



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



**Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : Mahboubi Imane Djahida et Khalfi Mohamed**

**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : GENIE CIVIL**

**OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL**

## **Thème**

**ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES D'UN  
COMPOSITE EN PLATRE A BASE DE DECHETS EN  
PLASTIQUE RECYCLE**

**Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mme. Bendjillali Khadra	MCA	Présidente
Mme. Merghoub Messaouda	MAA	Examinatrice
Melle. Djoudi Amina	MCB	Encadreur
Mr. Bouziani Tayeb	MCA	Co-encadreur

**Promotion : Juin - 2018**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon très cher père*

*A celle qui a veillé sur moi toujours, ma chère mère,*

*A mes frères : (Ahmed, Allal).*

*A toute ma famille (mes tantes, mes oncles)*

*A mon binôme : Khalfi Mohamed.*

*A Tous ceux qui me connaissent.*

*Imane Djahida.*

## *Dédicaces*

*Je dédié ce modeste travail :*

*A l'âme de mon père.*

*A ma chère mère qui a toujours crue en moi et en mes études,*

*A mes chères sœurs.*

*A mon frère: Mustapha.*

*A toute ma famille (mes tantes et mes oncles)*

*A mon binôme Imane qui n'a pas cessé de m'encourager tout le temps et sa respectueuse famille.*

*A toute ma promotion de Génie Civil 2017/2018.*

*A tous mes amis : Mohamed sghir , Rabie , Walid , Ayoub , bakker, ,othmane ,djamel , younes , Farouk ,Elias , Ahmed ,Wahid.*

*A Tous ceux qui me connaissent.*

*Mohamed.*

## **Remerciements**

**N**ous remercions avant tout Allah de nous avoir gardé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

**N**ous exprimons toute notre profonde gratitude à **Melle Djoudi Amina**, nôtre promotrice et notre Co-promoteur **Monsieur Bouziani Tayeb**, de nous avoir fait confiance pour mener à bien ce présent travail. Nous témoignons également nos profondes reconnaissances pour l'aide qu'ils nous ont apporté, pour leurs conseils et leur soutien indéfectible tout au long de ce travail.

**N**ous remercions également Mme. **Bendjillali Khadra** d'avoir accepté de présider nôtre jury.

**N**ous remercions aussi Mme. **Merghoub Messaouda** d'avoir accepté d'examiner notre mémoire.

**N**os vifs grands remerciements et notre sincère gratitude à **Monsieur Ferhat Ahmida** pour son appui pendant la réalisation des essais thermiques au niveau du laboratoire de recherche de génie civil à l'université d'Amar Thelidji à Laghouat.

**N**ous souhaitons également exprimer nos plus sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil et à toute l'équipe de soutien de laboratoire de génie civil pour tout l'effort qui ont fait à bien mener nôtre formation et notre projet de fin d'étude.

**E**nfin nous tenons à remercier, tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour réaliser ce travail et en particulier **Mr Attiat Aissa** agent technique chargé de bibliothèque de nous avoir mis a notre disposition toute la documentation nécessaire.

**Khalfi Mohamed / Mahboubi Imane Djahida**

## عنوان المذكرة: دراسة الخصائص الفيزيائية-الميكانيكية لمركب الجص القائم على النفايات البلاستيكية المعاد تدويرها

المؤطر: جودي امينة  
المؤطر المساعد: بوزياني الطيب

الاسم: إيمان جهيدة  
الاسم: محمد

اللقب: محبوبي  
اللقب: خالفي

### ملخص

تدخل هذه الدراسة في إطار التنمية المستدامة و التي تتركز على تثمين واستغلال الموارد المحلية و بعض المخلفات الصناعية الصلبة لتطوير مواد بناء الخاصة ، يتمحور هذا العمل حول دراسة إمكانية استخدام الجص ورمل الكثبان وكذلك النفايات البلاستيكية المعاد تدويرها في مجال مواد البناء. يتم تحليل ومقارنة الخصائص الفيزيائية-الميكانيكية (الكثافة ، الانكماش ، المقلومة الميكانيكية ، المسامية) والحرارية (الموصلية، الانتشارية، الحرارة النوعية) للخلطات المنجزة من خلال تطبيق النمذجة الرياضية على أساس النهج الإحصائي. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها التأثير الإيجابي لإدخال نفايات بلاستيكية لتخفيف الخرسانة الجصية ، وتحسين العزل الحراري والانكماش (عند نسبة  $E / P$  منخفضة) ، خاصة مع إدخال الرمال التي تزيد من هذه الخصائص. ومع ذلك ، فإن إدخال النفايات يؤثر سلبًا على المسامية ومقاومات الميكانيكية .

**الكلمات المفتاحية:** الجص، نفايات بلاستيكية، رمل الكثبان، الخصائص الفيزيائية ، الخصائص الميكانيكية و الخصائص الحرارية .

### Memory title: Study of The physico-mechanical properties of a plaster composite based on recycled plastic waste

Name : Mahboubi

First name : Imane

Directed by : Djoudi Amina

Name : Khalfi

First name : Mohamed

Co- Directed by : Bouziani Tayeb

### Abstract

This study enter within the framework of suistnabale development that focused on the exploitation and utilization of local resources as well as certain solid industrial wastes for the development of special building materials. This work is conducted to study the potentialities of using plaster and sand dunes, as well as recycled plastic waste in the field of building materials. The physic-mechanical (density, shrinkage, mechanical strength, porosity) and thermal properties (conductivity, diffusivity, specific heat)s of the different mixtures made are analyzed and compared by applying mathematical modeling based on a statistical approach.

The results obtained show the beneficial effect of the introduction of plastic waste for the lightening of plaster concrete, the improvement of thermal insulation and shrinkage (at low  $E / P$  ratio), especially with the introduction of sand that increases these properties. Nevertheless, the introduction of the waste adversely affects the porosity and the mechanical strengths.

**Key words:** Plaster, plastic wastes, dune sand, physical properties, thermal properties, mechanical properties.

### Titre du mémoire : Etude des propriétés physico-mécaniques d'un composite en plâtre à base de déchets en plastique recyclés

Nom : Mahboubi

Prénom : Imane

Encadreur : Djoudi Amina

Nom : Khalfi

Prénom : Mohamed

Co-encadreur : Bouziani Tayeb

### Résumé

Cette étude entre dans le cadre du développement durable, elle est axée sur la valorisation et l'exploitation des ressources locales ainsi que certains résidus industriels solides pour la mise au point de matériaux de construction spéciaux. Ce travail est mené sur l'étude des potentialités d'utilisation de plâtre et de sables de dunes, ainsi que les déchets en plastiques recyclés dans le domaine des matériaux de construction. Les propriétés physico-mécaniques (la densité, le retrait, la résistance mécanique, la porosité) et thermiques (la conductivité, la diffusivité, la chaleur spécifique) des différents mélanges réalisés sont analysées et comparées en appliquant une modélisation mathématique basée sur une approche statistique. Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique de l'introduction des déchets de plastique pour l'allègement du béton de plâtre et l'amélioration de l'isolation thermique et du retrait (à faible rapport  $E/P$ ), notamment avec l'introduction du sable qui augmente ces propriétés. Néanmoins, l'introduction du déchet affecte négativement la porosité et les résistances mécaniques.

**Mots clés :** Plâtre, plastiques, sable de dunes, propriétés physiques, propriétés thermiques et propriétés mécaniques.

## Liste des figures

### Chapitre 1

Figure I. 1. Images de gypses naturelles : (a, d) Gypse rose des sables, (b) gypse en fer de lance, (c, e) gypse.....	4
Figure I. 2. Albâtre et Sélénite. ....	4
Figure I. 3. Mécanisme de formation de gypse au milieu marin lagunaire. ....	5
Figure I. 4. Cristallisation du Gypse. ....	6
Figure I. 5. Projection de la structure du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ par WOOSTER en 1936. ....	7
Figure I. 6. Images MEB des plâtres Prestia obtenues respectivement par voie humide ( $\alpha$ ) et voie sèche ( $\beta$ ). ....	7
Figure I. 7. Photos prises au MEB des deux formes de semi-hydraté. ....	8
Figure I. 8. Réactions chimiques de déshydratation du gypse par la chaleur. ....	10
Figure I. 9. Exploitation à ciel ouvert .....	14
Figure I. 10. carrières de gypse souterrain. ....	14
Figure I. 11. Fabrication de gypse à proximité du carrière - encyclopédie d'Alembert. ....	15
Figure I. 12. Charrette apportant du gypse devant le four de Romainville.....	15
Figure I. 13. Bateau à plâtre sur les quais de seine à Paris.. ....	16
Figure I. 14. Extraction du gypse à ciel ouvert. ....	16
Figure I. 15. Concassage du gypse.....	17
Figure I. 16. Four de cuisson du gypse. ....	18
Figure I. 17. Schéma de la déshydratation du gypse.....	20
Figure I. 18. Étapes de fabrication du plâtre. ....	22
Figure I. 19. des éléments Préfabriqués de décoration. ....	26
figure I. 21. Plaques de plâtre avec isolant polystyrène.....	26
Figure I. 20. plaques de plâtre.....	26
Figure I. 22. carreaux de plâtre hydrofuge pour réaliser des cloisons. ....	27
Figure I. 23. Disposition des éléments préfabriqués à base de plâtre. ....	27
Figure I. 24. l'influence de rapport E/C sur la densité de plâtre. ....	30
Figure I. 25. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques. ....	31

## Chapitre 2

Figure II. 1. Classification des bétons légers d'après Lafarge. ....	35
Figure II. 2. Représentation schématique des différents types de béton légers. ....	36
Figure II. 4. Cathédrale de rue Sofia, Turquie. ....	38
Figure II. 6. Pont du Gard, built in ca. A.D. ....	38
Figure II. 3. Babylone, Irak. ....	38
Figure II. 5. Église romain. ....	38
Figure II. 7. Pierre ponce. ....	39
Figure II. 8. OPS. ....	39
Figure II. 9. Diatomite. ....	39
Figure II. 10. Laitier volcanique. ....	39
Figure II. 11. Schiste expansé. ....	40
Figure II. 12. Argile expansée. ....	40
Figure II. 13. Laitier refroidi à l'air, Cendre volante, Laitier expansé. ....	40
Figure II. 15. Granulats en caoutchouc. ....	41
Figure II. 14. Polystyrène. ....	41
Figure II. 17. Variation de la masse volumique de BPLPE, $D = 4\text{mm}$ en $\text{kg/m}^3$ . ....	47
Figure II. 16. Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R- ....	47
Figure II. 18. Variation de la résistance à la flexion de BPSLPE en fonction de pourcentage de PSE. ....	48
Figure II. 19. Variation de la résistance à la compression de BPSLPE en fonction de pourcentage de PSE. ....	49
Figure II. 20. variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition plâtre + copeaux de bois a l'âge de 28 jours. ....	50
Figure II. 21. variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition plâtre + copeaux de bois a l'âge de 28 jours. ....	50
Figure II. 22. Trois types de porosité présente dans les matériaux. ....	52
Figure II. 23. Variation de conductivités thermiques $\lambda$ en fonction de pourcentage de polystyrène. ....	55
Figure II. 24. Bouteilles en PET. ....	59
Figure II. 25. composition chimique de PET. ....	59
Figure II. 26. Les citernes en (PEBD) ....	60

Figure II. 27. Les emballages en Polyéthylène. ....	60
Figure II. 28. Les sachets en plastique. ....	60
Figure II. 30. composition chimique de PS. ....	61
Figure II. 29. Les billets de PS. ....	61

### Chapitre 3

Figure III. 1. Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut. ....	65
Figure III. 2. Espace expérimental pour deux facteurs. ....	65
Figure III. 3. Représentation d'une réponse dans un espace expérimental. ....	66
Figure III. 4. Domaine d'étude défini par l'expérimentateur. ....	66
Figure III. 5. Surface de réponse formée par les points expérimentaux. ....	67
Figure III. 6. Exemple d'une représentation schématique d'un plan composite avec deux facteurs. ....	68
Figure III. 7. Plâtre utilisé. ....	72
Figure III. 9. Diffractogramme du plâtre. ....	74
Figure III. 8. Diffractomètre de rayons X de l'UATL. ....	74
Figure III. 10. Diffractogramme de gypse. ....	75
Figure III. 11. Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue du plâtre. ....	76
Figure III. 12. Dispositif pour l'essai de récipient et entonnoir à trépied. ....	77
Figure III. 13. Récipient standard. ....	77
Figure III. 14. Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge. ....	79
Figure III. 15. Diffractogramme aux rayons X du sable de dune. ....	81
Figure III. 16. Vu général (à grande échelle, MEB.) du sable de dune. ....	82
Figure III. 17. Détermination de la masse volumique absolue. ....	83
Figure III. 18. Détermination de l'équivalent de sable. ....	84
Figure III. 19. Détermination du coefficient d'absorption. ....	85
Figure III. 20. Appareillage pour l'analyse Granulométrique par tamisage. ....	85
Figure III. 21. Courbes granulométriques de sable de dune. ....	86
Figure III. 22. Les étapes du recyclage des granulats. ....	87
Figure III. 23. Déchets du plastique utilisé. ....	87

Figure III. 24.Détermination masse volumique absolue des déchets.....	88
Figure III. 25.Appareillage pour l'analyse granulométrique. ....	89
Figure III. 26.Courbes granulométriques des déchets en plastique. ....	90
Figure III. 27.La chaux utilisé.....	90
Figure III. 28.Les procédures du malaxage. ....	93
Figure III. 29.Moules utilisés pour l'essai mécanique.....	94
Figure III. 30.Moules utilisés pour l'essai de variation dimensionnelle.....	94
Figure III. 31.Détermination de la masse volumique. ....	94
Figure III. 32.les pores connecté et fermé.....	95
Figure III. 33.Schématisation du dispositif de flexion 3 points. ....	97
Figure III. 34.Schématisation du dispositif de compression.....	98
Figure III. 35.Appareillage pour la mesure du retrait. ....	99
Figure III. 36.Appareil de retrait utilisé. ....	99
Figure III. 37.Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.....	101
Figure III. 38.Dispositif expérimental pour la mesure de la caractéristique.....	102
Figure III. 39.Vue d'une sonde Hot disc.....	102

## Chapitre 4

Figure IV. 1.Donne un exemple de variation de masse volumique en fonction de S/P et de D/P (pour E/P=0.6).....	111
Figure IV. 2.Variation de la résistance a la compression en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P.....	112
Figure IV. 3.Variation de la résistance a la flexion en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P.....	113
Figure IV. 4.Variation de la porosité accessible a l'eau en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P.....	114
Figure IV. 5.Variation de la conductivité thermique en courbes isoréponses, en fonction de S/P et D/P.....	115
Figure IV. 6.Variation de la diffusivité en courbes isoréponses, en fonction de S/P et D/P (pour E/P=0,6). ....	116
Figure IV. 7. Variation de la chaleur spécifique en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P (pour E/P=0,6). ....	117

Figure IV. 8 .Variation dimensionnelle en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P (pour E/P=0,6) .....	118
Figure IV. 10. Profileur de prévision du retrait. ....	118

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

Tableau I. 1. Différences entre les sulfates de calcium semi hydratés $\alpha$ et $\beta$ . .....	8
Tableau I. 2. Phases de déshydratation du gypse. ....	9
Tableau I. 3. Production mondiale de gypse, 2010-2011. ....	11
Tableau I. 4. Exploitations de gypse en Algérie. ....	12
Tableau I. 5. Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate ..	28

### Chapitre 2

Tableau II. 1. Classification fonctionnelle des bétons légers. ....	34
Tableau II. 2. Classification des bétons légers selon la norme ACI 211.3R-87. ....	34
Tableau II. 3. Choix des granulats en fonction des classes de béton .....	42
Tableau II. 4. Les principales caractéristiques des bétons légers. ....	45
Tableau II. 5. Variation de la résistance à la compression béton de liège BPLLEE3/8 en MPa. ....	49
Tableau II. 6. Variation de la résistance à la flexion béton de liège BPLLEE3/8 en MPa. ....	49
Tableau II. 7. Caractéristiques de quelques bétons légers. ....	51
Tableau II. 8. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre $>2 \mu\text{m}$ . ....	52
Tableau II. 9. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux. ....	54

### Chapitre 3

Tableau III. 1. Valeurs de k (Goupy, 2006). ....	69
Tableau III. 2. Analyse chimique du plâtre. ....	73
Tableau III. 3. Finesse des plâtres de construction. ....	78
Tableau III. 4. Finesse de mouture du plâtre. ....	78
Tableau III. 5. Temps du début de prise et de la fin de prise de plâtre pour chaque E/p .....	80
Tableau III. 6. Temps du début de prise et de la fin de prise des plâtres. ....	80
Tableau III. 7. Propriétés mécaniques du plâtre sur des éprouvettes $4*4*16 \text{ cm}^2$ .....	80
Tableau III. 8. Analyse chimique du sable. ....	81
Tableau III. 9. Résultats de l'essai de L'équivalent de sable de dune. ....	84
Tableau III. 10. Analyse granulométrique du sable de dune. ....	86

Tableau III. 11. Analyse granulométrique des déchets plastiques.....	89
Tableau III. 12. Analyse chimique de la chaux. ....	91
Tableau III. 13. Composition chimique de l'eau de gâchage [A.D.E. Laghouat].....	91
Tableau III. 14. Formulation des bétons de plâtre à base des déchets en plastique.....	92

#### **Chapitre 4**

Tableau IV. 1. Niveaux des facteurs retenus. ....	104
Tableau IV. 2. Proportions et résultats d'essais. ....	104
Tableau IV. 3. La formule de centre .....	105
Tableau IV. 4. Résultats des essais. ....	106
Tableau IV. 5. Coefficients et paramètres des modèles des réponses (en valeurs codées). ....	108
Tableau IV. 6. Coefficients et paramètres des modèles des réponses (en valeurs codées).(suite).....	109
Tableau IV. 7. Analyse de la variance des réponses.....	110

## Table des matières

<b>1. Dédicaces</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Remerciements</b> .....	<b>4</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>ii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>vii</b>
<b>3. Table des matières</b> .....	<b>ix</b>
<b>4. Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Chapitre 1 : Généralités sur le plâtre</b> .....	<b>3</b>
1.1. Introduction.....	3
1.2. Plâtre.....	3
1.2.1. Matière première.....	3
1.2.2. Différentes Origines de plâtre.....	3
1.2.3. Formation du gypse.....	5
1.2.4. Formes du gypse.....	5
1.2.5. Structure du gypse et plâtre.....	6
1.2.6. Différentes phases du système (CaSO <sub>4</sub> - H <sub>2</sub> O).....	7
1.2.7. Phases de déshydratation du gypse.....	9
1.2.8. Production du gypse.....	10
1.2.9. Mode d'Exploitation du gypse.....	13
1.2.10. Fabrication du plâtre à partir du gypse.....	14
1.2.11. Recyclage de plâtre.....	22
1.2.12. Domaines d'utilisation de plâtre.....	22
1.2.13. Types des plâtres.....	24
1.2.14. Eléments Préfabriqués à base de plâtre.....	26

1.2.15.	Propriétés physiques et mécaniques du plâtre.....	28
1.3.	Conclusion.....	32
<b>2.</b>	<b>Chapitre 2 : les Bétons légers.....</b>	<b>33</b>
2.1.	Introduction .....	33
2.2.	Béton léger .....	33
2.3.	Domaine d'utilisation.....	36
2.3.1.	Bétons d'isolation pure, non porteurs .....	36
2.3.2.	Bétons porteurs et isolants .....	36
2.3.3.	Bétons légers de structure .....	37
2.4.	Types des bétons légers.....	37
2.4.1.	Bétons de granulats légers .....	38
2.4.2.	Béton cellulaire .....	44
2.4.3.	Bétons caverneux .....	46
2.5.	Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques Des bétons de granulats légers	46
2.5.1.	La masse volumique .....	46
2.5.2.	La rhéologie à l'état frais.....	46
2.5.3.	Le comportement et performances mécaniques.....	47
2.5.4.	La sensibilité à l'eau .....	51
2.5.5.	L'absorption.....	52
2.5.6.	Les propriétés thermiques .....	53
2.5.7.	La durabilité .....	54
2.5.8.	Autres propriétés du béton léger .....	55
2.6.	Les avantages des bétons légers .....	56
2.6.1.	Avantages techniques : .....	56
2.6.2.	Avantages de mises en œuvre .....	56
2.6.3.	Avantages Economiques .....	56

2.7.	Les inconvénients des bétons légers .....	57
2.8.	Béton Léger à base des granulats en plastique recyclé .....	57
2.8.1.	Matériaux légers de recyclage .....	57
2.8.2.	Types de matière plastique.....	59
2.8.3.	Propriétés des matières plastiques .....	61
2.8.4.	Granulats recyclées de sac de plastique .....	63
2.9.	Conclusion.....	63
<b>3.</b>	<b>Chapitre 3 : Matériaux et méthodes expérimentales utilisés.....</b>	<b>64</b>
3.1.	Introduction .....	64
3.2.	Méthode de plan d'expériences.....	64
3.2.1.	Introduction.....	64
3.2.2.	Notion d'espace expérimental .....	64
3.2.3.	Plan pour surface de réponse (plan composite) .....	67
3.2.4.	Modélisation mathématique.....	71
3.3.	Essais de caractérisation des matériaux utilisés .....	72
3.3.1.	Plâtre .....	72
3.3.2.	Sable de dune .....	80
3.3.3.	Déchets en plastique recyclé.....	87
3.3.4.	Chaux .....	90
3.3.5.	Caractérisation de l'eau de gâchage.....	91
3.4.	Formulation .....	92
3.4.1.	Mise en œuvre.....	93
3.5.	Les essais de caractérisation du béton durci.....	94
3.5.1.	Caractéristiques physiques.....	94
3.5.2.	Caractéristiques mécaniques .....	97
3.5.3.	Caractéristiques thermiques .....	100
3.6.	Conclusion.....	102

<b>4. Chapitre 4 : Résultats et interprétations .....</b>	<b>103</b>
4.1. Introduction .....	103
4.2. Préparation de l'étude .....	103
4.2.1. Choix des réponses .....	103
4.2.2. Choix des facteurs.....	104
4.2.3. Composition de la formule du centre.....	105
4.3. Résultats des essais.....	106
4.3.1. Modèles mathématiques.....	107
4.3.2. Analyse de la variance .....	110
4.3.3. Présentation des résultats .....	111
4.4. Conclusion.....	119
<b>5. Conclusions Générales .....</b>	<b>120</b>
<b>6. Références bibliographiques.....</b>	<b>122</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>127</b>
6.1. Annexe A : Cinétique de variation de la masse volumique et du retrait.....	127
6.2. Annexe B : Aspect et distribution granulaire du déchet dans le béton de plâtre	129

## Introduction générale

Le monde de la construction est un secteur clé dans l'activité économique. La construction en Algérie est confrontée aujourd'hui à deux exigences à priori contradictoires qui sont la réduction des coûts d'une part et l'amélioration de la qualité d'autre part. Par ailleurs, les grandes quantités des déchets résultants quotidiennement des différents travaux industriels constituent une gêne environnementale et soulèvent des problèmes difficiles à résoudre. Or, la réutilisation de ces déchets dans la construction pourra résoudre un double problème : d'un part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de la construction.

Le plâtre, qui est un matériau familier dans le domaine de la construction avec ses qualités reconnues dans le monde, peut entrer en concurrence avec le ciment, où ce dernier n'est pas supprimé totalement, mais utilisé rationnellement dans les parties sensibles à l'eau où nous devons rigidifier l'ossature, telle que les fondations et les chaînages. Afin d'améliorer certaines propriétés physico-mécaniques du plâtre, on a introduit le sable de dune qui occupe plus de 60 % de la superficie de l'Algérie. Dans la mesure où les caractéristiques mécaniques restent suffisantes, l'idée d'utiliser des granulats en plastiques recyclés comme facteurs d'allègement est une proposition aussi intéressante, non seulement de point de vue économique mais également environnemental. C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux.

Enfin, ce modeste travail est une contribution à la valorisation des déchets de plastiques comme granulats et de sable de dunes afin de produire un béton de plâtre léger avec des propriétés thermiques et mécaniques améliorées. Pour appuyer notre travail expérimental, nous avons appliqué une modélisation statistique afin d'établir des modèles mathématiques reliant les facteurs étudiés (variation des rapports sable/plâtre, déchet plastique/plâtre et eau/plâtre) aux différentes réponses trouvées (masse volumique, retrait, résistances mécaniques et propriétés thermiques). Ces modèles ont une grande utilité pour mettre en évidence l'effet de chaque facteur séparément et les effets croisés ou quadratiques des facteurs.

Dans l'objectif de mettre en œuvre un béton léger pouvant acquérir des performances thermo-mécaniques appréciables et qui peut être utilisé comme blocs ou panneaux préfabriqués, on a divisé notre travail en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on va étudier le plâtre, ses propriétés et ses applications traditionnelles et modernes.

Le deuxième chapitre donne des généralités sur les bétons légers.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés, techniques expérimentales, présentation de la méthode des lois d'expériences et la formulation des composites en plâtre.

Le dernier chapitre présente l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus lors de cette étude.

En fin une conclusion générale sur l'étude élaborée, des recommandations et des perspectives à prendre en considération dans les futures recherches.

## Chapitre 1 : Généralités sur le plâtre

### 1.1. Introduction

Le plâtre a été découvert depuis l'antiquité, 9000 ans environ avant J.C. Il est alors utilisé comme enduit (extérieur et intérieur) [1, 2]. Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons). C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu [3].

La poudre sèche de plâtre produite par la déshydratation thermique du gypse, roche naturelle ou sous-produit de certaines industries (artificiel), qui est un sulfate de calcium hydraté de formule  $\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$  [4].

### 1.2. Plâtre

#### 1.2.1. Matière première

La matière première désigne le matériau d'origine naturelle qui est l'objet d'une transformation artisanale ou industrielle. Des études récentes permettent d'avoir des connaissances assez larges sur le plâtre notamment sur sa matière première et son élaboration. En effet le plâtre est obtenu à partir du gypse. Il en existe deux types : le gypse naturel et le gypse de synthèse [5].

#### 1.2.2. Différentes Origines de plâtre

##### 1.2.2.1. Origine naturelle

La Pierre de plâtre de la famille des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau, est un sulfate de calcium qui se trouve dans la nature sous forme de deux structures:

##### A- L'anhydrite

Assez rare, où sulfate de calcium anhydre répondant à la formule chimique  $\text{CaSO}_4$ .

##### B- Le gypse

La pierre à plâtre (sulfate de calcium à deux molécules d'eau), hydraté très abondante, qui répond à la formule chimique  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ . Ce qui correspond à 79.07% de Sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) associé à 20.93% d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). C'est un fragment pur que l'on retrouve dans la nature. Il est formé d'éléments chimiques qui se sont mis ensemble et qui donnent un minéral pur. Les minéraux se regroupent ensemble ensuite pour former une roche

sédimentaire appelée pierre à plâtre présente des propriétés cristallographiques, chimiques et physiques [6].

Les images des **Figures I.1** et **I.2** montrent ses multiples présentations physiques:

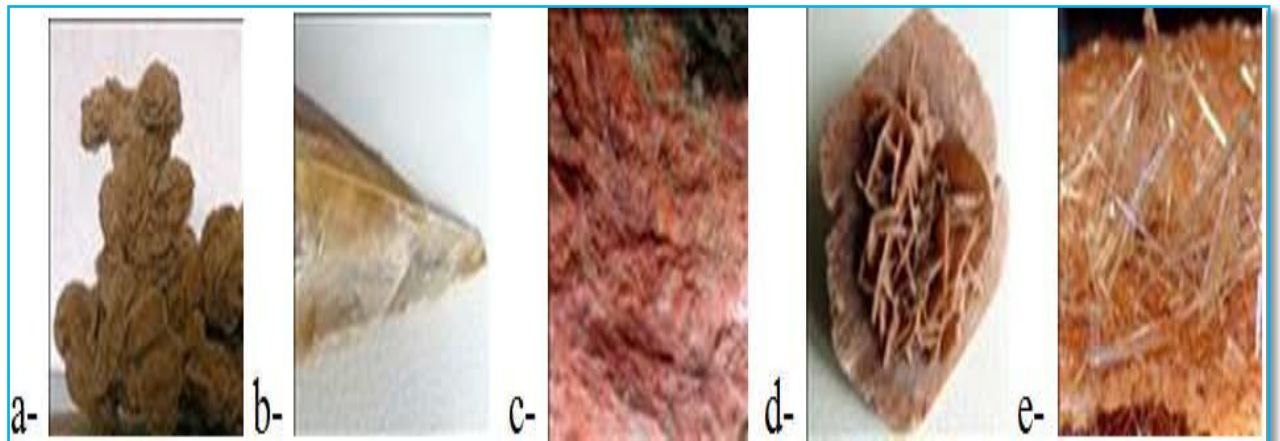


Figure I. 1. Images de gypses naturelles : (a, d) Gypse rose des sables, (b) gypse en fer de lance, (c, e) gypse. [5].



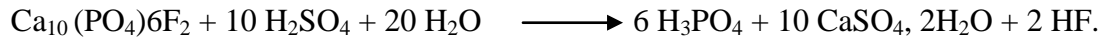
Figure I. 2. Albâtre et Sélénite [7].

### 1.2.2.2. Origine artificielle

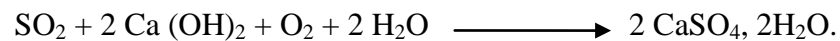
#### A. Gypse de synthèse

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont:

- La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) par attaque sulfurique du phosphate naturel :



- La fabrication d'autres acides minéraux (acide borique, acide fluorhydrique) ou organiques : (acide citrique, tartrique, etc....).
- La fabrication de l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) conduit également à une production de gypse appelé titanogypse.
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydrite sulfureux  $\text{SO}_2$  (énanhydrite sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux, produit un gypse appelé désulfogypse [1] :



### 1.2.3. Formation du gypse

Le gypse est une roche sédimentaire évaporitique. Il se forme au niveau des lagunes et parfois des lacs salés des régions semi-arides (ex : Lacs du salar d'Uyuni en Bolivie). Dans les deux cas, de l'eau salée se retrouve piégée temporairement sans alimentation en eau douce (**Figure I.3.**)

L'eau va alors s'évaporer rapidement. Ceci entraîne le dépôt des sels ( $\text{Ca}^{++}$ , sulfates) qui étaient dissous dans l'eau. On le classe donc, d'un point de vue chimique, dans les sels [7].

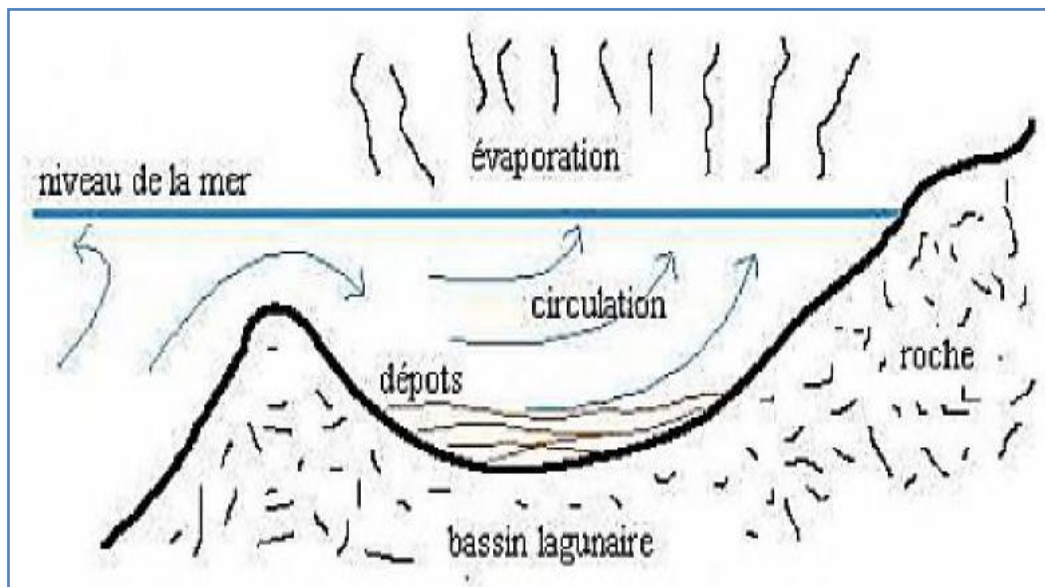


Figure I. 3.Mécanisme de formation de gypse au milieu marin lagunaire [7].

