newtonien est le cas de Bingham, lequel présente une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement après avoir franchi le seuil de cisaillement (BENAICHA M., 2013). Le béton est souvent assimilé à un fluide de Bingham (DAVID M., 2014). Ce comportement est illustré dans la Figure II.11.

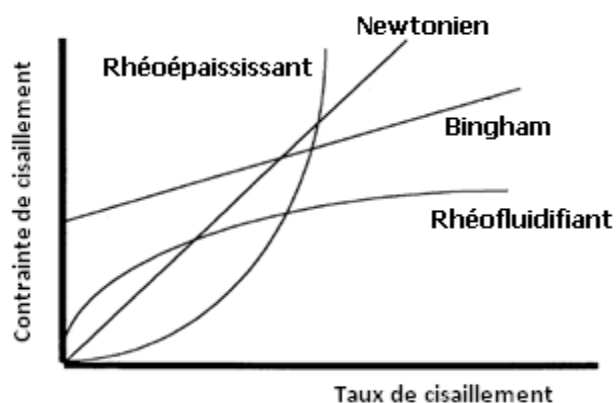


Figure II.10 : Courbes reflétant le comportement rhéologique de divers fluides, (Benaicha M, 2013).

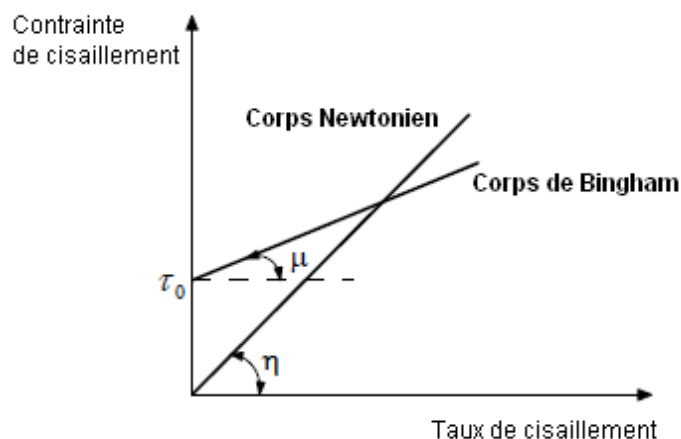


Figure II.11 : Rhéogramme du corps Newtonien et de Bingham, (Benaicha M, 2013).

Le seuil de cisaillement est le point d'intersection de la droite de Bingham avec l'axe des contraintes de cisaillement. La viscosité plastique est représentée par la pente de la droite qui définit l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

II.4.6. Rhéomètre à béton

L'utilisation d'un rhéomètre permet d'appliquer au béton un couple C ou une vitesse Ω et de mesurer la réponse du matériau à cette sollicitation. Les résultats doivent ensuite être

transformés en valeurs de contraintes de cisaillement. Les équivalences entre ces deux types de valeurs dépendent du rhéomètre utilisé. En effet, plusieurs modèles de rhéomètres existent, ils se distinguent par leur contenance, le procédé de mise en mouvement du fluide et par la méthode d'interprétation des données mesurées (DAVID M., 2014).

II.4.7. Méthode de Lanos

Estellé et Lanos (2008) ont développé une approche pour déterminer la courbe d'écoulement à partir des données expérimentales de couple et de vitesse de rotation. L'approche consiste à considérer un fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham et calculer les taux de cisaillements et les contraintes correspondantes lorsque respectivement le fluide est partiellement et complètement cisailé dans l'entrefer.

Le taux de cisaillement pour le modèle de Bingham peut être exprimé par l'équation (Eq. 4) lorsque le fluide est partiellement cisailé (localisation du cisaillement) et par l'équation (Eq. 5) lorsqu'il est complètement cisailé dans l'entrefer.

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \dots\dots\dots (Eq. 4)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M(d\Omega/dM)}{1-(R_b^2/R_c^2)} - \frac{\Omega-M(d\Omega/dM)}{\ln(R_b/R_c)} \dots\dots\dots (Eq. 5)$$

Où : R_b désigne le rayon du cylindre interne et R_c est le rayon externe. Ω et M représentent respectivement la vitesse de rotation du cylindre interne et son couple.

$$\dot{\gamma} = \max((Eq. 4) ; (Eq. 5)) \dots\dots\dots (Eq. 6)$$

Avec : $\frac{d\Omega}{dM} \cong \frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{M_j - M_{j-1}} \dots\dots\dots (Eq. 7)$

Donc, à partir d'une rampe croissante et/ou décroissante en vitesse de rotation Ω , on peut calculer la vitesse de cisaillement, ainsi que la contrainte correspondante à partir de l'équation (Eq. 8).

$$\tau_i = \frac{1}{2} (\tau_j + \tau_{j-1}) \dots\dots\dots (Eq. 8)$$

Avec : $\tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \dots\dots\dots (Eq. 9)$

Où : h désigne la hauteur du cylindre interne.

II.5. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons identifié les paramètres qui ont une incidence directe sur l'opération de malaxage des bétons en général et des bétons légers en particulier et spécialement le béton sujet de notre intérêt : le béton de liège. Faisant suite aux divers travaux de la littérature, nous retenons pour le programme expérimental, trois paramètres

que nous jugeons importants : le type du malaxeur, le temps de malaxage et le mode d'introduction des constituants dans le malaxeur.

Aussi, nous avons pensé utile d'étendre la caractérisation des mélanges à l'état frais au comportement rhéologique. Les études entreprises sur les bétons ont montré des comportements rhéologiques qui suivent des modèles différents : Binghamiens et non Binghamiens. Dans le cadre de ce travail, une partie du programme expérimental sera dédiée à la caractérisation rhéologique des mélanges préconisés.

Chapitre III

Matériaux et Méthodes

Contenu

III.1. Introduction.....	38
III.2. Caractérisation des matériaux.....	38
III.4. Caractérisation du béton à l'état frais.....	52
III.5. Caractérisation du béton à l'état durci.....	54
III.6. Conclusion.....	57

III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, un nouveau type de béton léger à base de liège dit « béton de liège ». Ce béton est obtenu par une substitution volumique des granulats minéraux concassés par des granulats de liège.

Nous présentons d’abord les matériaux utilisés puis les formulations des mélanges effectués. En dernier, nous montrons les essais préconisés pour la détermination des caractéristiques de nos bétons.

III.2. Caractérisation des matériaux

Dans cette partie du mémoire, nous présentons la caractérisation des matériaux utilisés pour notre programme expérimental. Les essais de caractérisation sont réalisés selon les normes en vigueur.

III.2.1. Eau

L’eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est l’eau distribuée par le réseau du service public de la Daïra de Chetouane appartenant à la wilaya de Tlemcen. Un échantillon d’eau a été analysé au Laboratoire de Travaux Publique Ouest de la wilaya de Tlemcen (LTPO), le résultat de la composition chimique est donné dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Composition chimique de l’eau utilisé.

CATIONS	mg/l	méq/l	ANIONS	mg/l	méq/l
Calcium	110,621	5,520	CHLORURE (Cl)	99,400	2,800
Magnésium (mg)	42,282	3,477	SULFATES (SO ₄)	312,740	6,515
Sodium (Na)	-	-	CARBONATES (CO ₃)	NEAT	NEAT
Potassium (K)	-	-	BICARBONATES (HCO ₃)	473,515	7,760
Balance cation	-	8,997	BALANCE ANION	885,655	17,075

Selon la norme NF EN 1008 (Juillet 2003), l’échantillon d’eau analysé peut être utilisé pour le gâchage du béton précontraint ou coulis du béton armé ou avec insert, ou du béton non armé et sans insert.

III.2.2. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42,5 provenant de la cimenterie de Béni-Saf (S.C.I.B.S). Nous avons déterminé sa masse volumique absolue à l'aide du pycnomètre en utilisant le toluène qui est non réactif avec le ciment. Nous avons aussi déterminé la masse volumique apparente à l'aide d'un entonnoir et une mesure de 1 litre (Figure III.1). Les résultats des masses volumiques du ciment sont déterminés conformément à la norme NF P18-558 et sont consignés dans le Tableau III.2.



Figure III.1 : Caractérisation de la masse volumique apparente du ciment.

Tableau III.2 : Masses volumiques du ciment CPJ-CEM II/A utilisé.

Matériau	Ciment
M.V app (kg/m ³)	1011
M.V abs (kg/m ³)	3124

III.2.3. Adjuvants

Les superplastifiants utilisés proviennent de la SARL Orachem Concrete (S.O.C), domiciliée à Boutelilis, dans la wilaya d'Oran. Les trois superplastifiants utilisés sont désignés commercialement comme suit : ORAFLOW HM 13600, ORAFLOW HM 15400 et ORAFLOW THM 17200 (Figure III.2). Puisque le principal objectif est d'avoir un béton léger fluide, le choix du superplastifiant s'est basé sur des essais d'étalement au mini-cône.



Figure III.2 : Superplastifiants utilisés pour les bétons confectionnés.

L'essai d'étalement au mini-cône, permet de connaître le dosage de saturation en superplastifiant de la pâte de ciment, c'est-à-dire le dosage optimum en adjuvant (Figure III.3).



Figure III.3. Essai d'étalement au mini-cône.

La Figure III.4, représente les courbes d'étalement de la pâte en fonction de la teneur en adjuvant. On remarque que le superplastifiant ORAFLOW THM 17200 a permis d'obtenir les meilleurs étalements avec un dosage relativement faible par rapport aux autres adjuvants. Notre choix s'est donc porté sur cet adjuvant pour être utilisé dans nos bétons légers. Son dosage optimum est de 0,5% de la masse du ciment.

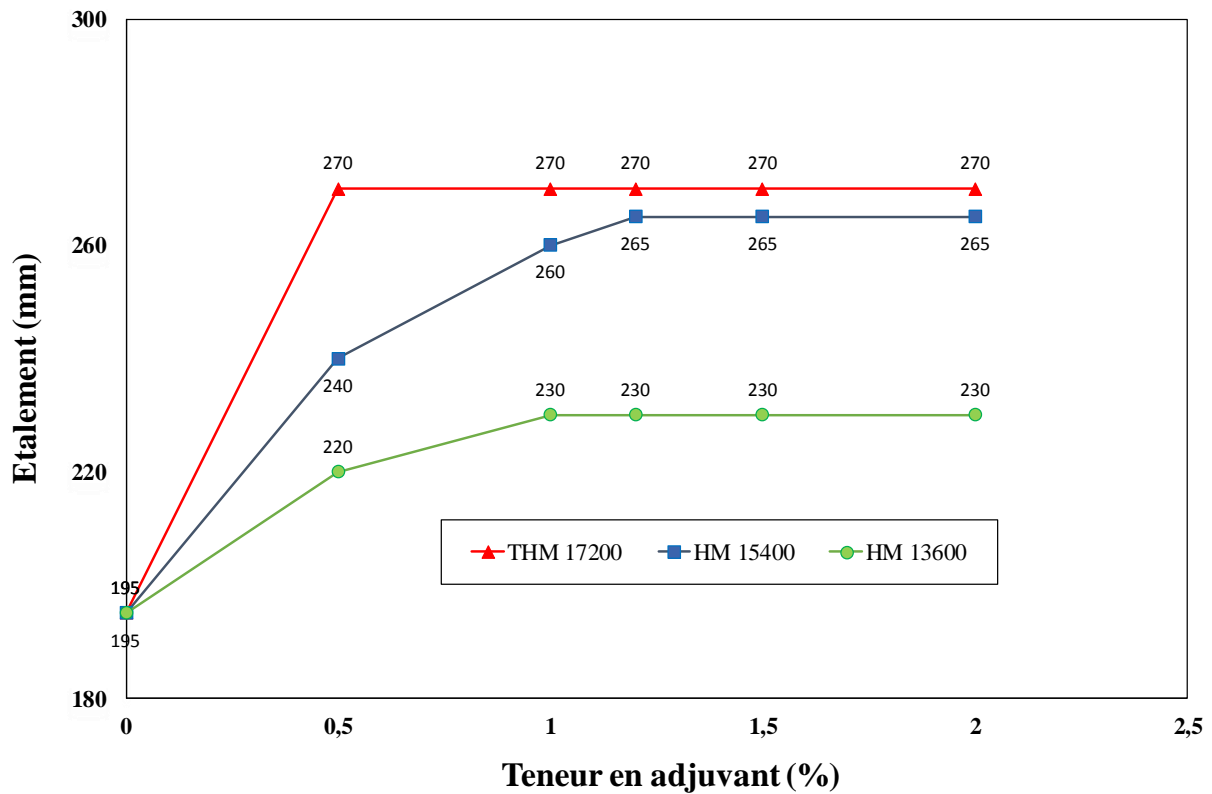


Figure III.4 : Courbes d'étalement au mini cône en fonction de la teneur en adjuvant.

III.2.4. Granulats minéraux

Les granulats minéraux utilisés sont des granulats concassés provenant de la carrière de l'Entreprise Nationale des Granulats (E.N.G) de Sidi-Abdelli, Tlemcen-Algérie. Les granulats minéraux utilisés sont : sable 0/4 et gravillons de classes granulaires 4/8 et 8/16.

III.2.4.1. Analyse granulométrique des granulats :

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la distribution dimensionnelle des différents grains constituant chaque échantillon du granulat étudié. Nous avons effectué l'essai conformément à la norme BS EN 933-1.

L'analyse granulométrique du sable a donné une teneur en fines de 18% et un module de finesse égale à 2,5.

Les courbes granulométriques sont représentés sur la Figure III.5.

