

N° Ordre...../FSI/UMBB/2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master
spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux en Génie Civil

THEME

Valorisation des granulats de liège pour
l'élaboration d'un béton autoplaçant léger

Réalisé par : AIT BAZIZ Oussama Encadré par : Pr. GHERNOUTI Y.

Jury :

- Mme RABEHI B.**
- Mr TAZROUT M.**
- Mr BOUCHOUIKA A.**

BOUMERDES 2018

Remerciements

Avant toute chose, je remercie le bon Dieu tout puissant de m'avoir donné la force pour poursuivre mes études supérieures.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au Pr. GHERNOUTI Youcef pour m'avoir encadré avec grande patience et attention pendant tout le long de cette étude.

Je souhaite remercier monsieur DRISS Mustapha le chef de département matériaux au Laboratoire Nationale de l'Habitat et la Construction à Oued Smar, Alger, qui m'a mis à l'aise et aidé aux grandes limites de ses capacités, je remercie aussi ses collègues Hilal, Mohammed pour leurs conseils, et toute l'équipe de l'LNHC.

Je voudrais témoigner ma gratitude envers mes amis spécialement K. H. et IGUEDERZENE Linda et camarades qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel durant ma démarche.

Enfin, merci à toute personne qui a participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents auxquels j'exprime un grand respect et mon éternelle reconnaissance pour leurs sacrifices et avoir veiller à ma réussite et mon bien être. A mes deux frères Sami et Ryad, à mes grand-mères, oncles et tantes, mes cousins et cousines...

A mes amis et amies les plus proches, Amine, Alilou, Anis, Ayoub, Abdou, Badro, Farouk, Jamil, Hamza, Hana, Hasna, Hadjer, Leila, les deux Mehdi, Moncef, Nadia, Yasmine et Walid...

A tous mes enseignants de mon premier jour d'école à mon dernier jour à l'université, et tous ceux me connaissent.

Sommaire

Etude bibliographique

Introduction.....	1
I. Généralités sur les BAP	1
I.1. Définition, historique et avantages.....	1
I.1.1. Les avantages techniques.....	1
I.1.2. Les avantages socio-économiques	2
I.2. Approches de formulation.....	2
I.2.1. Approche Japonaise.....	3
I.2.2. Approche Suédoise.....	4
I.2.3. Approche Française.....	4
I.2.4. Approche Nord-Américaine	4
I.3. Caractéristiques recherchées à l'état frais.....	5
I.3.1 Déformabilité.....	5
I.3.2. Capacité de passage entre les armatures.....	5
I.3.3. Résistance à la ségrégation.....	5
I.4. Les adjuvants.....	6
I.4.1. Superplastifiants.....	6
I.4.2. Agents de viscosité.....	6
I.5. Les ajouts cimentaires.....	6
I.5.1. Les cendres volantes.....	6
I.5.2. Le laitier de haut fourneau.....	6
I.5.3 La fumée de silice.....	7
I.6. Rôle des ajouts cimentaires.....	7
I.7. Rôle des granulats.....	7

I.7.1. Effet de la teneur en granulats.....	7
I.7.2. Effet du diamètre maximal du granulat.....	7
II. Méthodes de caractérisations expérimentales d'un BAP	8
II.1. Caractérisation à l'état frais	8
II.1.1. Essai d'Etalement (Slump Flow).....	8
II.1.2. Essai de la boîte en L (L-Box).....	9
II.1.3. Essai de stabilité au tamis.....	9
II.1.4 La masse volumique.....	10
II.2. Caractérisation à l'état durci.....	11
II.2.1. Essais destructifs.....	11
II.2.1.1. Essai de la résistance à la compression (NF P 18-406).....	11
II.2.1.2. Essai de traction.....	12
II.2.1.2.1. Par flexion.....	12
II.2.1.2.2. Par fendage.....	12
II.2.2. Essais non destructifs.....	13
II.2.2.1. Essai au scléromètre.....	13
II.2.2.2. Essai d'auscultation dynamique.....	14
III. Généralités sur les bétons légers.....	15
III.1. Le béton léger.....	16
III.1.1. Le béton cellulaire.....	17
III.1.2. Le béton caverneux.....	18
III.1.3. Les bétons de granulats légers.....	18
III.2. Classification du béton légers.....	20
III.3. Formulation des bétons légers.....	21

<i>III.4. Propriétés des bétons légers.....</i>	<i>21</i>
<i>III.5. Les constituants du béton de granulats légers.....</i>	<i>22</i>
<i>III.5.1. Granulats Naturels.....</i>	<i>23</i>
<i>III.5.1.1. Pierre ponce.....</i>	<i>23</i>
<i>III.5.1.2. Pouzzolane.....</i>	<i>23</i>
<i>III.5.1.3. Granulats obtenus par traitements.....</i>	<i>24</i>
<i>III.5.1.4. Vermiculite.....</i>	<i>25</i>
<i>III.5.1.5. Perlite.....</i>	<i>26</i>
<i>III.5.2. Granulats fabriqués spécialement.....</i>	<i>26</i>
<i>III.5.2.1. Argile Expansées.....</i>	<i>26</i>
<i>III.5.2.2. Billes de polystyrène.....</i>	<i>27</i>
<i>III.5.3. Granulats végétaux.....</i>	<i>27</i>
<i>III.5.3.1. Granulats de liège.....</i>	<i>27</i>
<i>III.5.3.2. Copeaux de bois (pin, sapin, bouleau)</i>	<i>33</i>
<i>III.5.4. Les matériaux légers de recyclage.....</i>	<i>34</i>
<i>III.5.4.1. Les plastiques.....</i>	<i>34</i>
<i>III.5.4.2. Les caoutchoucs.....</i>	<i>34</i>
<i>III.6 Domaine d'utilisation.....</i>	<i>34</i>
<i>III.7 Les avantages des bétons légers.....</i>	<i>35</i>
<i>III.7.1 Avantages techniques.....</i>	<i>35</i>
<i>III.7.2 Avantages socio-économiques.....</i>	<i>36</i>
<i>IV. Conclusion.....</i>	<i>37</i>

Étude expérimentale

<i>Introduction</i>	38
<i>I. Caractérisation des matériaux utilisés</i>	38
<i>I.1. Ciment</i>	38
<i>I.2. Sable</i>	40
<i>I.3. Graviers et liège</i>	41
<i>I.4. Poudre de marbre</i>	44
<i>I.5. L'adjuvant</i>	44
<i>II. Formulations et préparation des BAP</i>	46
<i>II.1. Formulation</i>	46
<i>II.2. Préparation du béton autoplaçant</i>	48
<i>III. Caractérisation du BAP à l'état frais</i>	49
<i>III.1. Masse volumique</i>	49
<i>III.2. Essai d'étalement et t</i>	51
<i>III.3. Essai de la boîte en L</i>	53
<i>III.4. Essai de stabilité au tamis</i>	54
<i>III.5. Interprétation des résultats</i>	55
<i>IV. Caractérisation du BAP à l'état durci</i>	57
<i>IV.1 Masse volumique</i>	57
<i>IV.2. Essais non-destructifs</i>	59
<i>IV.2.1. Auscultation dynamique</i>	59
<i>IV.2.2 Essai au scléromètre</i>	60
<i>IV.3. Essais destructifs</i>	61
<i>IV.4. Interprétation des résultats</i>	65
<i>V. Conclusion</i>	68

Liste des figures

Étude bibliographique

Figure 1 : Critères de base pour assurer une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage.

Figure 2 : Schéma du principe de l'essai d'étalement.

Figure 3 : Schéma de la boîte en L.

Figure 4 : Essai de stabilité au tamis.

Figure 5 : Mesure de la résistance à la compression des éprouvettes.

Figure 6 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.

Figure 7 : Procédure de l'essai au scléromètre.

Figure 8 : Composition de l'appareil de mesure de vitesse de propagation d'ondes sonores ultrasoniques.

Figure 9 : Représentation schématique des différents types de bétons légers.

Figure 10 : Masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours.

Figure 11 : Granulats de pierre ponce.

Figure 12 : Granulats de Pouzzolane.

Figure 13 : Granulats de mâchefer.

Figure 14 : Granulats de laitier.

Figure.15 : Petits parallélépipèdes de Vermiculite.

Figure 16 : Grains de Perlite.

Figure 17 : Granulats d'Argile expansée.

Figure 18 : Billes de polystyrène.

Figure 19 : Liège noir expansé en granulés de fraction 4/16mm.

Figure 20 : Répartition mondiale des pays producteurs de liège.

Figure 21 : *Cartographie descriptif des peuplements de chêne liège au nord d'Algérie.*

Figure 22 : *Courbe contrainte-déformation de liège.*

Étude expérimentale

Figure 23 : *Sac de ciment CPJ-CEMII/A GICA.*

Figure 24 : *Les différents granulats utilisés.*

Figure 25 : *Courbe d'analyse granulométrique par tamisage du sable (NF P 18-560).*

Figure 26 : *Poudre de marbre broyée très finement.*

Figure 27 : *l'adjuvant MasterGlenium SKY.*

Figure 28 : *Différentes éprouvettes de BAP réalisées.*

Figure 29 : *Bassin de conservation du béton.*

Figure 30 : *Histogramme de variations des masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège à l'état frais.*

Figure 31 : *Essai d'étalement du BAP.*

Figure 32 : *Calcule du diamètre de la galette après étalement du BAP.*

Figure 33 : *Variations des diamètres de galette après l'étalement du BAP.*

Figure 34 : *Essai de la boîte en L du BAP.*

Figure 35 : *Variations du rapport $H2/H1$ de la boîte en L.*

Figure 36 : *Variations de la laitance du BAP.*

Figure 37 : *Histogramme de variations des masses volumiques du BAP Témoin et BAP de liège à l'état durci.*

Figure 38 : *Histogramme de variations des masses volumiques du BAP Témoin et BAP de liège entré l'état frais et durci.*

Figure 39 : *Calcule de vitesse de propagation des ultrasons dans le béton.*

Figure 40 : *Variation de la vitesse des ultrasons dans le BAP.*

Figure 41 : *Variation de la résistance par l'essai sclérométrique.*

Figure 42 : *Le Scléromètre.*

Figure 43 : *Histogramme de variation de résistances à la compression et à la traction par flexion du BAP témoin et BAP de liège.*

Figure 44 : *Eprouvette cylindrique endommagée du BAP témoin.*

Figure 45 : *Eprouvette cylindrique endommagée du BAP de liège 5%.*

Figure 46 : *Eprouvettes cylindrique endommagée du BAP de liège 25%.*

Figure 47 : *Eprouvettes cylindrique endommagée du BAP de liège 50%.*

Figure 48 : *Eprouvettes prismatiques endommagées du BAP.*

Figure 49 : *Eprouvettes prismatiques endommagées du BAP témoin et BAP de liège (5%, 25%, 50%) de gauche à droite.*

Figure 50 : *Faces supérieures des éprouvettes prismatiques endommagées du BAP témoin et BAP de liège (5%, 25%, 50%) de gauche à droite.*

Figure 51 : *Facettes des éprouvettes cubiques coupées du BAP témoin et BAP de liège.*

Liste des tableaux

Étude bibliographique

Tableau 1 : Recommandations

Tableau 2 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires

Tableau 3 : Classification des bétons légers en fonction de la densité.

Tableau 4 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de pierre ponce.

Tableau 5 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de laitier expansé.

Tableau 6 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de cendres volantes frittées expansées.

Tableau 7 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de vermiculite.

Tableau 8 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de perlite.

Tableau 9 : Propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée.

Tableau 10 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de billes de polystyrène.

Étude expérimentale

Tableau 11 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ-CEMII/A GICA.

Tableau 12 : Caractéristiques physiques du ciment CPJ-CEMII/A GICA.

Tableau 13 : Composition minéralogique du ciment CPJ-CEMII/A GICA.

Tableau 14 : Composition chimique du ciment CPJ-CEMII/A GICA.

Tableau 15 : Caractéristiques physiques du sable Oued Souf.

Tableau 16 : Analyse granulométrique du sable d'Oued Souf (NF P 18-560).

Tableau 17 : Equivalent de sable d'Oued Souf.

Tableau 18 : Caractéristiques physiques des graviers et liège.

Tableau 19 : Analyse granulométrique du gravier (3/8) de Bouzegga (NF P 18-560).

Tableau 20 : Analyse granulométrique du gravier (8/15) de Bouzegga (NF P 18-560).

Tableau 21 : Analyse granulométrique du liège (4/16) de Bejaia (NF P 18-560).

Tableau 22 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.

Tableau 23 : Caractéristiques du MasterGlenium SKY 841

Tableau 24 : Composition pour 1m³ de béton.

Tableau 25 : Masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège à l'état frais.

Tableau 26 : Etalement des différents types de BAP.

Tableau 27 : t50 des différents types de BAP.

Tableau 28 : Rapport H2/H1 de la boîte en L.

Tableau 29 : Laitance des différents types de BAP.

Tableau 30 : Résultats de tous les essais effectués sur différents types de BAP à l'état frais.

Tableau 31 : Masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège à l'état durci.

Tableau 32 : Vitesse des ultrasons dans le BAP témoin et BAP de liège.

Tableau 33 : Moyenne de l'indice sclérométrique du BAP témoin et BAP de liège.

Tableau 34 : Résistances à la compression et à la traction par flexion du BAP témoin et BAP de liège.

Résumé

Dans le génie civil, le béton est un des matériaux largement utilisé avec des quantités massives, dans ce dernier les granulats représentent en moyenne 75% de son volume total.

Ce travail scientifique de recherche questionne la possibilité d'utiliser le matériau de liège noir expansé pur, qui est un matériau étranger aux constituants communs de béton, mettant en évidence le gain en légèreté du béton autoplaçant.

Ayant réalisé plusieurs formulations basées sur la substitutions progressive de certains volumes de granulats naturels (5%, 25%, 50%, 75%), remplacés directement par le même volume en liège noir expansé pur granulé, l'estimation de la réussite des formulations a été jugée en étudiant les propriétés du béton à l'état frais par : l'essai d'étalement et t50, l'essai de la boîte en L, l'essai de la stabilité au tamis; à l'état durci les propriétés du béton réalisé ont été déterminées par : la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, essai de compacité par ultrasons.

Les résultats obtenus suggèrent une utilisation possible du liège noir expansé dans la formulation des bétons autoplaçant, ce qui peut résulter à la création de nouveaux bétons avec des propriétés physico mécaniques intéressantes.

Mots clés : Béton léger, Béton autoplaçant, granulés, valorisation, environnement, liège noir expansé pur.

Introduction générale

Les bétons autoplaçant par contre sont considérés comme de nouveaux bétons car leur taux utilisation dans les ouvrages reste faible par rapport aux autres types de bétons malgré leur fort potentiel de développement. Les caractéristiques spécifiques au BAP par rapport aux bétons classiques sont visées autour de son extrême fluidité, ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre car ils se mettent en place sous l'effet de la gravité.

Les granulats concourent à l'aménagement du territoire, notamment à la construction de logements et d'ouvrages d'art, à l'entretien des voies de communication, et à l'amélioration du cadre de vie.

Actuellement en Algérie les besoins en granulats et matériaux de constructions se reposent sur l'extraction et totalement couvert par des carrières, il y a donc un certain besoin d'imaginer d'autres sources d'approvisionnement. L'utilisation des granulats de liège dans le béton contribue sur des niveaux d'ordre environnementale, technologique et surtout économique, c'est un domaine d'investissement intéressant.

Notre objectif principal de ce travail est de contribuer à la valorisation des granulats de liège disponibles en abondance en Algérie pour la confection du béton autoplaçant permettant donc de :

- Réduire la masse volumique du BAP ;
- Valoriser et encourager l'utilisation du liège dans le béton.

Ainsi pour expliquer notre travail, on a structuré ce mémoire en deux parties partagées entre, bibliographie et expérimentation, pour cette fin nous avons procédé comme suit :

Etude bibliographique Traitant les bétons autoplaçant et les bétons légers avec une accentuation sur le liège et son utilisation dans le domaine de la construction.

Etude expérimentale Une étape centrée autour de la caractérisation d'ordre physique, chimique et mécanique des matériaux utilisés pour la confection de notre BAP léger de liège et à la formulation du BAP léger à base de liège et la présentation des résultats suivi par leurs interprétations.

Pour finaliser notre travail, on a clôturé le mémoire par une conclusion générale.

Étude bibliographique

I. Généralités sur les BAP

I.1. Définition, historique et avantages

I.2. Approches de formulation

I.3. Caractéristiques recherchées à l'état frais

I.4. Les adjuvants

I.5. Les ajouts cimentaires

I.6. Rôle des ajouts cimentaires

I.7. Rôle des granulats

II. Méthodes de caractérisations expérimentales d'un BAP

II.1. Caractérisation à l'état frais

II.2. Caractérisation à l'état durci

III. Généralités sur les bétons légers

III.1. Le béton léger

III.2. Classification du béton légers

III.3. Formulation des bétons légers

III.4. Propriétés des bétons légers

III.5. Les constituants du béton de granulats légers

III.6 Domaine d'utilisation

III.7 Les avantages des bétons légers

IV.8 Conclusion

Introduction

En se fiant à la littérature scientifique au tour des bétons autoplaçant(BAP) des bétons légers, et l'arbre de chêne liège, on a pu rédiger cette partie pour éclaircir brièvement les BAP, ses constituants, les méthodes courantes pour sa formulation, les types de granulats légers, et le liège noir expansé pur, tout en mettant en avant leur définitions, historique, avantages et utilisations...