### 1.2.4. Formes du gypse

Le gypse cristallise dans le **système monoclinique**. À l'échelle moléculaire, il présente une **structure feuilletée** dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium.

Le gypse se présente sous plusieurs variétés qu'on peut grouper en :

#### 1.2.4.1. Gypse cristallisé

En cristaux distincts (sélénite), souvent gros, généralement aplatis selon  $g^1$  (fig. I-4(1)) ou prismatique et allongés parallèlement à  $C^{\rightarrow}$  (**Figure I.4** (2-3)), en macles, lamelleux et transparents, dont le fer de lance.

#### 1.2.4.2. Gypse fibreux

Agrégats cohérents avec une structure fibreuse, massive ou saccharoïde (albâtre), en grains fins, blancs ou délicatement ombrés, souvent colorés et pouvant contenir des traces d'argiles d'oxyde de fer de calcite (carbonate de calcium  $CaCO_3$ ) ou d'anhydrite ( $CaSO_4$ ). [8].

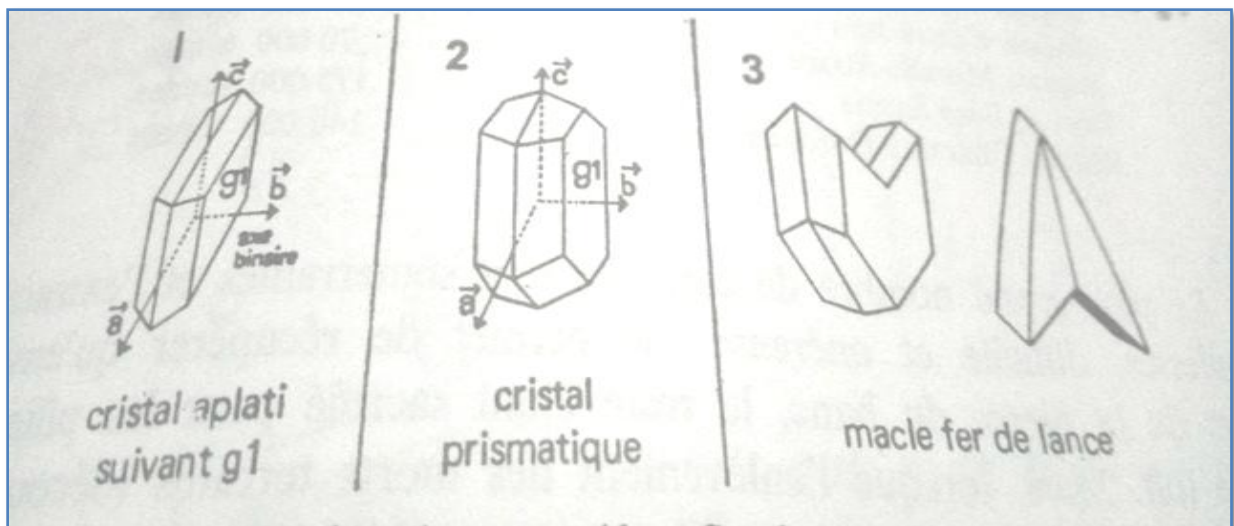


Figure I. 4.Cristallisation du Gypse [8].

#### 1.2.5. Structure du gypse et plâtre

Elle est constituée de feuillets comme le montre la **figure I.5**. Chaque molécule d'eau est liée à un atome de calcium et à un atome d'oxygène de son feuillet, et encore, à un atome du feuillet adjacent [9], dans la structure du gypse on retrouve deux types de liaisons chimiques :

- Des liaisons ioniques (fortes) dans les feuillets  $Ca^{2+}SO_4^{2-}$  dues aux différences de charges électriques.
- Des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions de sulfate. L'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion de calcium, celles-ci sont beaucoup moins fortes que les liaisons ioniques  $Ca^{2+}SO_4^{2-}$ . [10].

- L'hémi hydrate  $\alpha$  à une phase très bien cristallisée, non poreuse, constituée de cristaux bien individualisés et facilement indexables est obtenue par un mécanisme de dissolution/recristallisation en milieu liquide.
- Pour l'hémi hydrate  $\beta$  l'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et nous obtenons un solide microporeux Constitué d'un assemblage de microcristaux (Figure I.6) [11].

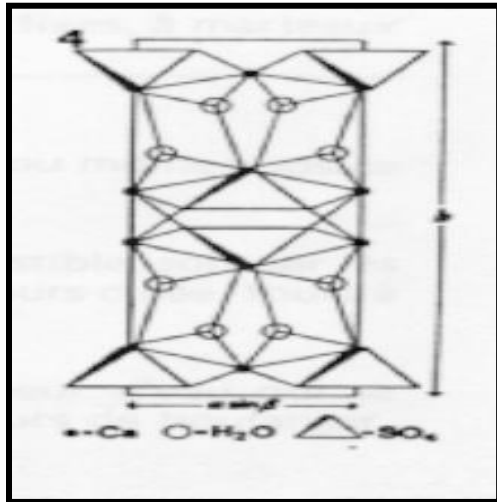


Figure I. 5. Projection de la structure du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  par WOOSTER en 1936 [12].

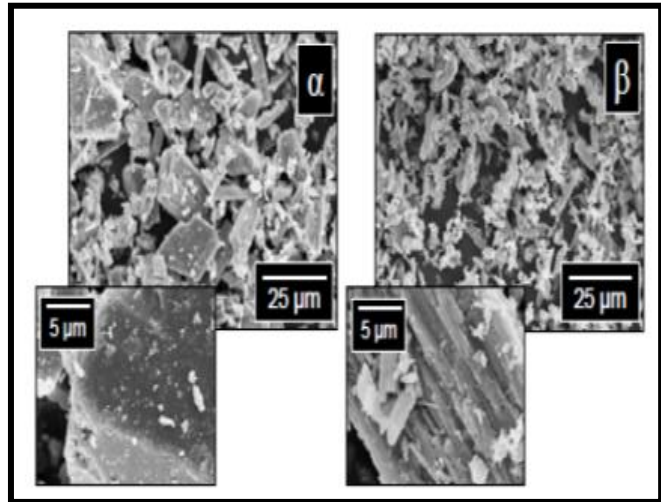


Figure I. 6. Images MEB des plâtres Prestia obtenues respectivement par voie humide ( $\alpha$ ) et voie sèche ( $\beta$ ) [11].

### 1.2.6. Différentes phases du système ( $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ )

Le semi hydrate  $\alpha$  est obtenu par cuisson du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en autoclave sous une pression de 1 bar et une température comprise entre 105 et 110 °C. On parle dans ce cas de préparation par voie humide. Le semi hydrate  $\alpha$  se présente sous forme de cristaux bien formés. Si par contre, le chauffage a lieu à l'air sec sans eau, on parle alors de préparation par voie sèche, on obtient la forme  $\beta$  du semi hydraté. Le départ d'eau du gypse est violent et le semi hydrate  $\beta$  cristallise mal.

La figure I.7 permet de comparer les deux formes de semi hydraté ainsi obtenues [7].

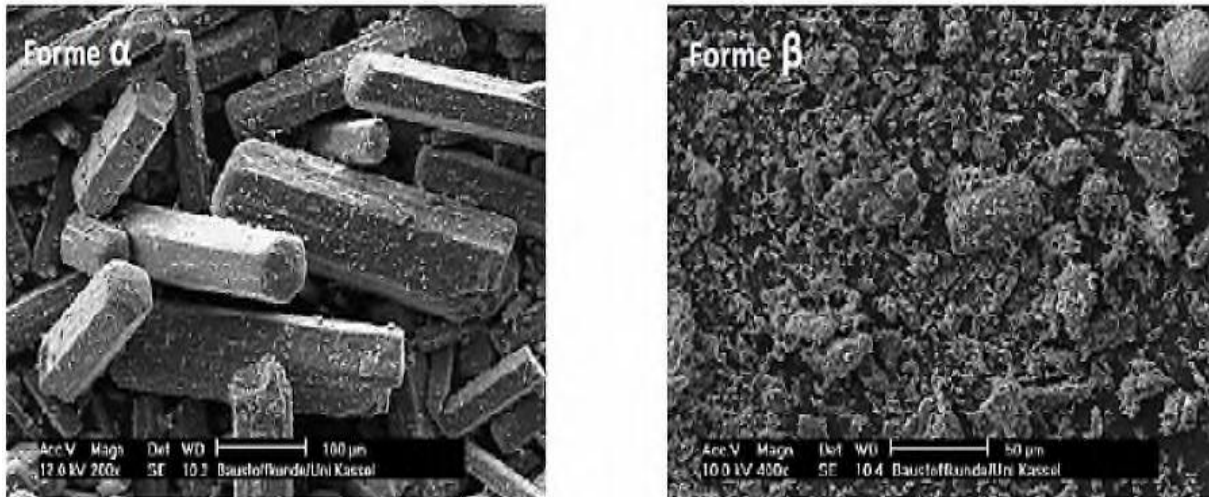


Figure I. 7 .Photos prises au MEB des deux formes de semi-hydraté [13].

Le semi hydraté  $\beta$  se présente sous forme de particules floconneuses d'où un taux de porosité assez élevé, des propriétés mécaniques plus faibles et une plus grande surface spécifique que la forme  $\alpha$ , ce qui entraîne une vitesse d'hydratation plus rapide pour le semi hydraté  $\beta$ . Une étude menée par Lewry et Williamson pour un rapport eau/plâtre de 0,6 montre effectivement que la forme  $\alpha$  présente une vitesse d'hydratation plus faible et un temps d'induction plus court que la forme  $\beta$ . C'est pour cette dernière raison que la forme  $\beta$  du plâtre est souvent préférée dans le milieu industriel [7].

D'un point de vue structural, les études par diffraction de rayons x ou par spectrométrie infrarouge n'ont révélé aucune différence entre ces deux structures.

Les principales différences entre les formes  $\alpha$  et  $\beta$  du semi hydraté sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau I. 1. Différences entre les sulfates de calcium semi hydratés  $\alpha$  et  $\beta$  [7].

Paramètres	$\alpha$ – semi hydraté	$\beta$ - semi hydraté
Dimensions des cristaux	10 - 20 $\mu\text{m}$	1 - 5 $\mu\text{m}$
Porosité de la matrice	non poreuse	poreuse
Cinétique de prise	Faible	haute
Résistance finale	Haute	basse

**1.2.7. Phases de déshydratation du gypse**

La fabrication du plâtre repose sur un principe simple, c'est l'élimination totale ou partielle de l'eau de constitution du gypse.

Soumis à la chaleur, le gypse conduit à une série de produits partiellement hydratés ou anhydres, cette opération a des implications complexes mettant en jeu des phénomènes de cristallisation.

Le **tableau I.2** donne les caractéristiques des différentes phases de déshydratation du gypse:

**Tableau I. 2. Phases de déshydratation du gypse [1].**

Phase	CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> , 1/2H <sub>2</sub> O		CaSO <sub>4</sub>		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
<b>Appellation</b>	Gypse	Semi hydrate α	Semi hydrate β	anhydrite III anhydrite soluble	anhydrite II anhydrite insoluble	Anhydrite I
<b>Système cristallin</b>	Monoclinique	Rhomboédrique		hexagonal	Orthorhombique	Cubique à faces centrées
<b>Teneur en eau (%)</b>	20.92	6.20	6.20	0	0	0
<b>Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.31. 103	2.76.103	2.63. 103	2.58. 103	2.93. 103 à 2.97. 103	2.93. 103 3. 103
<b>Masse molaire (g/mol)</b>	172.20	145.15	145.15	136.10	136.10	136.10
<b>Volume molaire (cm<sup>3</sup>/mol)</b>	74.5	52.40	55.20	52.80	45.8 à 46.4	

La déshydratation du gypse par la chaleur conduit à des réactions chimiques (voir la figure I.8) où l'évaporation d'eau de constitution du gypse nous donne les phases suivantes :

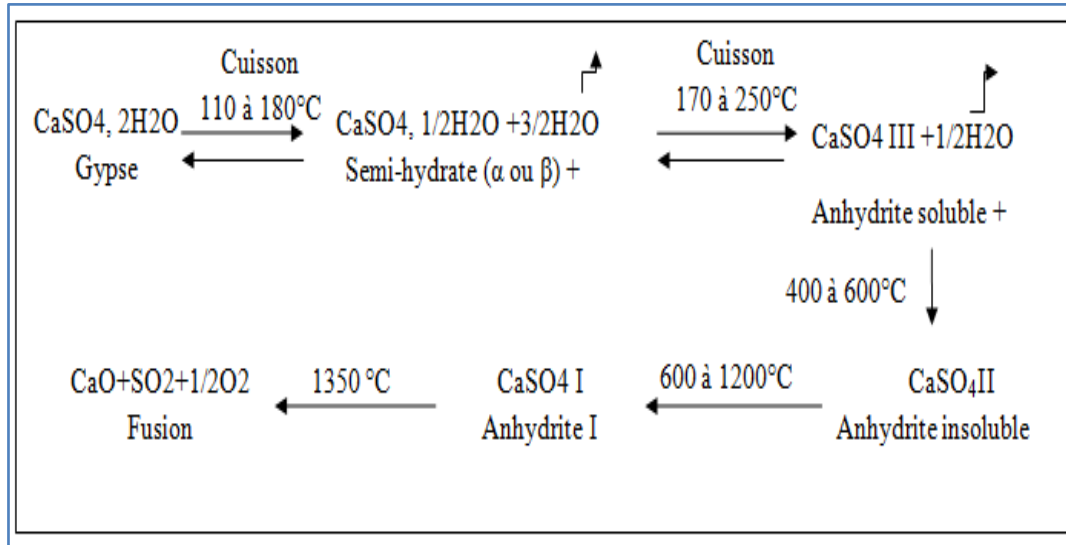


Figure I. 8. Réactions chimiques de déshydratation du gypse par la chaleur [1].

### 1.2.8. Production du gypse

Le gypse est présent dans le monde entier, et les ressources mondiales de gypse sont énormes. Plus de 90 pays dans le monde produisent du gypse. Les coûts d'extraction du gypse sont relativement faibles, mais le traitement, grand consommateur d'énergie, et l'utilisation finale ultime sont générateurs de coûts supplémentaires, et de surcoût significatif pour les produits fabriqués à partir du gypse. Typiquement, les principaux facteurs donnant une valeur commerciale aux dépôts sont la proximité de la zone du marché, l'existence d'une main d'œuvre, des infrastructures, et l'existence d'un moyen bon marché pour acheminer les matières premières ou les produits finis [14].

Dans le monde entier, le gypse est principalement utilisé dans la fabrication de plâtre pour le secteur de la construction, et la fabrication de ciment portland. En Amérique du Nord, le gypse est surtout utilisé pour les panneaux muraux en plâtre. Cependant, la mise en place croissante d'installations de production de panneaux muraux en plâtre en Chine et en Thaïlande indique que l'Asie, avec des milliards de consommateurs potentiels, pourrait devenir l'un des principaux marchés des panneaux en plâtre au niveau mondial. Concernant d'autres régions du monde, la reconnaissance de la facilité de mise en œuvre et du caractère bon marché des panneaux en plâtre comme un matériau de construction, ainsi que l'augmentation des capacités de production de panneaux en Amérique Centrale, en Europe, en Inde, et Amérique du sud, laisse supposer que l'on assistera dans l'avenir à une demande accrue pour le gypse. Il n'y a pas de pénurie prévisible des ressources de gypse dans le monde. Plus de 400 produits peuvent être fabriqués à partir du gypse, utilisant les méthodes

spécialisées de calcination, et en le mélangeant avec des additifs. Les applications comprennent le gypse broyé pour l'agriculture, les produits spécialisés à base de plâtre pour l'art et la sculpture, des éléments architecturaux complexes moulés, des applications médicales, et des produits de construction à prise rapide et de haute résistance [14].

Le **tableau I.3** présente la production du gypse naturel la plus importante dans le monde et le **tableau I.4** présenté les différentes entreprises du gypse en Algérie :

**Tableau I. 3.Production mondiale de gypse, 2010-2011 [14].**

<b>Production x 1 000 tonnes</b>		
<b>Pays</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
<b>États-Unis</b>	8840	9400
<b>Canada</b>	2717	2300
<b>Chine</b>	47000	47000
<b>Mexique</b>	3560	3500
<b>Thaïlande</b>	8500	8500
<b>Japon</b>	5700	5700
<b>Australie</b>	3500	3500
<b>France</b>	2300	2300
<b>Inde</b>	2650	2700
<b>Russie</b>	2900	2900
<b>Egypte</b>	2400	2400
<b>Iran</b>	13000	13000
<b>Espagne</b>	12500	13000
<b>Autres pays</b>	31400	31800
<b>Totale</b>	147000	148000

Tableau I. 4. exploitations de gypse en Algérie [15].

Wilaya	Nom de l'entreprise	Activités
<b>ALGER</b>	SCAL société des ciments Algéroise	Extraction et préparation du gypse Pour ciment
	Zidane marbre	Exploitation de marbre et gypse Pour plâtre
<b>BATNA</b>	Carrière de plâtre bouchareb EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
	Carrière plâtre bellahcène Messaoud sarl	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>BÉJAÏA</b>	Benamara EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>BISKRA</b>	Entreprise de plâtre et dérivés spa	Exploitation de gypse pour plâtre
	Plâterie el ghazal EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>BOUIRA</b>	ENFA plâtre (gypse, plâtre) SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	ERCC SPA	Exploitation de gypse pour ciment
<b>CONSTANTINE</b>	SPDE spa	Exploitation de gypse pour ciment
<b>GHARDAÏA</b>	Ghardaïa plâtre SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	Plâtre du sud spa	Exploitation de gypse pour plâtre
	SPDC spa plâtrerie de Ghardaïa filiale ERCC	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>GUELMA</b>	GYPSE EN NADOR EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>KHENCHELA</b>	IKHLASSE SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>MASCARA</b>	E.MA.CO EPE (UNITE PLATRIERE D'OGGAZ)	Exploitation de gypse pour plâtre
	ERCO EPE/SPA	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>MILA</b>	Bousbaâet aïssaoui (gypse el hassi aïssaoui et associés) _snc	Exploitation de gypse pour plâtre
	SO. PLAT SPA société des plâtres de grarem gouga	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>M'SILA</b>	Challa production de plâtre SARL	Exploitation de gypse pour
	El djabes (dokmane abdelatif) EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
<b>ORAN</b>	ERCO PLATRE (SODEPAC) SPA	Exploitation de gypse pour plâtre Et ciment
<b>SÉTIF</b>	Guellal plâtre D'OR SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	Guesmia d'extraction et préparation De gypse EURL	Exploitation de gypse pour plâtre

### **1.2.9. Mode d'Exploitation du gypse**

Les gisements de gypse ne peuvent être exploités sans une évaluation approfondie de nombreux critères : situation par rapport aux riverains et aux utilisateurs, qualité et quantité de la ressource, structure du gisement, nature du recouvrement ou encore remise en état après exploitation.

Placée sous le contrôle du Ministère de l'Environnement depuis 1993 et l'expertise des ingénieurs, l'exploitation est exécutée en appliquant minutieusement les réglementations en vigueur pour les mines et les carrières. Ainsi, l'exploitation d'une carrière, qu'elle soit à ciel ouvert ou souterraine, fait l'objet d'un arrêté préfectoral qui intègre toutes les exigences légales : conditions d'extraction, plan d'avancement de l'exploitation, remblaiement des excavations et aménagement final.

Des études précisent l'impact que l'exploitation pourrait avoir sur la vie économique et sociale des communes avoisinantes ainsi que sur la nature. Elles détaillent également les étapes de réhabilitation une fois l'exploitation terminée, l'objectif étant de redonner au site son état initial ou de proposer des améliorations (aspect, utilisation...) en cohérence avec l'environnement géographique, démographique, économique. Piloté par les industriels assistés de sociétés de conseil en ingénierie écologique, le projet est mené avec l'administration, les communes ainsi que les associations de protection de l'environnement.

Il est exploité de deux manières selon la structure des gisements :

#### **1.2.9.1. Les carrières à ciel ouvert**

Lorsque le gisement est à une petite profondeur, l'exploitation se fait à ciel ouvert, dans les carrières, pour extraire les différentes couches en étages, dont la hauteur est en fonction de l'épaisseur de la couche de gypse (Figure I.9). Cette méthode permet d'exploiter la totalité du gypse. Lorsqu'un gisement est épuisé, la carrière est réhabilitée pour recréer un ensemble le plus proche possible de l'état initial du terrain [1].



Figure I. 9. Exploitation à ciel ouvert [16].

### 1.2.9.2. Les carrières souterraines

Lorsque celui-ci se trouve à un niveau trop profond, une exploitation souterraine est privilégiée de façon classique selon la méthode des chambres et piliers (**Figure I.10**). Il s'agit d'extraire les couches inférieures en creusant des galeries, qui sont ensuite comblées par des matériaux inertes une fois l'exploitation terminée. Mais cette méthode permet seulement d'exploiter un tiers du gypse avec un taux de récupération de 30%, qui se déploie en plusieurs couches [1].



Figure I. 10. carrières de gypse souterrain [18].

### 1.2.10. Fabrication du plâtre à partir du gypse

L'extraction du gypse a pour but de fabriquer du plâtre, d'où le nom de "pierre à plâtre" longtemps donné au gypse.

### 1.2.10.1. Fabrication traditionnelle

Traditionnellement (jusqu'en **1950**) le plâtre était fabriqué dans des fours situés relativement proche de la carrière. Le gypse était apporté dans des charrettes tirées par des chevaux (**Figures I.11-12 et 13**). La cuisson se faisait dans des **fours à culée**. Les blocs de gypse les plus gros étaient assemblés en **voûtes parallèles** sous lesquelles on plaçait le combustible. Ces voûtes étaient recouvertes de morceaux de gypse de plus en plus petits afin d'homogénéiser la cuisson. La température et le temps de la cuisson (plusieurs dizaines d'heures) étaient liés au savoir faire du plâtrier. Ce savoir faire était issu des méthodes empiriques des générations antérieures. Ces paramètres varient également en fonction de l'utilisation que l'on voulait en faire: liant, enduit, amendement...

Souvent le plâtre obtenu contenait des impuretés, notamment des **morceaux de charbon**, dues au contact avec le combustible lors de la cuisson. De ce fait ce plâtre n'était pas de qualité suffisante pour réaliser des moulages ou des enduits d'intérieur. On inventa donc un **four à foyer** où le combustible n'était pas en contact du gypse. [18].

Ensuite les blocs de plâtre étaient réduits en poudre par **battage manuel**. Vers la fin du 19ème siècle les **meules**, actionnées par des chevaux ou un moulin, remplacent ce travail manuel. Pour finir le plâtre était tamisé.



Figure I. 11. Fabrication de gypse à proximité du carrière - encyclopédie d'Alembert [18].



Figure I. 12. Charrette apportant du gypse devant le four de Romainville [18].

La livraison était faite rapidement car la conservation au sec était difficile. Pour les grandes quantités le plâtre était livré directement dans des charrettes. Pour de plus petits volumes, il était conditionné en sac. Pour de long trajet (vers d'autres pays d'Europe) il était conditionné en tonneaux. Il existait aussi un transport du plâtre par bateaux.



**Figure I. 13.**Bateau à plâtre sur les quais de seine à Paris. [18].

#### **1.2.10.2.Fabrication industrielle**

La fabrication du plâtre nécessite plusieurs étapes :

##### **A. Extraction de gypse (matière première)**

Le plâtre provient du gypse, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté (**Figure I.14**). Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine [19].



**Figure I. 14.**Extraction du gypse à ciel ouvert [20].

### B. Concassage - calibrage

Le concassage a pour but de réduire le gypse extrait de la carrière en produits plus fin (Figure I.15). Généralement, après un concassage, il ne subsiste plus de blocs dont la dimension est supérieure à 100 mm. Ce gypse devient donc transportable sur des bandes par exemple, et peut être envoyé en usine pour le traitement ultérieur [20].

De très nombreux types de concasseurs existent sur le marché et peuvent traiter jusqu'à (1 200 à 1 300 t/h).



Figure I. 15. Concassage du gypse [20].

### C. Cuisson

Cette opération est généralement effectuée dans des fours rotatifs inclinés (Figure I.16). Elle permet d'obtenir, par une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre.

La déshydratation du gypse est la base de la fabrication des plâtres. Il est connu selon les conditions dans lesquelles s'opèrent cette déshydratation, les caractéristiques des plâtres obtenus seront différentes.

La déshydratation des gypses est donc en fonction de la température, de la durée de cuisson, de la nature du gypse, de la granulométrie mais également d'autres paramètres comme la pression de vapeur d'eau [7].



Figure I. 16 .Four de cuisson du gypse [7].

On procède à la cuisson suivant deux principes essentiels :

- La cuisson en voie sèche (destinée pour la fabrication du plâtre bêta).
- La cuisson en voie humide (destinée pour la fabrication du plâtre Alpha).

➤ Cuisson du plâtre  $\beta$  :

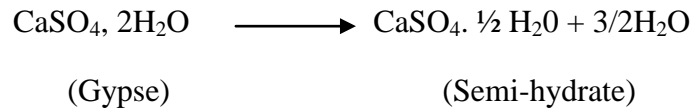
Après un premier broyage, la poudre fine calibrée est cuite à raison de 5 Tonnes par heure, dans des fours de type “four Beau” qui opèrent une cuisson indirecte du gypse placé dans une virole en rotation au-dessus de brûleurs à fioul [20].

➤ Cuisson du plâtre  $\alpha$

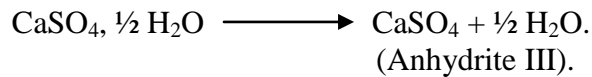
On dépose les pierres de gypse, précédemment triées, dans des paniers que l'on descend ensuite dans des autoclaves. La cuisson s'effectue à une pression pouvant aller jusqu'à 10 bars. Les caractéristiques du plâtre ainsi obtenu permettent un gâchage avec peu d'eau (5 à 6 fois moins qu'avec du plâtre  $\beta$ ) pour un matériau offrant alors des résistances mécaniques beaucoup plus élevées [20].

Le processus de cuisson du plâtre et la déshydrations du gypse sont des étapes très importantes. Dans les 20,93% d'eau que contient le gypse, 5,20% sont fortement combinés et correspondent à  $\frac{1}{2}$  H<sub>2</sub>O, tandis que 15,73% sont faiblement combinés et correspondent à  $\frac{3}{2}$  H<sub>2</sub>O.

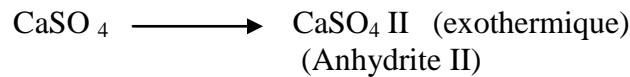
Par l'action plus au moins prolongée de la chaleur en atmosphère de la vapeur d'eau dégagée par la cuisson on obtient entre 110°C et 160°C, élimination de l'eau faiblement combinée, ce qui laisse le semi-hydrate CaSO<sub>4</sub>.  $\frac{1}{2}$  H<sub>2</sub>O, l'élément essentiel du plâtre [7].



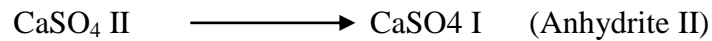
Lorsqu'on porte le gypse à des températures plus élevées environ 200°C, on rencontre une nouvelle transformation anhydre dans laquelle le semi-hydrate donne du sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$  anhydre  $\text{CaSO}_4$ . Ce sulfate anhydre connu sous le nom d'anhydrite soluble ou anhydrite III.



Si on continue à chauffer, le sulfate anhydre précédent, subit entre 220°C et 350°C, une nouvelle transformation qui, sans qu'elle modifie sa composition, conduit à une anhydrite



A température encore plus élevée, aux environs 1225°C, on note un phénomène endothermique correspondant à une nouvelle transformation (sans modification de composition) celle de l'anhydrite II en anhydrite I ( $\text{CaSO}_4\text{I}$ ) [17].



Au-delà de 1450°C, l'anhydrite I, se dissocie en CaO (chaux vive) et  $\text{SO}_2$ . Cette décomposition peut également se produire à une température plus basse dans un milieu oxyde réducteur (dès 880°C si le four est fortement ventilé) [7].



La **figure I.17** résume les étapes de déshydratation de gypse.

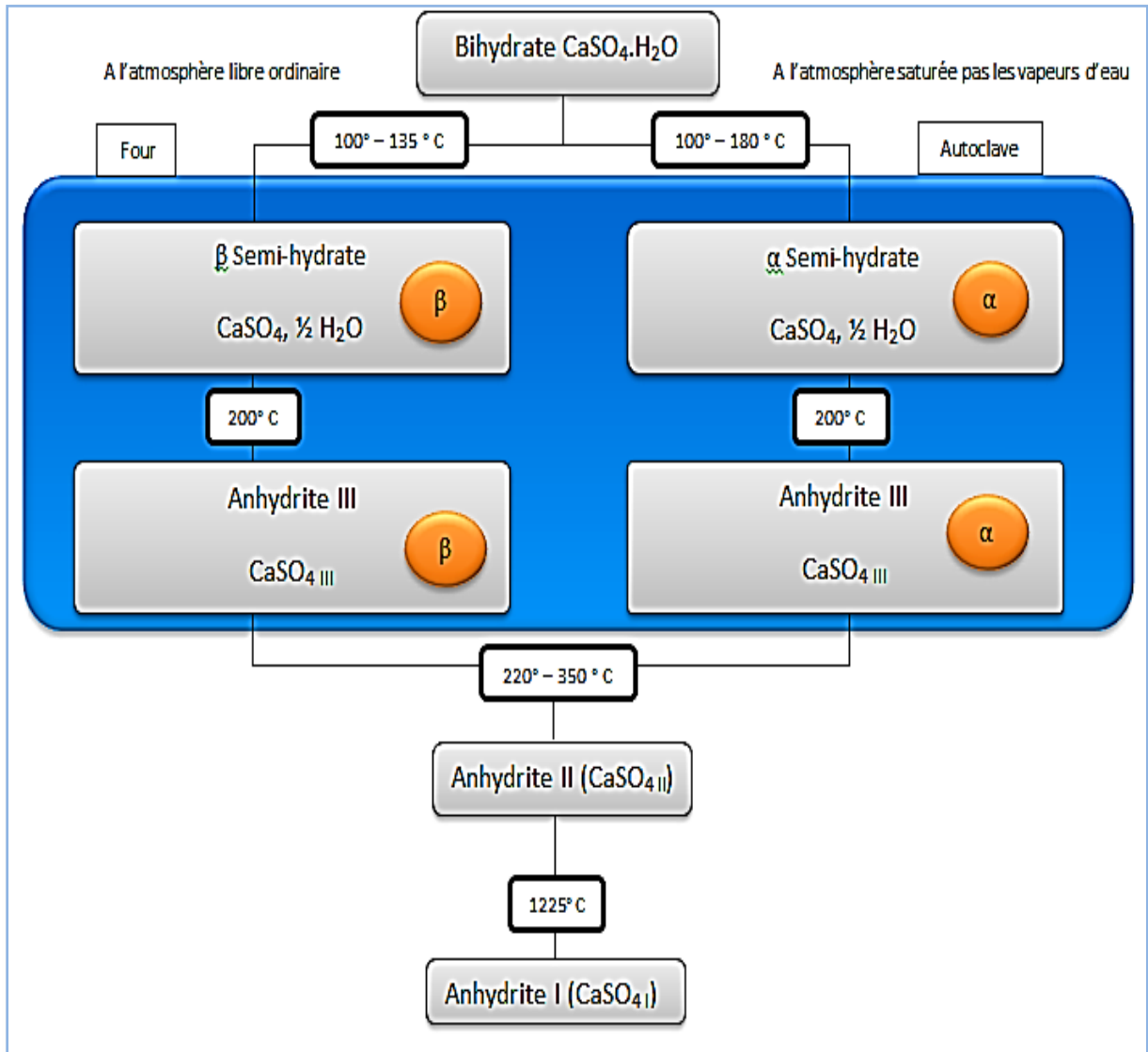


Figure I. 17 .Schéma de la déshydratation du gypse [7].

