

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 : RIOUCHI Ilyes & BELGUENDOUZI Wiame

Sujet

Optimisation des performances d'un béton vert à base de granulats de liège :
Effet des conditions de cure

Soutenu publiquement, le / 07 / 2019, devant le jury composé de :

M. BOUKLI S.M.A.	Professeur	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
M. TEDJDITI A.K.	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. HOUTI F.B.	Maître assistant A	Univ. Tlemcen	Examinateur
M. BOUHRAOUA R.T.	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité

Remerciements

En premier, on voit que c'est impoli de commencer les remerciements avant de remercier ALLAH qui nous a facilité toutes les tâches avant d'arriver au terme de ce travail
"يا ربي لك الحمد حتى ترضى، ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا."

*On tient à remercier vivement nos encadrant **Pr. GHOMARI Fouad**, professeur (université de Tlemcen), **Dr. TALEB Omar** maître de conférences (université de Tlemcen), et **Mr. TEDJDITI Ahmed Kamel** doctorant (université de Tlemcen) qui ont orienté ce modeste travail jusqu'au bout. On les remercie pour leur aide, leur confiance, leur gentillesse et leur disponibilité.*

*Nos profonds remerciements, nos respects et nos gratitude s'adressent à **Pr. BOUKLI Sidi Mohamed El Amine** professeur (université de Tlemcen), qui nous a fait l'honneur de présider le jury d'examen.*

*On exprime nos gratitude, nos reconnaissances et nos remerciements à **Mr. HOUTI**, maître-assistante (université de Tlemcen) de nous avoir fait l'honneur d'être examinateur de ce travail. Leurs remarques, et leurs suggestions seront sans aucun doute très utiles dans la suite de cette recherche.*

*Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire EOLE. On tient donc à remercier tous ses membres et notamment **Pr. BEZZAR A. Dr. MERIOUA A. et Mlle YOUSSEF F.** pour leur accueil et leurs aides.*

*Un deuxième merci à **Mr. TEDJDITI Ahmed Kamel** à qui on doit nos premiers pas dans la recherche.*

On adresse nos plus vifs remerciements à nos familles, pour leur soutien moral et surtout leurs encouragements. Un spécial merci à nos parents à qui on doit ce qu'on est devenu. On vous aime.

On tient à remercier également tous nos amis et aussi tous nos collègues de la promotion structure (2018-2019) et on leurs souhaite une bonne continuation.

Liste des abréviations

GES : Gaz à Effet de serre.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

IEA : International Energy Agency.

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

AREL : Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine.

EOLE : Eau et Ouvrages dans Leurs Environnements.

NaOH : Hydroxyde de sodium.

FA 50 : Béton contenant 50% de cendres volantes.

FA40S10 : Béton contenant 40% de cendres volantes et 10% de Laitier.

FA30S20 : Béton contenant 30% de cendres volantes et 20% de Laitier.

FA30S30 : Béton contenant 20% de cendres volantes et 30% de Laitier.

FA10S40 : Béton contenant 10% de cendres volantes et 40% de Laitier.

S50 : Béton contenant 20% de Laitier.

RHA : Béton contenant de balle de riz.

EPS : Polystyrène expansé.

RCA : Béton incorporant un agrégat de béton recyclé traité.

NW : Durcissement continu à l'eau.

OA : Durcissement initial dans l'eau pendant 28 jours avant l'exposition à un environnement en plein air.

SO : Durcissement initial de l'eau pendant 28 jours avant une exposition à l'eau de mer.

RO : Béton à base de granulats recyclés et non traité.

CO : Béton de référence.

TR : Béton à base de granulats recyclés traité.

SWC : Durcissement dans l'eau de mer.

FWC : Durcissement dans l'eau douce.

SC : Durcissement standard.

GARC : Béton de récif artificiel vert.

LTPO : Laboratoire de Travaux Publics Ouest.

Mg : Magnésium.

Na : Sodium.

K : Potassium.

Cl : Chlorures.

SO₄ : Sulfates.

CO₃ : Carbonates.

HCO₃ : Bicarbonates.

S.C.I.B.S : Société des ciments de Béni-Saf.

S.O.C : SARL Orachem Concrete.

E.N.G : Carrière nationale des granulats.

SIBL : Société Industrielle Bois et Liège.

H28 : Immersion totale dans l'eau pendant 28 jours, des échantillons de Béton de liège.

MEB : Microscopie Electronique à Balayage.

ITZ : Zone de Transition Interfaciale.

Liste des symboles

λ : Conductivité thermique du matériau (W/m.K)

ρ_B : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (kg/m³)

ρ_T : Masse volumique apparente vraie des particules sèches (kg/m³)

ρ_S : Masse volumique absolue (kg/m³)

$\eta_{\text{Tot-Gr}}$: Porosité totale

η_{Tinter} : Porosité inter-granulaire

$\eta_{\text{Intra-p}}$: Porosité intra-granulaire des particules isolées

$\eta_{\text{Intra/Tot}}$: Porosité intra-granulaire par rapport au mélange

MV abs : masse volumique absolue (kg/m³)

MV app : masse volumique apparente (kg/m³)

SSP : Surface spécifique (cm²/g)

K : Constante de l'appareil

n : Porosité

t : Le temps (s)

μ : Viscosité dynamique de l'air (Pa.s)

Ab24 (%) : Coefficient d'absorption (%)

Ab (%) : Coefficient d'absorption (%)

Ms : Masse sec (g)

Msat : Masse saturé (g)

σ : La contrainte ou la résistance (MPa)

F : La force (N)

L : Longueur de l'éprouvette (m)

b : Coté de l'éprouvette (m)

ρ : Masse volumique (kg/ m³)

M : La masse (g)

V : Le volume (m^3)

Mt : Masse à l'instant t (g)

V : Vitesse ultrasonore (km/s)

E_{dyn} : Module d'élasticité dynamique (GPa)

g : La gravité (m/s^2)

I : Capillarité (mm)

A : La surface (m^2)

P(%) : La porosité (%)

Mair : La masse en air (g)

Meau : La masse en eau (g)

E/C : Rapport eau sur ciment

Résumé

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons tenté d'évaluer l'effet des conditions de cure sur les performances d'un béton allégé par la substitution volumique de 50% de trois granulats minéraux (classes granulaires : 0/4, 4/8 et 8/16mm) par des granulats de liège de même classe granulaire. Une fois le béton confectionné, il est soumis à différentes conditions de cure qui diffèrent en termes de temps d'immersion dans l'eau (0, 3, 7, 14 et 28 jours).

Nous avons identifié au laboratoire les caractéristiques physiques de ces mélanges (masses volumiques, porosité, capillarité), mécaniques à l'aide d'essais destructifs et non destructifs (résistance à la compression, résistance à la flexion, module d'Young), ainsi que leur microstructure. Les résultats que nous avons obtenus ont montré que seule la cure humide, tend à accroître la masse volumique des bétons testés. De plus, les résistances mécaniques ainsi que les paramètres de durabilité évalués sont améliorés en augmentant le temps d'immersion dans l'eau. Les bétons totalement immergés pendant 0, 3, et 14 jours présentent une bonne ductilité, tandis que ceux conservés à 7 et 28 jours sont des bétons à comportement fragile.

Mots clés : Béton vert, Liège, Conditions de cure, Propriétés.

Table de matières

Remerciements	II
Liste des abréviations	III
Liste des symboles	V
Résumé	VII
Table de matières	VIII
Liste de Figures	XII
Liste des Tableaux	XVI
Introduction générale.....	1
1. Vers la mise en valeur de la ressource « Liège »	3
1.1. Introduction	3
1.2. Le bâtiment et l'environnement.....	3
1.2.1. Développement durable.....	3
1.2.2. Consommation énergétique.....	3
1.2.3. Secteur du bâtiment.....	4
1.3. L'isolation thermique dans le bâtiment	5
1.3.1. Matériaux d'isolation	6
1.4. Les bétons légers	6
1.4.1. Généralités.....	6
1.4.2. Types de bétons légers	7
1.4.3. Propriétés des bétons de granulats légers	7
1.4.3.1. Propriétés mécaniques	7
1.4.3.2. Propriétés thermiques.....	8
1.4.3.3. Propriétés acoustiques.....	8
1.4.4. Les bétons verts	9
1.4.4.1. Béton de chanvre.....	9
1.4.4.2. Bétons de Diss.....	10
1.5. Béton de liège	11
1.5.1. Propriétés des bétons de liège	12
1.5.1.1. Masse volumique	12
1.5.1.2. La résistance à la compression.....	13
1.5.1.3. Résistance à la flexion	14
1.5.1.4. Conductivité thermique.....	15

1.6.	Le liège	16
1.6.1.	Propriétés et applications	17
1.6.2.	Les différents types de liège	19
1.6.3.	La structure du liège	20
1.7.	Conclusion	21
2.	Effet des conditions de cure sur l'évolution des propriétés des nouveaux bétons	22
2.1.	Introduction	22
2.2.	Principales caractéristiques des particules végétales	22
2.2.1.	Masse volumique	23
2.2.2.	Compressibilité	24
2.2.3.	Structure poreuse	25
2.2.4.	Absorption	26
2.2.5.	Sensibilité à la vapeur d'eau	28
2.3.	Effet des conditions de cure sur les performances des bétons	30
2.3.1.	Masse volumique :	30
2.3.2.	Absorption en eau	32
2.3.3.	Résistance à la compression	36
2.3.4.	Résistance à la flexion	38
2.3.5.	Module de Young	39
2.3.6.	Conductivité thermique	40
2.3.7.	La porosité	41
2.3.8.	Capillarité	42
2.3.9.	Perméabilité a l'eau	44
2.4.	Conditions de cure dans le béton de liège	45
2.5.	Conclusion	46
3.	Caractérisation des matériaux & procédures expérimentales	47
3.1.	Introduction	47
3.2.	Caractéristiques des matériaux	47
3.2.1.	Eau	47
3.2.2.	Ciment	48
3.2.3.	Adjuvant	49
3.2.4.	Granulats minéraux	51
3.2.4.1.	Analyse granulométrique des granulats	51

3.2.4.2.	Masse volumique	52
3.2.4.3.	Absorption.....	53
3.2.5.	Granulats végétaux	54
3.2.5.1.	Analyse granulométrique des classes granulométriques du liège.....	54
3.2.5.2.	Masses volumiques des classes de liège :	55
3.2.5.3.	Absorption.....	56
3.3.	Formulation du béton.....	57
3.3.1.	Malaxage	58
3.3.2.	Fabrication des éprouvettes	59
3.4.	Procédures des essais effectués	60
3.4.1.	A l'état frais.....	60
3.4.1.1.	Mesure de la consistance.....	60
3.4.2.	A l'état durci.....	61
3.4.2.1.	Propriétés mécaniques	61
3.4.2.2.	Propriétés physiques	63
3.4.2.3.	Essais de durabilité	66
3.4.2.4.	Microstructure	68
3.5.	Conclusion	69
4.	Influence des conditions de cure sur les performances du béton de liège	70
4.1.	Introduction	70
4.2.	Rappel méthodologique	70
4.3.	Effet des conditions de cure sur les propriétés des bétons de liège.....	72
4.3.1.	Propriétés physiques.....	72
4.3.1.1.	Masse Volumique	72
4.3.1.2.	Vitesse ultrasonore.....	73
4.3.1.3.	Absorption par immersion totale.....	74
4.3.2.	Propriétés mécaniques.....	76
4.3.2.1.	Résistance à la compression.....	76
4.3.2.2.	Résistance à la flexion	77
4.3.2.3.	Module d'élasticité dynamique.....	78
4.3.2.4.	Courbes de capacité	79
4.3.3.	Paramètres de durabilité	80
4.3.3.1.	Porosité	80

4.3.3.2. Absorption capillaire.....	81
4.3.4. Microstructure	83
4.4. Conclusion.....	87
Conclusion générale et perspectives.....	88
Annexe 1	89
Références bibliographiques	91

Liste de Figures

Figure 1.1 : Consommation énergétique au niveau mondial (IEA, 2018).	4
Figure 1.2: Les plus grandes utilisations de l'énergie au monde par secteur (IEA, 2018).....	4
Figure 1.3 : Répartition de la consommation finale d'énergie en Algérie par secteur d'activité (APRUE, 2015)	5
Figure 1.4 : Répartition des déperditions thermiques dans une maison (source : zolpan)	6
Figure 1.5 : Représentation schématique des différents types de bétons légers (Cérézo, 2005).	7
Figure 1.6 : Éprouvettes de béton de chanvre (Chabannes, 2015)	9
Figure 1.7 : Fibres de Diss et de Doum (Achour et coll., 2017)	11
Figure 1.8 : Evolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de liège (Ziregue et coll., 2016).....	12
Figure 1.9 : Masse volumique des mortiers de liège à 84 jours (Boussetoua et coll., 2017) ..	13
Figure 1.10 : Influence du liège sur la résistance à la compression du béton (Panesar & Shindman, 2012)	14
Figure 1.11. Résistance à la flexion en fonction de la masse volumétrique du béton de liège (Ziregue et coll., 2016).....	15
Figure 1.12. La résistance à la flexion moyenne et son écart type (Boussetoua et coll., 2017)	15
Figure 1.13 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des composites en ciment de liège (Karade, 2016).	16
Figure 1.14 : la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique de liège (Panesar & Shindman, 2012)	16
Figure 1.15. Répartition des forêts de liège à travers le monde (Garvaglia et Besacier, 2012).	17
Figure 1.16 : Le liège comme bouchons de bouteilles (L. Gil, 2015).....	18
Figure 1.17 : Les panneaux d'isolation (Manuel, 2012)	18
Figure 1.18 : Design et décoration (Manuel, 2012)	19
Figure 1.19 : Tronc du chêne-liège illustrant un liège vierge et mince.....	19
Figure 1.20 : Microscopie électronique à balayage d'une section de liège (Pereira, 2007)....	20
Figure 1.21: Schéma de la structure tridimensionnelle du liège (Pereira, 2007)	20
Fig 2.1. Compressibilité des granulats de chènevotte (Cérézo, 2005)	25
Figure 2.2. Gain massique et taux de saturation S_r pour des particules de chanvre sec (Cérézo, 2005).....	27
Figure 2.3. Absorption des fibres de Diss	27

Figure 2.4. Absorption et gonflement des granulats de Chanvre et Tournesol (Nozahic, 2012)	28
Figure 2.5. Isothermes de sorption/désorption de vapeur d'eau à 20° C des particules de chènevotte (Garnier, 2000)	29
Figure 2.6. Isotherme de sorption/désorption de vapeur d'eau à 25° C de la moelle de tournesol et de la chènevotte (Magniont, 2010)	29
Figure 2.7. Influence des conditions de cure sur la masse volumique des bétons recyclés à 28 jours	32
Figure 2.8. Influence du temps d'immersion sur l'absorption en eau du béton (Liu et coll., 2018)	33
Figure 2.9. Absorption d'eau sous différents régimes de conservation (Ling & Teo, 2011)	34
Figure 2.10. Absorption des bétons recyclés sous différentes conditions de cure (Ismail et coll., 2017)	35
Figure 2.11. Développement de la résistance à la compression du béton soumis au durcissement à l'eau, et à la vapeur d'eau (Gesoglu et coll., 2013)	36
Figure 2.12. Résistance à la compression pour la pâte aux cendres de carburant, durcie à différentes températures (Salih et coll., 2015)	38
Figure 2.13. Résistance à la flexion du béton recyclé sous différentes conditions de cure (Ismail et coll., 2017)	39
Figure 2.14. Module d'élasticité des éprouvettes exposées à des températures élevées (Andiç-Çakır & Hızal, 2012)	40
Figure 2.15. Variation de la conductivité thermique en fonction de la température (L. H. Nguyen et coll., 2017)	40
Figure 2.16. Porosité des échantillons durcis dans des conditions différentes (Ismail et coll., 2017)	41
Figure 2.17. Influence des conditions de cure sur la porosité des bétons recyclés à 28 jours (Thomas et coll., 2013; Thomas et coll., 2018)	42
Figure 2.18. Influence du temps de cure sur l'absorption d'eau spécifique du béton (Liu et coll., 2018)	43
Figure 2.19. Capillarité des bétons de récif en fonction du temps à 28 jours (Zheng et coll., 2018)	44
Figure 2.20. Pénétration de l'eau des bétons recyclés à 28 jours sous différentes conditions de cure (Thomas et coll., 2013; Thomas et coll., 2018)	45
Figure 3.1 : Caractérisation de la masse volumique apparente du ciment	48
Figure 3.2 : Perméabilimètre Blaine	49
Figure 3.3. Super-plastifiant utilisé pour les bétons	50
Figure 3.4. Essai d'étalement au mini-cône	50

Figure 3.5. Courbe d'étalement au mini-cône des pâtes de ciment adjuvantées.....	51
Figure 3.6. Courbes granulométriques des granulats.	52
Figure 3.7. Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats minéraux utilisés.....	52
Figure 3.8 : Absorption des granulats minéraux utilisés.....	53
Figure 3.9. Les classes des granulats de liège utilisés.....	54
Figure 3.10. Courbes granulométriques des granulats de liège utilisés.	55
Figure 3.11. Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats de liège utilisés.	56
Figure 3.12. Immersion des échantillons de liège.....	57
Figure 3.13 : Malaxeur utilisé pour la formulation de nos bétons.....	58
Figure 3.14 : Table vibrante utilisée pour le serrage des échantillons de béton.....	59
Figure 3.15 : Rectification des surfaces des éprouvettes à l'aide de la scie à béton.....	59
Figure 3.16 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	61
Figure 3.17 : Presse de capacité 600 KN.....	62
Figure 3.18 : Portique didactique.....	63
Figure 3.19 : Essais de masse volumique des bétons.....	64
Figure 3.20 : Immersion totale des échantillons dans l'eau.....	65
Figure 3.21 : Essai à l'ultrason.....	66
Figure 3.22. Essai d'absorption capillaire.....	67
Figure 3.23 : Absorptions capillaires initiale et secondaire.....	67
Figure 3.24. Essais de porosité accessible à l'eau.....	68
Figure 3.25 : Microscope électronique à balayage type HIRACHI-TM1000.....	69
Figure 4.1. Béton soumis aux conditions du laboratoire.....	71
Figure 4.2. Conservation du béton dans l'eau (immersion totale).....	71
Figure 4.3. Masse volumique des bétons sous différentes conditions de cure.....	73
Figure 4.4. Vitesse ultrasonore des bétons de liège en modes de cure variables.....	74
Figure 4.5. Coefficients d'absorption des bétons de liège.....	75
Figure 4.6. Résistance à la compression des bétons à 28 et 56 jours sous différentes conditions de cure.....	77
Figure 4.7. Résistance à la flexion du béton à 28 jours sous conditions de conservation variables.....	78
Figure 4.8. Variation du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la compression.....	79
Figure 4.9. Courbes de capacités des différents bétons de liège.....	80

Figure 4.10. Porosité des bétons de liège soumis à des conditions de maturation différentes	81
Figure 4.11. Courbes d'absorptions capillaires des bétons de liège.....	83
Figure 4.12. Microstructure du béton H0 conservé à 28 jours aux conditions du laboratoire	84
Figure 4.13. Microstructure du béton H3 immergé 3 jours dans l'eau	85
Figure 4.14. Microstructure du béton H7 immergé 7 jours dans l'eau	85
Figure 4.15. Microstructure du béton H14 immergé 14 jours dans l'eau	86
Figure 4.16. Microstructure du béton H28 immergé 28 jours dans l'eau	86

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques et performances mécaniques minimales des applications du .. 10 Béton de chanvre sur des échantillons stabilisés à 20°C et 50%HR (Chabannes, 2015).....	10
Tableau 1.2. Résistance à la flexion et à la compression à 28 jours d'un mortier à différents taux d'incorporation en liège (Brás et coll., 2013).....	14
Tableau 2.1. Masses volumiques des granulats de chènevotte.	23
Tableau 2.2. Masses volumiques des granulats de Tournesol.	24
Tableau 2.3. Masses volumiques et porosités des granulats de Tournesol (Nozahic, 2012) ..	25
Tableau 2.4. Propriétés physiques des granulats de balle de Riz (Chabannes, 2015).....	26
Tableau 2.6. Régimes de cure utilisés pour la conservation des bétons de RHA-EPS (Ling & Teo, 2011)	34
Tableau 2.7. Résistance à la compression pour différentes conditions de cure (Abdel-Hay, 2017).....	37
Tableau 2.8. Etudes de l'effet des conditions de cure sur les matériaux cimentaires à base de liège.	46
Tableau 3.1 : Composition chimique de l'eau utilisé (LTPO).....	47
Tableau 3.2 : Masses volumiques et surface spécifique du ciment CPJ-CEM II/A 42,5 utilisé.	48
Tableau 3.3. Masses volumiques des différents granulas minéraux utilisés.	53
Tableau 3.4. Coefficient d'absorption des différents granulats minéraux utilisés.	54
Tableau 3.5. Masses volumiques des granulats de liège.	55
Tableau 3.6. Coefficients d'absorptions des différents granulats de liège.....	57
Tableau 3.7 : Composition de 1m ³ de béton ordinaire en (kg/m ³).	57
Tableau 3.8 : Composition de 1m ³ du béton de liège.	58
Tableau 3.9 : Désignation des différents bétons ainsi que leurs conditions de cure.....	60
Tableau 4.1. Désignation des bétons sous différentes conditions de cure	72
Tableau 4.2. Absorption par immersion en % des bétons de liège sous différentes conditions de cure.	75
Tableau 4.2. Coefficients d'absorptions capillaires initiales et secondaires des différents bétons.	83
Tableau A.1. Calcul des valeurs de capillarité C à partir de suivi des masses.....	90

Introduction générale

L'accélération de l'activité humaine, avec en toile de fond l'accroissement des consommations énergétiques, notamment des énergies fossiles, est à l'origine de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), et particulièrement du dioxyde de carbone (CO₂). Ce qui a contraint d'ailleurs les pays du monde entier à repenser leurs modes de construction, en optant pour des constructions durables et sans impact pour l'environnement.

Actuellement, en Algérie, des efforts sont mis en place afin de trouver des leviers technologiques en faveur de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel. On cite, à titre d'exemple, l'amélioration de l'enveloppe (isolation thermique) des ouvrages. Parmi les récentes alternatives éclairées et guidées par le développement durable dans ce domaine, l'utilisation de ressources naturelles d'origine biologique issue de l'agriculture ou du secteur forestier. D'un point de vue environnemental, ces ressources sont sans impact pour l'environnement. De plus, elles sont durables, renouvelables et possèdent des propriétés qui les rendent d'excellents isolants thermiques.

Récemment, plusieurs études ont confirmé que l'incorporation de ces matières végétales dans le béton offre à ce dernier, une bonne performance thermique au prix d'une réduction des résistances mécaniques. Cette incorporation permet de mettre en valeur les particules végétales et au même titre, mettre en évidence une solution innovante pour concevoir des bâtiments durables. Parmi les agro-bétons connus, le béton de liège. Etant notre sujet d'intérêt, ce béton végétal est obtenu à partir d'une substitution volumique des granulats minéraux (sable et gravier) par leur volume équivalent en liège. La nature végétale et la structure morphologique spécifique des granulats de liège diffèrent complètement de celle des granulats minéraux et influent directement sur le composite béton-liège. De plus, leur fort caractère hygroscopique, qui dépasse de loin celui des agrégats ordinaires (minéraux) est un autre facteur qui, à son tour, peut influencer les propriétés de ce béton. En effet, la sensibilité des granulats de liège vis-à-vis de l'humidité (eau et vapeur) pose un véritable problème lors de leur introduction dans une matrice cimentaire puisqu'à titre d'exemple, la compressibilité de ces particules est aussi gouvernée par la quantité d'eau présente à l'intérieur de ces granulats. Donc, la maîtrise de la quantité d'eau présente dans le milieu qui contient ces particules végétales (le béton) est un paramètre clé dans l'optimisation des propriétés du composite béton de liège. Le présent travail à caractère expérimental a pour objectif l'évaluation de l'effet des conditions de cure (temps

d'immersion dans l'eau) sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructurales et quelques paramètres de durabilité.

Afin d'aboutir à l'objectif préconisé, le présent manuscrit a été organisé comme suit :

Le premier chapitre concerne une analyse bibliographique où l'on présente en premier lieu le contexte du développement durable, ainsi que quelques notions fondamentales sur la consommation énergétique et l'isolation thermique. Nous avons aussi mis en relief les types et les propriétés des bétons légers, et par la même occasion celle des agrégats, sujets de notre intérêt, granulats de liège.

Le deuxième chapitre est dédié à un état de l'art sur les principales caractéristiques des particules végétales, ainsi qu'à un survol sur l'effet des conditions de cure sur les propriétés des bétons dits « nouveaux ».

Le troisième chapitre présente le programme expérimental ainsi que les méthodes utilisées dans notre étude et les caractéristiques des constituants utilisés dans la formulation de notre béton

Dans le quatrième chapitre, nous tentons d'interpréter les résultats obtenus, en les comparant aux résultats de la littérature.

Chapitre 01 :

Vers la mise en valeur de la ressource « Liège »

1. Vers la mise en valeur de la ressource « Liège »

1.1. Introduction

Ce premier chapitre s'articule autour de quelques éléments bibliographiques relatifs à notre thématique de recherche et présente les concepts de base liés au contexte général du projet. Dans un premier temps, ce chapitre met en relation les enjeux économiques (consommation énergétique) et environnementaux (les notions du développement durable) avec le secteur de la construction. Une fois cette relation établie, les différentes solutions qui peuvent limiter les problèmes liés à ce secteur, notamment son impact sur la consommation énergétique, sont évoquées tels que les bétons légers, leurs types et leurs propriétés. Nous pouvons citer à titre d'exemple les bétons végétaux comme le béton de chanvre ou de Diss.

A la fin de cette partie introductive, une description du matériau à base de liège est présentée, avec les principaux travaux scientifiques réalisés sur les composites de liège.

1.2. Le bâtiment et l'environnement

1.2.1. Développement durable

Après un long terme de consommation sans limites des ressources naturelles, le concept du développement durable a vu le jour en 1987 dans le rapport Brutland, où il y a eu une prise de conscience mondiale du pouvoir destructeur de l'activité humaine sur l'environnement. Dans ce rapport, nous trouvons la première définition relative à ce concept :

« Le développement durable est un monde de développement qui permet de répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire aux leurs » (Brutland, 1987). En effet la notion d'un futur commun (développement durable) est une notion relativement récente mais incontournable, qui concerne tout genre d'activité humaine, tel que l'industrie, le bâtiment, l'agriculture, l'énergie et le transport.

Pour sa part, le secteur du bâtiment, au même titre que les secteurs agricoles et industriels porte atteinte à l'environnement, soit par l'épuisement progressif de ressources naturelles soit par la pollution de l'atmosphère par des renvois des émissions des gaz à effet de serre (Nozahic, 2012).

1.2.2. Consommation énergétique

Après la deuxième guerre mondiale, la population a triplé en 50 ans pour passer de 2 milliards à plus de 6 milliards. Il a fallu donc de plus en plus d'énergie pour assurer les besoins et le confort des citoyens. Le rapport du World Wide Fund for Nature (Fund, 2010) atteste qu'on consomme 20% en plus des ressources que la terre n'en produit pour une période donnée.

La Fig 1.1, illustrée dans le rapport de l'agence internationale de l'énergie (IEA) en 2018, compare l'évolution de la répartition d'énergie finale dans le monde en allant de 1973 à 2016. L'analyse de cette figure dénote que la consommation énergétique, dans cette période, a été doublée.

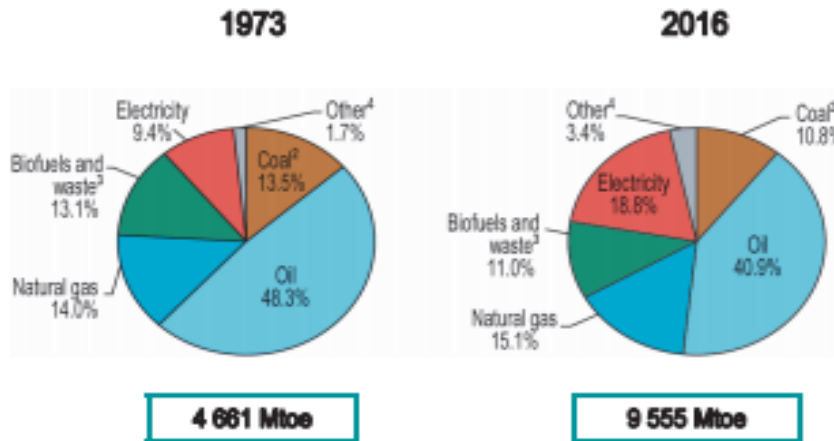


Figure 1.1 : Consommation énergétique au niveau mondial (IEA, 2018).

1.2.3. Secteur du bâtiment

Le secteur résidentiel a un important potentiel d'économie d'énergie au niveau mondial (IEA). Le secteur du bâtiment représente à lui seul plus de 22% de la consommation d'énergie finale selon (IEA, 2018) et occupe la troisième place dans le classement des secteurs énergivores après le secteur industriel et celui du transport qui représentent 37 et 29% de la consommation totale, respectivement (Fig. 1.2).

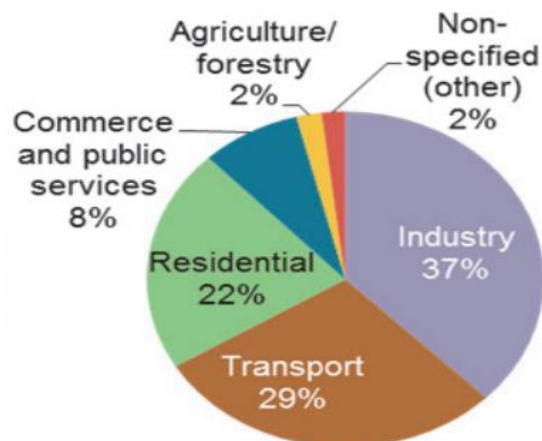


Figure 1.2: Les plus grandes utilisations de l'énergie au monde par secteur (IEA, 2018)

En Algérie le rapport des répartitions de la consommation énergétique dans les différents secteurs d'activité montre que le résidentiel tertiaire est le deuxième secteur de consommation d'énergie finale. Il représente 36% de la consommation totale après le secteur du transport 41% (APRUE, 2015) (Fig 1.3).

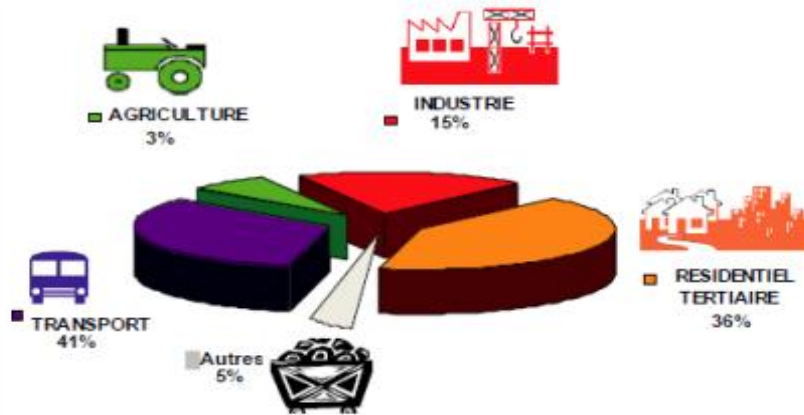


Figure 1.3 : Répartition de la consommation finale d'énergie en Algérie par secteur d'activité (APRUE, 2015)

1.3. L'isolation thermique dans le bâtiment

Le secteur du bâtiment est un secteur où le potentiel d'économie d'énergie est important. Une implantation réfléchie, une isolation performante et un choix pertinent des matériaux sont autant de solutions à prendre en compte pour réaliser des économies d'énergie et par la même occasion minimiser l'impact sur l'environnement (Beguin, 2006).