I. Généralités sur les BAP

I.1. Définition, historique et avantages

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide qui s'écoule sous son propre poids et se met en place sans vibration, sans ségrégation et sans ressuage [1]. Le concept de béton autoplaçant, aussi appelé **béton autocompactant**, **béton autoconsolidant** ou **béton autonivelant** pour les applications horizontales, a été introduit pour la première fois à la fin des années 1980 par des chercheurs de l'Université de Tokyo [2]. L'idée d'un béton fluide et homogène se mettant en place sous l'effet de son propre poids est née du problème de durabilité des structures en béton au Japon. Cela était dû à la réduction du nombre de mains-d'œuvre qualifiées qui assuraient une bonne mise en œuvre et une bonne consolidation du béton. La pérennité des structures était menacée face à ce problème. Dès lors, la recherche, le développement et l'utilisation du BAP ont pris de l'ampleur en Europe et en Amérique du Nord une dizaine d'années après son premier développement [3]. En effet, ce nouveau type de béton révolutionnaire tant par ces caractéristiques à l'état frais qu'à l'état durci offre un bon nombre d'avantages techniques, et socio-économiques liés à son utilisation [4], [5]. On peut citer :

• I.1.1. Les avantages techniques

- Bon remplissage des coffrages et enrobage des armatures adéquates sans vibration.
- Facilité de coulage dans des endroits confinés et/ou difficiles d'accès ;
- Possibilité de confectionner des structures de géométrie complexe et/ou fortement ferraillées ;
- Meilleures performances et durabilité grâce à leur grande compacité ;
- Propriétés mécaniques analogues ou supérieures à celles du béton vibré ;
- Amélioration des qualités esthétiques des parements et des surfaces ;
- Mise en place aisée par pompage.

- **I.1.2. Les avantages socio-économiques**

- Optimisation du rendement des chantiers et des usines de préfabrication.
- Augmentation des cadences de production et gain de temps.
- Suppression des opérations coûteuses en mains-d'œuvre qualifiées pour le compactage du béton, le talochage et le surfaçage.
- Économie sur le coût global d'un projet.
- Réduction des nuisances sonores sur les chantiers, notamment en milieux urbains, dues principalement à l'emploi de vibrateurs internes et/ou externes.

I.2. Approches de formulation

Il n'existe pas de méthode universelle pour formuler un BAP. L'approche de formulation adoptée dépend du type d'application et des exigences spécifiques de chaque projet de génie civil. Néanmoins, toutes les approches de formulations visent à assurer un BAP **fluides et homogène** sans ségrégation et sans ressuage. De ce fait, Khayat, [1], a résumé les critères nécessaires pour assurer les propriétés autoplacantes du BAP (figure 1).

Par ailleurs, selon les recommandations du comité de l'American Concrete Institute sur l'emploi des BAP [4], on peut distinguer trois scénarios de formulation des BAP :

1. Forte teneur en poudre et utilisation de superplastifiants ;
2. Faible teneur en poudre, utilisation de superplastifiants et d'agent de viscosité ;
3. Moyenne teneur en poudre, utilisation de superplastifiants et une quantité limitée d'agents de viscosité.

Dans ce cas la stabilité est obtenue en utilisant un mélange de granulats adapté, ou en diminuant le rapport E/L ou en utilisant un agent de viscosité.

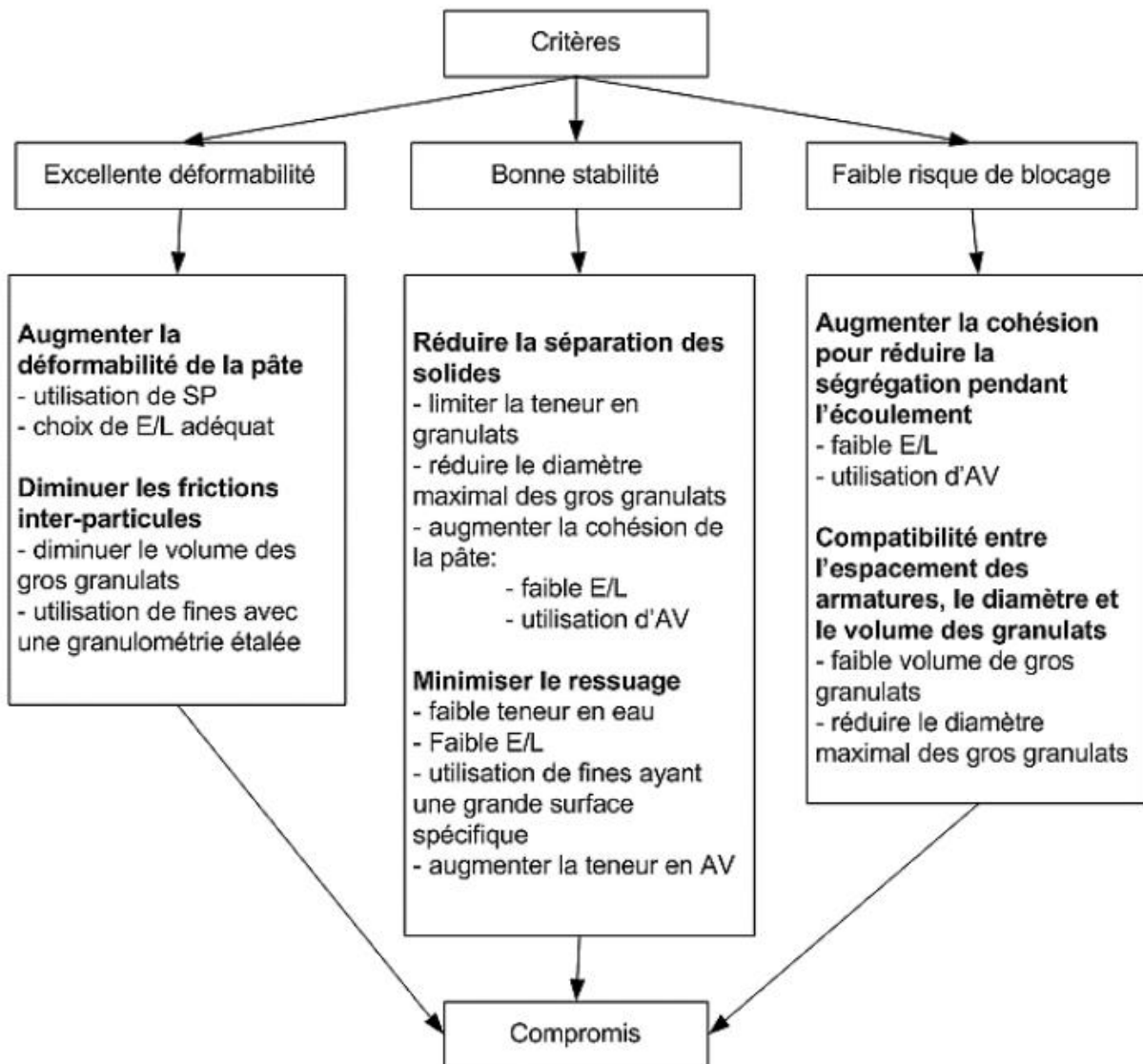


Figure 1 : Critères de base pour assurer une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage [1]

Quelques approches de formulation des BAP sont résumées dans les paragraphes suivants :

I.2.1. Approche Japonaise

L'approche Japonaise, aussi appelée méthode basée sur l'optimisation du mortier [2]. Le principe de cette méthode est tel que :

- La quantité de gros granulat dans le béton est limitée à 50% du volume total des solides (granulats + sable + liants) ;
- La quantité de sable est limitée à 40 % du volume total de mortier ;
- Le rapport E/L volumique se situant entre 0,8 et 1 ;

- Le dosage en superplastifiants et le rapport E/L finaux sont ajustés de manière à assurer la fluidité et la viscosité nécessaires au BAP ;
- La caractérisation de la fluidité et de la viscosité se fait à travers l'essai d'étalement et le temps d'écoulement

Cette méthode, bien que sécuritaire et menant vers des BAP de très hautes résistances, nécessite une grande quantité de pâte et donc une teneur élevée en ciment et en superplastifiants afin de minimiser les frictions entre les granulats et le risque de blocage lors de l'écoulement. La viabilité économique de ces BAP est peu satisfaisante et mène vers des coûts très élevés.

I.2.2. Approche Suédoise

Dans cette méthode, **le volume de pâte minimal** nécessaire pour atteindre un bon taux de remplissage à la boîte en L est calculé pour chaque rapport granulats/sable (G/S) et en utilisant les courbes de référence de chaque nature de granulats. Aussi, le volume de pâte minimal pour atteindre un étalement donné est estimé en se basant sur la compacité granulaire du mélange sable + granulats. Le rapport G/S final est celui qui nécessite le même volume de pâte pour avoir l'ouvrabilité recherchée. Les teneurs en fines, en eau et en superplastifiants sont ajustées par la suite pour obtenir la résistance en compression visée, une viscosité suffisante pour la stabilité et un faible seuil de cisaillement pour la déformabilité. [5]

I.2.3. Approche Française

Une approche de formulation des BAP basée sur **l'optimisation du squelette granulaire** par l'emploi d'un modèle mathématique intitulé « Modèle de suspension solide ». Ce dernier est implémenté dans le logiciel René-LCPC conçu pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil à partir de grandeurs expérimentales faciles à mesurer [6]. Les données d'entrée dans le logiciel sont : la distribution granulométrique, la densité, l'indice de compacité propre à chaque constituant, et le dosage de saturation en superplastifiants. L'utilisation d'agent de viscosité n'est pas prise en compte. [5]

I.2.4. Approche Nord-Américaine

Dans le contexte Nord-Américain, on retrouve deux méthodes de formulation. La première méthode appelée « BAP type poudre » est une combinaison entre l'approche Japonaise et la méthode de formulation du béton haute-performance (BHP).

La méthode type poudre est basée sur **un faible rapport E/L et l'utilisation d'ajouts minéraux** (fumée de silice, cendres volantes, laitiers, filler calcaire) afin d'accroître les résistances mécaniques et la durabilité, l'utilisation de superplastifiants pour assurer la fluidité nécessaire. Une viscosité modérée est maintenue grâce au volume élevée en poudre qui remplace une fraction du ciment. La deuxième méthode appelée « BAP type AV » est basée sur **l'utilisation d'agent de viscosité** afin d'assurer la plasticité du mélange. Dans ce cas, une moyenne teneur en poudre avec éventuellement des ajouts minéraux est suffisante, l'utilisation de superplastifiants afin d'assurer de bonnes propriétés d'écoulement du BAP [6].

I.3. Caractéristiques recherchées à l'état frais

Le béton est caractérisé à l'état frais par son ouvrabilité. Celle-ci, détermine l'aptitude d'un béton frais à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures, et donc remplir les exigences d'une bonne mise en œuvre. L'ouvrabilité du béton autoplaçant est définie par sa grande déformabilité, sa capacité de passage et sa résistance à la ségrégation [8].

I.3.1. Déformabilité

La déformabilité ou la capacité de remplissage décrit la capacité du BAP à s'écouler librement dans un milieu non confiné (sans obstacles) et à remplir complètement tous les espaces à l'intérieur du coffrage sous son propre poids. La déformabilité est influencée par la teneur et la nature du liant, la teneur et la granulométrie des granulats, le rapport sable/granulat, le rapport E/L, les adjuvants et les interactions intergranulaires [5].

I.3.2. Capacité de passage entre les armatures

La capacité de passage décrit la facilité avec laquelle le béton peut passer dans les milieux confinés (avec obstacles, présence d'armature par exemple) et les espaces étroits sans blocage avec le minimum de friction possible entre les particules. Le blocage peut apparaître lorsqu'il y a une ségrégation des granulats au voisinage des armatures, empêchant ainsi le passage du béton [1]. Cette ségrégation peut être due à une teneur élevée en eau, ou un surdosage en SP entraînant un manque de stabilité et d'homogénéité entre les composants.

I.3.3. Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est définie par la stabilité du béton, c'est-à-dire, la capacité du matériau à maintenir une répartition homogène de ses différents constituants au cours de son écoulement et de sa mise en place [5].

I.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances chimiques ajoutées aux mélanges cimentaires afin de modifier et d'améliorer les propriétés à l'état frais et/ ou à l'état durci du béton. Parmi ces substances on retrouve **les superplastifiants et les agents de viscosités.**

I.4.1. Superplastifiants

Comme leur nom l'indique, les superplastifiants (SP) servent à fluidifier et à disperser les grains de ciment qui ont tendance à flocculer dès leur contact avec l'eau de gâchage [9]. D'une façon générale, les SP agissent en augmentant la fluidité de la pâte [10].

I.4.2. Agents de viscosité

Les agents de viscosité (AV) sont utilisés afin d'améliorer la cohésion et la stabilité des systèmes cimentaires très fluide [1].

I.5. Les ajouts cimentaires

Ce sont généralement des coproduits et des sous-produits de procédés industriels. Ils sont incorporés directement dans les centrales à béton lors de la confection des mélanges de béton ou broyés et mélangés conjointement avec le clinker pour produire des liants composés. L'emploi des ajouts cimentaires contribue à améliorer la durabilité des bétons par leur action pouzzolanique et/ou hydraulique, à limiter l'utilisation des ressources naturelles pour la production de ciment. Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés dans l'industrie du ciment et du béton, on retrouve : **les cendres volantes, les laitiers de hauts de fourneau et la fumée de silice.**

Dans les paragraphes suivants, nous exposons le rôle des ajouts cimentaires sur la rhéologie des pâtes de ciment en passant par une brève description de chaque ajout cimentaire [5].

I.5.1. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont les pouzzolanes artificielles (sous-produit industriel) les plus utilisées. Ce sont de fines particules provenant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques produisant l'électricité [5].

I.5.2. Le laitier de haut fourneau

Il provient de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte. Pour obtenir les propriétés hydrauliques qui lui permettent d'être utilisé comme liant, le laitier est refroidi

brusquement dans l'eau : trempé, il n'a pas le temps de cristalliser. On obtient alors le laitier granulé, qui est ensuite broyé pour être utilisable comme ajouts cimentaires [5].

I.5.3 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zirconium [5].

I.6. Rôle des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires améliorent les propriétés d'écoulement des BAP, aident à maintenir une bonne stabilité, à éviter le ressuage et à diminuer le dégagement de chaleur [1].

Il est bien établi que l'utilisation des cendres volantes améliore l'ouvrabilité et contribue au développement des résistances mécaniques et de durabilité à long terme, grâce à la forme sphérique des cendres volantes et à leur action pouzzolanique [5].

I.7. Rôle des granulats

Les granulats sont des matériaux inertes composés de sable, de graviers ou de cailloux. Ils constituent le squelette granulaire du béton et ont diverses origines : naturelle, artificielle ou recyclée. Il est bien connu que l'écoulement du béton est régi en grande partie par le comportement rhéologique de la pâte qui le constitue, cependant, les caractéristiques des granulats et leur proportion peuvent constituer des critères de performance des BAP [8].

I.7.1. Effet de la teneur en granulats

Dans les BAP, la teneur en gros granulats varie entre 28% à 35% du volume total du béton autoplaçant [3] ; [13], plus la capacité de remplissage diminue, donc le volume des gros granulats dans le béton est un facteur important pour le contrôle de la maniabilité. La quantité de sable contenue dans le mortier a une influence sur la capacité de remplissage et doit donc être contrôlée. L'utilisation d'un rapport S/G (Sable/Gravillon) de l'ordre de 1 est recommandée afin d'assurer une bonne déformabilité.

I.7.2. Effet du diamètre maximal du granulats

Afin d'augmenter la déformabilité du béton autoplaçant et limiter le risque de blocage dans les régions étroites d'un coffrage, il est important de réduire le diamètre maximal des gros granulats [1].

II. Méthodes de caractérisations expérimentales d'un BAP

II.1. Caractérisation à l'état frais

L'ouvrabilité des bétons autoplaçant se décompose en trois caractéristiques :

1. La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
2. La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
3. La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

II.1.1. Essai d'Etalement (Slump Flow)

C'est l'essai le plus courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté et à l'aide du cône d'ABRAMS (figure 2). Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm.

La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. [15].

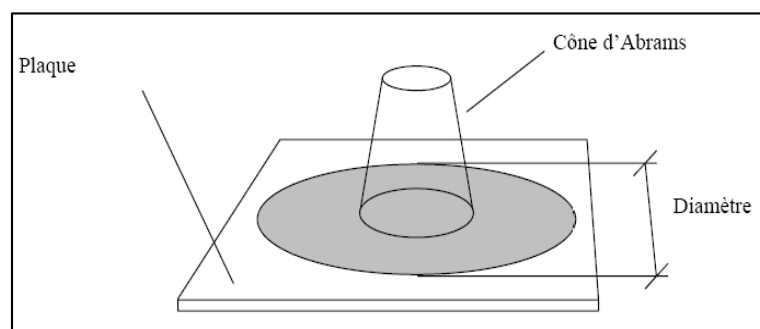


Figure 2 : Schéma du principe de l'essai d'étalement [17]

La mesure du temps pour obtenir l'étalement final, ou encore un étalement de 50 cm (souvent noté t_{50}), est à ce titre c'est une donnée utile pour évaluer la viscosité.

II.1.2. Essai de la boîte en L (L-Box)

La procédure d'essai de la boîte en L (figure 3) est la suivante :

La partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite, le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer à travers un grillage, formé de 3 barres d'armature $\varnothing 14$ mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'auto remplissage. Le rapport H_2/H_1 devrait être supérieur à 0,80. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer le volume de la teneur en granulats d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport eau/liant constant [16].

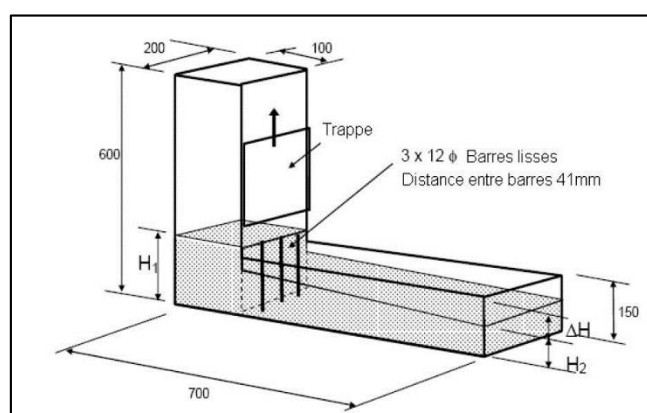


Figure 3 : Schéma de la boîte en L [17]

II.1.3. Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçant, il vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm (Figure 4).