#### D. Broyage de plâtre

Après la cuisson, les pierres sont broyées selon 2 principes :

##### ▪ *Broyage standard*

Le plâtre est réduit en particules de 200 µm grâce à un système de marteaux en rotation à l'intérieur d'un tamis (garantie d'une granulométrie maximale) [20].

### ▪ *Broyage/sélectage*

Comme dans le broyage standard, le plâtre est broyé par des marteaux en rotation puis aspire à travers une “cage d’écureuil” en rotation. Selon son poids (donc sa taille), le grain de plâtre, soumis à 2 forces opposées (centrifuge et aspiration), traverse ou non la cage d’écureuil.

### **E. Homogénéisation et l’adjuvantation**

On ajoute des différents ajouts tel que :

- Amidon, pour améliorer l’adhésion entre le plâtre et le carton (plaque de plâtre).
- Adjuvants.
- Retardateurs pour modifier les temps de prise du plâtre.

Ces derniers donneront au matériau une cinétique particulière, une expansion spécifique, une fluidité contrôlée et autres caractéristiques précises. Tout au long du processus, le plâtre fait l’objet de nombreux prélèvements et contrôles. Cela permet de corriger le produit et de l’améliorer jusqu’à ce qu’il colle parfaitement au cahier des charges du client [20].

### **F. Contrôle et la validation des produits**

En amont (à l’extraction), l’humidité et la pureté du gypse font l’objet de contrôles périodiques. Ensuite, des échantillons sont prélevés tout au long du processus de fabrication et contrôlés par le laboratoire qualité de l’usine qui se consacre totalement à ce travail. Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite des procédés de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité des plâtres mis en vente [20].

### **G. Conditionnement et livraison**

Le stockage de plâtre se fait généralement dans des silos repartis sur différents postes de chargement en vrac qui permettent une logistique en flux tendu.

Les expéditions est livré en sac de 40 kg ou bien en vrac selon la demande du client.

La **figure I.18** résume les étapes de fabrication du plâtre :

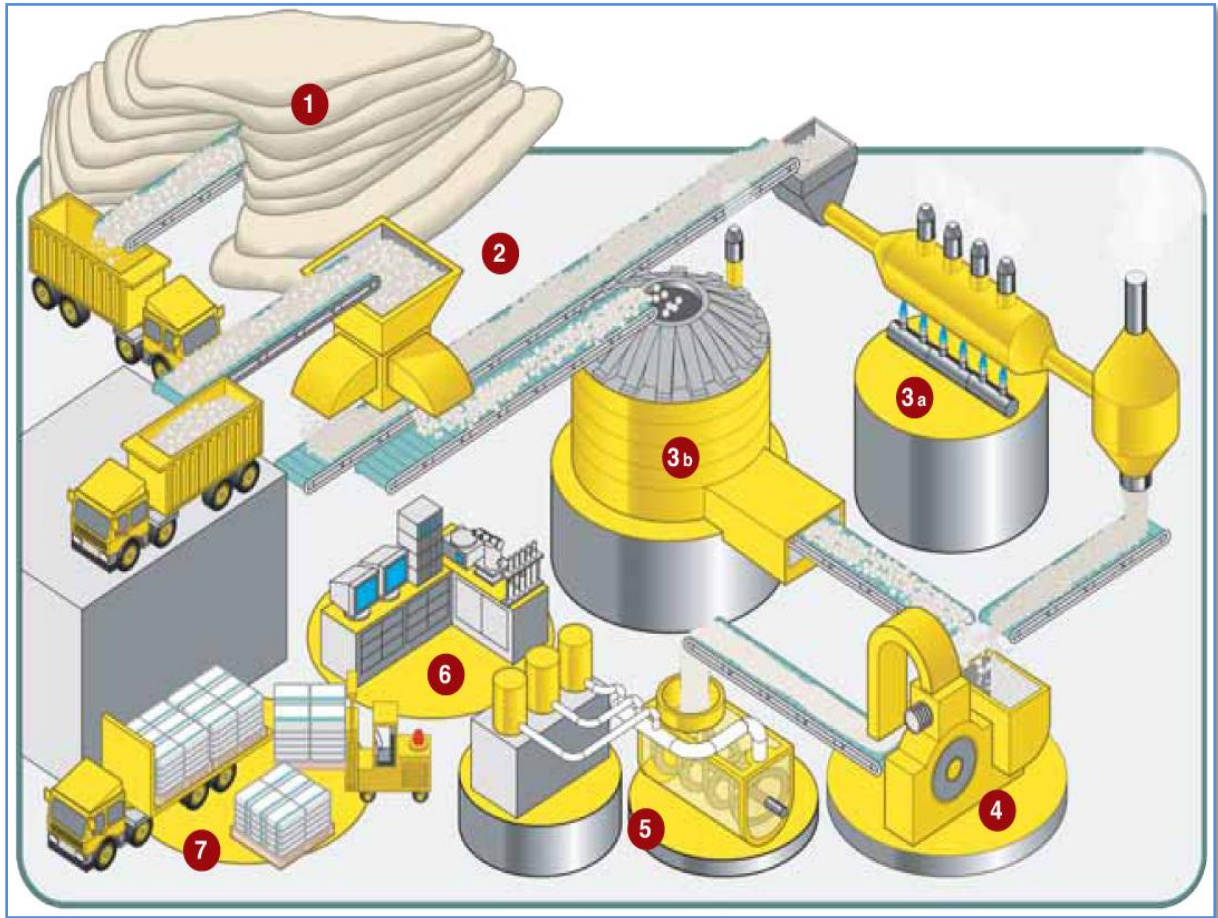


Figure I. 18. Etapes de fabrication du plâtre [20].

### 1.2.11. Recyclage du plâtre

En fin de vie, le produit de plâtre est mis en décharge, On note une absence de pollution de la nappe phréatique causée par le dépôt des déchets de plâtre.

Les déchets de fabrication et de chantiers sont généralement recyclés et réintroduits dans la fabrication du plâtre. En d'autres termes, c'est un produit sans déchets, car mis en œuvre sous forme de plâtre il est réhydraté en gypse. Les chutes de fabrication et d'installation des plaques de plâtre sont récupérées et recyclées dans la fabrication de nouvelles plaques. Le plâtre provenant de la démolition d'immeubles est également, en partie, recyclé en agriculture. [20].

### 1.2.12. Domaines d'utilisation de plâtre

#### 1.2.12.1. En cimenterie

Les sulfates de calcium mélangés au clinker ont une action regularitrice sur la prise du ciment et augmentent sa résistance, dans la limite d'une teneur minimale de 2%.

### **1.2.12.2. En industries chimiques**

Les sulfates de calcium naturels ou artificiels sont utilisés comme matière première pour la fabrication de nombreux produits chimiques d'application industriels [21].

### **1.2.12.3. En agriculture et engrais**

Les épandages de gypse broyé sur terrains agricoles peuvent présenter plusieurs avantages sur le plan agronomique.

En effet le gypse apporte une correction des sols salins ou alcalins qui se trouvent en région arides ou semi arides et en bordure de mer, le chlorure de sodium ayant une action inhibitrice ou asphyxiante sur la croissance des plants et créant des sols durs et grossiers par défloculation des argiles, le gypse en solution permet un remplacement des cations  $Na^+$  par  $Ca^{++}$ , ce qui fait flocculer les argiles et rend le sol plus aéré et léger, par ailleurs l'alcalinité est réduite et la teneur en calcium assimilable augmente.

Sur sols acides, le gypse semble neutraliser l'acidité en libérant  $Ca^{++}$ , tandis que  $SO_4^-$  serait absorbé par les plantes [21].

### **1.2.12.4. Industries alimentaires**

Le gypse est utilisé pour la purification des eaux de brasserie grâce à son pouvoir flocculant.

Il peut également être employé pour réduire la teneur en tartre et contrôler la clarté des vins.

Dans l'alimentation animale, le gypse broyé sert dans la préparation de nourritures pour bétail, il pallie le manque de soufre et évite l'utilisation de matières azotées pour améliorer les fourrages de qualité médiocre.

### **1.2.12.5. Domaine de construction et urbanisme**

Actuellement, Le plâtre a des utilisations assez diversifiées, soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués.

#### **➤ Enduits**

Le plâtre mélangé à la chaux grasse (10 à 15%) et au sable donne un mortier très utilisé comme enduit extérieur et intérieur.

On emploie le plâtre gros pour la première couche d'application sur les plafonds et les murs, pour les travaux de remplissage et pour les planchers.

On utilise le plâtre fin pour la dernière couche de finition [22].

➤ **Matériaux de construction préfabriqués**

Le plâtre sert à la fabrication de carreaux et plaques (sandwich de plâtre compris entre deux feuillets de carton), la réalisation des cloisons de distribution ou de séparation entre les logements, comme plafonds ou doublage des murs, outre cela le plâtre peut être armé de fibres pour constituer du plâtre armé. Le staff est du plâtre armé de filasse de chanvre, il est très utilisé dans la décoration intérieure grâce à sa capacité de se mouler sur toutes les formes et à se prêter à tout type de finition.

C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu [22].

**1.2.12.6. Autres utilisations**

Le caractère neutre et inerte de gypse, sa faible abrasivité a été finement broyé, ainsi que sa blancheur qui peut être élevée, en font un bon produit de charge dans les secteurs Industriels suivant :

- Peintures et colles, pâtes à moduler.
- Papiers, tissus.
- Verrerie.
- Insecticides en poudre.
- Pharmacie, Prothèse dentaire, chirurgie.

L'anhydrite broyée peut également s'employer en charge, dans les peintures et papiers, les cartons bitumés et les bitumes pour revêtements routiers [21].

**1.2.13. Types des plâtres**

Depuis une trentaine d'années, grâce à l'évolution des techniques de fabrication, l'industrie du plâtre est à même de fournir une gamme étendue de produits.

Le choix de conditions de fabrication permet de diversifier entre certaines limites, les propriétés de ces produits : c'est ainsi que l'on distingue :

- A. Des plâtres en poudre pour utilisation sur chantier.
- B. Des plâtres pour la préfabrication.
- C. Des plâtres pour les arts et l'industrie [7].

### **1.2.13.1. Les plâtres utilisés sur chantier**

- Plâtres de construction : proprement dit : normes EN 13279-1.
- Plâtres gros de construction PGC n°1 ou n°2 tamis mailles 0.4 mm ; 20% < refus < 40%
- plâtre fin de construction PFC n°1 ou n°2 tamis mailles 0.4 mm ; refus <15%.

Ces plâtres se gâchent généralement dans un rapport eau/plâtre à raison de 1. Ce type de plâtre sert pour la construction des cloisons, des murs, des enduits finaux et mouleurs [7].

### **1.2.13.2. Les plâtres destinés à des emplois spéciaux**

- Plâtres pour enduits de très haute dureté (THD) : norme BF-B-2303. Ils se distinguent essentiellement par une dureté élevée et un emploi facile avec un taux de gâchage moins élevé que les plâtres de construction.
- Plâtres pour support lisse : béton
- Plâtres de surfacage correction des défauts de surface.
- Plâtres à projeter : malaxage, transport, projection mécanique.
- Plâtres de réglage du sol : sous couche de revêtement de sol.
- Plâtre pour projection spéciales contre les incendies.
- Plâtres à briqueter pour montage de cloison.

### **1.2.13.3. Les plâtres pour la préfabrication**

Se caractérisent par un durcissement rapide.

#### **A. Les plâtres à mouler pour l'industrie**

Ce sont des plâtres constitués en général essentiellement de semi-hydrate, on trouve :

- Plâtres à mouler pour staff : destiné à la décoration.
- Plâtres à mouler pour stuc.
- Plâtres pour l'industrie céramique : moule et coulage, de calibrage, matrice pour de nombreuses industries, tuilerie, « porcelainière», carrosserie et matières plastiques.
- Plâtres pour l'art dentaire : il s'agit de semi-hydrate, il est gâché avec 30 à 50 parties d'eau pour 100 de plâtre.
- Plâtres pour bandes plâtrées : est un semi-hydrate pur avec accélération de prise (temps de prise 4min) [7].

#### 1.2.14. Eléments préfabriqués à base de plâtre

Les éléments les plus utilisés dans le bâtiment (Figures I.19-23), sont des matériaux confectionnés en usine sont :

- Eléments à faces lisses pour parois verticales (Carreau de plâtre et Plaque de plâtre)
- Elément de plafond.
- Eléments à enduire.
- Eléments de décoration [8].



Figure I. 19. des éléments Préfabriqués de décoration [23].



Figure I. 20. plaques de plâtre [23].



figure I. 21. Plaques de plâtre avec isolant polystyrène [23].



### 1.2.15. Propriétés physiques et mécaniques du plâtre

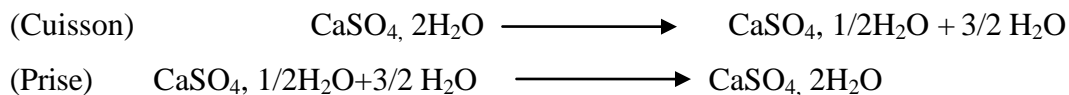
#### 1.2.15.1. Prise

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété, lorsqu'ils se trouvent au contact avec l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre [24]. Son temps de prise est court avec un durcissement rapide accompagné d'une forte élévation de température.

Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives:

- reprise de l'eau pour reformer le dihydrate.
- cristallisation (qui constitue la prise proprement dite).
- durcissement.

La prise est la réaction inverse du cuisson.



#### 1.2.15.2. Durcissement

Le processus de durcissement comporte trois phases:

- Dissolution des produits du semi-hydrate de Ca ;
- L'hydratation du semi-hydrate aboutissant à la formation du double hydrate de Ca ;
- La cristallisation de l'hydrate [24].

Tableau I. 5. Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate [24].

Propriétés	Semi-hydrate $\alpha$	Semi-hydrate $\beta$
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2,76. 10 <sup>3</sup>	2,63. 10 <sup>3</sup>
Temps de prise (min)	15 à 20	25 à 35
Expansion (mm/m)	2,8	1,6
Résistance à la traction (MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression (MPa)	56	5,6
Solubilité dans l'eau à 20 C° (en g de CaSO <sub>4</sub> pour 100 cm <sup>3</sup> )	0,63	0,74

### A. Facteurs influents sur la prise et le durcissement

Les temps de prise et de durcissement varient évidemment avec la nature du plâtre (présence en plus du semi-hydraté d'incuits, de surcuits ...), et avec sa finesse. Les autres paramètres importants sont les suivants :

- Quantité et nature de l'eau : plus la quantité d'eau est importante plus la prise est lente.
- Les impuretés contenues dans l'eau peuvent modifier beaucoup les temps de prise.
- Mode et durée de malaxage.
- Température : l'eau chaude agit comme retardateur de prise.
- Adjuvants [7].

### B. Adjuvants

#### ▪ *Les accélérateurs de prise :*

- a) Le sulfate hydraté  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .
- b) La pluparts des acides courants ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ).
- c) Le sulfate d'Alumine et de Potasse ( $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ ,  $[\text{K}_2\text{SO}_4]$ )
- d) Les Aluns
- e) Le chlorure de Sodium ( $\text{NaCl}$ ).

#### ▪ *Les retardateurs de prise :*

- a) Les phosphates.
- b) Acides organiques, et leurs sels solubles (acide citrique et citrates).
- c) La gélatine, la colle, la caséine.
- d) Les Borax.
- e) Les déchets résultants de la dégradation de protéines animales ou végétales.
- f) La chaux [7].

#### 1.2.15.3. Variation de volume

Le plâtre augmente de volume surtout aux premières heures (18% au début de la prise puis 19% après un jour), mais il peut après plusieurs jours ou plusieurs semaines de séchage, prendre un léger retrait par rapport au gonflement maximum atteint [7].

#### 1.2.15.4. Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie

Du fait de sa faible conductivité thermique  $\lambda$ , le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique. Un enduit plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation

thermique. Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agrégats légers qui ont des conductivités thermiques de l'ordre de  $0,18$  à  $0,20 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  sont particulièrement destinés à cet usage. En outre, du fait de sa forte inertie thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre élimine le phénomène de paroi froide [24].

#### 1.2.15.5. Densité

Elle varie en fonction des facteurs suivants :

- la granulométrie du plâtre.
- le rapport E/P.

La courbe ci-dessous donne l'influence du rapport E/P sur la densité

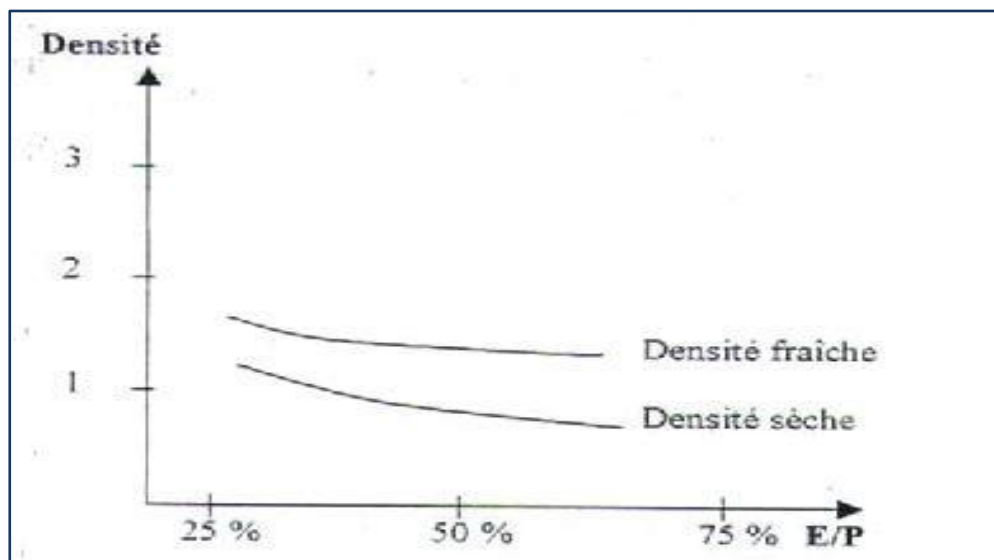


Figure I. 24. l'influence de rapport E/C sur la densité de plâtre.

#### 1.2.15.6. Résistance mécanique

Les facteurs qui influent sur la résistance mécaniques sont les suivants :

##### A. Rapport E/P

La courbe ci-dessous donne l'influence du rapport E/P sur la Résistance mécanique :

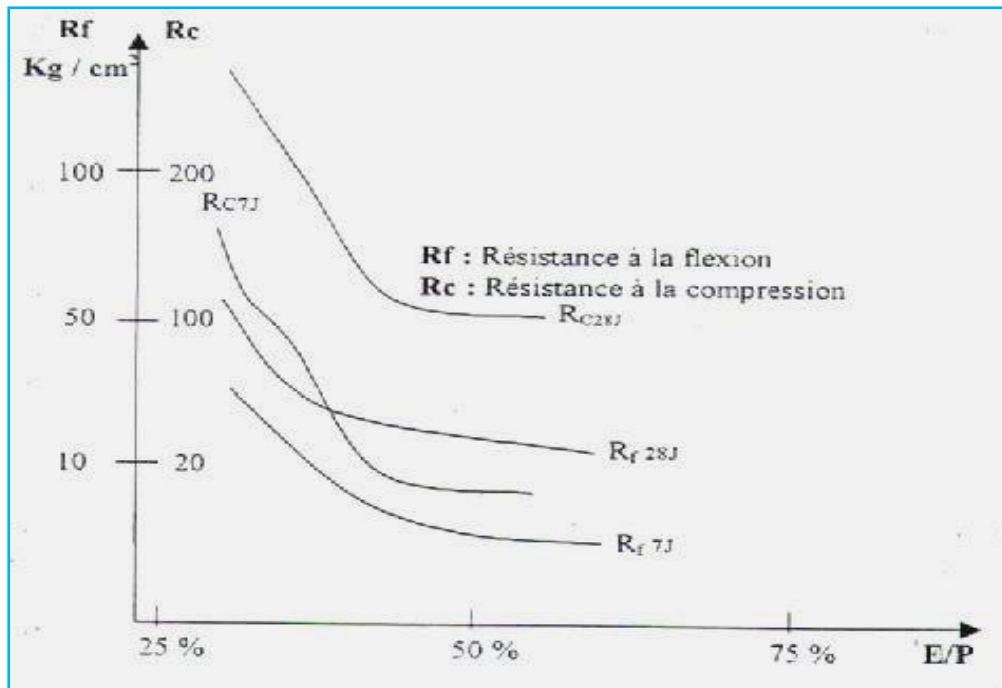


Figure I. 25. Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques [24].

On remarque que le rapport E/P influe directement sur les propriétés de produit résultant où lorsque le rapport E/P élevé provoque une porosité élevée, le matériau devient moins dense d'où une chute sur les résistances mécaniques.

Pour l'obtention d'une meilleure ouvrabilité et une résistance satisfaisante, recommande l'utilisation d'un rapport E/P= 0,6 [24].

**B. Nature et la finesse de plâtre.**

**C. Temps (âge de plâtre).**

**D. Milieu de conservation (sec ou humide).**

**E. Adjuvants**

Les adjuvants améliorent la résistance et augmentent la durée de prise du plâtre comme la chaux éteinte avec une faible teneur de 6% à 10% [25].

### **1.3. Conclusion**

Malgré l'existence d'énormes gisements de plâtre, matière première pour produire le plâtre, son utilisation est limitée aux enduits intérieurs, aux carreaux de plâtre et quelque élément décoratif.

Les propriétés thermiques et hygrométriques de plâtre lui permettent de diversifier sur emploi dans le domaine de construction.

Dans cette étude on va ajouter quelques matériaux talque le sable de dune, les déchets de plastiques recyclées, la chaux afin de l'introduire d'une façon rationnelle dans le domaine de bâtiments.

## Chapitre 2 : les Bétons légers

### 2.1. Introduction

La commission Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (RILEM) [26] des bétons légers propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Cependant d'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes, CORMON (1973) appelle béton léger un béton dont la masse volumique apparente à 28j inférieure à  $1800 \text{ kg/m}^3$ . De même l'American Concrete Institute (ACI) limite la masse volumique apparente des bétons à  $1800 \text{ kg/m}^3$  après séchage à l'air pendant 28 jours. Ainsi en Allemagne fédérale la norme DIN1042. Parue en 1972, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à  $2000 \text{ kg/m}^3$ . En fin, la masse volumique après séchage comprise entre  $800$  et  $2100 \text{ kg/m}^3$  [27].

### 2.2. Béton léger

Le béton léger est l'un des bétons spéciaux, dont les caractéristiques suggèrent de nouvelles utilisations. Il est caractérisé sa faible masse volumique par rapport au béton ordinaire.

En effet, la masse d'un béton courant varie de  $2200$  à  $2600 \text{ kg/m}^3$ , tandis que celle du béton léger oscille entre  $300$  et  $1850 \text{ kg/m}^3$  Neville [2000][28].

Les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à  $1800 \text{ kg/m}^3$  [26].

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.).

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 des granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances variées, 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.

En fin Les bétons légers se caractérisent 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.

L'institut de génie civil de l'université de Sydney en Australie a adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leurs utilisations dans la construction (**Tableau II.1**). Cette classification a été recommandée par la suite par la commission **RILEM** [26].

**Tableau II. 1. Classification fonctionnelle des bétons légers [26].**

Classe	I	II	III
<b>Type de béton léger</b>	Béton léger de construction	Béton léger de construction et d'isolation	Béton léger d'isolation
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	>15	>3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	/	< 0.75	<0.3

Une autre classification des bétons légers est celle de la norme **ACI 21 213R-87**. Celle-ci classe les bétons légers en fonction de la masse volumique en trois catégories (**Tableau II.2**) [29].

**Tableau II. 2. Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87 [29].**

Classe du béton	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance à la compression (MPa)
Le Béton de granulats léger de structure	1350 à 1900	≥ 17
Le béton de résistance moyenne	800 à 1350	7 à 17
Le béton léger de faible masse volumique	300 à 800	/

La figure II.1. Présente une classification proposée par Lafarge Béton Granulats

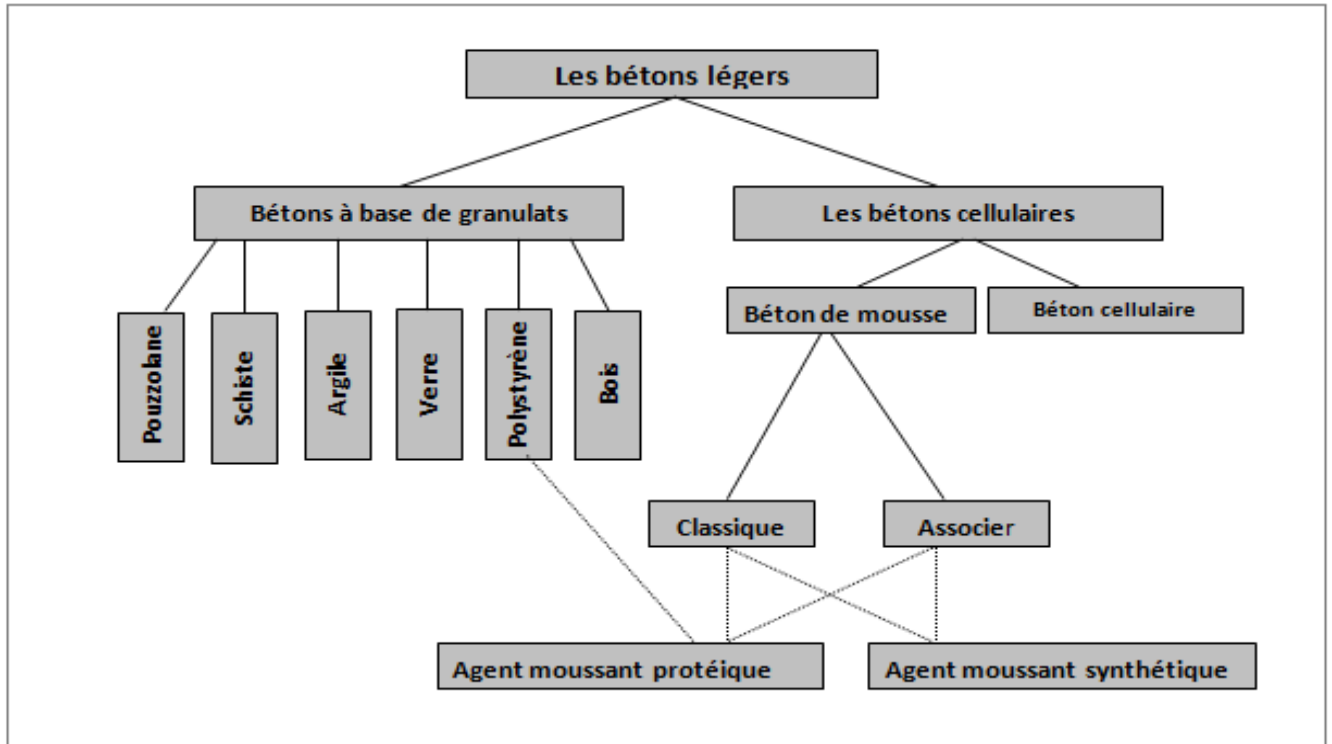


Figure II. 1. Classification des bétons légers d'après Lafarge [30].

Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects :

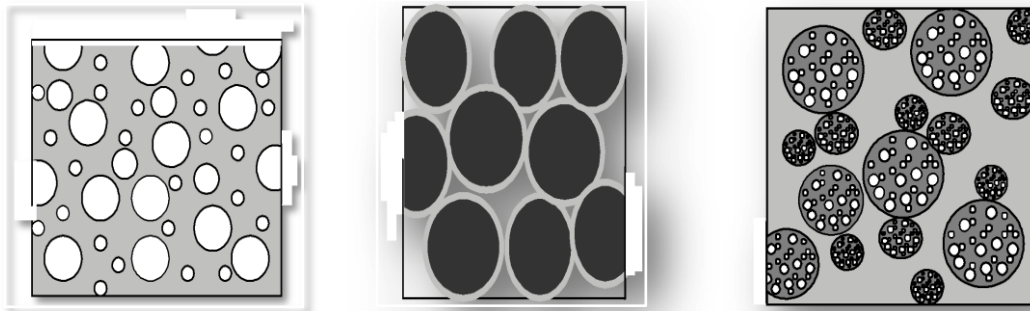
1. Les particularités en matière de formulation des bétons légers.
2. La source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant 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 (**Figure II.2**) :

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



(1) Béton cellulaire

(2) Béton caverneux léger

(3) Béton de granulats

Figure II. 2. Représentation schématique des différents types de béton légers [27].

### 2.3. Domaine d'utilisation

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

#### 2.3.1. Bétons d'isolation pure, non porteurs

Leur masse volumique est faible ( $600 \text{ kg/m}^3$ ) 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 sur terre plein.
- ❖ La préfabrication des éléments architecturaux.
- ❖ La protection d'étanchéité sur terrasse.
- ❖ Chapes, planché, dalles d'isolation.
- ❖ Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation.
- ❖ Le rattrapage de niveau.

#### 2.3.2. Bétons porteurs et isolants

Leur masse volumique varie de  $1000$  à  $1300 \text{ kg/m}^3$  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 incendie.

### 2.3.3. Bétons légers de structure

Ils ont une masse volumique de 1700 à 1800 kg/m<sup>3</sup> 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 [27].

Ces bétons sont utilisés pour :

- ❖ Ouvrage où le poids mort est important par rapport au poids total (Chargement compris).
- ❖ Immeuble de grande hauteur.
- ❖ Portées importantes (poutres, voiles).
- ❖ Structures marines immeubles.
- ❖ Surélévation d'immeuble existant.
- ❖ Restauration d'anciens immeubles etc...

### 2.4. Types des bétons légers

Le béton de granulat léger « **BGL** », n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scoria, etc... Les Sumériens ont employé ceci dans le bâtiment Babylone dans le 3<sup>ème</sup> millénium A.C (**figure II.3**). Certaines de ces magnifiques structures de l'antiquité existent toujours, comme la cathédrale de Sainte Sofie « ou le Hagia Sofia », (**figure II.4**) à Istanbul, Turquie. Les Grecs et les Romains ont employé la ponce dans la construction des bâtiments (**figure II.5**).

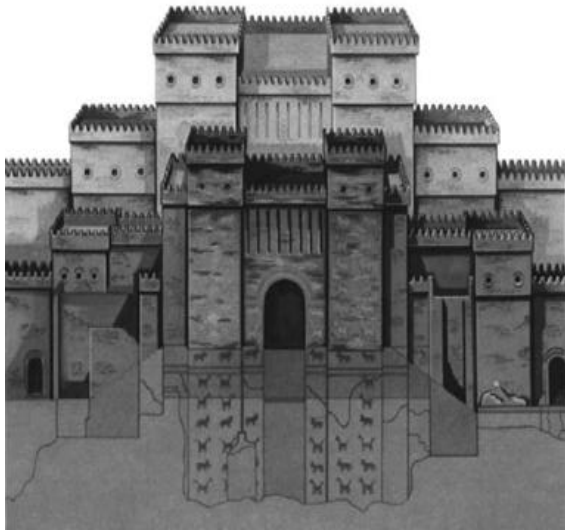


Figure II. 3 .Babylone, Irak [27].