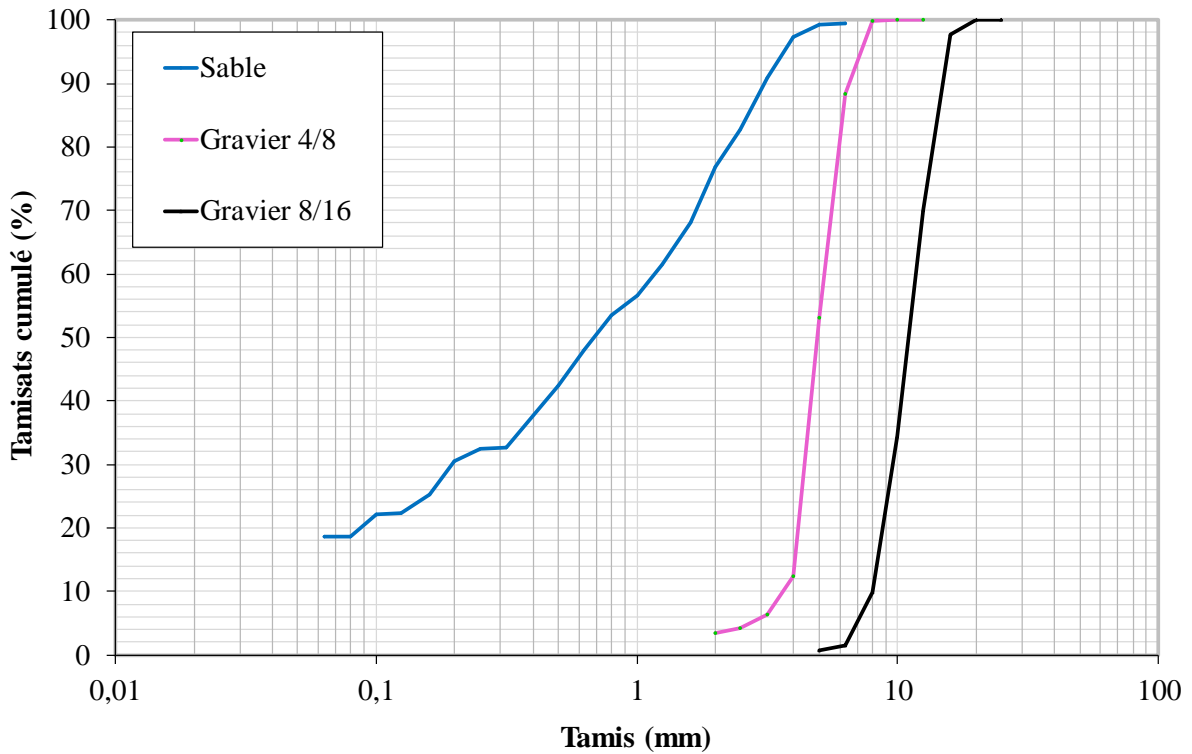


Figure III.5 : Courbes granulométriques des trois granulats testés.

III.2.4.2. Masses volumiques :

Les essais des masses volumiques apparentes ont été réalisés selon la norme BS EN 1097-3 : 1998 et les essais des masses volumiques absolues en utilisant la méthode du ballon, selon la norme BS EN 1097-6 : 2012 (Figure III.6). Cette méthode est plus précise que la méthode de l'éprouvette graduée. Les résultats des masses volumiques des granulats sont regroupés dans le Tableau III.3.

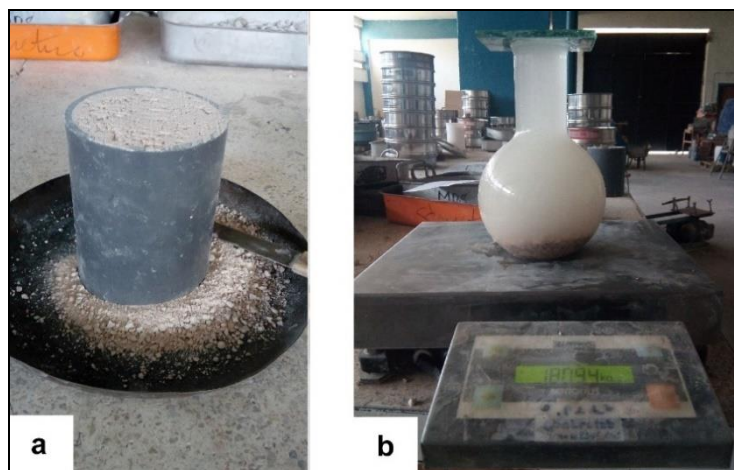


Figure III.6 : Essais de caractérisation physique des granulats testés,
 (a) Masse volumique apparente, (b) Méthode du ballon.

Tableau III.3 : Masses volumiques des granulats minéraux utilisés.

Granulat	Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16
M.V app (kg/m ³)	1636,5	1311	1317
M.V abs (kg/m ³)	2693	2592	2580

III.2.4.3. Compacité :

Nous avons effectué l'essai de compacité conformément à la méthode LPC n°61 à l'aide d'une table à secousses et un piston de 20 kg qui applique une pression de 10 kPa sur le matériau présentée (Figure III.7). Les résultats de la compacité sont récapitulés dans le Tableau III.4.



Figure III.7 : Table à secousses et piston de 20 Kg (méthode LPC n°61).

Tableau III.4 : Compacité des granulats minéraux.

Granulat	Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16
Compacité (%)	0,59	0,53	0,51

III.2.4.4. Propreté des granulats :

Dans un mélange de béton, les fines des granulats (argiles, limons, impuretés...) engendrent des problèmes d'adhérence entre la pâte et le squelette granulaire. Nous avons étudié la

propreté des graviers selon la norme NF P18-591 et celle du sable conformément à la norme NF P18-598 de l'essai d'équivalent de sable. Les résultats de propreté des graviers et du sable sont regroupés dans le Tableau III.5.

Tableau III.5 : Propreté des granulats utilisés.

Granulat	Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16
Propreté (%)	ES _p = 71	3,60	1,37

III.2.4.5. Absorption :

Le coefficient d'absorption est défini par le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24h à la masse sèche de l'échantillon (Figure III.8). Nous avons effectué cet essai conformément à la norme BS EN 1097-6 : 2012.

Les résultats des coefficients d'absorptions sont représentés dans le Tableau III.6.



Figure III.8 : Absorption des granulats minéraux

Tableau III.6 : Coefficient d'absorption des granulats minéraux utilisés.

Granulat	Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16
Absorption (%)	1,71	1,22	1,23

III.2.4.6. Foisonnement du sable :

Nous avons aussi mesuré la variation de la masse volumique apparente du sable en fonction de son teneur en eau pour étudier le foisonnement du sable. Les résultats de cet essai sont représentés sur la Figure III.9.

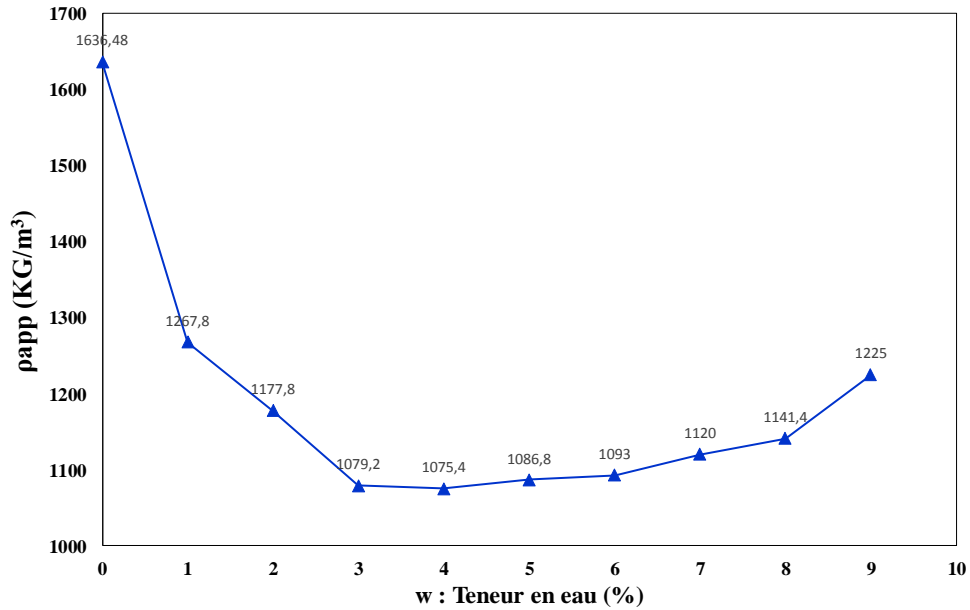


Figure III.9 : Foisonnement du sable

III.2.5. Granulats végétaux

Le liège utilisé dans notre étude expérimentale provient de la Société Industrielle Bois et Liège (S.I.B.L), installée dans la wilaya de Jijel en Algérie. Nous avons employé trois classes granulaires : 0/4mm, 4/8mm et 8/16mm (Figure III.10). Nous présentons dans ce qui suit, les essais et les résultats de caractérisation effectués sur les granulats de liège : analyse granulométrique, masses volumiques, compacité et absorption des granulats.



Figure III.10 : Classes de granulats de liège utilisés.

III.2.5.1. Analyse granulométrique des classes de liège :

Nous avons effectué une analyse granulométrique des échantillons de liège suivant la norme BS EN 933-1. Les lièges 0/4, 4/8 et 8/16 ont été respectivement analysés par les mêmes

séries de tamis que ceux utilisés pour les granulats minéraux. Toutefois, en raison de la faible densité du liège, nous avons réduit les quantités des échantillons à 160 g pour le liège 0/4mm et 4/8mm et 180 g pour le liège 8/16mm. Les résultats des analyses sont représentés par la Figure III.11.

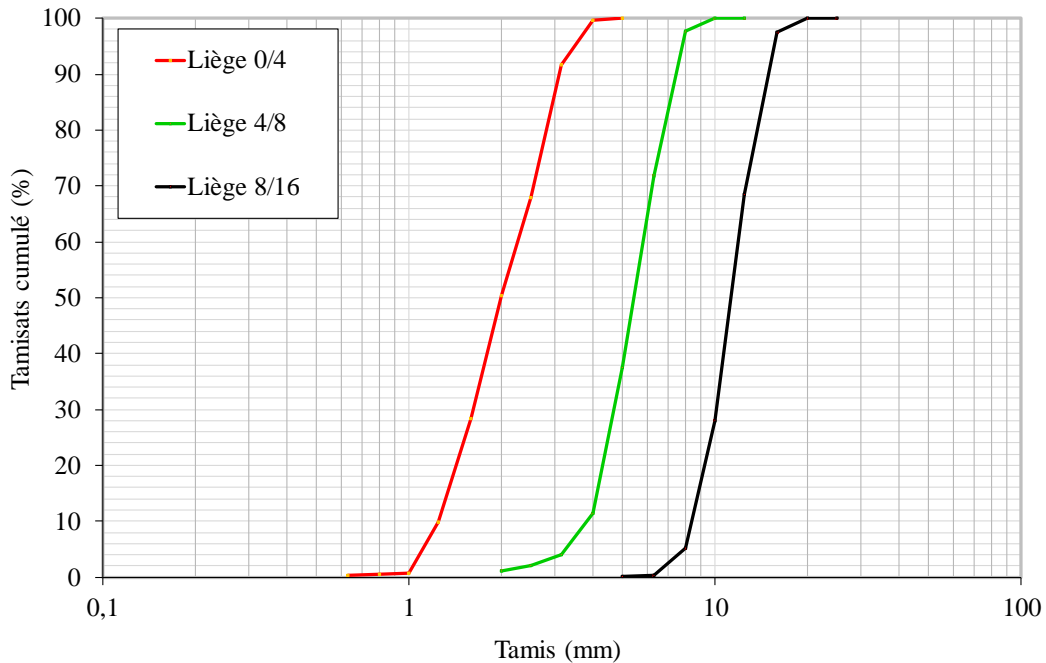


Figure III.11 : Courbes d'analyse granulométrique des granulats de liège utilisés.

III.2.5.2. Masses volumiques des classes de liège :

Comme pour les granulats minéraux, nous avons procédé à la détermination des masses volumiques apparentes et absolues des différentes classes de liège selon les normes : BS EN 1097-3 ; 1998 et BS EN 1097-6 ; 2012, respectivement (Figure III.12). Cependant, nous avons réduit les quantités des échantillons de liège à 30 grammes. Les résultats de ces essais sont donnés dans le Tableau III.7.



Figure III.12 : Méthode du ballon.

Tableau III.7 : Masses volumiques des granulats végétaux.

Classe granulaire	Liège 0/4	Liège 4/8	Liège 8/16
M.V app (kg/m ³)	89	84	86
M.V abs (kg/m ³)	218	184	223

Ces résultats montrent que les trois classes granulaires présentent des masses volumiques apparentes presque similaires. Cependant, la masse volumique absolue de la classe 4/8 est légèrement inférieure par rapport à celles des deux autres classes granulaires.

III.2.5.3. Compacité :

Nous avons aussi effectué des essais de compacité sur des échantillons de liège suivant la méthode LCP n°61. Nous avons réduit les masses des trois échantillons de liège à 750 grammes suite à leurs faibles densités. Les résultats sont résumés dans le Tableau III.8.

Tableau III.8 : Compacité des granulats végétaux.

Classe granulaire	Liège 0/4	Liège 4/8	Liège 8/16
Compacité (%)	40,8	45,5	45,6

III.2.5.4. Absorption :

Nous avons réalisé les essais d'absorption pour les granulats de liège conformément à la norme BS 1097-6 :2012. Les particules de liège ont été immergées dans l'eau pendant 24h (Figure III.12). Ensuite, nous avons effectué un séchage de la surface et nous avons mesuré la

masse à état saturé. Les résultats des coefficients d'absorption sont regroupés dans le Tableau III.9.



Figure III.13 : Immersion des échantillons de liège dans l'eau pendant 24h.

Tableau III.9 : Coefficients d'absorption des granulats de liège utilisés.

Classe granulaire	Liège 0/4	Liège 4/8	Liège 8/16
Coef d'absorption (%)	138	74,5	45,5

Ces résultats montrent que l'absorption des granulats de liège est inversement proportionnelle à leur taille. En effet, plus la taille des granulats est petite plus son coefficient d'absorption devient élevé. Notons que pour les trois classes granulaires du liège 0/4, 4/8 et 8/16, la capacité d'absorption reste très élevée par rapport aux granulats minéraux à cause de leurs structures naturelles alvéolaires qui favorisent l'absorption de quantités importantes d'eau (cf. section 1.5.3 du chapitre 1).

III.3. Composition du béton

Dans le cadre de ce programme expérimental, nous avons considéré deux types de béton : (1) un béton de référence sans ajouts de granulats de liège et (2) un béton allégé à base de liège. Nous avons utilisé la méthode de Dreux-Gorisse pour la formulation du béton de référence. Les bétons allégés sont obtenus par des substitutions volumiques des granulats minéraux par les granulats de liège.

III.3.1. Béton de référence

Le béton de référence est un béton ordinaire ayant une ouvrabilité plastique et une résistance mécanique visée à 28 jours égale à 30 MPa. La formulation du béton de référence est résumée dans le Tableau III.10. Sa masse volumique théorique est de 2395 kg/m³.

Tableau III.10 : Composition d'un mètre cube du béton de référence.

Composition du béton ordinaire en (kg/m ³)	
Sable	780,6
Gravier 4/8	348
Gravier 8/16	729,3
Ciment	350
Adjuvant	1,75
Eau	185,4

III.3.2. Bétons de liège

Les formulations préconisées pour les bétons de liège sont le résultat de substitutions volumiques de 25, 50, 75 et 100% des granulats minéraux par les granulats de liège de même taille. Les compositions à différents taux de remplacement sont regroupés dans le Tableau III.11. Afin de choisir le mode de malaxage adéquat, nous avons confectionné sept (07) formulations qui contiennent 50% de liège. Les désignations des différentes formulations utilisées dans ce programme expérimental sont définies dans le Tableau III.11.