Figure 4 : Essai de stabilité au tamis

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

- $0\% \leq \% \text{ laitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% \text{ laitance} \leq 30\%$: stabilité critique
- $\% \text{ laitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation, béton inutilisable [17].

Tableau 1 : Recommandations [18]

Type d'essai	Recommandation
Essai d'étalement (Slump flow)	-Etalement $60 \leq \frac{D1+D2}{2} \leq 70$ -Il caractérise la fluidité et la maniabilité du béton
Essai de boîte en (L-BOX)	- $H_1 / H_2 \geq 0.8$ -Il caractérise la mobilité du béton et son écoulement dans un milieu confiné
Essai de stabilité au tamis	- $0 \leq \text{laitance} \leq 15\%$ -Il caractérise la stabilité du béton et la limite de ségrégation

II.1.4 La masse volumique

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique.

La densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$\rho = \frac{m(\text{béton})}{\text{volume}(\text{récipient})} \text{ kg/m}^3$$

II.2. Caractérisation à l'état durci

Le béton durci peut être soumis à différents essais à la fois destructifs ou bien non destructifs de caractérisation :

Essais destructifs sur béton durci :

- Les essais de compression.
- Les essais de traction par flexion.
- Les essais de traction par fendage.

Essais non destructifs sur béton durci :

- Essais de compacité par ultrasons (Essai d'auscultation dynamique)
- Essai au Scléromètre

Ces différents essais sont expliqués d'une façon détaillée dans les paragraphes suivants :

II.2.1. Essais destructifs

II.2.1.1. Essai de la résistance à la compression (NF P 18-406)

Les essais de mesure de la résistance à la compression (figure 5) sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément à la norme (NF P 18-400). Ce test fournit la force de compression qui génère la rupture de l'échantillon. La contrainte de compression à la rupture est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée [17].

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S} \text{ Mpa}$$

R_c : la résistance en compression exprimée en MPa.

F : la charge maximale exprimée en MPa.

S : l'aire de la section sur laquelle la force de compression est appliquée, elle est exprimée en mm².



Figure 5 : Mesure de la résistance à la compression des éprouvettes.

II.2.1.2. Essai de traction

II.2.1.2.1. Par flexion

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28cm). Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion et soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture [19].

$$Rf = \frac{3FL}{2a^3}$$

F : la charge de rupture (N) ;

L : L'écartement des deux points de charge (mm) ;

a : les dimensions des arrêtes des éprouvettes (mm).

II.2.1.2.2. Par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton couché suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. Si « F » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétrale verticale, « D » diamètre et « L » longueur du cylindre (figure 6) [20].

$$Rc = \frac{2P}{3.14 * D * L} \text{ MPa}$$

P : charge de rupture (N) ;

L : longueur de l'éprouvette (mm) ;

D : diamètre de l'éprouvette (mm).

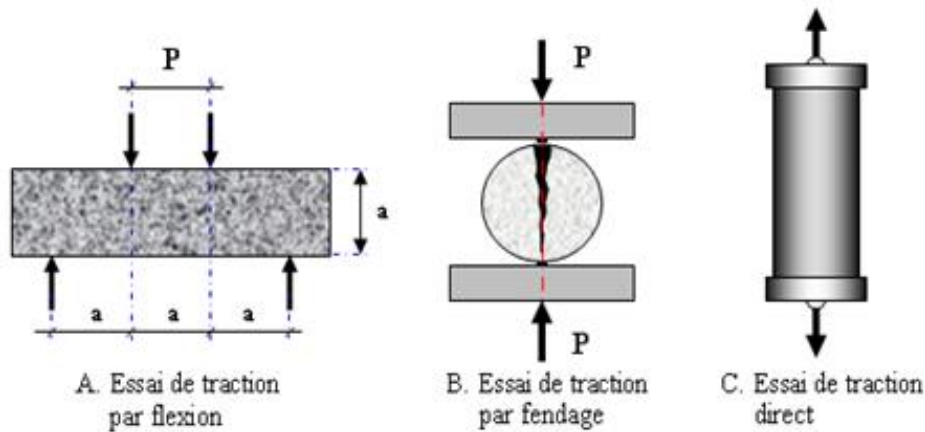


Figure 6 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction [20]

II.2.2. Essais non destructifs

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments [21]. Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance ;
- L'homogénéité ;
- La porosité ;
- La durabilité.

II.2.2.1. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre (figure 7) consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de :

- L'énergie de recul ;
- Caractéristiques des systèmes de ressorts,

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage [21].



Figure 7 : Procédure de l'essai au scléromètre.

Interprétation des résultats de contrôle du béton au scléromètre

1. Méthode de la courbe de calibrage

La courbe de calibrage est déterminée en effectuant l'essai au scléromètre sur au moins 30 éprouvettes. La courbe de calibrage doit être revue en cas de changement de la composition du béton ou des conditions de conservation. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe de calibrage est évaluée à $\pm (20\% \div 25\%)$.

2. Méthode de la courbe unique

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation affectant la corrélation « Indice sclérométrique – Résistance du béton » sont inconnues. On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil fourni par le fabricant. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe peut être évaluée à $\pm 50\%$. La résistance du béton peut aussi être obtenue à partir de la formule suivante :

$$R = I^2 / 32$$

Avec :

R : résistance

I : indice sclérométrique.

II.2.2.2. Essai d'auscultation dynamique

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée. La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type

des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions [21].

Figure 8 : Composition de l'appareil de mesure de vitesse de propagation d'ondes sonores



ultrasoniques

III. Généralités sur les bétons légers

Les bétons légers connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, dans cette période connaissent un regain d'intérêt, qui semble tout à fait mérité en raison de leurs propriétés.

CORMON appelle béton léger un béton dont la masse volumique apparente à 28j inférieure à 1800 kg/m^3 dans les conditions normales de conservation (température de 20° et 65% d'humidité relative). De même l'American Concrete Institute limite la masse volumique apparente des bétons à 1800 kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours. Par contre SHORT et KINNIBURG considèrent que la masse volumique apparente sèche d'un béton léger doit être inférieurs à 1775 kg/m^3 . Ainsi l'Allemagne fédérale limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 kg/m^3 [22].

En fin la masse volumique après séchage comprise entre 800 et 2100 kg/m^3 entièrement ou partiellement réalisés avec des granulats légers. Il est donc bien difficile de donner une définition précise des bétons en se basant sur une limite supérieure de la masse volumique apparente [22]. Cependant la définition avancée par CORMON semble la plus intéressante, car elle est proche des valeurs limites de masse volumique généralement admises et surtout car elle est la plus précise quant aux conditions de conservation du béton et à la date de mesure [22].

III.1. Le béton léger

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 kg/m³, d'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m³ [23].

Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons à une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ [23].

Ces bétons à des fins **d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois**, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction [24].

En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur **faible masse volumique**, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction [24]. Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects :

1. Les particularités en matière de formulation des bétons légers ;
2. La source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplacent une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- Soit dans les granulats ;
- Soit dans la pâte de ciment ;
- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :

1. Les bétons cellulaires ;
2. Les bétons sans fines (caverneux) ;
3. Les bétons de granulats légers.

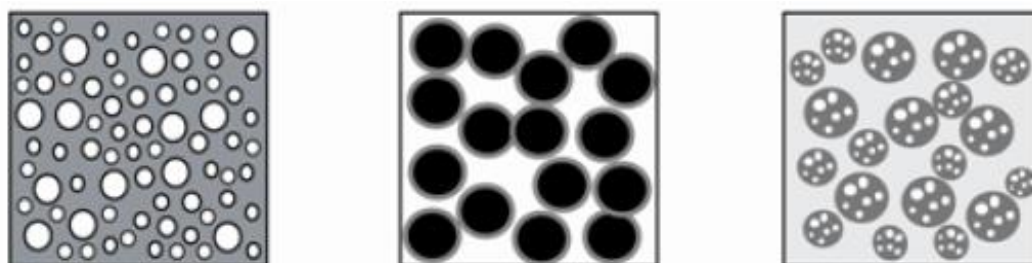


Figure 9 : Représentation schématique des différents types de bétons légers, respectivement de gauche à droite, béton cellulaire, béton caverneux, béton de granulats légers [25]

III.1.1. Le béton cellulaire

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi Ces agents, la poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse [24].

La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis ; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier [24].

Tableau 2 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires [23].

Masse volumique(Kg/m ³)	Résistance à la compression(MPa)	Résistance à la flexion (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/m.h.°C)
450	3.2	0.65	0.12
525	4.0	0.75	0.14
600	4.5	0.85	0.16
675	6.3	1.00	0.18
750	7.5	1.25	0.20

Les résistances et le module augmentent en fonction de l'augmentation de la masse volumique du béton (tableau 2). En conséquence, il est possible d'obtenir une masse volumique souhaitée pour une résistance spécifique. Il est à noter que la résistance en flexion peut être améliorée par l'ajout d'armature ou de microfibres, celles-ci reprennent les efforts de flexion, et aide à contrôler la microfissuration lors de l'application d'une charge. Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai [23].

III.1.2. Le béton caverneux

Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton, un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une épaisseur de 1 à 3mm. Cette substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression [23].

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainant [25].

La masse volumique du béton caverneux dépend de sa granulométrie. La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14MPa. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. La résistance en flexion est habituellement égale à 30 % de la résistance en compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire. Le retrait du béton caverneux est considérablement plus faible que celui d'un béton de densité normale. Ce béton est très résistant au gel. Sa forte absorption d'eau le rend cependant inutilisable dans les fondations et dans les situations où il peut se saturer en eau [26].

III.1.3. Les bétons de granulats légers

Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers. Il existe en effet de nombreuses variétés de bétons de granulats légers que l'on peut classer de différentes façons. Une classification basée sur l'origine des granulats et on peut ainsi distinguer quatre grands groupes [22] :

1. Les bétons de granulats légers naturels

Il s'agit des bétons fabriqués avec de la ponce ou de la pouzzolane matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse qui permettent par concassage des granulats légers. Ces matériaux sont relativement peu connus en Algérie, leur emploi reste donc sans domaine d'application, mais il n'est pas exclu que dans l'avenir, certaines de leurs propriétés les rendent plus avantageux pour certaines réalisations.

2. Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique

Ce sont les bétons fabriqués avec des granulats d'argile, de schiste, d'ardoise, et de perlite expansés ou de vermiculite exfoliée.

La perlite expansée s'obtient par traitement thermique de verres volcaniques de structure perlitique contenant une certaine quantité d'eau. Ce granulat n'est pas produit en Algérie, mais principalement aux USA et en URSS.

La vermiculite est un minéral phyllosiaïque comportant à l'état naturel deux couches de molécules d'eau entre deux feuillets élémentaire. Le traitement par la chaleur provoque l'écartement des différentes lamelles et l'on appelle ce phénomène l'exfoliation [24].

Il faut enfin noter que ces deux types de granulat sont extrêmement légers (masse volumique apparente inférieure à 150 kg/m^3) et sont donc principalement employés pour réaliser des bétons isolants mais non porteurs.

3. Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial

Il s'agit des bétons réalisés avec du mâchefer, sous-produit de la combustion du charbon ou des ordures ménagères. Ce matériau est en très nette régression et on l'utilise que pour la fabrication de parpaings.

4. Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux

On peut utiliser que pour fabriquer des granulats légers de très nombreux déchets industriels comme le laitier de haut fourneau : d'EL-HADJAR que l'on expande sur les lieux de production. Les cendres volantes que l'on peut fripper, on le verre que l'on peut également expandé [22].

Pour être complet, il faut en outre signaler que l'on classe également parmi les bétons légers des matériaux réalisés à partir de débris végétaux. Enfin, on réalise aussi des bétons de granulats légers en utilisant des liants organiques (résines synthétiques et mousses plastiques) à la place de liants hydrauliques [22].

III.2. Classification du béton légers

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. Il s'agit :

- De la masse volumique sèche ;
- De la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en kg/m^3 . [27]

Tableau 3 : Classification des bétons légers en fonction de la densité [27]

Classes	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Masse volumique (Kg/m^3)	>800 et <1000	>1000 et <1200	>1200 et <1400	>1400 et <1600	>1600 et <1800	>1800 et <2000

Une autre classification pour béton léger basée sur la masse volumique est logique, puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R -8713.141 classifie les bétons en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m^3) en trois catégories :

1- Le béton léger de structure : 1350 – 1900 kg/m^3

Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

2- Le béton léger de faible masse volumique : 300 – 800 kg/m^3

A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m^3 n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, $R_c < 7$ MPa

3- Le béton de résistance moyenne se situe entre les deux : Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa.

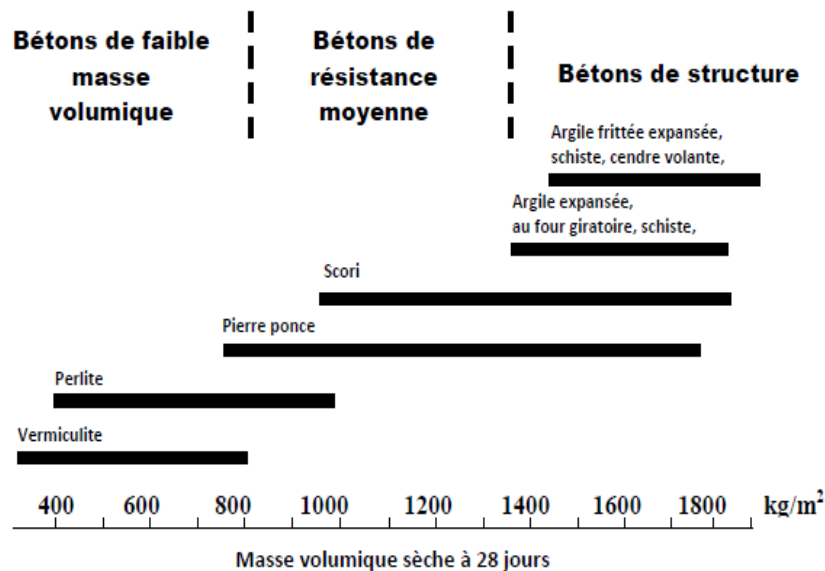


Figure 10 : Masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours [26]

III.3. Formulation des bétons légers

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons de granulats rigides.

Dans l'ensemble, le processus de formulation comprend les étapes suivantes :

1. Définir la nature de l'ouvrage ;
2. Etablir les propriétés du béton en fonction de la nature de l'ouvrage ;
3. Etablir le dosage des constituants permettant ainsi d'atteindre les propriétés recherchées.

La formulation du béton est tributaire de la nature de l'ouvrage. A ce titre, il convient de distinguer deux grandes familles de béton léger :

- Le béton léger structural ;
- Le béton léger architectural.

III.4. Propriétés des bétons légers

La description des propriétés des bétons sera d'avantage axée sur les éléments suivants :

1. La masse volumique

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importants dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants.

2. La durabilité

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont différents [23].

3. La rhéologie à l'état frais

La rhéologie du béton à l'état Frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité.

On qualifie la rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages [23].

4. Les propriétés mécaniques

Parmi les propriétés mécaniques, on retrouve la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. Ces propriétés sont des paramètres secondaires dans la conception d'un béton ultra-léger puisque leur importance est relativement mineure pour ce type de béton. Toutefois, on ne peut les négliger puisque tous les bétons, peu importe l'application, nécessitent un minimum de résistance mécanique [23].

III.5. Les constituants du béton de granulats légers

Le béton conventionnel est un matériau relativement simple à fabriquer dont les composantes sont bien connues c'est-à-dire le ciment, les ajouts cimentaires, l'eau, les additions et les adjuvants. La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Considérant l'importance de ceux-ci, il convient donc d'exposer les principales caractéristiques et les types de granulats utilisés dans la confection de bétons de granulat légers.

Les granulats légers sont très nombreux et ils se différencient les uns des autres par leur origine, leur composition, leur forme, leur état de surface, leur structure, leur porosité, leur densité, leur résistance, les grandes familles sont les suivantes :

III.5.1. Granulats Naturels

III.5.1.1. Pierre ponce

La pierre ponce est un matériau naturel d'origine volcanique, on trouve dans sa composition chimique une proportion élevée de trois minéraux qui sont : le silice, l'alumine et l'alcalis.

Elle se forme par brusque refroidissement de roches en fusion où il se présente sous l'aspect de grains assez arrondis dont le diamètre maximal est 10 à 20 mm suivant les carrières, de couleur grisâtre, d'une densité sèche et faible variant de 500 à 800 kg/m³ due à la présence de bulles de gaz créées lors de sa formation et non pas à sa fabrication car à cette étape la ponce ne subit aucune transformation particulière mise à part le concassage. La ponce est assez friable et employée pour des bétons légers de structure et d'isolation ayant des résistances mécanique modestes ainsi que dans le cas d'enduits légers [24].

Tableau 4 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de pierre ponce [23]

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Pierre ponce	750 à 1400	3 à 20	0.5 à 1.5	0.40



Figure 11 : Granulats de pierre ponce [28].

III.5.1.2. Pouzzolane

La pouzzolane provient de la cristallisation de magma volcanique refroidi assez lentement (scorie, lave mousseuse, crasse volcanique). La roche s'exploite en carrière. Elle est parfois lavée, concassée et criblée. La pouzzolane est colorée en rouge brun, en noire ou en teinte intermédiaire. Sa densité est un peu plus élevée que celle de la ponce, de l'ordre de 700 à 900 kg/m³. Les bétons confectionnés sont peu plus denses et plus résistants que les bétons de ponce.



Figure 12. : Granulats de Pouzzolane [28]

III.5.1.3. Granulats obtenus par traitements

Soit de déchets industriels, soit de matériaux naturels :

Mâchefer : Le Mâchefer est un résidu de la combustion du charbon dans les foyers domestiques ou industriels. C'est un matériau de couleur foncée. Dur, d'aspect fritté et scoriacé. Il ne doit pas contenir de produit nocif (chaux et magnésie sur cuites, sulfures et sulfates).



Figure 13 : Granulats de mâchefer [28]

- **Le Laitier** : Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts-fourneaux. Des usines sidérurgiques. Plusieurs traitements permettent d'obtenir des granulats légers à partir du laitier en fusion.