Avec une bonne isolation, on peut économiser jusqu'à 60% sur la consommation énergétique. Ceci peut être fait en réduisant les déperditions de la chaleur et en minimisant ainsi l'énergie utilisée pour le chauffage ou bien la climatisation, tout en assurant un niveau de confort satisfaisant (Beguin, 2006).

A l'opposé, sans isolation, la maison est une véritable passoire. La répartition des déperditions de chaleur dans une habitation non isolée est illustrée dans la Figure 1.4. Elle montre des valeurs de déperdition thermique de l'ordre de 30 % pour les toits, 25% pour les murs, 20% pour les renouvellements d'air, 10% pour les ouvertures, 5% pour les sols et 10% pour les ponts thermiques.

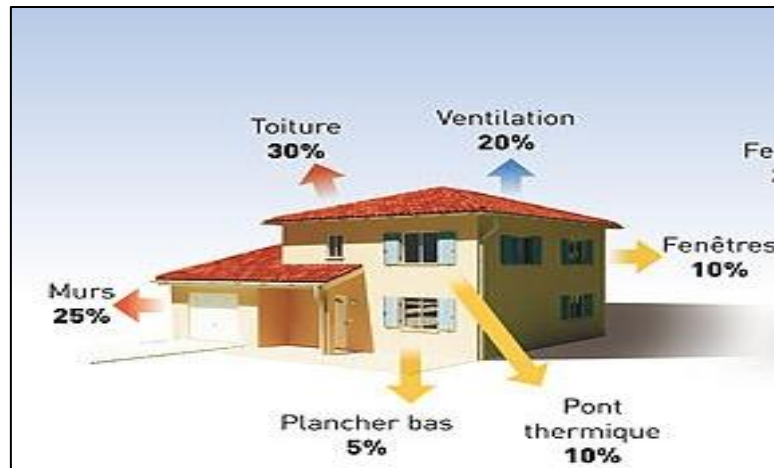


Figure 1.4 : Répartition des déperditions thermiques dans une maison (source : zolpan)

1.3.1. Matériaux d'isolation

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, l'isolation thermique du bâtiment peut réduire énormément sa consommation énergétique. Cette isolation peut se faire, de l'intérieur ou de l'extérieur en utilisant différentes techniques et en incorporant des isolants de différentes natures. Ces isolants peuvent être des isolants :

- **d'origine minérale** : Laine de verre, laine de roche.
- **d'origine pétro chimique** : Tel que le polystyrène et polyuréthane.
- **Isolants réflecteurs** : Isolants minces.
- **d'origines végétales** : Laine de bois, laine de lin, liège.

1.4. Les bétons légers

1.4.1. Généralités

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Il est composé d'un mélange de granulats qui forme son squelette (sable, gravier), d'un liant et de l'eau, le plus souvent et parfois quelques additions.

En général, la masse volumique des bétons ordinaires est comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ et peut être influencée par le type et la proportion des granulats utilisés (Shink, 2003).

Les bétons légers sont des bétons qui possèdent une capacité d'isolation thermique améliorée par rapport au béton ordinaire. Ils ont une masse volumique inférieure à 1900 kg/m³ et une résistance mécanique comparable à celle du béton de granulats rigides tout en étant de 25% à

35% plus légers. Ces bétons ont aussi une autre qualité remarquable, elle réside dans le fait qu'ils permettent de diminuer les coûts de transport et d'installation (Shink, 2003).

1.4.2. Types de bétons légers

En effectuant un remplacement d'une partie du matériau solide par de l'air, on peut obtenir différents types de bétons légers (Fig. 1.5). Ces types varient en fonction de l'endroit où on introduit la quantité d'air. Ce dernier peut être :

- dans la matrice : le béton dans ce cas est appelé béton cellulaire.
- entre les gros granulats : le béton dans ce cas est appelé béton caverneux.
- dans les granulats : le béton dans ce cas est appelé béton de granulats légers.

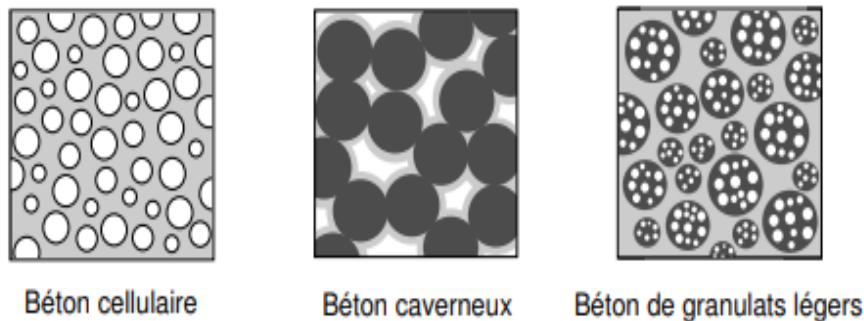


Figure 1.5 : Représentation schématique des différents types de bétons légers (Cérézo, 2005).

Le béton de granulats légers peut aussi prendre d'autres désignations en fonction de la nature des granulats administrés dans le mélange. On peut distinguer les granulats d'origine minérale, synthétique ou végétale (agro-béton). On tient à noter aussi que les granulats d'origine végétale restent les plus stables, les plus renouvelables et les plus sains. C'est la raison pour laquelle, plusieurs travaux de recherche ont tendance à s'orienter vers la réalisation de ce type de bétons légers.

1.4.3. Propriétés des bétons de granulats légers

Nous présentons, dans ce qui suit quelques propriétés des bétons légers :

1.4.3.1. Propriétés mécaniques

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc il est moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons

légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides. Les niveaux de performances des bétons légers sont par conséquent inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque leur déformabilité est beaucoup plus grande. D'une manière générale, la résistance en compression et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats diminue (Cérézo, 2005).

1.4.3.2. Propriétés thermiques

Ces propriétés se manifestent par une résistance thermique qui empêche les déperditions de chaleur. Elles se caractérisent aussi par une faible conductivité thermique λ , de telle sorte que plus ce coefficient de conductivité est petit, plus la capacité d'isolation est grande.

Cette propriété intrinsèque (λ) dépend principalement de la microstructure et des constituants du matériau en question. Parmi les facteurs qui peuvent aussi bousculer la stabilité de la conductivité thermique, la porosité et la masse volumique. Contrairement aux bétons ordinaires, les bétons légers ont une proportion d'air plus élevée (poreux) ce qui leur permet d'ailleurs d'être de bons isolants.

Des études expérimentales réalisées par (Cérézo, 2005) et (Mohellebi, 2015) ont montré aussi l'existence d'une relation quasi permanente entre la conductivité thermique et la teneur en eau. En effet, une présence d'eau importante peut diminuer le pouvoir isolant des bétons légers.

1.4.3.3. Propriétés acoustiques

Une bonne performance acoustique permet au matériau de limiter la propagation des ondes sonores. Elle est généralement obtenue en utilisant des matériaux de forte masse volumique. En revanche, comme leur nom l'indique, les bétons légers ne fonctionnent pas par cet effet de masse mais ils ont plutôt d'autres qualités qui leurs fournissent une bonne isolation acoustique.

Une grande capacité d'isolation acoustique en utilisant des bétons légers peut être donc obtenue de deux manières :

- La première consiste à avoir une surface imperméable qui empêche le son de se transmettre entre deux pièces conjointes.
- En revanche, la deuxième méthode diffère de la première et repose sur le principe de permettre aux bétons légers de dissiper les ondes acoustiques. Cette fois-ci le béton n'a pas à avoir une surface imperméable, mais il doit plutôt disposer d'un espace pour pouvoir absorber le son (amortissement du son par dissipation visqueuse) (Cérézo, 2005).

1.4.4. Les bétons verts

Les bétons végétaux sont multiples et ont diverses utilisations, la diversité des particules utilisées est à l'origine des différences entre les propriétés de ces bétons. Ils sont connus par leur capacité de répondre aux préoccupations environnementales, et leurs performances en termes d'isolation thermique et acoustique.

Ce type de produit représente une production de quelques dizaines de milliers de mètres cubes par an (Cérézo, 2005). Cependant, la difficulté majeure rencontrée lors de l'utilisation des bétons verts pour la construction des structures réside dans leurs propriétés mécaniques considérées comme très faibles selon les normes de sécurité du bâtiment (Sellami et coll., 2013).

Nous présentons, dans ce qui suit quelques exemples de bétons verts ayant fait l'objet de quelques travaux de recherches.

1.4.4.1. Béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau composite obtenu en mélangeant de la chènevotte, de l'eau et un liant minéral seul ou un mélange de liants (Fig. 1.6).

(Cérézo, 2005) a fait du béton de chanvre l'objet de ses recherches ; il a varié les proportions de chanvre administré dans le mélange de 10% à 25% afin d'évaluer les propriétés mécaniques, acoustiques et thermiques de ce matériau.

La résistance en compression et le module d'élasticité sont globalement faibles mais d'un point de vue thermique, la présence des granulats de chanvre améliore considérablement les performances d'isolation. Par exemple, la conductivité sèche du matériau élaboré par ces chercheurs était inférieure à 0,24 W/ (m.K).

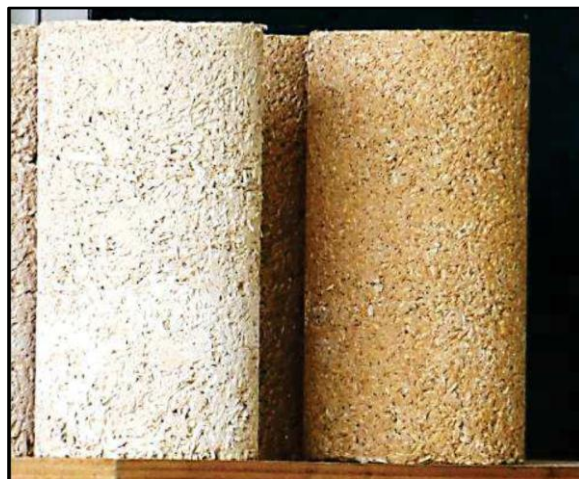


Figure 1.6 : Éprouvettes de béton de chanvre (Chabannes, 2015)

En acoustique, les premiers essais montrent des niveaux d'absorption supérieurs à 50 % pour des fréquences allant de 100 à 2000 Hz.

Le béton de chanvre a une multitude d'applications, il peut être utilisé pour réaliser différentes parois d'une construction que ce soit pour une application de type mur, toiture, dallage, sol ou enduit. Néanmoins, le béton de chanvre ne peut pas être utilisé comme élément porteur de la structure. Il convient de l'associer à une structure capable de supporter le transfert vertical des charges et le contreventement de l'ouvrage. A ce sujet, le choix d'une structure en bois est le plus fréquent. Le Tableau 1.1 regroupe les caractéristiques minimales recommandées pour l'application de ce matériau en fonction de son utilisation (Umurigirwa, 2014) et (Chabannes, 2015).

Tableau 1.1 : Caractéristiques et performances mécaniques minimales des applications du Béton de chanvre sur des échantillons stabilisés à 20°C et 50%HR (Chabannes, 2015).

Application	MUR	TOIT	SOL
Pourcentage massique de chènevotte (%)	~15	~25	~11
Densité apparente (kg.m ⁻³)	~400	~250	~500
Conductivité thermique sèche (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	~0,1	~0,06	~0,12
Résistance en compression seuil (MPa) ^a	>0,2	>0,05	>0,3
Module d'élasticité (MPa) ^a	>15	>3	>15

1.4.4.2. Bétons de Diss

Les fibres de Diss ainsi que de Doum (Fig. 1.7) sont des fibres végétales provenant du secteur forestier ou agricole. Elles sont considérées aujourd'hui comme une alternative intéressante pour remplacer les fibres classiques (amiante, verre, carbone et aramide).



a) Fibres de Diss



b) Fibres de Doum

Figure 1.7 : Fibres de Diss et de Doum (Achour et coll., 2017)

Les études de l'effet des fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques des composites à base d'une matrice cimentaire renforcée à l'aide de ces fibres a été le centre d'intérêt de quelques travaux de recherche récents. L'un de ces travaux a été élaboré au sein du laboratoire EOLE, et a abouti à la soutenance d'une thèse de doctorat en 2017. Dans le cadre de ce travail, (Achour et coll., 2017) a étudié l'effet de l'incorporation des fibres de Diss et de Doum comme renfort dans un mortier à base de ciment. Les résultats obtenus ont affirmé que les performances mécaniques du mélange diminuent avec l'augmentation du dosage des fibres. Aussi, les performances mécaniques des mortiers à base de fibres traitées avec NaOH dépassent celles obtenues en incorporant des fibres brutes. En effet, les mortiers contenant des pourcentages de fibres de 2 et 4% de Diss et de Doum traitées, présentent respectivement une diminution de la résistance mécanique de 41 et 53% par rapport au mortier témoin. En revanche, ceux contenant des fibres brutes présentaient des chutes de résistance de 51 et 68% pour les mêmes teneurs en fibres.

En termes de conductivité thermique, les mortiers renforcés de fibres de Diss et de Doum traités restent de meilleurs isolants avec des améliorations respectives de 40% et 33% par rapport à celles du mortier de référence.

1.5. Béton de liège

Le béton de liège est un béton léger fabriqué à base de granulats de liège incorporé dans une matrice cimentaire. Ce composite a fait l'objet de peu de travaux de recherche. Nous citerons dans ce qui suit certains travaux qui ont mis en évidence les propriétés mécaniques, physiques et thermiques des bétons de liège. Ces études ont révélé que la taille, le pourcentage et la

substitution d'une partie de la matrice par son équivalent en granulats de liège peuvent influencer sur le comportement et les performances des composites de liège (Panesar & Shindman, 2012), (Brás et coll., 2013), (Ziregue et coll., 2016), (Karade, 2016) et (Boussetoua et coll., 2017).

1.5.1. Propriétés des bétons de liège

1.5.1.1. Masse volumique

La variation de la masse volumique des composites de liège en fonction de la teneur en liège a été traitée dans la plupart des travaux de recherche consultés. On en compte parmi ces derniers, l'étude expérimentale de (Ziregue et coll., 2016). Ces chercheurs ont travaillé sur un mortier de liège expansé issu de la fabrication de panneau d'isolation d'épaisseur 3.8mm avec des pourcentages de liège de 20, 30, 40, 50, 60 et 70% comme substituant de la pâte (ciment + sable + eau). A l'issue de leur étude, il s'est avéré comme il fallait s'y attendre, que la masse volumique diminue avec l'augmentation de la teneur en liège. En effet, une teneur en agrégat de liège allant de 0 à 70% induit une diminution de masse volumique de 1,98 à 0,59 g/cm³ (Fig. 1.8), procurant ainsi une légèreté de 70% par rapport au béton de référence. En revanche, un dosage minimal de 20% de liège peut être à l'origine d'une réduction de 18% par rapport au mélange de référence.

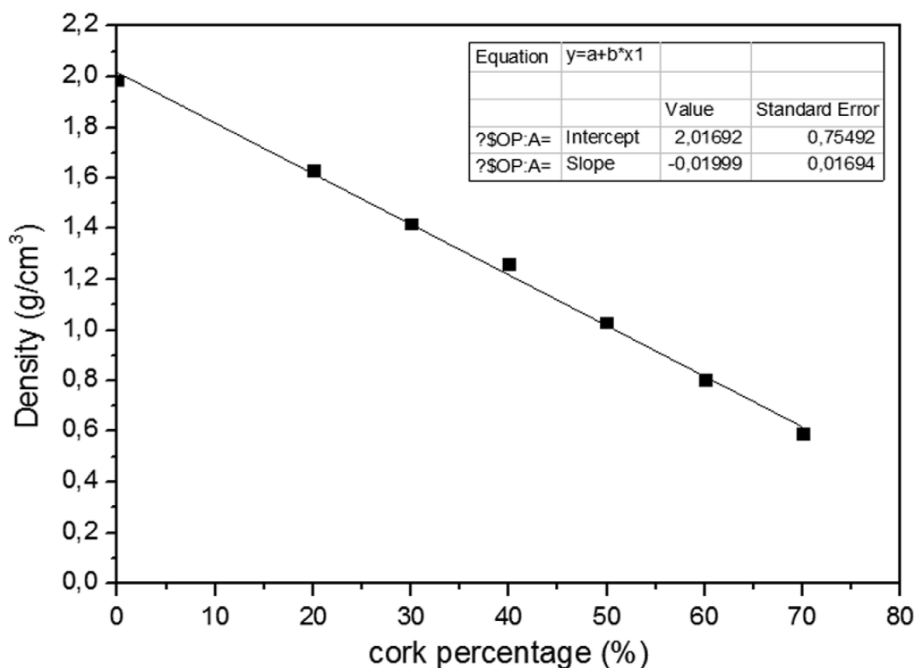


Figure 1.8 : Evolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de liège (Ziregue et coll., 2016)

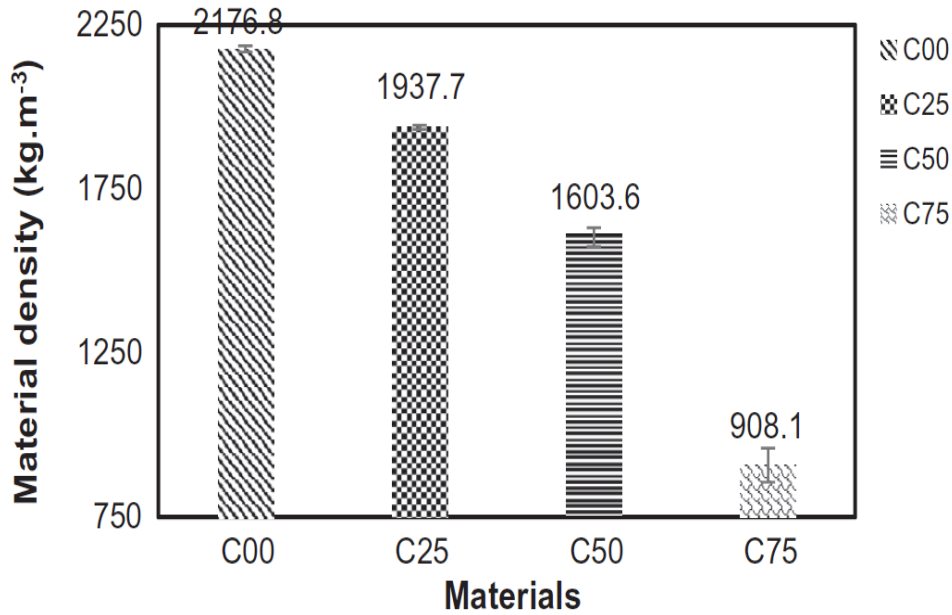


Figure 1.9 : Masse volumique des mortiers de liège à 84 jours (Boussetoua et coll., 2017)

Dans un autre travail qui s'est fixé les mêmes objectifs, (Boussetoua et coll., 2017) ont utilisé des granulats de liège de 0/6.3mm avec des teneurs de 0, 25, 50 et 75% comme substituant au sable. Les travaux de ces chercheurs ont confirmé que la teneur en liège a une grande incidence sur la diminution de la masse volumique, de telle sorte qu'en passant de 0 à 75% de liège, la masse volumique diminue de 2176,80 à 908,09 kg/m³, c'est-à-dire une diminution de 58%. (Fig. 1.9).

1.5.1.2. La résistance à la compression

La campagne expérimentale de (Brás et coll., 2013) repose sur l'étude d'un mortier à base de liège avec des proportions de 0, 10, 20, 40, 50, 60, 70 et 80% comme substituant au sable. Parmi les paramètres étudiés par ces auteurs, l'influence du taux d'incorporation du liège sur la résistance en compression à 28 jours. Les auteurs ont trouvé que l'augmentation du pourcentage de granulats de liège diminue de façon significative la résistance à la compression du mortier (voir Tableau 1.2). En effet, on remarque une résistance de 24.4 MPa à 28 jours pour un mortier de référence. Cependant, pour un dosage de 70% de granulat de liège, cette valeur diminue pour atteindre une valeur de 10.3 MPa (Tableau 1.2).

Mortars with EPS beads	Flexural strength (MPa)	COV (%) - Flexural strength	Compressive strength (MPa)	COV (%) - Compressive strength
CB	5.2	7.8	24.4	2.5
CE10	4.1	13.3	20.9	6.4
CE20	4.1	7.9	19.2	4.1
CE40	3.4	7.6	15.1	8.1
CE50	3.2	12.0	14.0	1.4
CE70	3.0	5.6	10.3	2.7
CE80	2.7	16.4	10.7	5.6

(Tableau 1.2). Résistance à la flexion et à la compression à 28 jours d'un mortier à différents taux d'incorporation en liège (Brás et coll., 2013)

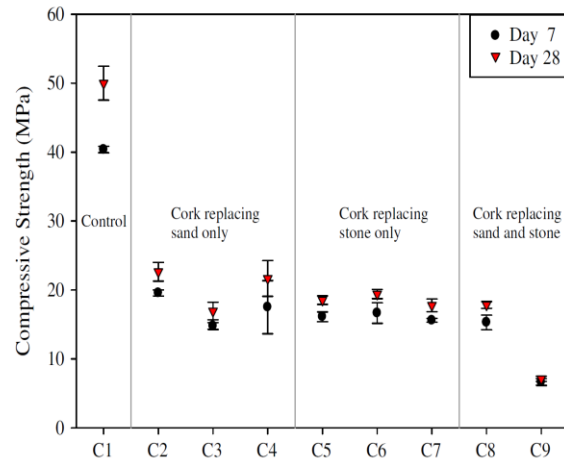


Figure 1.10 : Influence du liège sur la résistance à la compression du béton (Panesar & Shindman, 2012)

(Panesar & Shindman, 2012) ont aussi travaillé sur des bétons à base des déchets de liège, résidus de la fabrication de bouchons, pour étudier l'évolution de la résistance mécanique à la compression de ce nouveau béton. Ces chercheurs ont soumis plusieurs spécimens contenant différents pourcentages en liège (0%, 10%, 20%) avec différentes tailles (0.5/1), (2/3), (3/5), (3/8) et (6/14mm) comme substitution aux granulats à des essais d'écrasements à 7 et 28 jours.

Les valeurs de la résistance à la compression prises à 7 et 28 jours (Fig. 1.10) ont montré que les mélanges contenant 10% de liège (du C2 à C8) sous forme de sable et / ou de gravier, ont une résistance moyenne à la compression inférieure de 51 à 66% par rapport à celle du béton ordinaire C1. En revanche, avec un dosage de 20% en liège, le mélange C9 a montré une faible résistance, respectivement inférieure de 83 et 86% au 7^{ème} et 28^{ème} jour par rapport au béton témoin C1.

Les mêmes auteurs ont aussi conclu après une comparaison des mélanges C2 et C3 comme illustrée sur la figure 1.11 que l'augmentation de la taille du liège de (0,5–1 mm) à (3–5 mm) en remplacement au sable diminue automatiquement la résistance à la compression à 7 et à 28 jours.

1.5.1.3. Résistance à la flexion

Comme nous l'avons déjà précisé précédemment, (Ziregue et coll., 2016) ont travaillé sur des mortiers en liège. Après avoir étudié l'influence la teneur en liège sur la masse volumique, ils ont mis en relation cette teneur avec l'évolution des caractéristiques mécaniques des mortiers

de liège en question. Les résultats de la résistance à la flexion (Fig 1.11) présentent des variations similaires à celles de la résistance à la compression.

La résistance à la flexion varie de 4,48 MPa pour le béton témoin à 2,18 MPa pour le béton composé de 20% d'agrégat de liège ; ce n'est pas tout parce que pour une teneur en liège de 70%, cette résistance peut atteindre une valeur de 0,25 MPa, avec un taux de réduction de 94% par rapport au béton de référence (Ziregue et coll., 2016).

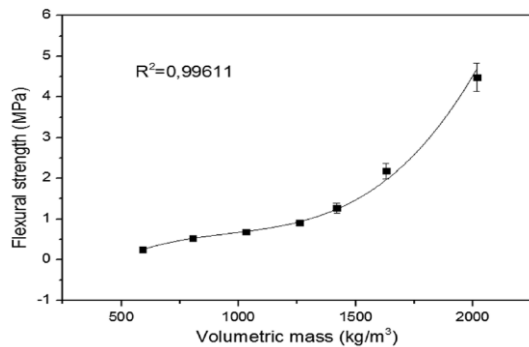


Figure 1.11. Résistance à la flexion en fonction de la masse volumétrique du béton de liège (Ziregue et coll., 2016)

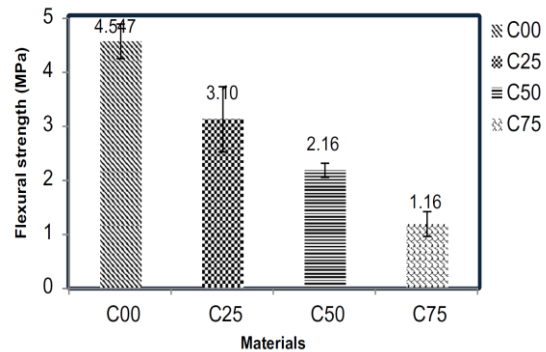


Figure 1.12. La résistance à la flexion moyenne et son écart type (Boussetoua et coll., 2017)

La variation de la résistance à la flexion à 28 jours des mortiers de liège a aussi été reportée dans les travaux de (Boussetoua et coll., 2017) (Fig. 1.12). Ces derniers ont remarqué qu'il y a une corrélation entre le dosage en liège et la résistance à la flexion, de sorte qu'un dosage élevé en liège entraîne une réduction importante de la résistance à la flexion.

Ces auteurs ont aussi noté que l'absence de liège (0%) a donné la meilleure résistance avec une valeur de 4,55 MPa, suivi par des valeurs de 3,10, 2,16 et 1,16 MPa pour des pourcentages respectifs de 25, 50, et 75% en liège.

1.5.1.4. Conductivité thermique

(Karade, 2016) a étudié le potentiel du composite de liège en tant que matériau d'isolation thermique en incorporant des granulats de liège de différentes tailles (2,5, 0,8 et 0,1mm) avec différents pourcentages : 10, 20, 30, 40, 50 et 60% par poids du ciment.

Les résultats des essais de conductivité thermique λ sur les composites de liège ont révélé l'effet de la masse volumique sur la valeur de λ mesurées (Fig. 1.13). Ces résultats montrent qu'il y a une relation quasi linéaire entre la masse volumique sèche et la conductivité thermique (λ). Néanmoins, cette relation n'est pas toujours valable, car les données sont plus dispersées pour des valeurs de masse volumique plus importantes.

L'auteur a conclu que l'ajout du liège dans le mélange diminue à la fois la masse volumique et la conductivité thermique des composites de liège.

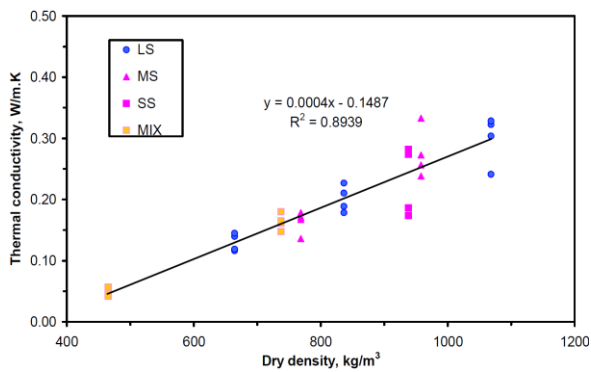


Figure 1.13 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche des composites en ciment de liège (Karade, 2016).

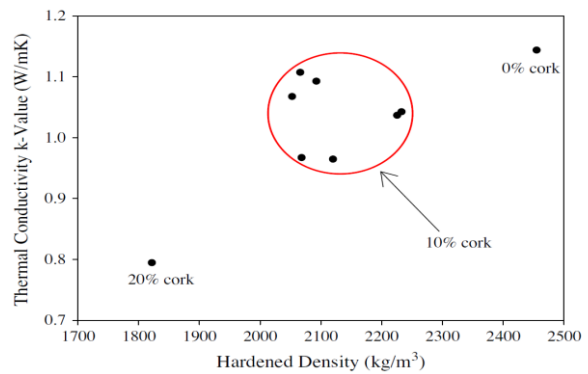


Figure 1.14 : la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique de liège (Panesar & Shindman, 2012)

Les résultats trouvés par (Panesar & Shindman, 2012) sont en accord avec ceux trouvés par (Karade, 2016). La conductivité thermique (Fig. 1.14) des mélanges, fabriqués par (Panesar & Shindman, 2012), contenant 10 et 20% de liège est réduite respectivement, par rapport au béton témoin, d'environ 16 et 30%.

1.6. Le liège

Le liège attire la curiosité des hommes depuis longtemps lorsque certaines de ces propriétés ont été mises à profit. Le liège est l'écorce du chêne liège (*Quercus suber* L). Ce matériau sublime est périodiquement récolté de l'arbre, généralement tous les 9 à 12 ans, en fonction de la culture de la région.

Le chêne liège est un chêne à croissance lente et à feuilles persistantes, qui ne fleurit que dans des régions spécifiques telles que les pays de la méditerranée occidentale (Portugal, Espagne, sud de la France, partie l'Italie), l'Afrique du nord et la Chine. Cet arbre a besoin de beaucoup de soleil et une combinaison très inhabituelle de précipitation et d'humidité relativement élevée.

L'union européenne et en particulier les pays du sud de la méditerranée, restent le principal producteur mondial de liège. Le Portugal qui détient environ 33% de la superficie totale des chênes liège, fournit environ 50% du liège dans le monde (Fig. 1.15) (Garvaglia et Besacier, 2012).

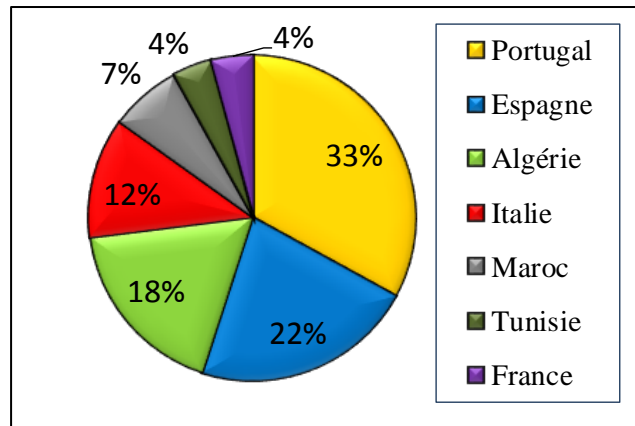


Figure 1.15. Répartition des forêts de liège à travers le monde (Garvaglia et Besacier, 2012).

Après le Portugal et l'Espagne, l'Algérie occupe la 3^{ème} place en termes de matière. Néanmoins, elle occupe l'avant dernière place en termes d'exploitation de cette ressource. Donc, la recherche de nouvelles applications qui peuvent mettre ce liège en valeur est de mise.