Figure II. 4 .Cathédrale de rue Sofia, Turquie[27].



Figure II. 6.Pont du Gard, built in ca. A.D [27].



Figure II. 5 .Église romain[27].

#### 2.4.1. Bétons de granulats légers

Ce sont des bétons dans lesquels des granulas normaux ont été remplacés par des granulas légers, ils peuvent être pleins ou caverneux, dans ce dernier cas, la granulométrie est fortement discontinue et les éléments fins sont partiellement ou totalement supprimés.

Les comportements physiques et mécaniques des bétons de granulas légers sont dictés par le type de granulats légers utilisés, et par leurs propriétés physiques et mécaniques d'une part, et d'autre part par la nature de la matrice utilisée. Selon les exigences demandées et selon le béton utilisé, le choix du type de granulats et de la nature de la matrice s'avère important [27].

### 2.4.1.1. Classification des granulats légers

Les granulats légers peuvent être classés selon leur nature comme suit :

#### A. Matériaux minéraux naturels non préparés

Par définition ce sont des matériaux qui n'ont subi que des traitements mécaniques tels que lavage, broyage, tamisage.

Les granulats les plus connus dans cette catégorie sont (**Figures II. 7 - 10**) : la ponce, les pouzzolanes, les roches d'origines volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques [30, 31].



Figure II. 7. Pierre ponce [31].



Figure II. 8. OPS [31].



Figure II. 9. Diatomite [31].



Figure II. 10. Laitier volcanique [31].

#### B. Matériaux minéraux naturels préparés

Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emploi dans le béton légers, cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier (**Figures II.11-12**) : l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.



Figure II. 11. Schiste expansé [31].



Figure II. 12. Argile expansée [31].

### C. Déchets industriels non préparés

Ce sont des déchets de l'industrie qui ne subissent pas de traitement particulier à part, dans certains cas un traitement mécanique de tri.

Le principal granulat dans ce type est le mâchefer, résidu de la combustion des charbons gras du coke ou des ordures ménagères [32].

### D. Déchets industriels préparés

Ce sont en général des sous produits de l'industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granulats légers.

Les granulats de ce type les plus répandus (**Figure II.13**) sont: **le laitier expansé ou granulé, les cendres volantes frittées ou expansés et le verre expansé** [32].



Figure II. 13. Laitier refroidi à l'air, Cendre volante, Laitier expansé [31].

### E. Matériaux organiques

Dans cette catégorie on classe des produits qui sont soit des polymères solides de synthèse, soit des matériaux d'origine végétale, on peut ranger dans cette catégorie les granulats de

polystyrène expansé qui sont assez répandus et les granulats de bois (copeaux ou sciure) (Figures II .14-15) qui ont fait l'objet de plusieurs études puisque leur utilisation rentre dans le cadre de la valorisation des déchets qui est une politique suivie dans presque tous les pays visant le côté économique de ces types de granulat, ainsi que l'aspect environnemental.

En effet plusieurs travaux [32, 33, 34] ont été réalisés où la matrice est composée essentiellement de déchets industriels ou de matières locales. L'allègement de la matrice a été réalisé par différents procédés à savoir, l'utilisation de granulats légers, notamment, les granulats de bois et de caoutchouc, ou la création d'une structure cellulaire, soit par réaction chimique, ou par entrainement d'air.



Figure II. 14. Polystyrène [31].



Figure II. 15. Granulats en caoutchouc [31].

#### 2.4.1.2. Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers

Chaque propriété des granulats légers peut avoir une influence sur les caractéristiques du béton frais ou du béton durci. Le choix du type de granulats légers doit prendre en considération chaque propriété du granulat.

Les propriétés spécifiques des granulats pouvant avoir une influence sur les caractéristiques du béton sont :

##### A. Forme des grains et aspect de surface

La forme et en particulier l'aspect de surface influent sur l'adhérence matrice-ciment. Les granulats légers peuvent présenter des différences considérables quant à la forme et l'aspect des grains, suivant l'origine et les procédés de fabrication, la forme peut être cubique et assez régulière, en majorité arrondie ou anguleuse et irrégulière. Les aspects de surface peuvent aller depuis l'aspect relativement lisse avec des alvéoles fins jusqu'à l'aspect irrégulier avec des alvéoles petits ou gros [31].

## B. Taille des granulats

La taille des granulats légers a une influence très importante sur presque toutes les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons.

Selon leurs grosseurs les granulats légers sont classés en deux classes :

### ▪ Les granulats légers fins

Ils sont principalement composés de matériaux cellulaires d'origine minérale, conforme aux prescriptions suivantes :

- a. Ils conviennent à la fabrication de béton léger.
- b. Ils ont une granulométrie inférieure à 5 mm.
- c. Ils ont une densité sèche inférieure à  $1100 \text{ kg/m}^3$ .

### ▪ Les gros granulats légers

- a. Ils conviennent à la fabrication de béton léger de structure.
- b. Ils ont une granulométrie de 5 à 19 mm.
- c. Ils ont une densité sèche inférieure à  $880 \text{ kg/m}^3$ .

## C. Masse volumique

Grace à leur structure cellulaire, les granulats légers ont une masse volumique plus faible que celle des granulats normaux. Elle est fortement liée à la porosité du granulat et à la densité de la matière d'origine du granulat. Le **tableau II.3** fixe le choix des granulats en fonction de la classe du béton :

**Tableau II. 3.Choix des granulats en fonction des classes de béton [35].**

Dénomination	Classe du béton	Masse volumique apparente des granulats ( $\text{kg/m}^3$ )		
		<350	de 350 à 550	>50
Isolant thermique	I	(+)	+	0
Isolant thermique	I	(+)	+	0
Isolant thermique et /ou porteur	II	+	(+)	+
De structure	IV	0	(+)	+
De structure de haute résistance	V	0	+	(+)

(+) utilisation recommandée    + utilisation possible    0 utilisation impossible

## D. Résistance des granulats

La résistance des granulats varie selon leur type et leur origine, les granulats de béton de structure, généralement durs et résistants et contribuent en conséquence dans la résistance du béton. Pour les bétons destinés la fabrication d'éléments de construction isolants et isolants porteurs, la résistance des granulats n'est pas d'une grande importance, puisqu'en

générale ces granulats sont friables et peut solides et ne contribuent en aucun cas à la résistance, bien évident, ils sont à l'origine des faibles résistances de ces bétons.

Il n'y a pas de corrélation nette entre la résistance des granulats légers et celle du béton. La caractérisation de la résistance des granulats pose un problème, en effet les essais mécaniques de base (compression et traction) leur sont donc inapplicables vu leur forme géométrique irrégulière et la différence entre leur structure interne et externe.

Il en est de même des essais routiers classiques (Los Angeles, fragmentation dynamique, micro-Deval) sont imprécis et peu représentatifs.

Au cours des dernières années, trois essais ont donné lieu à des études précises en vue d'une meilleure compréhension du rôle des divers paramètres de la résistance mécanique des granulats légers, l'essai le plus classique est l'essai "au point", dérivé directement de la norme soviétique **GOST9758-68** [31]. Il se réalise par mesure de la pression nécessaire pour enfoncer de 20 mm un piston dans un récipient rempli de granules.

Le **CTBB de France** a mis point un nouvel essai dit de « compression isostatique » qui consiste à mesurer la pression hydrostatique nécessaire à l'écrasement d'un granule entouré d'une gaine souple et plongé dans un bain d'huile mis sous pression [31].

**Armines** a également mis au point un autre essai nouveau dit de "rupture au fil" qui consiste à rompre les granulats par serrage dans une boucle d'un fil.

Chaque granulat est caractérisé par une résistance au fil  $f_{tg}$ , rapport de la force de traction  $F$  exercée sur le fil lors de la rupture à l'aire  $S$  de la surface de rupture :  $f_{tg}=F/S$  [31].

### ❖ Porosité et absorption

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% [31, 36]. La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption. Par ailleurs, la porosité des granulats varie proportionnellement à la taille des grains.

En raison de leur structure poreuse, les granulats légers ont tendance à absorber plus d'eau que les granulats normaux.

Un essai d'absorption de 24 heures montre que les granulats légers absorbent généralement 5 à 20% en poids du granulat sec [26]. Cette absorption dépend de la structure des pores du granulat (porosité ouverte ; porosité fermée), de leur taille et de la morphologie interne des granulats.

La capacité d'absorption des granulats légers a une grande importance dans l'étape du malaxage. Lorsqu'une certaine quantité d'eau est mélangée, la quantité disponible pour

humidifier le ciment ou plâtre et permettre la réaction d'hydratation dépend de la quantité d'eau absorbée par les granulats légers.

Cette quantité peut être nulle lorsque les granulats légers ont été préalablement immergés pendant une longue période, alors qu'elle peut être très importante, selon le type de granulat léger, lorsqu'ils ont été préalablement séchés au four.

Entre ces deux cas extrêmes, la quantité d'eau absorbée par les granulats séchés à l'air peut varier entre 70 et 100 kg par m<sup>3</sup> de béton après leur introduction dans le malaxeur.

Après 24 heures, l'absorption des granulats légers se situe entre 5 à 20 % de la masse du granulat à l'état sec, mais ne dépasse habituellement pas les 156 % dans le cas des granulats de bonne qualité utilisés dans les bétons structuraux [28].

### E. Caractéristiques thermiques des granulats légers

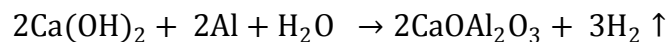
En général, les propriétés thermiques des bétons légers sont directement liées à celles des granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau.

Les granulats légers manufacturés, obtenues à partir de procédés à très haute température, sont généralement caractérisés par une meilleure stabilité thermique que les granulats rigides naturels [32].

Le **tableau II. 4** résume les principales caractéristiques des bétons légers.

#### 2.4.2. Béton cellulaire

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte, soit par gâchage avec de la poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. 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 au laboratoire, et non pas sur le chantier.

Tableau II. 4. Les principales caractéristiques des bétons légers [32].

Type de béton		Masse volumique des granulats (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique sèche du béton (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance la compression à 28 jours (MPa)	Retrait de séchage (µm/m)	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Laitier expansé	Fin	900	1850	21	500	0.69
	grossier	650	2100	41	600	0.76
Argile expansée Au four giratoire	Fin	700	1200	17	600	0.38
	grossier	400	1300	20	700	0.40
Argile expansée Au four giratoire avec sable naturel	grossier	400	1500	20	-	0.57
			1600	35	-	-
			1750	50	-	-
			1900	70	-	-
Argile frittée expansée	Fin	1050	1500	25	600	0.55
	grossier	650	1600	30	750	0.61
Ardoie expansée au four giratoire	Fin grossier	950 700	1700	28	400	0.61
			1750	35	450	0.69
Cendres volantes frittées	Fin grossier	1050 800	1500	25	300	-
			1540	30	350	-
			1570	40	400	-
Cendres volantes frittées avec sable naturel	grossier	80 0	1700	25	300	-
			1750	30	350	-
			1790	40	400	-
Pierre ponce		500- 800	1200	15	1200	-
			1250	20	1000	0.14
			1450	30	-	-
Perlite		40-200	400-500	1.2-3	2000	0.05
Vermiculite		60-200	300-700	0.3-3	3000	0.10
Cellulaire	cendre volante sable	950	750	3	700	0.19
		1600	900	6		0.22
Cellulaire autoclave		-	800	4	800	0.25

Ces bétons présentent un fort retrait. Les caractéristiques de base des bétons cellulaires sont leur teneur en ciment, sa masse volumique à la mise en place, sa masse volumique séchée, sa

teneur en granulat fin et sa teneur en air. Plus la teneur en ciment augmente plus la résistance à la compression augmente.

La densité des bétons cellulaires dépend de leur composition, en variant entre 0.4 et 1.2. Leur conductivité thermique est une fonction de la densité, elle est de l'ordre de 0.16 W/m/°C pour les bétons de masse volumique de 400 kg/m<sup>3</sup> et 0.40 W/m/°C pour les bétons de masse volumique de 1200 kg/m<sup>3</sup>. Leur résistance à la compression varie entre 0.5 et 0.8 MPa pour les bétons de masse volumique de 400 kg/m<sup>3</sup> et entre 4 et 5 MPa pour les bétons de masse volumique de 1200 kg/m<sup>3</sup>

### 2.4.3. Bétons caverneux

Ce sont des bétons qui ne contiennent que du ciment, de gros granulats (normaux ou légers) et d'eau. Il existe des gros vides dans la masse du béton à cause de la l'absence de sable et d'éléments fins. C'est un béton drainant et poreux et très résistant au gel. Les bétons caverneux sont caractérisés par leur économie (économie de matières et gain de poids) et leur performance techniques (isolation thermique, drainage de l'eau).

## 2.5. Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques Des bétons de granulats légers

### 2.5.1. La masse volumique

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche (**Figure II.16**). La réduction de la masse volumique est rendue possible en Changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants [32, 37].

### 2.5.2. 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 [**M. CONTANT, 2000**][27].

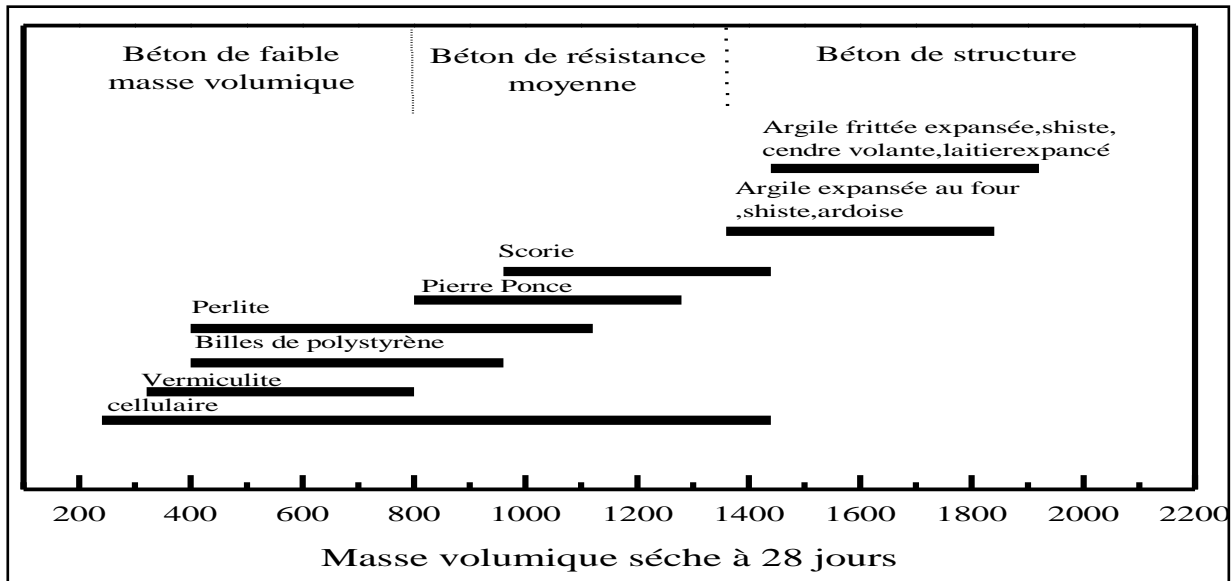


Figure II. 16. Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87[37], [38].

Guergab et Abdelali [6], montrent que la masse volumique apparente des bétons élaborés (BPLPE,) diminue avec le pourcentage des granulats de polystyrène dans le temps (Figure II.17).

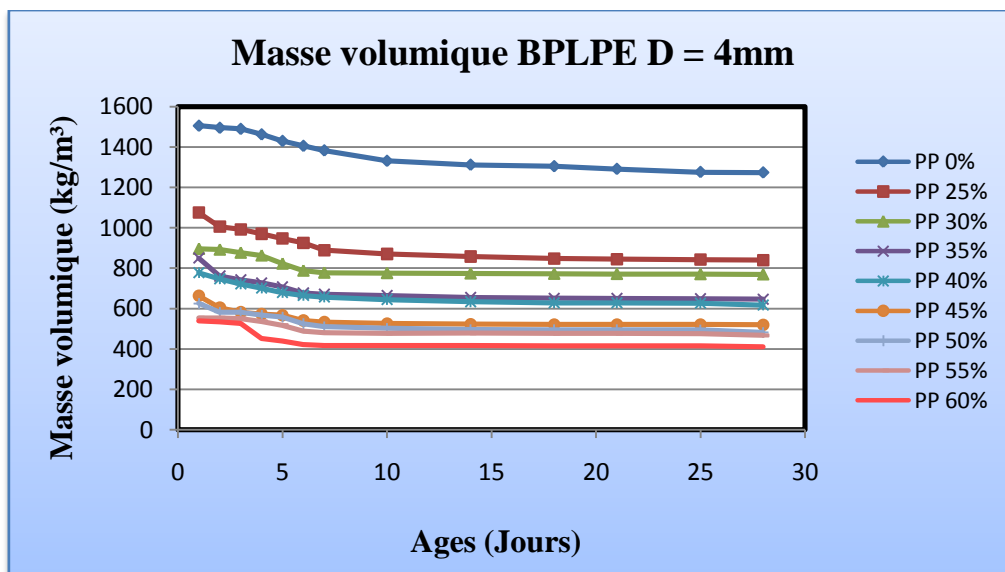


Figure II. 17. Variation de la masse volumique de BPLPE, D = 4mm en kg/m<sup>3</sup> [6].

### 2.5.3. Le comportement et performances mécaniques

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulats légers est poreux donc moins résistant qu'un granulats usuel.

Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par

rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides [39].

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre  $\phi_g$  qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats  $\phi_g$  diminue.

Des campagnes expérimentales ont mis en relation performances mécaniques et masse volumique  $\rho$  des bétons légers.

Guergab et Abdelali [6] montrent que la résistance à la flexion et la résistance à la compression des bétons de plâtre diminue avec le pourcentage des granulats de polystyrène (Figure II.18- II.19).

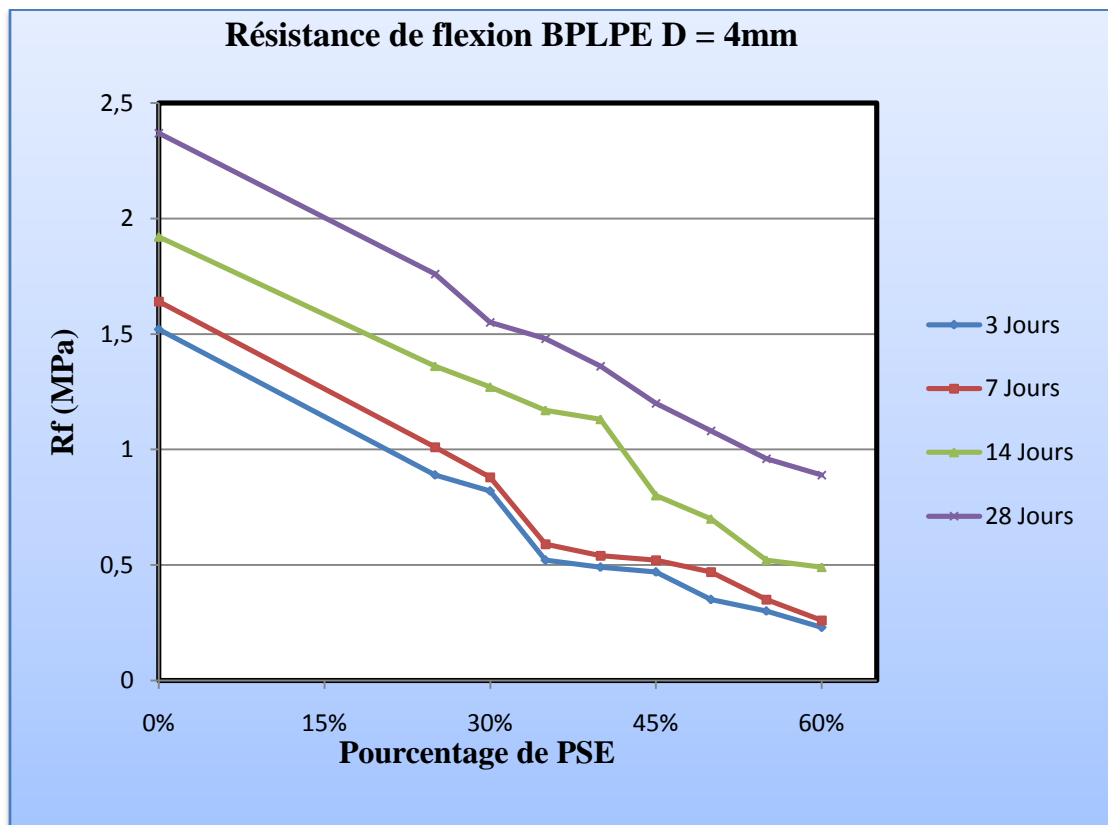


Figure II. 18.Variation de la résistance à la flexion de BPSLPE en fonction de pourcentage de PSE [6].

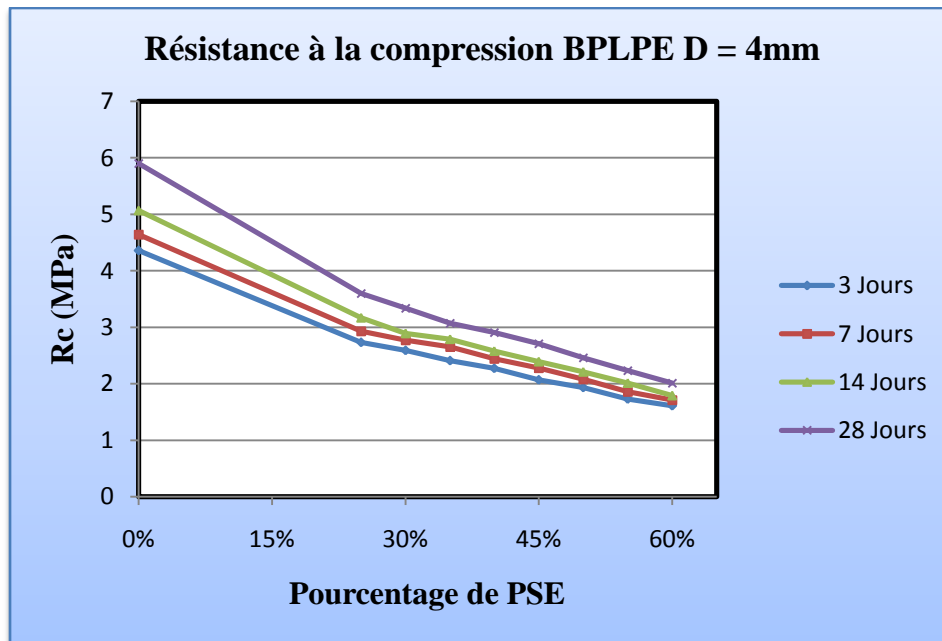


Figure II. 19. Variation de la résistance à la compression de BPSLPE en fonction de pourcentage de PSE [6].

Zitani [40] montre que la résistance a la compression et à la flexion des bétons de liège varient inversement avec le pourcentage de liège tableau II.5 et II.6.

Tableau II. 5. Variation de la résistance à la compression béton de liège BPLLEE3/8 en MPa [41].

L/P	Age (jour)			
	3	7	14	28
0	5,08	9,45	11,75	12,23
0,5	1,55	2,22	2,93	3,31
1	0,84	1,65	1,99	2,41
2	0,73	0,78	1,21	1,44
3	0,62	0,69	0,76	0,86

Tableau II. 6. variation de la résistance à la flexion béton de liège BPLLEE3/8 en MPa [41].

L/P	Age (jour)			
	3	7	14	28
0	2,57	4,05	4,08	4,23
0,5	0,8	1,36	1,39	1,45
1	0,66	1,16	1,3	1,36
2	0,52	0,93	1,22	1,31
3	0,47	0,61	0,8	0,95

Kassou [41] montre que la résistance à la compression et à la flexion de béton de plâtre à base de copeaux de bois diminuent avec l'ajout des copeaux de bois (Figures II.20- II.21).

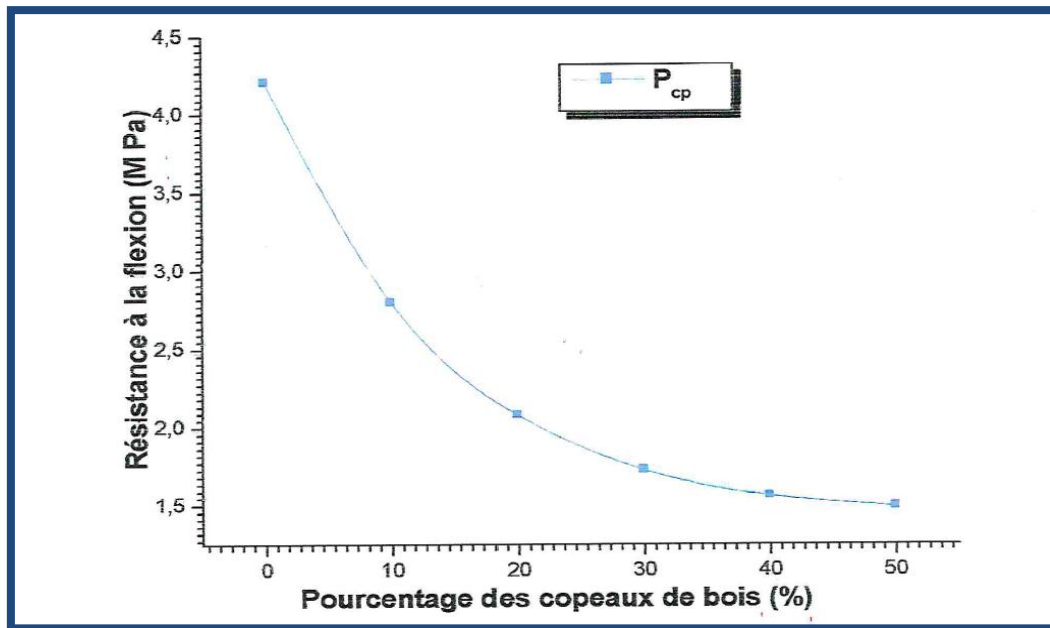


Figure II. 20.variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition plâtre + copeaux de bois a l'âge de 28 jours [41].

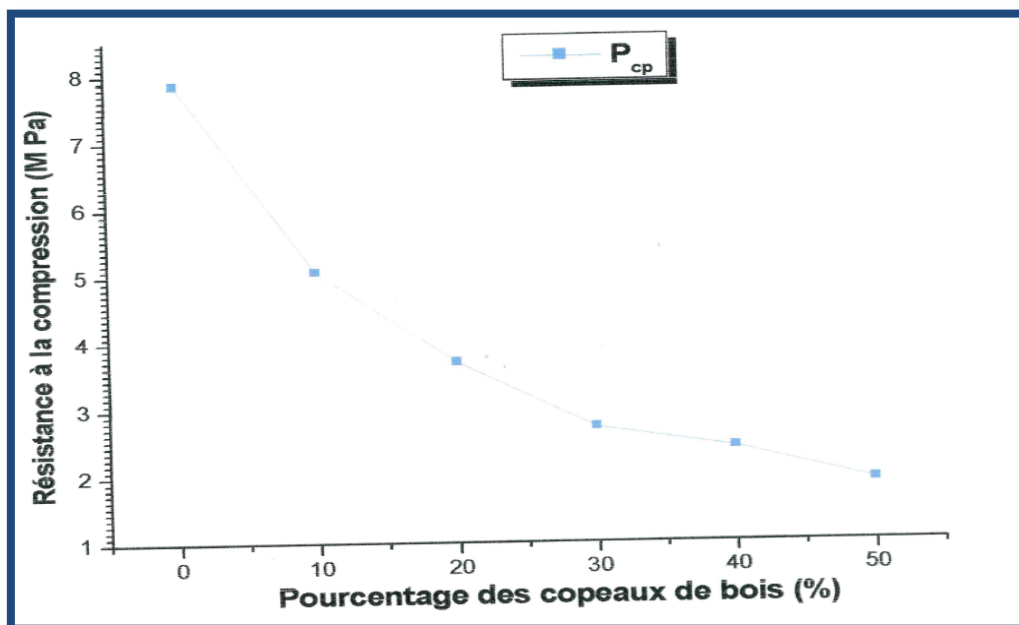


Figure II. 21.variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en copeaux de bois pour composition plâtre + copeaux de bois a l'âge de 28 jours [41].

Les caractéristiques de quelques bétons légers sont récapitulées dans le **tableau II.7**.

**Tableau II. 7. Caractéristiques de quelques bétons légers [36].**

	Constituants			$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Rc (MPa)	E (GPa)	$\varepsilon$ (m/m)
	Nom	Masse (Kg)	Volume (m <sup>3</sup> )					
Granulats	Granulat minéral (grés, granite .....)			2600	< 1%	-	60	-
	Argile expansée			850	60à70%	6à9	-	
	Copeau de bois en vrac			275	75 %	-	10à12	
	Granulat bois Agresta			600	60%	-		
Béton hydraulique	Granulat	755	0.285	2330	9%	30	36	1.10 <sup>-4</sup>
	Sable	925	0.350					
	Ciment	440	0.140					
	Eau	210	0.215					
	Air	-	0.015					
Béton argile expansé	Granulat	351	0.414	1600	36%	25	14	-
	Sable	602	0.230					
	Ciment	400	0.127					
	Eau	193	0.193					
	Air	-	0.025					
Béton cellulaire	Mortier ciment			350-650	75à82%	5	2 à 3	2.10 <sup>-3</sup>
	Air							
Béton de bois	Copeaux de bois	170	0.212	600-900	52 %	3.5à4	-	-
	Ciment	350	0.113					
	Eau	200	0.200					
	Air	-	0.379					
	Sable*	250	0.096					

#### 2.5.4. La sensibilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméables, permettent les transferts hydriques sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle de sorption-désorption.

La perméabilité représente la faculté qu'a un matériau de laisser un fluide s'écouler en son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc que si le matériau possède une porosité non négligeable et que celle-ci est connectée. En revanche,

un matériau peut être très poreux (le béton cellulaire) et peu perméable car les pores, non reliés entre eux ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. Porosité et perméabilité sont donc liées mais le premier n'implique pas forcément le deuxième.

### 2.5.5. L'absorption

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. L'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée (les vides sont inter communicants) [32].

Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus (porosité close ou porosité vacuolaire dénommée aussi porosité résiduelle). Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption (**Figure. II.22**).

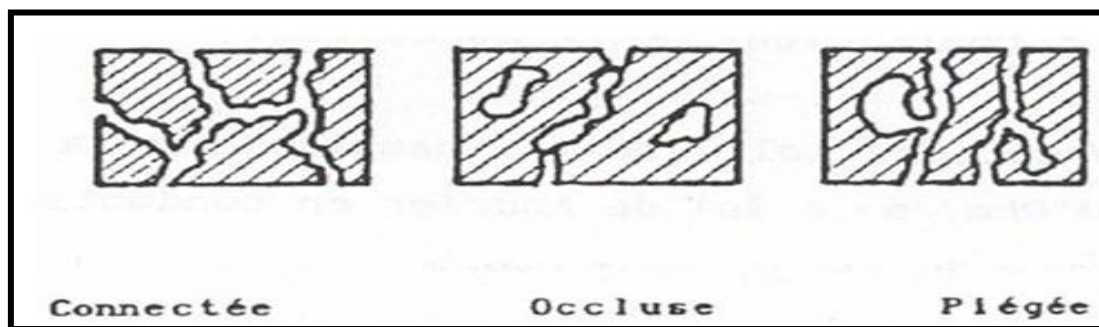


Figure II. 22. Trois types de porosité présente dans les matériaux [31].

Une étude expérimentale menée par Vaquier dans [30], a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats légers (tableau II.8) et en analysant les conséquences sur l'absorption.

Tableau II. 8. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre > 2  $\mu\text{m}$ .