Figure 14 : Granulats de laitier [28]

Tableau 5 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de laitier expansé [23]

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Laitier expansé	1000 à 1800	3 à 25	3 à 7	0.30 à 0.45

- **Cendres volantes frittées et expansées**

La cendre volante frittée est obtenue à partir de cendres volantes, résidus de la combustion du charbon pulvérisé utilisé dans les centrales thermiques. Les cendres sont séparées et recueillies dans des précipitateurs électrostatiques ou dans des collecteurs mécaniques.

Tableau 6 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de cendres volantes frittées expansées [23].

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Cendre volantes	900 à 1850	5 à 45	2.5 à 3	0.15 à 0.60

III.5.1.4. Vermiculite

Les granulats de vermiculite sont obtenus par expansion dans de l'air chaud vers 900°C. Puis refroidissement brusque de paillettes de mica. Ils ont la forme de « mini- accordéons » de couleur jaune brillant, de 0,5 à 10mm de côté. La densité est comprise entre 70 et 130 kg/m³.



Figure 15 : Petits parallélépipèdes de Vermiculite [28]

Tableau 7 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de vermiculite [23].

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Vermiculite	300 à 800	1 à 2	0.2 à 0.4	0.20 à 0.30

III.5.1.5. Perlite

Les granulats de Perlite sont obtenus par chauffage rapide à 100°C puis refroidissement brusque d'une roche volcanique riche en silice. On obtient des microbilles blanchâtres de 0,5 à 4mm de diamètre. Leur densité est comprise entre 50 et 100 kg/m³ par traitement spécial ou obtient les perlites siliconées.



Figure 16 : Grains de Perlite [28]

Tableau 8 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de perlite [23].

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Perlite	300 à 800	1 à 5	0.1 à 0.5	0.07 à 0.18

III.5.2. Granulats fabriqués spécialement

III.5.2.1. Argile Expandées

L'argile expansée est certainement actuellement le matériau le plus fabriqué dans le monde. La production industrielle a commencé vers 1928 et actuellement dans le monde il existe plusieurs centaines d'usines.



Figure 17 : Granulats d'Argile expansée [28]

Tableau 9 : Propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée [23].

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Argile expansée	600 à 1800	5 à 35	4 à 8	0.20 à 0.75

III.5.2.2. Billes de polystyrène

La matière première servant à la formation des billes de polystyrène est constituée de granules de polystyrène non expansé renfermant un porogène.

*Figure 18 : Billes de polystyrène [28]***Tableau 10 :** Propriétés du béton léger confectionné à partir de billes de polystyrène [23].

	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Coeff. de conductivité thermique (Kcal/mh°C)
Polystyrène	300 à 1800	1 à 10	0.3 à 1.5	0.05 à 0.25

III.5.3. Granulats végétaux

III.5.3.1. Granulats de liège

Le liège est un produit naturel, renouvelable, durable en matières premières, qui a été utilisé pendant de nombreux siècles. Le liège est l'écorce du chêne (*Quercus suber* L.), qui est périodiquement récolté de l'arbre, généralement tous les 9-12 ans, en fonction de la région.

*Figure 19 : Liège noir expansé en granulés de fraction 4/16mm*

Abondant dans les régions spécifiques de la Méditerranée occidentale (Portugal, Espagne, sud de la France, une partie de l'Italie, l'Afrique du Nord) et la Chine [29] ; [30].

Cet arbre exige beaucoup de lumière solaire et une combinaison très inhabituelle de faibles précipitations et l'humidité assez élevées. L'Europe dispose d'environ 60% de la superficie totale de production (forêts de liège) et produit plus de 80% de liège au monde [31]. La qualité et l'épaisseur de l'écorce varient selon les conditions d'un arbre de croissance spécifique [29] ; [30]. Le liège est des plus souples matériaux naturels connus. **C'est un matériau léger, élastique, flexible et imperméable aux gaz et liquides, impérissable, bon isolateur électrique et thermique, isolateur phonique** [32] et diélectrique. **La faible conductivité thermique du liège combinée à une raisonnable compression, font de ce matériau un excellent isolateur thermique lorsque des charges compressives sont présentes.** Sa propriété de frottement (anti-glissement) le rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées. Aujourd'hui, les produits en liège sont utilisés pour l'isolation acoustique des sous-marins et les studios d'enregistrement, tels des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu'absorbeur d'énergie dans les planchers, les chaussures et l'emballage, et naturellement comme taquets [32] ; [33].

Chêne liège (*Quercus suber* L) en Algérie

Benamirouche S et al [43] ont caractérisé géographiquement et donné quelques descriptions des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans **les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien)**. Ils ont constaté que 22 peuplements occupant une superficie totale de 1025 hectares ont été retenus [33].

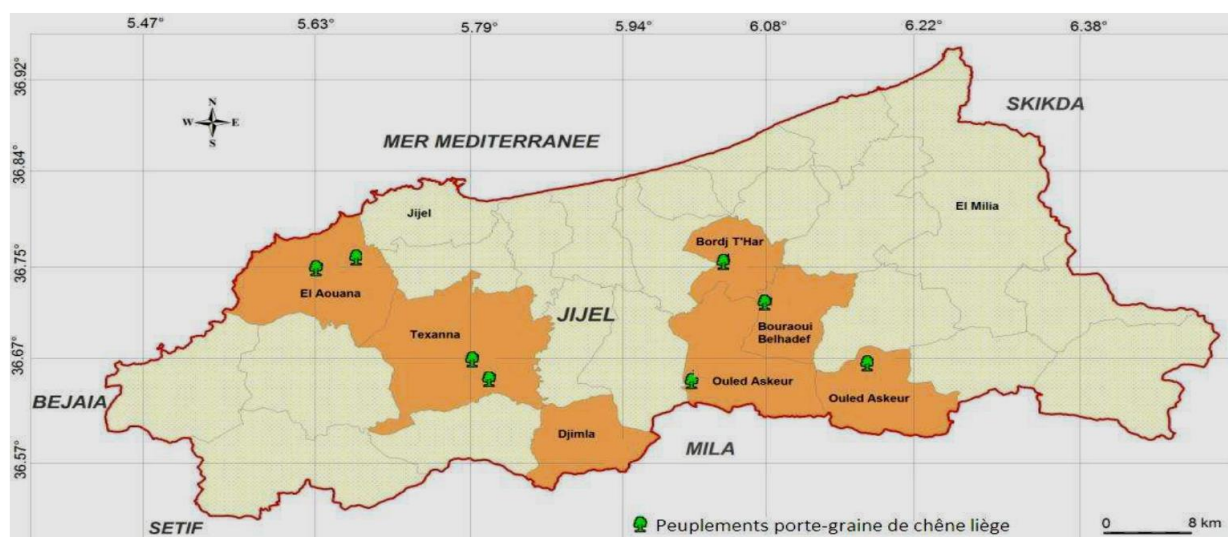


Figure 21 : Cartographie descriptif des peuplements de chêne liège au nord d'Algérie [33]

Les exportations de l'Algérie en liège et dérivés sont estimées à 4.551.603 dollars en 2017, un chiffre jugé "très faible" au vu des énormes potentialités disponibles dans ce domaine, selon le Président directeur général du Groupe GGR (groupe génie rural) à Blida, Mahfoud Boucekka, qui a fait part d'un programme mis en place par le ministère de l'Agriculture pour le relèvement de ce seuil et, partant, soutenir la relance de l'économie nationale [34].

"En dépit de son classement à la 3eme place mondiale en matière de production de liège, l'Algérie n'en exporte que 4 millions de dollars" en 2017, va-t-il indiqué, jugeant "très faible" ce chiffre, comparativement aux "énormes capacités détenues par notre pays dans ce domaine", avant de révéler un plan d'action mis en place par le ministère de tutelle, par le biais du Groupe GR, en vue de relancer cette filière et sa participation au soutien de la hausse des exportations hors hydrocarbures [34].

En 2017, l'Algérie a exporté 4.551.603 dollars de liège, dont 230.508 dollars enregistrés à l'actif du Groupe GGR et le reste assuré par des opérateurs privés, a indiqué la source, précisant qu'une grande partie des exportations dans ce domaine est représentée par des bouchons et isolants en liège [34].

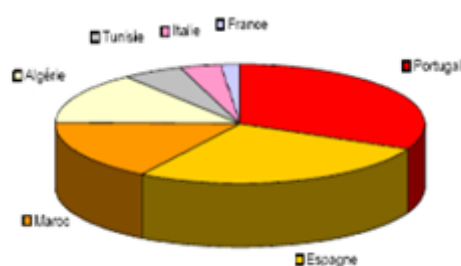


Figure 20 : Répartition mondiale des pays producteurs de liège [35]

Le liège est une ressource naturelle rare de par le monde. En effet, il est produit par sept (7) pays seulement, à leur tête le Portugal, puis l'Espagne, suivi en 3eme position par l'Algérie (avec une surface de 414 .000 ha de subéraie, soit un taux de 18% de la production mondiale), puis le Maroc, la France, la Tunisie et l'Italie [34].

La production nationale de liège a été estimée à **4.397 tonnes entre 2010 et 2017**, selon le directeur technique du Groupe, Kerrouche Yahia, qui a signalé que la part de son entreprise dans cette collecte est de 90.000 qx/an, tout en jugeant ce chiffre "très loin" par rapport à l'énorme potentiel national [34].

Ce responsable a relevé que cette richesse nationale n'est pas exploitée comme il se doit, notant que la démarche engagée par son Groupe, en vue d'une exploitation "idone" de cette ressource

naturelle était "rare et noble" et ce, à travers le soutien des entreprises relevant du Groupe, au même titre que des opérateurs privés du domaine, ceci d'autant plus, va-t-il assuré, que la demande sur le liège et ses dérivés est "en constante hausse à l'échelle mondiale " [34].

Caractéristiques physico-mécaniques du liège

Le liège est un produit de faible densité, antistatique, isolant thermique, acoustique et vibratoire. Il résiste relativement bien au feu et également à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Contrairement à la croyance populaire, le liège est inflammable au même titre que tout composé ligneux. Il est souple et se décompose lentement. On distingue deux types de liège :

- **Le liège expansé** est chauffé à haute température, gonflé d'air, ce qui le rend plus léger et plus performant en résistance thermique ;
- **Le liège brut** ne subit aucun traitement, excepté l'ébouillantage, c'est pourquoi il est qualifié de « liège naturel » à l'inverse du « liège expansé » [35].

1. Densité

La densité du liège peut varier entre **110 et 300 kg/m³ selon l'âge**, les traitements subis par le liège et la proportion de lenticelles. Cette variation serait liée également aux dimensions des cellules. En effet, une densité élevée correspondrait à des parois épaisses et lourdes, d'après Gibson et al, 1981 [36] et à des cellules de petite hauteur (15 µm). D'après Pereira, 2007e [37], cette densité peut atteindre 1250 Kg/m³ sous l'effet d'une forte compression (55 Mpa). Cette faible densité fait du liège un bon isolant thermique et acoustique. Cela permet également au liège de pouvoir être utilisé pour amortir les vibrations (chocs) [33].

2. Caractéristiques mécaniques du liège

Le liège présente plutôt des propriétés mécaniques particulières. La courbe de compression (contrainte-déformation) présente trois régions liées aux trois mécanismes responsables pour les propriétés des matériaux alvéolaires flexibles [33].

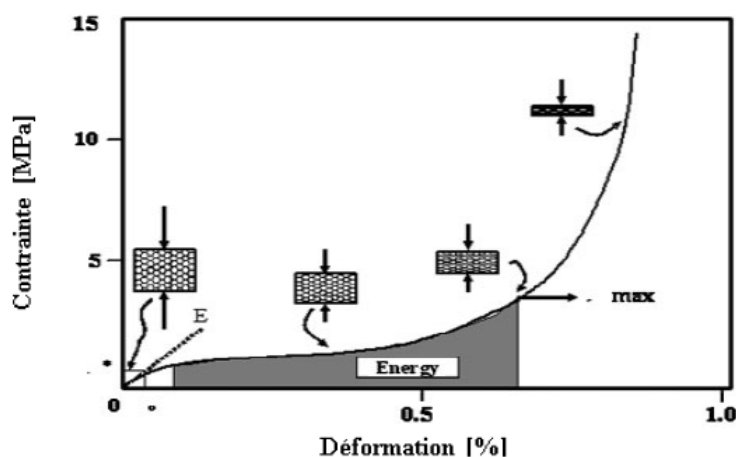


Figure 22 : Courbe contrainte-déformation de liège [33]

- **Préparation du liège**

Elle comporte essentiellement les opérations suivantes :

- 1. Ecorçage ou démasclage**

Le cycle d'exploitation du chêne liège commence tout d'abord par l'écorçage. Une première étape de sélection du produit initial est effectuée dans les subéraies. La levée du liège s'exécute manuellement selon une pratique traditionnelle à l'aide d'une hachette spéciale très tranchante. D'abord deux profondes entailles horizontales sont pratiquées, l'une à la base du tronc et l'autre en haut, puis deux entailles verticales. Les plaques de liège sont enlevées avec le manche de la hachette. Les entailles pratiquées au cours de cette étape doivent être précises, car des lésions dues à une mauvaise manipulation peuvent compromettre la qualité du produit et causer à long terme la mort de l'arbre. [38]

- 2. Triage et séchage**

Les planches de liège sont empilées à l'air libre pendant 6 à 12 mois afin de permettre au liège de s'affiner par oxydation. [38]

- 3. Bouillage**

Cette étape s'effectue pendant 45 à 90 minutes dans de l'eau. Ce nettoyage permet d'éliminer une partie des substances hydrosolubles du liège (en particulier les composés phénoliques du liège), d'augmenter son épaisseur, de réduire sa densité et d'améliorer sa souplesse. [38]

4. Stabilisation

Les plaques sont ensuite stabilisées pendant 2 à 4 semaines dans un lieu où l'aération et l'humidité sont réglables. Cette opération permet aux planches de s'aplanir, le liège sèche pour atteindre la consistance permettant la découpe. [38]

5. Deuxième bouillage

Le liège subit un tri. Les planches qui ne correspondent pas au calibre et à la qualité souhaitée sont éliminées, les autres planches sont bouillies une seconde fois, pendant environ 30 minutes, pour les rendre malléables. [38]

6. Classement

C'est la répartition des planches de liège selon leur épaisseur et leur choix. [38]

- **Propriétés du liège**

La composition et la structure du liège lui confèrent de nombreuses propriétés [38] :

3. Elasticité- Compressibilité– Souplesse. Il est comprimé rapidement dans sa limite élastique, et prend presque instantanément 85 % de son volume initial ;
4. Légèreté, sa faible densité est variable avec la qualité du liège. Elle est due à l'air contenu dans ses cellules ;
5. Adhérence, elle est permise par la force d'expansion d'une matière élastique et par la présence de micro ventouses (cellules coupées lors du cycle de fabrication) au contact des parois.
6. Imperméabilité qui est due la contre- pression exercée par le gaz des cellules
7. Durabilité. Du fait de sa faible perméabilité il résiste aux agents extérieurs.
8. Faible conductivité phonique et thermique, dû au fait que l'air reste enfermer dans ses cellules (minuscules compartiment étanches).
9. Mauvaise combustibilité car il lui faut beaucoup d'oxygène pour brûler. De plus il carbonise en surface et cette couche empêche la propagation du feu.

- **Utilisations**

Il sert traditionnellement à fabriquer des bouchons à vin ; plus de 80 % de la production de liège mondiale est utilisée pour fermer les bouteilles. Néanmoins, toutes ces propriétés, réunies dans un matériau naturel, rendent le liège précieux pour diverses applications, notamment en bio

construction. Le PVC utilisé dans les fuselages des avions a pu être ainsi remplacé par du liège qui dispose des mêmes propriétés de légèreté et d'ininflammabilité. Concassé en granulés, on le transforme en panneaux d'isolation, revêtement mural ou pour le sol. Il entre aussi dans la composition du linoléum.

Le liège est utilisé dans beaucoup d'applications de bouchages spéciaux, de semelles de chaussures, de panneaux techniques de toutes formes. Entièrement recyclable le coût de sa collecte et de son tri reste trop élevé pour qu'une filière de recyclage se développe à grande échelle malgré des initiatives locales.

Il est également utilisé dans la fabrication de certains instruments de musique de la famille des bois, notamment la clarinette, le hautbois, le saxophone, et le basson.

Les caractéristiques du liège (souple, isolant, etc.) font de lui un matériau très demandé pour l'élaboration d'articles particuliers : siège de voiture, articles de sports, canne à pêche, constituants de produits destinés à l'industrie de pointe, joints de dilatation destinés à l'industrie du bâtiment, etc.

Le liège sert aussi à la fabrication de volant de badminton, et dans le secteur de la mode, pour la fabrication de chaussures, d'accessoires et de vêtements. Depuis quelques années, il est également très utilisé dans la construction de maison écologique, pour ses excellentes performances en isolation thermique et acoustique. Il se présente en granules ou en panneau constitués de liège broyé, expansé dans des fours autoclaves ou pas. **Sa conductivité thermique (λ) est d'environ 0,04** en fonction du produit et du niveau d'expansion. Outre son utilisation comme isolant à partir de granulats ou de plaques de liège, il est désormais utilisé dans la décoration de l'habitat. Il est particulièrement apprécié pour ses qualités intrinsèques, éprouvées dans l'habitat depuis plusieurs siècles. En qualité de matériau résilient il est souple à la marche et apporte un confort au quotidien inégalé, même par les matériaux synthétiques les plus récents. Il est très utilisé dans les pays d'Europe du Nord, aux États-Unis, ainsi qu'au Japon. Il est également utilisé dans l'industrie spatiale, pour fabriquer des boucliers thermique ablatifs.

III.5.3.2. Copeaux de bois (pin, sapin, bouleau)

Des morceaux de bois de 5 à 25mm obtenus par découpage et broyage seront déshydratés, traités chimiquement [28].