1.6.1. Propriétés et applications

Nous présentons, dans ce qui suit les principales propriétés et quelques applications de ce matériau liège. Ces propriétés peuvent être résumées dans les points suivants (Manuel, 2012) (Pintus, 2012), (Garvaglia et Besacier, 2012), (Silva et coll., 2005) (Luís Gil, 2009) (L. Gil, 2015) et (H. Pereira, 2007):

- Légèreté,
- Compressibilité, élasticité,
- Imperméabilité aux liquides et au gaz,
- Imputrescible et inaltérable sous l'action de l'humidité,
- Mauvaise conductivité thermique, acoustique et vibratoire,
- Résistance à la combustion : il est considéré comme retardateur naturel de la progression du feu,
- Durable
- Recyclable.

Grâce à toutes ces propriétés physiques et mécaniques, le liège peut être utilisé dans une multitude d'applications, dont les plus importantes sont :

- Les bouchons de bouteilles (Fig. 1.16), où 25 à 30% de la production totale y est utilisée.



Figure 1.16 : Le liège comme bouchons de bouteilles (L. Gil, 2015)

- Les panneaux d'isolation (100% liège) sans additions (Fig. 1.17).



Figure 1.17 : Les panneaux d'isolation (Manuel, 2012)

- Le design et la décoration (Fig. 1.18)



Figure 1.18 : Design et décoration (Manuel, 2012)

1.6.2. Les différents types de liège

Le liège est récolté tous les 9 à 12 ans, après que l'arbre atteint 25cm de diamètre. Le liège récupéré de la première récolte est appelé : le liège mâle (Fig. 1.19). Il y a une différence significative entre la première récolte, la deuxième et les récoltes qui suivent (Silva et coll., 2005).



Figure 1.19 : Tronc du chêne-liège illustrant un liège vierge et mince.

Le liège mâle a une structure, une épaisseur et une masse volumique irrégulières. Il est dur, rugueux et friable et peut-être utiliser seulement pour les panneaux de liège, les joints d'étanchéité et les semelles de chaussures.

Le liège de la première reproduction (récolté au moins 9 ans plus tard) est plus régulier que le premier (Pereira, 2007), mais toujours de qualité insuffisante pour produire les bouchons de liège. Seul le liège de la deuxième reproduction est utilisé pour la production de bouchon en liège, tant dis que tous les types de liège peuvent être utilisés pour produire des granulats de liège (Silva et coll., 2005).

1.6.3. La structure du liège

Le liège peut être décrit comme un tissu homogène de cellules à parois minces, régulièrement disposées sans espaces intercellulaires. Le liège révèle une structure alvéolaire, analogue à celle d'un nid d'abeille (Fig. 1.20) (Silva et coll., 2005).

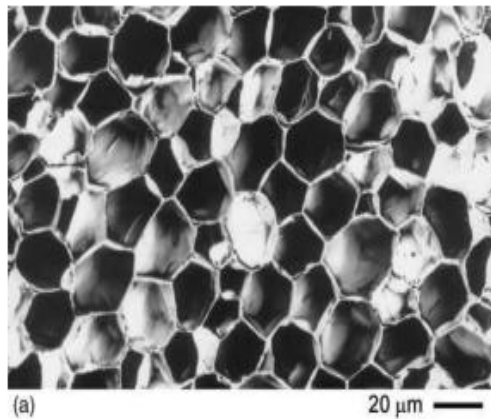


Figure 1.20 : Microscopie électronique à balayage d'une section de liège (Pereira, 2007)

Le liège peut être considéré transversalement en première approximation comme un matériau isotrope, ce qui implique que toutes les directions perpendiculaires à la direction radiale (c.à.d., les directions axiale et tangentielle) sont presque équivalentes.

Les cellules peuvent être décrites comme des prismes rectangulaires, emballés à base des colonnes parallèles à la radiale (Fig. 1.21) (Pereira, 2007).

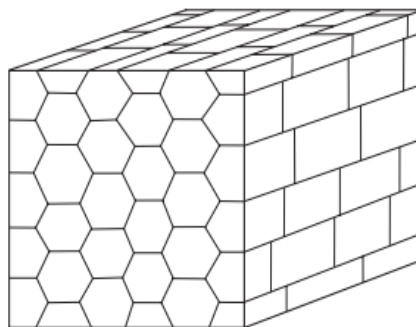


Figure 1.21: Schéma de la structure tridimensionnelle du liège (Pereira, 2007)

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit quelques notions générales et éléments qui nous ont permis de cerner le contexte de ce projet. On a ainsi pu constater que les bétons légers, plus particulièrement les bétons végétaux sont des atouts environnementaux. D'un point de vue thermique, leurs porosités importantes leur offrent une faible conductivité, ce qui est intéressant pour fabriquer des bétons légers permettant de minimiser l'énergie de chauffage et de climatisation dans le secteur du bâtiment. De plus, ce chapitre a mis en lumière les spécificités du principal constituant du béton de liège, le liège en mettant en évidence ses types, ses propriétés et sa microstructure, pour enfin arriver au composite béton de liège qui semble avoir diverses caractéristiques faiblement maîtrisées.

Au terme de cette étude bibliographique nous avons conclu que le béton de liège est un nouveau matériau prometteur mais qui demeure encore un vaste domaine d'investigation. Le chapitre suivant consiste principalement à étudier les propriétés des particules végétales ainsi que l'influence des conditions de cure sur les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité de ces bétons dits « nouveaux ».

Chapitre 2 :

Effet des conditions de cure sur l'évolution des propriétés des nouveaux bétons

2. Effet des conditions de cure sur l'évolution des propriétés des nouveaux bétons

2.1. Introduction

Après avoir terminé le premier chapitre visant à donner des notions générales sur les bétons verts, notamment le béton de liège sujet de la présente étude, ce deuxième chapitre a pour objectif de faire un état de l'art relatif aux travaux réalisés sur l'effet des conditions de cure sur l'évolution des propriétés des nouveaux bétons. La première partie de ce chapitre est destinée à l'identification des principales caractéristiques des particules végétales, en l'occurrence, leur légèreté, compressibilité et leur grande sensibilité vis-à-vis de l'eau et l'humidité. La deuxième partie est consacrée à l'évaluation des effets de conditions de cure sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques et même sur la durabilité des bétons légers et recyclés.

2.2. Principales caractéristiques des particules végétales

Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique. Celle-ci est inférieure à 1200 kg/m^3 , tandis que celle de la pierre naturelle est proche de 2700 kg/m^3 .

Un certain nombre de granulats légers existe à l'état naturel, d'autres sont obtenus artificiellement par divers procédés chimiques. Parmi les granulats d'origine minérale naturellement poreux, les plus fréquemment rencontrés sont les ponces ou les roches sédimentaires comme les calcaires. Ils sont extraits de gisements et directement utilisables dans les matériaux de construction.

Les autres particules naturellement poreuses sont d'origine végétale. Il s'agit pour la plupart des déchets organiques qui ont été valorisés dans la construction (Nozahic, 2012).

Les particules végétales qui ont été incorporées dans plusieurs matériaux cimentaires proviennent de différentes cultures lignocellulosiques. Ces particules peuvent être utilisées sous forme de fibres, comme renforts mécaniques de composites cimentaires ou bien comme étant des granulats pour produire des bétons bio-sourcés, légers et donc à propriétés isolantes.

Ces particules possèdent une composition chimique qui peut influencer fortement leurs propriétés. Par conséquent, elles influent de manière directe sur les propriétés des composites qui les contiennent (Amziane et coll., 2017).

Ces particules ont aussi des structures morphologiques très différentes par rapport à celles des granulats habituels.

Les raisons et les caractéristiques précédemment citées offrent à ce type de particules des propriétés très sensibles et des comportements différents en présence d'eau. Les résultats de quelques travaux de recherches incluant l'évaluation des propriétés des particules végétales sont résumés, par propriété, dans la partie qui suit :

2.2.1. Masse volumique

La masse volumique est une propriété fondamentale qui a une influence directe sur les différentes autres caractéristiques des granulats eux-mêmes et sur les bétons de manière plus précise (T. T. Nguyen, 2010). Les masses volumiques des granulats de chènevotte ont été mesurées dans plusieurs travaux de recherches y compris ceux de (T. T. Nguyen, 2010). Parmi les résultats reportés dans la littérature, le Tableau 2.1 regroupe les plus récents :

Tableau 2.1. Masses volumiques des granulats de chènevotte.

Auteur	(T. T. Nguyen, 2010)	(Nozahic, 2012)	(Magniont, 2010)
Masse volumique apparente (kg/m ³)	103	114,2	134.8
Masse Volumique absolue (kg/m ³)	256	191	320

A titre d'exemple, les résultats trouvées par (T. T. Nguyen, 2010) montrent que la masse volumique apparente de ce type de granulats tourne autour de 103 kg/m³, tandis que la masse volumique absolue, mesurée à l'aide de la méthode du ballon, est de 256 kg/m³.

Les masses volumiques des granulats de tournesol ont aussi été évalué dans quelques travaux. Le Tableau 2.2 regroupe, à titre d'exemple, les résultats rapportés par (Magniont, 2010) et (Nozahic, 2012).

Tableau 2.2. Masses volumiques des granulats de Tournesol.

Auteur	(Magniont, 2010)	(Nozahic, 2012)
Masse volumique apparente (kg/m ³)	20	20,1
Masse Volumique absolue (kg/m ³)	35	97,2

Selon les résultats trouvés par (Magniont, 2010), la masse volumique apparente de ce type de granulat vaut seulement 20 kg/m³, et celle absolue a montré une valeur de 35 kg/m³.

Les résultats des masses volumiques des granulats végétaux listés au-dessus mettent en évidence la grande différence qui existe entre les masses volumiques de ces granulats et celles des granulats ordinaires. Ces différences expliquent par conséquent, la légèreté et le comportement des bétons à base de granulats végétaux.

2.2.2. Compressibilité

La compressibilité des particules végétales est aussi une caractéristique qui a été évoquée dans les travaux de recherche consultés. (Cérézo, 2005) a évalué la compressibilité des éprouvettes cylindriques (160mm de diamètre et 320mm de hauteur) contenant uniquement des particules de chènevotte sèches légèrement compactées.

Les résultats obtenus ont révélé la grande compressibilité des particules de chènevotte. L'éprouvette de chènevotte en question est passée d'une hauteur totale de 320mm à moins de 85mm de hauteur à la fin de l'essai, c'est-à-dire qu'elle a subi une déformation de 75% (Fig. 2.1).

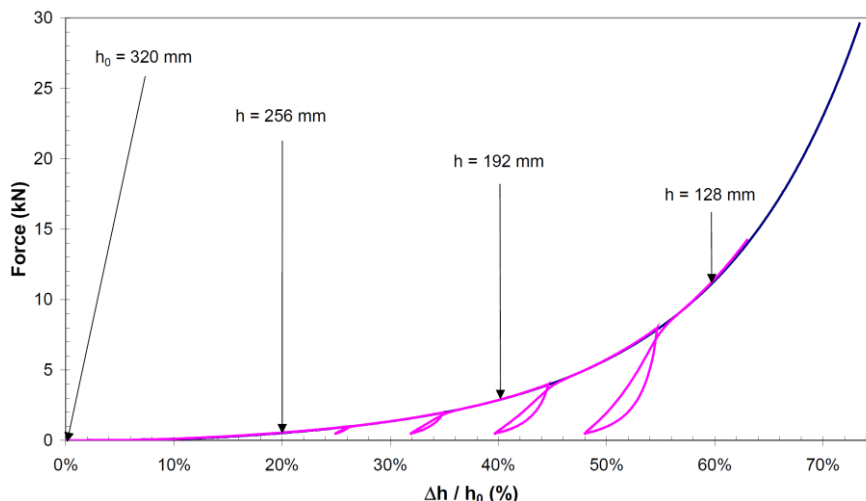


Fig 2.1. Compressibilité des granulats de chènevette (Cérézo, 2005)

Dans un autre travail, Picandet cité dans (Amziane et coll., 2017) a souligné l'effet de l'eau sur la compressibilité des particules végétales. Cet auteur a conclu que la compressibilité des chènevettes humides est nettement plus grande que de celles testées à l'état sec. Picandet a aussi noté que l'eau rend la particule plus lourde et plus facile à se déformer.

2.2.3. Structure poreuse

La haute porosité ainsi que la microstructure des agrégats végétaux sont fondamentales pour leurs propriétés physiques. Ces granulats présentent généralement, une structure de pores complexe. Cette structure complexe de leur porosité engendre un matériau capable d'adsorber facilement l'eau et l'humidité. Il en résulte un matériau qui possède une capacité tampon d'humidité exceptionnellement élevée, caractéristique qui présente un grand intérêt pour les matériaux de construction. Cependant, ceci conduit aussi à un comportement très complexe en présence d'eau et d'humidité.

Les essais conduits par (Nozahic, 2012) pour l'évaluation des porosités des granulats de chanvre et de tournesol ont montré que la valeur de cette dernière est relativement élevée. Elle est respectivement de 55,7 et 50,1% pour les granulats de chènevette et de Tournesol (Tableau 2.3).

Tableau 2.3. Masses volumiques et porosités des granulats de Tournesol (Nozahic, 2012)

Grandeur	Granulat de chènevette	Granulat de tournesol	Unité
ρ_{AcG}	114,2 \pm 2,3*	97,2 \pm 1	[kg.m ⁻³]
n_{TOT-G}	92,4 \pm 0,15	93,7 \pm 0,03	[m ³ .m ⁻³]
n_{IEP}	55,1 \pm 6,7	50,8	[m ³ .m ⁻³]
n_{IA-P}	37,2 \pm 0,1	43	[m ³ .m ⁻³]

La recherche bibliographique réalisée par (Chabannes, 2015) a montré que la porosité des granulats de balles de riz du mélange en vrac est très importante et ce en raison de la grande masse volumique apparente d'une particule (Tableau 2.4). Ce chercheur a aussi conclu que ses résultats concordent bien avec ceux de Kaupp et Goss cités dans son travail estimant que le volume d'air des interstices entre les balles représente environ 85% du volume total apparent.

Tableau 2.4. Propriétés physiques des granulats de balle de Riz (Chabannes, 2015)

ρ_B : Masse volumique apparente en vrac à l'état sec (kg.m^{-3}) [138], [139]	98–108
ρ_T : Masse volumique apparente (vraie) des particules sèches (kg.m^{-3}) [1]	453
ρ_S : Masse volumique absolue (kg.m^{-3}) [130], [139]	780
Porosité totale : $\eta_{\text{Tot-Gr}} = 1 - \rho_B/\rho_S$	87%
Porosité inter-granulaire : $\eta_{\text{Inter}} = 1 - \rho_T/\rho_S$	78%
Porosité intra-granulaire des particules isolées : $\eta_{\text{Intra-P}} = 1 - \rho_T/\rho_S$ [140]	40 – 50%
Porosité intra-granulaire par rapport au mélange : $\eta_{\text{Intra/Tot}} = \eta_{\text{Intra-P}}(1 - \eta_{\text{Inter}})$	9 – 11%

Les travaux consultés à propos des granulats végétaux ont montré la grande porosité de ce type de granulats, la propriété qui manœuvre les phénomènes de transfert. Afin de confirmer l'impact de la porosité sur les phénomènes de transfert hydrique dans ce type de granulats, la section suivante sera consacrée à l'évaluation de la sensibilité à la vapeur d'eau et à l'absorption des granulats les plus utilisés pour la réalisation des agro-bétons.

2.2.4. Absorption

En premier lieu, les particules végétales étant fortement poreuses comme l'ensemble des granulats légers, il se pose la question de leur comportement vis à vis de l'eau. Afin d'évaluer le pouvoir absorbant et le degré de saturation des granulats de chènevotte, (Cérézo, 2005) a suivi l'évolution du gain massique et du degré de saturation des granulats de chanvre préalablement séchés (Cérézo, 2005) a reporté le fort pouvoir absorbant de la chènevotte vis à vis de l'eau liquide. Il a trouvé que l'absorption de ses granulats atteint son maximum au bout de 5 minutes et dépasse les 200%. Quant au degré de saturation, (Cérézo, 2005) s'est rendu compte que ce dernier a dépassé 95% après 5 minutes d'immersion (Figure 2.2). Il est aussi utile de noter que granulats testés sont saturés à partir de 10 minutes.

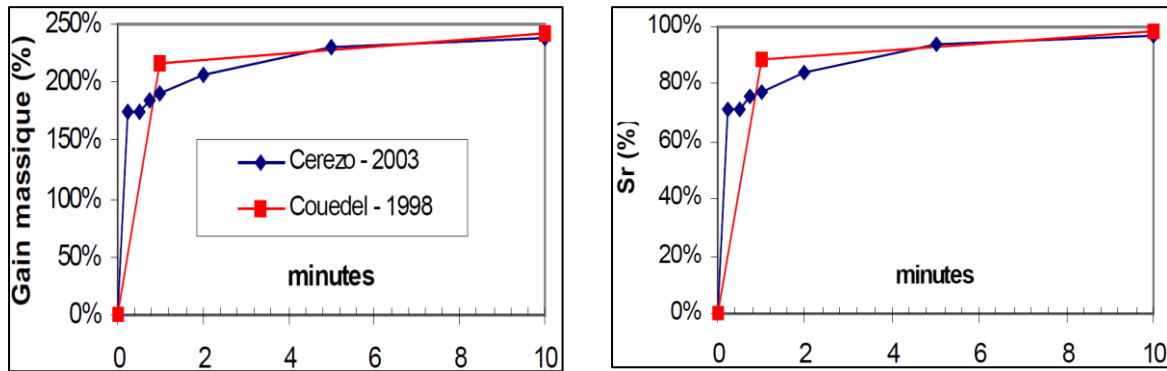
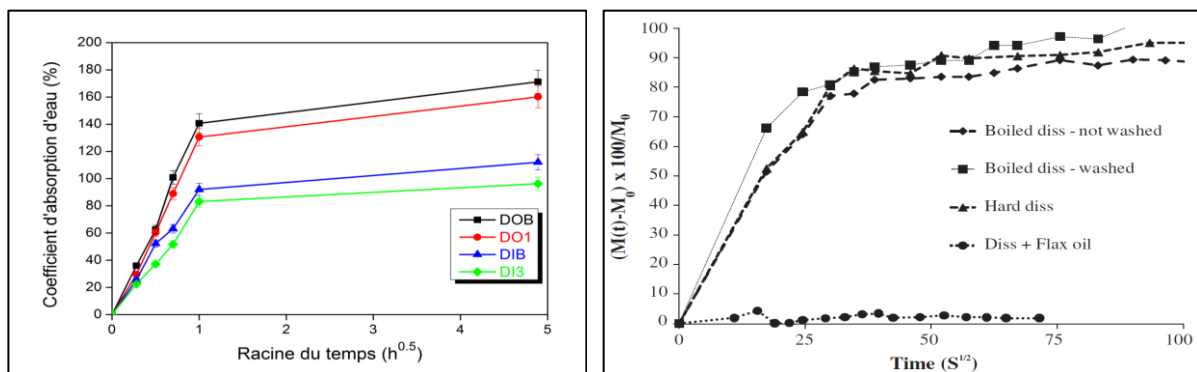


Figure 2.2. Gain massique et taux de saturation Sr pour des particules de chanvre sec (Cérézo, 2005)

Selon une étude effectuée par Tamba et coll et citée dans (Chabannes, 2015), la balle de riz absorberait environ 80% de sa masse en eau avant d'arriver à la saturation après 20 heures d'immersion. L'étude de (González De La Cotera, 1982) annonce un pourcentage d'absorption d'eau des balles de riz saturées superficiellement sèches d'environ 122% sans donner davantage de détails.

Les études réalisées par (Achour et coll., 2017) & (Sellami et coll., 2013) ont démontré encore une fois le grand pouvoir absorbant des granulats végétaux. Cette fois ci, ces auteurs ont évalué le pouvoir absorbant des fibres de Diss. Ils ont montré que le taux d'absorption pour ce type de fibres végétales varie entre 80 et 100%. Il est à noter que les valeurs trouvées par les deux chercheurs sont très proches comme le montre les Figures 2.3.a et 2.3.b.



a. Absorption des fibres utilisées par (Achour et coll., 2017)

b. Absorption des fibres utilisées par (Sellami et coll., 2013)

Figure 2.3. Absorption des fibres de Diss

En plus de l'évaluation du pouvoir absorbant des granulats de chanvre et Tournesol, (Nozahic, 2012) a abordé aussi le phénomène du gonflement structurel qui résulte de la forte capacité d'absorption. Dans sa recherche, (Nozahic, 2012) a trouvé qu'une saturation totale des végétaux

testés conduit à un gonflement de l'ordre de 9% (Figure 2.4), ce qui peut engendrer de véritables problèmes lors de leur introduction dans une matrice cimentaire

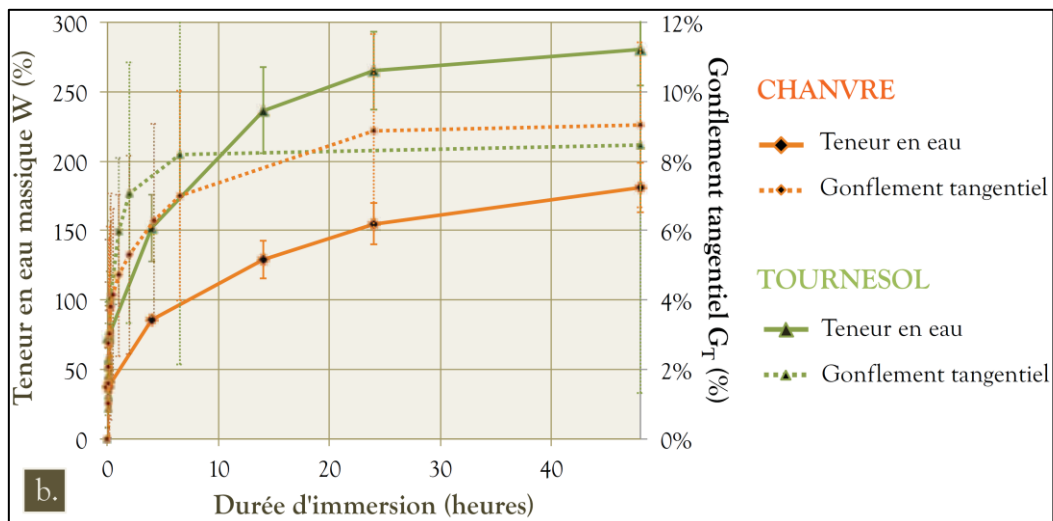


Figure 2.4. Absorption et gonflement des granulats de Chanvre et Tournesol (Nozahic, 2012)

En plus de ce gonflement structurel, la forte absorption des granulats végétaux peut être à l'origine d'une compétition avec les liants hydrauliques, qui ont besoin d'un apport en eau minimum pour former des hydrates et assurer leur cohésion.

2.2.5. Sensibilité à la vapeur d'eau

La sensibilité à l'eau liquide des particules végétales abordée dans le paragraphe précédent amène à se poser la question du comportement des granulats vis à vis de la vapeur d'eau présente dans l'air en quantité variable selon l'hygrométrie du milieu extérieur. Afin de répondre à cette problématique, quelques tentatives d'évaluation des isothermes d'adsorption/désorption des particules végétales ont été entreprises :

Selon Garnier cité dans (Cérézo, 2005), les teneurs en eau des granulats de chènevotte dépassent les 10% pour une humidité relative de 50% (Figure 2.5). L'allure représentée dans la figure montre aussi que pour des humidités relatives élevées, la teneur en eau peut franchir des valeurs proches de 40%, valeur qui peut influencer directement sur le comportement thermique et mécanique des granulats eux-mêmes et des agro-bétons qui les contiennent en même temps.

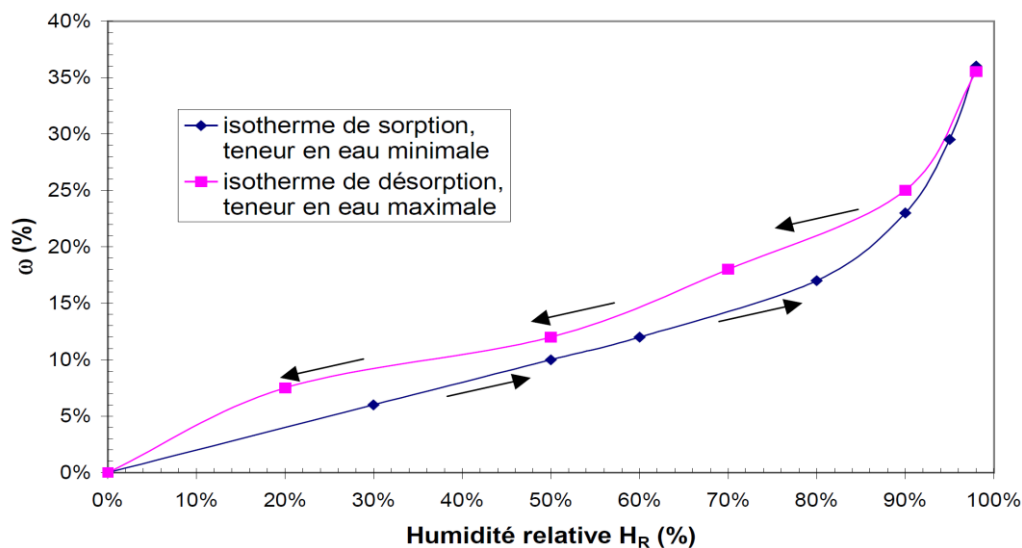


Figure 2.5. Isothermes de sorption/désorption de vapeur d'eau à 20° C des particules de chènevotte (Garnier, 2000)

Dans un autre travail réalisé par (Magniont, 2010), les isothermes des granulats de chènevotte et de Tournesol ont été évalué. Les résultats obtenus par (Magniont, 2010), dénotent une nouvelle fois le fort caractère hygroscopique des granulats végétaux. Les valeurs obtenues dans cette recherche sont légèrement inférieures à celles obtenues dans le travail cité précédemment. Pour une humidité relative de 10%, (Magniont, 2010) a trouvé une teneur en eau de 8% pour les granulats de Tournesol. En revanche, cette teneur en eau est de l'ordre de 20% pour une humidité relative égale à 90% (Figure 2.6).

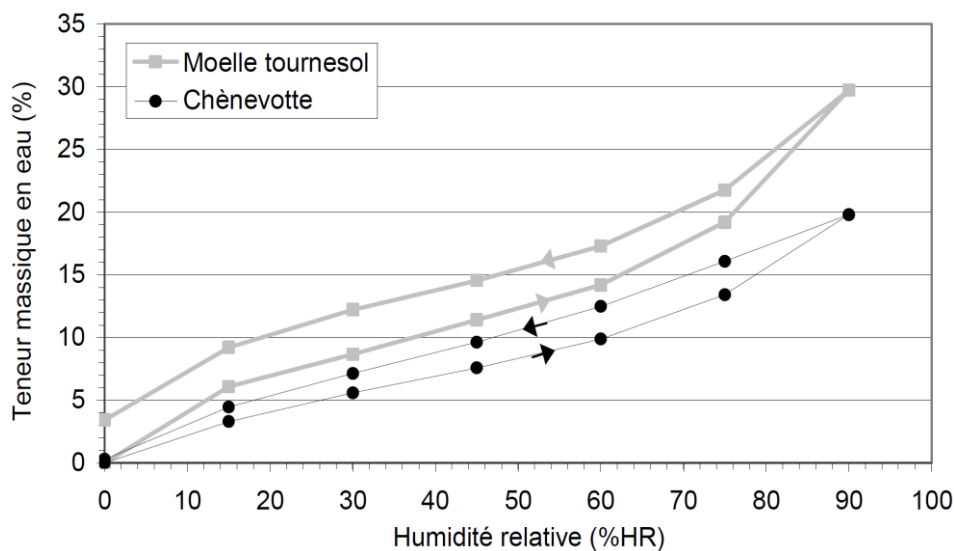


Figure 2.6. Isotherme de sorption/désorption de vapeur d'eau à 25° C de la moelle de tournesol et de la chènevotte (Magniont, 2010)

2.3. Effet des conditions de cure sur les performances des bétons

Le béton ordinaire, connu depuis le 19^{ème} siècle a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Grâce à ces travaux, les propriétés du béton ordinaire sont maîtrisées et les méthodes de formulations ainsi que les paramètres qui peuvent influencer sur ces propriétés sont même normalisées.

Contrairement au béton classique, les nouveaux bétons, spécialement les bétons légers sont sujets à des travaux de recherche afin d'aboutir à leur normalisation. Les propriétés de ces bétons varient en fonction de plusieurs paramètres tels que la méthode de formulation, les conditions de mise en œuvre ou même les conditions de conservation. L'effet de ces conditions appelées aussi conditions de cure a été évalué dans peu de travaux. Les travaux réalisés ont porté sur l'impact des conditions de cure sur les performances des bétons recyclés ou même sur les bétons légers minéraux : les différentes cures rapportées dans la littérature consultée ainsi que leur effet sur les différentes propriétés des bétons sont résumées dans la partie suivante :

2.3.1. Masse volumique :

(Raheem et coll, 2013) a examiné l'effet des différentes cures sur un béton fabriqué à base de granit concassé, de sable tranchant et les composants habituels (ciment et eau).

Les échantillons de béton ont mûris sous six (06) différentes techniques de conservation : traitement par immersion dans l'eau, polymérisation par polythène, séchage par pulvérisation, traitement par toile de jute, traitement au sable humide et durcissement à l'air.

Le Tableau 2.5 montre la masse volumique moyenne enregistrée pour chaque méthode de durcissement.

Les résultats rapportés par ces chercheurs ont montré que la masse volumique des spécimens variait de 2432,59 à 2502,72 kg/m³. La méthode de durcissement au sable humide a produit un échantillon de béton avec la masse volumique moyenne la plus élevée (2502,72 kg/m³), suivie par les méthodes au polythène et l'immersion dans l'eau avec des valeurs moyennes de 2484,94 kg/m³ et 2 461,23 kg/m³, respectivement.

Tableau 2.5. Relation entre la méthode de cure et la masse volumique (Raheem et coll, 2013)

Méthode de cure	Période de cure	Masse volumique	Moyenne
Immersion dans l'eau	3	2469.14	2442.47
	7	2424.69	
	14	2459.26	
	21	2459.26	
	28	2400.00	
Séchage par pulvérisation	3	2459.26	2461.23
	7	2459.26	
	14	2469.14	
	21	2400.00	
	28	2518.52	
Polymérisation par polythène	3	2469.14	2484.94
	7	2390.12	
	14	2429.63	
	21	2597.53	
	28	2538.27	
Traitement par toile de jute	3	2518.52	2502.72
	7	2518.52	
	14	2439.51	
	21	2518.52	
	28	2518.52	
Traitement au sable humide	3	2459.26	2432.59
	7	2419.75	
	14	2434.57	
	21	2429.63	
	28	2419.75	
Durcissement à l'air	3	2404.94	2450.37
	7	2439.51	
	14	2498.77	
	21	2479.01	
	28	2429.63	

Le travail mené par (Thomas et coll., 2018) présente les résultats d'une étude sur l'influence de l'exposition à un environnement marin sur différentes propriétés d'un béton à base de granulats recyclés. Dans ce travail, les pourcentages d'agrégats recyclés qui ont été incorporés sont : 0, 20, 50 et 100%.