	Porosité ouverte (%)	% pores diamètre > 2 $\mu\text{m}$
Ponce	55,0	68,0
Argile expansée	53,9	11,7
Schiste expansé	37,0	34,7
Cendre frittée	37,0	17,6

Il constate que la plus grande partie de l'eau est absorbée en quelques minutes et que la quantité d'eau absorbée n'est pas corrélée à la porosité ouverte mais à la porosité ouverte de diamètre supérieur à 2 microns. Ceci est confirmé par la comparaison entre le volume de liquide maximal absorbé par les granulats et le volume total des capillaires de diamètre supérieur à 2 microns qui sont quasiment identiques.

### 2.5.6. Les propriétés thermiques

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique  $\lambda$ . Cette dernière est définie comme le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau [42].

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique  $\lambda$  est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (i.e porosité), en ajoutant l'air intra-particule (i.e porosité). A titre comparatif, un béton hydraulique ( $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ) a une conductivité thermique de  $2,0 \text{ W/ (m.K)}$  tandis qu'un béton d'argile expansé ( $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ ) a une conductivité thermique de  $0,60 \text{ W/ (m.K)}$ .

Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'un autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement.

Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs [35].

En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ( $\Phi \approx 80 \%$ ) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible.

➤ Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique  $C$  en  $\text{J/ (kg.K)}$ .

Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent.

Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure.

Le tableau suivant permet de comparer des caractéristiques thermiques de quelques matériaux.

**Tableau II. 9. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [35].**

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité $\epsilon$ (%)	C (J/kg/K)	$\lambda$ (W/m/K)
<b>Air</b>	1.2	-	1000	0.026
<b>Eau liquide</b>	998	-	4180	0.602
<b>Béton hydraulique</b>	2330	8	1050	1.80 à 2.00
<b>Béton argile expansé</b>	1600	36	900	0.46
<b>Béton cellulaire</b>	350 à 650	75 à 82	880	0.16 à 0.33
<b>Béton de bois</b>	600 à 900	52	1200	0.09 à 0.30
<b>Brique</b>	1800	-	860	1.15

Un dernier élément concernant les propriétés thermiques des bétons légers est lié au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant.

**Guergab et Abdelali [6]** montrent que la conductivité thermique des bétons de plâtre diminue avec l'augmentation de pourcentage des granulats de polystyrène (**Figure II.23**).

### 2.5.7. 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 [**M. CONTANT, 2000**] [27].

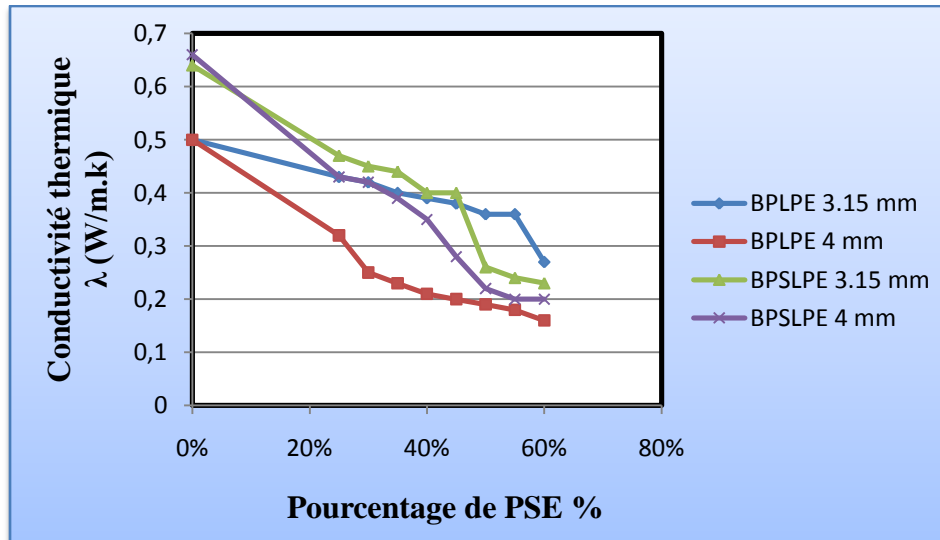


Figure II. 23. Variation de conductivités thermiques  $\lambda$  en fonction de pourcentage de polystyrène [6].

Laoubi et al [43]. Montrent que les déchets de caoutchouc améliorent le pouvoir isolant des bétons de plâtre.

### 2.5.8. Autres propriétés du béton léger

La résistance au gel Elle est très bonne, malgré la teneur en eau absorbée, car de nombreux pores non saturés subsistent, qui permettent l'expansion de la glace. Il faut noter en outre une bonne aptitude au bétonnage par temps froid, car la faible conductivité thermique permet au béton de conserver la chaleur de prise du ciment [44].

#### 2.5.8.1. La résistance au feu

Elle se mesure par la durée de tenue d'un élément, à une température déterminée, est meilleure que celle du béton traditionnel, en raison des valeurs peu élevées de la conductivité thermique et du coefficient de dilatation. Ainsi, par exemple la durée de résistance d'une dalle de 12cm d'épaisseur est d'environ 2h avec un béton normal, et 4h avec un béton léger; de même, les pertes de résistances mesurées à 650° sont respectivement de l'ordre de 40 à 50 dans le premier cas, et de 15% seulement dans le second.

#### 2.5.8.2. L'aspect acoustique

L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger, est avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'air; il est dû à l'existence de nombreuses cellules fermées dans les agrégats. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures à celles

prévues par la « loi de masse ». Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm [45].

## **2.6. Les avantages des bétons légers**

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, qui sont classés en trois catégories [27]:

### **2.6.1. Avantages techniques :**

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1,2 en comparaison de 2,2 à 2,5 pour 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 M<sub>0</sub> au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- Imputrescible : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.

### **2.6.2. Avantages de mises en œuvre**

- Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur [27].
- 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).

### **2.6.3. Avantages Economiques**

- Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau.
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations.
- 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 [27].

## 2.7. Inconvénients des bétons légers

- Le faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations différées. (déformabilités instantanée et différée plus grandes).
- Les bétons légers sont néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction. L'utilisation de fibres métalliques demeure une solution efficace pour en augmenter la résistance à la fissuration.
- Résistance mécanique plus faible en général, dans le domaine des valeurs élevées.
- Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes.
- Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût.

Bien que dans certains cas les bétons légers puissent revenir plus cher par mètre cube qu'un béton ordinaire, la construction peut être moins onéreuse vu la réduction du poids mort.

Une juste comparaison ne doit pas se limiter uniquement au prix.

L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton, sa densité et ses qualités mécaniques [32,39].

## 2.8. Béton Léger à base des granulats en plastique recyclé

Le béton constitue donc un bon matériau pour la récupération puisqu'il est facile d'incorporer des matériaux recyclés lors de sa fabrication. L'utilisation de matériaux recyclés dans le béton favoriserait, d'une part, la récupération des matériaux en circulation et, d'autre part, la protection des ressources naturelles. Le béton ainsi produit pourrait être utilisé pour fabriquer une multitude de produits de consommation et, par le fait même, redonner une seconde vie à ces déchets.

### 2.8.1. Matériaux légers de recyclage

#### 2.8.1.1. Les plastiques

##### A. Composition et origine

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.

Les matières plastiques sont composées en général en trois éléments qui sont:

- Résine de base (polymères).
- Adjuvants.
- Additifs.

Matière plastique = résine de base (Polymère) + adjuvants + additifs

### B. Méthode de fabrication

Pour les thermoplastiques, la méthode consiste à réduire les produits récupérés en petites particules et de les faire fondre pour obtenir une toute nouvelle résine pouvant servir au moulage de nouveaux produits.

Puisqu'il est impossible de les faire refondre, les thermodurcissables sont concassés en particules de dimension désirée et sont utilisés comme matériaux de remplissage.

### C. Propriétés du béton incorporant en plastique

La documentation sur le béton confectionné avec des granulats à base de matières plastiques se concentre sur les propriétés mécaniques du béton (Soroushian et coll., 1994).

Ces recherches visent principalement à valider l'influence d'une substitution du granulat fin par une matière plastique et d'en vérifier l'incidence sur les propriétés du béton durci.

Dans l'ensemble, l'ajout de matières plastiques contribue à diminuer le retrait au séchage du béton. Semble que les particules de plastique puissent agir comme renfort permettant de freiner la microfissuration au sein de la pâte de ciment hydraté : les particules relativement plates, dont la dimension nominale est de 10 mm, forment un pont en travers des fissures.

Une substitution de 20% du sable par des matières plastiques améliore la résistance à la flexion du béton d'un facteur de 4 à 5 comparativement au béton de contrôle et d'un facteur 8 lorsque ce pourcentage passe à 40 %.

L'incorporation de matières plastiques s'est toutefois révélée néfaste quant à la résistance à la compression. Cette diminution de la résistance peut être attribuée, d'une part, à la diminution de la masse volumique et, d'autre part, à la faible rigidité des matières plastiques (module d'élasticité inférieur à 1GPa).

Cependant, si l'on considère la baisse de résistance du béton en relation avec la diminution de sa masse volumique, on constate une légère augmentation de la résistance spécifique de ce béton. Par ailleurs, on note un apport positif quant à la résistance aux impacts au-delà de la fissuration initiale [46].

Cet effet s'explique de la même manière que pour le retrait de séchage, c'est-à-dire que les particules plastiques servent de pont à l'intérieur de la fissure.

## 2.8.2. Types de matière plastique

### 2.8.2.1. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires qui peuvent glisser les unes par rapport aux autres sous l'effet de la chaleur, ou de fortes contraintes.

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit [46].

Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables.

#### A. Le polyéthylène téréphtalate (PET)

C'est un polymère obtenu par la polycondensation de deux composants: le diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol (Figure II.25). Les chaînes vont s'arranger et former des fibres résistantes. Le PET est surtout employé pour la fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles. (Figure II.24).



Figure II. 24. Bouteilles en PET [47].

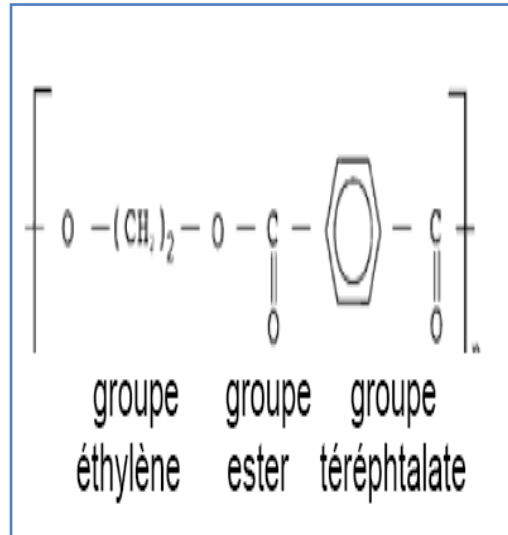


Figure II. 25. composition chimique de PET [47].

**B. Le polyéthylène (Haute et basse densité Polyéthylène haute densité(PEHD) et Polyéthylène basse densité (PEBD))**

Cette matière plastique représente à elle seule environ un tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques (**Figures II.26-28**).



Figure II. 26. Les citernes en (PEBD) [47].



Figure II. 27. Les emballages en Polyéthylène[47].



Figure II. 28. Les sachets en plastique [47].

### C. Le polystyrène (PS)

Le polystyrène est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel courant largement diffusé, offrant de très nombreux usages. Sa composition chimique et l'aspect usuel de polystyrène est représentée sur les Figures suivantes.



Figure II. 29. Les billets de PS [47].

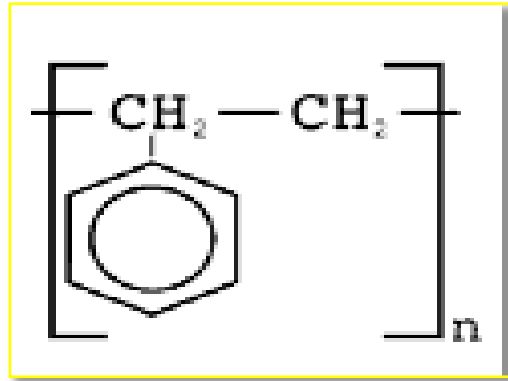


Figure II. 30. composition chimique de PS [47].

#### 2.8.3. Propriétés des matières plastiques

L'emploi des matières plastiques comme matériaux de construction est relativement récent. Leurs propriétés sont très différentes de celles des matériaux traditionnels comme le béton et les métaux. Il est donc nécessaire que les projeteurs et les utilisateurs comprennent leurs caractéristiques afin d'assurer leur performance adéquate dans des nouvelles applications [46].

##### 2.8.3.1. Masse spécifique

La masse spécifique de la plupart des plastiques est bien plus faible que celle des métaux, ce qui est très utile lorsqu'on veut obtenir une diminution de poids car certains plastiques sont, à Poids égal, plus résistants que les métaux. Cependant, à volume égal, c'est habituellement le contraire qui se produit. La masse spécifique des polymères et des plastiques se situe normalement entre 0.83 et 2.50 g/cm<sup>3</sup>. Pour les plastiques alvéolaires elle peut descendre jusqu'à 0.01 g/cm<sup>3</sup> et pour les plastiques contenant des charges, elle peut atteindre 3.50 g/cm<sup>3</sup> [46].

##### 2.8.3.2. Propriétés thermiques et électriques

En tant que matériaux organiques, les polymères et les plastiques ont, à quelques exceptions près, une stabilité thermique bien plus faible que celle des métaux, surtout au contact de l'oxygène. Le tétrafluoréthylène, qui fait exception parmi les polymères communs, possède une stabilité thermique très élevée, car il n'a que des liaisons C-C et C-F, toutes deux très stables. Lorsqu'ils sont chauffés à des températures de plus en plus élevées, les matériaux thermoplastiques passent lentement de l'état solide plus ou moins rigide à l'état de liquide très

visqueux. Même si sous l'effet de la chaleur les matériaux thermodurcissables ne perdent pas leur rigidité de façon appréciable, un chauffage trop intense ou prolongé provoque un durcissement excessif, une contraction, une carbonisation ou une désintégration. Les coefficients de dilatation thermique des plastiques (de 4 à 20 x 10<sup>-5</sup>/°C; de 2 à 11 x 10<sup>-5</sup>/°F) sont beaucoup plus élevés que ceux des métaux ordinaires (de 1.0 à 2.5 x 10<sup>-5</sup>/°C; de 0.6 à 1.4 x 10<sup>-5</sup>/°F). En général, les polymères et les plastiques dérivés sont de bons isolants électriques; certains excellents même, comme le polytétrafluoréthylène [46].

### 2.8.3.3. Résistance au feu

Les plastiques se comportent différemment sous l'action du feu: certains s'enflamment, d'autres brûlent rapidement ou lentement, et d'autres sont auto-extinguibles. La nature des polymères et des substances comme les charges, les matériaux de renforcement, les plastifiants ou les adjuvants ignifugeants, déterminent le degré d'inflammabilité.

Les polymères halogénés, tel que le PVC ou le PVC chloruré, sont naturellement ignifuges; lors qu'ils sont chauffés, ils libèrent des gaz halogènes qui interrompent la réaction d'oxydation en chaîne par radicaux libres. Cependant, si l'on ajoute des plastifiants, le PVC devient inflammable. La résistance au feu des plastiques peut être améliorée par l'adjonction d'adjuvants appropriés ou par l'emploi de polymères naturellement ignifugeants [46].

### 2.8.3.4. Comportement mécanique

Les matériaux polymères sont utiles principalement en raison de leurs propriétés mécaniques. Par rapport aux métaux, les polymères et les plastiques ont un faible module d'élasticité et leur rapport résistance/poids est plus élevé.

Les objets et structures en plastique ont des degrés de résistance au choc très variables, allant de très fragile à très tenace.

Le comportement des polymères à la déformation diffère de celui des métaux de construction en ce qu'il n'est pas seulement fonction de l'ordre de grandeur de la contrainte, mais également de la durée d'application. Le fluage des polymères et des plastiques peut être important, même à la température ambiante, alors que pour les métaux, il ne l'est jamais au-dessous de 500°C.

De plus, la température et le mode d'application de la contrainte affectent beaucoup plus les propriétés mécaniques des polymères et des plastiques que celles des métaux. Ces propriétés peuvent aussi être influencées par le procédé de fabrication, un traitement ultérieur et l'âge du produit fini.

Les polymères n'obéissent pas à la loi de Hooke, mais ont un comportement dit viscoélastique. Le préfixe "visco" veut dire que le matériau possède certaines des caractéristiques des liquides visqueux, ce qui implique une dépendance du facteur temps.

Suivant ce comportement, les polymères amorphes peuvent avoir 3 types de réaction à la déformation par contraintes non destructives (relativement faibles), selon la durée de l'application de celles-ci: élasticité instantanée (ou de Hooke), élasticité retardée ou différée (haute élasticité) et écoulement visqueux [46].

### 2.8.4. Granulats recyclés de sac de plastique

Le recyclage des déchets de plastique passe par plusieurs étapes (du ramassage et récupération des sacs usés jusqu'au stockage en granulats, en passant par un traitement thermique). Les granulats produits à partir de déchets de sacs en plastique servent à être utilisés par la suite pour la fabrication de différents types d'emballage et sacs en plastique.

Le traitement thermique consiste à l'homogénéisation des différents déchets plastiques en une feuille de plastique, qui sera transformé par la suite en fibres minces. Ces fibres seront découpées en granulats manuellement ou automatiquement. Les granulats en plastique recyclés ont généralement des diamètres de 3 à 4 mm et une densité de l'ordre de  $0,9 \text{ g/cm}^3$  [48].

## 2.9. Conclusion

Le béton constitue donc un bon matériau pour la récupération puisqu'il est facile d'incorporer des matériaux recyclés lors de sa fabrication. L'utilisation de matériaux recyclés dans le béton favoriserait, d'une part, la récupération des matériaux en circulation et, d'autre part, la protection des ressources naturelles. Le béton ainsi produit pourrait être utilisé pour fabriquer une multitude de produits de consommation et, par le fait même, redonner une seconde vie à ces déchets.

## Chapitre 3 : Matériaux et méthodes expérimentales utilisés

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode de plan d'expérience utilisée pour la réalisation et l'optimisation des différentes compositions étudiées. Enfin, nous avons caractérisé les différents matériaux (sable, plâtre, déchets de plastique, chaux) utilisés dans l'étude expérimentale et les procédures d'essais réalisés au niveau du laboratoire de génie civil (pédagogique) et le laboratoire de Recherche de Génie Civil (LRGC) de L'Université Ammar Thelidji de Laghouat.

### 3.2. Méthode de plan d'expériences

#### 3.2.1. Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles, notamment celles expérimentales. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$y = f(x_i)$$

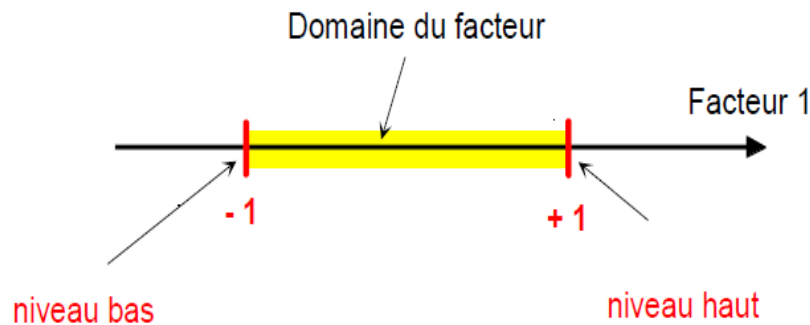
Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle *d'espace expérimental* et celle de *modélisation mathématique* des grandeurs étudiées.

#### 3.2.2. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (**Figure III.1**). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on

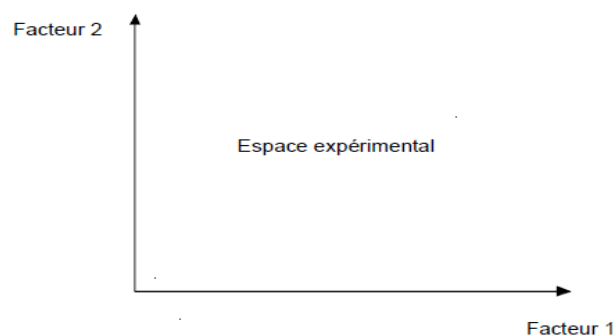
limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure qui s'appelle aussi le niveau bas et la borne supérieure qui s'appelle aussi le niveau haut.



**Figure III. 1.** Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le *domaine* du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé *l'espace expérimental* (Figure III.2).



**Figure III. 2.** Espace expérimental pour deux facteurs.

Le niveau  $x_1$  du facteur 1 et le niveau  $x_2$  du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure III.3). Une expérience donnée est

alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

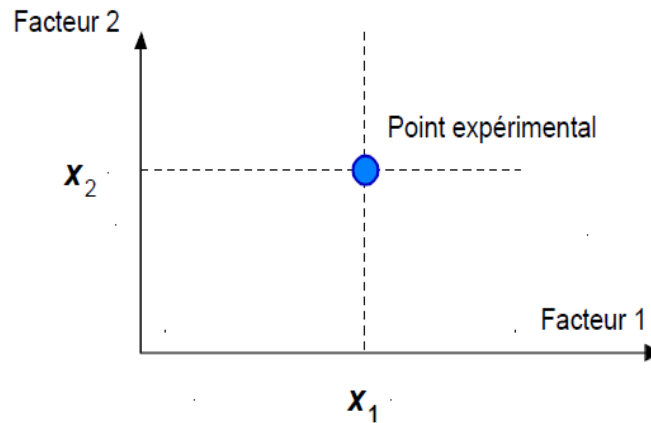


Figure III. 3. Représentation d'une réponse dans un espace expérimental.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure III.4).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

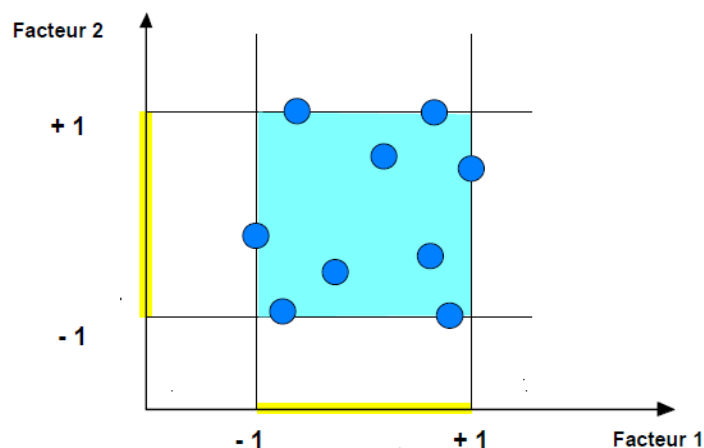


Figure III. 4. Domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais, il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple l'ensemble des

couleurs : blanc, rouge, vert, jaune, etc. On grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

### 3.2.3. Plan pour surface de réponse (plan composite)

Dans un plan d'expérience, une expérience est représentée par un point avec coordonnées  $(x_{1i}, x_{2j})$ . L'ensemble de tous les points expérimentaux constituent un ensemble de réponses, qui constituent à leurs tours une surface de réponse (**Figure III.5**).

Dans un plan classique (factoriel) basé sur des facteurs à deux niveaux, on peut obtenir des modèles mathématiques du premier degré. Dans la plus part des cas des matériaux de génie civil, on rencontre souvent des comportements avec un maximums ou un minimum. Ces comportements nécessitent des modèles de second degré.

A cet effet, on fait recours aux plans pour surfaces de réponse, dont le plus connu est le plan composite.

Peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues.

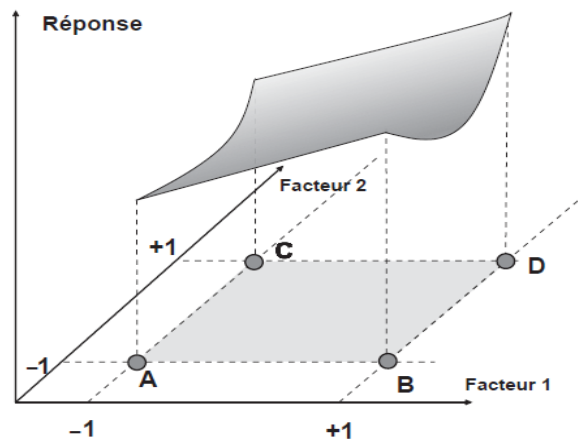


Figure III. 5.Surface de réponse formée par les points expérimentaux.

Le plan composite peut être un plan factoriel complet augmenté par des points axiaux. La flexibilité de ce type de plan réside dans le fait qu'il permet de passer par une analyse d'un modèle d'ordre 1 avant de passer à l'augmentation du plan par des points axiaux et l'analyse d'un modèle d'ordre 2. Le test de passage est effectué par l'intermédiaire des points centraux ; si le test est satisfaisant (c'est-à-dire, si la réponse mesurée au centre du domaine est proche à

la réponse calculée au même point), l'étude se termine et nous ne passons pas à l'augmentation de plan. Les points supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile (Figure III.6)

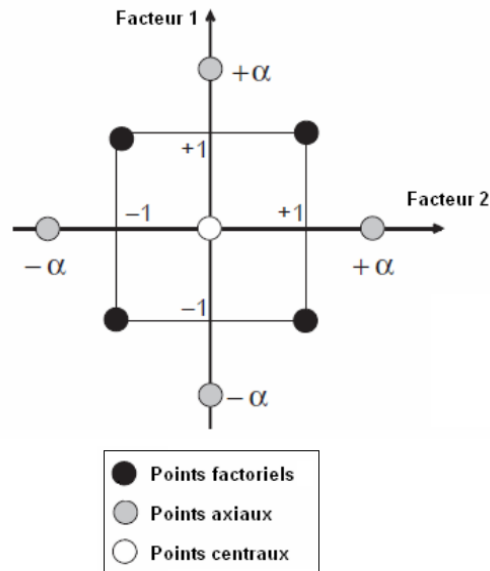


Figure III. 6.Exemple d'une représentation schématique d'un plan composite avec deux facteurs.

Le nombre total (n) d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel ( $n_f$ ), des essais du plan en étoile ( $n_\alpha$ ) et des essais au centre ( $n_0$ ) :

$$n = n_f + n_\alpha + n_0$$

### 3.2.3.1. Eléments de base appliqués aux plans d'expériences

Dans ce qui suit, on donne des explications et des définitions aux principaux outils mathématiques appliqués aux plans d'expérience, qui permettent de bien expliquer et comprendre les résultats trouvés.

#### A. Erreur expérimentale

L'erreur expérimentale est estimée en utilisant les valeurs des essais centraux:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)$$

Le carré des écarts des valeurs centrales à la moyenne peuvent être calculés comme suit :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

La somme des carrés des écarts est prise comme mesure de dispersion des valeurs centrales autour de la moyenne.

On peut calculer **la variance (V)**, en divisant la somme des carrés des écarts par le nombre des points centraux moins 1 (le nombre de points moins 1 est appelé **degré de liberté**).

Enfin, **l'écart-type ( $\sigma$ )** peut être calculé en prenant la racine carrée de la variance :

$$\sigma = \sqrt{V}$$

Le nombre des réponses qui interviennent dans la mesure de l'écart-type influe sur sa qualité. Plus le nombre est grand plus la qualité est bonne.

### B. Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance  $I_c$  est lié à :

- La probabilité retenue par l'expérimentateur (généralement en prend des probabilités > à 95%).
- La qualité de l'écart-type calculé.

On a :

$$I_c = k \cdot \sigma \tag{3-6}$$

Où:  $k$  est un coefficient lié à la qualité de l'écart-type. **Le tableau III.1.** Indique les valeurs de  $k$  en fonction de la probabilité choisie et le nombre de mesures qui interviennent dans le calcul de l'écart-type..

**Tableau III. 1.Valeurs de k (Goupy, 2006).**

		Nombre de mesures ayant servi à calculer l'écart-type.						
		2	3	4	5	10	20	$\infty$
Probabilité retenue	70%	1.96	1.38	1.25	1.19	1.10	1.06	1.03
	90%	6.31	2.92	2.35	2.13	1.83	1.73	1.64
	95%	12.7	4.3	3.18	2.78	2.26	2.06	1.96
	99%	63.6	9.92	5.84	4.6	3.25	2.86	2.58

### C. Influence des facteurs

L'influence des facteurs est jugée par leurs coefficients trouvés. On fait intervenir aussi l'écart-type pour l'évaluation de l'importance d'un coefficient ( $a_i$ ), Cette évaluation est effectuée par le rapport entre le coefficient est son écart-type:

- Si le coefficient est nettement plus grand que son écart-type, on dit que l'effet de coefficient est important.
- Si le coefficient est nettement plus petit que son écart-type, on dit que l'effet de coefficient est négligeable.
- Si le coefficient est comparable à son écart-type, son effet est laissé à l'expérimentateur.

Ce rapport est appelé **rapport-t** ou **t-student**. Ce rapport permet de calculer la probabilité que l'effet de coefficient soit important ou négligeable. Cette probabilité est appelée aussi **p-value**.

L'écart-type, comme mentionné avant, peut être divisé en deux parties : erreur expérimentale ( $\epsilon$ ) et manque d'ajustement ( $\Delta$ ).

#### D. Analyse de la variance

Cette analyse a pour but de localiser les sources de variation des réponses. En utilisant la méthode des moindres carrés. Dans ce cas, la différence trouvée s'appelle *résidus* ( $r_i$ ). On peut écrire :

$$y_i = \hat{y}_i + r_i$$

L'analyse de la variance fait intervenir la différence entre les réponses et leur moyenne, qui représentent les écarts des réponses à la moyenne et qui s'écrit :

$$\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 + \sum r_i^2$$

La somme des carrés des résidus est donc la plus faible valeur de la somme des carrés des écarts. Si on divise la somme des carrés des résidus par le nombre de degré de liberté associé, on obtient la variance des résidus  $V(r_i)$ :

$$V(r_i) = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n r_i^2$$

C'est sur la base de cette valeur qu'on peut évaluer l'importance d'un coefficient dans le modèle postulé.

La représentation de l'analyse de la variance est généralement effectuée sous la forme de tableau. La plus simple forme de ce tableau comporte 05 colonnes (source de variation, somme des carrés, degrés de liberté, carré moyen et statistique de Fisher) et 4 lignes (titres, modèle corrigé de la moyenne, résidus et réponses mesurées corrigées de la moyenne).

Le rapport F (de Fisher), qui est le rapport entre le carré moyen du modèle et les résidus. Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux.

### E. Coefficient de détermination

L'analyse de la variance permet aussi de calculer le coefficient de détermination  $R^2$ . C'est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées à la somme des carrés des réponses mesurées :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées}}$$

Ce rapport permet d'estimer la qualité du modèle postulé. Tant qu'il est proche de 1 c'est mieux.

### 3.2.4. Modélisation mathématique

La réponse peut être représentée, a priori, par une forme générale comme le suivant :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Pour en faire une approximation, on prend un développement Taylor-Mac Laurin, comme une première proposition. Donc, on peut réécrire la forme générale dans l'équation comme suit :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots$$

Où :

$Y$  est la réponse ;  $x_i$  représentent les facteurs ;  $a_0, a_i, a_{ij}, \dots$ , sont les coefficients du polynôme.

Il faut noter que les modèles issus de la modélisation sont valables dans le domaine d'étude, délimité au démarrage. La modélisation proposée est une modélisation expérimentale, c'est pour cela qu'on apporte deux compléments au modèle:

- 1- Le manque d'ajustement ( $\Delta$ ): représente la différence entre le modèle proposé est celui réel, trouvé après la modélisation.

2- L'erreur expérimentale ( $\varepsilon$ ) : représente la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse.

L'équation du modèle proposé doit être modifiée comme suit :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots + \Delta + \varepsilon$$

Pour la résolution de cette équation, on utilise une méthode de régression, généralement basée sur le critère d'optimisation des moindres carrés.