Tableau III.11 : Désignation des différentes formulations.

Désignation	Définition
BL50 O1	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 1 en fixant le malaxeur comme outil et 5min comme temps
BL50 O2 BL50 T1	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 2 en fixant le malaxeur comme outil et 5min comme temps
BL50 O3	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 3 en fixant le malaxeur comme outil et 5min comme temps
BL50 T2 BL50 M	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 2 en fixant le malaxeur comme outil et 8min comme temps
BL50 T3	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 2 en fixant le malaxeur comme outil et 11min comme temps
BL50 B	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 2 en fixant la bétonnière comme outil et 8min comme temps
BL50 MD	Béton de liège 50% confectionné selon l'ordre d'introduction 2 en fixant le mélangeur double comme outil et 8min comme temps
BL 25	Béton de liège 25%
BL75	Béton de liège 75%
BL100	Béton de liège 100%

Il faut préciser que les substitutions ont été aussi calculées au prorata des dosages de chacun des trois granulats dans le béton de référence (Annexe 1). Les résultats des masses volumiques théoriques des compositions de béton montrent que les bétons de liège sont fortement allégés par rapport au béton de référence ; nous remarquons qu'une substitution volumique de 50% des granulats minéraux engendre une baisse d'environ 40% de la masse volumique du béton de référence. Quant au béton à 100% de granulats de liège, sa masse volumique est plus faible que celle de l'eau avec une baisse d'environ 75% par rapport au béton de référence.

Tableau III.12 : Composition des mélanges

	Taux de remplacement (%)			
	25	50	75	100
Sable (kg)	585,45	390,3	195,15	0
Gravier 4/8 (kg)	261	174	87	0
Gravier 8/16 (kg)	546,97	364,65	182,32	0
Ciment (kg)	350	350	350	350
Adjuvant (kg)	1,75	1,75	1,75	1,75
Eau (l)	178,37	171,38	164,39	157,41
Liège 0/4 (kg)	10,60	21,20	31,80	42,40
Liège 4/8 (kg)	5,56	11,12	16,68	22,25
Liège 8/16 (kg)	13,29	26,58	39,87	53,17
Masse volumique théorique	1953	1511	1069	627

III.3.3. Fabrication des éprouvettes

Pour la confection des éprouvettes, nous avons d’abord procédé au remplissage des moules en deux couches en utilisant la table vibrante comme moyen de serrage (Figure III.14). Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées avec un grand soin pour ne pas épaufrer les arrêtes surtout pour les éprouvettes contenant du liège, qui sont plus fragiles. Toutes les éprouvettes ont été conservées ensuite dans l’eau à la température du laboratoire (Figure III.15). Avant la caractérisation du béton à l’état durci, les éprouvettes ont été séchées à l’air pendant 24 heures.



Figure III.14 : Mise en œuvre des bétons dans leurs moules



Figure III.15 : Conservation des éprouvettes au laboratoire par immersion dans l'eau.

III.4. Caractérisation du béton à l'état frais

III.4.1. Mesure de la consistance

Nous avons mesuré la consistance des bétons après malaxage à l'aide de l'essai au cône d'Abrams (D=20cm, d=10cm, h=30cm), selon la norme NF P 18-451.

Le remplissage du moule a été effectué en trois couches en utilisant à chaque fois un piquage avec une tige d'acier de 16mm de diamètre, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution pour mesurer l'affaissement (Figure III.16). Plus l'affaissement est élevé plus le béton est fluide.



Figure III.16 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

III.4.2. Rhéologie

Nous avons étudié la rhéologie des bétons que nous avons formulé, à l'aide d'un rhéomètre coaxial de type vane de marque Heidolph (Figure III.17). C'est un appareil fiable qui mesure les paramètres rhéologiques avec une bonne précision et une grande stabilité.

Le dispositif est équipé d'un agitateur, piloté par un logiciel appelé « Watch and control » et d'un récipient de 30 cm de diamètre qui contient des baguettes parallèles à leur axe. Ces baguettes permettent de réduire le risque de glissement du matériau étudié pendant l'essai. Le rayon interne mesure 5.25 cm et le rayon externe 15 cm. Une pale en forme de double U inversée est utilisée, car elle permet de réduire la vibration de l'appareil et d'obtenir des mesures plus stables.

L'essai rhéologique comprend les phases suivantes (Taleb O, 2017) :

Phase 1 : Mesure des couples à vide qui correspondent aux couples imposés pour maintenir les vitesses lorsque le récipient est vide,

Phase 2 : Remplissage du béton dans le récipient en une seule fois, sans vibration,

Phase 3 : Positionnement de la pale en l'immergeant dans le mélange jusqu'à être placée à niveau avec la couche supérieure du béton. La pale repose ainsi sur une couche en béton de 10 cm d'épaisseur,

Phase 4 : Mesure des couples totaux qui correspondent aux couples imposés pour maintenir les vitesses lorsque le récipient est rempli de béton,

Phase 5 : Calcul des couples finaux en déduisant les couples à vide des couples totaux, pour chaque palier de vitesse,

Phase 6 : Exploitation des mesures et calcul des paramètres rhéologiques.

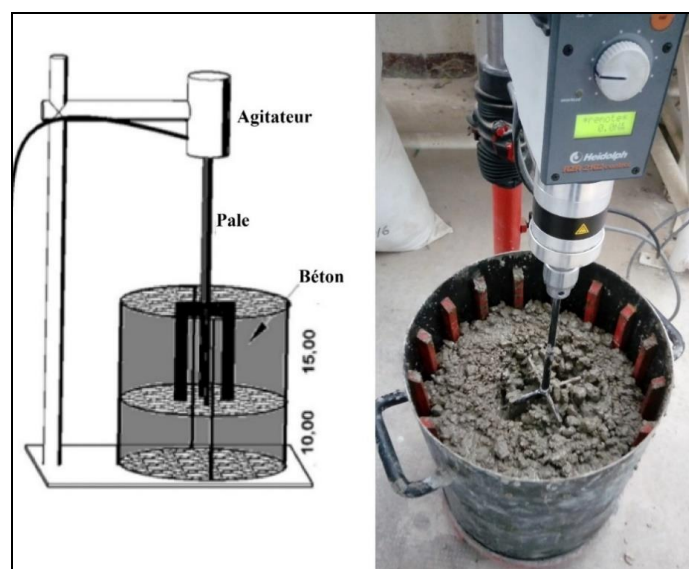


Figure III.17 : Mesure des caractéristiques rhéologiques des bétons étudiés.

Nous avons effectué des mesures rhéologiques pendant la phase décroissante des vitesses afin de s'affranchir du comportement et des propriétés dépendantes du temps et pour tester le matériau dans un état suffisamment destructuré. Le profil de vitesse choisi est composé de 7 paliers de 10 s à des vitesses de rotation allant de 48 rpm (0,8 rps) à 4 rpm (0,07 rps), précédés d'un palier de 110 secondes de pré-cisaillement à la vitesse maximale de 48 rpm afin d'effacer l'historique de cisaillement précédent et la mémoire d'une structure initiale. Pour chaque palier de vitesse, 20 mesures du couple sont effectuées.

III.5. Caractérisation du béton à l'état durci

Pour chaque gâchée, la masse volumique est déterminé après 24 heures du contact eau/ciment, puis à 28 jours juste avant d'entamer les essais mécaniques (Figure III.18). La masse volumique est la moyenne de trois éprouvettes cylindriques (Ø11x 22cm), calculée par l'équation (Eq. III.1) :

$$\rho = M/V \text{ (Kg/m}^3\text{).....(Eq. III.1)}$$

Avec :

M : la masse de l'éprouvette en Kilogramme

V : volume de l'éprouvette en mètre cube.



Figure III.18 : Pesée des éprouvettes en béton.

III.5.1. Mesure de la résistance mécanique à la compression

Parmi les essais mécaniques du béton, l'essai de compression est le plus important. Nous avons effectué cet essai sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (Ø11 x 22cm). La résistance considérée pour chaque formulation est la moyenne de trois éprouvettes. La presse utilisée est une machine universelle hydraulique traction/compression, qui a une

capacité de 600 KN pilotée par ordinateur (Figure III.19). Nous avons varié la vitesse de chargement selon la fragilité des éprouvettes. Nous avons utilisé une vitesse de 0,5 MPa/s comme recommandée par la norme EN 196-1 pour les éprouvettes du béton de référence, une vitesse de 0,2 MPa/s pour les éprouvettes de béton avec taux de remplacement en liège de 25 et 50% et une faible vitesse de 0,1 MPa/s pour les éprouvettes de béton avec un taux de substitution de 75 et 100%.

Nous avons calculé la résistance à la compression correspondante à la contrainte maximale selon la norme BS EN 196-1 : 2005, par la formule (Eq. III.2) :

$$R_c = P/A \text{ (MPa)} \dots\dots\dots \text{(Eq. III.2)}$$

Avec :

P : la charge à la rupture

A : la section de l'éprouvette.



Figure III.19 : Essai de compression des éprouvettes cylindriques du béton.

III.5.2. Mesure de la résistance à la traction par flexion

Nous avons réalisé l'essai de traction par flexion sur trois éprouvettes prismatiques de dimensions (10x10x40cm) pour chaque gâchée (Figure III.20). Nous avons effectué cet essai conformément à la norme EN 196-1 à l'aide d'un portique d'essai universel didactique, d'une capacité de 200 kN. La vitesse de chargement est de 5 MPa/s pour le béton de référence et une vitesse minimale de 2,5 MPa/s pour les éprouvettes de béton de liège. Nous avons calculé la résistance à la traction par flexion, selon la formule suivante (Eq. III.3):

$$R_{TF} = \frac{3.P.L}{2.b.h^2}(\text{MPa})\dots\dots\dots(\text{Eq. III.3})$$

Avec :

« P » la charge appliquée, « L » longueur de l'éprouvette, « b » coté de l'éprouvette et « h » sa hauteur.



Figure III.20 : Essai de traction par flexion du béton

III.5.4. Homogénéité

Nous nous sommes aussi intéressés à l'homogénéité des éprouvettes de béton à base de liège puisqu'ils sont composés de classes granulaires de densités très différentes. Pour ce faire, les éprouvettes ont été sciées en plusieurs parties sur la hauteur (Figure III.21) pour pouvoir visualiser d'une part la distribution granulaire dans les sections : supérieure, médianes et inférieure (Figure III.22) et mesurer les masses volumiques de tous ces morceaux, d'autre part.



Figure III.21 : Cisaillement des éprouvettes avec la scie à béton

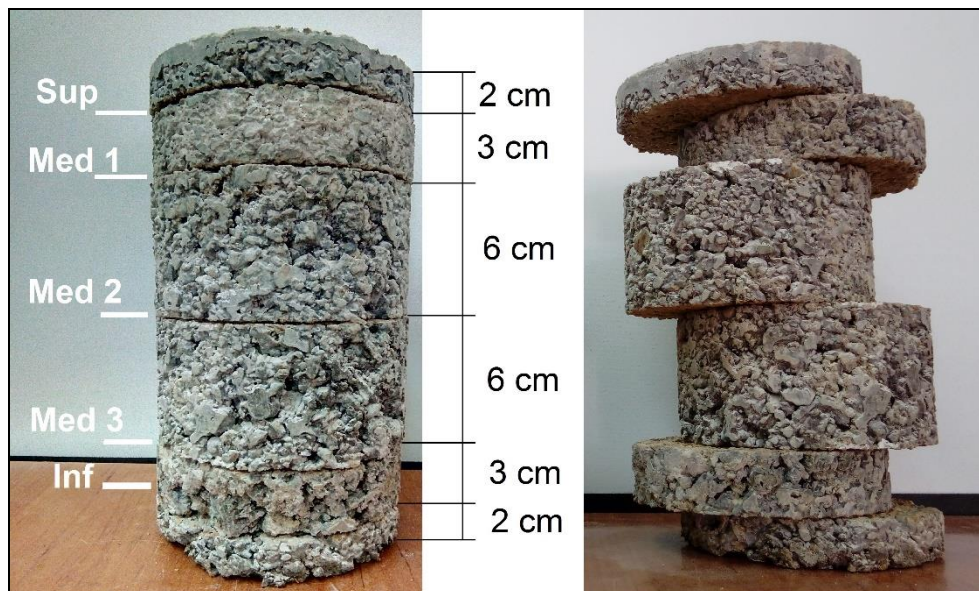


Figure III.22 : Eprouvettes cylindriques en béton de liège coupées en six morceaux

III.6. Conclusion

Cette étude expérimentale comprend la caractérisation des propriétés des constituants des bétons et des mélanges à l'état frais et à l'état durci. Pour chaque essai réalisé, nous avons suivi rigoureusement les normes en vigueur. Les principales différences constatées entre les granulats minéraux et les granulats végétaux sont les suivantes :

- Le liège 0/4 présente un manque d'éléments fins par rapport au sable qu'on a utilisé.
- Les masses volumiques du liège sont très faibles en les comparant à celles des graviers et du sable.

- Le liège présente une compacité légèrement inférieure à celle des granulats minéraux.
- Malgré la différence observée pour les différentes classes granulaires, l'absorption des granulats de liège reste largement supérieure à celle des granulats minéraux.

Pour une même classe granulaire, $\frac{\text{Absorption des granulats de liège}}{\text{Absorption des granulats minéraux}} > 37$

En variant les facteurs qui influencent le mode de malaxage, nous avons analysé le comportement du béton de liège. Nous discutons en détail les résultats du programme réalisé dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats et Discussion

Contenu

IV.1. Introduction.....	60
IV.2. Méthodologie.....	60
IV.3. Influence de l'ordre d'introduction.....	63
IV.4. Influence du temps de malaxage.....	67
IV.5. Influence de l'outil de malaxage.....	70
IV.6. Application : Evolution des propriétés des bétons en fonction du pourcentage de liège.....	74
IV.7. Conclusion.....	82

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter et d'expliquer les résultats du programme expérimental que nous avons effectué au laboratoire et qui nous a permis d'étudier l'influence des paramètres de malaxage d'une part sur l'homogénéité des diverses compositions du béton de liège (substitution des granulats minéraux par les granulats de liège de même classe : 25, 50, 75 et 100%) et d'autre part sur ses propriétés rhéologiques et mécaniques.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons fait varier le temps de malaxage, l'outil de malaxage et l'ordre d'introduction des constituants pour un mélange de 50% de granulats de liège. Ensuite, nous avons étudié l'influence du pourcentage de liège substitué sur les propriétés des bétons en utilisant les paramètres de malaxage optimisés dans la première phase.