Les échantillons de contrôle, conservés dans une chambre humide, ont également été testés afin de comparer l'influence de l'environnement de durcissement. Les masses volumiques obtenues par (Thomas et coll., 2018) sont représentées dans la Figure 2.7.

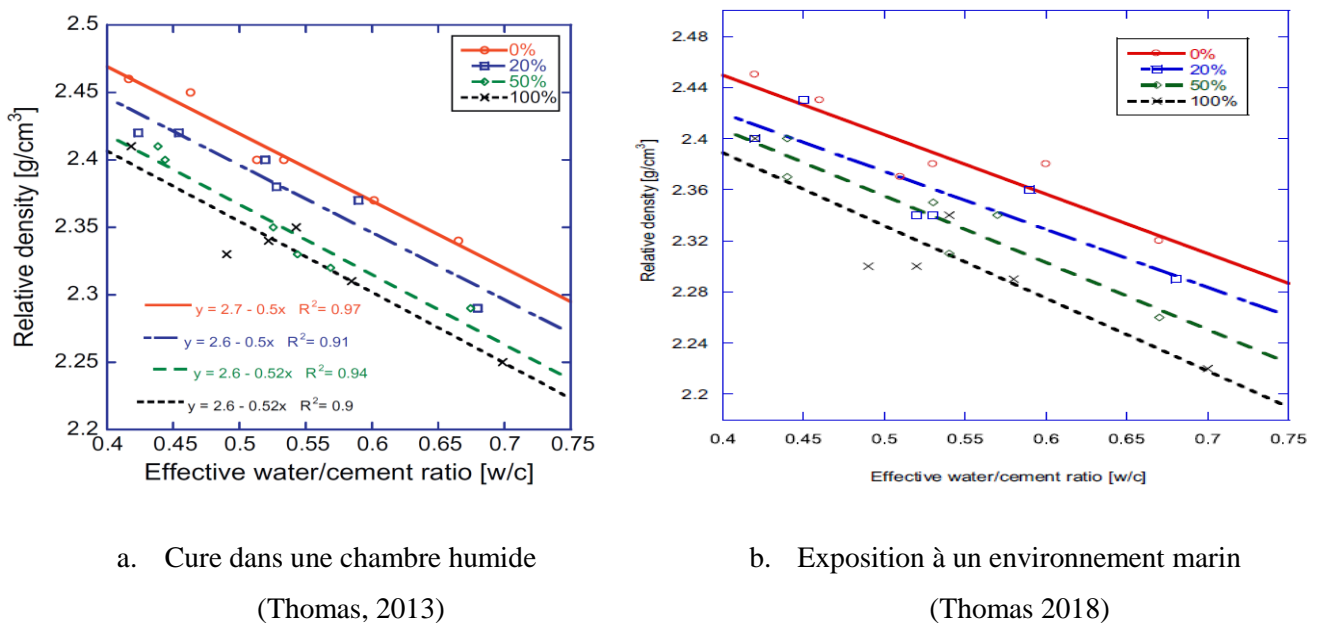


Figure 2.7. Influence des conditions de cure sur la masse volumique des bétons recyclés à 28 jours

Les résultats obtenus montrent que la masse volumique des bétons décroît linéairement avec le rapport E/C. Cependant, l'incrément de pente obtenu pour une cure dans un environnement marin est plus élevé que celui obtenu pour une cure standard. Ce constat est remarqué pour les différents pourcentages de substitution.

Les résultats ont montré aussi que les bétons recyclés avec de faibles rapports E/C ne subissent pas une diminution très élevée de la masse volumique. En revanche, pour des rapports E/C élevés, la diminution due à l'exposition à un milieu marin est plus importante.

2.3.2. Absorption en eau

(Liu et coll., 2018) ont étudié l'influence des conditions de cure sur les performances des éco-bétons incorporant les cendres volantes et les laitiers des hauts fourneaux pour remplacer 50% de ciment. Les bétons fabriqués dans ces travaux sont désignés comme suit :

FA 50 : Béton contenant 50% de cendres volantes.

FA40S10 : Béton contenant 40% de cendres volantes et 10% de Laitier.

FA30S20 : Béton contenant 30% de cendres volantes et 20% de Laitier.

FA30S30 : Béton contenant 20% de cendres volantes et 30% de Laitier.

FA10S40 : Béton contenant 10% de cendres volantes et 40% de Laitier.

S50 : Béton contenant 50% de Laitier.

Ces chercheurs ont évalué l'effet du temps d'immersion, de la température et de l'humidité. Parmi les propriétés évaluées aussi par ces auteurs, on retrouve la variation de l'absorption en eau des éco-bétons en fonction de la période d'immersion dans l'eau (voir Figure 2.8).

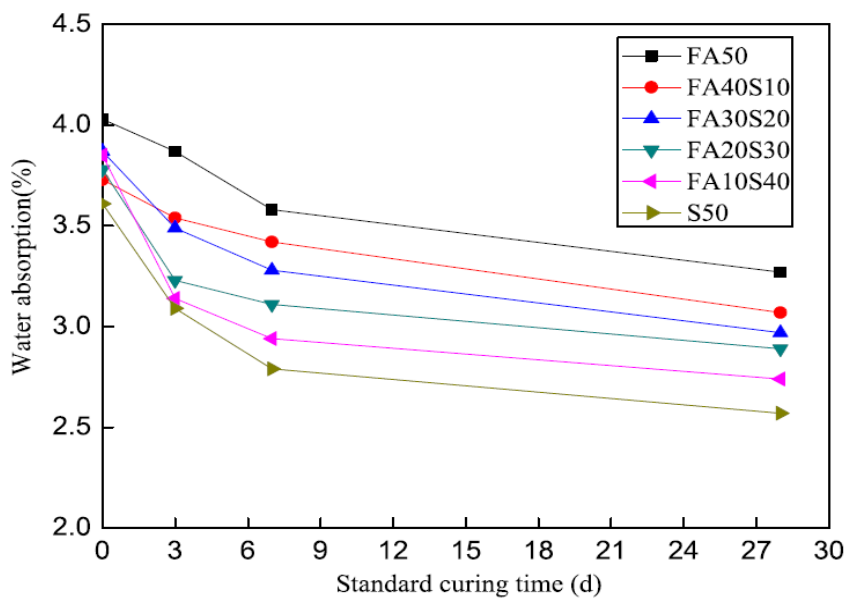


Figure 2.8. Influence du temps d'immersion sur l'absorption en eau du béton (Liu et coll., 2018).

Le travail réalisé montre que l'absorption en eau des bétons diminue avec le temps d'immersion dans l'eau. La différence entre l'absorption après un temps d'immersion de 7 et 28 jours est presque identique. Ceci indique que lorsque le temps d'immersion est de 7 ou 28 jours, l'hydratation du liant (ciment + cendres volantes + laitier) semble adéquate, et les produits d'hydratation vont combler les pores du béton, ce qui réduira la porosité et l'absorption d'eau du béton.

(Ling & Teo, 2011) ont étudié l'impact des conditions de cure sur les propriétés des bétons contenant des cendres de balle de riz (RHA) et du polystyrène expansé (EPS). Le RHA est utilisé pour remplacer une partie du ciment tandis que les EPS sont utilisés pour un remplacement partiel des agrégats dans le béton. Afin d'évaluer l'effet des conditions de cure

sur les propriétés de ce béton, les échantillons ont été préservés dans les conditions regroupées dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6. Régimes de cure utilisés pour la conservation des bétons de RHA-EPS (Ling & Teo, 2011).

Méthode de cure	Désignation de cure
Dans l'eau	C1
3 jours dans l'eau	C2
7 jours dans l'eau	C3
Air libre	C4

Les mêmes auteurs ont aussi étudié l'absorption d'eau en fonction du temps. Selon les résultats rapportés, cette absorption était comprise entre 10 et 20%, en fonction des régimes de cure employés et du pourcentage de RHA dans les échantillons (Figure 2.9).

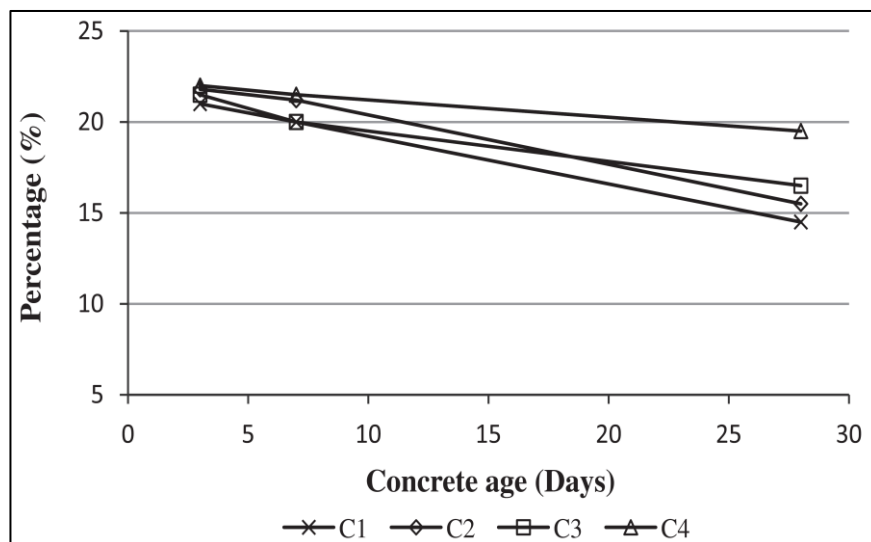
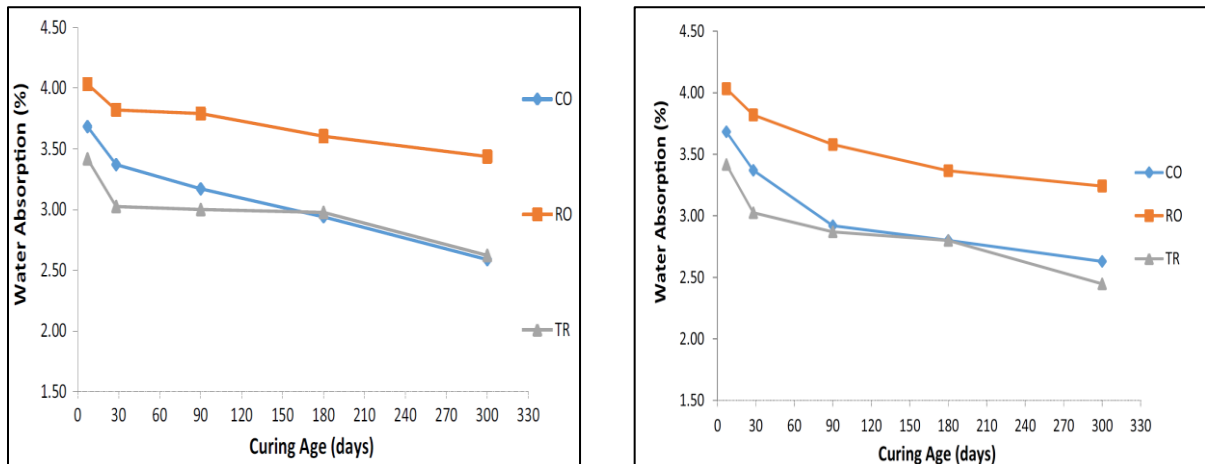


Figure 2.9. Absorption d'eau sous différents régimes de conservation (Ling & Teo, 2011)

Les résultats ont aussi révélé que la cure dans l'eau (C1) produisait les pourcentages d'absorption les plus faibles pour l'ensemble des échantillons étudiés. Il convient aussi de noter que l'absorption d'eau est en relation directe avec le temps.

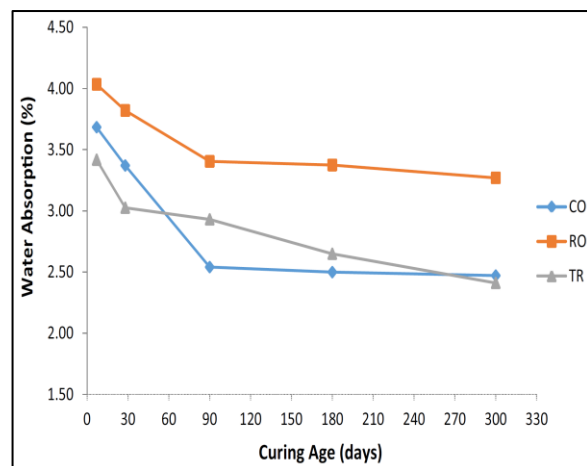
La campagne expérimentale réalisée par (Ismail et coll., 2017) a examiné les propriétés d'un béton incorporant un agrégat de béton recyclé traité (RCA) dans différentes conditions de mûrissement.

Trois régimes de durcissement différents ont été appliqués, à savoir, un durcissement continu à l'eau (NW), un durcissement initial dans l'eau pendant 28 jours avant l'exposition à un environnement en plein air (OA) et un durcissement initial de l'eau pendant 28 jours avant une exposition à l'eau de mer (SW).



a- L'eau (NW)

b- Air libre (OA)



c- L'eau marine (SW)

Figure 2.10. Absorption des bétons recyclés sous différentes conditions de cure (Ismail et coll., 2017)

Dans ce travail, les résultats obtenus à propos de l'absorption en eau pour tous les échantillons prouvent que cette dernière tend à diminuer en fonction de la période de durcissement quelque que soit la cure utilisée.

Il convient aussi de noter que les bétons à base de granulats recyclés et non traités (RO) présentent des taux d'absorption supérieurs, variant entre 10 et 35% par rapport à celle du béton ordinaire (RO), et ceci en fonction de la cure utilisée (Figure 2.10).

2.3.3. Résistance à la compression

(Gesoglu et coll., 2013) ont traité les effets de la conservation dans l'eau et dans la vapeur d'eau, sur le développement des propriétés d'un béton léger contenant différents volumes de cendre volante. L'une des propriétés étudiées par ces chercheurs est la résistance à la compression. Les résultats trouvés sont illustrés sur la Figure 2.11.

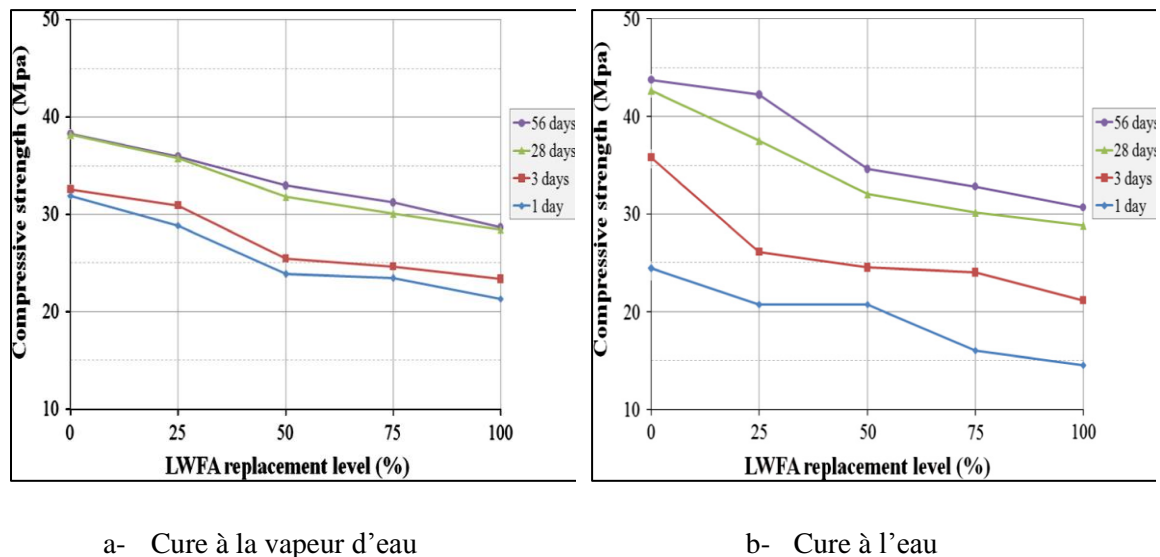


Figure 2.11. Développement de la résistance à la compression du béton soumis au durcissement à l'eau, et à la vapeur d'eau (Gesoglu et coll., 2013)

Comme l'indique la Fig 2.11, l'évolution de la résistance à la compression est proportionnellement inversée au pourcentage d'agrégats fins administrés dans le mélange. On remarque aussi que la cure à la vapeur d'eau donne des résistances à jeune âge (24 heures) plus importantes par rapport à celles obtenues par la cure dans l'eau avec une valeur de 32,6 MPa pour un pourcentage de 0% de cendre volantes. En revanche, la cure à l'eau amène à un accroissement de résistance de 103% à 56 jours, pour un pourcentage de 25% d'agrégats fins, contrairement à la résistance des éprouvettes maturées à la vapeur d'eau qui ne dépasse pas 24,5% d'accroissement dans les mêmes conditions.

Les travaux de recherche entrepris par (Abdel-Hay, 2017) reposent sur l'étude des bétons à base de granulats recyclés sous différents dosages, exposés à des conditions de cure variées (air libre, eau et cure dans une peinture).

A l'issue de ces études, l'auteur a conclu que la résistance à la compression du béton durci dans l'eau est supérieure à celle qui a durci à l'air lorsque le pourcentage d'agrégats recyclés est de 0 et 100%. Cependant, les échantillons contenant 25 et 50% de granulats recyclés, durcis à l'air,

offrent une résistance à la compression supérieure à ceux durcis à l'eau, à l'âge de 3, 7 et 28 jours. Il convient de souligner que le cas du durcissement dans la peinture a donné des valeurs de résistance à la compression supérieures à celles des autres méthodes de durcissement, dans tous les cas et à tous les âges, sauf dans le cas des agrégats recyclés à 100% (Tableau 2.7).

Tableau 2.7. Résistance à la compression pour différentes conditions de cure (Abdel-Hay, 2017).

Type de béton	Age de l'échantillon (jour)	Résistance à la compression (MPa)		
		Cure à l'air	Cure à l'eau	Cure dans la peinture
Béton de référence	3 jours	181	183	194
Recyclé à 25%		191	177	229
Recyclé à 50%		212	208	271
Recyclé à 100%		237	249	259
Béton de référence	7 jours	223	225	261
Recyclé à 25%		262	255	269
Recyclé à 50%		259	226	320
Recyclé à 100%		245	296	278
Béton de référence	28 jours	264	283	350
Recyclé à 25%		281	280	329
Recyclé à 50%		300	242	349
Recyclé à 100%		255	308	287

L'objectif du travail rapporté par (Salih et coll., 2015) est d'examiner les effets de la température de murissement sur l'activation alcaline des cendres de l'huile de palmier. L'essai de compression a été effectué sur des échantillons activés avec un mélange de silicate de sodium et d'hydroxyde de sodium (NaOH) à différentes températures, les mesures ont été prises à 7, 28, 90 et 180 jours.

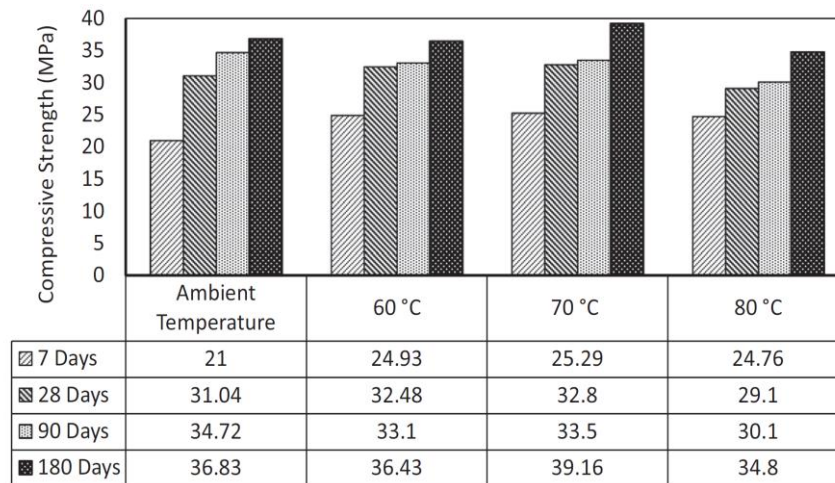


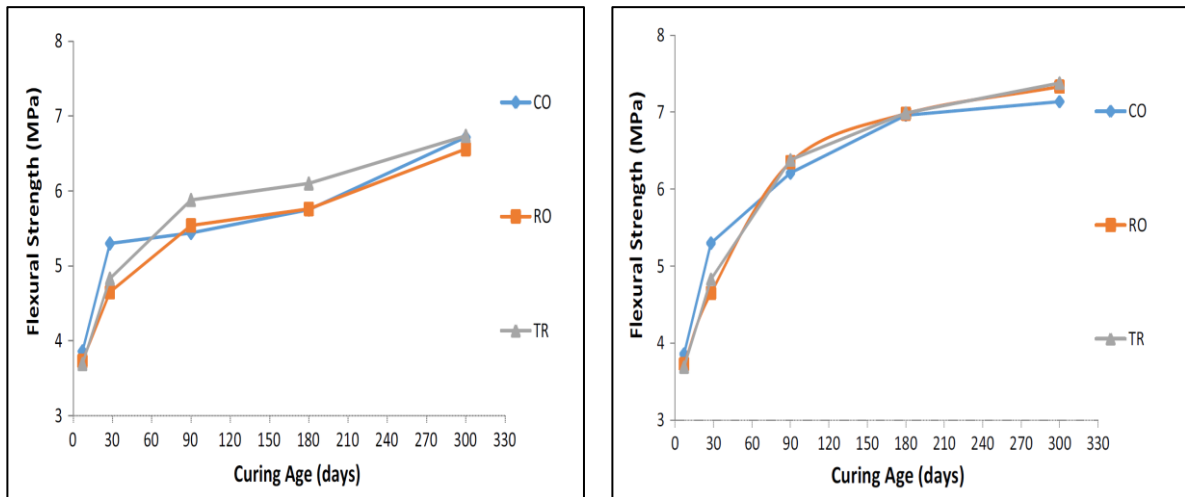
Figure 2.12. Résistance à la compression pour la pâte aux cendres de carburant, durcie à différentes températures (Salih et coll., 2015).

Au regard des résultats présentés dans la figure 2.12, les auteurs ont constaté que le durcissement au four augmentait la résistance à la compression des pâtes de ciments à 7 jours à une vitesse supérieure à celles obtenues à 28, 90 et 180 jours. Les auteurs ont aussi observé que la résistance à la compression à 7 jours des spécimens conservés au four est plus importante que celle obtenue en conservant l'échantillon à température ambiante et qu'au-delà de 70°C, les résistances tendent à diminuer, ce qui peut être le résultat de dégradations microstructurales à températures élevées.

2.3.4. Résistance à la flexion

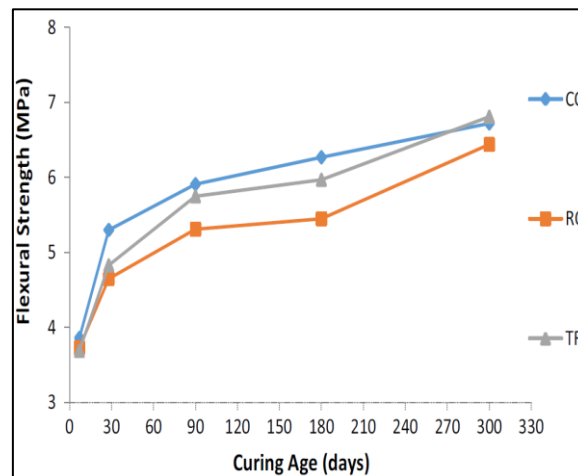
Dans l'étude de (Ismail et coll., 2017) décrite ci-dessus, l'effet des conditions de cure sur la résistance à la flexion a aussi été traité. Ces auteurs ont conclu que l'incorporation des granulats recyclés diminue la résistance à la flexion. Cependant cette différence est fortement affectée par les conditions dans lesquelles le béton est conservé.

Les résultats ont révélé que la chute de la résistance à la flexion était importante lorsque le béton était mis dans de l'eau douce, alors que cette chute était moins importante quand le béton était conservé à l'air libre à l'eau de mer (Fig. 2.13).



a- Cure à l'air libre

b- Cure à l'eau de mer



c- Cure à l'eau

Figure 2.13. Résistance à la flexion du béton recyclé sous différentes conditions de cure (Ismail et coll., 2017)

2.3.5. Module de Young

Les travaux menés par (Andiç-Çakır & Hızal, 2012) ont évalué les propriétés et les performances mécaniques d'un béton auto-plaçant léger à base de pierre ponce. Parmi les paramètres étudiés, la variation du module d'élasticité sous différentes températures élevées a été sujette à l'identification.

A l'issue de cette étude, les auteurs se sont rendu compte que les températures élevées présentent des effets non négligeables sur les valeurs initiales du module d'élasticité. Les résultats trouvés indiquent que les valeurs de ce module diminuent avec l'augmentation de la température d'exposition (Figure 2.14).

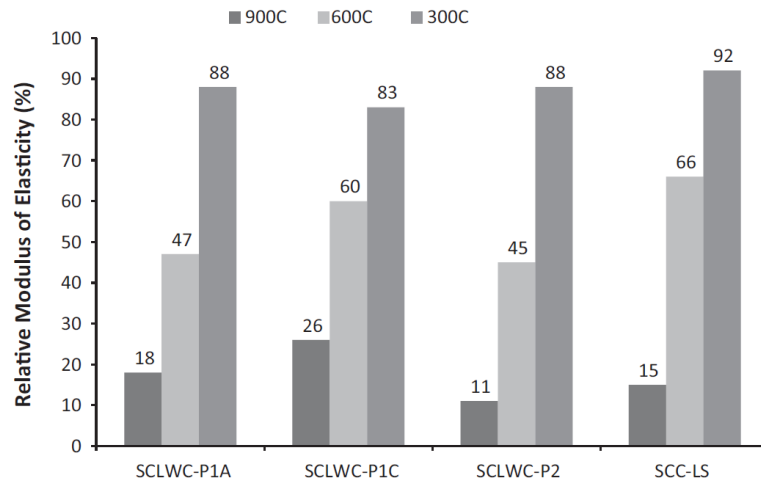


Figure 2.14. Module d'élasticité des éprouvettes exposées à des températures élevées (Andiç-Çakır & Hızal, 2012)

A titre d'exemple, le béton SCLWC-P1A a gardé 88% de sa valeur initiale après son exposition à 300°C, alors que sa valeur résiduelle après une exposition à 900°C était seulement de 18%.

2.3.6. Conductivité thermique

(L. H. Nguyen et coll., 2017) ont travaillé sur des bétons légers à base de schiste expansée (p), de pierre ponce(c), et d'argile expansée.

Pour étudier l'évolution des propriétés thermiques de ce béton léger, ces chercheurs ont soumis différents échantillons avec différents dosages de granulats légers sous différentes températures de cure. La variation de la conductivité thermique en fonction de la température de cure est illustrée sur la figure 2.15.

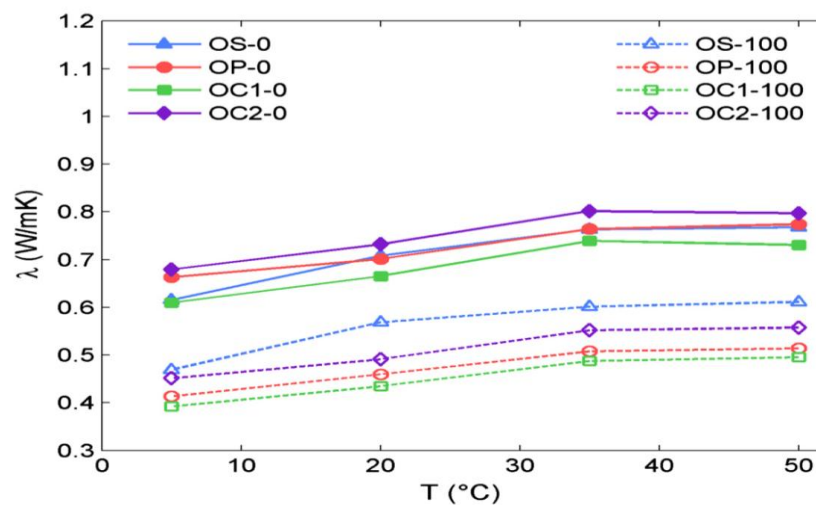


Figure 2.15. Variation de la conductivité thermique en fonction de la température (L. H. Nguyen et coll., 2017)

(L. H. Nguyen et coll., 2017) ont trouvé que cette conductivité thermique connaît une augmentation significative allant de 5° à 35°C, puis se stabilise après 35° C.

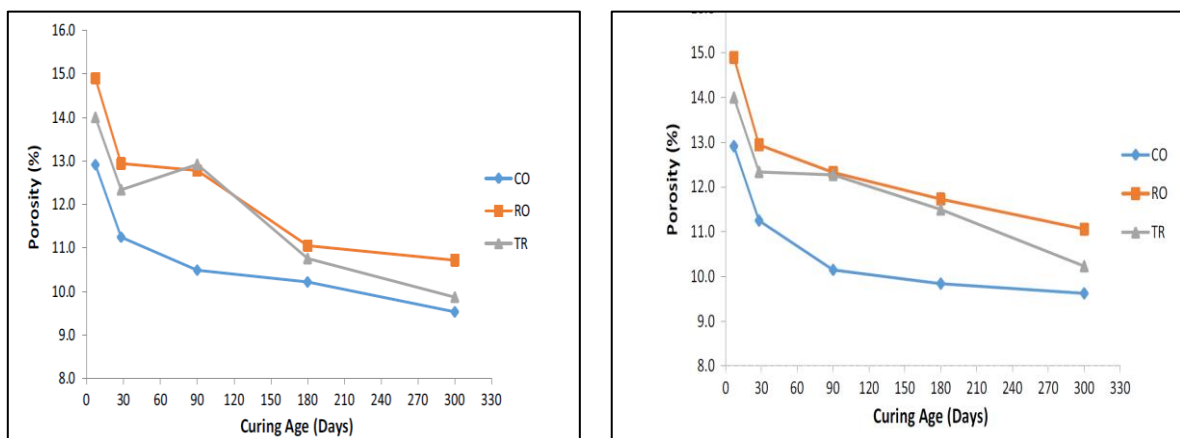
L'utilisation du béton en question sans agrégats légers fins induisait une augmentation de sa conductivité thermique de 0,12 à 0,15 W / m.°K (17% à 24%). De l'autre côté pour un dosage de 100% d'agrégats légers, l'augmentation de la conductivité variait de 0,1 à 0,14 W / m.°K (environ 24 à 30%).

L'augmentation de la conductivité du béton léger contenant 100% d'agrégats légers met en évidence le rôle joué par l'eau piégée dans la relation entre la conductivité et la température.

2.3.7. La porosité

Comme nous l'avons déjà précisé dans les paragraphes précédents, (Ismail et coll., 2017) ont travaillé sur un béton à base de granulats de béton recyclé, traités ou non.

Les résultats des tests de porosité des différents échantillons CO (béton de référence), RO (béton à base d'agrégats recyclé brutes) et TR (béton à base d'agrégats traités), sous différentes conditions de cures sont illustrés sur la figure 2.16.



a- Cure à l'eau de mer

b- Cure à l'eau

Figure 2.16. Porosité des échantillons durcis dans des conditions différentes (Ismail et coll., 2017)

Les auteurs ont constaté que pendant tout l'essai, la porosité la plus élevée a été offerte par les spécimens RO quel que soit le mode de conservation adapté, avec des différences de 15% et 12% par rapport à celles des échantillons CO maturés respectivement à l'eau et à l'eau de mer. De plus, la porosité totale des spécimens TR à un âge de 300 jours n'était que de 6% et 4% supérieure à celle des échantillons témoins placés respectivement dans l'eau et l'eau de mer.