### **3.3. Essais de caractérisation des matériaux utilisés**

La recherche actuelle sur les matériaux s'intéresse au développement de nouveaux matériaux composites, dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques et leur durabilité et afin d'élargir leur domaine d'utilisation dans la construction.

Parmi ces matériaux, qui peuvent être exploités, et que nous utiliserons dans notre béton, le plâtre, sable de dune, et les déchets de plastiques recyclés qui sont préparés localement ainsi que la chaux et l'eau de gâchage.

#### **3.3.1. Plâtre**

Le plâtre utilisé provenant de l'usine **S.A.R.L.Ghardaïa plâtre**, et il est disponible sur le marché Algérien .



**Figure III. 7.Plâtre utilisé.**

### 3.3.1.1. Composition chimique de plâtre

Une analyse chimique du plâtre utilisé a été effectuée dans l'usine de sa fabrication pour déterminer sa composition et la teneur de chaque de ses composant du plâtre.

Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le **tableau III.2**

**Tableau III. 2. Analyse chimique du plâtre.**

Constituants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	KO	Cl
Pourcentage (%)	0,70	0,10	0,08	32,15	0,53	44,95	0,09	0,03	0,002

- D'après le tableau III.2, Nous remarquons que le plâtre utilisé contient des pourcentages appréciables de SO<sub>2</sub> et de CaO, ce qui affirme que le constituant le plus essentiel dans le plâtre utilisé est le sulfate de calcium.

### 3.3.1.2. Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X

Cet essai concerne les matériaux cristallisés. Il est réalisé à l'aide d'un diffractomètre de rayons X (**Figure III.8**). Celui-ci est équipé d'un tube à anode de cobalt de rayonnement  $\lambda_{K\alpha}^1 = 1.789\text{\AA}$  et un compteur proportionnel. L'identification des minéraux s'effectue en comparant les diagrammes des échantillons étudiés avec les diagrammes standards des principaux minéraux. A noter que l'amplitude et le nombre de pics d'une certaine substance obtenus sur le diagramme de diffraction X ne reflète en aucun cas la surabondance de cette substance dans le composé, ceci dépend du degré de cristallisation et de l'orientation de la substance. Il existe une relation entre l'intensité des raies de diffraction d'une espèce minérale et sa concentration dans un mélange, cette relation permet une analyse quantitative des différents minéraux dans le mélange

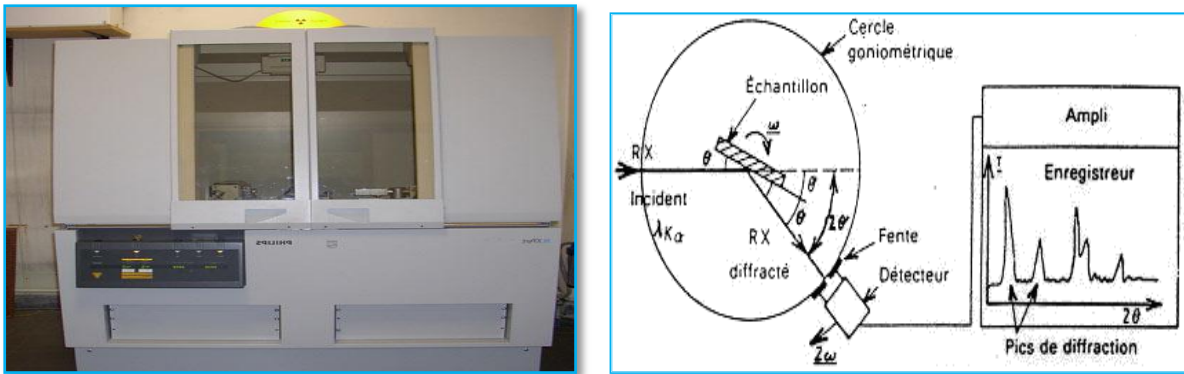


Figure III. 8. Diffractomètre de rayons X de l'UATL.

Les résultats de l'analyse par diffraction au rayon X du plâtre et de gypse sont représentés dans le diffractogramme des **figure III.9 et III.10** respectivement.

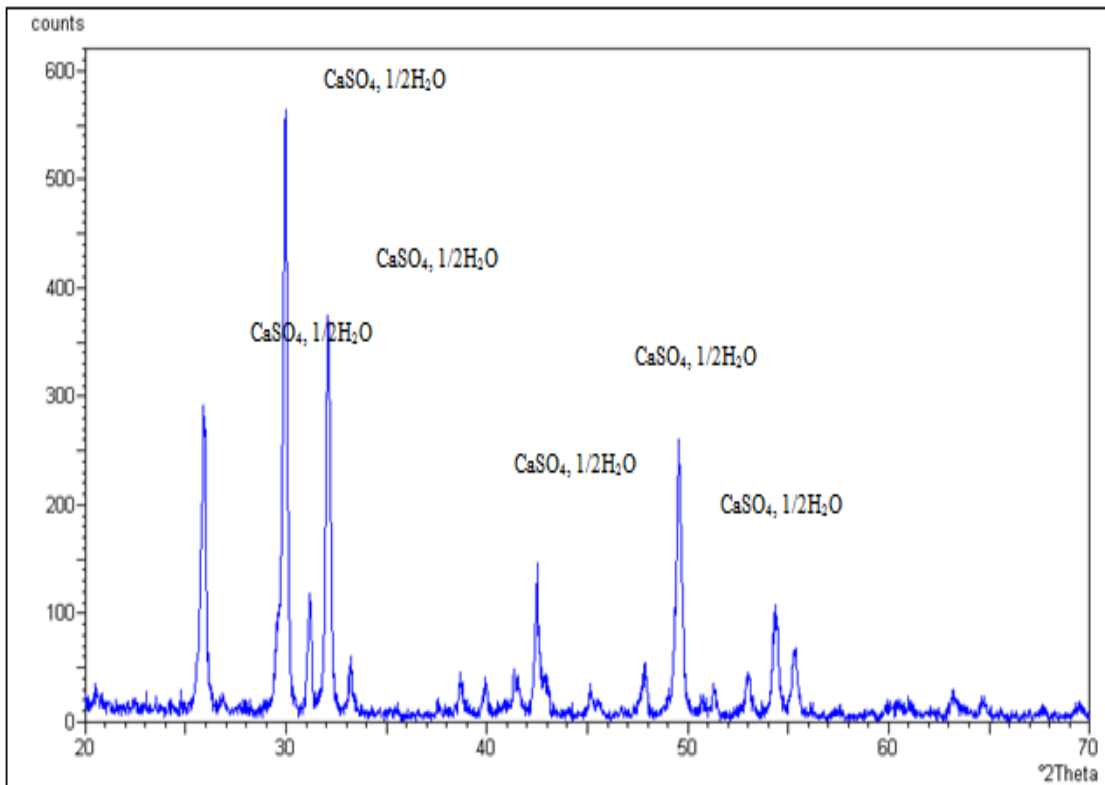


Figure III. 9. Diffractogramme du plâtre.

- L'analyse minéralogique, nous montre que le plâtre utilisé possède une teneur en  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$  environ 96%, ce qui nous a permis de le classer en classe I et qui correspond à une teneur en  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$  supérieure à 90 % [50].

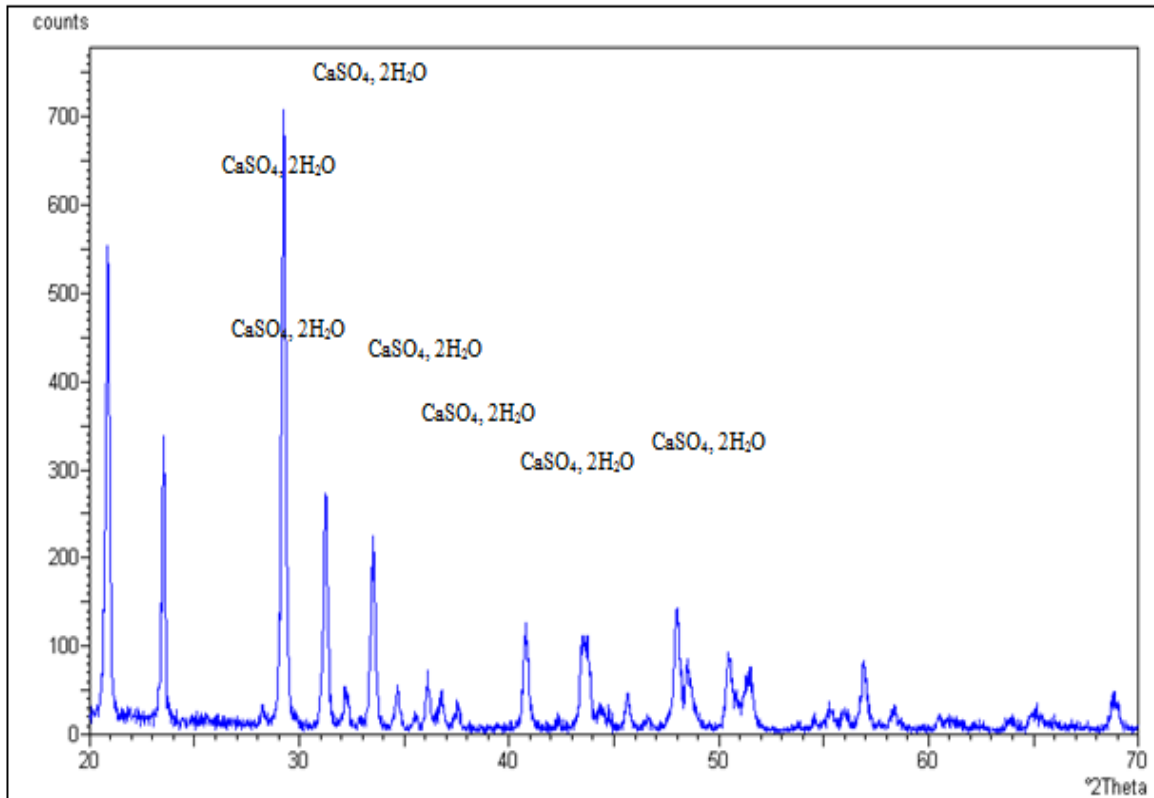
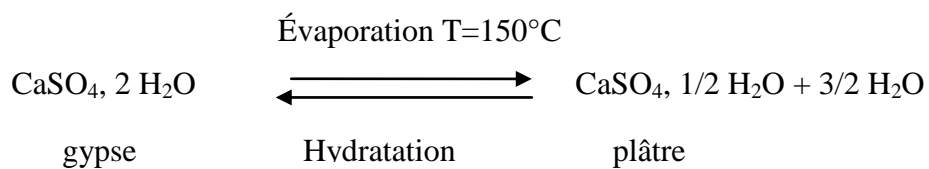


Figure III. 10. Diffractogramme de gypse.

- D'après le diffractogramme du plâtre et de gypse on peut confirmer l'existence de leur composant principal « le sulfate de calcium (CaSO<sub>4</sub>) ».
- La comparaison entre les deux diffractogrammes aussi révèle une différence dans la composition et la structure cristalline des deux matériaux, cette différence est due à l'évaporation ou l'hydratation d'une molécule et demi d'eau de composition (3/2 H<sub>2</sub>O) d'après la réaction ci-dessous :



- **Deux systèmes cristallins aussi révélé :**
  - Rhomboédrique en ce qui concerne le plâtre (CaSO<sub>4</sub> · 1/2 H<sub>2</sub>O).
  - Monoclinique en ce qui concerne le gypse (CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O).

### 3.3.1.3. Masse volumique absolue NFP 18-555

#### A. Principe de la mesure

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit, lorsqu'on introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue (**Figure III.11**).

#### B. Équipement nécessaire

- Un densimètre de Le Chatelier d'une contenance minimale de 50 cm<sup>3</sup>.
- Un thermomètre, précis à 0,1 °C, permettant de connaître la température du laboratoire.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le plâtre, l'éthanol.
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Papiers filtres.



**Figure III. 11.**Équipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue du plâtre.

La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_p}{V_1 - V_0} = \dots\dots\dots$$

**M<sub>p</sub>** : Masse du plâtre introduite

**V<sub>1</sub>** : Volume final lu sur le densimètre

**V<sub>0</sub>** : Volume initial pris comme référence (V=0).

❖ **La masse volumique absolue du plâtre utilisé est 2564.102 kg/m<sup>3</sup>**

### 3.3.1.4. Masse volumique apparente NFP 18-555

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée  $\rho_{app}$  et donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots$$

Où **M** : Masse du plâtre.

**V** : Volume total de l'échantillon.

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard de volume connu 1l (1dm<sup>3</sup>) et on pèse la masse totale  $M_T$  (Figure III.12, 13),

La masse de l'échantillon **M** sera :

$$M = M_T - M_R$$

( $M_R$  est la masse du récipient).



Figure III. 12. Dispositif pour l'essai de récipient et entonnoir à trépied.



Figure III. 13. Récipient standard.

➤ Alors la masse volumique apparente du plâtre de construction est 1065.21kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.1.5. Compacité et Porosité NFP 18-555

La compacité est définie par le rapport du volume (solide) de matière pleine au volume total. Alors que la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité.

La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100% : P+C=1. L'essai est réalisé selon la norme NFP18-555

Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} = 0.42 \longrightarrow C = 42 \%$$

$$P = 1 - C = 1 - 0.33 = 0.58 \longrightarrow P = 58 \%$$

### 3.3.1.6. Finesse de mouture NFB 12-301

La norme NFB 12-301 distingue les plâtres de construction selon la finesse par tamisage, le contrôle des plâtres est souvent effectué en usine à l'aide des tamis d'ouverture 0,8, 0,4 ou 0,2mm [52]. La finesse par tamisage sur un échantillon de 100g de plâtre de construction est comme dans le tableau suivant :

**Tableau III. 3.Finesse des plâtres de construction [53].**

Tamis		Refus r(en %)de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	PGC	PFC
0,8	30	$5 \leq r < 20$	$r \leq 2$
0,4	27	$20 \leq r < 40$	$r \leq 15$
0,2	24		$r \leq 35$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.4

**Tableau III. 4.Finesse de mouture du plâtre.**

Tamis		Refus (r %)de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	Essai 1	Essai 2
0,8	30	5.4	5.7
0,4	27	5.67	5.42
0,2	24	11	10.18

D'après les résultats obtenus dans le tableau III.5 et en les comparant avec le **tableau III.4**, on peut remarquer que pour le tamis 0,8mm :

$$5 < r = 5.4 < 20 \text{ et } 5 < r = 5.7 < 20$$

➤ **Alors le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction [53].**

### 3.3.1.7. Prise NFB 12-401

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété, lorsqu'ils se trouvent au contact de l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives :

- ✚ reprise de l'eau pour reformer le déshydraté.
- ✚ cristallisation (qui constitue la prise proprement dite).
- ✚ durcissement [52].

Cet essai est prescrit par la norme **NFB 12-401**, il constitue une indication indispensable pour la prise d'un plâtre (**Figure III.14**) qui est en fonction de :

- Sa nature (à prise lente ou rapide).
- Sa finesse.
- La température de milieu de conservation.
- La teneur et la nature des adjuvants (retardateurs ou accélérateurs de prise).
- Le rapport E/P. [9].

Les temps de début et de fin de prise, sont mesurés à l'aide d'un appareil analogue à l'aiguille de VICAT (utilisée pour les ciments) [53], muni d'un cône à son extrémité, l'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans une pâte de plâtre.

- le début de prise : est défini comme étant le temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrêter à une distance  $d \geq 2,5$  cm du fond du moule.
- La fin de prise : correspond au temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte de plâtre [52].

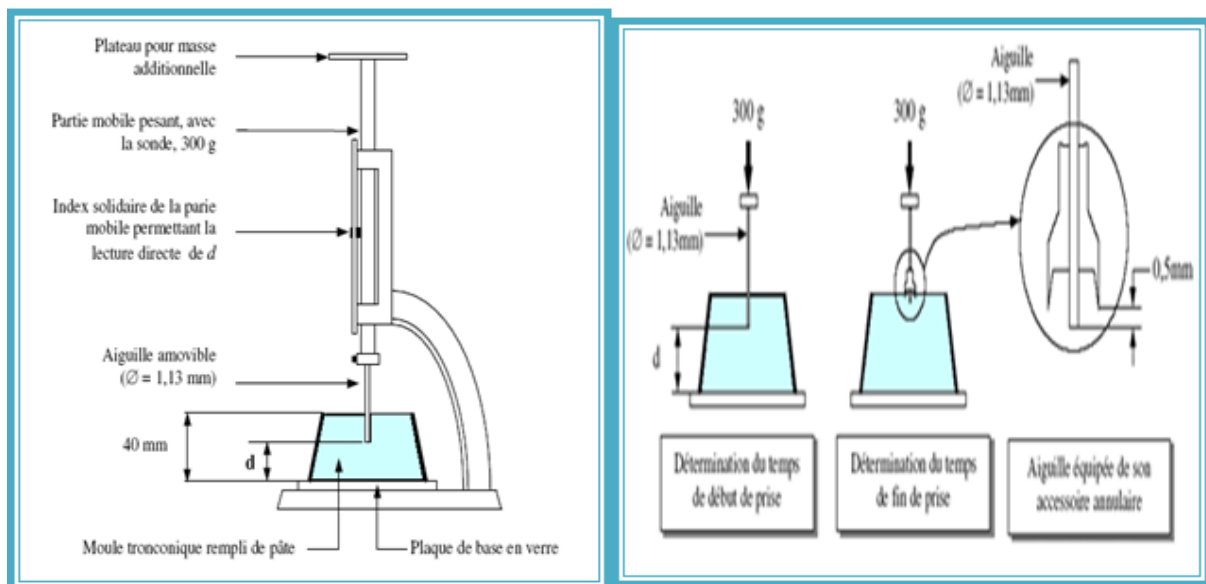


Figure III. 14.Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge [52].

A une température de 20 °C les temps du début de prise (d) et de la fin de prise (f) des plâtres gros de construction( PGC ) sont montré dans le tableau suivant :

**Tableau III. 5. Temps du début de prise et de la fin de prise de plâtre pour chaque E/p**

Rapport E/P	Temps début de prise	Temps fin de prise
E/p = 0,51	$d \leq 1$ min	4 min
E/p = 0,55	1 min	5 min
E/p = 0,6	2 .30 min	8 min
E/p = 0,65	4 min	10 min
E/p = 0,68	5 min	13 min

Le tableau III.7 donne le temps du début de prise et de fin de la prise de plâtre [53].

D'après les résultats de prise du plâtre obtenus on remarque que le temps de début et de fin de prise de plâtre utilisé est dans l'intervalle donnée dans le **tableau III.6**.

**Tableau III. 6. Temps du début de prise et de la fin de prise des plâtres [53].**

Temps (min)	PGC
Début (min)	$2 \leq d \leq 6$
Fin (min)	$15 \leq f < 30$

### 3.3.1.8. Propriétés mécaniques du plâtre

Le malaxage s'effectue sans malaxeur de la façon suivante :

- On met l'eau de gâchage dans un récipient et on saupoudre avec le mélange (plâtre=330 g, chaux = 19.8 g) en malaxant bien le mélange rapidement. Après on fait la mise en œuvre du mélange et démoulage des moules après 24h et conservation à 28 jours.

Les résultats de propriétés mécaniques de plâtre utilisé sont représentés sur le **tableau III.7**

**Tableau III. 7. propriétés mécaniques du plâtre sur des éprouvettes 4\*4\*16 cm<sup>2</sup>**

Propriétés mécaniques	
Resistance à la compression à 28 jrs	12.23 MPa
Resistance à la flexion à 28 jrs	4.23 MPa

### 3.3.2. Sable de dune

Le sable de dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz.

Le sable utilisé dans notre étude est le sable de dunes de la région nord de la ville de Laghouat.

### 3.3.2.1. Analyse minéralogique et chimique

Les résultats de l'analyse chimique et minéralogiques et sont représentés sur le **tableau III.8** et la **figure III.16**.

Tableau III. 8.Analyse chimique du sable [41].

Résidus insolubles (SiO <sub>2</sub> ) %	95,87
Teneur en sulfate (SO <sub>3</sub> )%	0,91
Matières organiques MO%	-----
Teneur en chlorures %	0,36
Carbonate de Calcium CaCO <sub>3</sub> %	2.5

Les résultats ci-dessus montrent que le sable utilisé est de nature siliceuse, vu la dominance de la silice (SiO<sub>2</sub>) au tableau III.8.

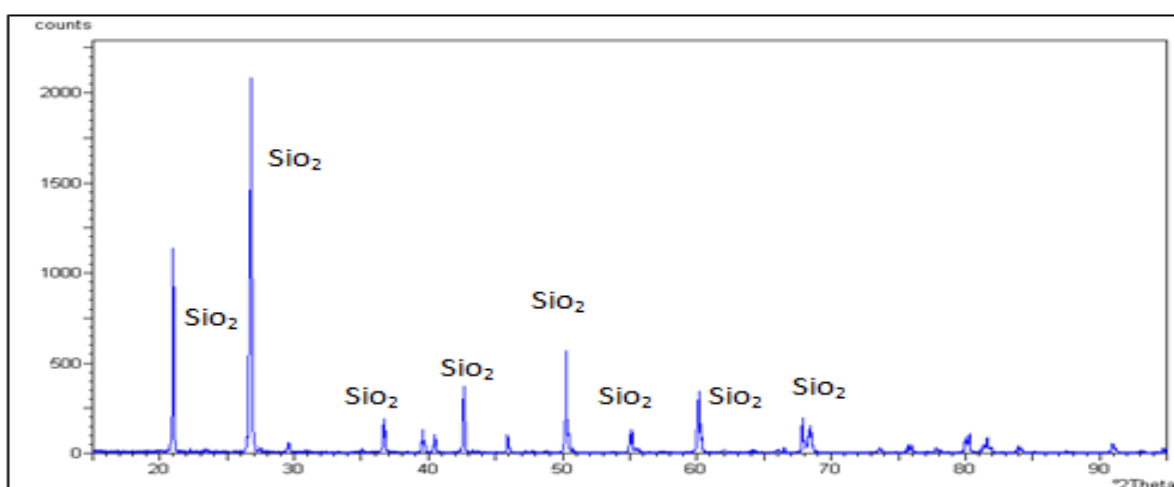


Figure III. 15.Diffractogramme aux rayons X du sable de dune

Le diffractogramme de la **figure III.15** obtenu par analyse minéralogique de ce sable, menée par rayons X au diffractomètre, confirme la présence du composant minéralogique de l'espèce SiO<sub>2</sub> (silice).

### A. Morphologique des grains de sable de dune

Une photo du sable dunaire à grande échelle visualisée par microscope électronique à balayage (M.E.B), effectué par Bedrina [54] au laboratoire de l'I.U.T d'Amiens en France montre que la majorité des grains possèdent des formes arrondies avec une faible angularité (Figure III.16).

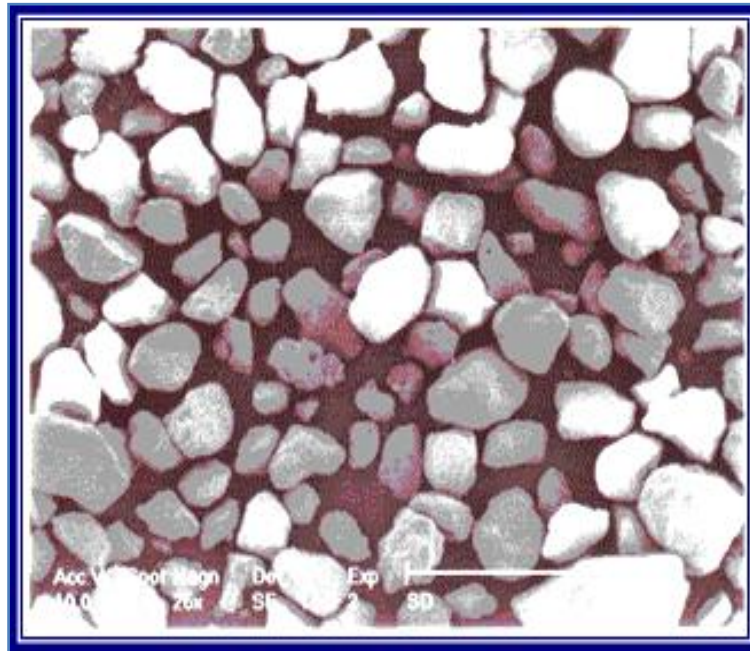


Figure III. 16. Vue générale (à grande échelle, MEB.) du sable de dune [54].

### 3.3.2.2. Masse volumique absolue NFP 18-555

#### A. Principe de l'essai

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit, lorsqu'on introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue (Figure III.17).



Figure III. 17. Détermination de la masse volumique absolue.

➤ La masse volumique absolue du sable de dune de construction est  $2666.66 \text{ kg/m}^3$

### 3.3.2.3. Masse volumique apparente NFP 18-555

La masse volumique apparente du sable de dune de construction est  $1538.25 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.3.2.4. Compacité et Porosité NFP 18-555

#### ❖ Compacité

$$C = \rho_{\text{app}} / \rho_{\text{abs}} = 0.58 \longrightarrow C = 58 \%$$

#### ❖ Porosité

$$P = 1 - C = 0.42 \longrightarrow P = 42 \%$$

### 3.3.2.5. Equivalent de sable NFP 18-598

#### A. Principe de l'essai

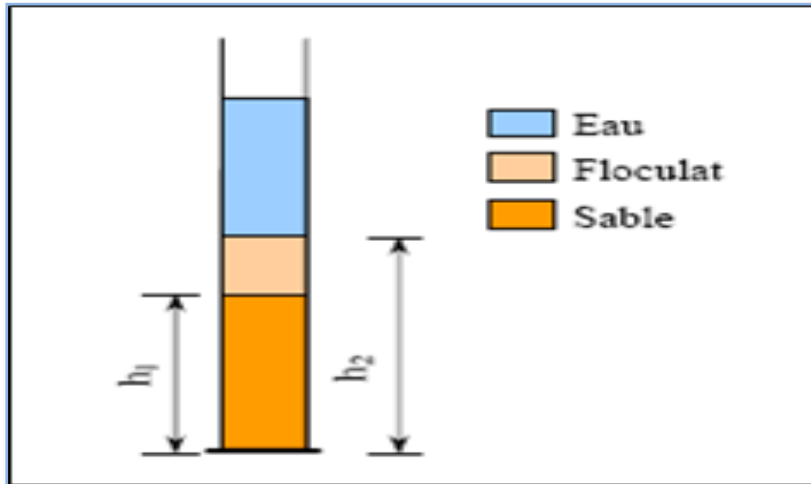
L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm des matériaux à étudier (Figure III.18). On lave l'échantillon selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur  $h_1$  : sable propre + éléments fins.
- Hauteur  $h_2$  : sable propre seulement .vue à l'œil.
- Hauteur  $h_2'$  : sable propre seulement .mesuré à l'aide du piston.

On détermine le degré de propreté du sable :

$$E_{sv} = \frac{H_2}{H_1} \times 100(\%) \dots\dots\dots$$

$$E_{sp} = \frac{H^*_2}{H_1} \times 100(\%) \dots\dots\dots$$



**Figure III. 18. Détermination de l'équivalent de sable.**

Les résultats de l'équivalent de sable sont représentés sur le **tableau II.9**

**Tableau III. 9. Résultats de l'essai de L'équivalent de sable de dune.**

E <sub>SV</sub> (%)	E <sub>SP</sub> (%)
<b>78.19</b>	<b>71.35</b>

➤ **D'après les résultats obtenus de l'équivalent de sable on peut constater que le sable de dune utilisé est propre, convenant au béton à haute qualité.**

**3.3.2.6. Essai d'absorption NFP 18-555**

**A. Principe de l'essai**

Le coefficient d'absorption correspond au rapport de l'augmentation de la masse d'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 h & 20 C° à la masse de l'échantillon sec (**Figure III.19**).

$$Abs = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

**M<sub>s</sub>** : la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 105 C°.

**M<sub>h</sub>** : la masse de l'échantillon imbibé (surface essuyée).



Figure III. 19. Détermination du coefficient d'absorption.

➤ Alors le coefficient d'absorption d'eau de sable de dune est 1.56 %.

### 3.3.2.7. Analyse granulométrique par tamisage NFP18-560

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables pour la détermination de la composition du béton, l'essai est réalisé selon la norme Française NFP18-560. Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon (Figure III.20). Pour avoir les meilleurs mélanges, les granulats doivent répondre à des fuseaux granulaires.

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 2 mm avec le passage de sable sur les tamis (2 mm).

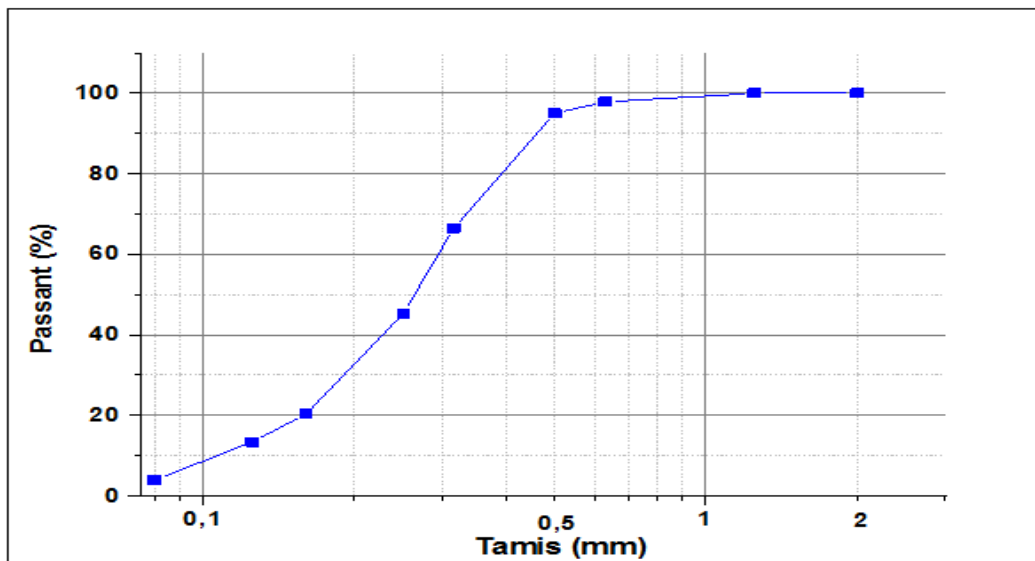


Figure III. 20. Appareillage pour l'analyse granulométrique par tamisage.

Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé sont représentés dans le **tableau III.10.** et la **figure III.21.**

**Tableau III. 10. Analyse granulométrique du sable de dune.**

<b>Analyse granulométrique du sable de dune</b>					
<b>la masse su sable = 2000 g</b>					
<b>Coefficient AFNOR</b>	<b>Diamètre des tamis (mm)</b>	<b>Masse. Refus partiel (g)</b>	<b>Masse. Refus Cumulée (g)</b>	<b>Refus cumulée (%)</b>	<b>Passant (%)</b>
<b>34</b>	2	0	0	0	100
<b>32</b>	1,25	0,5	0,5	0,025	99,98
<b>29</b>	0,63	42,47	42,97	2,1485	97,85
<b>28</b>	0,5	56,78	99,75	4,9875	95,01
<b>26</b>	0,315	570,15	669,9	33,495	66,51
<b>25</b>	0,25	415,47	1085,37	54,2685	45,37
<b>23</b>	0,16	508,31	1593,68	79,684	20,32
<b>22</b>	0,125	137,55	1731,23	86,5615	13,44
<b>20</b>	0,08	189,79	1921,02	96,051	3,95
<b>fond</b>	f	71,13	1992,15	99,61	0,39



**Figure III. 21. Courbes granulométriques de sable de dune.**

❖ **Module de finesse :**

Le module de finesse  $M_f$  du sable est défini comme suit :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100} = (0+0.025+2.1485+4.9875+33.495+54.2685+79.685+86.5615) = 2,532$$

Avec :  $R_c$ : Refus cumulé en % sur les tamis .22.23.25.26.28.29.32.34

La valeur du module de finesse confirme que le sable dunaire est un sable très fin, rappelons que pour un sable à béton traditionnel, ce module est compris entre 2,20 et 2,80 [44].