III.5.4. Les matériaux légers de recyclage

III.5.4.1. Les plastiques

Il existe deux groupes de plastique, les thermodurcissables, dont le durcissement, obtenu si chaud, est irréversible, et les thermoplastiques, qui se ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent au froid de façon réversible. Les matières plastiques occupent une place importante dans l'ensemble des produits de consommation [24].

III.5.4.2. Les caoutchoucs

Composition et origine - Les caoutchoucs peuvent être utilisés dans le béton comme matériaux de substitution à la masse granulaire. La plus grande source de caoutchouc susceptible d'être recyclée est sans contredit les résidus de pneu. Les pneus représentent une excellente source d'approvisionnement pour la fabrication des bétons. Les pneus sont composés d'un mélange très complexe d'élastomères, de fibres de textiles, et de fils d'acier [24].

III.6 Domaine d'utilisation

Les domaines d'utilisation préférentiels des bétons légers sont divers, on peut les diviser en trois domaines d'utilisation ;

1. Des bétons d'isolation pure, non porteurs : leur masse volumique est faible (600 kg/m^3) de même que leur résistance à la compression (de 1,5 à 5 MPa).

Ces bétons sont utilisés principalement :

- En forme de pente isolante pour toiture-terrasse ;
 - En isolation de sols ;
 - La préfabrication des éléments architecturaux ;
 - La protection d'étanchéité sur terrasse ;
 - Chapes, plancher, dalles d'isolation ;
 - Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation ;
 - Le rattrapage de niveau.
2. Des bétons porteurs et isolants : leur masse volumique varie de $1\ 000$ à $1\ 300 \text{ kg/m}^3$ et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :
 - Des murs banchés ou préfabriqués ;

- Des blocs à maçonner ;
 - Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage ;
 - Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces ;
 - La protection contre les incendies.
3. Des bétons légers de structure, ils ont une masse volumique de 1 700 à 1 800 kg/m³ et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité.

Ces bétons sont utilisés pour :

- Ouvrage où le poids mort est important par rapport au poids total ;
- Immeuble de grande hauteur ;
- Portée importantes (poutres, voiles) ;
- Structures marines immeubles ;
- Surélévation d'immeubles existants ;
- Restauration d'anciens immeubles.

III.7 Les avantages des bétons légers

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classer en trois catégories qui sont :

III.7.1 Avantages techniques

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique ;
- Isolant : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique ;
- Non inflammable : La chape en béton léger est classée M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment ;
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique ;
- Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.
- Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur ;

- Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur ;
- Coffrages plus légers ;
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes).

III.7.2 Avantages socio-économiques

- Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau [26] ;
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations [26] ;
- Economie sur le ferrailage des éléments ;
- Le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

IV. Conclusion

Sous l'appellation "Béton léger" il existe une grande famille de matériaux très différents. D'un point de vue générale et simple, le béton léger est réalisé on diminue la masse volumique par le remplacement d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- Dans les granulats ;
- Dans la pâte de ciment ;
- Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.
- Il convient de compléter notre bibliographie centrée sur le béton de granulats légers en notant l'importance des propriétés et les caractéristiques de chaque type de granulat.
- Les caractéristiques des granulats et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.

Quant aux bétons autoplaçant on peut dire que :

Les bétons autoplaçant présentent des intérêts technico-économiques majeurs, tel que :

- La mise en œuvre sans vibration qui permet de diminuer largement le temps de la mise en place du béton sur chantier ce qui nous permet de gagner le temps lors du coulage.
- L'obtention de la planéité de la structure sans opération de surfacage.

Étude expérimentale

I. Caractérisation des matériaux utilisés

I.1. Ciment

I.2. Sable

I.3. Gravier et liège

I.4. Poudre de marbre

I.5. L'adjuvant

II. Formulations et préparation des BAP

II.1. Formulation

II.2. Préparation du béton autoplaçant

III. Caractérisation du BAP à l'état frais

III.1. Masse volumique

III.2. Essai d'étalement et t_{50}

III.3. Essai de la boîte en L

III.4. Essai de stabilité au tamis

III.5. Interprétation des résultats

IV. Caractérisation du BAP à l'état durci

IV.1 Masse volumique

IV.2. Essais non-destructifs

IV.3. Essais destructifs

IV.4. Interprétation des résultats

V. Conclusion

Introduction

Cette partie englobe la caractérisation et les différents essais physico-mécaniques effectués sur les matériaux notre béton autoplaçant de liège (ciment, sable, graviers, liège, eau de gâchage, addition, adjuvant), suivie par la formulation, la confection puis les résultats d'essais réalisés sur les bétons frais (Calcul de masse volumique, essais d'étalement au cône d'Abrams, t50, boîte en L, stabilité au tamis), en suite les résultats d'essais effectués sur nos BAP à l'état durci (Calcul de masse volumique, auscultation dynamique, essai au scléromètre, résistance à la compression, résistance à la traction). Après avoir exposé et interpréter les résultats obtenus on a clôturé le mémoire avec une conclusion générale.

I. Caractérisation des matériaux utilisés

I.1. Ciment

Le ciment utilisé est un CPJ-CEMII/A 42.5 « GICA ». Le ciment GICA est un ciment gris offrant une haute résistance initiale et finale, contenant 15% de fillers calcaires. Ses caractéristiques minéralogiques et chimiques sont regroupées dans les tableaux ci-dessous.



Figure 23 : Sac de ciment CPJ-CEMII/A GICA

Tableau 11 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ-CEMII/A GICA

Résistance(MPa)	Age		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression	10	35.4	Limite inférieure (Li) : ≥ 42.5
			Limite supérieure (Ls) : ≤ 62.5
Flexion	4.27	5.91	6.81

Tableau 12 : Caractéristiques physiques du ciment CPJ-CEMII/A GICA

Caractéristique	Valeurs	Unités
Consistance normale	27.04	%
Début de prise	> 60	Minutes
Fin de prise	~225	
Masse volumique abs	3.07	g/cm ³
Masse volumique app	1.3	
Surface spécifique (SSB)	4465	cm ² /g

Tableau 13 : Composition minéralogique du ciment CPJ-CEMII/A GICA

Phase	Eléments	Teneur(%)
Clinker	C3S	58
	C2S	16
	C3A	7
	C4AF	12
	CaO	1
Régulateur de prise	Gypse	6
Ajouts	Calcaire	17

Tableau 14 : Composition chimique du ciment CPJ-CEMII/A GICA

Eléments	Teneur(%)
SiO₂	18.47
Al₂O₃	4.63
Fe₂O₃	3.34
CaO	61.08
MgO	1.16
K₂O	0.71
Na₂O	0.40
SO₃	2.64
Chlorures	0.017
CaO libre	0.87
Insolubles	2.15
P.A.F	6.69

I.2. Sable

Le sable utilisé est un sable roulé moyen provenant de Oued Souf, les essais effectués sur ce dernier sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 15 : Caractéristiques physiques du sable Oued Souf

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Masse volumique abs</i>	2.62	g/cm ³
<i>Masse volumique app</i>	1.53	
<i>Equivalent de sable</i>	79.86	%
<i>Absorption d'eau</i>	1.4	

Tableau 16 : Analyse granulométrique du sable de Oued Souf (NF P 18-560)

<i>Ouverture des tamis(mm)</i>	<i>Masses(g)</i>		<i>Pourcentage(%)</i>	
	<i>Refus partiels</i>	<i>Refus cumulés</i>	<i>Refus Cumulé</i>	<i>Passants</i>
5	177	319	15.95	91.15
2.5	114	318	15.9	84.1
1.25	133	451	22.55	77.45
0.63	225	676	33.8	66.2
0.315	790	1466	73.3	26.7
0.16	444	1910	95.5	4.5
0.08	69	1979	98.95	1.05
<i>Ft</i>	16	1995	99.75	0.25

Note : Calcule du module de finesse du sable (NF EN 933-1) :

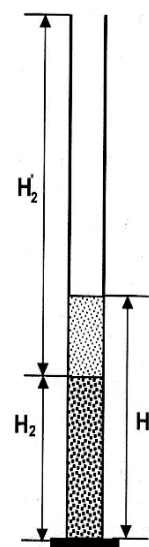
$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis} \{ 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 \} = 2.49$$

D'après ce calcul on remarque que le module de finesse du sable de Oued Souf est moyen, et ne nécessite aucune correction.

Equivalent de sable

Tableau 17 : Equivalent de sable de Oued Souf (NF EN 933-8)

	1ère prise	2ème prise
Heure de début de l'essai	15 :09	15 :12
Heure de début + 10mn	15 :19	15 :22
Heure de lecture (20mn après lavage)	15 :39	15 :42
Hauteur totale H1(cm)	9.6	9.2
Hauteur H'2(cm)	35.7	35.3
Hauteur de sable H2 (cm) (ESP=43-H'2)	43-35.7	43-35.3
Hauteur de sable H2(cm) (ESV)	7.3	7.7
ESP(%)= $100 \times H2/H1$	76	83
Moyenne(%)	79.5	



L'analyse au laboratoire nous a permis de juger que notre sable présente des caractéristiques physico-mécaniques acceptables et satisfaisantes vis à vis des spécifications de la norme NF EN 12620.

I.3. Gravier et liège

Les graviers utilisés sont des graviers naturels en provenance de la carrière de Bouzegza de fraction (3/8mm, 8/15mm), et des granulats naturels de nature végétale de liège de fraction (4/16mm) en provenance de la liègerie de Bejaia.



Figure 24 : Les différents granulats utilisés

Tableau 18 : Caractéristiques physiques des graviers et liège (NF P 18-560)

Caractéristique	Fraction	Valeurs	Unités
Masse volumique absolue	Gravier 3/8	2.63	g/cm ³
	Gravier 8/15	2.64	
	Liège 4/16	0.13	
Masse volumique apparente	Gravier 3/8	1.41	
	Gravier 8/15	1.41	
	Liège 4/16	0.0054	
Los Angeles	Graviers 3/8, 8/15	0.67	%
micro-Deval	Graviers 3/8, 8/15	26.64	
Absorption d'eau	Graviers 3/8, 8/15	0.67	
	Liège	6.66	

Tableau 19 : Analyse granulométrique du gravier (3/8) de Bouzegga (NF P 18-560)

Ouverture des tamis(mm)	Masses(g)		Pourcentage(%)	
	Refus partiels	Refus cumulés	Refus Cumulé	Passants
6.3	260.0	260.0	13.0	87.0
5	1140	1400	70.0	30.0
4	440.0	1840	92.0	8.00
2.5	100.0	1940	97.0	3.00
1.25	160.0	2000	100.0	0.00

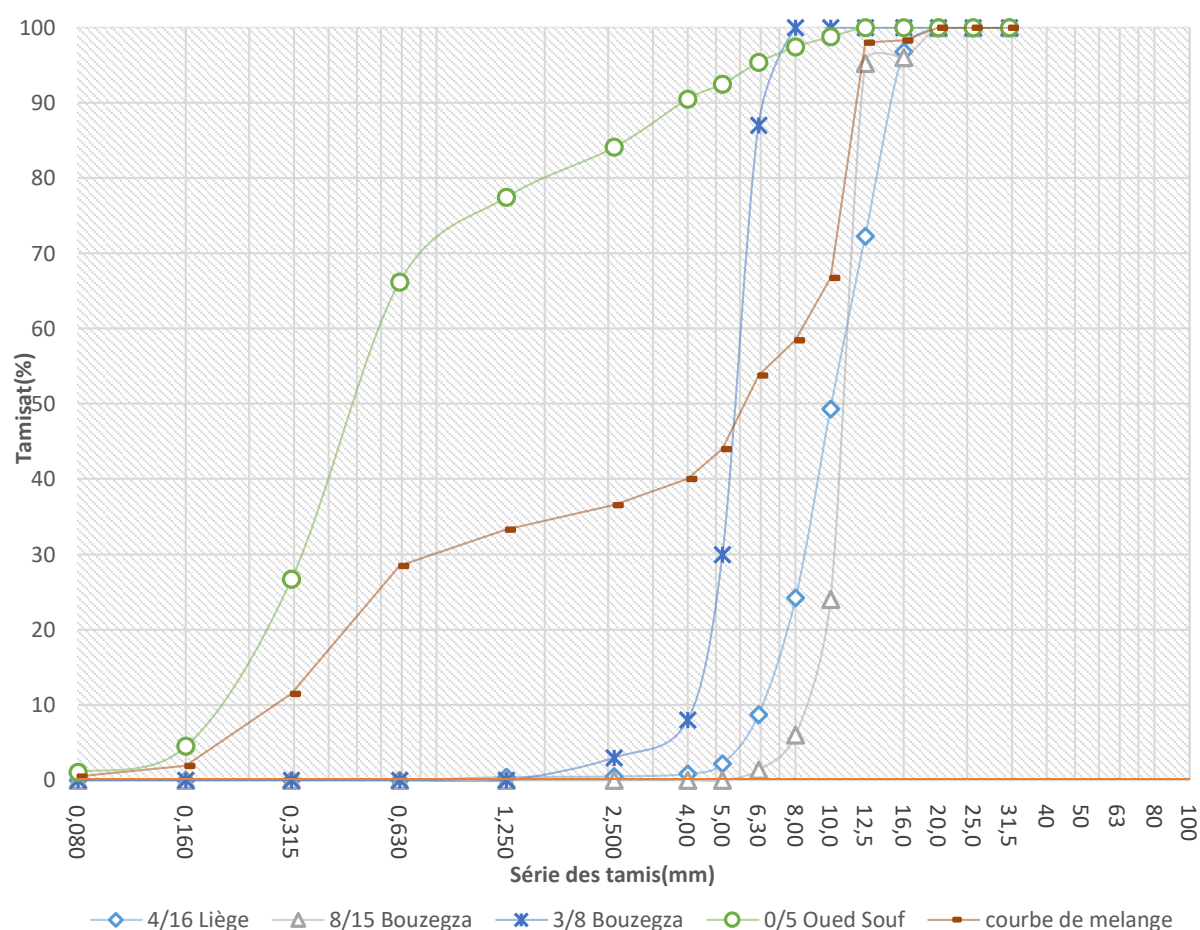
Tableau 20 : Analyse granulométrique du gravier (8/15) de Bouzegga (NF P 18-560)

Ouverture des tamis(mm)	Masses(g)		Pourcentage(%)	
	Refus partiels	Refus cumulés	Refus Cumulé	Passants
16	120.0	120.0	4.000	96.00
12.5	1300	142.0	47.33	52.67
10	860.0	2280	76.00	24.00
8	540.0	2820	94.00	6.00
6.3	140.0	2960	98.67	1.33
5	40.0	3000	100.0	0.00

Tableau 21 : Analyse granulométrique du liège (4/16) de Bejaia (NF P 18-560)

Ouverture des tamis(mm)	Masses(g)		Pourcentage(%)	
	Refus partiels	Refus cumulés	Refus Cumulé	Passants
16	11.2	11.2	3.2	96.2
12.5	85.8	97	27.7	72.3
10	80.4	177.4	50.6	49.4
8	87.8	265.2	75.7	24.3
6.3	54.4	319.6	91.1	8.9
5	22.7	342.3	97.7	0.3
4	4.8	347.1	99.1	0.9
2.5	1.2	348.3	99.6	0.4
1.25	0.3	348.6	99.6	0.4
0.63	1.4	350	100	0

Les granulats utilisés sont des granulats de bonne qualité, dont les caractéristiques physico-mécaniques répondent aux exigences de la norme NF EN 12620.

**Figure 23 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage des granulats (NF P 18-560)**

I.4. Poudre de marbre

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter le plus souvent des veines ou marbrures, dues à des inclusions d'oxydes métalliques. La poudre de marbre employée dans la composition du BAP est un sous-produit de marbrière de Tizi Ouzou ayant subie un broyage pour atteindre une surface spécifique supérieure ou égale à celle du ciment.

Dans notre travail, la poudre de marbre (figure 24) a été utilisée comme addition dans le mélange du béton afin d'augmenter son écoulement et diminuer les vides interstitiels, elle est caractérisée par une grande blancheur et pureté.



Figure 24 : Poudre de marbre broyée très finement

Les principales caractéristiques de la poudre de marbre sont :

Tableau 22 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Masse volumique app</i>	0,81	<i>g/cm³</i>
<i>Masse volumique abs</i>	2,55	
<i>Surface spécifique (SSB)</i>	4791	<i>cm²/g</i>
<i>Couleur</i>	Blanche	

I.5. L'adjuvant

Le MasterGlenium SKY 841 (figure 25) est un **superplastifiants haut réducteur d'eau**, issu de BASF Construction Chemicals, il a été développé pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises.



Figure 25 : l'adjuvat MasterGlenium SKY

Propriétés

Tableau 23 : Caractéristiques du MasterGlenium SKY 841 [39].

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Densité	$1.06 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$
pH	5.5 ± 1.8
Teneur en Chlorures	$< 0.1\%$
Extrait sec	$26 \pm 1.3\%$
Teneur en Nitrate	$< 2\%$

Effets

- Béton à faible viscosité même à faible rapport E/C ;
- Long maintien d'ouvrabilité sans retard de prise préjudiciable ;
- Béton à haute performance ;
- Optimisation des dosages en liant ;
- Bonne réactivité avec les granulats concassés ;
- Amélioration de la durabilité liée au faible E/C ;
- Pompage sur de longues distances.

Dosage

Le dosage de MasterGlenium SKY peut varier de **1.2 jusqu'à 3%** du poids de ciment soit 0.19 Litres à 2.831 Litres pour 100 Kg de ciment. Le dosage varie selon les propriétés et performances recherchées.

Mode d'introduction

L'effet optimal est obtenu par incorporation de l'adjuvant dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur.

Toutefois il est possible d'incorporer l'adjuvant dans l'eau de gâchage et il est préférable d'éviter de l'ajouter sur les granulats secs.

Domaine d'application

Cet adjuvant est recommandé pour la fabrication de béton de consistance plastique à autoplaçant nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et aux performances initiales élevées.

I.6 Eau de gâchage

Pour la confection de nos BAP de liège on a utilisé l'eau potable du robinet de la région de Oued Smar.