IV.2. Méthodologie

Afin de déterminer le mode de malaxage adéquat pour le béton de liège, nous avons traité plusieurs facteurs qui ont un impact direct sur les caractéristiques à l'état frais et durci du mélange. Ces facteurs sont : l'ordre d'introduction des constituants, le temps de malaxage et l'outil de malaxage.

Dans un premier temps, nous avons fixé un taux de 50% de substitution volumique des trois classes granulaires de liège et nous avons fabriqué ce béton en faisant varier les trois paramètres suivants :

- 1., l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur (Figure IV.1), pour un temps de malaxage de 5 minutes,
- 2., le temps de malaxage (Tableau IV.1),
- 3., l'outil de malaxage (Figure IV.2).

Dans la deuxième partie du programme expérimental, nous avons varié le taux de substitution des granulats concassés par les granulats de liège à des pourcentages de 25%, 75% et 100% en utilisant le mode de malaxage qui nous a permis d'obtenir la meilleure consistance. La démarche utilisée est résumée dans l'organigramme, illustré sur la Figure IV.3.

Tableau IV.1 : Classes du temps de malaxage.

Classe	Temps de malaxage
Temps 1	5 minutes
Temps 2	8 minutes
Temps 3	11 minutes

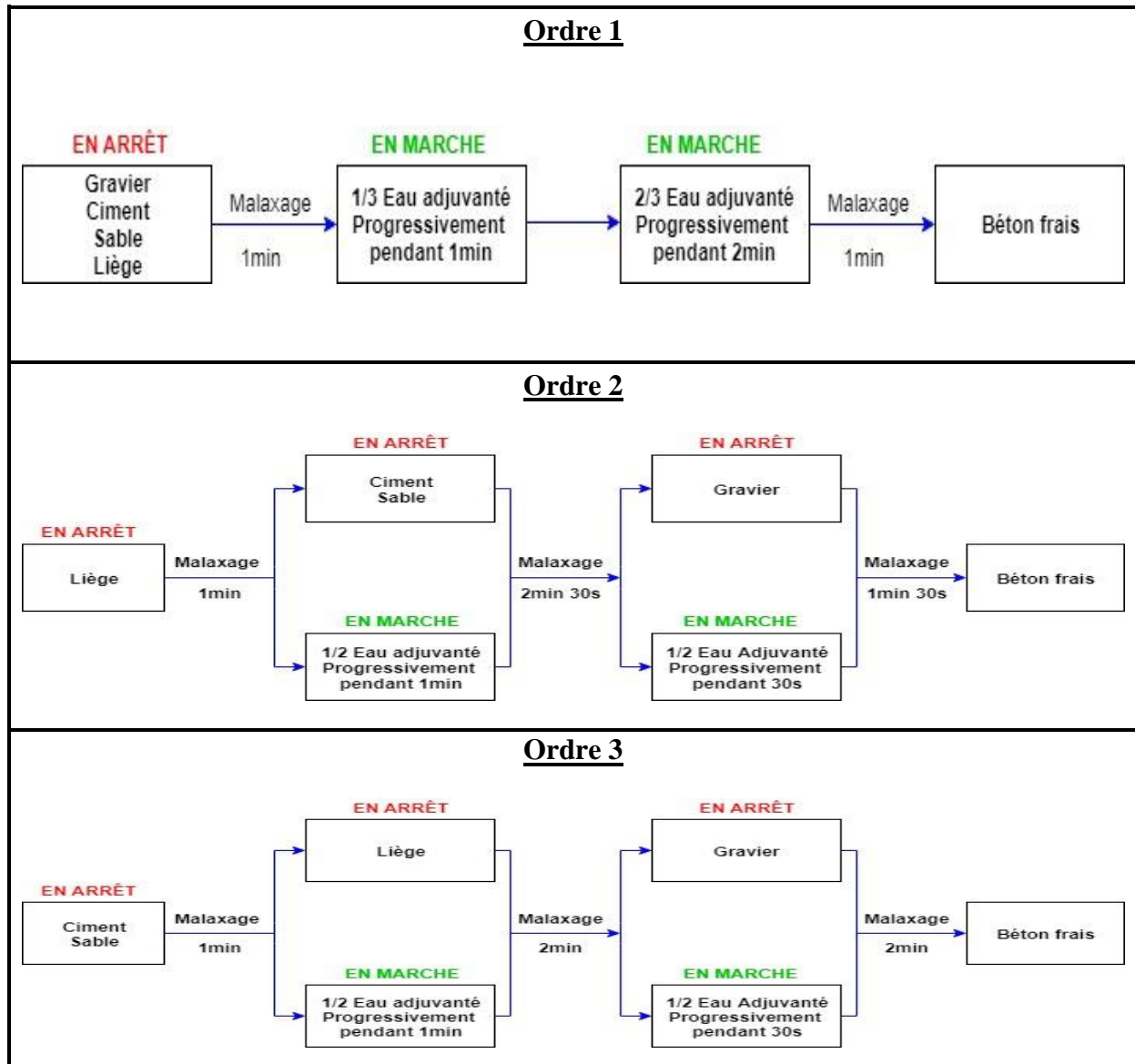


Figure IV.1 : Ordres d'introduction des constituants du béton à base de 50% de liège.

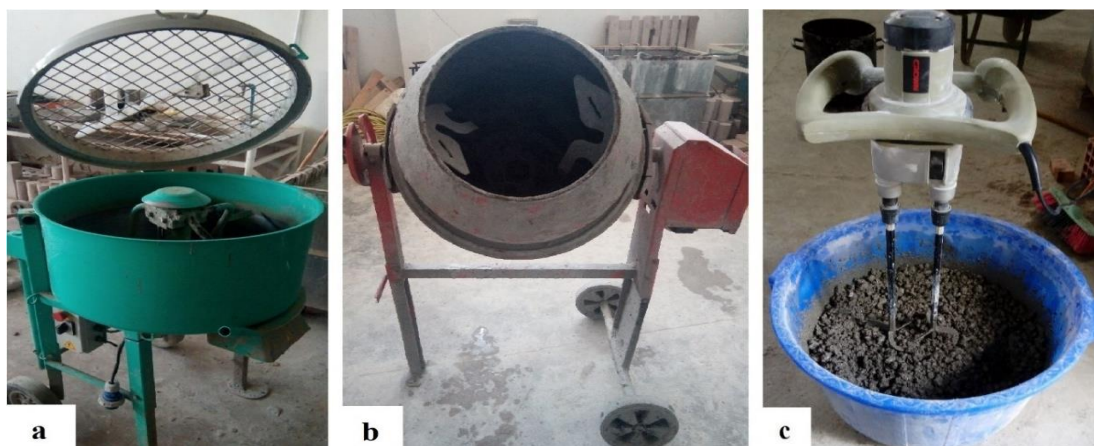


Figure IV.2 : Différents outils de malaxage testés, a) Malaxeur, b) Bétonnière, c) Mélangeur double.

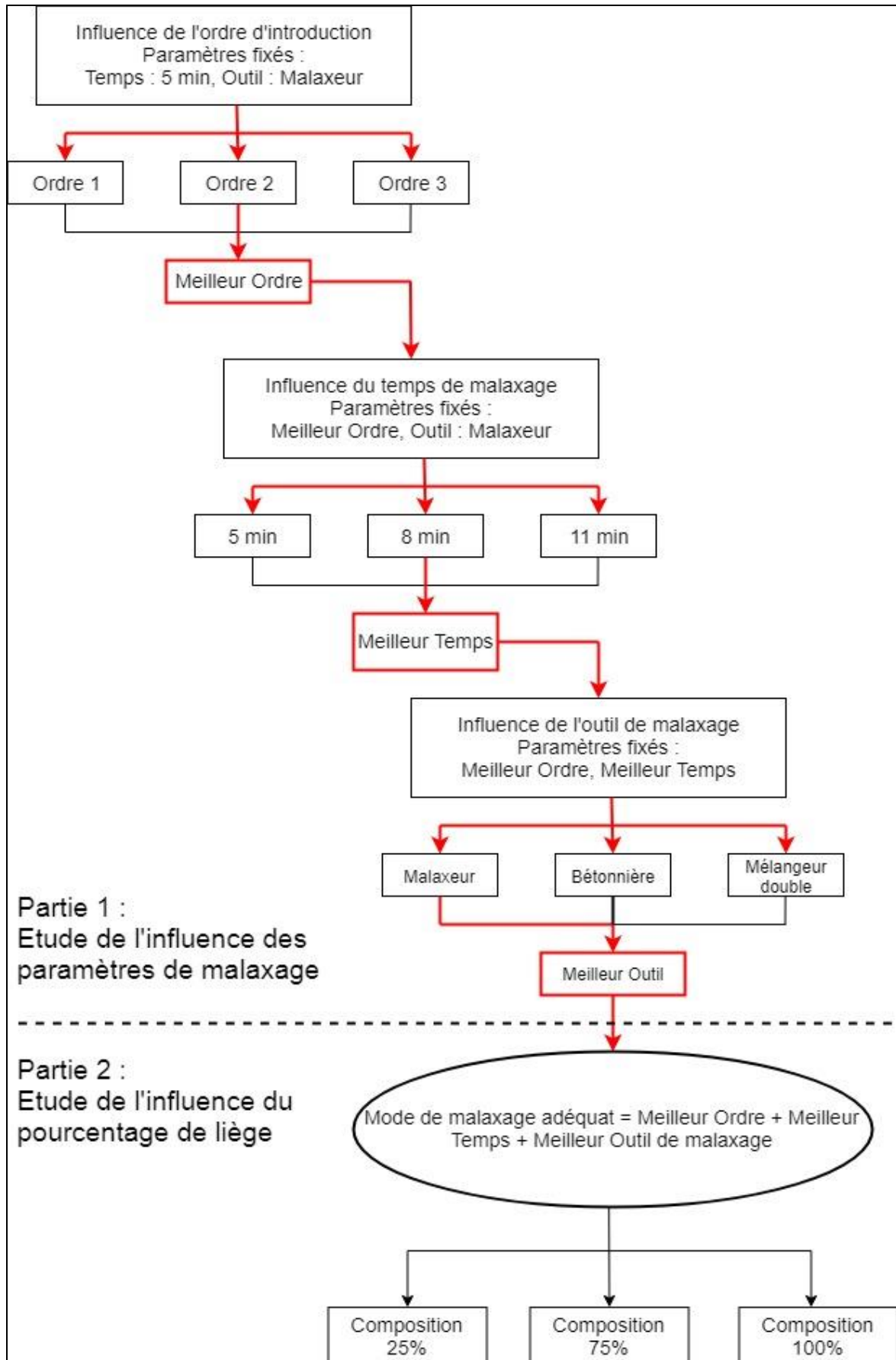


Figure IV.3 : Organigramme du programme expérimental

IV.3. Influence de l'ordre d'introduction

Rappelons que nous avons défini trois ordres d'introduction. Dans le choix de l'ordre 1 nous nous sommes inspirés des travaux de recherche de (TALEB O., 2017) pour voir si le malaxage adopté au béton de référence est convenable au béton de liège. Dans le choix de l'ordre 2 et 3, la densité du liège était le facteur décisif. Dans l'ordre 2 nous avons introduit le liège en premier lieu en s'inspirant des travaux de (Moreira A. & al, 2014). L'introduction du liège après le sable et le ciment et avant le gravier dans l'ordre 3 a pour but d'assurer la non remonté des granulats de liège en surface.

IV.3.1. A l'état frais

La Figure IV.4 présente les résultats de l'affaissement en fonction de l'ordre d'introduction. Ces résultats confirment l'incidence de l'approche utilisée dans l'introduction des constituants de ce type de béton dans le malaxeur. Le but recherché étant d'adopter le béton qui donne la meilleure consistance ; c'est donc l'ordre 2 que nous considérons pour le reste de notre programme où c'est le liège qui est introduit le premier dans la cuve de l'outil de malaxage. Les trois classes de liège sont donc d'abord homogénéisées à sec dans le malaxeur avant d'y verser les autres constituants solides. Cette procédure est inspirée des travaux de (Moreira A. & al, 2014).

Il faut aussi préciser, que l'ordre 3 a un impact important sur l'ouvrabilité du mélange et qu'il n'est pas recommandé de l'utiliser dans ce cas.

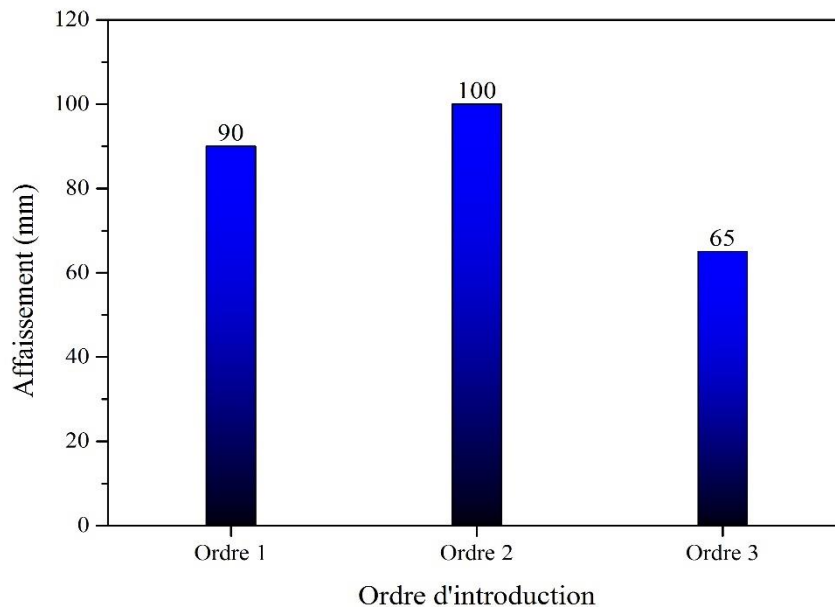


Figure IV.13 : Ouvrabilité des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur.

IV.3.2. A l'état durci

La Figure IV.5 présente la variation de la masse volumique et des résistances conventionnelles des bétons (à 50%) testés en fonction de l'ordre d'introduction des constituants. D'après cette Figure, on peut dire que l'ordre 2 présente la meilleure résistance à la compression à 28 jours avec une valeur de 4,3 MPa. Nous pensons que l'ouvrabilité de ce béton à l'état frais a permis une mise en œuvre plus facile dans le moule, responsable de sa grande densification et par conséquent de la meilleure résistance à la compression. La résistance à la traction par flexion dépend amplement de la répartition des granulats dans la masse de l'échantillon. Nous notons, toutefois un ordre de grandeur intéressant ($RT_f > R_c/2$) pour les mélanges obtenus.