### 3.3.3. Déchets en plastique recyclé

Les granulats utilisés dans ce travail sont des produits à partir des déchets de sacs en plastique (comme le montre la figure III.22, 23). La feuille de plastique est fendue en brins minces, produisant des fibres continues droites après découpé en granulats manuellement ou automatiquement. Les granulas en plastique recyclés de diamètre de 3 à 4 mm et une densité de  $0,87 \text{ g / cm}^3$  (Figure III.24).



Figure III. 22.Les étapes du recyclage des granulats [48].



Figure III. 23.Déchets du plastique utilisé.

### 3.3.3.1. Masse volumique absolue NF P 18 555

#### A. Conduite de l'essai : (Méthode de la mesure au pycnomètre)

- On détermine avec précision la masse  $M_1$  du pycnomètre rempli d'eau.
- On détermine avec précision la masse  $M_2$  d'un échantillon de matériau sec (environ 30 g),
- Introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre, rempli d'eau, et on ferme le bouchon et remplir le volume restant du pycnomètre de l'eau.
- Dans tous les cas . on vérifie que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air, puis on pesé alors le pycnomètre, soit  $M_3$ .



Figure III. 24.Détermination masse volumique absolue des déchets plastiques.

On peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés :

$$M_3 = M_1 + M_2 - (M_2 / \rho_s) * \rho_w$$

La masse volumique  $\rho_s$  du matériau, connaissant la masse volumique de l'eau  $\rho_w$  qui est égale a  $1 \text{ g/cm}^3$  ou  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

➤ **la masse volumique apparente du déchet est  $910 \text{ kg/m}^3$**

### 3.3.3.2. Masse volumique apparente NFP 18-555

**La masse volumique apparente des déchets en plastique recyclé est  $531.5 \text{ kg/m}^3$ .**

### 3.3.3.3. Analyse granulométrique par tamisage des déchets

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 5 mm avec le passage de déchet sur les tamis (5 mm), (**Figure III. 25**).



**Figure III. 25.**Appareillage pour l'analyse granulométrique.

Les résultats d'analyse granulométrique du déchet utilisé sont représentés dans le **tableau III.11** et la **figure III.26** :

**Tableau III. 11.**Analyse granulométrique des déchets plastiques.

<b>Analyse granulométrique des déchets plastiques</b>					
<b>la masse M = 2000 g</b>					
<b>Coefficient AFNOR</b>	<b>Diamètre des tamis (mm)</b>	<b>Masse. Refus partiel (g)</b>	<b>Masse. Refus Cumulée(g)</b>	<b>Refus cumulée (%)</b>	<b>Passant (%)</b>
<b>38</b>	5	0	0	0	100
<b>37</b>	4	179.11	179.11	8.9555	91.0445
<b>36</b>	3.15	1488.72	1667.83	83.3915	16.6085
<b>35</b>	2.5	311.22	1979.05	98.9525	1.0475
<b>34</b>	2	15.63	1994.68	99.734	0.266
<b>31</b>	1	4.61	1999.29	99.9645	0.0355
<b>Fond</b>	f	0	0	0	0

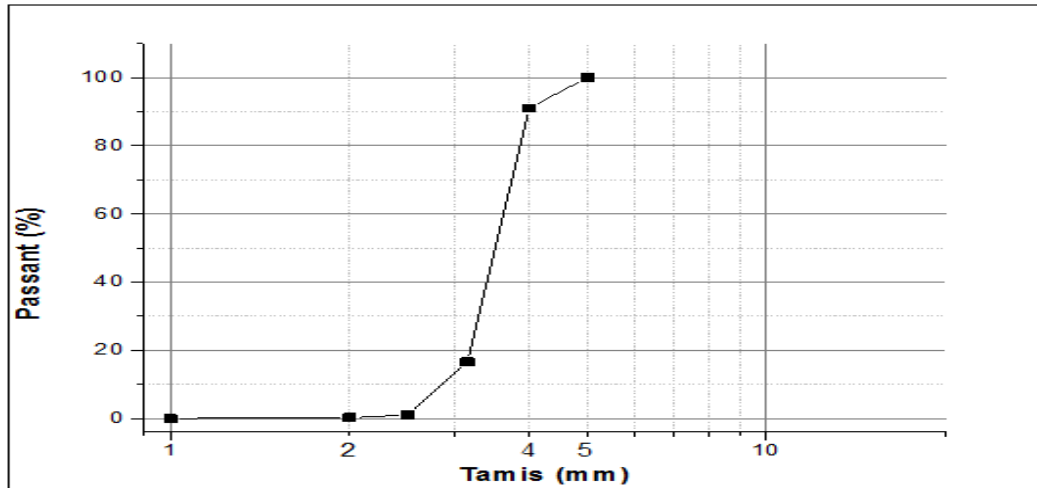


Figure III. 26. Courbes granulométriques des déchets en plastique.

### 3.3.4. Chaux

On a utilisé la chaux vive de SARL B.C.B Ghardaïa (figure III.27) comme retardateur de prise du plâtre, car elle diminue la solubilité de ce dernier et permet d'augmenter son temps d'emploi. En plus elle n'affecte pas ces propriétés mécaniques.



Figure III. 27. La chaux utilisée.

D'après le fiche technique fournie par l'usine :

- **Nominations :**

Nomination commerciale : chaux dolomitique vive.

Nomination chimique : oxyde de calcium et magnésium.

Forme chimique :  $\text{CaO.MgO}$ .

### 3.3.4.1. Analyse chimique

L'analyse chimique de la chaux utilisée est effectuée à l'usine et présentée sur le **tableau III.12**

**Tableau III. 12. Analyse chimique de la chaux.**

CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
56%±2%	42%±2%	0.4%±0.1%	0.04%±0.01%	0.08%±0.01%

### 3.3.5. Caractérisation de l'eau de gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais, une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire.

L'eau qui est utilisée pour la confection de notre béton doit vérifier deux fonctions principales. D'une part, une fonction physique qui permet de conférer au béton les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. Cette eau doit être propre.

Le tableau ci-dessous présente l'analyse chimique de l'eau de gâchage.

**Tableau III. 13. Composition chimique de l'eau de gâchage [A.D.E. Laghouat].**

Nature du point d'eau		Robinet		
<b>Ca<sup>+2</sup> en mg/l</b>	104	Balance cations m. éq/l		<b>5.20</b>
<b>Mg<sup>+2</sup> en mg/l</b>	97			<b>8</b>
<b>Na<sup>+</sup> en mg/l</b>	102.3			<b>4.45</b>
<b>K<sup>+</sup> en mg/l</b>	646			<b>0.14</b>
<b>Cl<sup>-</sup> en mg/l</b>	148	Balance Anions m. éq /l 16.74		<b>4.17</b>
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en mg/l</b>	520			<b>10.82</b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en mg/l</b>	94			/
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en mg/l</b>	12.4			<b>0.2</b>
<b>Résidu sec à 105°C 1576 mg/l</b>	PH 7.70	Conductivité en 1/10 mm à 25°C 16.77		<b>dureté totale 43.25</b>
<b>Test chlore (ml d'eau de Javel à 15°/m<sup>3</sup>) 0.96 ml/l</b>		T.A.C 7.8°F	S.A.F 75°F	<b>I.S 62.3°F</b>
<b>MINERALISATION 1010.60</b>	M.O milieu Acide en O <sub>2</sub> 8.53	SiO <sub>2</sub> 4.45 mg/l		<b>Somme des ions 1084 mg/l</b>
<b>Cations</b>	Ca <sup>+2</sup> = 15%	Mg <sup>+2</sup> = 23.2%		<b>Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> = 13.4%</b>
<b>Anions</b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 4.5%</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> = 53.8%</b>		<b>Cl<sup>-</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 12.6%</b>

Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5. Si le choix a été porté sur cette eau c'est sa pureté et l'absence des excès des teneurs de sels, de sulfates et d'acides et ceux-ci on se basant sur le rapport fourni par le laboratoire ADE de Laghouat (Algérienne des eaux de Laghouat ex EPDEMIA).

### 3.4. Formulation

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des bétons de plâtre, nous a conduit à suivre les recommandations de CNERIB [50] et à l'aide de logiciel statistique JMP7 (de SAS Institute).

Dans cette formulation on à trois matrices :

- ❖ matrice 1 : plâtre + sable.
- ❖ matrice 2 : plâtre + déchets plastiques.
- ❖ matrice 3 : plâtre + déchets plastiques + sable.
- ❖ **Note** : On ajoute 6% de la chaux aérienne comme retardateur de prise.

La formulation des bétons de plâtre à base des déchets en plastique sont illustrés sur le tableau ci-dessous :

**Tableau III. 14. Formulation des bétons de plâtre à base des déchets en plastique.**

Plâtre = 330g				Chaux = 19.8g (6%)			
				dosages en (g)			
MIX	E/P	S/P	D/P	Eau (g) th.	Eau (g) réelle.	sable (g)	déchets (g)
1	0,51	0,4	0,3	168,3	170,3592	132	99
2	0,55	0,16	0,12	181,5	182,32368	52,8	39,6
3	0,55	0,16	0,48	181,5	182,32368	52,8	158,4
4	0,55	0,64	0,12	181,5	184,79472	211,2	39,6
5	0,55	0,64	0,48	181,5	184,79472	211,2	158,4
6	0,6	0	0,3	198	198	0	99
7	0,6	0,4	0	198	200,0592	132	0
8	0,6	0,4	0,3	198	200,0592	132	99
9	0,6	0,4	0,3	198	200,0592	132	99
10	0,6	0,4	0,3	198	200,0592	132	99
11	0,6	0,4	0,3	198	200,0592	132	99
12	0,6	0,4	0,6	198	200,0592	132	198
13	0,6	0,8	0,3	198	202,1184	264	99
14	0,65	0,16	0,12	214,5	215,32368	52,8	39,6
15	0,65	0,16	0,48	214,5	215,32368	52,8	158,4
16	0,65	0,64	0,12	214,5	217,79472	211,2	39,6
17	0,65	0,64	0,48	214,5	217,79472	211,2	158,4
18	0,68	0,4	0,3	224,4	226,4592	132	99

### 3.4.1. Mise en œuvre

#### 3.4.1.1. Procédure de malaxage

Le malaxage s'effectue sans malaxeur (**Figure III.28**) de la façon suivante :

- On mélange les matériaux (plâtre, sable, déchets et la chaux) à sec.
- On met l'eau de gâchage dans un récipient et on saupoudre avec le mélange (plâtre, sable, déchets et la chaux), en malaxant bien le mélange et rapidement.



Figure III. 28. La procédure du malaxage.

#### 3.4.1.2. Préparation et conditionnement des éprouvettes

La mise en moule est faite sans vibration à raison de 3 couches piquées à la truelle pour éviter tout problème de ségrégation affectant l'homogénéisation des échantillons. Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'air libre du laboratoire en les couvrant d'une toile en plastique. Après 24 heures, les éprouvettes de forme prismatique ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) sont démoulées et conservées dans les mêmes conditions.

Les échantillons sont conservés dans les conditions suivantes :

- Température (C°) :  $20^\circ \pm 5^\circ$
- Humidité (%) :  $45\% \pm 5\%$

Les moules utilisés pour les essais mécaniques et les essais de variation dimensionnelle sont représentés sur les figures ci-dessous :



Figure III. 29. Moules utilisés pour l'essai mécanique



Figure III. 30. Moules utilisés pour l'essai de variation dimensionnelle.

### 3.5. Les essais de caractérisation du béton durci

#### 3.5.1. Caractéristiques physiques

##### 3.5.1.1. La masse volumique

Les éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  sont pesées régulièrement au cours du temps et cela à l'aide d'une balance avec précision de 0.1g. Les masses volumiques aux âges de 1 à 7 jours, 14 jours 21 jours et 28 jours sont mesurées lors de cette étude (Figure III.31).



Figure III. 31. Détermination de la masse volumique.

##### 3.5.1.2. La porosité totale

La porosité est un paramètre très important à prendre en compte lors de l'étude de caractérisation d'un matériau poreux, elle influe sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons.

La taille des pores de dimensions variables dans un même matériau, influence en partie le caractère hygroscopique du matériau. Un autre phénomène qui dépend de la taille des pores, se traduit par la quantité d'eau liée présentée dans le matériau [55].

On peut différencier deux types de porosité :

- La porosité ouverte (ou libre) accessible à la pénétration du fluide (ensemble de pores reliés à l'extérieur).
- La porosité fermée (occluse) non accessible à la pénétration du fluide (celle qui n'est pas connectée avec l'extérieur).

La porosité totale est la somme de la porosité connectée ou ouverte et de la porosité fermée.

La figure III.32 présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

- ✚ Les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).
- ✚ Les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.
- ✚ Les pores ou bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport [55].

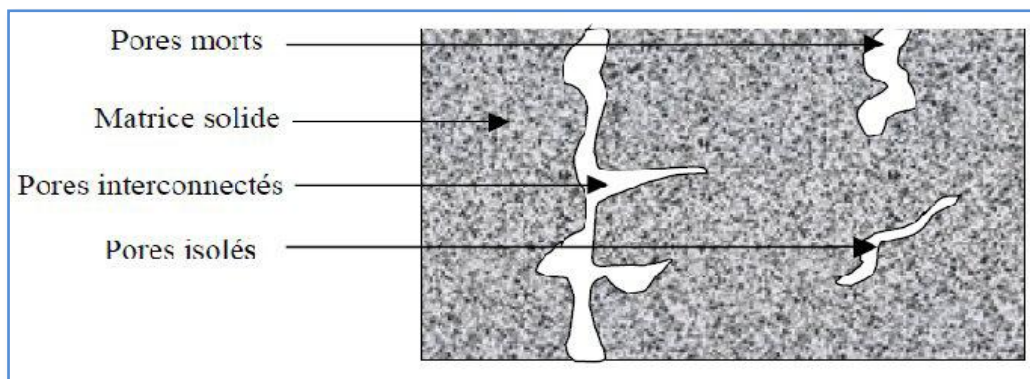


Figure III. 32.les pores connecté et fermé.

La porosité totale ( $P$  totale) de béton provient de celle de la matrice et celle du granulats, elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction de volume des vides dans le matériau par rapport au volume total [29].

De plus la porosité totale  $\epsilon$  est immédiate si on connaît la masse volumique apparente  $\rho_{app}$  et absolue  $\rho_{abs}$  de l'échantillon auquel on s'intéresse. En effet, on peut écrire :

$$Porosité P_r = \frac{V_v}{V_t} = \left[ \frac{V_t - \frac{m_{sec}}{\rho_{abs}}}{V_t} \right] = \left[ 1 - \frac{m_{sec}}{\rho_{abs} V_t} \right] = \left[ 1 - \frac{\rho_{rel}}{\rho_{abs}} \right] = \left( \frac{\rho_{abs} - \rho_{rel}}{\rho_{abs}} \right)$$

▪ Le protocole de l'essai la Porosité accessible à l'eau

- L'échantillon (2\*2\*2cm) est placé dans une enceinte fermée dans laquelle on établit le vide.
- L'échantillon est mis en dépression à l'air pendant une certaine durée environ (24h) environ dans le but de le saturer sous vide.
- On introduit alors de l'eau déminéralisée dans l'enceinte jusqu'à remplissage. Après 24h environ, la perméabilité de l'échantillon permet de supposer que saturer le plus complètement possible.
- l'échantillon « saturée » est pesée. On obtient alors la masse de l'échantillon saturée  $m_{sat}$  (g).

- On mesure donc la porosité ouverte accessible à l'eau :

Avec :

Le volume des pores accessible à l'eau ( $V_e$ ) sous vide est égal au volume d'eau qui a pénétré dans l'échantillon ( $V_{eau}$ ), et on suppose la porosité fermée négligeable ou très faible, alors :

$$V_v = V_e.$$

➤ Par conséquent :

$$V_v = V_e = \frac{m_{eau}}{\rho_{eau}} = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{\rho_{eau}}$$

Avec :

- $m_{sat}$  : la masse de l'échantillon saturée.
- $m_{sec}$  : la masse l'échantillon sèche.
- $\rho_{eau}$  : la masse volumique de l'eau, estimée à  $\rho_{eau} = 1\text{g/cm}^3$

En fin la porosité ouverte accessible à l'eau est égale :

$$P_{ac} = \frac{V_{eau}}{V_t} < P_r$$

### 3.5.2. Caractéristiques mécaniques

#### 3.5.2.1. Résistances mécaniques

##### A. Essais de Résistance à la flexion (flexion 3 points) :

L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4 ×4× 16) cm<sup>3</sup> selon la norme NF P. 18-407, La machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 100 KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/sec ± 10N/sec.

La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion, tel que celui schématisé sur **la figure III.33**

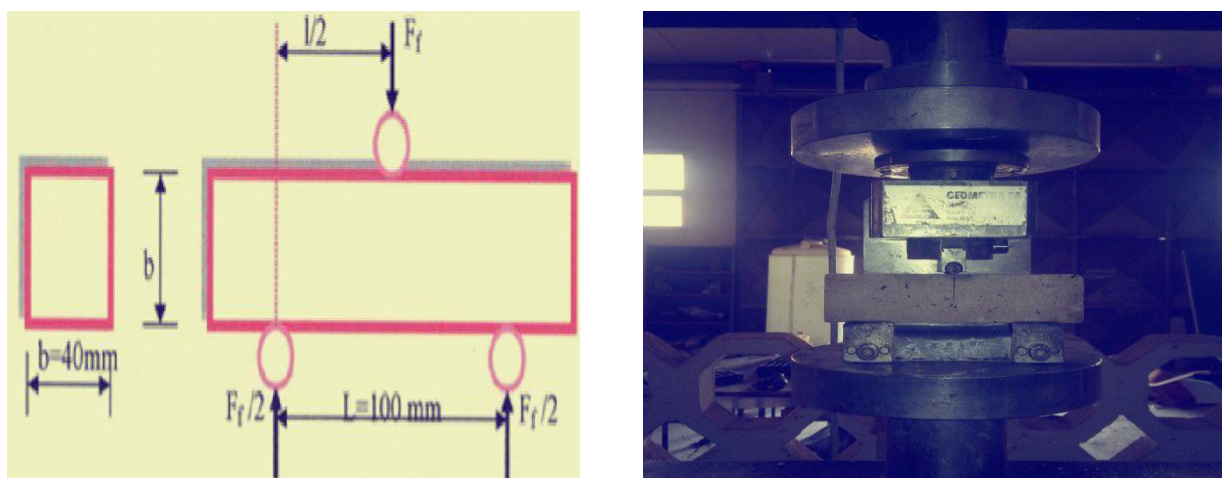


Figure III. 33.Schématisation du dispositif de flexion 3 points.

La résistance à la flexion est calculée par la formule de la R.D.M suivant :

$$R_f = \frac{3 f_r L}{2 b^3} \text{ (MPa)}$$

**L** : Distance entraxe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette 40x40x160 mm<sup>3</sup> (L= 100 mm)

**R<sub>f</sub>** : Résistance à la flexion en MPa.

**F<sub>f</sub>** : Charge à la rupture en N.

**b** : Largeur de la section carrée du prisme en mm (b = 40 mm).

##### B. Essais de Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion conformément à la norme NFP 18-406.

L'écrasement des morceaux est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement force 2400 N/s  $\pm$  200 N/s.

La résistance à la compression est calculée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ (MPa)}$$

Avec :

$R_c$  : Résistance à la compression en MPa.

$F_c$  : Charge à la rupture en N.

$A$  : l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en mm<sup>2</sup> (1600 mm<sup>2</sup>).

La figure III.34 montre le dispositif de l'écrasement par compression :

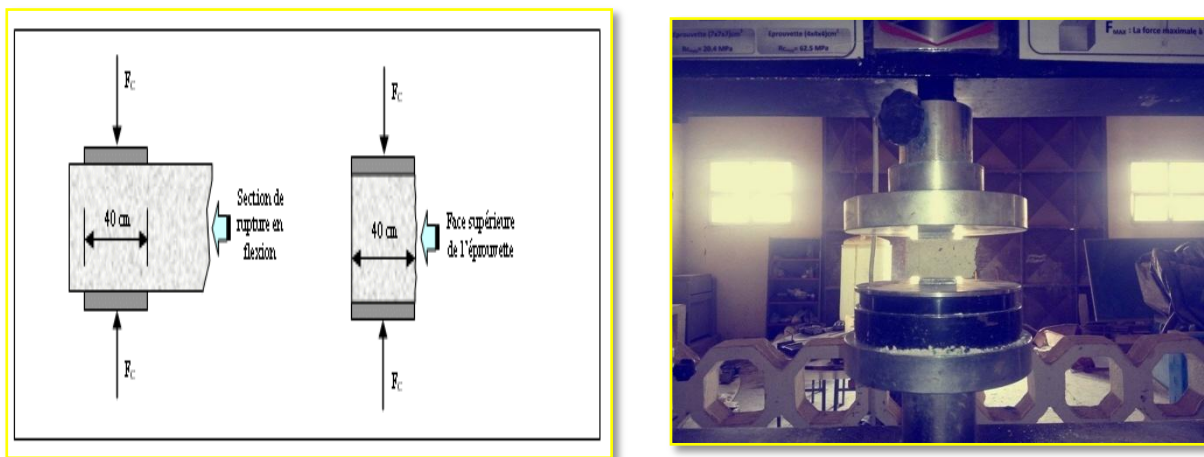


Figure III. 34.Schématization du dispositif de compression.

### C. Variation dimensionnelle

Il consiste à mesurer la variation dimensionnelle longitudinale relative par rapport à la longueur initiale de l'éprouvette après 24 heures de moulage ( $L_0 = 16\text{cm}$ ). L'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. On prend la moyenne des trois mesures sur trois éprouvettes.

Si la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03 mm celle de l'éprouvette avant la variation la plus voisine. Il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact, descellement des plots ...etc.) et si celle-ci peut être éliminée l'éprouvette doit être rebutée.

L'appareil de l'essai (Figures III.35, 36) doit être étalonné avant chaque série de mesures avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_f - L_i}{16} \right|$$

Le retrait étant exprimé par :

$L_f$  : la longueur finale.

$L_i$  : la longueur initiale.

$L_0$  : La longueur initiale après 24heures démoulage. ( $L_0 = 16$  cm).

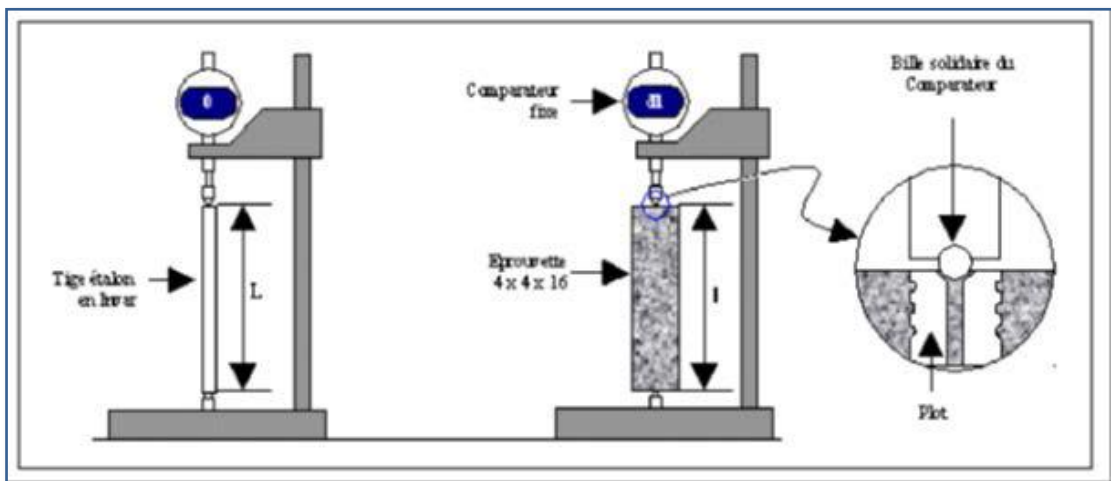


Figure III. 35.Appareillage pour la mesure du retrait.



Figure III. 36.Appareil de retrait utilisé.

### 3.5.3. Caractéristiques thermiques

Avant d'expliciter les procédures expérimentales, il est nécessaire de définir les paramètres caractérisant le pouvoir isolant d'un matériau:

- *La conductivité thermique :*

La conductivité thermique  $\lambda$  exprimée en  $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ , traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Parmi les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des matériaux de construction, citons : la porosité et la teneur en eau.

- *La capacité calorifique :*

Elle traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner la chaleur, elle est notée ( $c$ ) et exprimée en  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

- *La diffusivité thermique :*

Le rapport  $a = \lambda / \rho c$  est appelé diffusivité thermique du matériau, elle exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en ( $m^2/s$ ).

- *L'effusivité thermique :*

L'effusivité thermique est la propriété d'un corps à arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact, elle est caractérisée par un coefficient d'arrachement ou effusivité,  $b = \sqrt{\lambda \rho c}$  exprimée en ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot K^{-1}$ ) [29].

#### 3.5.3.1. Méthodes de mesure des paramètres thermiques :

De nombreuses méthodes de mesure de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermiques des matériaux s'appuient donc sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps. Parmi ces méthodes, citons deux méthodes les plus utilisées, il s'agit de la technique de la sonde mono tige à faible inertie thermique, et la méthode de la sonde plane **TPS** (Transient Plane Source).

Pour nos mesures on a utilisé la technique de la sonde plane **TPS**, en raison de sa capacité de détermination de la conductivité et la capacité thermique des matériaux contrairement à la méthode de la sonde mono tige qui ne permet de déterminer que la conductivité thermique, de plus les erreurs liées à la résistance de contact sont minimales dans la **TPS** que dans la sonde monotige [29].

### A. Dispositif expérimental :

L'essai consiste à placer en sandwich la sonde TPS (**Figure III.38**) et la relier à un circuit électrique. La variation de la résistance aux Bornes du pont de Whestone,  $\Delta U$  permet d'accéder à la différence de potentielle  $\Delta E(t)$  aux bornes de l'élément TPS. Une relation entre  $\Delta E(t)$  et la variation de température dans l'élément TPS peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique  $a$  et de conductivité thermique  $\lambda$ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à  $\lambda.a$  et ensuite  $c$  [29].



Figure III. 37. Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.

### B. Conception de l'élément TPS

L'élément TPS qui doit être utilisé dans cette méthode doit être constitué d'un élément résistif jouant, à la fois, le rôle de résistance chauffante et de capteur de température. Il peut, en principe, avoir plusieurs formes (rectangulaire, disque, etc.) et plusieurs tailles suivant la configuration géométrique de l'échantillon et le type de matériau utilisé. Pour des raisons de commodité, tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, deux configurations ont été retenues pour le modèle résistif TPS, la forme rectangulaire et la forme disque (**Figure III.38**). Cependant il existe plusieurs tailles du capteur afin de pouvoir effectuer des mesures sur des échantillons de différentes dimensions.

Dans ce travail, l'élément TPS utilisé (**Figure III.39**) est en forme de disque, dont le capteur TPS est constitué d'une feuille métallique en Nickel en forme de spirales bifilaires insérées entre deux couches isolantes en Kapton, Teflon ou Mica pour des températures inférieures à 200°C. Les épaisseurs de la feuille et de la couche de Kapton sont respectivement de 10 et 25  $\mu\text{m}$ .

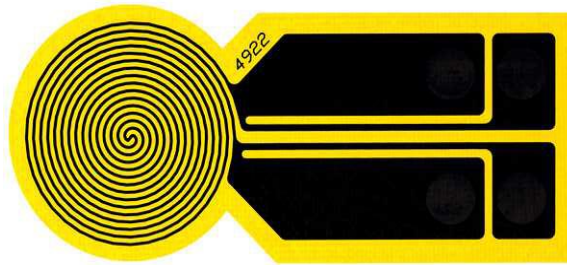


Figure III. 38. Vue d'une sonde Hot disc .



Figure III. 39. Dispositif expérimental pour la mesure de la caractéristique.

### 3.6. Conclusion

L'étude de caractérisation des matériaux utilisés montre que :

- Le sable de dune est un sable siliceux et propre.
- Le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction et de qualité et cela d'après sa teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  élevée.
- La caractérisation des déchets utilisés montre une masse volumique absolue de  $910 \text{ kg/m}^3$  et masse volumique apparente de  $531.5 \text{ kg/m}^3$  et une granulométrie de classe de diamètre 2 à 4 mm.

## Chapitre 4 : Résultats et interprétations

### 4.1. Introduction

Dans cette partie, nous présentons les résultats des essais et la discussion de ces résultats. L'influence de différents paramètres étudiés (rapport E/P, rapport D/P, Rapport S/P), sur les propriétés physico-mécanique et thermique (Masse volumique apparente ( $M_v$ ), Resistance à la flexion à 28 jours ( $R_f$ ), Resistance à la compression à 28 jours ( $R_c$ ), La porosité accessible a l'eau ( $P_a$ ), La variation dimensionnelle (retrait), La conductivité thermique ( $\lambda$ ), La diffusivité thermique ( $a$ ) et La chaleur spécifique ( $c$ ), en appliquant la méthode basée sur les plans d'expériences.

### 4.2. Préparation de l'étude

Le travail consiste à étudier l'influence des paramètres de formulation (rapport E/P, rapport D/P, rapport S/P) sur les propriétés physico-mécanique et thermique et d'établir d'éventuelles relations entre ces propriétés et les facteurs étudiés du béton de plâtre élaborés.

#### 4.2.1. Choix des réponses

On désigne par réponse toutes grandeurs mesurées en variant les paramètres de l'étude. Comme cité ci-dessus, Les réponses choisies sont :

- La masse volumique ( $M_v$ ) en ( $\text{kg/m}^3$ )
- Resistance a la flexion ( $R_f$ ) en (MPa),
- Resistance a la compression ( $R_c$ ) en (MPa),
- La porosité accessible a l'eau ( $P_a$ ) en (%)
- La variation dimensionnelle (retrait) en ( $\mu\text{m/m}$ )
- La conductivité thermique ( $\lambda$ ) en ( $\text{W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).
- La diffusivité thermique ( $a$ ) en ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ).
- La chaleur spécifique ( $c$ ) en ( $\text{MJ. m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ )

#### 4.2.2. Choix des facteurs

Les facteurs étudiés, qui seront utilisés dans les modèles mathématiques des réponses sont:

- Le rapport eau/plâtre (E/P).
- Le rapport déchets / plâtre (D/P).
- Le rapport sable / plâtre (S/P).

##### 4.2.2.1. Définition des niveaux des facteurs

Les niveaux des facteurs sont donnés dans le tableau suivant

**Tableau IV. 1.Niveaux des facteurs retenus.**

Facteurs	Niveau (-1.682)	Niveau (-1)	Niveau (0)	Niveau (+1)	Niveau (+1.682)
<b>E/P</b>	0,51	0,55	0,6	0,65	0,68
<b>S/P</b>	0	0,16	0,4	0,64	0,8
<b>D/P</b>	0	0,12	0,3	0,48	0,6

L'indique les compositions des points factoriels, des points axiaux et des points centraux du plan d'expériences choisi. Les combinaisons entre les points factoriels, axiaux et centraux ont été réalisées à l'aide de logiciel statistique JMP7 (de SAS Institute).

Tableau IV. 2. Proportions et résultats d'essais.