Dans le travail réalisé par (Thomas et coll., 2018), la porosité ouverte a été également évaluée. Les résultats obtenus ont montré que la porosité ouverte des bétons s'accroît en augmentant le rapport Eau/Ciment. Les auteurs ont aussi conclu que l'exposition à l'eau de mer des bétons ordinaires et ceux contenant de faibles teneurs en agrégats recyclés, augmente les valeurs de la porosité. Cependant, pour les bétons contenant des forts pourcentages d'agrégats recyclés, les porosités obtenues pour une cure standard et une exposition à l'eau de mer sont très proches (Fig. 2.17).

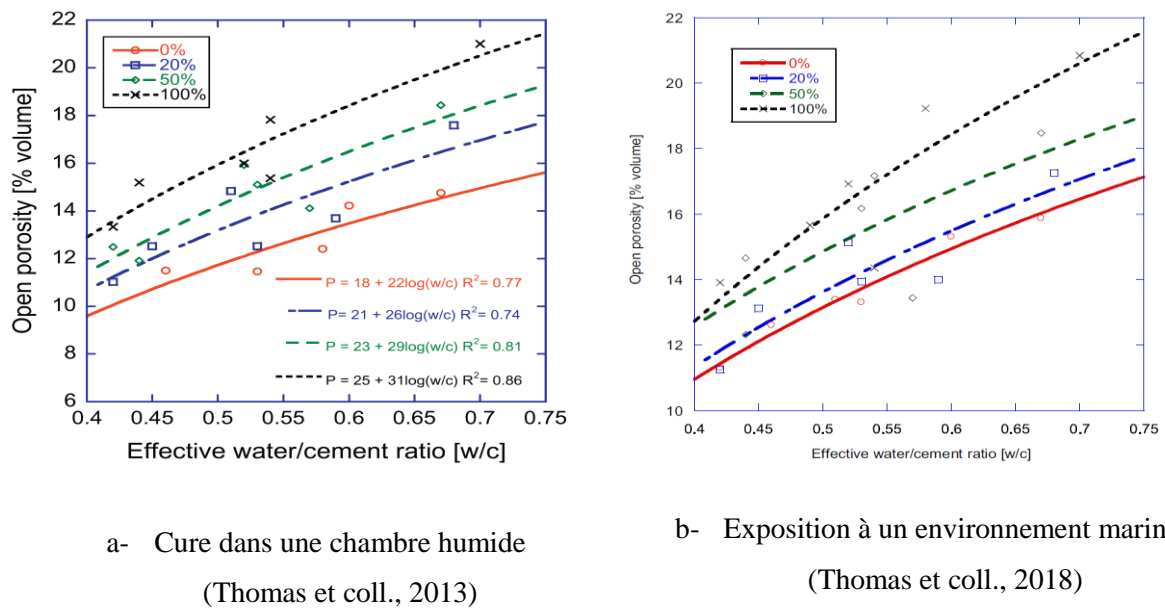


Figure 2.17. Influence des conditions de cure sur la porosité des bétons recyclés à 28 jours (Thomas et coll., 2013; Thomas et coll., 2018)

2.3.8. Capillarité

En plus de l'influence du temps d'immersion totale du béton dans l'eau sur son absorption, (Liu et coll., 2018) ont aussi évalué l'impact de ce temps d'immersion sur l'absorption capillaire de leurs bétons. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 2.18.

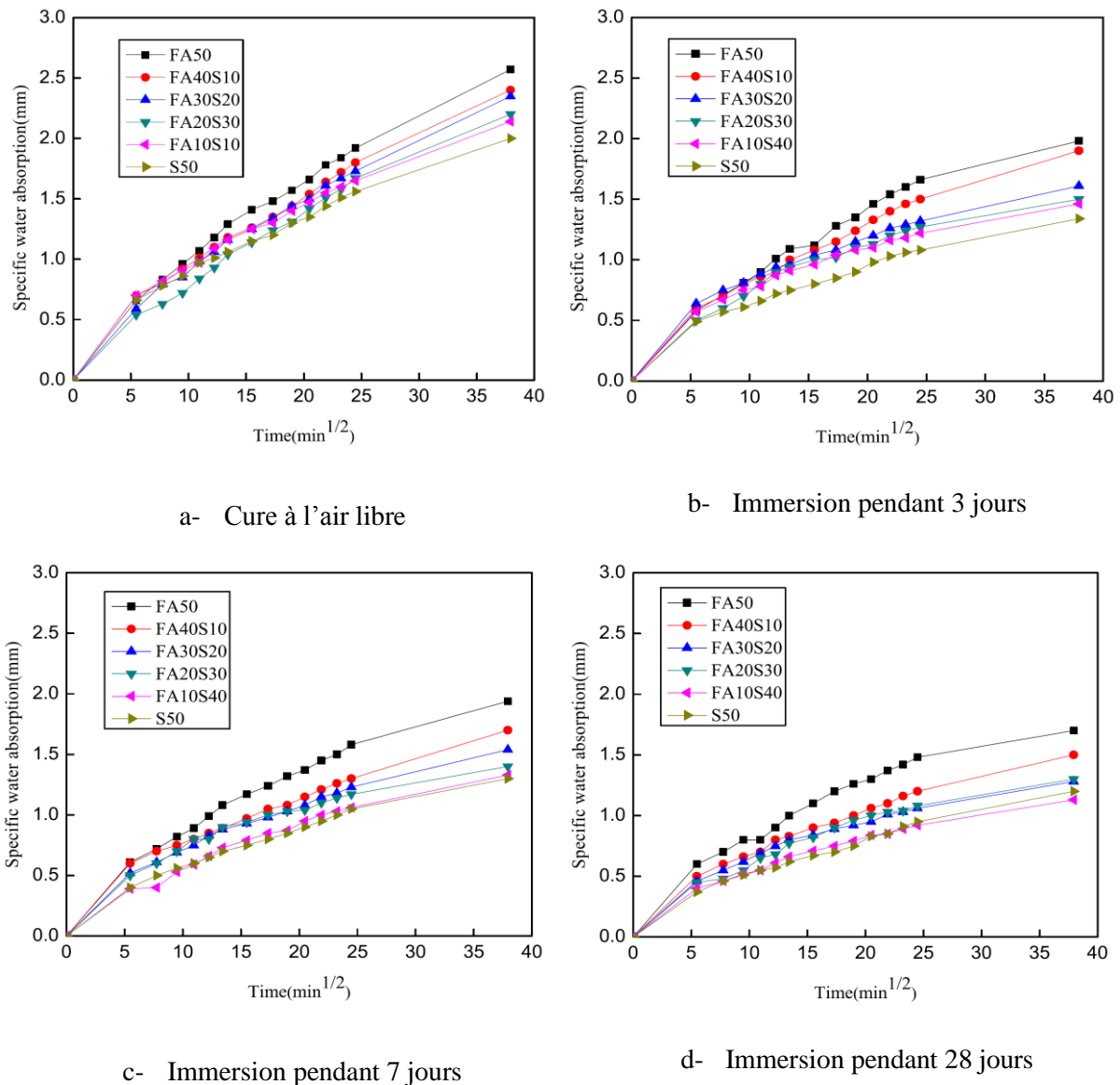


Figure 2.18. Influence du temps de cure sur l'absorption d'eau spécifique du béton (Liu et coll., 2018)

Comme montré dans la figure 2.18, les résultats trouvés indiquent que l'absorption capillaire d'eau du béton diminue au fur et à mesure que le temps d'immersion augmente.

L'absorption en eau du béton soumis à l'air libre est supérieure à celle d'une cure sous l'eau. En effet, même une cure standard de 3 jours peut réduire considérablement l'absorption capillaire en eau.

L'absorption capillaire a été aussi évalué dans la campagne expérimentale réalisée par (Zheng et coll., 2018). Cette étude a proposé l'eau de mer comme moyen de durcissement (SWC) pour le béton de récif artificiel vert (GARC) dans les zones côtières. L'effet de cette cure a été comparé avec deux autres cures différentes, à savoir, un durcissement standard (SC) à une

humidité de 90-95% et une température de 20 ± 2 °C et un durcissement dans l'eau douce (FWC) à 20 ± 2 °C.

Les résultats rapportés par (Zheng et coll., 2018) sont représentés par la figure 2.19.

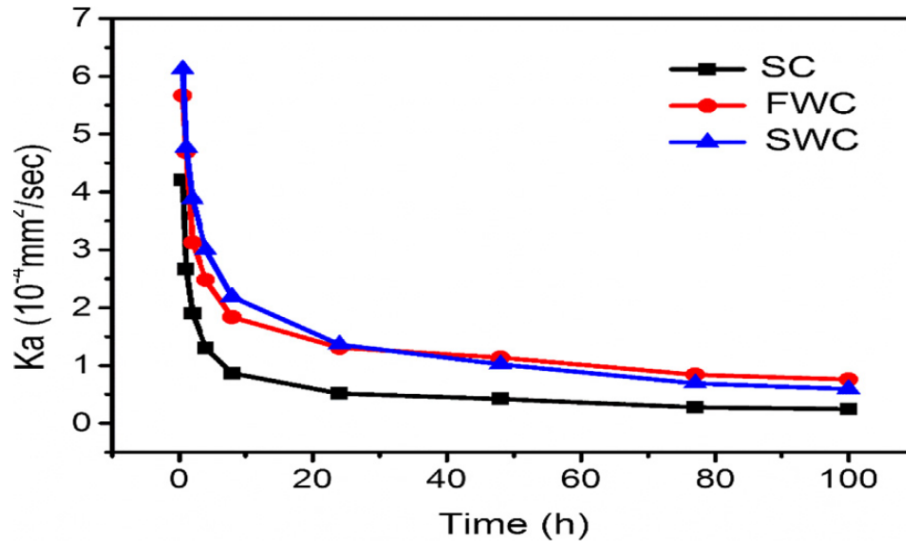


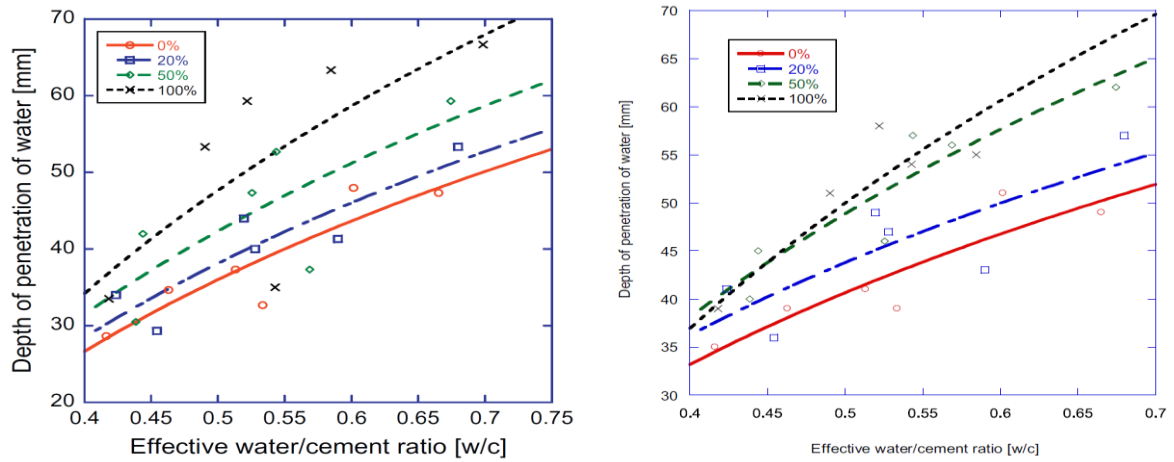
Figure 2.19. Capillarité des bétons de récif en fonction du temps à 28 jours (Zheng et coll., 2018).

Dans un premier temps, les auteurs ont pu constater que l'absorption capillaire diminue de manière significative au cours des 20 premières heures, et devient ensuite plus lente quelque soit le régime de cure utilisé.

Ces chercheurs ont aussi signalé que l'absorption en eau la plus faible pendant toute la durée de l'expérience est identifiée pour un durcissement standard, ce qui signifie que les perméabilités des bétons dans les autres conditions étaient supérieures à celle d'un durcissement standard.

2.3.9. Perméabilité à l'eau

Un autre paramètre évalué dans la campagne expérimentale réalisée par Thomas & col (2018) est la perméabilité à l'eau (Figure 2.20).



a- Cure dans une chambre humide

(Thomas et coll., 2013)

b- Exposition à un environnement marin

(Thomas et coll., 2018)

Figure 2.20. Pénétration de l'eau des bétons recyclés à 28 jours sous différentes conditions de cure (Thomas et coll., 2013; Thomas et coll., 2018)

Les travaux expérimentaux réalisés par ces auteurs ont révélé que la pénétration de l'eau est plus élevée pour les rapports E/C plus grands et augmente aussi quand le dosage des agrégats recyclés administrés dans le mélange est plus important.

Quant à l'effet de la condition de cure, (Thomas et coll., 2018) ont rapporté que pour un rapport E/C égal à 0.45, la pénétration de l'eau passe de 34 à 38 mm quand la substitution par des granulats recyclés passe de 0 à 100%. Ceci indique une augmentation respective de 20% et 10% par rapport aux résultats obtenus dans un environnement standard.

2.4. Conditions de cure dans le béton de liège

Nous avons montré dans le premier chapitre, les différentes propriétés du matériau liège ainsi que les plus récents travaux réalisés sur les mélanges à base de ce matériau. La revue de littérature réalisée sur ces composites nous a permis non seulement de constater le peu d'études réalisés, mais aussi l'absence de travaux qui traitent l'influence des conditions de cure sur ce type de matériaux cimentaires. Le Tableau 2.8 résume les différentes conditions de conservation, trouvées dans les travaux récents, utilisées pour la fabrication des matériaux à base de liège.

Tableau 2.8. Etudes de l'effet des conditions de cure sur les matériaux cimentaires à base de liège.

Auteur	Type du composite	Cure utilisée
(Panesar & Shindman, 2012)	Béton de liège	Chambre humide à 100% de HR et 23°C
(Brás et coll., 2013)	Mortier de liège	Chambre humide à 95% de HR et 20°C
(Moreira et coll., 2014)	Chapes de liège	Chambre humide à 100% de HR et 23°C
(Boussetoua et coll., 2017)	Mortier de liège	Chambre humide à 50% de HR et 21°C
(Barnat-Hunek et coll., 2017)	Mortier de liège expansé	N'est pas mentionnée

2.5. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons, dans un premier temps, essayé de mettre en évidence les propriétés des particules végétales, surtout celles qui peuvent être en relation avec la quantité d'eau présente autour de la particule. Ce chapitre regroupe aussi l'effet des conditions de conservation (cure) sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des nouveaux bétons. La bibliographie réalisée a permis, d'une part, d'observer l'impact des conditions de cure mais de détecter aussi le manque des travaux visant à évaluer l'impact de la cure sur les propriétés des bétons sujets de notre étude, c'est-à-dire les bétons de liège.

En se basant sur la recherche bibliographique, notre travail consiste à évaluer l'effet des conditions de cure (du temps d'immersion en premier) sur les propriétés physiques, mécaniques et microstructurales et quelques paramètres de durabilité d'un béton vert à base de granulats de liège local.

Le chapitre suivant sert donc à décrire les caractéristiques des différents constituants utilisés ainsi qu'à expliquer les méthodes utilisées pour mesurer les propriétés préconisées.

Chapitre 3 :

Caractérisation des matériaux & procédures expérimentales

3. Caractérisation des matériaux & procédures expérimentales

3.1. Introduction

Ce chapitre met en exergue les caractéristiques intrinsèques des constituants du béton de liège que nous étudions. Ce béton est obtenu par une substitution volumique des granulats minéraux par des granulats de liège pour les mêmes classes granulaires.

Nous allons présenter, en premier lieu les caractéristiques des constituants du squelette de ce béton, à savoir les agrégats minéraux et végétaux ainsi que les procédures de préparation et de confection des mélanges composites.

La suite du chapitre sera consacrée à la description des méthodes expérimentales préconisées pour l'étude des caractéristiques physiques, mécaniques, microstructurales et de quelques paramètres de durabilité.

3.2. Caractéristiques des matériaux

Dans ce qui suit, nous allons présenter les matériaux de base utilisés pour formuler les bétons étudiés ainsi que les essais qui ont contribué à déterminer leurs caractéristiques.

3.2.1. Eau

L'eau de gâchage utilisée pour la formulation de nos bétons est l'eau de robinet du pôle universitaire de Chetouane à Tlemcen. Sa composition chimique est consignée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique de l'eau utilisé (LTPO).

CATIONS	mg/l	még/l	ANIONS	mg/l	még/l
Calcium	110,621	5,520	Chlorures (Cl)	99,400	2,800
Magnésium (mg)	42,282	3,477	Sulfates (SO ₄)	312,740	6,515
Sodium (Na)	-	-	Carbonates (CO ₃)	NEANT	NEANT
Potassium (k)	-	-	Bicarbonates (HCO ₃)	473,515	7,760
Balance Cation	-	8,997	Balance Anion	885,655	17,075

Cette composition chimique a été obtenue grâce à une analyse d'un échantillon d'eau au sein du laboratoire de travaux publics Ouest de la wilaya de Tlemcen (LTPO).

3.2.2. Ciment

Dans le cadre de ce projet, le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42,5 à base de pouzzolane. Ce ciment est fabriqué par la société des ciments de Béni-Saf (S.C.I.B.S) de la wilaya d'Ain-Temouchent. Ces masses volumiques ont été mesurées suivant la norme NF P18-558. Dans un premier temps nous avons déterminé sa masse volumique absolue en utilisant un pycnomètre et un solvant : le toluène (qui est sans réaction avec le ciment). D'autre part grâce à l'essai de l'entonnoir, muni d'une passoire et d'un opercule mobile et un récipient de 1 litre placé en dessous (Figure 3.1), nous avons déterminé la masse volumique apparente du ciment (Tableau 3.2). En s'appuyant ensuite sur les recommandations de la norme SSB NF P 15-471, nous avons déterminé la surface spécifique à l'aide du perméabilimètre BLAINE (Figure 3.2) en utilisant l'équation (Eq. 3.1).



Figure 3.1 : Caractérisation de la masse volumique apparente du ciment.

Tableau 3.2 : Masses volumiques et surface spécifique du ciment CPJ-CEM II/A 42,5 utilisé.

Matériau	Ciment
M.V app (kg/m ³)	1011
M.V abs (kg/m ³)	3124
Surface spécifique (cm ² /g)	3143,02



Figure 3.2 : Perméabilimètre Blaine.

$$SSP = K \frac{\sqrt{n^3 t}}{MV \text{ abs}(1 - n)\sqrt{\mu}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Avec :

SSP : Surface spécifique (cm²/g)

K : constante de l'appareil

n : porosité (en général égal à 0,5)

MV abs : masse volumique absolue du ciment en t/m³

t : le temps d'écoulement (s)

μ : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai (Pa.s)

3.2.3. Adjuvant

Le super-plastifiant utilisé est désigné commercialement sous l'appellation de ORAFLOW THM 17200 (Fig. 3.3). Ce super-plastifiant est fabriqué par la SARL Orachem Concrete (S.O.C), située à Boutlélis dans la wilaya d'Oran.



Figure 3.3. Super-plastifiant utilisé pour les bétons.

Le dosage approprié en superplastifiant a été déterminé en effectuant des essais d'étalement au mini-cône (Fig. 3.4), en variant les dosages en superplastifiant : 0, 0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.4 et 1.5%. Le dosage de saturation optimal en adjuvant (Fig. 3.5) trouvé est de 0.8%. Par conséquent, dans la suite du travail, nous allons utiliser ce dosage pour la formulation de nos bétons.



Figure 3.4. Essai d'étalement au mini-cône.

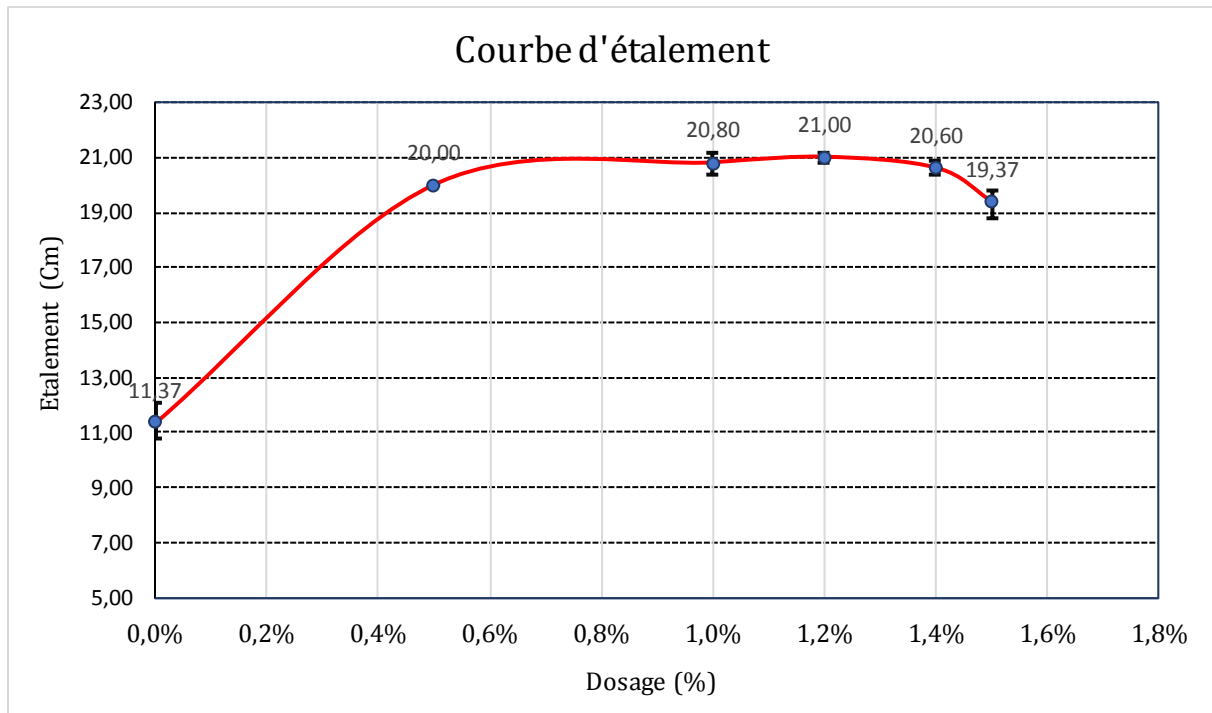


Figure 3.5. Courbe d'étalement au mini-cône des pâtes de ciment adjuvantées.

3.2.4. Granulats minéraux

Les granulats minéraux utilisés pour la composition de nos bétons sont : un sable de classe granulaire 0/4 mm, un gravier de classe 4/8 mm et un autre gravier de classe 8/16 mm. Ces granulats concassés proviennent, de la carrière nationale des granulats (E.N.G), située à Sidi-Abdelli, à la wilaya de Tlemcen en Algérie.

3.2.4.1. Analyse granulométrique des granulats

Les analyses granulométriques ont été réalisées conformément à la norme BS EN 933-1. L'essai consiste à écrêter un échantillon de granulats sur une colonne de tamis. A l'issue de cet essai, une courbe granulométrique est tracée ; elle représente les pourcentages des tamis cumulés en fonction des diamètres des tamis. Les courbes granulométriques du sable et des graviers sont représentées sur la Figure 3.6.

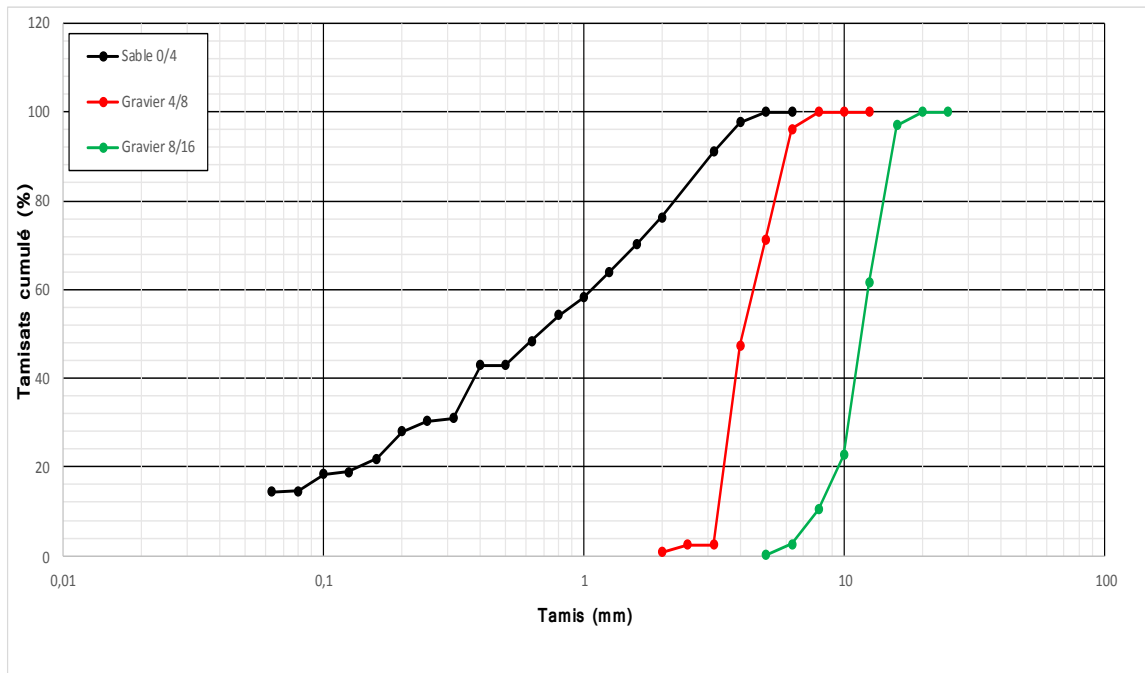


Figure 3.6. Courbes granulométriques des granulats.

L'analyse granulométrique a montré que le sable est assez riche en élément fins avec une teneur en fines de 12,4% et un module de finesse égal à 3,26. Il s'agit d'un sable grossier ; cependant aucune correction granulométrique avec un sable fin n'a été préconisée.

3.2.4.2. Masse volumique

Nous avons mesuré les masses volumiques apparentes 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 (Fig. 3.7). Cette méthode est plus précise par rapport à celle de l'éprouvette graduée. Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents granulats sont récapitulés dans le Tableau 3.3.

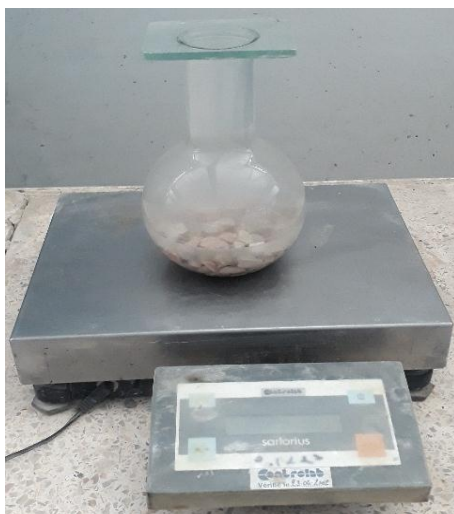


Figure 3.7. Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats minéraux utilisés.

Tableau 3.3. Masses volumiques des différents granulas minéraux utilisés.

Granulat	Sable 0/4	Gravier 4/8	Gravier 8/16
M.V app (kg/m ³)	1559	1356	1207
M.V abs (kg/m ³)	2598	2538	2546

3.2.4.3. Absorption

Le coefficient d'absorption exprime le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon immergé 24 heures dans l'eau. Dans notre étude, ce paramètre a été déterminé conformément à la norme BS EN 1097-6 : 2012. (Fig. 3.8). Tout d'abord les échantillons des 3 classes granulaires, sont séchés à 105° C pendant 48 heures à l'étuve. Ensuite, ils sont immergés 24 heures dans l'eau, puis sont sortis de l'eau pour pouvoir sécher leurs surfaces à l'aide d'un chiffon pour les graviers 4/8mm et 8/16mm et en utilisant un séchoir pour le sable. Le coefficient d'absorption a été calculé par l'équation (Eq. 3.2). Les résultats des coefficients d'absorption sont récapitulés dans le Tableau 3.4.

**Figure 3.8 :** Absorption des granulats minéraux utilisés.

$$Ab_{24} (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Avec :

M_s : Masse sèche des granulats en grammes (g).

M_{sat} : Masse des granulats saturés (g).

Tableau 3.4. Coefficient d'absorption des différents granulats minéraux utilisés.

Granulat	Sable 0/4	Gravier 4/8	Gravier 8/16
Absorption (%)	2,10	1,57	1,28

3.2.5. Granulats végétaux

Le liège est utilisé dans notre étude expérimentale sous forme de granulats concassés. En effet, trois classes granulaires 0/4mm, 4/8mm et 8/16mm ont été intégrées dans la composition de nos bétons (Fig. 3.9). Les trois classes granulaires proviennent de la société JIJEL SIBL, située à Jijel à l'est Algérien. Les essais et les résultats de caractérisation de ces granulats de liège sont les suivants :

**Figure 3.9.** Les classes des granulats de liège utilisés.

3.2.5.1. Analyse granulométrique des classes granulométriques du liège

L'analyse granulométrique des classes granulaires de liège utilisées (0/4, 4/8 et 8/16) a été effectuée suivant la norme BS EN 933-1. Elles ont été respectivement analysées par les mêmes séries de tamis que ceux utilisés pour les granulats minéraux mais avec des masses différentes afin de pouvoir remplir les tamis, en l'occurrence, 160 grammes pour les classes 0/4 et 4/8 et 180 grammes pour la classe 8/16. Les courbes granulométriques des granulats de liège sont représentées sur la Fig. 3.10.