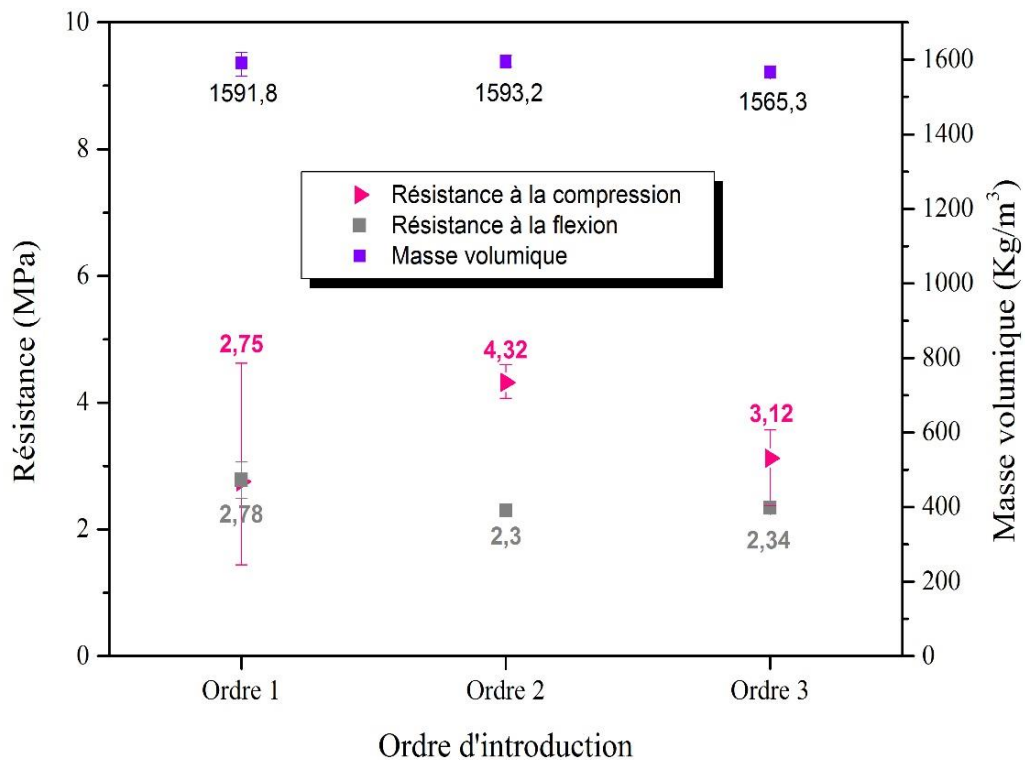


Figure IV.5 : Résistances mécaniques conventionnelles des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur.











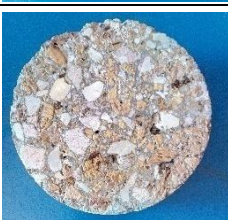




IV.3.3. Homogénéité

L'inspection visuelle de la répartition des granulats légers dans les éprouvettes cylindriques testées montre, une présence, dans toutes les parties sciées, des granulats minéraux et végétaux ; ce qui offre une certaine homogénéité dans la répartition de ces deux types de granulats dont les densités sont très différentes, et qui aurait pu être à l'origine d'une répartition très hétérogène.

Les résultats des masses volumiques signalent la présence d'un gradient de densité sur la hauteur de toutes les éprouvettes cylindriques, d'élanement 2 (Tableau IV.2). Il est à noter que ce gradient ne suit aucun ordre précis et nous ne pouvons par conséquent donner aucune recommandation en vue d'améliorer cet état de fait. Néanmoins, on peut remarquer que la partie inférieure des éprouvettes est la plus dense ; on peut ramener ce résultat au mode de serrage du béton après mis en œuvre dans les moules (table vibrante), ce qui favorise la descente au fond du moule, des granulats les plus lourds.

Toutefois, nous pouvons noter que le mode 2 offre un gradient de densité de l'ordre de 7% entre les extrémités supérieures et inférieures de l'éprouvette étudiée, contrairement aux modes 1 et 3 dont le gradient de densité est respectivement de l'ordre de 12 et 18%.

Tableau IV.2 : Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur avec un temps de 5 minutes.

	BL50 O1	Mv	BL50 O2	Mv	BL50 O3	Mv
Sup		1603,65		1543,32		1352,16
M1		1599,87		1590,67		1499,69
M2		1607,21		1623,63		1509,77
M3		1548,41		1530,67		1587,26
Inf		1815,31		1657,17		1657,61

IV.3.4. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à l'état frais et à l'état durci, montrent clairement que l'ordre 2 reste le plus performant. Ceci peut être expliqué par le fait que l'introduction du liège en premier, suivi par l'introduction du ciment, sable et eau a permis d'avoir un meilleur enrobage des granulats de liège, ce qui a induit une bonne homogénéité, et donc un meilleur affaissement à l'état frais et de bonnes caractéristiques mécaniques à l'état durci.

IV.4. Influence du temps de malaxage

Dans cette partie de l'étude, nous avons convenu d'utiliser le malaxeur en préconisant le mode d'introduction 2 choisi plus haut. La fourchette des temps utilisés varie de 5min à 11min en passant par un temps de 8min. Ce choix était fait en se basant sur les travaux lus dans la bibliographie faite sur les bétons légers, et qui utilisent un temps minimum de 5min.

IV.4.1. L'état frais

La Figure IV.6 présente l'affaissement du béton à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage (5, 8 et 11 minutes). D'après ces résultats, la plus grande ouvrabilité est obtenue pour le temps de malaxage intermédiaire (8min). Notons que les ouvrabilités mesurées pour les deux autres temps de malaxage sont dans la même classe (bétons plastiques). Le temps de malaxage n'a pas donné une grande influence sur l'affaissement. Cependant, il est à signaler qu'une ségrégation a été remarquée pour un temps de 5min alors que les mélanges de 8min et 11min présentent des homogénéités meilleures et pratiquement similaires. Ce constat nous a conduit à choisir le temps 8min pour la suite du programme expérimental.

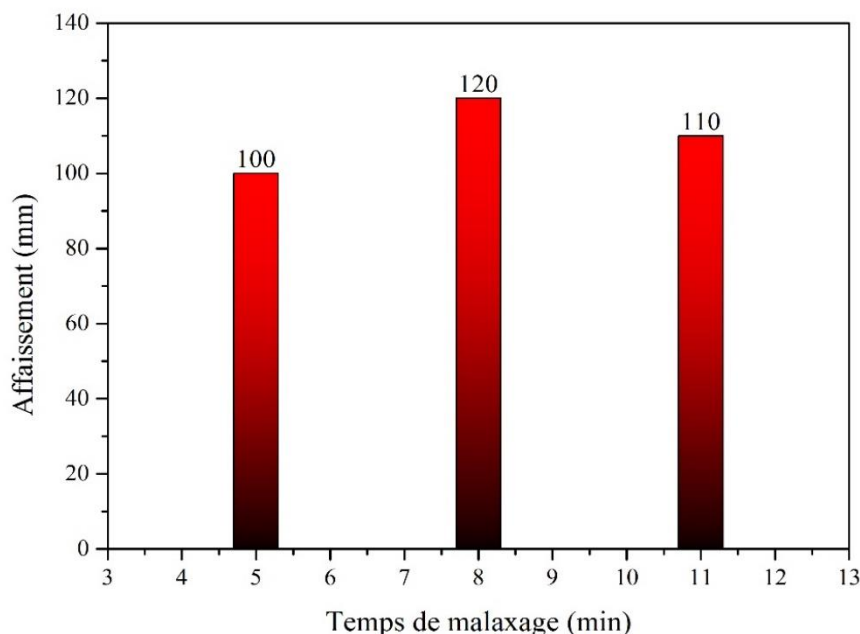


Figure IV.6 : Ouvrabilité des bétons à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage.

IV.4.2. A l'état durci

La Figure IV.7 présente la variation de la masse volumique et des résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion en fonction du temps de malaxage. Au regard des résultats présentés, on remarque que les résistances à la compression varient entre 3.47MPa et 4.32MPa. Il est à noter que la plus grande résistance (4.32MPa) est obtenue pour un temps de 5min. Ceci signifie une différence de 19.68% et 4.17% entre ce résultat et ceux obtenus pour des temps de 8min et 11min, respectivement.

Contrairement à la résistance à la compression, les résultats de résistance à la traction par flexion présentent des différences inférieures à 5%. Toutefois, la plus grande valeur est obtenue pour un temps de 8min et est de 2,42MPa.

La masse volumique obtenue pour un temps égal à 5min est de 1593.2 Kg/m³. Cette valeur chute de 5.06% quand le temps passe de 5min à 8min et diminue de 3.43% en allant de 5min à 11min.

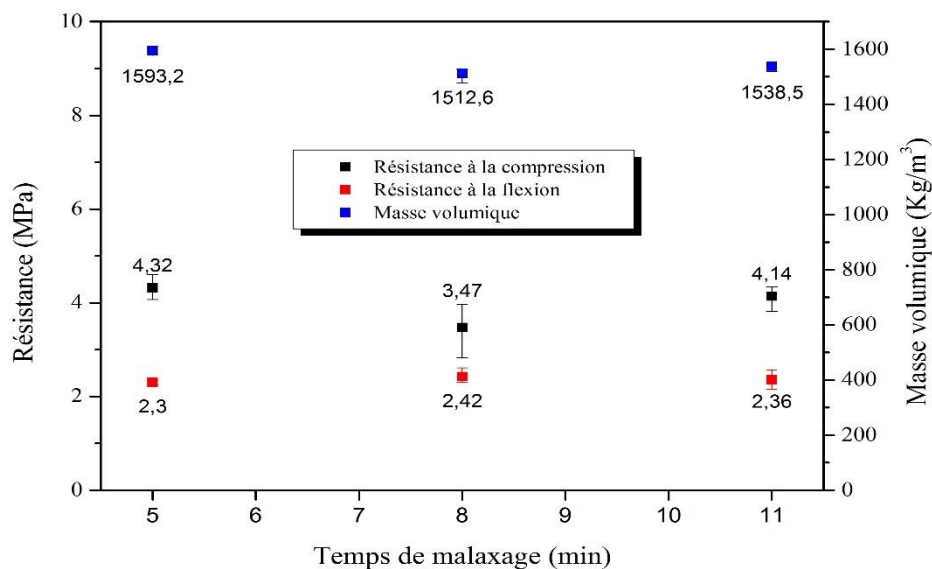


Figure IV.14 : Résistances mécaniques conventionnelles des bétons à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage.
















IV.4.3. Homogénéité

Il est judicieux de préciser que la désignation BL50T1 correspond aussi au BL50O2 ; c'est le même béton et donc les mêmes résultats qui sont repris (Tableau IV.3).

L'étude de l'homogénéité a montré que l'augmentation du temps de malaxage aboutirait à un gradient de densité plus élevé que ceux obtenus auparavant. En effet, pour les temps $T_m = 8$ et 11 min, le gradient est de 26%, contrairement à $T_m = 5$ min où il n'est que de 7%.

Nous pouvons aussi se demander si ces résultats ne sont en grande partie dus, au moyen de serrage utilisé dans la confection de nos éprouvettes au laboratoire.

Tableau IV.3 : Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des bétons à base de 50% de liège en fonction du temps de malaxage.

	BL50 T1	Mv	BL50 T2	Mv	BL50 T3	Mv
Sup		1543,32		1269,08		1337,54
M1		1590,67		1496,50		1441,38
M2		1623,63		1536,16		1566,29
M3		1530,67		1491,46		1465,28
Inf		1657,17		1709,07		1805,22

IV.3.4. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à l'état frais signifient que $T = 8\text{min}$ donne une meilleure ouvrabilité ainsi qu'une bonne homogénéité. Cependant, les caractéristiques à l'état durci ne confirment pas ce constat où les meilleures résistances et masses volumiques sont obtenues pour un temps de 5min. Ceci est probablement dû à des détails de remplissages à cause de la ségrégation remarquée pour le béton malaxé 5min.

IV.5. Influence de l'outil de malaxage

Pour cette partie du programme, nous avons convenu d'utiliser le mode d'introduction 2 pour un temps de malaxage égal à 8 minutes. Le choix des outils de malaxage s'est fait en fonction de leur disponibilité dans notre laboratoire et qui sont, un malaxeur à axe vertical, une bétonnière et un mélangeur double (Figure IV.2).

IV.5.1. L'état frais

La Figure IV.8 présente l'affaissement du béton à base de 50% de liège en fonction de l'outil de malaxage utilisé. Les résultats de cette Figure montrent que l'affaissement obtenu en utilisant le malaxeur et qui est de 120mm présente une supériorité de 45.83% et 16.67% par rapport à ceux obtenus en utilisant la bétonnière et le mélangeur double, respectivement.

La Figure IV.9 montre clairement le développement d'un phénomène de ségrégation au niveau des bétons malaxés à l'aide de la bétonnière et du mélangeur double. Toutefois, cette même Figure illustre la bonne homogénéité obtenue en utilisant le malaxeur à axe vertical.

Sur la base des résultats obtenus à l'état frais, le malaxeur à axe vertical sera utilisé dans la suite du programme expérimental.

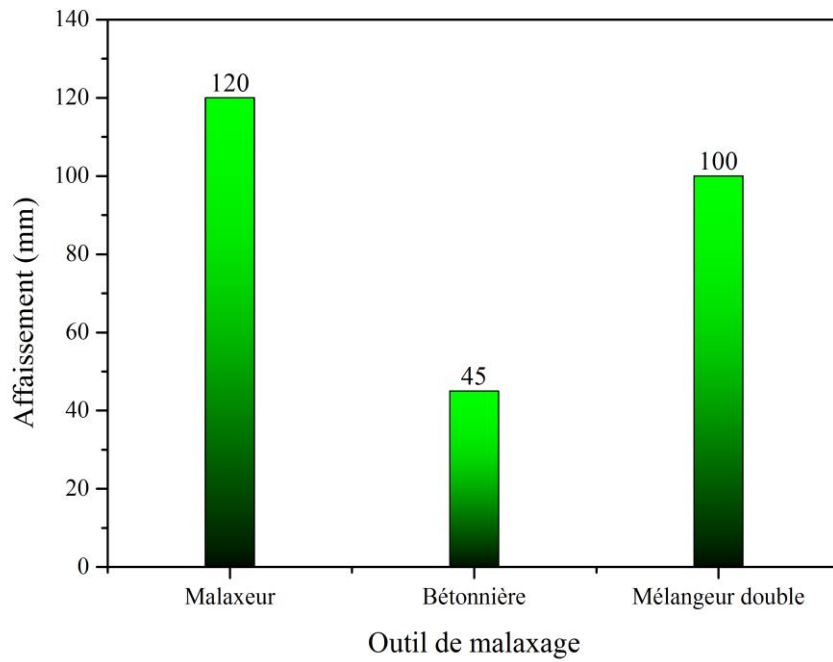


Figure IV.15 : Ouvrabilité des bétons à base de 50% de liège en fonction du moyen de malaxage utilisé.