II. Formulations et préparation des BAP

II.1. Formulation

Pour formuler nos BAP on a opté pour la méthode japonaise citée dernièrement dans la revue bibliographique, les intervalles pour chaque constituant suivant cette méthode sont :

- Volume de la pâte est de 330 à 400 l/m³ ;
- La masse du ciment est de 450 à 600 kg/m³ ;
- Le dosage des additions cimentaires est de 10% de la masse du ciment ;
- Le rapport gravier sur sable est de ~1.

Notre base de formulation :

- Rapport G/S = 1 ;
- Rapport eau sur liant(ciment+addition) E/C+F = 0.38 ;
- Ciment 430kg ;
- Addition cimentaire 10% de la masse du ciment 43kg ;
- Le dosage de l'adjuvant est de 1.93% du poids du ciment (donné par l'essai d'étalement), et correspond a une masse de 8.29kg.

Détermination de la masse de chaque constituant

Dosage en eau : $E/C+F = 0.38$ donc $E = 0.38 \times (430+43)$

$$E = 179.74 \text{ kg} = \sim \mathbf{180 \text{ kg.}}$$

Volume de la pâte = **347 l/m³**

Volume de granulats = **675 l/m³**

Rapport G/S = **~1**

Dans ce travail de recherche, on a proposé d'étudier cinq (05) différentes compositions de béton autoplaçant :

Une composition de béton témoin à base de granulats naturels, et quatre (04) autres compositions basées sur la substitution de granulats naturels remplacés par des granulats de liège à différents pourcentages de substitution 5%, 25%, 50%, 75%...

Méthode de substitution

Afin de décider comment et combien nous allons substituer les masses des granulats naturels à échanger contre des volumes équivalents en liège on s'est référé à la courbe d'analyse granulométrique des granulats (figure 23), étant donné que la courbe d'analyse du liège 4/16mm est proche de la courbe d'analyse du gravier 8/15mm on a établi que la substitution des granulats naturels sera plus importante sur cette fraction pour but d'optimiser notre squelette granulométrique. Les pourcentages des substitutions des granulats **en volume** pour chaque formulation sont de l'ordre de 25% pour les granulats de 3/8mm, et 75% des granulats 8/15mm.

Autrement dit à titre d'exemple 100% de substitution des granulats naturels, est en réalité répartie comme suit :

$$3/8\text{mm} : 100\% - 25\% = 75\%$$

$$8/15\text{mm} : 100\% - 75\% = 25\%$$

Il y aura toujours respectivement 75% et 25% de la masse initiale des granulats restants de chaque fraction de gravier ; 3/8mm et 8/15mm, donc en réalité l'addition de ces derniers représente, 50% de la masse initiale des granulats.

Tableau 24 : Composition pour 1m³ de béton

	Témoin	BAP de liège 5%	BAP de liège 25%	BAP de liège 50%	BAP de liège 75%
Ciment(kg)	430	430	430	430	430
Eau(kg)	180	180	180	180	180
Addition(kg)	43	43	43	43	43
Sable(kg)	866	866	866	866	866
Granulats(3/8) (kg)	445	433.8	389.3	333.75	222.5
Granulats(8/15) (kg)	445	411.6	278.1	111.25	0
Liège (4/16) (kg)	0	2.09	7.65	8.34	27.79
Adjuvant(kg)	8.29	8.29	8.29	8.29	8.29
Total(kg)	2417	2375	2202	1981	1778

II.2. Préparation du béton autoplaçant

La préparation du béton autoplaçant diffère de la préparation d'un béton ordinaire, elle demande plus d'attention et de précision. Le malaxage a été effectué dans un malaxeur de grande capacité (150l).

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant sur tous les niveaux de substitution, on a procédé comme suit :

- Calculer la quantité de béton à préparer pour remplir tous les moules prévus ;
- Vérification et préparation des moules, ces derniers ont été graissés avec de l'huile afin de faciliter le démoulage ;
- Préparation des quantités nécessaires des constituants pour 35l de béton ;
- Placement des constituants dans le malaxer dans un ordre précis pour garder les particules fines du ciment en place (gravier 8/15mm, 3/8mm, ciment et addition, et enfin le sable) ;
- Mise en marche du malaxeur et l'ajout progressif de l'eau de gâchage (jusqu'à 2/3) ;
- L'ajout progressif de l'adjuvant ;
- L'ajout de dernier 1/3 de l'eau de gâchage restante ;

- Remplissage des moules (Cylindriques 16/32cm, Prismatiques 7x7x28cm, Cubique 15x15x15cm).



Figure 28 : Différentes éprouvettes de BAP réalisées

- Après un temps de 24h, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans des bassins (figure 29) à température ambiante de 20°C.



Figure 29 : Bassin de conservation du béton

III. Caractérisation du BAP à l'état frais

III.1. Masse volumique

On a déterminé la masse volumique(kg/m³) de notre béton frais à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_{\text{béton}} = \frac{m \text{ (masse du béton)}}{v \text{ (volume de l'éprouvette)}}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau 24).

Tableau 25 : Masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège à l'état frais

Type de BAP	Masse volumique(kg/m ³)
BAP Témoin	2500
BAP de liège (5%)	2375
BAP de liège (25%)	2202
BAP de liège (50%)	1981
BAP de liège (75%)	/

Les variations de la masse volumiques des différentes compositions sont présentées dans la figure 30.

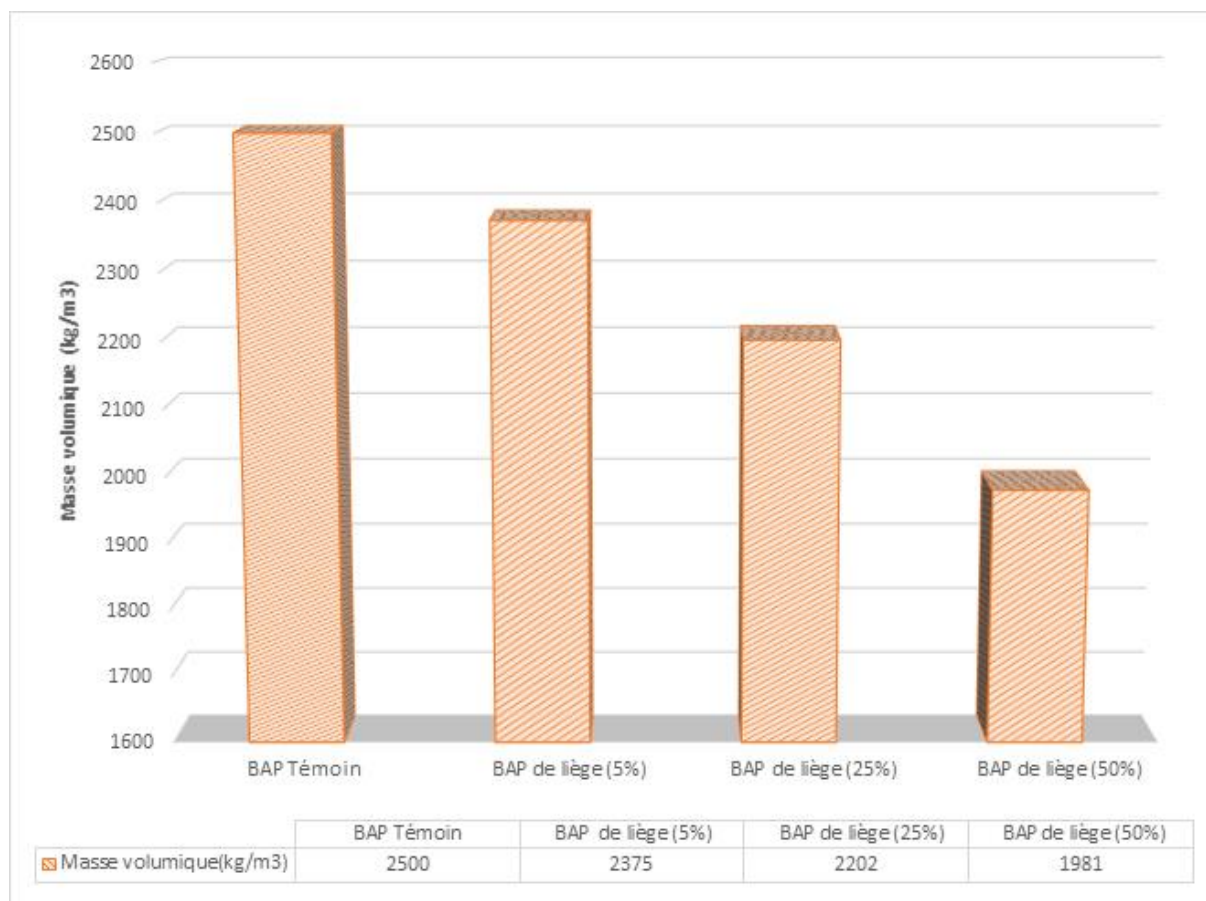


Figure 30 : Histogramme de variations des masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège à l'état frais

III.2. Essai d'étalement et t50

L'essai d'étalement au cône d'Abrams permet de voir et mesurer la mobilité du béton autoplaçant en milieu non confiné. L'essai est réalisé à l'aide du cône d'Abrams et une table métallique humidifiée et un chronomètre pour calculer le temps qu'il a fallu au béton pour parcourir 50cm sur la table. Après la levée du cône et la stabilisation du béton, on calcule le diamètre la galette formée.



Figure 31 : Essai d'étalement du BAP



Figure 32 : Calcul du diamètre de la galette après étalement du BAP

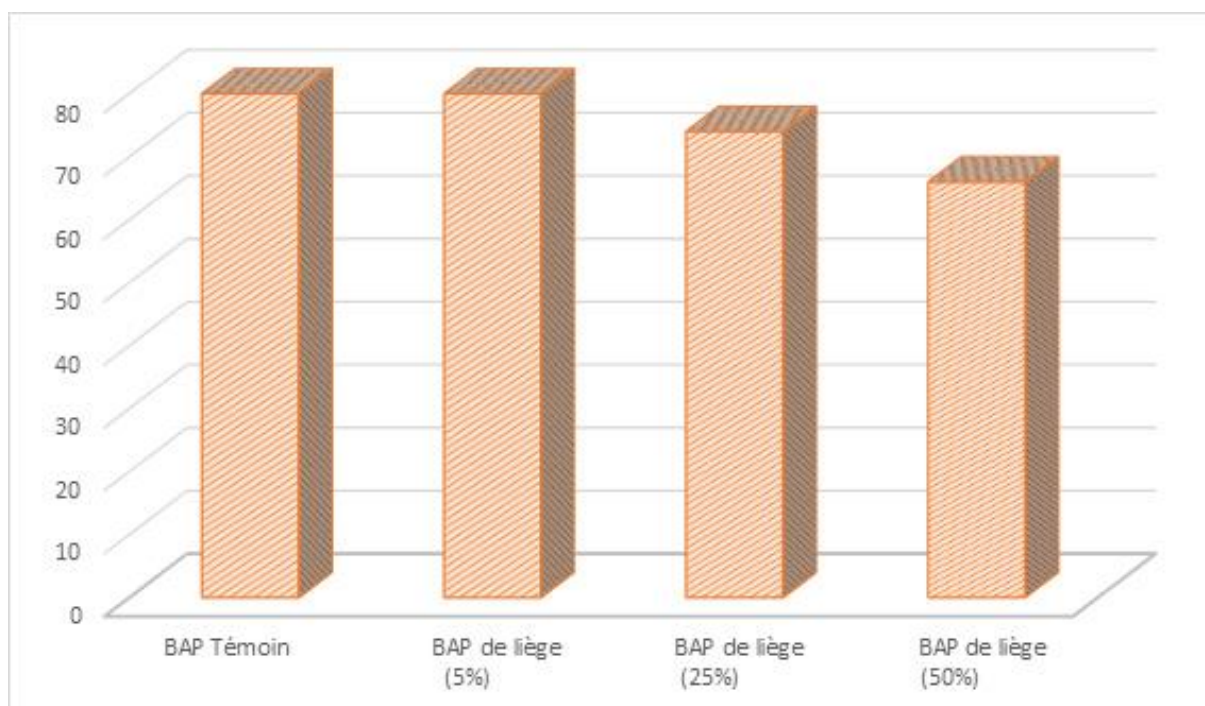
Les résultats de l'essai d'étalement et de t50 de notre BAP sont présentés dans les tableaux suivants respectivement tableau 26 et 27 de la page suivante :

Tableau 26 : Etalement des différents types de BAP

Type de BAP	Etalement(cm)
BAP Témoin	80
BAP de liège (5%)	80
BAP de liège (25%)	74
BAP de liège (50%)	66
BAP de liège (75%)	/

Tableau 27 : t50 des différents types de BAP

Type de BAP	t50(s)
BAP Témoin	1'10s
BAP de liège (5%)	1'16s
BAP de liège (25%)	1'27s
BAP de liège (50%)	2'00s
BAP de liège (75%)	/

*Figure 33 : Variations des diamètres de galette après l'étalement du BAP*

III.3. Essai de la boîte en L

Cet essai a pour but de tester la mobilité des BAP en milieu confiné pour définir une idée du comportement rhéologique du béton frais en présence d'armatures. L'essai consiste à remplir le béton frais dans la partie verticale de la boîte fermée par une trappe mobile, une fois la trappe levée on laisse le béton s'écouler sous son propre poids dans la partie horizontale de la boîte à travers trois (3) barres d'acier. Une fois le béton est inerte on mesure la différence de hauteur entre la partie verticale (H1) et la partie horizontale (H2).



Figure 34 : Essai de la boîte en L du BAP

Les résultats obtenus après cet essai sont regroupés dans le tableau 28 ci-dessous :

Tableau 28 : Rapport H2/H1 de la boîte en L

Type de BAP	Rapport H2/H1
BAP Témoin	1.00
BAP de liège (5%)	1.00
BAP de liège (25%)	0.97
BAP de liège (50%)	0.97
BAP de liège (75%)	/

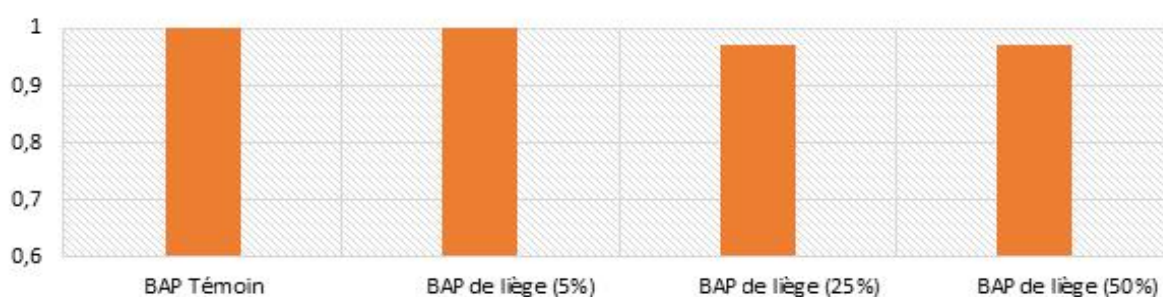


Figure 35 : Variations du rapport H2/H1 de la boîte en L

III.4. Essai de stabilité au tamis

Cet essai nous permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton, l'essai consiste à mettre une masse de béton frais (après un repos de 15 minutes du malaxage du béton) de 4.8kg sur un tamis d'ouverture de mailles 5mm. Au bout de deux (02) minutes, on pèse la masse de laitance qui a coulé du tamis. Le pourcentage de la laitance est calculé par rapport à la masse initiale de l'échantillon, puis on pourra donc exprimer la stabilité du béton.



Figure 4 : Essai de stabilité au tamis

Les résultats de stabilité au tamis des différentes compositions de BAP au tableau 29 :

Tableau 29 : Laitance des différents types de BAP

Type de BAP	Laitance(%)
BAP Témoin	10
BAP de liège (5%)	7.5
BAP de liège (25%)	6.6
BAP de liège (50%)	2.9
BAP de liège (75%)	/

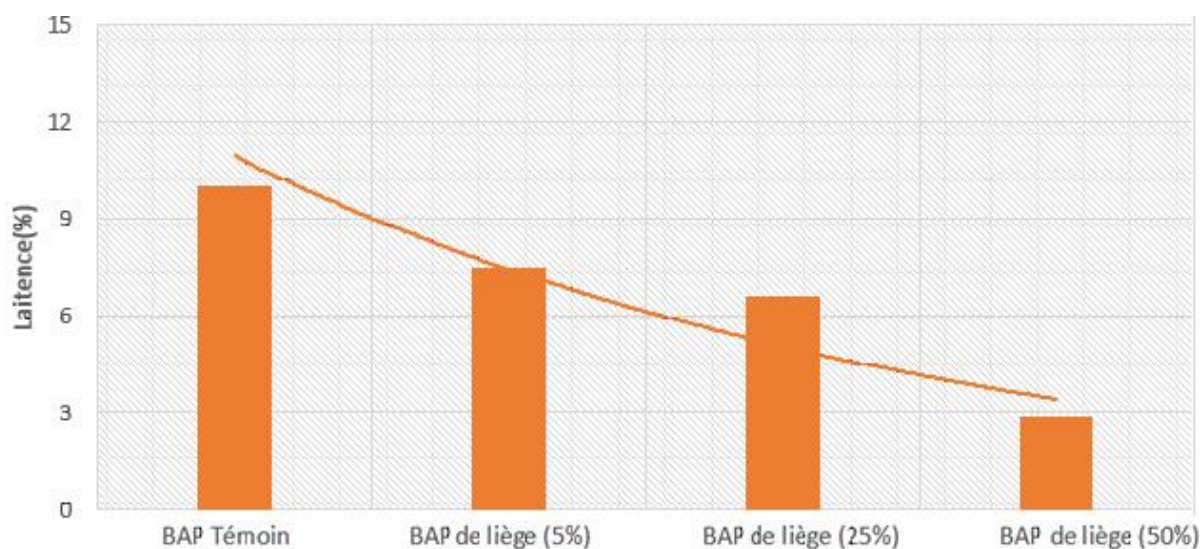


Figure 36 : Variations de la laitance du BAP

L'ensemble des résultats effectués sur le béton à l'état frais sont regroupés dans le tableau 30 suivant :

Tableau 30 : Résultats de tous les essais effectués sur différents types de BAP à l'état frais

Type de BAP	Masse volumique(kg/m ³)	Etalement(cm)	Boite en L	Stabilité au tamis
BAP Témoin	2500	80	1	10
BAP de liège (5%)	2375	80	1	7.5
BAP de liège (25%)	2202	74	0.97	6.6
BAP de liège (50%)	1981	66	0.97	2.9
BAP de liège (75%)	/	/	/	/

III.5. Interprétation des résultats

- **La masse volumique**

La substitution des granulats naturels réduit la masse volumique du béton d'une façon assez conséquente, cela est bien sûr dû aux propriétés physiques des granulats de liège contenu dans le béton, ce dernier présente une très faible densité qui est l'ordre de **vingt (20) fois** moins par rapport aux granulats naturels.