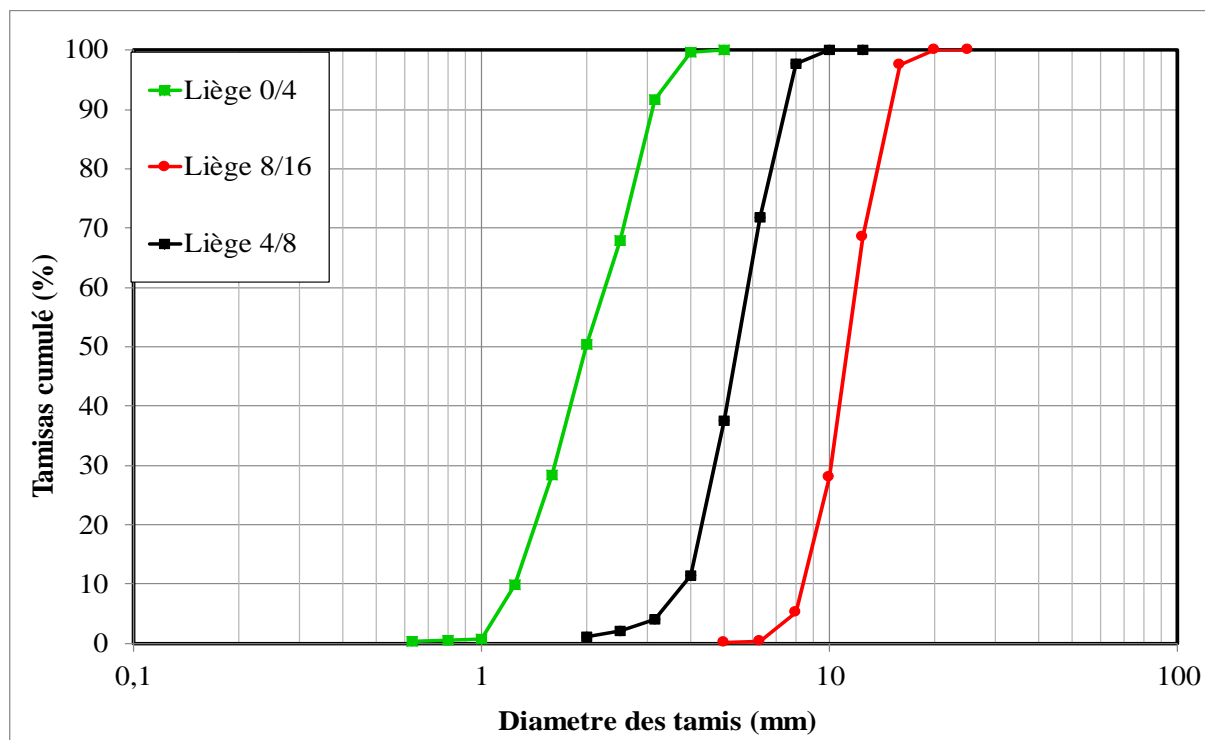


Figure 3.10. Courbes granulométriques des granulats de liège utilisés.

3.2.5.2. Masses volumiques des classes de liège :

Les masses volumiques apparentes et absolues des différentes classes de liège ont été obtenues de la même manière que celles des granulats minéraux, autrement dit, ils ont été obtenus en suivant les recommandations des normes : BS EN 1097-3 ; 1998 et BS EN 1097-6 ; 2012, respectivement (Fig 3.11). Les résultats de ces essais sont récapitulés dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5. Masses volumiques des granulats de liège.

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



Figure 3.11. Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats de liège utilisés.

3.2.5.3. Absorption

Quant à l'absorption de l'eau par les granulats de liège, il semble qu'il n'existe toujours pas une norme qui décrit la méthode de détermination de ce paramètre. Par conséquent, ce paramètre a été déterminé en utilisant la méthode décrite comme suit :

Tout d'abord les 3 échantillons de liège issus de chaque classe (0/4, 4/8 et 8/16) sont séchés à l'étuve à 60° C pendant 24 heures, pour être ensuite immergés dans un bain d'eau pendant 4, 8, 15, 30 minutes, 1, 2, 4, 24, 48, 72 et 96 heures (Fig. 3.12). On tient à préciser qu'après chaque laps de temps mentionné, ces échantillons ont été introduits dans une essoreuse pour sécher leurs surfaces et mesurer en même temps leurs masses. Essais utilisés pour la mesure des masses volumiques apparente et absolue des granulats minéraux utilisés temps leurs masses.

Les résultats des coefficients d'absorption moyens après 48h sont présentés dans le Tableau 3.6.



Figure 3.12. Immersion des échantillons de liège.

Tableau 3.6. Coefficients d'absorptions des différents granulats de liège.

Granulat	Liège 0/4	Liège 4/8	Liège 8/16
Absorption (%)	168,67	116,78	68,89

3.3. Formulation du béton

Dans ce travail expérimental, le béton de liège a été formulé en partant d'une composition d'un béton ordinaire formulé à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse. Ce béton présente la formulation consignée dans le Tableau 3.7, une masse volumique de $2379,5 \text{ kg/m}^3$ et une résistance à la compression égale à 31 MPa.

Tableau 3.7 : Composition de 1m^3 de béton ordinaire en (kg/m^3).

Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Ciment	Eau	Adjuvant
780,6	348	729,3	350	171,4	2.8

Le principe de la formulation du béton de liège, sujet de notre étude, repose sur la substitution volumique de 50% des granulats minéraux (sable 0/4, gravier 4/8 et gravier 8/16mm) par des granulats de liège de même classe. Le choix de ce taux de remplacement est fondé sur les résultats de travaux antérieurs (Tedjditi et coll, 2018). La composition du béton de liège utilisé, est donnée dans le Tableau 3.8. Sa masse volumique est estimée à 1512 kg/m^3 ; ce béton est par conséquent bien plus léger que le béton de référence.

Tableau 3.8 : Composition de $1m^3$ du béton de liège.

Ciment	Eau	Super-plastifiant	Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Liège 0/4	Liège 4/8	Liège 8/16
350	171.4	2.8	390.3	174.0	364.7	21.2	11.1	26.6

3.3.1. Malaxage

Concernant le mode de malaxage choisi pour la fabrication de nos bétons, nous avons adapté la démarche validée par les travaux de (Tedjiti et coll ,2018), qui est détaillée dans ce qui suit :

D'abord, les granulats de liège saturés pendant 48h sont introduits en premier dans le malaxeur et mélangés pendant 90 secondes dans un malaxeur à axe vertical (Figure 3.13). Ensuite, le sable, le ciment et la moitié de l'eau super plastifiée y sont versés dans cet ordre et mélangés pendant 4 minutes. Puis, les graviers et la quantité d'eau super plastifiée restante sont ajoutés et mélangés pendant 60 secondes. Ensuite, le malaxage de tous les constituants continue pendant 90 secondes.

**Figure 3.13** : Malaxeur utilisé pour la formulation de nos bétons.

3.3.2. Fabrication des éprouvettes

Après chaque formulation, nos bétons sont directement mis en place dans des moules en acier, cylindrique de dimensions (110x220) mm, ou bien prismatique de (100x100x400) mm, en utilisant une aiguille vibrante comme moyen de serrage (Figure 3.14).



Figure 3.14 : Table vibrante utilisée pour le serrage des échantillons de béton.

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées puis conservées dans des conditions de cure différentes (Tableau 3.9), jusqu'à l'âge de 28 jours, où l'on rectifie leurs surfaces à l'aide d'une scie à béton pour les préparer pour les différents essais de caractérisation (Fig 3.15).



Figure 3.15 : Rectification des surfaces des éprouvettes à l'aide de la scie à béton.

Tableau 3.9 : Désignation des différents bétons ainsi que leurs conditions de cure.

Désignation	Mode de cure
H28	Immersion totale dans l'eau pendant 28 jours, des échantillons de Béton de liège et puis conservation à l'air libre aux conditions du laboratoire
H0	Cure à l'air libre aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation, des échantillons de Béton de liège
H14	Cure mixte 1 : immersion totale dans l'eau pendant 14 jours des échantillons de Béton de liège puis maturation à l'air libre aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation
H7	Cure mixte 2 : immersion totale dans l'eau pendant 7 jours des échantillons de Béton de liège puis maturation à l'air libre aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation
H3	Cure mixte 3 : immersion totale dans l'eau pendant 3 jours des échantillons de Béton de liège puis maturation à l'air libre aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation

3.4. Procédures des essais effectués

Nous avons étudié les caractéristiques des bétons à l'état frais et à l'état durci.

3.4.1. A l'état frais

3.4.1.1. Mesure de la consistance

Afin de mesurer l'affaissement du béton, nous avons utilisé l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (D=20 cm, d=10 cm, h= 30cm) selon la norme 12350-2 :2009. Le remplissage du cône se fait en 3 couches de telle sorte que chaque couche subit 25 coups avec une tige métallique. Après le remplissage, le cône est soulevé et l'affaissement du béton est mesuré à l'aide d'une règle (Fig. 3.16). Les résultats obtenus ont montré que le béton utilisé dans cette campagne expérimentale présente un affaissement de 146 mm.



Figure 3.16 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

3.4.2. A l'état durci

Sur la base d'une série d'essais expérimentaux, nous avons déterminé les caractéristiques physiques, mécaniques ainsi que la microstructure et quelques paramètres de durabilité de nos bétons. La description des différents essais réalisés est faite dans la partie qui suit :

3.4.2.1. Propriétés mécaniques

3.4.2.1.1. Essai de résistance mécanique à la compression :

La résistance à la compression est réalisée à l'âge de 28 et à 56 jours en utilisant la machine universelle traction/compression pilotée par ordinateur et qui permet d'appliquer des charges qui peuvent atteindre jusqu'à 600 KN (Fig. 3.17). Les mesures ont été réalisées selon la norme BS EN 12390-3 : 2009.

Une fois l'essai terminé, la machine affiche la force maximale, et affiche la courbe de capacité force-déplacement. En exploitant les données de cette dernière, les courbes de capacité contrainte-déformation ont été tracées. La résistance à la compression est calculée en utilisant l'équation (Eq. 3.3).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Avec :

σ : La résistance à la compression (MPa).

F : La force à la rupture (N).

S : La section de l'éprouvette (mm²).



Figure 3.17 : Presse de capacité 600 KN.

3.4.2.1.2. Essai de résistance mécanique à la flexion :

L'essai de flexion trois points a été réalisé suivant les recommandations de la norme BS EN BS EN 12390-5 : 2009 (à l'âge de 28 jours), à l'aide d'un portique d'essai universel didactique, d'une capacité de 600 KN (Fig. 3.18). Des éprouvettes prismatiques de 10x10x40 cm³ sont préparées et testées après 28 jours. Pour chaque formulation de mélange, les valeurs obtenues correspondent à la moyenne de trois essais.

La résistance à la flexion est calculée par l'équation (Eq. 3.4).

$$\sigma = \frac{3.F.L}{2.b^3} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Avec :

σ : La contrainte maximale en MPa.

F : La force appliquée (MN).

L : Longueur de l'éprouvette mètres (m).

b : Côté de l'éprouvette (m).



Figure 3.18 : Portique didactique.

3.4.2.2. Propriétés physiques

3.4.2.2.1. Masse volumique

La masse volumique des éprouvettes cylindriques (11x22) cm est déterminé à 28 jours selon la norme 12390-7 : 2009 (Fig. 3.19). En réalité la masse volumique est la moyenne des mesures calculées par l'équation (Eq 3.5).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{Eq 3.5})$$

Avec :

M : la masse de l'éprouvette en kilogrammes.

V : le volume de l'éprouvette en mètre cube.



Figure 3.19 : Essais de masse volumique des bétons.

3.4.2.2.2. Absorption par immersion totale

Le coefficient d'absorption a été déterminé selon la norme ASTM C 1585-06 sur des éprouvettes de dimensions $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$. Les échantillons sont d'abord séchés à l'étuve à une température de 60° C , puis pesés jusqu'à la stabilisation de leur masse (la différence entre trois pesées espacées de 24 heures doit être $\leq 0,5\%$) pour déterminer leur poids à l'état sec (M_s). Ensuite, les échantillons sont totalement immergés dans l'eau (Fig. 3.20), puis nous avons pesé ces échantillons en les sortant de l'eau suivant les temps de 5, 10, 15, 30 minutes, 1, 2, 4, 24 et 48 heures.

On tient à noter qu'à chaque fois, l'échantillon est sorti d'eau, sa surface est ensuite séchée à l'aide d'un chiffon et que sa masse est pesée (M_t). Le coefficient d'absorption est donné par l'équation (Eq. 3.6).

$$Ab(\%) = \frac{M_t - M_s}{M_s} * 100 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Avec :

M_s : masse de l'échantillon à l'état sec (g).

M_t : masse des échantillons à l'instant t en (g).



Figure 3.20 : Immersion totale des échantillons dans l'eau.

3.4.2.2.3. Essai à l'ultrason

L'essai de transmission ultrasonore sur les éprouvettes de béton est un essai non destructif dont l'objectif est la mesure du temps de passage de l'onde ultrasonore d'un émetteur piézoélectrique à un récepteur (Fig. 3.21). Cet essai est réalisé conformément à la norme BS EN 12504-4 : 2004, sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 110 x 220 mm.

Après avoir mesuré le temps (t) nécessaire pour qu'une onde traverse l'éprouvette, la vitesse (v) peut être calculée à l'aide de l'équation (Eq.3.9).

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Eq 3.9})$$

Avec :

V : Vitesse ultrasonore (km/s).

L : La longueur de l'éprouvette (mm).

t : Le temps nécessaire pour qu'une onde traverse la longueur de l'éprouvette (μs).

Une fois la vitesse ultrasonore déterminée, le module d'Young dynamique peut être calculé à l'aide de l'éq 3.10 citée dans les travaux de (Latroch et coll., 2018).

$$E_{dyn} = \frac{V^2 * \rho}{g} * 10^{-2} \quad (\text{Eq 3.10})$$

Tel que :

E_{dyn} est le module d'élasticité dynamique (GPa), V est la vitesse ultrasonore (km/s), ρ est la masse volumique du matériau (kg/m^3) et g la gravité (9.81 m/s^2).

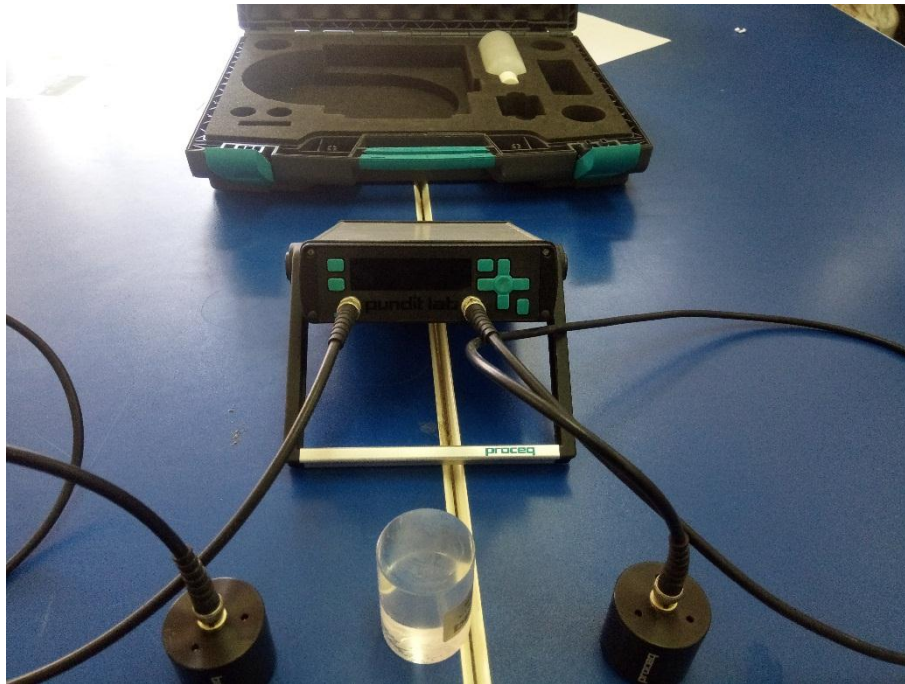


Figure 3.21 : Essai à l'ultrason.

3.4.2.3. Essais de durabilité

3.4.2.3.1. Absorption par capillarité :

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est déterminé selon les recommandations de la norme ASTM C 1585-04 sur des échantillons de $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}^3$. Les surfaces latérales des échantillons sont imperméabilisées à l'aide de la résine Epoxy afin d'assurer un transfert unidirectionnel. Les spécimens sont d'abord placés dans une étuve réglée à 60°C jusqu'à stabilisation de leur masse pour déterminer la masse sèche M_{sec} (la stabilisation est atteinte lorsque la différence entre 3 pesées espacées de 24h soit inférieure ou égale à 0.1%). Ensuite, les échantillons sont placés dans un bassin d'eau, contenant des supports ayant la même hauteur pour éviter le contact de la surface inférieure de l'échantillon avec les parois du bassin. Le bassin est rempli de façon que l'échantillon soit immergé sur une profondeur de $2 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (Fig. 3.22). L'échantillon est pesé après 1, 5, 10, 20, 30min, 1, 2, 3, 4, 5, 6h, et puis chaque jour jusqu'à stabilisation de sa masse. Après chaque période, la capillarité est calculée suivant l'équation 3.9 :

$$I = \frac{M_t - M_s}{A} * 100 \quad (3.9)$$

Où :

I : Capillarité, exprimée en [mm]

M_s : Masse sèche des échantillons [mg].

M_t : Masse des échantillons humides à l'instant t [s].

A : la surface de l'échantillon en contact avec l'eau [m^2].



Figure 3.22. Essai d'absorption capillaire

Les calculs effectués permettent de tracer la courbe d'absorption $I = f(\sqrt{t})$. Selon cette courbe, on peut distinguer deux coefficients d'absorption, à savoir : l'absorption initiale et secondaire (Fig. 3.23).

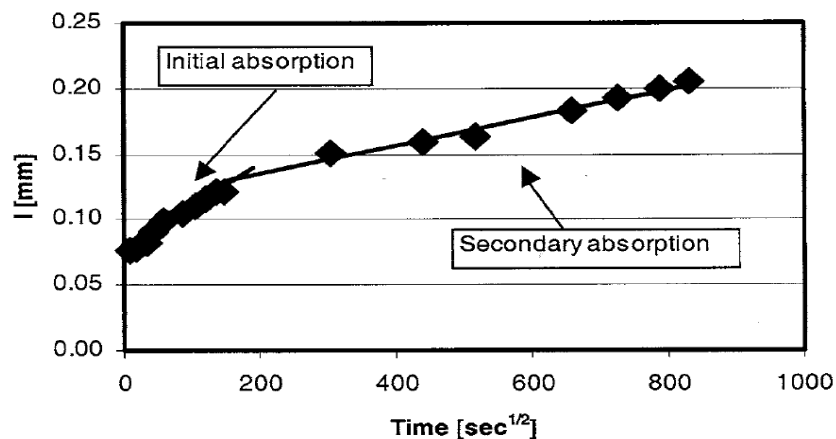


Figure 3.23 : Absorptions capillaires initiale et secondaire

3.4.2.3.2. Porosité accessible à l'eau :

L'essai de la porosité accessible à l'eau a été conduit suivant les recommandations de la norme AFPC-AFREM sur les éprouvettes $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Les échantillons, sont tout d'abord séchés à l'étuve à une température de 60°C , puis pesés jusqu'à stabilisation de leur masse (différence entre trois pesées espacées de 24 heures est $\leq 0,05\%$) pour déterminer leur masse sèche (M_s). Ensuite, les échantillons sont mis dans un dessiccateur pour faire le vide pendant 24 heures, puis saturés par immersion à mi-hauteur pendant 48 heures. Ensuite, nous avons procédé à une saturation par immersion totale pendant 24 heures (Fig. 3.24). Les échantillons sont prélevés du dessiccateur et séchés superficiellement puis pesés dans un premier temps, à l'air libre (M_{air}) et par la suite à l'eau (M_{eau}) à l'aide d'une pesée hydrostatique. Le calcul de la porosité a été fait en utilisant l'équation (Eq. 3.11).

$$P(\%) = \left(\frac{M_{air} - M_s}{M_{air} - M_{eau}} \right) * 100 \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Avec :

P(%) : La porosité en %.

M_s : Masse de l'échantillon à l'état sec (g).

M_{air} : Masse de l'échantillon à l'air libre (g).

M_{eau} : Masse de l'échantillon dans l'eau (g).



Figure 3.24. Essais de porosité accessible à l'eau.

3.4.2.4. Microstructure

3.4.2.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage est une technique capable de produire des images de haute résolution de la structure des échantillons. Cet essai consiste à introduire des échantillons du béton de liège dans un microscope électronique à balayage type HIRACHI-TM1000 qui permet des grossissements allant jusqu'à 10.000 fois (Fig. 3.25).

Dans notre étude, l'essai au MEB servira à voir de plus près l'influence des différentes cures sur les zones de transition interfaciale (ITZ) ainsi que la taille des pores à l'intérieur des échantillons de béton.



Figure 3.25 : Microscope électronique à balayage type HIRACHI-TM1000.

3.5. Conclusion

Ce chapitre décrit les méthodes expérimentales utilisées au laboratoire afin d'identifier l'influence des conditions de cure (le temps d'immersion dans l'eau). Dans sa première partie nous avons effectué une caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons de liège. Cette caractérisation a révélé la grande différence qui existe entre les propriétés des granulats minéraux et végétaux. La caractérisation nous a permis aussi de connaître que :

- Les granulats de liège utilisés présentent une répartition granulométrique similaire à celle des granulats minéraux usuels à l'exception de la classe 0/4mm qui ne comporte pratiquement pas de fines,
- Des masses volumiques qui sont inférieures au dixième de celles des minéraux
- Une absorption qui peut arriver jusqu'au double de leur masse initiale.

Dans cette partie, nous avons déterminé la composition du béton de liège ainsi que la procédure de sa fabrication (Méthode de malaxage).

La deuxième partie a été simplement destinée à la description des méthodes de mesure des paramètres physico-mécaniques et de durabilité ainsi que la microstructure des bétons produits.

Chapitre 4 :

Influence des conditions de cure sur les performances du béton de liège

4. Influence des conditions de cure sur les performances du béton de liège

4.1. Introduction

Ce chapitre est destiné à l'évaluation de l'effet des conditions de cure sur les propriétés des bétons verts à base de granulats de liège. La campagne expérimentale est réalisée sur un béton contenant, en volume de granulats, 50% de granulats de liège. Les granulats ont été incorporés sous forme de trois classes granulaires, à savoir, 0/4, 4/8 et 8/16mm. Une fois le béton formulé et mis en place dans des moules, les éprouvettes démoulées sont soumises à cinq différentes conditions de cures qui diffèrent en termes de temps d'immersion. Les temps d'immersion que nous avons fixé sont : zéro, trois (03), sept (07), quatorze (14) et 28 jours. Après l'écoulement de la période de cure, les éprouvettes de béton sont par la suite caractérisées en termes de propriétés physiques, mécaniques et de durabilité. A la fin, l'évolution des propriétés microstructurales de ces bétons a été mise en évidence.

4.2. Rappel méthodologique

Avant d'entamer l'exposition des résultats que nous avons obtenus à propos des effets des conditions de cure, nous avons cru judicieux de commencer par un rappel de la méthodologie que nous avons suivi et des différentes conditions de conservation que nous avons choisies et qui sont :

- Cure totalement sèche : un durcissement à l'air libre au laboratoire (Fig. 4.1) pendant toute la période de cure sous une température moyenne de 23,9° C et une humidité relative de 45%.
- Cure mixte immergée 3 jours dans l'eau : Immersion dans l'eau (Fig. 4.2) pendant 3 jours puis exposition aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation (28 et 56 jours).
- Cure mixte immergée 7 jours dans l'eau : Immersion dans l'eau pendant 7 jours puis exposition aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation (28 et 56 jours).
- Cure mixte immergée 14 jours dans l'eau : Immersion dans l'eau pendant 14 jours puis exposition aux conditions du laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation (28 et 56 jours).

- Cure totalement humide : immersion totale dans l'eau pendant 28 jours sous une température moyenne de l'eau de 15,5° C et puis dans le laboratoire jusqu'à l'âge de caractérisation (28 et 56 jours).



Figure 4.1. Béton soumis aux conditions du laboratoire



Figure 4.2. Conservation du béton dans l'eau (immersion totale)

Les désignations des différents bétons soumis aux conditions de cure précitées sont résumées dans le Tableau 4.1 :

Tableau 4.1. Désignation des bétons sous différentes conditions de cure

Cure	Désignation du béton
Totalement sèche	H0
Mixte immergée 3 jours dans l'eau	H3
Mixte immergée 7 jours dans l'eau	H7
Mixte immergée 14 jours dans l'eau	H14
Totalement humide	H28

4.3. Effet des conditions de cure sur les propriétés des bétons de liège

4.3.1. Propriétés physiques

4.3.1.1. Masse Volumique

La figure 4.3 illustre la variation de la masse volumique en fonction du temps d'immersion à 1 et 28 jours. Les résultats obtenus montrent clairement que seule la cure humide est à l'origine de l'accroissement de 5% de la masse volumique à l'âge de 28 jours. En revanche, pour les autres modes de cure, on remarque que plus le temps d'immersion diminue, plus la masse volumique diminue. Cette diminution a atteint son maximum pour une cure totalement sèche et est de l'ordre de 9%. Les résultats obtenus peuvent être expliqués par le fait que l'immersion dans l'eau permet aux granulats de liège d'absorber de l'eau. Cependant la conservation dans des conditions sèches conduit à la libération de l'eau contenue dans les granulats et une partie de l'eau destinée à l'hydratation du ciment.

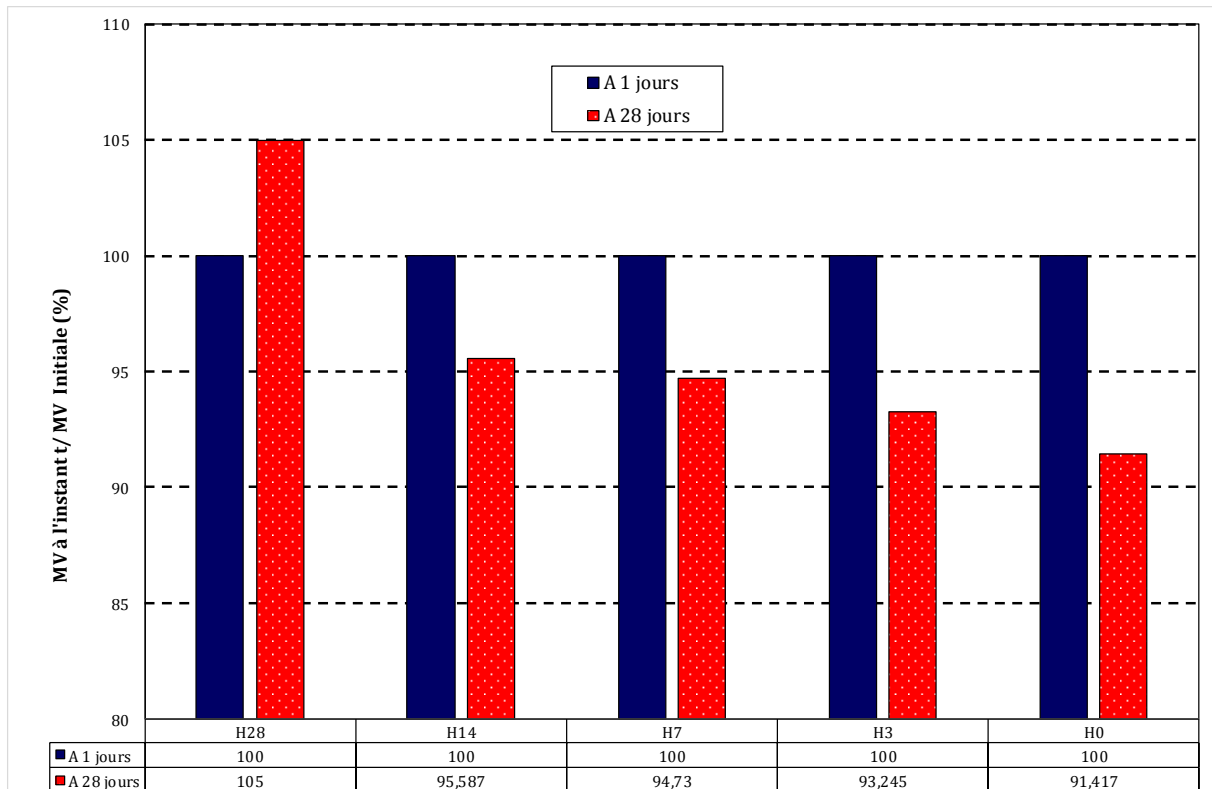


Figure 4.3. Masse volumique des bétons sous différentes conditions de cure

4.3.1.2. Vitesse ultrasonore

La variation de la vitesse ultrasonore du béton de liège en fonction de la durée d'immersion dans l'eau est indiquée dans la Fig 4.4. Les valeurs trouvées révèlent que pour une durée d'immersion inférieure ou égale à 7 jours, la vitesse ultrasonique du béton de liège augmente avec l'augmentation de la durée d'immersion. Cependant, si cette durée d'immersion dépasse le seuil des 7 jours, la vitesse ultrasonore tend à diminuer. Les valeurs obtenues ont tendance à indiquer qu'une immersion pendant 7 jours dans l'eau donne un optimum de vitesse ultrasonore. Il est aussi utile de noter que les vitesses ultrasonores obtenues varient entre 3000 et 3620 m/s, valeurs qui sont inférieures aux vitesses enregistrées dans le cas des bétons ordinaires et qui avoisinent 4500 m/s (Traore et coll., 2018).

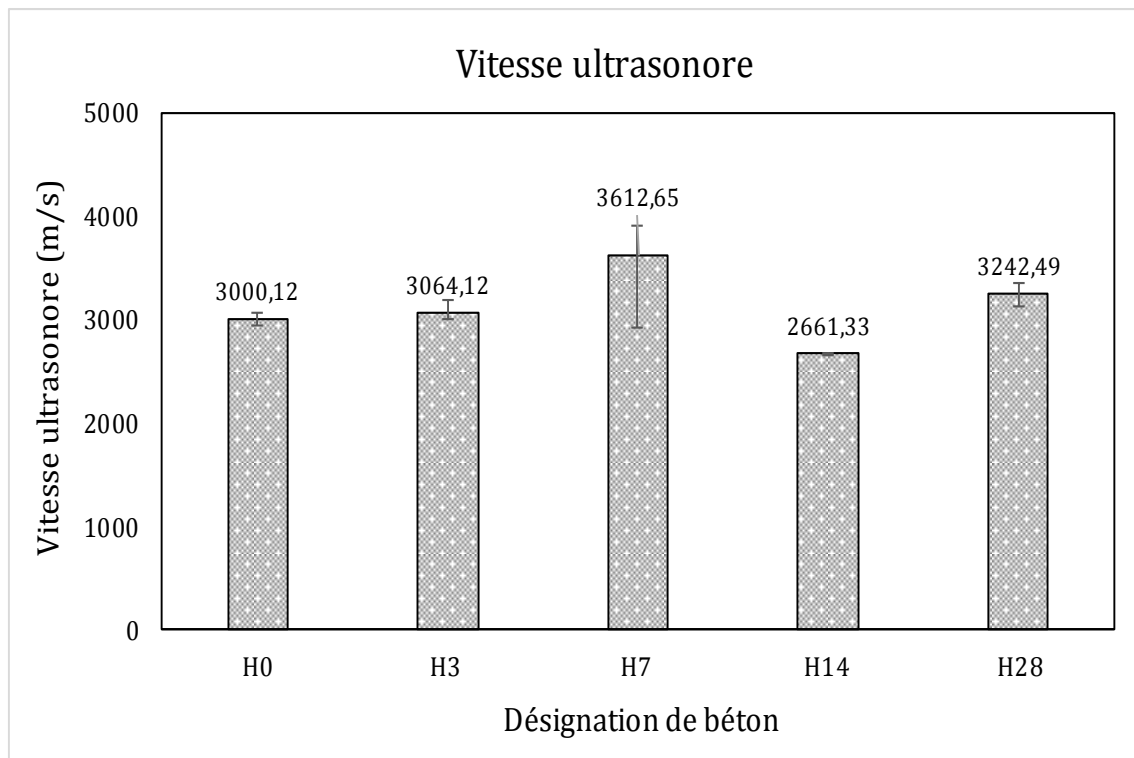


Figure 4.4. Vitesse ultrasonore des bétons de liège en modes de cure variables

4.3.1.3. Absorption par immersion totale

Les résultats de l'absorption de l'eau par immersion totale des bétons de liège sous différentes conditions de maturation sont présentés dans la Fig 4.5 et le Tableau 4.2. Les résultats obtenus montrent que, sous différentes conditions, l'évolution de l'absorption suit la même allure. Cette absorption atteint plus de 80% de sa valeur maximale dans les 4 premières heures. Après cette forte absorption, l'aptitude du béton à absorber de l'eau devient très faible et atteint la stabilité après 48 heures. Ces résultats ont montré aussi l'influence des conditions de cure sur le coefficient d'absorption des bétons de liège. On note que la valeur minimale a été enregistrée pour un temps d'immersion de 3 jours (H3) et est égale à 7,82 %. En revanche, le béton conservé pendant 28 jours à l'air libre au laboratoire a donné le plus grand coefficient d'absorption estimé à 14,98%.