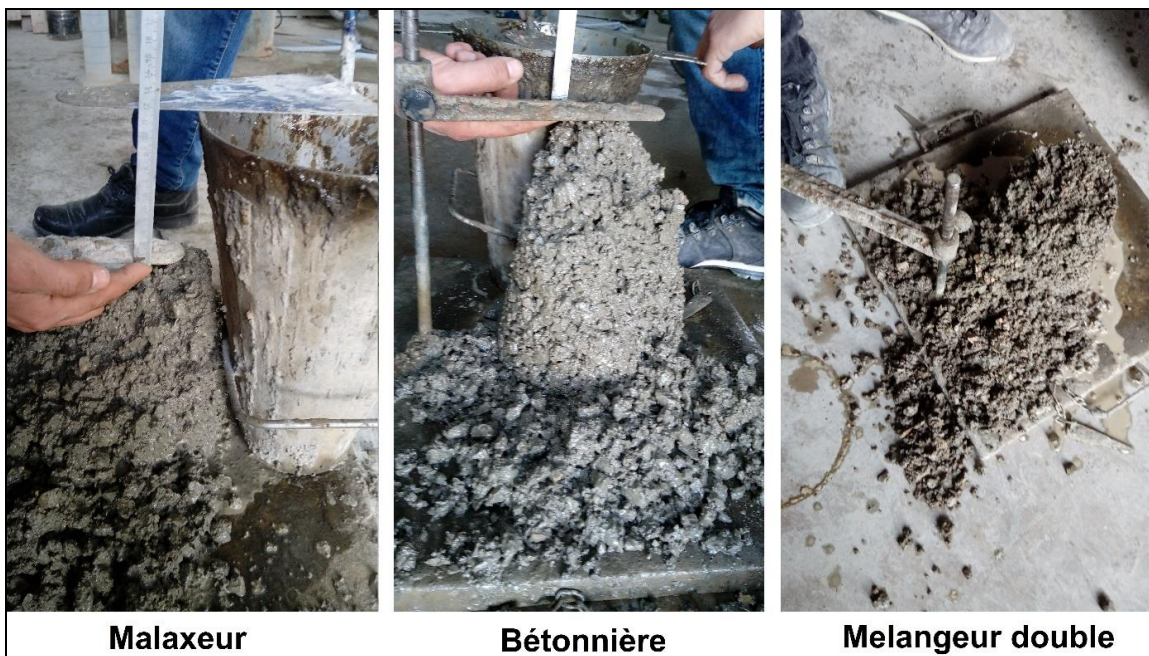


Figure IV.9 : Bétons à l'état frais confectionnés à l'aide des différents outils de malaxage.

IV.5.2. A l'état durci

La Figure IV.10 présente les résultats de la masse volumique et des résistances mécaniques à 28 jours en fonction des trois outils de malaxage utilisés : malaxeur, bétonnière et mélangeur double. D'après cette Figure, on remarque que la bétonnière donne la plus grande valeur de la résistance mécanique à la compression (4,14MPa) qui présente une supériorité de 14,5% et 38,6% par rapport à la valeur du malaxeur et du mélangeur double, respectivement. Cependant, les résistances à la traction restent presque similaires où les différences ne dépassent pas dans 11%. De même que les résistances à la traction, les valeurs des masses volumiques présentent un intervalle de différence inférieur à 3%.

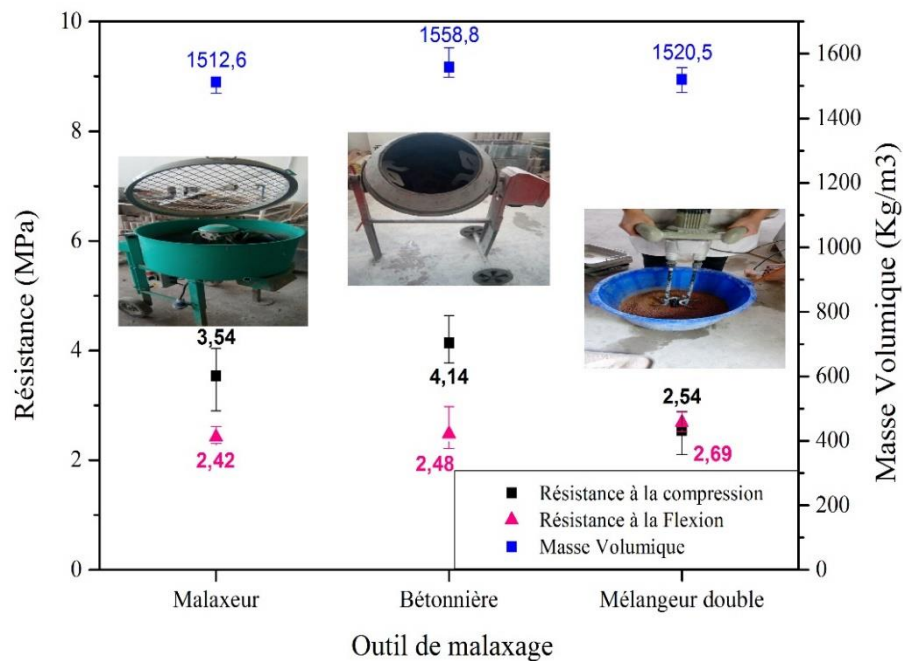


Figure IV.10 : Résistances mécaniques conventionnelles des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'outil de malaxage.














IV.5.3. Homogénéité

Le Tableau IV.4 consigne les résultats obtenus des masses volumiques des diverses parties des éprouvettes sciées du béton à base de 50% de granulats de liège.

Les gradients de densité dans cette partie du programme expérimental sont relativement faibles par rapport aux précédentes ; sachant que les paramètres d'étude (ordre d'introduction et temps de malaxage) ont été déjà optimisés.

Il est utile de préciser que le malaxeur double a conféré à l'éprouvette de béton de liège un gradient de densité extrêmement faible ; cependant, cet équipement a été choisi pour effectuer des tests au laboratoire, car il n'est pas recommandé pour le mélange des bétons. Nous avons eu à ce titre des difficultés d'utilisation du malaxeur double surtout en présence des gros graviers dans nos mélanges.

Tableau IV.4 : Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des bétons à base de 50% de liège en fonction de l'outil de malaxage.

	BL50 M	Mv	BL50 B	Mv	BL50 MD	Mv
Sup		1543,32				1564,57
M1		1590,67				1669,24
M2		1623,63		1565,31		1441,22
M3		1530,67		1563,81		1379,40
Inf		1657,17		1743,84		1587,16

IV.5.4. Interprétation des résultats

Les résultats de l'affaissement et ceux de la résistance à la compression montrent des résultats contradictoires car, la bétonnière présente de mauvaise propriété à l'état frais (faible affaissement et non homogénéité du mélange) et bonnes performances mécaniques à l'état durci (résistance à la compression). Ceci peut être dû à la ségrégation et à la mise en œuvre qui ont privilégié la résistance à la compression du mélange obtenue par malaxage dans la bétonnière. C'est donc le malaxeur à axe vertical (avec un système de brassage horizontal), l'outil le plus adapté à la formulation du béton de liège, cette conclusion est confirmée par les résultats d'homogénéité du béton à l'état durci.

IV.6. Application : Evolution des propriétés des bétons en fonction du pourcentage de liège

Après avoir effectué le choix du mode de malaxage adéquat au béton de liège, la partie suivante est dédiée à une application visant à voir l'impact de variation du pourcentage de liège sur les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques du béton de liège. Nous avons décidé de passer par des remplacements volumiques de 25%, 50%, 75% jusqu'à 100% où le taux des granulats minéraux est nul (béton complètement végétal) en utilisant le mode de malaxage établi ci-dessus (Malaxeur, Ordre 2 et 8min).

IV.6.1. A l'état frais

IV.6.1.1. Ouvrabilité :

La Figure IV.11 présente les résultats de la consistance des divers bétons confectionnés à base de pourcentage croissant de granulats de liège. Nous remarquons que la substitution graduelle des granulats végétaux au béton engendre une perte très significative de son ouvrabilité. En effet, d'une consistance molle (170mm) pour le béton à base de granulats minéraux (Béton de référence), on est passé à une consistance ferme (32mm) pour le béton à base de granulats de liège.

Ce constat était prévisible puisque les granulats de liège ont des capacités d'absorption en eau très élevés. Ces granulats ont absorbé, donc, pendant l'opération de malaxage, une partie de l'eau de gâchage et par conséquent l'ouvrabilité du mélange a été affectée.

Nous aurions dû prévoir, pendant le malaxage, l'ajout à l'eau de gâchage calculé pour le béton de référence, des quantités d'eau calculés à partir des coefficients d'absorption des trois classes de granulats de liège en fonction de leurs dosages respectifs et tenter de garder constante la consistance de tous ces bétons.

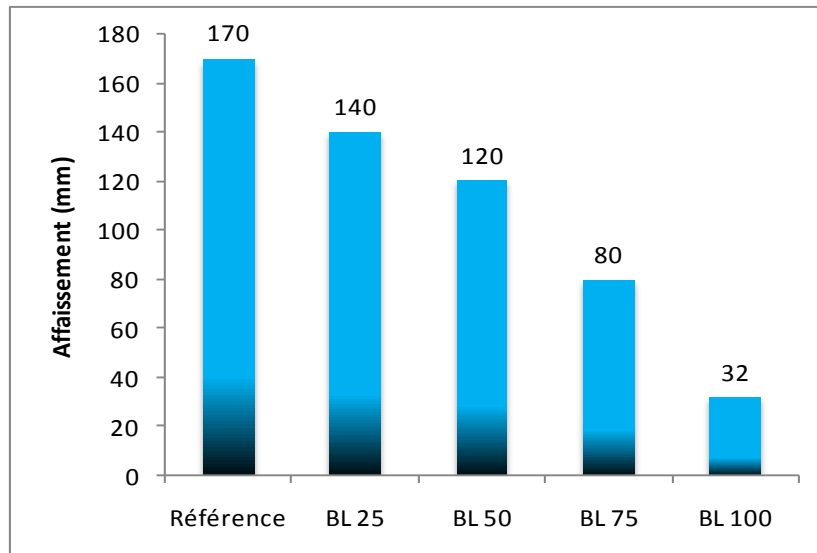


Figure IV.11 : Ouvrabilité mesurée au cône d'Abrams, des différentes bétons testés.

IV.6.1.2. Rhéologie :

La Figure IV.12 regroupe les résultats des caractéristiques rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des cinq bétons testés. Les résultats de ces essais montrent que le seuil de cisaillement de ces bétons augmente jusqu'à atteindre une limite à partir de 50% de substitution des granulats de liège. La constance de la maniabilité de ces bétons aurait pu jouer en faveur de la diminution de leur seuil de cisaillement.

L'effet des granulats en liège sur la viscosité des bétons est plutôt inversé en comparaison avec le seuil de cisaillement pour les deux premiers taux de substitution. En effet, pour ces deux premiers bétons de liège, la maniabilité est restée pratiquement dans la même classe, ce qui n'a pas affecté la viscosité des mélanges. Toutefois, la viscosité devient relativement élevée pour des taux de substitution équivalents à 75% et plus, où la consistance a sérieusement chuté.

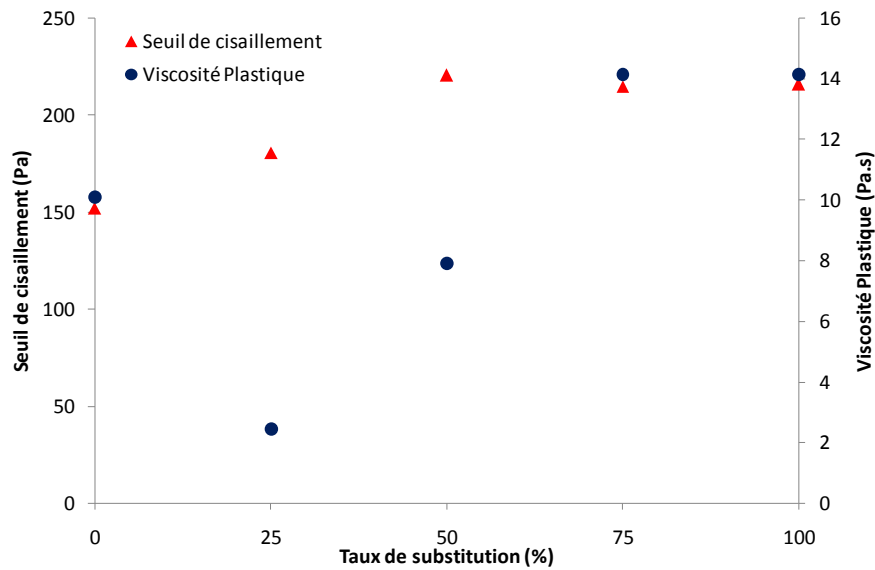


Figure IV.12 : Influence des paramètres rhéologiques des différents bétons testés en fonction du taux de granulats de liège substitué.

IV.6.2. A l'état durci

IV.6.2.1. Masse volumique des bétons :

La Figure IV.13 représente la variation de la masse volumique des diverses compositions de béton à 28 jours en fonction du pourcentage de liège substitué. Nous montrons que la relation entre la masse volumique des mélanges et le pourcentage du liège substitué est parfaitement linéaire. Notons, que plus le taux de remplacement augmente, plus la masse volumique diminue. Cette masse volumique est passée de 2383,7 Kg/m³ à 716,5Kg/m³ quand le taux de remplacement est allé de 0% (béton de référence) à 100% c'est-à-dire une chute de 70%. Ce résultat est dû au fait de remplacer un volume de granulats minéraux dont la masse volumique moyenne est de 1500 kg/m³ par son équivalent en granulats de liège présentant une masse volumique moyenne de 85 kg/m³.