La variation de la masse volumique entre le BAP témoin et le BAP de liège (50%) est de 25%.

- **L'étalement et t50**

Nos résultats des essais d'étalement accompagné par le t50 effectué sur les différentes compositions de notre béton autoplaçant sont été présentés dans les tableaux 26 et 27 respectivement, la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 60cm et 80cm. Le temps d'étalement sur 50cm appelé t50 présenté dans le tableau 27 nous donne une idée complémentaire sur le comportement rhéologique du BAP.

Les résultats démontrent que l'accentuation du taux de liège dans notre béton agit en minimisant l'étalement, étant donné que notre granulats de liège est de nature végétale et poreuse cela conduit à une absorption plus importante de l'eau utilisée pour le gâchage (voir tableau 18 ; page 42), en effet le tout se traduit par une augmentation de la viscosité du mélange c'est-à-dire une ouvrabilité moindre.

Plus loin encore les variations de la réduction de l'étalement dans notre BAP de liège 5%, 25%, 50%, qui sont de **0%, 7.5%, 17.5%** respectivement, ne sont pas conséquente sachant que la limite minimale acceptable est de 60cm.

Les résultats confirment que toute composition confondue vérifie la condition minimale de l'étalement pour un béton autoplaçant même sur les compositions à forte présence de liège. Ce recule d'étalement est donc négligeable.

- **Boite en L**

La boite en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. L'essai de la boite en L est exploité à travers le taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond est en début de boite) qui doit en principe être supérieur à 0,8).

A travers nos résultats de l'essai de boite en L présentés (tableau 28 ; page 53), on peut déduire que notre BAP a un excellent écoulement en présence d'armatures dans le cas de toutes les compositions, témoin et celles de liège ce qui veut dire que les résultats sont parfaitement conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant.

Par ailleurs à ce niveau-là on peut dire que notre BAP de liège ne présentera **aucun problème d'ouvrabilité**, donc la mise en œuvre dans les milieux confinés et assurée.

- **Stabilité au tamis**

C'est un essai de grande importance dans les cas des bétons autoplaçant, il vise à les qualifier vis à vis du risque de ségrégation, et doit être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire.

La limite d'acceptation est directement liée à la laitance du béton qui doit être inférieure ou égale à 15%.

Notre BAP témoin et toutes les autres compositions contenant des taux de liège présentées (tableau 29 ; page 59), montrent un taux de ségrégation acceptable, c'est donc synonyme de **stabilité correcte**.

IV. Caractérisation du BAP à l'état durci

IV.1 Masse volumique

Comme à l'état frais du béton, la procédure de calcul de la masse volumique du béton est identique. Les valeurs des masses des éprouvettes de BAP sont relevées à partir des éprouvettes cylindriques, prismatiques et cubiques de chaque composition après une période de cure de vingt-huit (28) jours.

Les moyennes des masses volumiques à l'état durci de notre BAP témoin et BAP de liège sont notés sur le tableau 31 suivant :

Tableau 31 : Masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège à l'état durci

<i>Type de BAP</i>	<i>Masse volumique(kg/m³)</i>
BAP Témoin	2370
BAP de liège (5%)	2300
BAP de liège (25%)	2100
BAP de liège (50%)	1750
BAP de liège (75%)	/

Les variations des masses volumiques du BAP à l'état durci et la différence des masses volumiques à l'état frais et durci sont présentés dans les figures 37 et 38 suivantes :

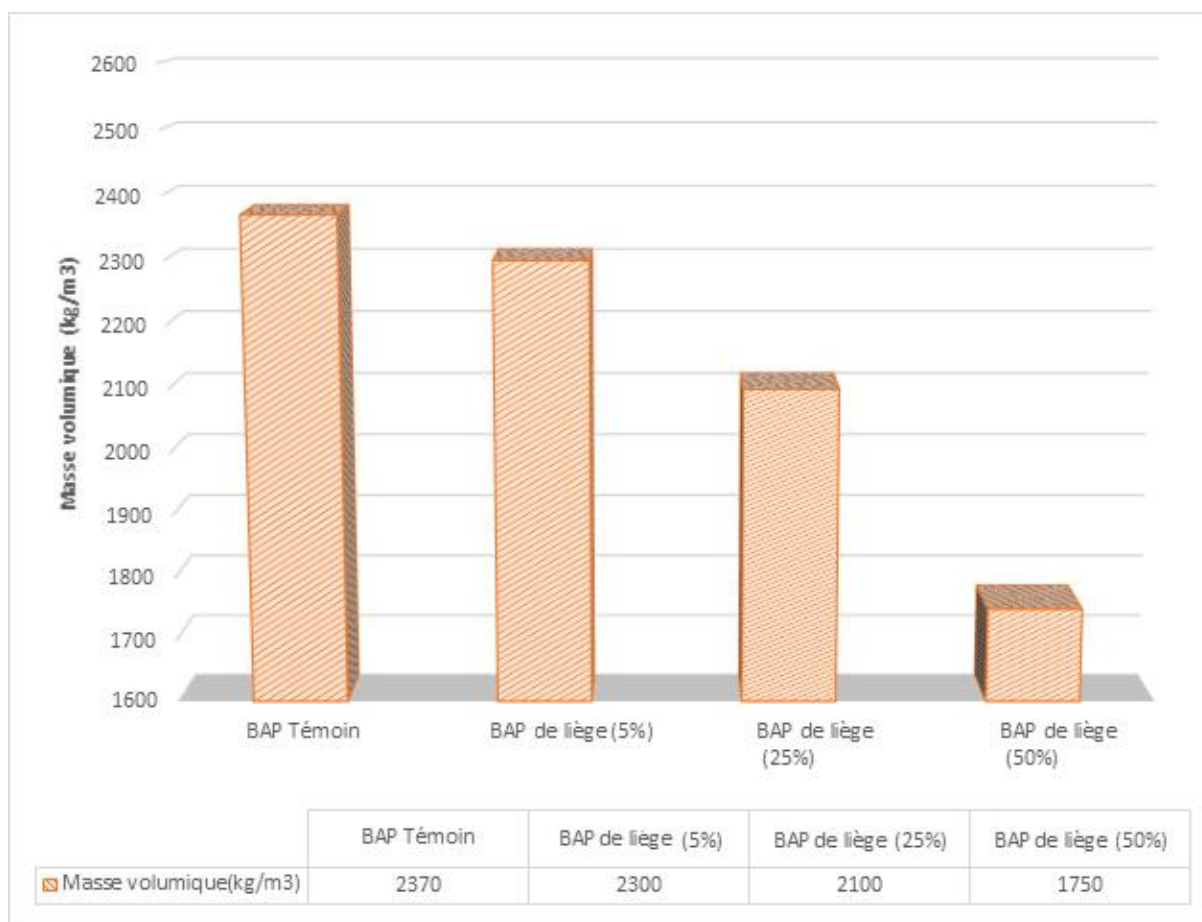


Figure 37 : Histogramme de variations des masses volumiques du BAP Témoin et BAP de liège à l'état durci

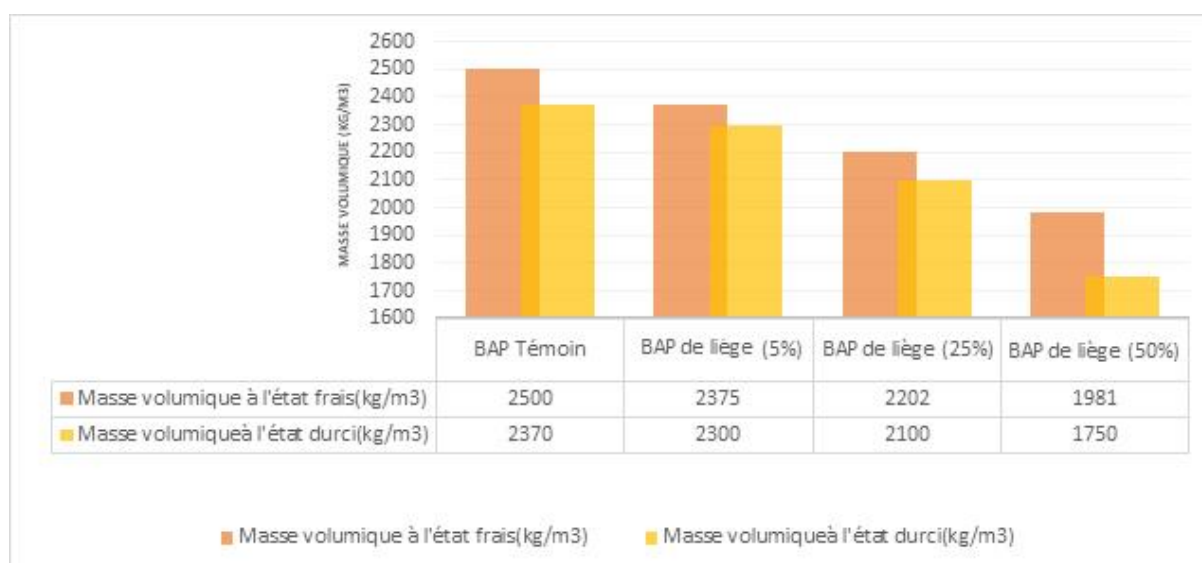


Figure 38 : Histogramme de variations des masses volumiques du BAP Témoin et BAP de liège entré l'état frais et durci

IV.2. Essais non-destructifs

IV.2.1. Auscultation dynamique

Il s'agit d'un des essais non destructifs qui a pour but de mesurer la vitesse de propagation d'ondes ultrason à travers le béton pour en déduire le taux de porosité du béton.



Figure 39 : Calcul de vitesse de propagation des ultrasons dans le béton

On a effectué l'essai (voir figure 39) sur nos différentes éprouvettes de béton après vingt-huit (28) jours de la date de gâchage, les moyennes et es variations de la vitesse de propagation des ultrasons sont présentées dans le tableau 32 et figure 40 suivantes :

Tableau 32 : Vitesse des ultrasons dans le BAP témoin et BAP de liège

Type de BAP	Vitesse des ultrason(m/s)
BAP Témoin	4705
BAP de liège (5%)	4650
BAP de liège (25%)	4090
BAP de liège (50%)	3674
BAP de liège (75%)	/

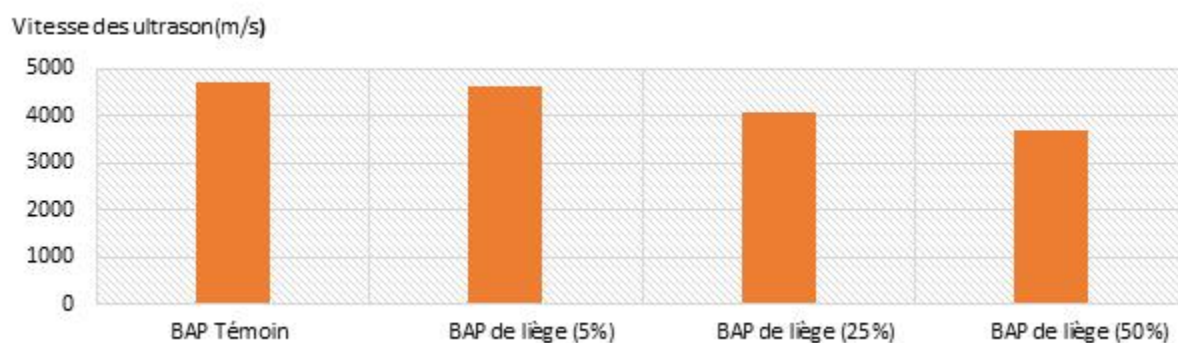


Figure 40 : Variation de la vitesse des ultrasons dans le BAP

IV.2.2. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre est un essai non destructif des plus utilisés c'est un essai facile et rapide qui nécessite peu d'efforts et de temps pour être réalisé.

On a relevé la moyenne des valeurs de l'indice sclérométrique en 15 coups sur nos éprouvettes cubiques après une période de cure de vingt-huit (28) jours de chaque composition, les résultats obtenus et leurs variations sont affichés sur le tableau 33 et la figure 41 :

Tableau 33 : Moyenne de l'indice sclérométrique du BAP témoin et BAP de liège.

Type de BAP	Indice sclérométrique	Résistance (MPa) $\pm$ 50 %.
BAP Témoin	40	40
BAP de liège (5%)	40	40
BAP de liège (25%)	35	30
BAP de liège (50%)	19	10
BAP de liège (75%)	/	/

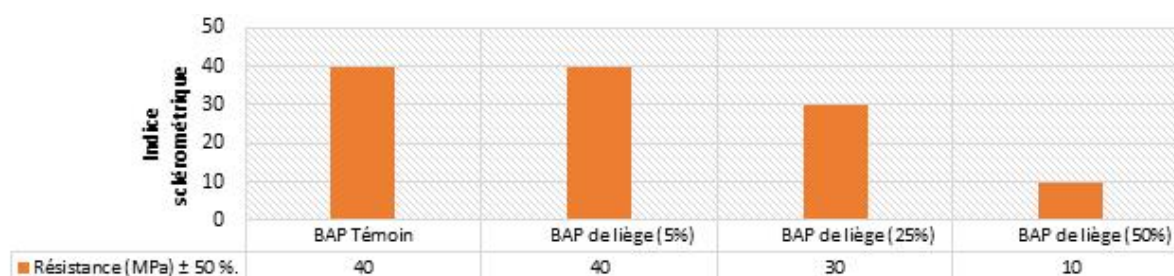


Figure 41 : Variation de la résistance par l'essai sclérométrique.

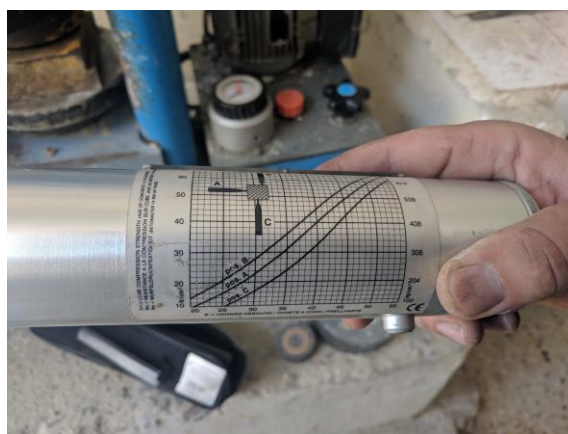


Figure 42 : Le Scléromètre

Les résistances sont déduites directement de la courbe de référence présente sur l'appareil lui-même selon la position de prise d'essais (figure 42).

IV.3. Essais destructifs

Résistances mécaniques à la compression et à la flexion

Après une période de cure de vingt-huit (28) jours on a effectué des essais de résistance à la compression sur nos éprouvettes cylindriques de dimensions 16/32cm et des essais de traction mécanique par flexion sur des éprouvettes normalisées de dimensions 7x7x28cm. Pour les deux essais les éprouvettes sont placés dans des machines qui appliquent des charges croissantes sur ces dernières jusqu'à leur rupture.

Il faut noter qu'avant d'entamer l'essai de compression axiale sur les éprouvettes cylindriques on a ajouté la poudre de soufre sur leurs facettes afin d'obtenir une surface rigoureuse pour une bonne répartition des forces. Les moyennes de résultats obtenus et leurs variations sont présentées dans le tableau 34 et la figure 43 suivante :

Tableau 34 : Résistances à la compression et à la traction par flexion du BAP témoin et BAP de liège.

Type de BAP	Résistance à la compression(MPa)	Résistance à la traction par flexion(MPa)
BAP Témoin	27.17	7.29
BAP de liège (5%)	26.44	6.68
BAP de liège (25%)	19.41	6.41
BAP de liège (50%)	6.08	4.38
BAP de liège (75%)	/	/

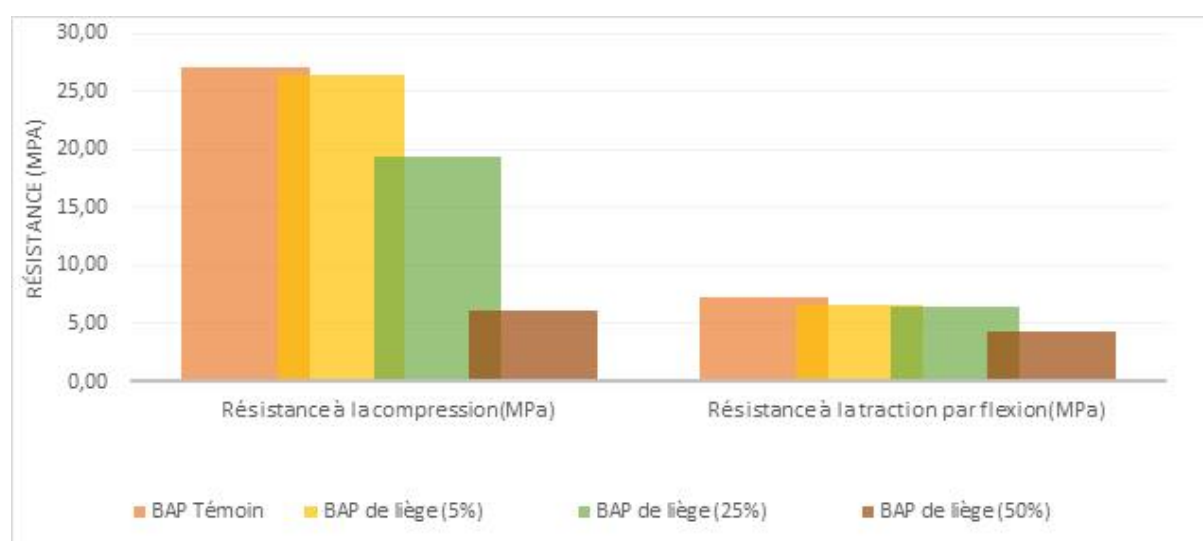


Figure 43 : Histogramme de variation de résistances à la compression et à la traction par flexion du BAP témoin et BAP de liège.