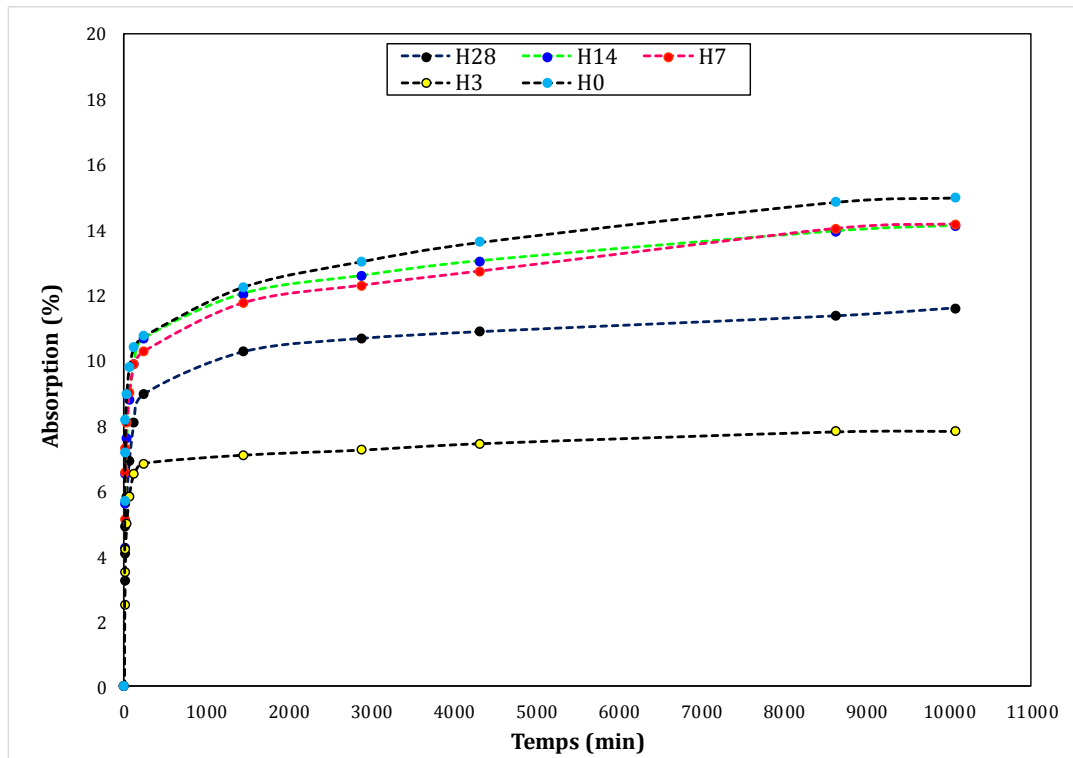


Figure 4.5. Coefficients d'absorption des bétons de liège

Tableau 4.2. Absorption par immersion en % des bétons de liège sous différentes conditions de cure.

Temps (minutes)	H28	H14	H7	H3	H0
0	0	0	0	0	0
5	3,24	4,26	5,12	2,51	5,71
10	4,10	5,61	6,56	3,52	7,17
15	4,89	6,51	7,30	4,21	8,19
30	5,81	7,62	8,10	5,00	8,97
60	6,89	8,77	8,98	5,83	9,77
120	8,07	9,90	9,86	6,53	10,40
240	8,96	10,66	10,27	6,84	10,74
1440	10,25	12,03	11,75	7,09	12,24
2880	10,66	12,58	12,29	7,25	13,03
4320	10,87	13,04	12,72	7,45	13,62
8640	11,35	13,95	14,03	7,81	14,85
10080	11,59	14,12	14,16	7,82	14,98

4.3.2. Propriétés mécaniques

4.3.2.1. Résistance à la compression

Les résultats illustrés par la figure 4.6 montrent la variation de la résistance à la compression en fonction des bétons de liège soumis à différentes conditions de cure à 28 et à 56 jours. Au regard des résultats obtenus, il est clair qu'à 28 jours, cette résistance à la compression augmente proportionnellement avec la durée d'immersion jusqu'à arriver à son optimum (2,57 MPa) après 7 jours d'immersion. Après ça, pour des temps d'immersion qui dépassent les 7 jours, nous avons remarqué une chute au niveau de cette résistance. Ces résultats ont montré aussi qu'à cette âge (28 jours), la différence obtenue entre cette valeur maximale et la valeur minimale obtenue pour une cure totalement sèche était de l'ordre de 11.2%.

Ces résultats sont probablement dû à l'effet qu'une immersion de 7 jours dans l'eau a permis aux granulats de liège de capter la quantité d'eau qui leur offre la compressibilité minimale. Néanmoins, une période d'immersion différente à 7 jours conduit à l'augmentation de leur compressibilité, ce qui se traduit par la baisse de la résistance à la compression.

Contrairement aux résultats obtenus à 28 jours, les résultats obtenus à 56 jours, ont montré que la résistance à la compression maximale a été obtenue pour une cure humide avec une valeur de 6,05 MPa. Les résultats obtenus ont confirmé ainsi que la résistance à la compression minimale est toujours obtenue pour une cure sèche. Il est très important de noter que l'augmentation de cette résistance à la compression en allant de 28 à 56 jours est de 68, 143, 234 et 158% pour des temps d'immersion de 0, 3, 14 et 28 jours, respectivement. En revanche, la plus faible augmentation a été enregistrée pour un temps d'immersion de 7 jours et était de 58%. Les augmentations obtenues peuvent être dus au fait que les granulats de liège contiennent des composés chimiques (tanins, polyphénols et flavonoïdes) qui ont une grande capacité inhibitrice, ce qui peut retarder l'hydratation du ciment et par conséquent mener à une augmentation remarquable des résistances après 28 jours.

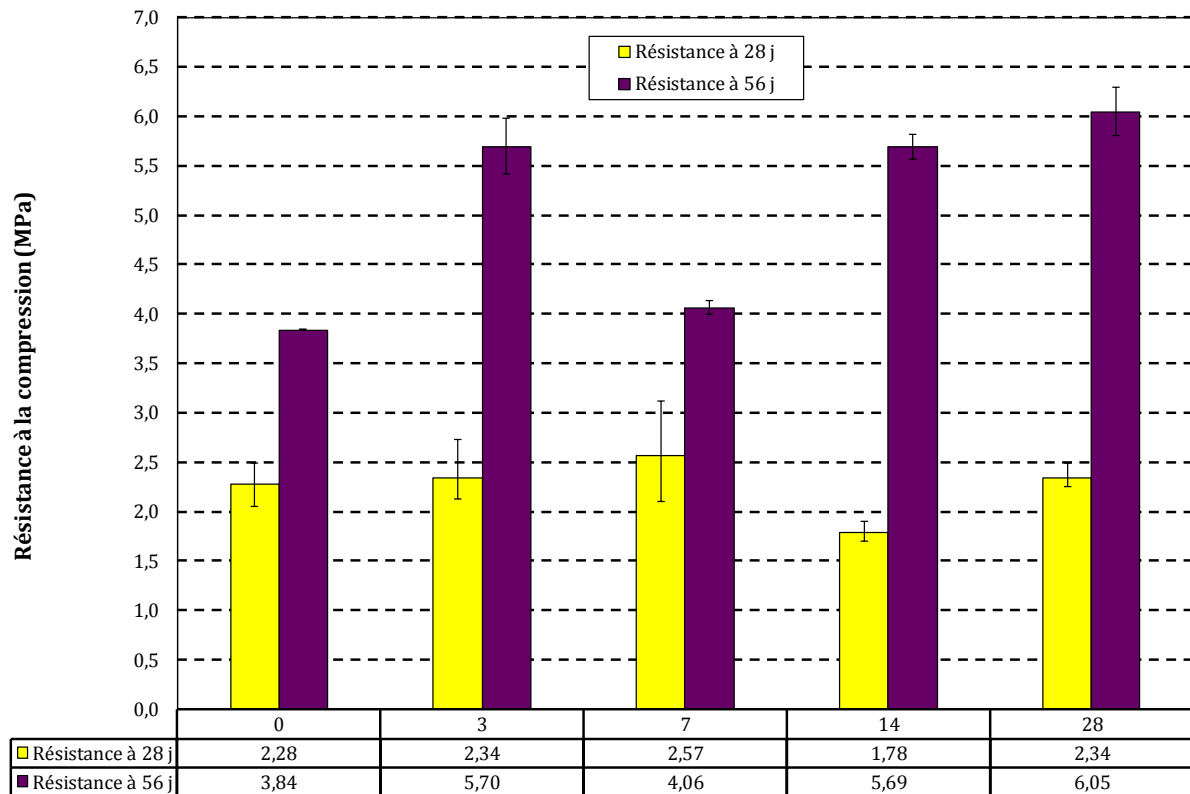


Figure 4.6. Résistance à la compression des bétons à 28 et 56 jours sous différentes conditions de cure

4.3.2.2. Résistance à la flexion

La figure 4.7 présente la variation des résistances à la flexion du béton de liège à 28 jours en fonction des conditions de maturation préconisées. Comme on peut le voir, il existe une relation quasi linéaire entre la résistance à la flexion et la durée d'immersion dans l'eau. Les résultats montrent que plus la durée d'immersion augmente, plus la résistance à la flexion du béton augmente aussi. En effet, la résistance à la flexion est passée de 2,03 MPa pour une cure sèche pour atteindre la valeur de 2,60 MPa pour une cure humide, ce qui correspond à une augmentation de 28%. Ces résultats peuvent être interprétés par le fait que contrairement à une cure totalement sèche, une cure partiellement ou totalement humide permet de conserver l'eau destinée à d'hydratation du ciment, ce qui conduit à un meilleur durcissement de la matrice cimentaire et une plus grande adhérence entre la matrice et les différents granulats.

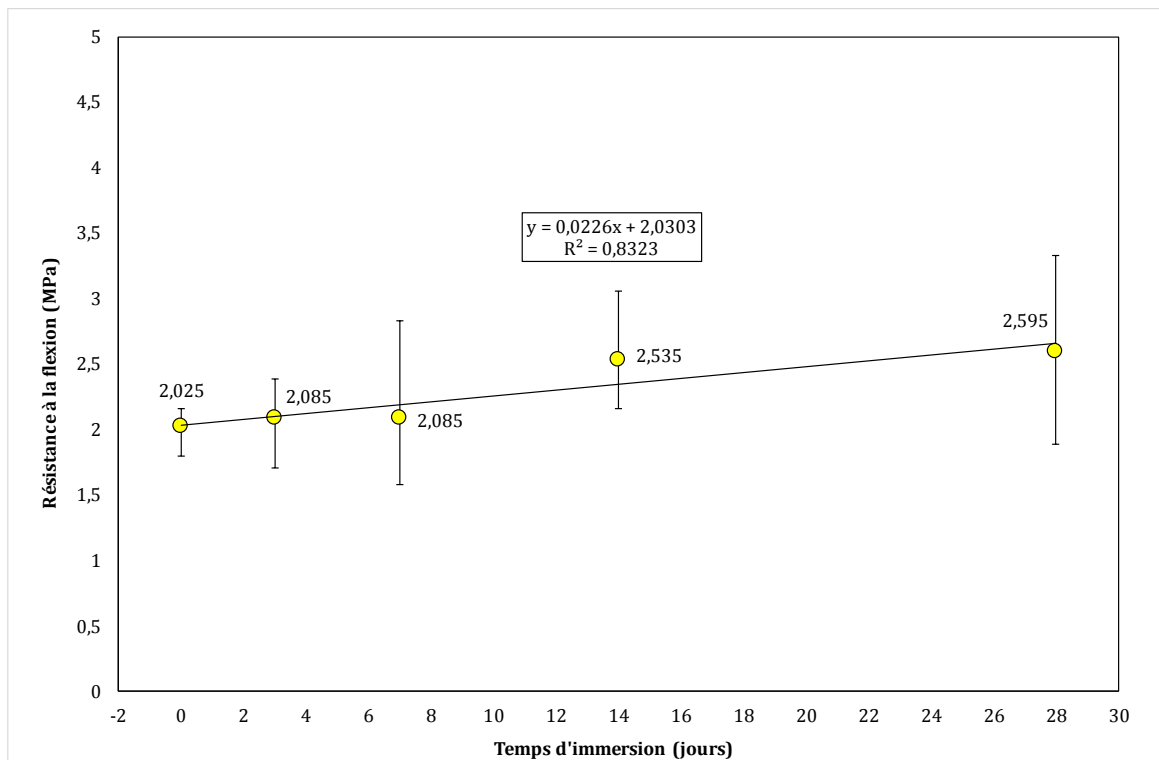


Figure 4.7. Résistance à la flexion du béton à 28 jours sous conditions de conservation variables

4.3.2.3. Module d'élasticité dynamique

La figure 4.8 présente les résultats du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la compression à 28 jours des bétons de liège sous différentes conditions de cure. Les résultats montrent qu'il existe une relation proportionnelle entre le module d'élasticité et la résistance à la compression. Cette relation est de forme exponentielle. Quant aux valeurs obtenues pour le module d'élasticité, elles oscillent entre 10 et 19 GPa. Notons que la valeur maximale a été obtenue pour une immersion pendant 7 jours dans l'eau.

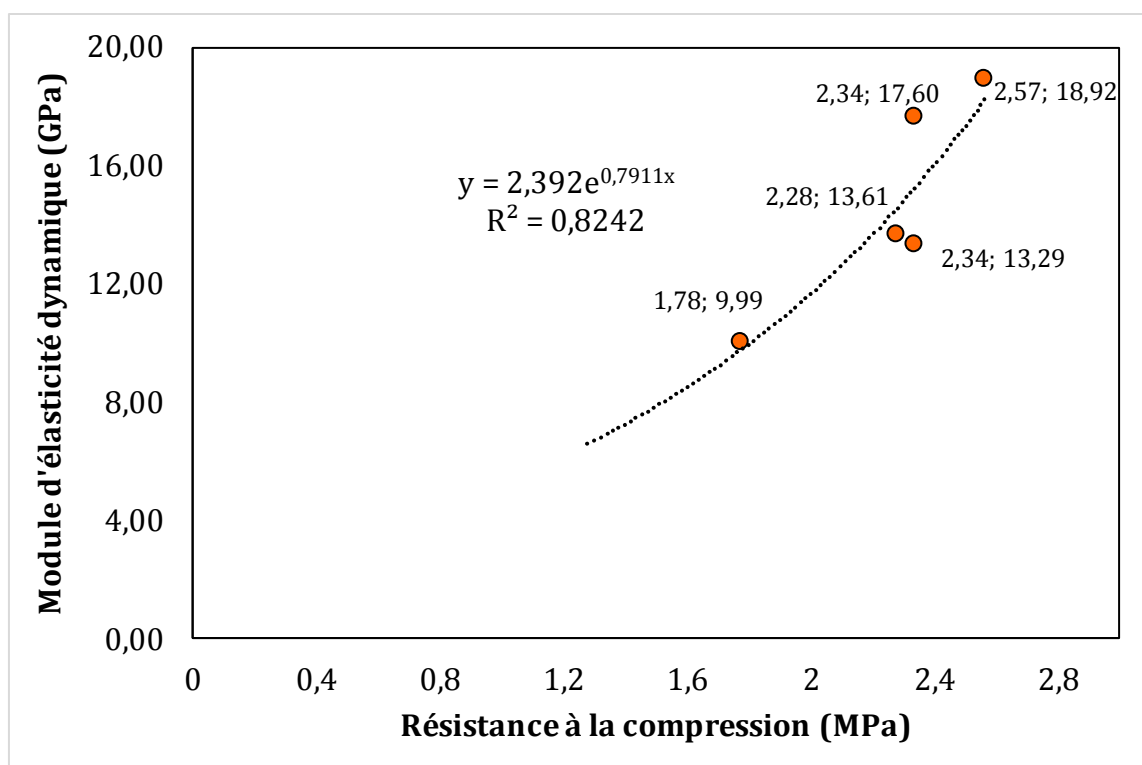


Figure 4.8. Variation du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la compression

4.3.2.4. Courbes de capacité

Les courbes de capacités (contrainte-déformation) des bétons de liège soumis à différentes conditions de cures sont illustrées par la figure 4.9. Comme le montre cette figure, les courbes des différents bétons commencent par un segment linéairement progressif qui définit la partie élastique de ces courbes de capacité. On peut remarquer aussi que bien que la contrainte d'élasticité soit différente, les déformations qui leur correspondent sont pratiquement égales, ce qui se traduit par une différence au niveau du module d'Young. Après cette partie élastique, les bétons conservés pendant 7 et 28 jours dans l'eau ont montré une chute brutale de la contrainte déclenchant ainsi un phénomène de rupture et un comportement fragile de ces bétons. En revanche, les bétons qui ont été conservés pendant 3, 14 et jours dans l'eau ont montré l'apparition d'un palier plastique après avoir atteint leurs limites élastiques. Les résultats obtenus nous permettent de dire que les bétons H7 et H28 conservés à 7 et 28 jours dans l'eau, respectivement, ont un comportement fragile, tandis que ceux conservés à 3 et 14 jours présentent un comportement ductile, très apprécié dans le domaine du génie parasismique.

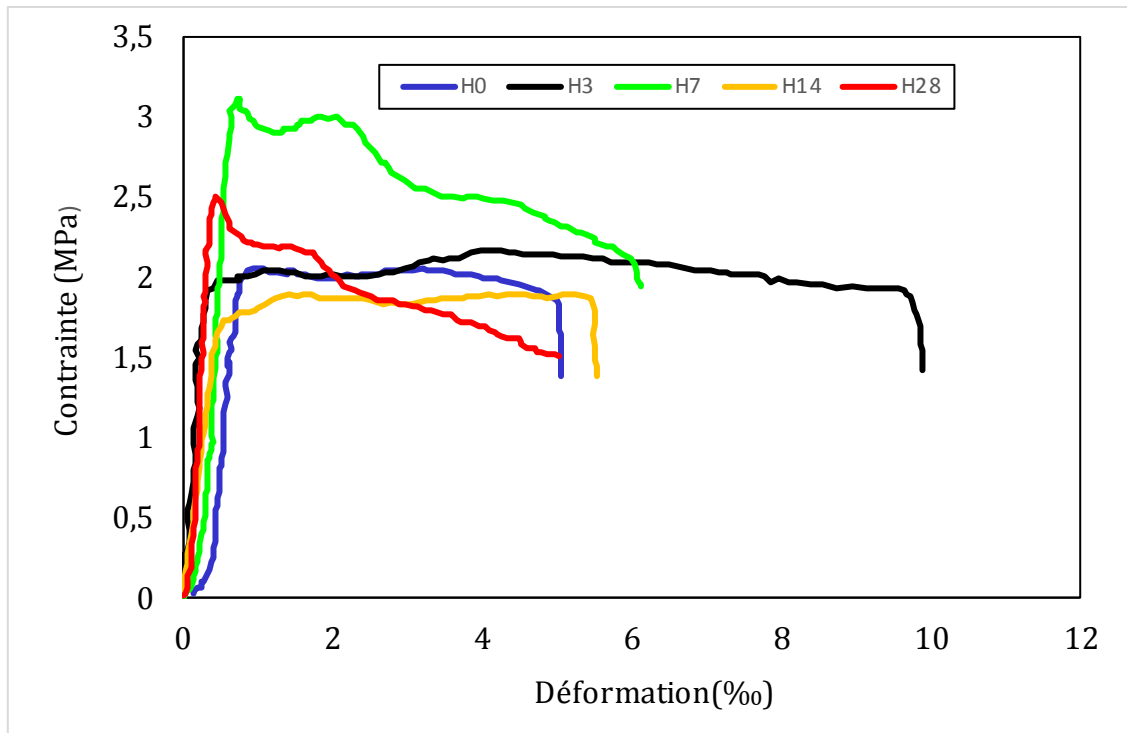


Figure 4.9. Courbes de capacités des différents bétons de liège

4.3.3. Paramètres de durabilité

4.3.3.1. Porosité

La variation des résultats de porosité en fonctions des conditions de cure pour le béton de liège sont illustrés par la figure 4.10. Ces résultats montrent clairement que cette porosité est inversement proportionnelle à la durée d'immersion du béton dans l'eau. On peut aussi constater qu'en passant d'une cure humide (H28) à une cure sèche (H0), la porosité du béton de liège est passée de 22,67 à 26,76%, indiquant une augmentation de 18%. Pour les autres temps d'immersion, nous avons enregistré des hausses de 1.1, 4.2 et 6.1% pour les bétons immergés respectivement pendant 3, 7, et 14 jours dans l'eau.

Ces résultats peuvent être interprétés par le fait que la conservation à l'air libre génère le séchage de l'eau interstitielle, responsable dans sa migration de l'intérieur de l'éprouvette vers l'extérieur, de la production de canalicules augmentant ainsi la porosité du milieu.

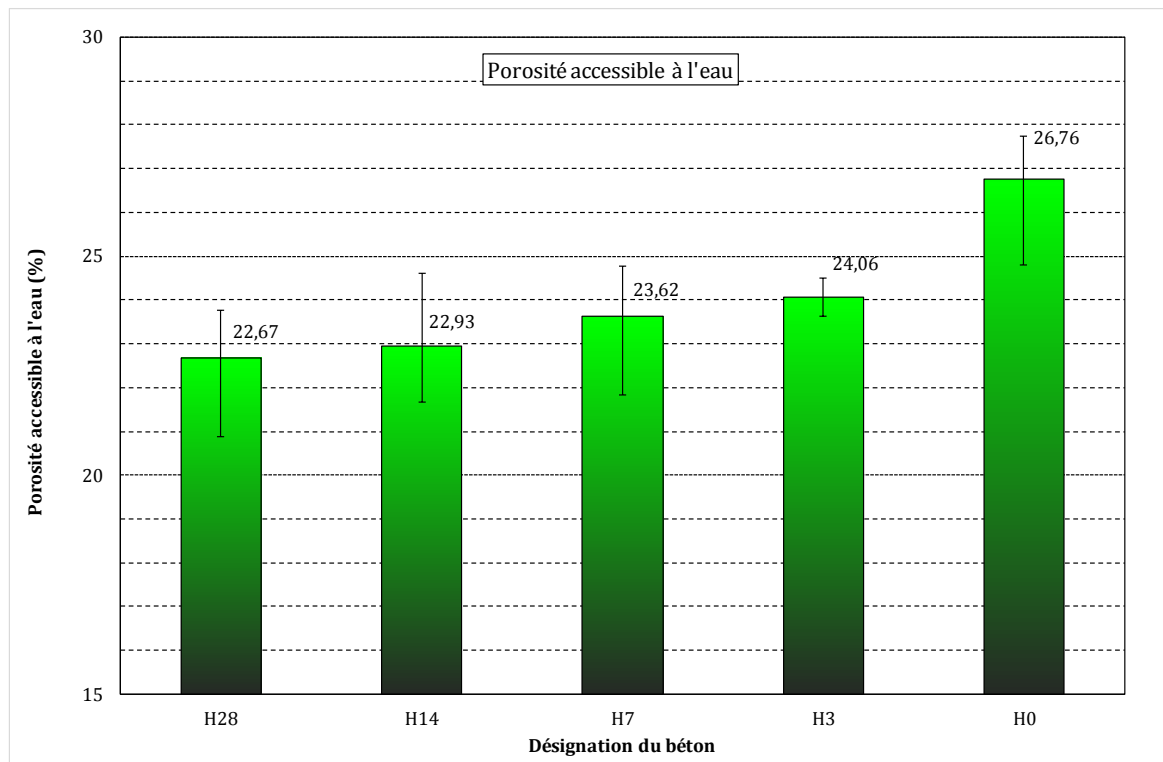


Figure 4.10. Porosité des bétons de liège soumis à des conditions de maturation différentes

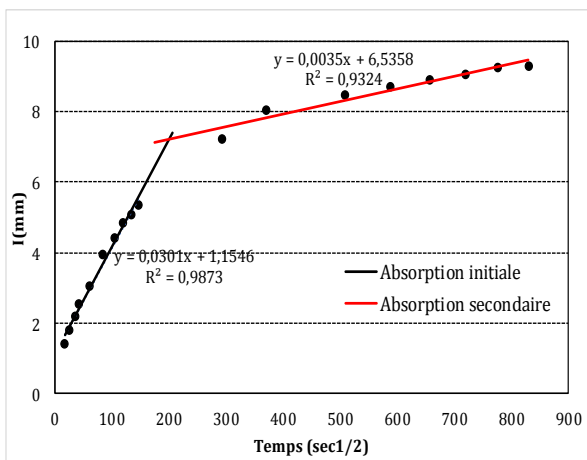
4.3.3.2. Absorption capillaire

Les figures 4.11.a, b, c, d et e ainsi que le Tableau 4.3 illustrent les résultats des absorptions capillaires des bétons de liège sous conditions de cure variables. Un exemple de valeurs qui nous ont permis de tracer ces courbes est donnée dans l'annexe 1. Chaque courbe tracée est caractérisée par deux segments qui représentent l'absorption initiale et l'absorption secondaire. L'absorption initiale est définie comme étant la pente du segment qui s'étale sur les six (06) premières heures tandis que l'absorption secondaire est la pente du segment qui va du premier jour au huitième. Pour toutes les courbes obtenues, l'allure générale est la même pour tous les bétons. En effet, la cinétique d'absorption des bétons pendant les premières heures où le matériau est avide en eau est toujours supérieure à l'absorption secondaire. En général, la littérature explique ce phénomène par le fait que l'absorption initiale correspond au remplissage des pores de grandes tailles tandis que l'absorption secondaire correspond plutôt au remplissage des pores de tailles plus petite.

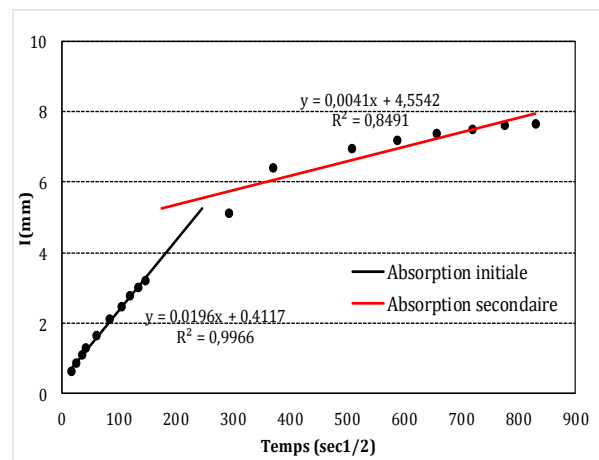
Quant à l'effet des conditions de cure, l'absorption initiale maximale a été obtenue pour le béton H0 conservé dans le laboratoire ; elle est de $0,0301\text{mm/s}^{0.5}$. Cette absorption initiale a montré une diminution de 34.9, 15.6, 18.9 et 35.9% quand la durée d'immersion est passée respectivement de 0 à 3, 7, 14 et 28 jours. Ces résultats peuvent être expliqués dans un premier temps par le fait que l'immersion dans l'eau permet une bonne hydratation du ciment, ce qui

créée de nouveaux composés chimiques pouvant réduire structure des pores, notamment les plus grands d'entre eux à l'intérieur du béton.

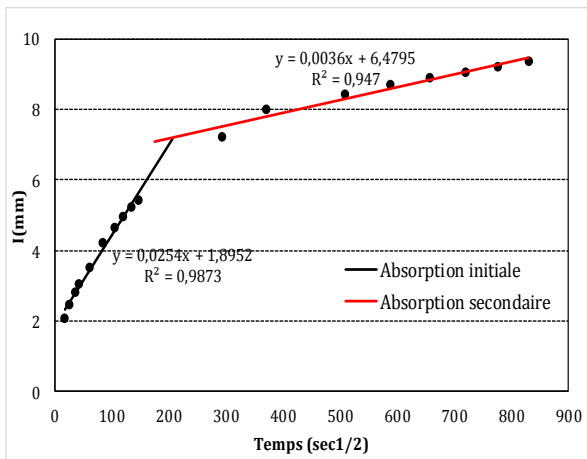
En revanche les résultats de l'absorption secondaire, obtenus pour les différentes conditions de cure ne présentent pas de grandes différences. Ces absorptions varient seulement entre 0,0035 et 0,0041 mm/s^{0.5}. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que pendant l'absorption initiale, la majeure partie des pores de grands diamètres présents dans le béton sont remplis d'eau, par conséquent, la cinétique du remplissage des vides de petites tailles se fait de manière lente.



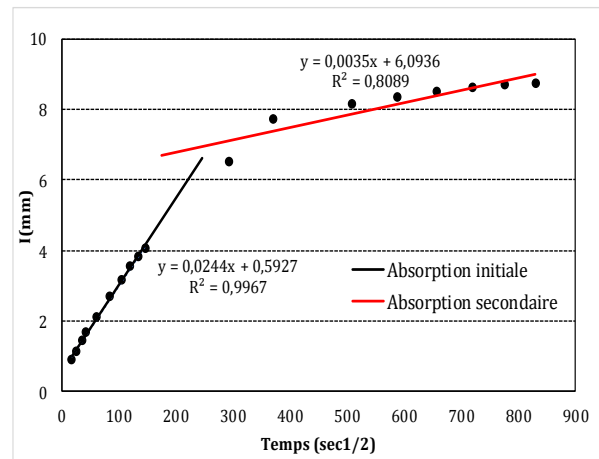
a- H0



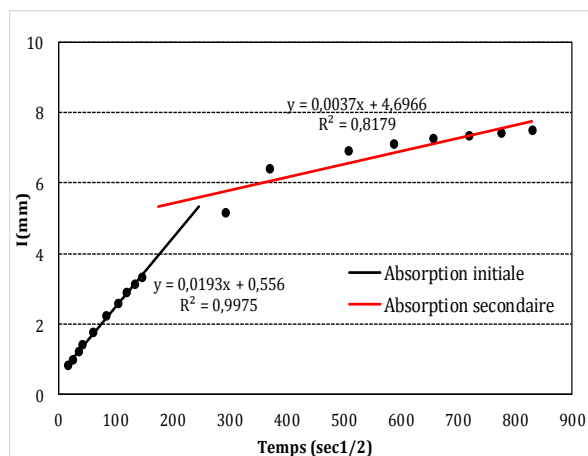
b- H3



c- H7



d- H14



e- H28

Figure 4.11. Courbes d'absorptions capillaires des bétons de liège**Tableau 4.2.** Coefficients d'absorptions capillaires initiales et secondaires des différents bétons.