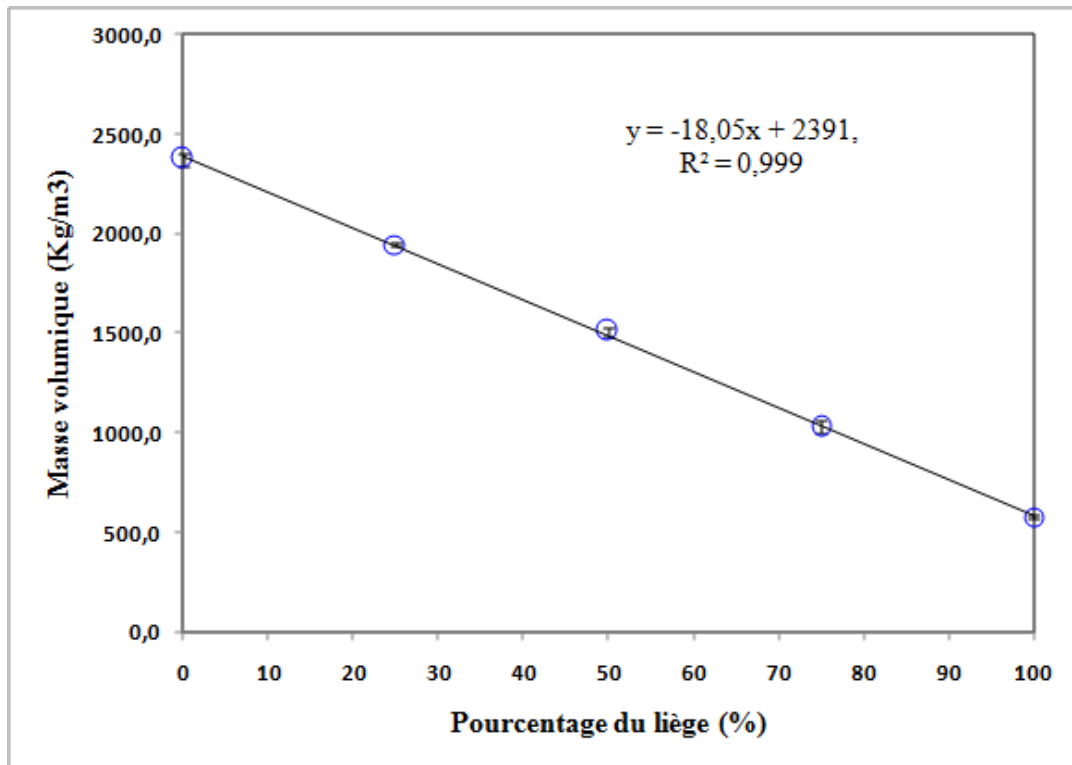


Figure IV.13 : Masse volumique en fonction des bétons testés en fonction du pourcentage de liège substitué.

Aussi, il est à signaler que le béton à 100% de granulats de liège présente une masse volumique inférieure à celle de l'eau. Ceci lui confère la caractéristique de flottabilité sur l'eau (Figure IV.14). Nous avons aussi constaté que les éprouvettes à fort taux de substitution de granulats de liège ($\geq 75\%$) présentent un manque dans le volume de pâte de ciment ; elles sont grenues à la surface (Figure IV.15). Ce constat peut être expliqué par le fait de remplacer les granulats minéraux chargés en fines par les granulats de liège qui ne comporte pratiquement pas de fines.



Figure IV.14 : Flottement du béton à base de granulats végétaux (à 100 %).



Figure IV.15 : Epreuves à fort taux de substitution de granulats de liège ($\geq 75\%$)

De plus, nous avons constaté une augmentation des masses volumiques des épreuves de béton après 28 jours de maturation (Tableau IV.5). Cette augmentation est probablement due aux quantités d'eau absorbées par les granulats de liège pendant la cure par immersion dans l'eau des épreuves de béton. Ainsi, ce constat nous pousse à penser à d'autres conditions de cure pour ce type de béton.

Tableau IV.5 : Effet de la maturation dans l'eau des épreuves de bétons de liège.

	M.V 1j (Kg/m³)	M.V 28j (Kg/m³)	Evolution de la M.V (%)
BL 25	1944,60	1985,70	2,07
BL 50	1554,39	1605,71	3,20
BL 75	1027,40	1136,4	9,60
BL 100	579,30	716,5	19,15

IV.5.2.2. Propriétés mécaniques :

Les Figures IV.16 et IV.17, présentent la variation des résistances à la compression et à la traction par flexion à 28 jours, en fonction du taux de substitution des granulats de liège. A partir de la Figure IV.16, on remarque que plus le pourcentage du liège augmente, plus la résistance à la compression diminue en suivant une relation exponentielle. A titre d'exemple, cette résistance est passée de 31.5 MPa à 0.5 MPa c'est-à-dire une diminution de 98.5% quand le taux de remplacement a varié de 0 à 100%.

Selon la classification des bétons légers de la RILEM⁴, les bétons de liège réalisés à un taux de substitution supérieur à 50% ne peuvent être utilisés que pour des applications destinées à

⁴ **RILEM** : Réunion Internationale des Laboratoires d'Etudes des Matériaux

l'amélioration de l'isolation thermique (par la suite l'efficacité énergétique), tandis que les bétons contenant un taux de substitution inférieur ou égal à 50% de liège peuvent être utilisés à la fois comme matériaux d'isolation et de résistance (Tableau IV.6).

Tableau IV.6 : Classification fonctionnelle des bétons légers selon RILEM

Béton des granulats légers		
Propriétés	Classe II (béton de résistance et d'isolation)	Classe III (béton d'isolation)
Résistance à la compression (MPa)	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .k ⁻¹)	< 0.75	< 0.3

La Figure IV.14 montre que cette même tendance est remarquée pour la variation de la résistance à la flexion. Notons que pour la résistance à la flexion, la diminution est de 92% en allant de 0% de substitution à 100%.

Les résultats obtenus pour les résistances mécaniques sont principalement dus au remplacement d'un volume de granulats rigides issus de roches dures (granulats minéraux) par son équivalent en granulats d'origine végétale (granulats de liège).

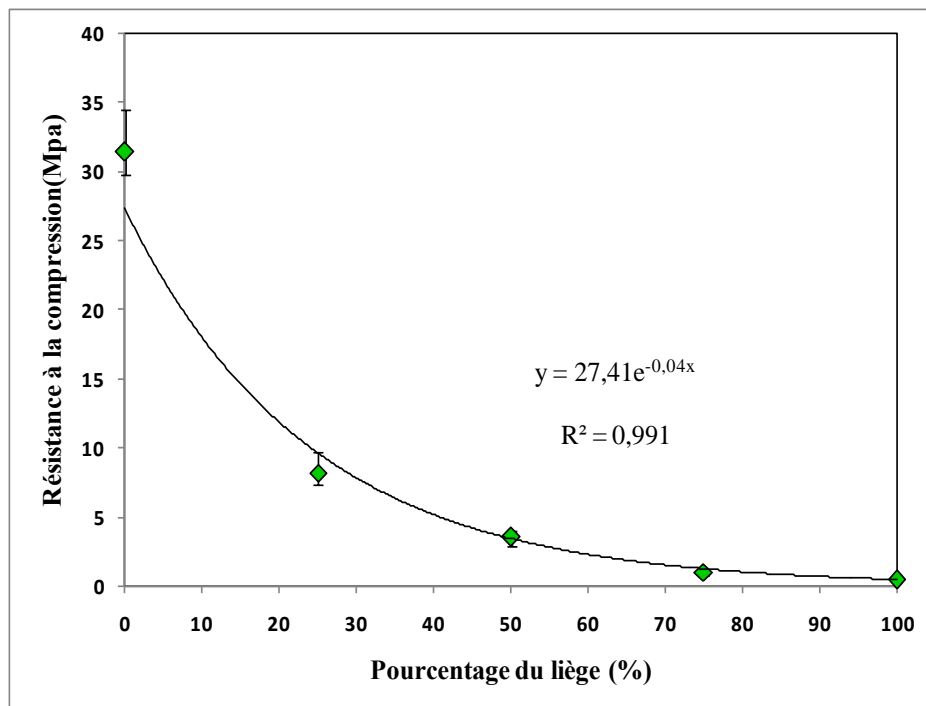


Figure IV.16 : Résistance à la compression à 28 jours des bétons de liège en fonction du pourcentage de liège substitué.

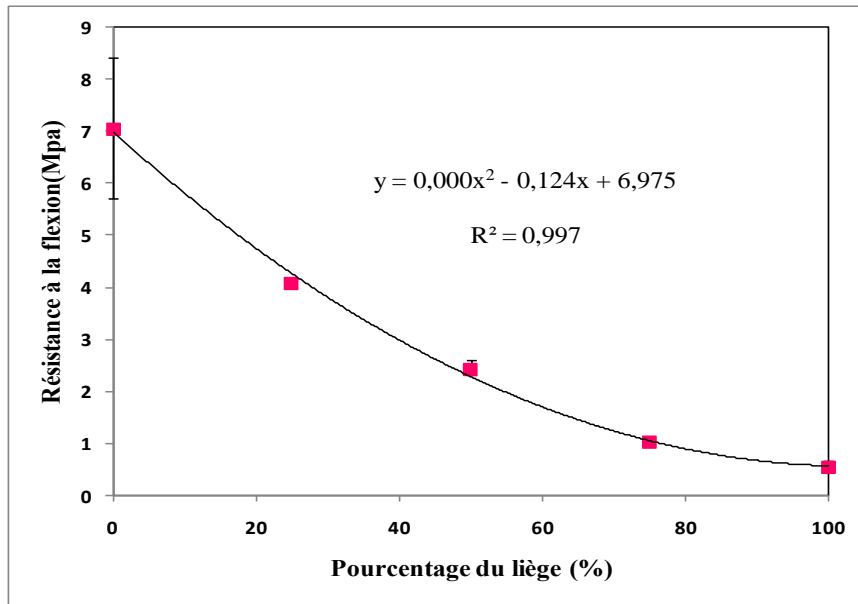


Figure IV.17 : Résistance à la flexion à 28 jours des bétons de liège en fonction du pourcentage de liège substitué.

La Figure IV.18 présente la variation de la résistance à la compression des bétons réalisés en fonction de leurs masses volumiques respectives. D'après cette, on peut dire que la résistance à la compression est proportionnellement liée à la masse volumique en suivant une relation exponentielle. La résistance à la compression est passée de 31.5 MPa quand la masse volumique était de 2384 Kg/m³ (béton de référence) à une valeur de 0.5 quand la masse volumique est devenue 716.5 Kg/m³ (béton contenant 100% de liège). Ce constat est peut-être dû à la forte porosité intra granulaire des granulats de liège.

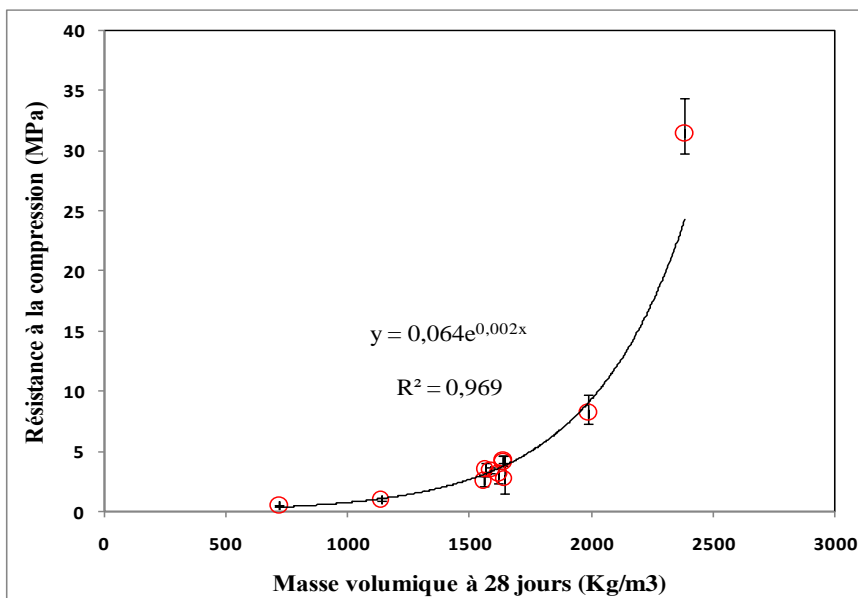










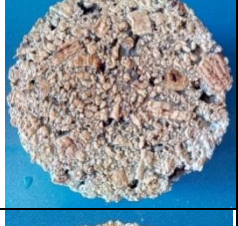


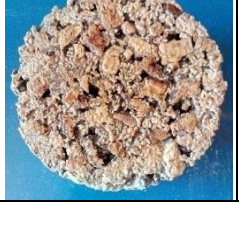
Figure IV. 18 : Résistance à la compression à 28 jours des bétons de liège en fonction de la masse volumique.

IV.6.3. Homogénéité

Le Tableau IV.7, regroupe les résultats relatifs à la mesure des masses volumiques des morceaux de bétons issus du sciage des éprouvettes des bétons de liège formulés. Ces résultats, malgré l'optimisation élaborée sur les paramètres de malaxage, montrent un gradient de densité entre les extrémités des éprouvettes de béton de l'ordre de 20% pour les bétons où les granulats minéraux subsistent encore ($T_s < 75\%$).

Nous avons aussi remarqué pour le béton de liège à 100%, que les granulats légers ont tendance à se concentrer dans la partie inférieure. En effet, ce béton totalement dépourvu de granulats minéraux est caractérisé par un faible affaissement et nécessite donc une vibration plus importante lors de sa mise en œuvre ; il en résulte une remontée de la pâte de ciment dans les parties supérieures et offre par conséquent un gradient de densité élevé de l'ordre de 45%.

Tableau IV.7. Répartition granulaire au sein des éprouvettes cylindriques des divers bétons de liège.

	BL25	Mv	BL75	Mv	BL100	Mv
Sup		1710,68		1096,76		998,80
M1		1923,79		1017,03		663,58
M2		1924,81		957,98		605,87
M3		1878,88		966,79		620,62

Inf		2152,19		1368,51		555,24
-----	---	---------	---	---------	---	--------

IV.7. Conclusion

La variation des paramètres de malaxage nous a été bénéfique pour distinguer un mode de malaxage adapté au béton de liège. L'introduction des granulats selon l'ordre 2 dans le malaxeur avec un temps de malaxage égale à 8 minutes représente le mode de malaxage le plus approprié à ce béton.

Le liège, étant un matériau de très faible masse volumique, nous a permis d'obtenir des bétons légers d'une densité qui varie entre 720 à 2000Kg/m³, selon le taux de substitution. Le béton complètement végétal possède une densité inférieure à celle de l'eau (716 Kg/m³) et lui permet de flotter dans l'eau.