Mode de rupture



Figure 44 : Epreuve cylindrique endommagée du BAP témoin

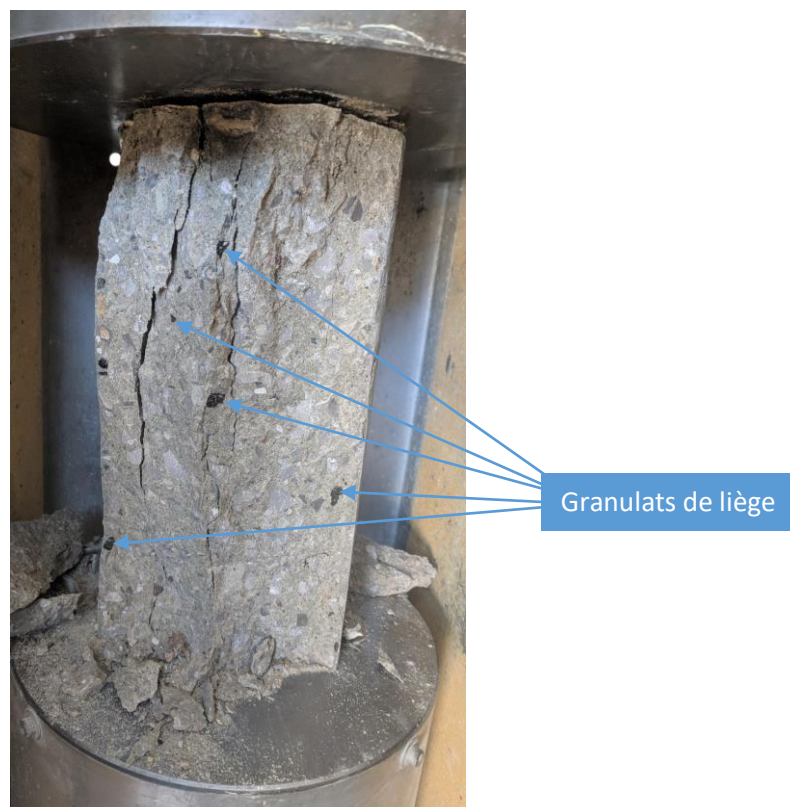


Figure 45 : Epreuve cylindrique endommagée du BAP de liège 5%



Figure 46 : Eprouvettes cylindrique endommagée du BAP de liège 25%



Figure 47 : Eprouvettes cylindrique endommagée du BAP de liège 50%



Figure 48 : Eprouvettes prismatiques endommagées du BAP



Figure 49 : Eprouvettes prismatiques endommagées du BAP témoin et BAP de liège (5%, 25%, 50%) de gauche à droite



Figure 50 : Faces supérieures des éprouvettes prismatiques endommagées du BAP témoin et BAP de liège (5%, 25%, 50%) de gauche à droite

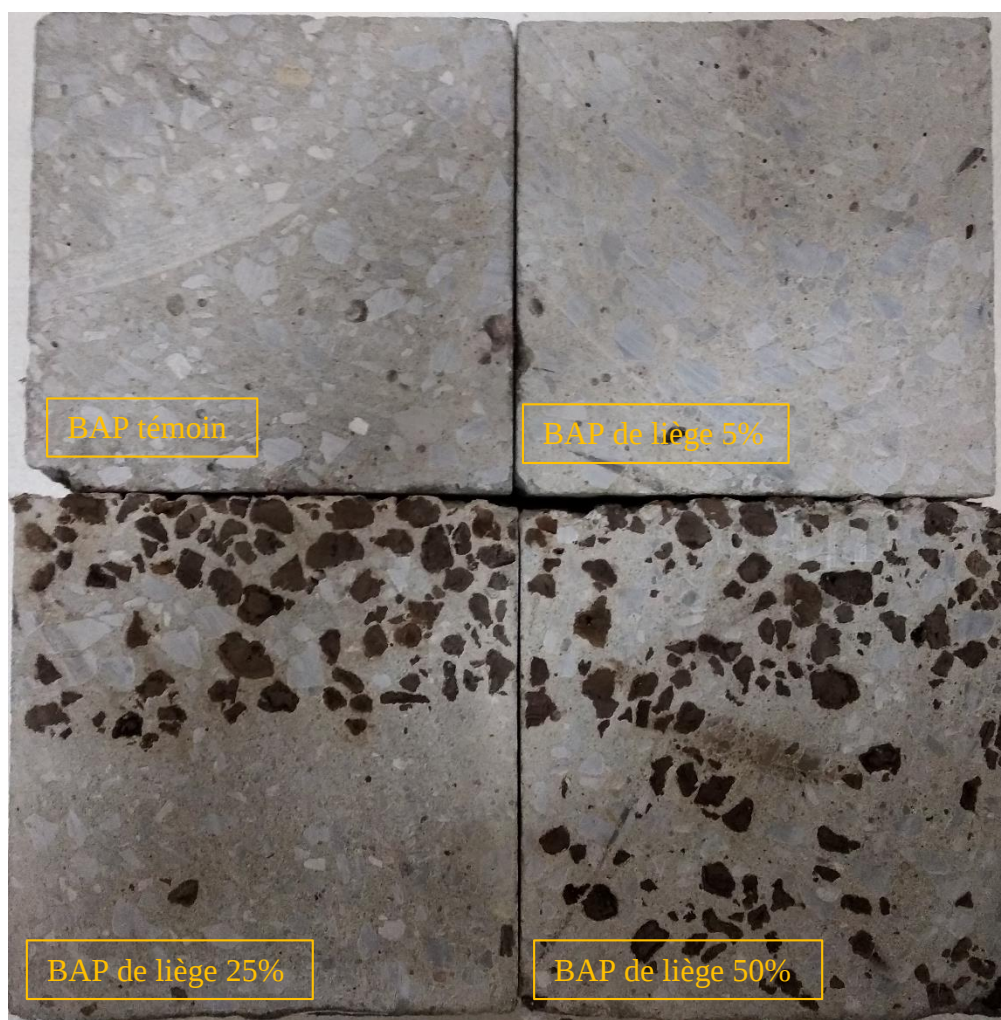


Figure 51 : Facettes des éprouvettes cubiques coupées du BAP témoin et BAP de liège

IV.4. Interprétation des résultats

- **La masse volumique**

L'histogramme de variations des masses volumiques du BAP témoin et BAP de liège entre l'état frais et durci (figure 38 ; page 58) montre des valeurs inférieures des masses volumiques à l'état durci du béton par rapport à l'état frais, chose normale, cette variation est due au départ de l'eau contenue dans le béton au moment de gâchage et à très jeune âge, les variations pour les compositions de BAP témoin et BAP de liège (5%, 25% 50%) **reculent respectivement** par, **5.2%, 3.15%, 4.63%, 11.66%** ; au sujet de la composition de BAP de liège (50%), la forte variation de la masse volumique entre l'état frais et durci est sûrement due au taux élevé de présence de granulats de liège qui présentent une absorption d'eau plus importante (voir tableau 18 ; page 42).

- **Auscultation dynamique**

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Il est difficile d'avoir une idée nette et précise sur les résistances mécaniques partant seulement de l'essai d'auscultation dynamique car notre BAP de liège des caractéristiques physico-mécaniques peu connues, et qu'il y a bon nombre de paramètres qui peuvent influencer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, par ailleurs on cite : le type de ciment, le dosage en ciment, la nature des granulats, la granulométrie, l'humidité du béton, la maturité du béton, les adjuvants, la porosité. C'est pour cette raison que pour exemple dans les procès-verbaux du CNERIB, seuls les appréciations suivantes sont données :

- Classements qualitatifs :

$2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,

$3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,

$3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,

$V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

D'après nos résultats et leurs variations (voir tableau 32, figure 40 ; page 59), en se référant au classement qualitatif ci-dessus il nous ait suggéré que toutes nos compositions tendent vers un béton de haute résistances mécaniques voir très hautes résistances, sachant les valeurs de résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion (tableau 34 ; page 61), on dit que les vitesses des ultrasons est directement influencée par **la faible porosité du BAP** (toute composition confondue) ce qui en effet permet une propagation plus rapide car la compacité du béton favorise le mouvement des ondes ultrasoniques. Ce comportement pour des bétons courant est synonyme d'une très grande résistance, or ce n'est pas le cas dans certaines de nos compositions de BAP de liège notamment les deux (02) compositions 25% et 50%.

- **Essai au scléromètre**

L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués [26], mais ne permet pas de corréler directement la dureté de surface à la résistance à la compression du béton dans la masse. L'essai peut être utilisé pour vérifier

si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton à des valeurs qui sont à $\pm 50\%$.

Les moyennes d'indices sclérométrique de nos compositions de BAP citées dans le (tableau 33 ; page 60), **ne sont nullement une mesure fiable** de la résistance du béton compte tenu des paramètres influant la précision de détermination de cette résistance, car les valeurs obtenues font allusion à des résistances bien plus élevées que celles obtenues par les essais de résistances mécaniques (voir tableau 34 page ; 61).

- **Résistances mécaniques à la compression et à la flexion**

Prenant compte des résultats de l'écrasement à 28 jours cités dans le tableau 34 et dans l'histogramme de variation de résistances à la compression et à la traction par flexion de nos compositions de BAP, on remarque une forte variation entre les deux extrémités de nos formulations notamment la composition du BAP témoin et BAP de liège (50%), la variation drastique dans le cas de l'essai d'écrasement des éprouvettes cylindriques de ces deux derniers qui est de l'ordre de **77%**.

Cette diminution des résistances est directement proportionnelle aux taux de liège présent dans chacune des compositions qui ont subi des substitutions de granulats naturels, en effet cette chute de performances mécaniques est expliquée dans les points suivants :

- La très faible dureté et résistance des granulats de liège ;
- Friabilité des granulats de liège ;
- Le mode de rupture incorrect des éprouvettes cylindriques (voir figures 46, 47 ; page 63) ;
- La mauvaise distribution des granulats de liège dans la matrice qui ont tendance à monter à la surface lors de la confection des éprouvettes surtout dans les compositions de BAP de liège (5%, 25%), (voir figures 46, 47, 49, 50, 51 ; pages 63-65).

Toutes les compositions de BAP de liège, présentent des résistances plus faibles par rapport au BAP témoin, affichant des **pertes de résistance** de **2.68%**, **28.56%**, **77%**, d'après l'essai de résistance à la compression, et des **pertes de résistances** de **8.36%**, **12.07%**, **39.91%** dans le cas de l'essai de traction par flexion par rapport au BAP témoin.

V. Conclusion

L'étude de plusieurs compositions distinguées chacune des autres par le dosage de granulats de liège qu'elles contiennent ont donné des résultats visant à estimer et quantifier le comportement physico-mécanique de nos BAP notamment, l'étalement et t_{50} , la boîte en L, la résistance à la ségrégation à l'état frais, puis les essais destructifs résistance à la compression et à la traction par flexion et non destructifs l'auscultation dynamique et l'essai au scléromètre à l'état durci.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail a été de formuler et de caractériser le comportement physico-mécanique d'un béton autoplaçant par le remplacement progressif de granulats naturels par des granulats de liège ce qui a donné des résultats tantôt prévisibles et imprévisibles intéressants.

Les résultats de la caractérisation des matériaux choisis pour nos formulations de BAP, et les essais qui ont suivi après leur gâchage à l'état frais et durci nous ont permis de dire que :

- L'analyse granulométrique des granulats de liège présente des courbes continues proches de celle d'un granulat naturel ;
- Les formulations de toutes nos compositions de BAP par la méthode japonaise ont donné des résultats de caractérisation satisfaisants ;
- L'augmentation de la teneur de liège est inversement proportionnelle aux valeurs d'étalement des BAP, mais ce n'est nullement une fatalité vis-à-vis la norme ($>60\text{cm}$), nos BAP offrent toujours une excellente ouvrabilité ;
- Les masses volumiques à l'état frais et durci du béton affichent une diminution proportionnelle au taux de liège dans les compositions ;
- Toutes les compositions réussies de nos BAP de liège ont montré une stabilité correcte (laitance $<10\%$) ;
- L'essai d'auscultation dynamique n'a pas été concluant pour toutes les compositions, spécialement celles de 25% et 50% de liège par rapport aux résistances mécaniques que les valeurs de vitesse d'ultrasons suggèrent ;
- L'ensemble des compositions à base de liège BAP présente des résistances mécaniques plus faibles par rapport au BAP témoin, voire très faibles pour le BAP à base de liège (50%) comparées à celle du BAP témoin.
- A l'état durci la masse volumique des BAP témoin et BAP de liège (50%), ont été respectivement de l'ordre **de 2370 à 1750 kg/m³** ce qui veut dire que on peut classer notre BAP à base de liège comme **béton léger** car sa masse volumique est **inférieure à 1800 kg/m³**.

Enfin on estime que ce genre de BAP de liège peut d'une façon être utilisé dans le domaine génie civil et servir à :

- La construction d'éléments non structuraux ;
- Le coulage de formes géométriques complexes, hautement ferrillées ou difficilement accessibles ;
- Confectionner des éléments pour une construction préfabriquée ;
- Aux travaux d'isolation thermique, phonique ou acoustique ;
- Au remplissage dans les murs, plafonds ou sols.

Références Bibliographiques

- [1] : **Khayat, K. H.** *Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating Concrete.* ACI Materials Journal, 1999.
- [2] : **Okamura, H. et Ouchi, M.** *Self-Compacting Concrete.* Journal of Advanced Concrete Technology, 2003.
- [3] : **Domone, P. L.** *Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies.* Cement and Concrete Composites, 2006.
- [4] : **ACI 237 R.** *Self-consolidating concrete*, 2007.
- [5] : **Sihem CHEKIREB.** *Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant.* Université de Sherbrooke, Canada. 2015
- [6] : **Sedran, T. et de Larrard, F.** *RENE - LCPC - Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de Génie Civil.* Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1994
- [7] : **Bonen, D. et Shah, S. P.** *Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete.* Progress in Structural Engineering and Materials, 2005
- [8] : **Hwang.** *Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications*, 2006.
- [9] : **Hanehara, S. et Yamada, K.** *Rheology and early age properties of cement systems.* Cement and Concrete Research, 2008.
- [10] : **Kim, B., Jiang, S., Jolicoeur, C. et Aõ, P.** *The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste*, 2000.
- [11] : **Papo, A. et Piani, L.** *Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes.* Cement and Concrete Research, 2004.
- [12] : **Papo, A., Piani, L. et Ricceri, R.** *Sodium tripolyphosphate and polyphosphate as dispersing agents for kaolin suspensions : Rheological characterization.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2002.
- [13] : **Ghezal, A.** *Modélisation statistique du comportement des bétons autoplaçants & optimisation.* Université de Sherbrooke, 1999.

- [14] : **Maher El Barrak**. *Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais*, Université de Sherbrooke, 2005.
- [15] : **Brahim Safi**. *Formulation et caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaires et mortiers autoplaçant*, 2012.
- [16] : **Aouifi Mourad**. *Formulation et caractérisation des propriétés rhéologiques et physico-mécanique d'un béton autoplaçant université de Boumerdès*, 2006.
- [17] : **Mohamed Rissel Khalifa**. *Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçant*, Université de Constantine, 2009.
- [18] : **Ainouche D, Benabdellah N**. *Influence du couple marbre – brique sur les propriétés des BAP*, Université de Boumerdès, 2013.
- [19] : **Krim Med R. et Hadj S.**, *Etude de comportement rhéologique de BAP en fonction de l'agent de viscosité*, Université de Boumerdès, 2008.
- [20] : **Rabbouh N**. *Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant*, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [21] : **Difallah Y**. *Les essais non destructifs sur le béton*, Université de Biskra, 2003.
- [22] : **Benkhalfa B**. *Contribution à l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués*. Université d'Annaba, 1988.
- [23] : **Contant M**. *Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux*, Université du Québec, 2000.
- [24] : **Herihiri O**. *Formulation et caractérisation des bétons légers*, Université de Biskra, 2010.
- [25] : **Shink M**. *Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers*, Université Laval Québec, 2003.
- [26] : **Neville A**. *Propriétés des bétons*, 2000.
- [27] : **Dreux G., Festa J**. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Bouquin, 1998.
- [28] : **Caillard B**. *Les bétons de granulats légers*, article sur internet www.maconnerie.bilp.fr, 2017.
- [29] : **Gil L**. *Cortiça: produção, tecnologia e aplicação* », Lisbon, INETI, 1998.

- [30] : **Costa A. Pereira H., Oliveira A.** *Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production*, 2003.
- [31] : **Barberis A., Dettori S., Filigheddu M.R.** *Management problems in Mediterranean corkoak forests post-fire recovery*, 2003.
- [32] : **Gil L., Moiteiro C.** *Cork*, *Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology*, 2003.
- [33] : **Lakreb N.** *Élaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage*, Université de Boumerdès, 2015.
- [34] : **APS.** *Filière liège en Algérie : un plan ambitieux pour le relèvement des exportations*, Algérie Presse Service, article sur internet www.aps.dz, 2018.
- [35] : *Le liège noir expansé pur*, description produit, www.bejaialiege.com.
- [36] : **Gibson L.J., Easterling K. E., Ashby M. F.** *The structure and mechanics of cork*. 1981.
- [37] : **Pereira H.** *Density and moisture relations of Cork*, 2007.
- [38] : **Nassima S.** *Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation*, Université de Constantine, 2010.
- [39] : **BASF Construction Chemicals**, *fiche technique MasterGlenium SKY 84*, 2018.