	H28	H14	H7	H3	H0
Absorption initiale	0,0193	0,0244	0,0254	0,0196	0,0301
Absorption secondaire	0,0037	0,0035	0,0036	0,0041	0,0035

4.3.4. Microstructure

Afin de mieux comprendre les phénomènes qui ont conduit aux résultats présentés précédemment, des investigations à l'aide de Microscopie Electronique à Balayage ont été aussi effectuées sur les bétons de liège fabriqués et conservés dans différentes conditions de cure. Les investigations ont porté principalement sur l'évaluation de la nature de l'interface (ITZ) entre les granulats de liège et la matrice cimentaire (dense ou poreuse), les nouveaux composés développés au niveau de cette interface ainsi que le développement des pores et leurs tailles. Les résultats issus de cette investigation sont présentés dans les Figures 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16. Au regard de ces résultats, on peut remarquer clairement l'effet des conditions de cure sur la microstructure du béton de liège. Ces figures montrent aussi une grande cohérence avec les résultats obtenus pour les propriétés physico-mécaniques. D'une part, les bétons H0, H3 et H14 ont montré des interfaces de transition poreuses, tandis que les bétons H7 et H28 ont révélé des interfaces denses. D'autre part, contrairement aux interfaces des bétons H0, H3 et H14 qui

ont montré le développement de pores pouvant arriver à 60 μm , les résultats ont aussi montré le développement de nouveaux composés chimiques à base de calcaire au niveau des interfaces des bétons H7 et 28. Il convient aussi de noter qu'en passant d'une cure sèche à une cure immergée à 3 jours dans l'eau, la taille des pores est passée de 60 μm à 30 μm seulement, ce qui démontre une nouvelle fois l'effet de l'immersion dans l'eau.

De manière générale, les résultats au MEB, peuvent confirmer ceux obtenus au niveau des résistances mécaniques qui ont révélé que les plus grandes résistances ont été obtenues pour les bétons ayant été partiellement ou totalement immergés dans l'eau, toutefois la résistance minimale a été obtenue pour une immersion dans l'eau de 14 jours, résultat qui paraît difficile à interpréter sans avoir recours au MEB.

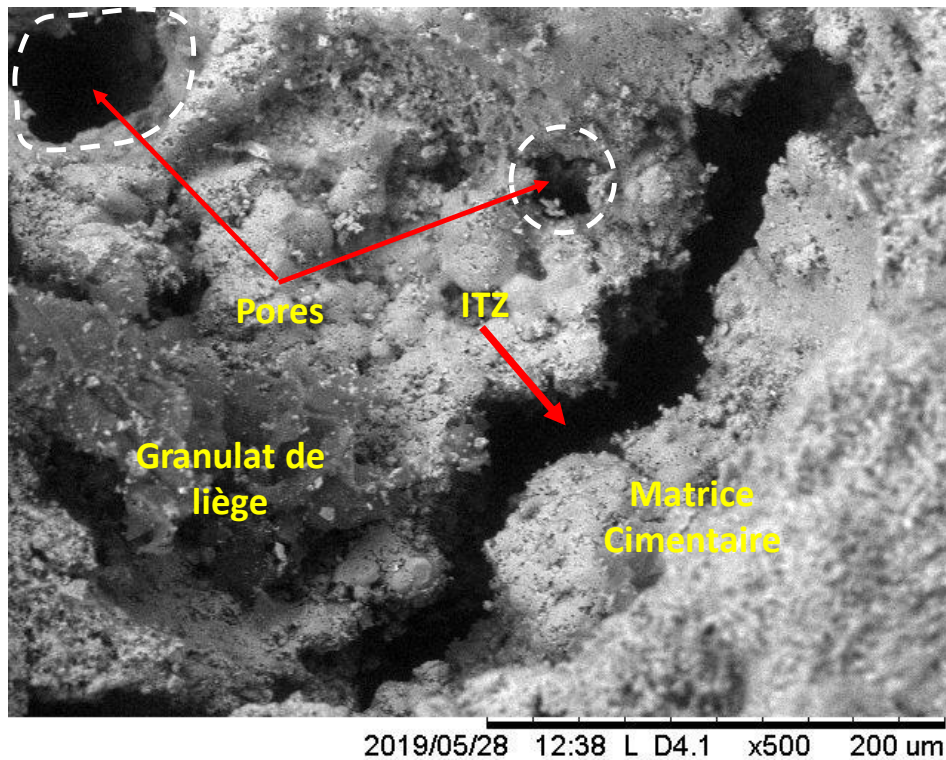


Figure 4.12. Microstructure du béton H0 conservé à 28 jours aux conditions du laboratoire

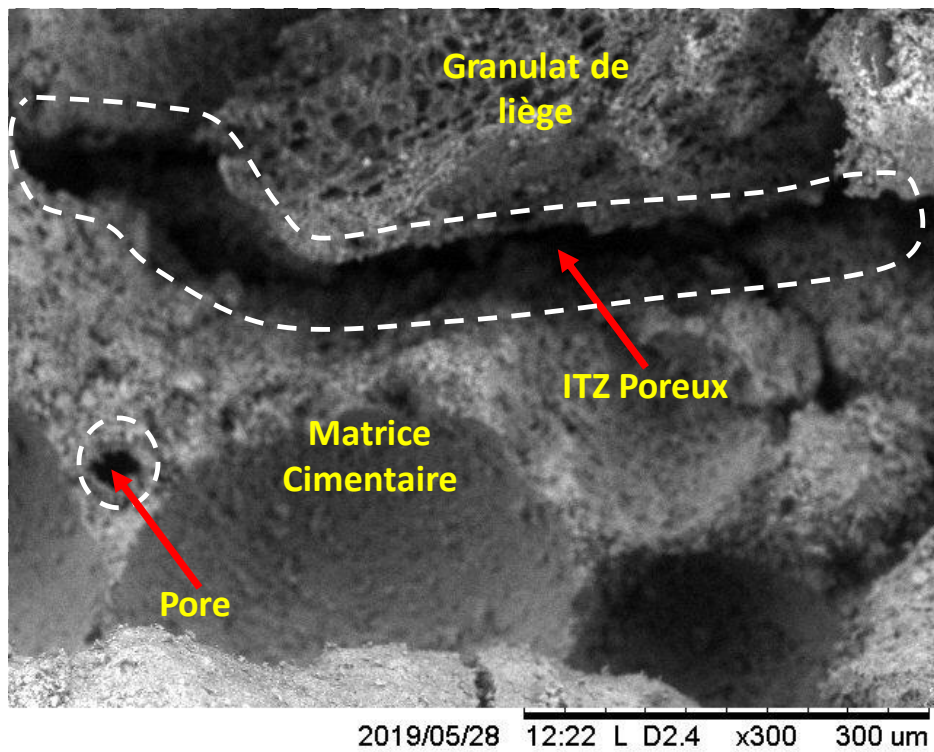


Figure 4.13. Microstructure du béton H3 immergé 3 jours dans l'eau

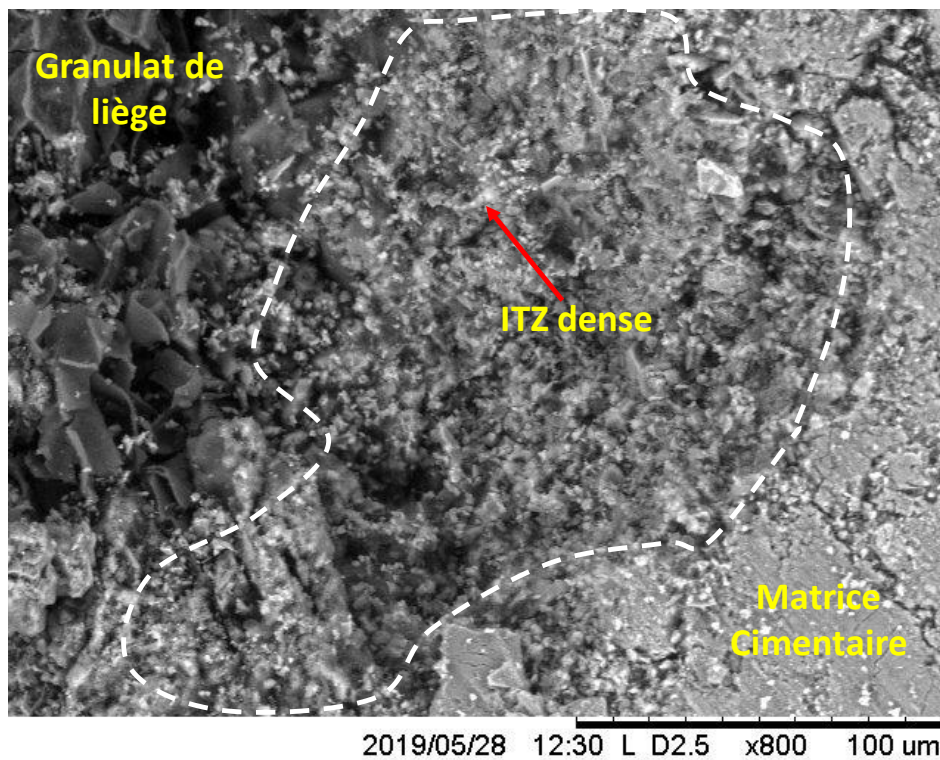


Figure 4.14. Microstructure du béton H7 immergé 7 jours dans l'eau

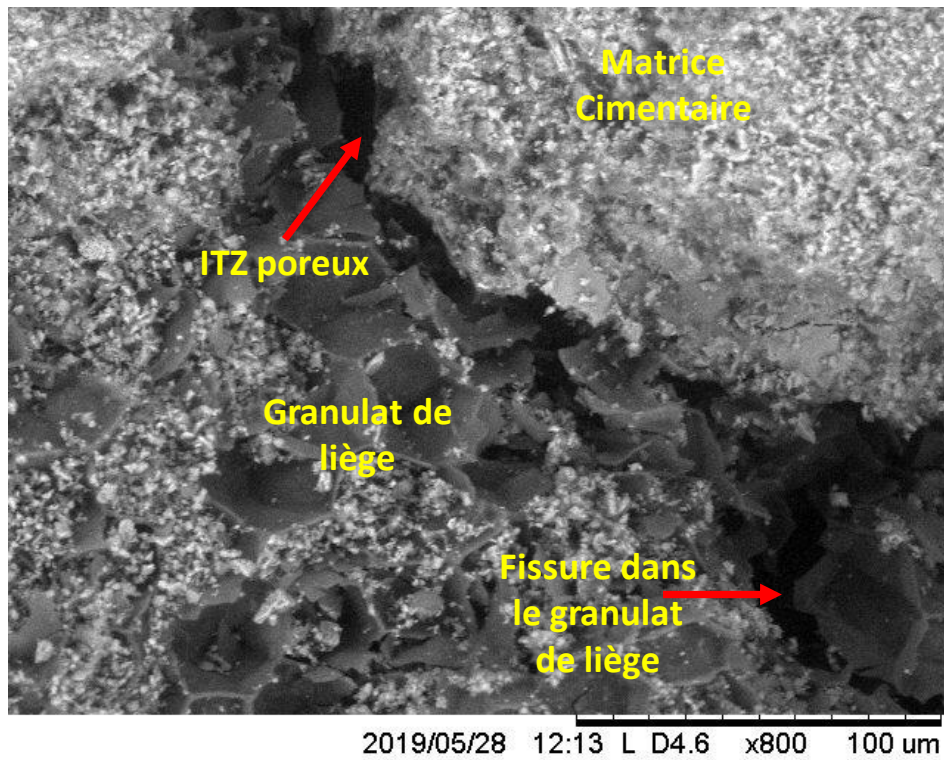


Figure 4.15. Microstructure du béton H14 immergé 14 jours dans l'eau

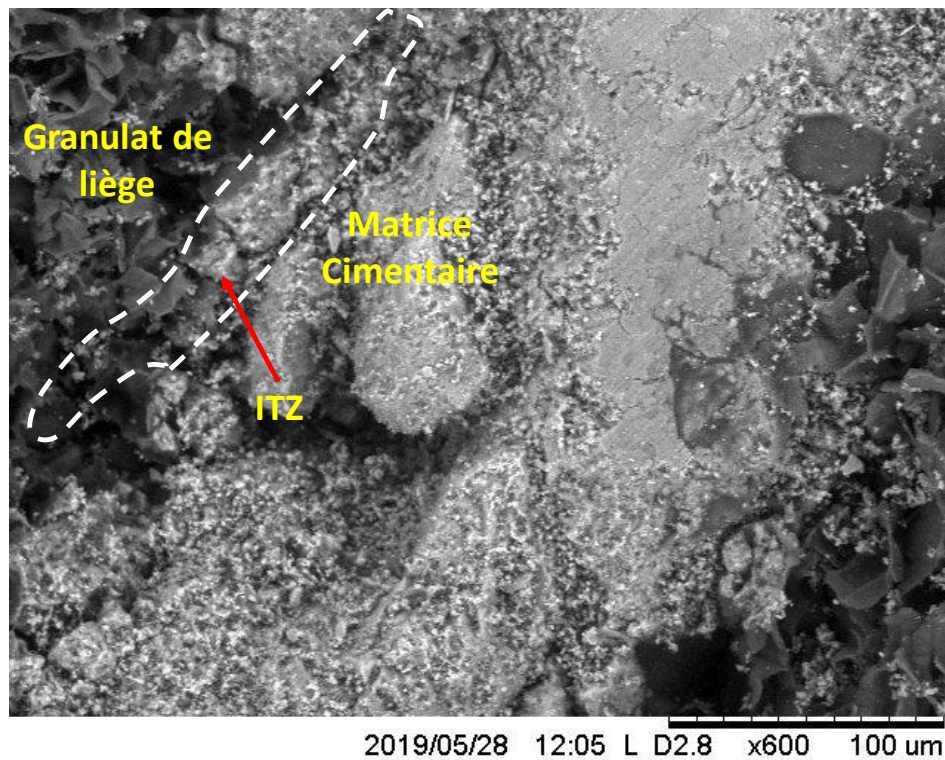


Figure 4.16. Microstructure du béton H28 immergé 28 jours dans l'eau

4.4. Conclusion

En s'appuyant sur un travail purement expérimental, la détermination des propriétés physiques, mécaniques et de durabilité ainsi que l'investigation de la microstructure des bétons de liège (contenant 50% de liège) sous conditions de cures différentes a été réalisée. Les résultats obtenus ont montré l'impact du temps d'immersion dans l'eau sur les propriétés des bétons fabriqués.

Une cure totalement humide conduit à une augmentation de la masse volumique à 28 jours, tandis que, l'exposition à une cure mixte ou sèche diminue cette masse volumique.

Les résistances mécaniques obtenues pour des cures mixtes ou humide dépassent celles obtenues pour une cure sèche.

En utilisant des conditions de maturation partiellement ou totalement humides, la durabilité des bétons de liège est fortement améliorée.

Les bétons H0, H3 et H14 présentent des comportements ductiles et donc une performance parasismiques encourageante, tandis que H7 et H28 possèdent une faible ductilité et restent dans la gamme des bétons fragiles.

Les investigations réalisées à l'aide du MEB nous ont permis de mieux comprendre les phénomènes qui ont été développées au niveau de la microstructure des bétons. Les interfaces particule végétale-matrice cimentaire des bétons conservés à des conditions totalement ou partiellement humide ont montré de meilleures performances (développement de nouveaux composés et taille des pores petite) que celles des bétons exposés à une cure sèche (interface fortement poreuse).

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail à caractère expérimental, l'évaluation de l'effet des conditions de cure sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructurales ainsi que de durabilité du béton de liège a été réalisée. Le travail a été effectué sur des bétons contenant, en volume de granulats, 50 % de granulats de liège. Les bétons fabriqués ont été exposés à cinq conditions de cure différentes en termes de temps d'immersion dans l'eau. A l'issue du travail, les principales conclusions tirées sont les suivantes :

- L'exposition du béton à une cure humide engendre une augmentation de la masse volumique du béton, contrairement aux cures mixtes où sèche qui tendent à diminuer cette masse volumique.
- La résistance à la compression optimale à 28 jours a été obtenue pour une durée d'immersion de 7 jours et a atteint 2,57 MPa. En revanche, à 56 jours la valeur maximale est obtenue pour une cure humide. Cette résistance a montré une augmentation qui peut aller jusqu'à 234% en allant de 28 à 56 jours.
- La résistance à la flexion, la porosité ainsi que l'absorption de ces bétons sont proportionnellement liées au temps d'immersion du béton dans l'eau, alors que la plupart des travaux consultés dans la bibliographie réalisée sur les bétons verts négligent l'effet de ce paramètre.
- En utilisant des conditions de cure sèche, humide pendant 3 et 14 jours, la ductilité des bétons est fortement améliorée. En revanche, la conservation du béton de liège dans une cure totalement humide ou immergé 7 jours dans l'eau a produit des bétons appartenant à la gamme des bétons fragiles.

On envisage pour la suite de ce travail de recherche, un certain nombre de perspectives qui se résument dans ce qui suit :

- Evaluation de l'effet de la température et de l'hygrométrie sur les propriétés des bétons liège.
- Extension de l'évaluation de l'effet du temps d'immersion sur d'autres bétons contenant des pourcentages de liège différents.
- Evaluation de l'effet de l'état hydrique du liège sur les propriétés des bétons.

Annexe 1

Dans cette annexe nous montrons un exemple de calcul de la capillarité à partir des mesures de masses des échantillons en fonctions du temps :

La capillarité est calculée en utilisant l'éq A.1 :

$$C(t) = \frac{M_t - M_s}{A} * 100 \quad (\text{A.1})$$

Où :

C ou I : Capillarité, donné en mm.

M_s : Masse sèche des échantillons [mg].

M_t : Masse des échantillons humides à l'instant t [s].

A : la surface de l'échantillon en contact avec l'eau [m²].

Exemple de calcul :

Pour un temps égal à 300 secondes, la capillarité relative à l'essai 1 (C1) et calculée comme suit :

$$M_s = 844,7 * 10^3 \text{ mg}$$

$$M_t = 850,8 * 10^3 \text{ mg}$$

$$A = 100 * 100 = 10000 \text{ mm}^2$$

Donc

$$C1 = \frac{850,8 - 844,7}{10000} * 10^3 = 0,61 \text{ mm}$$

En procédant de la même manière, cette capillarité est calculée pour différentes périodes. Le Tableau A.1 montre à titre d'exemple les valeurs que nous avons obtenu et qui a servi pour tracer la courbe de capillarité pour le béton H28.

Tableau A.1. Calcul des valeurs de capillarité C à partir de suivi des masses

Temps (s0.5)	Temps (s)	Temps (min)	Essai 1(g)	Essai 2(g)	Essai 3(g)	C1(mm)	C2(mm)	C3(mm)	Moyenne
0,00	0,00	0,00	844,70	784,10	719,70	0,00	0,00	0,00	
17,32	300,00	5,00	850,80	792,60	729,90	0,61	0,85	1,02	0,83
24,49	600,00	10,00	852,60	794,20	731,50	0,79	1,01	1,18	0,99
34,64	1200,00	20,00	854,50	796,70	733,80	0,98	1,26	1,41	1,22
42,43	1800,00	30,00	856,40	798,70	736,00	1,17	1,46	1,63	1,42
60,00	3600,00	60,00	860,00	802,60	738,80	1,53	1,85	1,91	1,76
84,85	7200,00	120,00	864,90	807,40	743,70	2,02	2,33	2,40	2,25
103,92	10800,00	180,00	868,20	811,30	746,80	2,35	2,72	2,71	2,59
120,00	14400,00	240,00	871,20	814,60	749,80	2,65	3,05	3,01	2,90
134,16	18000,00	300,00	873,40	817,10	751,70	2,87	3,30	3,20	3,12
146,97	21600,00	360,00	875,40	819,40	753,60	3,07	3,53	3,39	3,33
293,94	86400,00	1440,00	895,10	838,70	769,50	5,04	5,46	4,98	5,16
369,86	136800,00	2280,00	907,10	852,20	781,00	6,24	6,81	6,13	6,39
509,12	259200,00	4320,00	911,90	857,50	786,10	6,72	7,34	6,64	6,90
587,88	345600,00	5760,00	913,90	859,80	788,20	6,92	7,57	6,85	7,11
657,27	432000,00	7200,00	915,50	861,60	789,50	7,08	7,75	6,98	7,27
720,00	518400,00	8640,00	915,90	862,30	790,70	7,12	7,82	7,10	7,35
777,69	604800,00	10080,00	916,50	863,50	791,70	7,18	7,94	7,20	7,44
831,38	691200,00	11520,00	917,30	863,10	792,50	7,26	7,90	7,28	7,48

Références bibliographiques

Articles et communications

- Abdel-Hay, A. S. (2017).** Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions. *HBRC Journal*, 13(3), 271-276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.07.001>
- Achour, A., Ghomari, F., & Belayachi, N. (2017).** Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(17), 1938-1962. doi: 10.1080/01694243.2017.1290572
- Amziane, S., Nozahic, V., & Sonebi, M. (2017).** Water Absorption of Plant Aggregate. 23, 73-90. doi: 10.1007/978-94-024-1031-0_3
- Andiç-Çakır, Ö., & Hızal, S. (2012).** Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 34, 575-583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.088>
- Barnat-Hunek, D., Siddique, R., & Łagód, G. (2017).** Properties of hydrophobised lightweight mortars with expanded cork. *Construction and Building Materials*, 155, 15-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.052>
- 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*, 1-16. doi: 10.1080/19648189.2017.1397551
- Brás, A., Leal, M., & Faria, P. (2013).** Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*, 49, 315-327. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006>
- Garavaglia, V., Besacier C. (2012).** *State of Mediterranean Forests. Fête de liege 14-15 juin. Vives.*
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Ali, B., & Mermerdaş, K. (2013).** Strength and transport properties of steam cured and water cured lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 49, 417-424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.042>
- Gil, L. (2009).** Cork Composites: A Review. *Materials*, 2(3), 776-789. doi: 10.3390/ma2030776
- Gil, L. (2015).** New Cork-Based Materials and Applications. [Review]. *Materials (Basel)*, 8(2), 625-637. doi: 10.3390/ma8020625

- Ismail, S., Kwan, W. H., & Ramli, M. (2017).** Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 155, 296-306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.076>
- Karade, S. R. (2016).** Potential of Cork Cement Composite as a Thermal Insulation Material. *Key Engineering Materials*, 666, 17-29. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.666.17
- Latroch, N., Benosman, A. S., Bouhamou, N.-E., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2018).** Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride. *Construction and Building Materials*, 175, 77-87. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.173
- Ling, I. H., & Teo, D. C. L. (2011).** Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3648-3655. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.061>
- Liu, B., Luo, G., & Xie, Y. (2018).** Effect of curing conditions on the permeability of concrete with high volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 167, 359-371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.190>
- M. Gonzalez De la Cotera (1982).** Morteros ligeros de cascara de arroz. in IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- Magniont, C. (2010).** *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. Thèse doctorat. Université de TOULOUSE III - PAUL SABATIER, France, 343 pages.
- Manuel, C. (2012).** La Forêt de Chêne-liège du Portugal AMORIM ISOLAMENTOS, S.A. Fête de liege 14-15 juin. Vives.
- Moreira, A., António, J., & Tadeu, A. (2014).** Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. *Cement and Concrete Composites*, 49, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012>
- Nguyen, L. H., Beaucour, A. L., Ortola, S., & Noumowé, A. (2017).** Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures. *Construction and Building Materials*, 151, 720-731. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.087>
- Panesar, D. K., & Shindman, B. (2012).** The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 982-992. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>

- 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.
- Raheem A.A., Soyngbe A.A., Emenike A.J (2013).** Effect of Curing Methods on Density and Compressive Strength of Concrete. *International Journal of Applied Science and Technology*. 3 (4), 55-64.
- Salih, M. A., Farzadnia, N., Abang Ali, A. A., & Demirboga, R. (2015).** Effect of different curing temperatures on alkali activated palm oil fuel ash paste. *Construction and Building Materials*, 94, 116-125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.052>
- Sellami, A., Merzoud, M., & Amziane, S. (2013).** Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. *Construction and Building Materials*, 47, 1117-1124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>.
- 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*, 50(6), 345-365. doi: 10.1179/174328005x41168
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., & Sánchez de Juan, M. (2013).** Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054-1065. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Cimentada, A. I., & Medina, C. (2018).** Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 618-625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.009>.
- Traore, Y. B., Messan, A., Hannawi, K., Gerard, J., Prince, W., & Tsobnang, F. (2018).** Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 452-460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.155
- Zheng, X., Ji, T., Easa, S. M., & Ye, Y. (2018).** Evaluating feasibility of using sea water curing for green artificial reef concrete. *Construction and Building Materials*, 187, 545-552. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.140>
- Ziregue, A., Khenfer, M. M., Quéneudec-t’Kint, M., & Montrelay, N. (2016).** Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(9), 934-946. doi: 10.1080/01694243.2015.1129882

Thèses et mémoires

- Cérézo, V. (2005).** *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique.* Thèse de doctorat. L'Ecole National des travaux publics de L'Etat, Lyon, France, 225 pages.
- Chabannes, M. (2015).** *Design and mechanical properties of lightweight insulating bio-based concretes using rice husk and hemp hurd for green building.* Thèse de doctorat. Matériaux composites et construction. Université Montpellier, France, 226 pages.
- GARNIER P (2000).** Le séchage des matériaux poreux. Approche expérimentale et approche théorique par homogénéisation des structures périodiques : rapport de DEA. DEA de Génie Civil. Ecole doctorale MEGA. Vaulx-en-Velin : ENTPE, 100 p.
- Mohellebi, S. (2015).** Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites. Thèse de doctorat en Génie Civil. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie. 91 pages.
- Nguyen, T. T. (2010).** *Contribution to the study of mix design and process of pre-cast building elements made of lime and hemp concrete.* Université de Bretagne Sud.
- Nozahic, V. (2012).** *Towards a new approach to the design of lignocellulosic plant concretes based on understanding and improving the binder / plant interface : application to chenevot and sunflower stem aggregates combined with a pumice / lime binder.* Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 334 pages.
- Umurigirwa, B. S. (2014).** *Élaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment.* Thèse doctorat. Universités de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE U.R.F Sciences Exactes et naturelles Ecoles Doctorale Sciences Technologie Santé. 139 pages.
- Shink, M. (2003).** Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers. Thèse de doctorat. Universités Laval, Québec, Canada, 172 pages.
- Sotehi, N. (2010).** Caractéristique thermique des parois de bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse de doctorat. Universités Mentouri, Constantine, Algérie, 157 pages.
- Dib, M. R. & Amara, A. (2018).** Influence du mode de malaxage sur les propriétés du béton de liège. Mémoire master. Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 106 pages.

Normes

AFPC-AFREM (2007). Durabilité des bétons « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité ».

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

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 12504-4 (Octobre 2004). Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.

ASTM C 1585-06 (Juillet 2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

ASTM C 1585-04 (Décembre 2007). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes.

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

BS EN 12390-5 (Février 2009). Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens.

BS EN 12350-2 (Mars 2009). Testing fresh concrete - Part 2: Slump-test.

BS EN 12390-7 (Mai 2009). Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete.

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

BS EN 1097-6 (Juillet 2012). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption.

Ouvrages

Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie. Consommation énergétique finale de l'Algérie. 2015.

Béguin, D. (2006). Guide de l'éco construction, Imprimis communication. 2006.

International Energy Agency (IEA). Key World Energy Statistics. 2018.

Pereira, H. (2007). Cork: Biology, production and uses. Elsevier.

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

World Wildlife Fund. Living planet report. Technical report. World Wildlife Fund. 2010.

Sites web

<https://www.zolpan.fr/isolation-thermique/isolation-thermique-par-l-exterieur/les-avantages-d-une-ite>. Dernière consultation effectuée le 14/06/2019.

Résumé

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons tenté d'évaluer l'effet des conditions de cure sur les performances d'un béton allégé par la substitution volumique de 50% de trois granulats minéraux (classes granulaires : 0/4, 4/8 et 8/16mm) par des granulats de liège de même classe granulaire. Une fois le béton confectionné, il est soumis à différentes conditions de cure qui diffèrent en termes de temps d'immersion dans l'eau (0, 3, 7, 14 et 28 jours).

Nous avons identifié au laboratoire les caractéristiques physiques de ces mélanges (masses volumiques, porosité, capillarité), mécaniques à l'aide d'essais destructifs et non destructifs (résistance à la compression, résistance à la flexion, module d'Young), ainsi que leur microstructure. Les résultats que nous avons obtenus ont montré que seule la cure humide, tend à accroître la masse volumique des bétons testés. De plus, les résistances mécaniques ainsi que les paramètres de durabilité évalués sont améliorés en augmentant le temps d'immersion dans l'eau. Les bétons totalement immergés pendant 0, 3, et 14 jours présentent une bonne ductilité, tandis que ceux conservés à 7 et 28 jours sont des bétons à comportement fragile.

Mots clés : Béton vert, Liège, Conditions de cure, Propriétés.

Abstract

In this paper, an evaluation of the effect of curing condition on properties of cork concrete is carried out. The cork concrete in question contains in volume of total aggregates, 50% of cork granules with grain size 0/4, 4/8 and 8/16mm. Once concrete is made, it was kept under curing conditions that differ in term of immersing time (0, 3, 7, 14 and 28 days). The evaluated properties were: bulk density, ultrasonic velocity, compressive strength, flexural strength, dynamic Young modulus, Porosity, Capillarity water absorption and microstructure. The obtained results showed that only a completely wet curing that results an increase in the density of concrete. In addition, the mechanical strengths as well as the durability parameters are improved by increasing the immersion time in the water. concretes submerged for 0, 3, and 14 days have good ductility, while those kept 7 and 28 days are concretes with fragile behavior.

Keywords: Green concrete, Cork, Curing conditions, Properties.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى تقييم تأثير شروط الحفظ على مختلف خصائص خرسانة الفلين. تحتوي الخرسانة المستعملة للقيام بهذا العمل على 50% من حبيبات فلين ذات أقطار 0/4، 4/8 و 8/16 مم كبديل لحجم حبيبات الرمل والحصى المستعملة في صنع الخرسانة العادية. بعد الانتهاء من صنع الخرسانة، تم حفظها تحت خمس ظروف تختلف من حيث مدة الغمر في الماء (0، 3، 7، 14 و 28 يوماً). تم تقييم الخرسانة من حيث الخصائص التالية: الكتلة الحجمية، سرعة انتشار الصوت، مقاومة الانضغاط، مقاومة الانحناء، معامل المرونة الديناميكي، المسامية، قدرة الامتصاص الشعرية إضافة إلى الخصائص المجهريّة. أظهرت النتائج التي حصلنا عليها أن الحفظ ظروف رطوبة طوال مدة الحفظ هو الوحيد الذي يؤدي إلى ارتفاع في قيمة الكتلة الحجمية للخرسانة. إن زيادة مدة الغمر في الماء تؤدي إلى تحسين كل من الخصائص الميكانيكية وكذا مؤشرات الديمومة. أظهرت النتائج المتحصل عليها كذلك أن الخرسانة التي غمرت في الماء لمدة 0، 3 و 14 يوماً تتمتع بمطيلية جيدة، في حين أن تلك التي غمرت لمدة 7 و 28 يوماً تنتمي إلى صنف الخرسانة ذات السلوك الهش.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الخضراء، الفلين، تأثير شروط الحفظ، الخصائص.