L'effet du liège sur les paramètres du béton à l'état frais est notable, l'affaissement décroît proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage du liège. Par contre, les paramètres rhéologiques oscillent selon la quantité de liège présente dans le mélange.

Par rapport aux performances mécaniques, le liège diminue la résistance à la compression du béton d'une manière sensible.

Enfin, les bétons à 25% et 50% de liège sont des bétons de résistance et d'isolation à la fois. Tandis que les bétons à 50%, 75% et 100% sont des bétons d'isolation.

Conclusions et Perspectives

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'influence des paramètres de malaxage (ordre d'introduction des constituants, temps de malaxage, outil de malaxage et pourcentage de liège) sur les propriétés du béton de liège à l'état frais (affaissement, viscosité et seuil de cisaillement) et à l'état durci (résistance mécanique à la compression et à la traction, masse volumique et homogénéité). Notre travail a consisté à varier les paramètres de malaxage et de caractériser les bétons de liège afin de déterminer le mode de malaxage approprié pour ce nouveau béton. Les principaux enseignements tirés à la fin de ce travail, sont les suivants :

- L'introduction du liège en premier paraît l'ordre le plus adéquat au béton de liège.
- Un temps de 8 minutes est le temps de malaxage convenable au béton de liège, c'est le temps qui a donné les meilleures performances à l'état frais (affaissement et rhéologie) et à l'état durci (résistance mécanique à la compression).
- Le malaxeur à axe vertical est l'outil de malaxage le plus approprié pour la confection du béton de liège. C'est l'outil qui a donné les meilleurs résultats, notamment par rapport à l'homogénéité du mélange.
- L'introduction des granulats de liège affaiblit les caractéristiques du béton à l'état frais et durci proportionnellement au taux de substitution.
- L'affaissement diminue proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de liège introduite dans le béton.
- Le liège affecte les propriétés rhéologiques du béton, essentiellement la viscosité qui diminue selon des taux de substitution $\leq 50\%$ et s'accroît pour les forts pourcentages en liège ($\geq 75\%$).
- La masse volumique du béton diminue linéairement avec la quantité de liège introduite. D'après nos résultats, la densité du béton composé entièrement de granulats végétaux diminue d'une valeur de 70% par rapport à notre béton de référence qui a une densité égale à 2380 Kg/m^3 .
- Les résistances mécaniques diminuent systématiquement avec la substitution croissante des granulats minéraux par les granulats de liège. En effet, les deux résistances à la compression et à la traction diminuent respectivement de 98% et de 92% lorsque le taux de substitution en liège atteint 100%.

- L'homogénéité de ce béton est délicatement affectée par le moyen de serrage qui, engendre une certaine instabilité au mélange.

Perspectives

Afin de contribuer à l'amélioration des propriétés de ces bétons verts, particulièrement ceux à base de liège, nous recommandons les travaux suivants :

- Traitement du liège.
- Prendre en considération le grand pouvoir absorbant des granulats de liège durant l'opération de malaxage.
- Augmenter le temps de malaxage, car pour notre cas le mélange malaxé pendant 11 minutes a donné les meilleures valeurs de résistances mécaniques à la compression.
- Définir une méthode de serrage bien précise afin de pouvoir comparer différents mélanges ayant le même paramètre à étudier.
- Prévoir d'autres conditions de cure pour ce type de béton contenant des granulats à forte aptitude d'absorption.

Nous pensons aussi que les sujets proposés ci-dessous, concernant le béton de liège, pourront être de bons axes de recherche :

- Amélioration des propriétés d'un béton à base de granulats végétaux à 100%.
- Evaluation des caractéristiques d'isolation, notamment l'isolation thermique du béton de liège.
- Exploitation de la ductilité du béton de liège.
- Etude de la durabilité du béton de liège dans des milieux agressifs (températures extrêmes, résistance au feu, ...).
- Identifier les applications potentielles du béton de liège (chape, enduit, blocs de béton, etc.).

Annexe 1

Méthode de calcul des compositions du béton de liège

	Masse (Kg)	M.V (Kg/m ³)	Coef d'absorption (%)
Sable	780,6	1636,5	1,71
Gravier 4/8	348,0	1311,0	1,22
Gravier 8/16	729,3	1317,0	1,23
Liège 0/4	-	89,0	138,00
Liège 4/8	-	84,0	74,50
Liège 8/16	-	86,6	45,50

La méthode de calcul sera appliquée sur le sable pour une composition de 75% de taux de remplacement en liège :

1. Volume du sable dans la composition de référence :

$$V_s = M_s / M.V_s \rightarrow V_s = 780,6 / 1636,5 = 0,477 \text{ m}^3$$

2. Volume de sable dans la composition du sable :

$$V_s' = V_s * (1 - 0,75) \rightarrow V_s' = 0,477 * 0,25 = 0,119 \text{ m}^3$$

3. Masse du sable dans la composition de 75% de liège :

$$M_{s,75} = V_s' * M.V_s \rightarrow M_{s,75} = 0,119 * 1636,5 = 195,15 \text{ Kg}$$

3. Volume du liège 0/4 dans la composition de 75% :

$$V_{L0/4} = V_s * 0,75 \rightarrow V_{L0/4} = 0,477 * 0,75 = 0,358 \text{ m}^3$$

4. Masse du liège dans la composition de 75% :

$$M_{L0/8} = V_{L0/8} * M.V_{L0/8} \rightarrow M_{L0/8} = 0,358 * 89 = 31,86 \text{ Kg}$$

5. Les mêmes étapes précédentes se répètent pour les graviers.

6. La dernière étape concerne la correction de la quantité d'eau absorbé par les granulats minéraux. Dans le cas de la composition de 75% de liège, on retranche la quantité d'eau absorbé de 75% de la quantité d'eau de la composition de référence :

i. Exemple de la quantité d'eau retranché du a la diminution de la quantité du sable :

$$E_{Ret,S} = Coef_{Ab} * V_s' \rightarrow E_{Ret,S} = 0,00171 * 1636,5 = 2,78 \text{ L}$$

Références bibliographiques

Publications

Ali Abd Elhakam., Abd Elmoaty Mohamed., Eslam Awad. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials* 35 (2012) 421–427. Elsevier.

Aziz M A., Murphy C K., & Ramaswamy S.D. (1979). Lightweight concrete using cork granules. *The international Journal of Lightweight concrete*. Vol 1, No 1, pp 29-33
S. P. Silva., M. A. Sabino., E. M. Fernandes., V. M. Correlo., L. F. Boesel and R. L. Reis. *Cork: properties, capabilities and applications*. 2005.

BOUHRAOUA R. (2014). Le chêne-liège face au feu de 2012 : Etat des lieux de 2 années s après : Cas de l'Algérie. Fête de liège 13 juin à Vivès. Université de Tlemcen, Algérie.

Boussetoua H., Maalouf C., Lachi M., Belhamri A & Moussa T. (2017) Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis. DOI.

Branco Fernando G., Tadeu António., Belgas Maria de Lurdes., & Reis C. (2007). Can Cork Be Used As A Concrete Aggregate?. Department of Civil Engineering, Faculty Of Sciences And Technology, University Of Coimbra, Portugal & Department Of Civil Engineering, Polytechnic Institute Of Tomar, Portugal.

Brás Ana., Leal Márcio & Faria Paulina., (2013). Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials* 49 (2013) 315–327. Elsevier.

Cherki Abou-bakr., Remy Benjamin., Khabbazi Abdelhamid., Jannot Yves & Baillis Dominique., (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite. *Construction and Building Materials* 54 (2014) 202–209. Elsevier.

GARAVAGLIA V., BESACIER C. (2012). State of Mediterranean Forests. Fête de liege 14-15 juin. Vives.

Maalouf C, Boussetoua H, Moussa T, Lachi M, Belhamri A. (7-septembre- 2015) Experimental And Numerical Investigation Of The Hygrothermal Behaviour Of Cork Concrete Panels In North Algeria. Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec.

Matos Ana Mafalda., Nunes Sandra & Coutinho Joana Sousa., (2015). Cork waste in cement based materials. *Materials and Design* 85 (2015) 230–239. Elsevier.

Moreira A., Antonio J & Tadeu, A. (2014). lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. *Cement and Concrete Composites*. 49 (2014): 1-8. Elsevier.

Natureza e tecnologia a solução ideal. La Forêt de Chêne-liège du Portugal AMORIM ISOLAMENTOS, S.A. 2012.

Panesar D.K., Shindman B. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete, containing waste cork. *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 982–992. Elsevier.

Parameshwar N. Hiremath, Subhash C. Yaragal. (2017). Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. *Construction and Building Materials* 141 (2017) 271–288. Elsevier.

PINTUS A. (2012). Les propriétés techniques du liège Intérêt pour la construction. Colloque International “Liège et éco construction”, 13-15 juin, Vivès. Agenzia Regionale per la Ricerca in Agricoltura.

Rapport Brundtland – Notre avenir à tous. « Commission mondiale sur l’environnement et le développement ». Présidée par Gro Harlem Brundtland, 1987.

Silva S. P., Sabino M. A., Fernandes E. M., Correlo V. M., Boesel L. F & Reis R. L. (2005) Cork: properties, capabilities and applications *International Materials Reviews*, VOL 50, NO 6,(345-365).

Ziregue Ahmed., Mouldi Khenfer Mohamed., Quéneudec-t’Kint Michèle & Montrelay Nicolas. (2016). Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30:9, 934-946.

Ouvrages

Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l’Utilisation de l’Energie. CONSOMMATION ENERGETIQUE FINALE DE L’ALGERIE. 2015.

Agence National pour la Promotion et la Rationalisation de l’Utilisation de l’Energie. PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT DE L’EFFICACITE ENERGETIQUE A L’HORIZON (2030). 2015.

International Energy Agency (IEA). Key World Energy Statistics. 2017.

Lorraine conseil régional. GUIDE DE L’ECO CONSTRUCTION. 2006.

Thèses et Mémoires

ADJOUJ M'hamed. (2015): Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Thèse De Doctorat. Thèse En Cotutelle entre Université DE CERGY-PONTOISE, France & Université HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, Algérie. 161 pages.

Agoumelcha A et Ouannoughi B. (2017) : formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de Barrage. Mémoire master. Universités de M'HAMED-BOUGARA-BOUMERDES. 111 pages.

Akkaoui Abdessamad. (2014): Bétons de granulats de bois Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles. Thèse de doctorat. Universités Paris-Est doctorale science Ingénieur et environnement, France, 230 pages.

ANH-DUNG-TRAN LE. (2010): Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment. Thèse de doctorat. Université de REIMS compacte Ardenne. 220 pages.

BENAICHA Mouhcine. (2013): Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons. THÈSE de DOCTORAT. L'université d'Aix-Marseille. France. 229 pages.

Benazza-Bouregba M. (2017) : Inventaire et identification des basidiomycètes de la forêt de M'sila (Oran). Thèse de doctorat. Université AHMAD-BEN-BELLA Oran, Algérie, 259 pages.

Berriah Amar. (2014): Les reboisements de chêne liège dans l'ouest Algérien : bilan et perspectives d'Amélioration. Mémoire de magister. 2014. Universités Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 158 pages.

Boukli Hacene S M A. (2009) : contribution à l'Etude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Thèse doctorat. 2009. Universités Abou Baker Belkaid, Facultés des sciences L'Ingénieur Département de GENIE CIVIL. Tlemcen, Algérie 200 pages.

Boulahia Hakima. (2016): Etude du comportement physico-mécanique de nouvelle bio composite poudre de liège-PVC. Thèse de doctorat. Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Algérie, 150 pages.

Cerezo Véronique. (2005) : Propriétés mécanique thermique et acoustique d'un matériau à base de particules végétales et modélisation théorique. Thèse de doctorat. L'Ecole National des travaux publics de L'Etat, Lyon, France, 225 pages.

Chabannes Morgan. (2015) : Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agro bétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction. Thèse de doctorat. Matériaux composites et construction. Université Montpellier, France, 226 pages.

David M. (2014) : Optimisation de la dispersion des fibres pendant le cycle de Malaxage des bétons industriels. Thèse de doctorat. Génie civil, Universités Paris-Est. 283 pages.

Glé Philippe. (2013) : Acoustique des matériaux du bâtiment à base de fibres et particules végétales - outils de caractérisation, modélisation et optimisation. Thèse de doctorat, Acoustique [physics,class,ph],INSA de LYON ,France, 389 pages.

Herichi Ouided. (2010) : Formulation et caractérisation des Béton légers. Mémoire Magister. Universités Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 135 pages.

Magniont Camille. (2010) : Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'ag ressources. Thèse doctorat. Université de TOULOUSE III -PAUL SABATIER, France, 343 pages.

Nguyen Le Hung. (2013) : Bétons de structures à propriétés D'isolation thermique Améliorés : Approche Expérimentalement et modélisation Numérique. Thèse de doctorat. 2013. Universités de Cergy-Pontoise, France, 280 pages.

Ngoc Dong Lé. (2007) : Amélioration de la régularité du béton en production. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées paris, France, 248 pages.

Nozahic Vincent. (2012) : Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux Lignon cellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal - application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 334 pages.

Soutehi Nassima. (2010) : Caractéristique thermique des parois de bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse de doctorat. Universités Mentouri, Constantine, Algérie, 110 pages.

Taleb Omar. (2017) : Etude Du Comportement Rhéologique Des Béton Autoplaçants Locaux. Thèse doctorat. Universités Abou Baker Belkaid, Tlemcen, Algérie, 236 pages.

Umurigirwa-Vasseur B S. (2014) : Elaboration et caractérisation d'un agro matériau chanvre amidon pour le Bâtiment, Thèse doctorat. Universités de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE U.R.F Sciences Exadés et naturelles Ecoles Doctorale Sciences Technologie Santé. 139 pages.

Normes

BS EN 196-1 (Avril 2016) : Methods of testing cement. Determination of strength.

BS EN 933-1 (Janvier 2012) : Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.

BS EN 1097-3 (Avril 1998) : Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids.

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

Méthode LCP n°61 (Juillet 2004) : Mode opératoire – Essai de compacité des fractions granulaire à la table à secousses.

NF P18-451 (Mai 2018) : Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUP.

NF P18-558 (Décembre 1981) : Granulats. Détermination de la masse volumique absolue des fines.

NF P18-591 (Avril 1979) : Granulats. Détermination de la propreté superficielle.

Réunion internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (1978). Functional classification of lightweight concrete, of TILEM LC2 (pp.281–283).

Sites web

changement-climatique.fr, disponible à l'adresse : <http://www.changement-climatique.fr/> (consulté en Avril 2018).

2020energy.eu, disponible à l'adresse : http://www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/efficacite_energetique.pdf (consulté en Avril 2018).