N°	PROPORTIONS			
		E/P	S/P	D/P
1	Axial	0,51	0,4	0,3
2	Factoriel	0,55	0,16	0,12
3	Factoriel	0,55	0,16	0,48
4	Factoriel	0,55	0,64	0,12
5	Factoriel	0,55	0,64	0,48
6	Axial	0,6	0	0,3
7	Axial	0,6	0,4	0
8	Central	0,6	0,4	0,3
9	Central	0,6	0,4	0,3
10	Central	0,6	0,4	0,3
11	Central	0,6	0,4	0,3
12	Axial	0,6	0,4	0,6
13	Axial	0,6	0,8	0,3
14	Factoriel	0,65	0,16	0,12
15	Factoriel	0,65	0,16	0,48
16	Factoriel	0,65	0,64	0,12
17	Factoriel	0,65	0,64	0,48
18	Axial	0,68	0,4	0,3

#### 4.2.3. Composition de la formule du centre

La formulation des bétons de plâtres étudiés est effectuée à l'aide de logiciel statistique JMP7 (de SAS Institute). Cette composition est choisie en fonction des résultats trouvés dans la littérature, d'une façon à maximiser l'intervalle de variation des paramètres E/P, D/P et S/P CNIREBE [50].

Le **tableau IV.3**, donne la composition détaillée du béton de plâtre.

Tableau IV. 3. La formule de centre

Composant	Sable	Déchets de plastique	Liant Plâtre	Eau	Chaux
Quantité (g)	132 g	99 g	330 g	200 ,0592 g	19,8 g

### 4.3. Résultats des essais

Les résultats des essais des bétons de plâtre en fonction de paramètres étudiés sont récapitulés dans le tableau suivant:

**Tableau IV. 4.Résultats des essais.**

N°	Les réponses							
	Mv-28 (kg/m <sup>3</sup> )	Rc-28 (MPa)	Rf-28 (MPa)	λ (W. m- 1.K-1)	a (mm <sup>2</sup> /s)	c (MJ. m- 3.K-1)	Pac (%)	Retrait (µm /m)
1	1463,4	10,14	2,54	0,52	0,5	1,05	25,99	4177,1
2	1413,15	11,19	3,27	0,6	0,46	1,29	25,49	4633,3
3	1332,3	8,29	2,04	0,52	0,46	1,12	20,38	7752,1
4	1574	9,77	3,28	0,72	0,50	1,43	23,03	1141,7
5	1429,5	8,3	2,37	0,6	0,54	1,10	19,49	2520,8
6	1221,2	7,032	1,43	0,46	0,39	1,20	30,6	4054,2
7	1522,5	10,37	4,54	0,60	0,54	1,12	25,81	5314,6
8	1429,4	6,47	2,51	0,56	0,52	1,07	27,49	4156,3
9	1431,8	4,325	1,38	0,56	0,35	1,61	23,90	6070,9
10	1395,2	5,95	1,9	0,56	0,52	1,08	23,94	8414,6
11	1394,9	4,97	1,37	0,55	0,49	1,13	24,03	1479,2
12	1308,2	4,42	1,10	0,54	0,45	1,22	24,91	3041,7
13	1486,7	6,23	1,96	0,64	0,49	1,31	21,041	3106,3
14	1366,9	7,925	2,59	0,5	0,5	0,99	25,47	11350
15	1255,7	3,31	0,99	0,47	0,42	1,13	20,1	9691,7
16	1540,9	8,85	3,34	0,57	0,58	0,99	22,2	11200
17	1390	2,64	0,8	0,4	0,4	0,98	19,125	1702,1
18	1328	3,3	1,3	0,5	0,45	1,2	27,2	2975

La préparation et l'analyse des résultats des expériences, réalisées selon les compositions du **Tableau IV.4**, sont effectuées à l'aide du logiciel statistique *JMP7* 'JMP, 2007'. Tous les coefficients des modèles mathématiques ont été trouvés par une méthode de régression basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés.

Nous présentons ci-dessous les résultats des modélisations effectuées :

### 4.3.1. Modèles mathématiques

Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation ( $R^2$ ), les rapports-t et les probabilités p-value des réponses sont regroupés dans le **tableau IV.5.D** d'après ce tableau, les modèles retenus des réponses s'écrivent respectivement comme suit :

$$Mv \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1416,36 - 30,516 * \frac{E}{P} + 74,388 * \frac{S}{P} - 62,333 * \frac{D}{P} - 12,955 * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} - 16,023 * \frac{S^2}{P} \quad (1)$$

$$Rf \text{ (Mpa)}, = 1,84276 - 0,394 * \frac{E}{P} + 0,12881 * \frac{S}{P} - 0,887 * \frac{D}{P} - 0,2519 * \frac{E}{P} * \frac{D}{P} + 0,398 * \frac{D^2}{P} \quad (2)$$

$$Rc \text{ en (Mpa)} = 5,390 - 1,8683 * \frac{E}{P} - 0,186 * \frac{S}{P} - 1,854 * \frac{D}{P} + 0,564 * \frac{S^2}{P} + 0,837 * \frac{D^2}{P} \quad (3)$$

$$\lambda \text{ (W. m}^{-1}\text{. K}^{-1}\text{)} = 0,562 - 0,0318 * \frac{E}{P} - 0,039 * \frac{S}{P} - 0,035 * \frac{D}{P} - 0,0195 * \frac{E}{P} * \frac{S}{P} - 0,0221 * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} - 0,015 * \frac{E^2}{P} \quad (4)$$

$$a \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right) = 0,5 - 0,008 * \frac{E}{P} + 0,0289 * \frac{S}{P} - 0,026 * \frac{D}{P} - 0,034 * \frac{E}{P} * \frac{D}{P} - 0,004 * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} - 0,008 * \frac{E^2}{P} - 0,020 * \frac{S^2}{P} \quad (5)$$

$$c \text{ (MJ. m}^{-3}\text{. K}^{-1}\text{)} = 1,118 - 0,107 * \frac{E}{P} - 0,0033 * \frac{S}{P} - 0,034 * \frac{E}{P} * \frac{S}{P} - 0,044 * \frac{D}{P} + 0,08 * \frac{E}{P} * \frac{D}{P} - 0,037 * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} + 0,0013 * \frac{E}{P} * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} \quad (6)$$

$$Pac \text{ (\%)} = 23,958 - 0,198 * \frac{E}{P} - 0,9409 * \frac{S}{P} - 2,145 * \frac{D}{P} - 0,104167 * \frac{E}{P} * \frac{S}{P} + 0,496 * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} - 2,062 * \frac{D^2}{P} \quad (7)$$

$$\text{Retrait } (\mu\text{m/m)} = 4608,914 + 2206,030 * \frac{E}{P} - 2074,388 * \frac{S}{P} - 770,645 * \frac{D}{P} + 72,9 * \frac{E}{P} * \frac{S}{P} - 1956,7 * \frac{E}{P} * \frac{D}{P} - 1197,396 * \frac{S}{P} * \frac{D}{P} + 1049,837 * \frac{E}{P} * \frac{E}{P} + 645,914 * \frac{S}{P} * \frac{S}{P} \quad (8)$$

Tableau IV. 5.Coefficients et paramètres des modèles des réponses (en valeurs codées).

Facteurs du modèle	Mv-28 (kg/m <sup>3</sup> )			Rc-28 (MPa)			Rf-28 (MPa)			λ (W. m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		
	R <sup>2</sup> =0,96			R <sup>2</sup> =0,95			R <sup>2</sup> =0,91			R <sup>2</sup> =0,77		
	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t
<b>Constante</b>	1416,36	202,29	<,0001	5,39	0,36733	<,0001	1,84276	16,64	<,0001	0,56294	44,83	<,0001
<b>E/P</b>	-30,516	-5,08	0,0003	-1,8683	0,19976	<,0001	-0,3943	-4,15	0,0013	-0,03188	-2,91	0,0141
<b>S/P</b>	74,388	12,27	<,0001	-0,186	0,20025	0,3741	0,12881	1,34	0,2039	0,03967	3,61	0,0041
<b>D/P</b>	-62,333	-10,29	<,0001	-1,854	0,20025	<,0001	-0,887	-9,26	<,0001	-0,03510	-3,20	0,0085
<b>E/p*S/P</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0,01951	-1,37	0,1994
<b>E/P*D/P</b>	/	/	/	/	0,26067	0,0117	-0,2519	-2,02	0,0664	/	/	/
<b>S/P*D/P</b>	-12,955	-1,64	0,1265	/	/	/	/	/	/	-0,0221	-1,55	0,1502
<b>E/P*E/P</b>	/			/	0,202436	0,0320	/	/	/	-0,01512	/	/
<b>S/P*S/P</b>	-16,023	-2,61	0,0227	0,564	0,210224	0,0230	/	/	/	/	/	/
<b>D/P*D/P</b>	/	/	/	0,837	0,210224	0,0026	0,39834	4,10	0,0015	/	-1,41	0,1849

Tableau IV. 6.Coefficients et paramètres des modèles des réponses (en valeurs codées).(suite)

Facteurs du modèle	a (mm <sup>2</sup> /s)			c (MJ. m-3.K-1)			Pac (%)			Retrait (µm/m)		
	R <sup>2</sup> =0,89			R <sup>2</sup> =0,97			R <sup>2</sup> =0,99			R <sup>2</sup> =0,94		
	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t
<b>Constante</b>	0,5068854	54,21	<,0001	1,1180164	95,00	<,0001	23,958333	266,04	<,0001	4608,9146	594,8374	0,0006
<b>E/P</b>	-0,008	-1,42	0,1904	-0,106705	-7,73	0,0045	-0,197917	-3,59	0,0230	2206,0301	415,1778	0,0032
<b>S /P</b>	0,0289	4,93	0,0008	-0,00328	-0,24	0,8274	-0,940972	-17,06	<,0001	-2074,388	412,01	0,0040
<b>D/P</b>	-0,026	-4,42	0,0017	-0,044373	-3,22	0,0488	-2,145833	-38,91	<,0001	-770,6455	333,1989	0,0687
<b>E/p*S/P</b>	/	/	/	-0,0339	/	0,0906	-0,104167	-1,89	0,1319	72,916666	433,7278	0,8731
<b>E/P*D/P</b>	-0,034	-4,45	0,0016	0,0791372	5,73	0,0105	/	/	/	-1956,771	433,7278	0,0063
<b>S/P*D/P</b>	-0,004	-0,57	0,5795	-0,037478	-2,72	0,0728	0,4965278	9,00	0,0008	-1197,396	433,7278	0,0398
<b>E/P*E/P</b>	-0,008	-1,35	0,2114	/	/	/	/	/	/	1049,837	446,0775	0,0653
<b>S/P*S/P</b>	-0,020	-3,24	0,0101	/	/	/	/	/	/	645,91499	493,0345	0,2471
<b>D/P*D/P</b>	/	/	/	/	/	/	-2,0625	-19,53	<,0001	/	/	/
<b>E/P*S/P*D/P</b>	/	/	/	0,0012909	0,09	0,9314	/	/	/	/	/	/

4.3.2. Analyse de la variance

Les analyses de la variance de chacune des réponses modélisées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV. 7. Analyse de la variance des réponses

Réponse	Source de variation	Degré de liberté (DDL)	Somme des carrés des écarts (SCE)	Estimation de la variance	Rapport F
<b>Mv (kg/ m3)</b>	Modèle	5	145415,89	29083,2	<b>58,4176</b>
	Résidus	12	5974,19	497,8	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	17	151390,08	/	<b>&lt;,0001</b>
<b>Rf-28 (Mpa),</b>	Modèle	5	15,600566	3,12011	<b>0,2405</b>
	Résidus	12	1,494862	0,12457	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	17	17,095428	/	<b>0,9581</b>
<b>Rc-28 (Mpa),</b>	Modèle	7	114,28229	16,3260	<b>0,4047</b>
	Résidus	10	5,43598	0,5436	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	17	119,71827	/	<b>0,8537</b>
<b>Pa (%)</b>	Modèle	6	55,573978	9,26233	<b>380,7010</b>
	Résidus	4	0,097319	0,02433	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	10	55,671296	/	<b>&lt;,0001</b>
<b>Retrait (µm/m)</b>	Modèle	7	110917851	15845407	<b>25,3733</b>
	Résidus	3	1873476	624491,89	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	10	112791327	/	<b>0,0113</b>
<b>λ (W. m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).</b>	Modèle	6	0,06079426	0,010132	<b>6,2047</b>
	Résidus	11	0,01796313	0,001633	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	17	0,07875739	/	<b>0,0047</b>
<b>a (mm<sup>2</sup>/s).</b>	Modèle	7	0,03595101	0,005136	<b>10,9385</b>
	Résidus	9	0,00422567	0,000470	<b>Prob. &gt; F</b>
	Total	16	0,04017668	/	<b>0,0009</b>
<b>c (MJ. m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	Modèle	7	0,17751973	0,025360	<b>16,6446</b>
	Résidus	3	0,00457083	0,001524	<b>Prob. &gt; F</b>
	<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>0,18209056</b>	<b>/</b>	<b>0,0208</b>

On remarque d’après le **tableau IV .7**, que les Rapports F (de Fisher) des réponses : masse volumique (**Mv**), la porosité accessible a l’eau désaère (**Pa**), le **retrait**, la conductivité thermique (**λ**), la diffusivité (**a**) et la chaleur spécifique (**C**) sont largement grands (>1), par contre les réponses résistance mécanique à la compression de 28jours (**Rc-28**) et la résistance mécanique à la flexion de 28jours (**Rf-28**) sont inférieures à l'unité.

On constate que les coefficients de corrélations des réponses : **Mv** (R<sup>2</sup>=0.96), **Pa** (R<sup>2</sup>=0.99), **λ** (R<sup>2</sup>=0.77), **a**(R<sup>2</sup>=0.89), **C**(R<sup>2</sup>=0,97), **Rc-28**(R<sup>2</sup>=0.95), **Rf-28**(R<sup>2</sup>=0.91), et le **retrait** (R<sup>2</sup>=0,94) sont des bons résultats.

Donc on peut dire que les modèles postulés, sauf ceux de Rc-28 et Rf-28, ne représentent pas uniquement la moyenne des mesures et les variations des réponses sont bien dues aux variations des facteurs.

### 4.3.3. Présentation des résultats

#### 4.3.3.1. Masse volumique Mv-28 (kg/ m<sup>3</sup>)

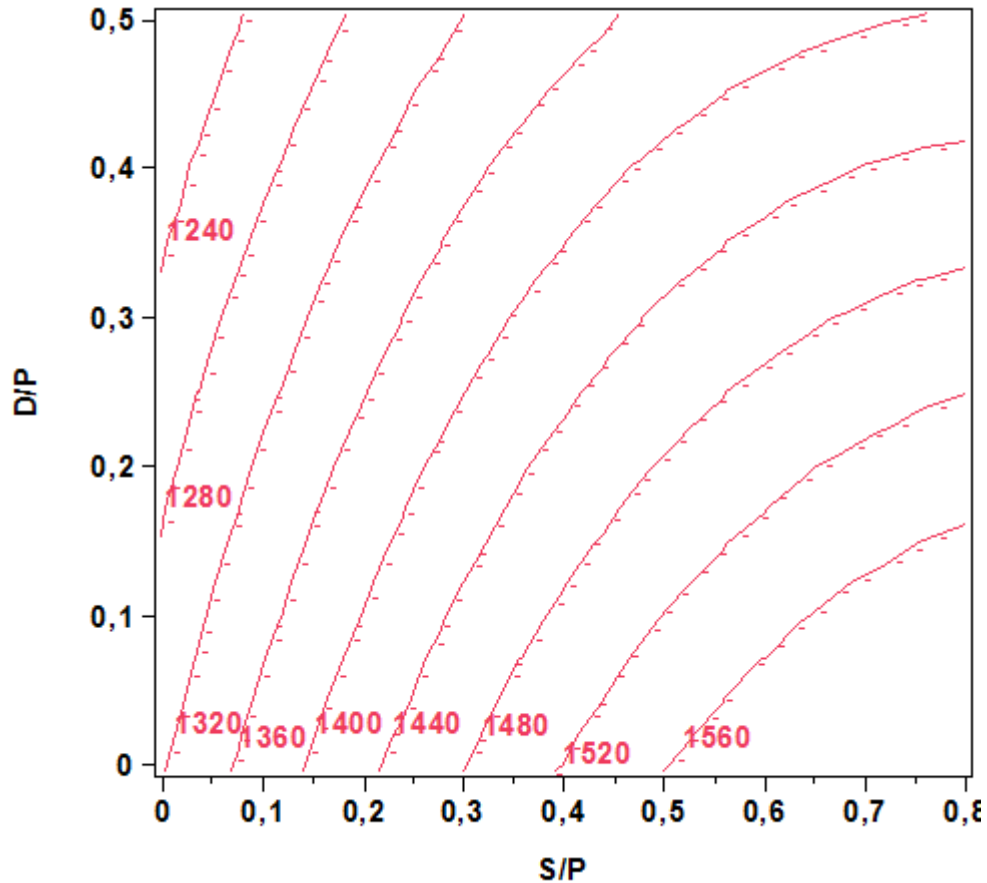


Figure IV. 1. Exemple de variation de la masse volumique en fonction de S/P et de D/P (pour E/P=0.6).

La figure IV.1 montre un exemple de la variation de la masse volumique (Mv-28) du béton de plâtre en fonction du rapport D/P et du rapport S/P (en fixant le rapport E/P à 0.6). D'après cette figure, on remarque que Mv-28 augmente avec l'augmentation du rapport S/P (de 1240 à 1560 kg/m<sup>3</sup>) et diminue avec l'augmentation du rapport D/P.

L'augmentation de Mv-28 en fonction du rapport S/P, est peut être due à la densité volumique élevée du sable (1,5) par rapport à celle du plâtre (1,1). Par contre, l'augmentation du rapport D/P diminue la valeur de Mv-28 (quelque soit le rapport du S/P). la diminution de Mv-28 est probablement due à la faible masse volumique du déchet de plastique (0,91g/cm<sup>3</sup>) par rapport à celle du plâtre.

#### 4.3.3.2. Résistance à la compression Rc-28 (MPa)

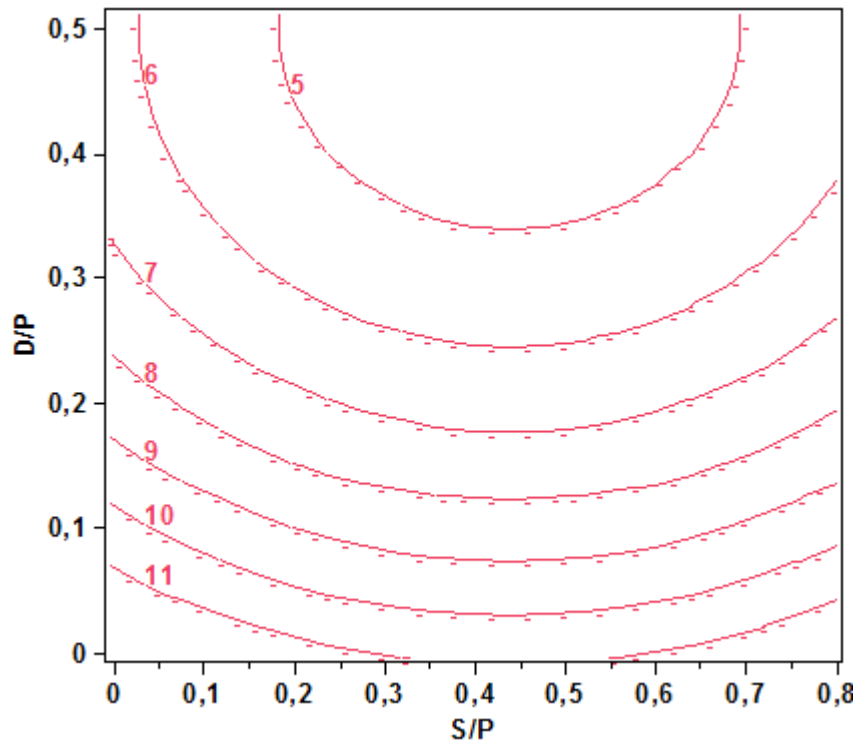


Figure IV. 2. Variation de la résistance a la compression en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P.

Les courbes isoréponses de l'essai de résistance à la compression à 28 jours (Rc-28), sont présentés dans la **Figure IV. 2**. D'après ces résultats, on remarque que, pour un dosage donné de D/P, Rc-28 diminue en fonction de l'augmentation du rapport S/P jusqu'à atteindre une valeur minimale (qui correspond à environ S/P=0.45) puis elle augmente. Dans le cas du plâtre avec déchets, on constate aussi que l'augmentation du rapport D/P, pour un rapport donné de S/P, entraine une diminution de Rc-28. La diminution de la résistance à la compression est peut être due à la difficulté de malaxage du plâtre (du fait de sa prise rapide). Par l'introduction du sable, le mélange sable-plâtre de plus en plus maniable (forme de grains arrondie). Nos résultats sont en accord avec les travaux de Kassou [41] et les recommandations de CNERIB [50].

#### 4.3.3.3. Résistance a la flexion Rf-28 (MPa)

Les résultats de la variation de la résistance à la flexion (Rf-28) en fonction des rapports S/P et D/P sont présentés dans la **figure IV.3** ci-dessous. On constate une importante diminution de Rf-28 en fonction de l'augmentation du rapport D/P, par contre, l'augmentation du rapport S/P entraine une légère amélioration de Rf-28 , et cela peut être due à la bonne adhérence

entre le plâtre et le sable, d'après les observations par microscope électronique à balayage faites par Djoudi [49].

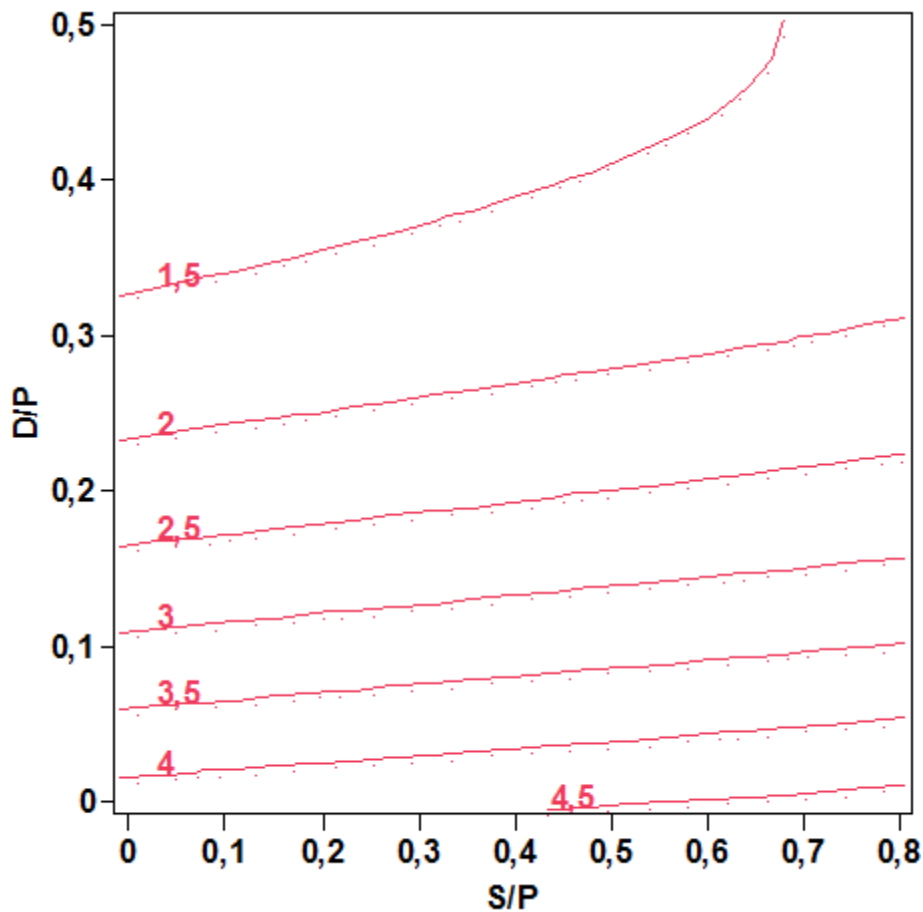


Figure IV. 3.Variation de la résistance à la flexion en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P.

La diminution de  $R_f-28$  est peut être l'origine de l'augmentation de la porosité du mélange en fonction de l'augmentation du dosage du déchet (du fait de la forme anguleuse des grains de déchet).

#### 4.3.3.4. Porosité accessible à l'eau désaéré $P_a$ (%)

La variation de la porosité accessible à l'eau ( $P_a$ ), en fonction de la variation des rapports S/P et D/P est donnée en graphes isoréponses dans la **figure IV.4** ci-dessous. Cette dernière montre que  $P_a$  diminue en fonction de l'augmentation du rapport S/P. Par contre, l'augmentation du rapport D/P augmente  $P_c$  (jusqu'à une valeur maximale qui correspond à environ  $D/P=0.2$ ) puis elle diminue. L'augmentation de  $P_a$  en fonction de l'augmentation du rapport D/P est peut être due aux vides créés par l'incorporation des déchets plastiques et aussi à l'effet de la forme des grains de déchet (anguleuse) ce qui perturbe l'état de surface

des éprouvettes. Concernant la diminution de Pa peut être attribué à l'état de surface des déchets plastiques qui est constitué des alvéoles fermés ou ouvertes [49]

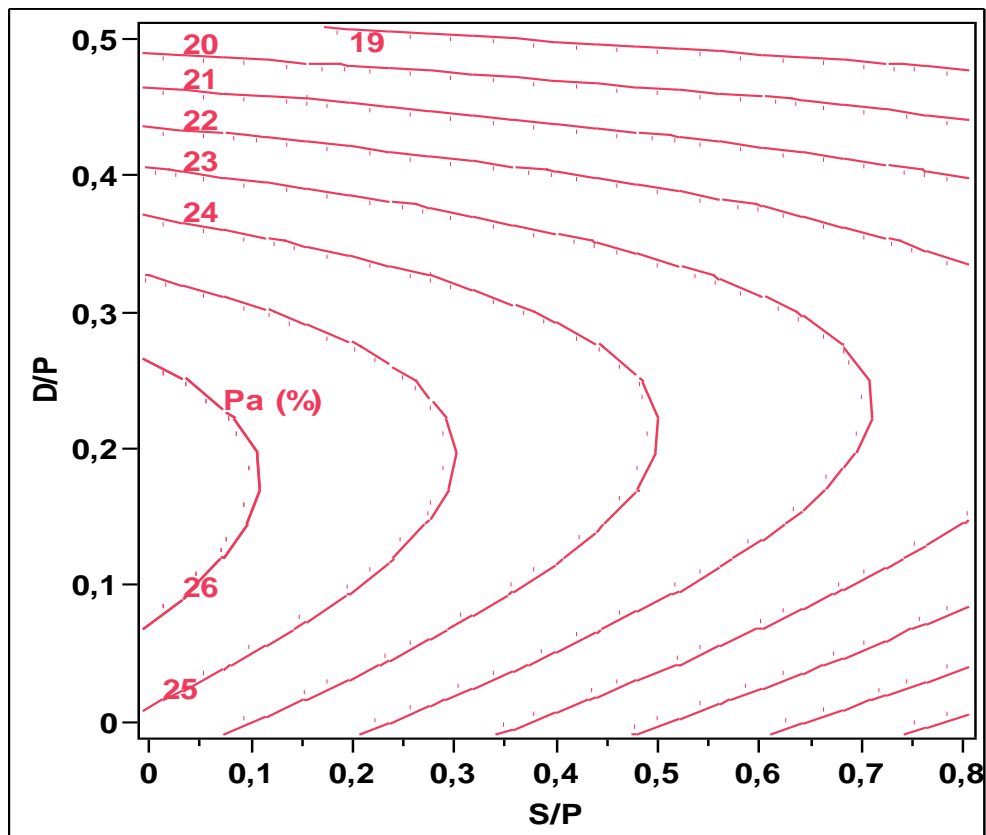


Figure IV. 4.Variation de la porosité accessible à l'eau en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P.

#### 4.3.3.5. Conductivité thermique $\lambda$ ( $\text{W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

La figure IV.5 ci-dessous montre la variation de la conductivité thermique en fonction de D/P et S/P. d'après cette figure, on remarque que l'augmentation du rapport S/P augmente les valeurs de  $\lambda$ . Par contre, on remarque que l'effet de déchet de plastique n'a pas une grande influence sur  $\lambda$  à faible rapport S/P. Au fur et à mesure de l'augmentation du rapport S/P, l'effet du déchet devient de plus en plus important, où il diminue  $\lambda$  due à l'introduction du sable.

L'augmentation de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation du sable est probablement due à la densité plus élevée du sable par rapport à celle du plâtre. La diminution de cette conductivité en fonction du rapport D/P est due à sa densité plus faible par rapport à celle du sable.

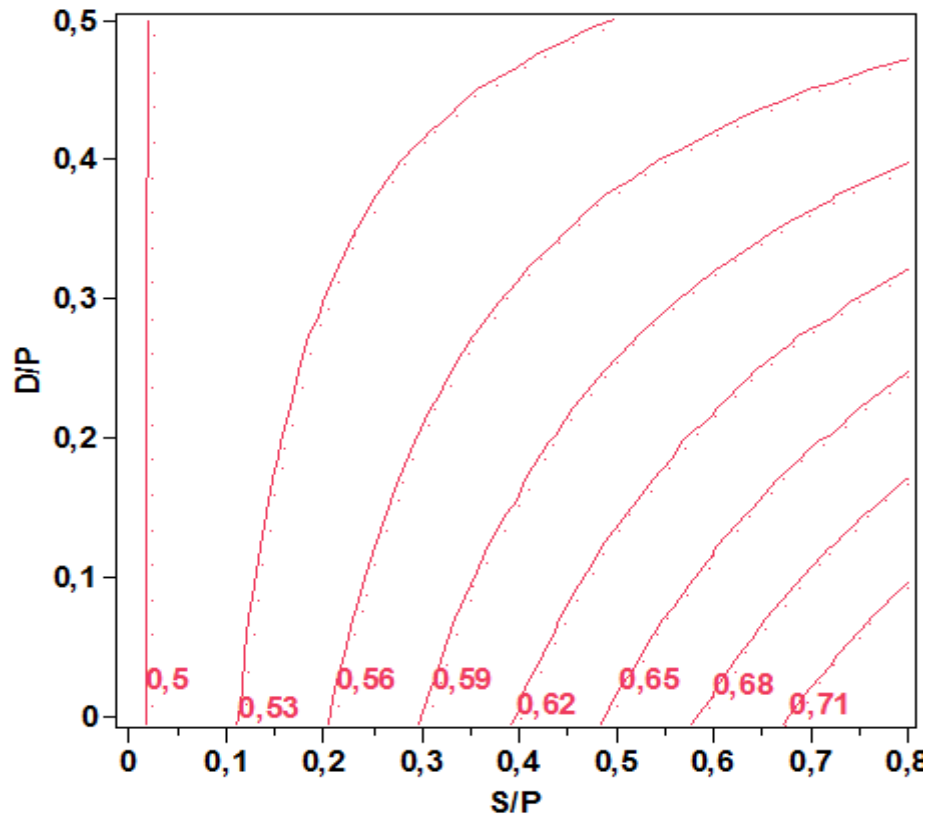


Figure IV. 5.Variation de la conductivité thermique en courbes isoréponses, en fonction de S/P et D/P.

#### 4.3.3.6. Diffusivité $a$ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

La variation de la diffusivité ( $a$ ), en fonction de la variation des rapports S/P et D/P est donnée en graphes isoréponses dans la **figure IV.6** ci-dessous. Cette figure montre que ( $a$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P. Par contre l'augmentation du rapport S/P augmente ( $a$ ) (jusqu'à une valeur maximale qui correspond à environ S/P=0.6) puis elle diminue. La diminution de ( $a$ ) dans le cas de l'augmentation de D/P est probablement due à la forme et la texture de la surface des grains de déchet de plastique. Par contre l'augmentation de ( $a$ ) en fonction de S/P est peut être due à la présence des éléments fins dans le sable par rapport au déchet de plastique.

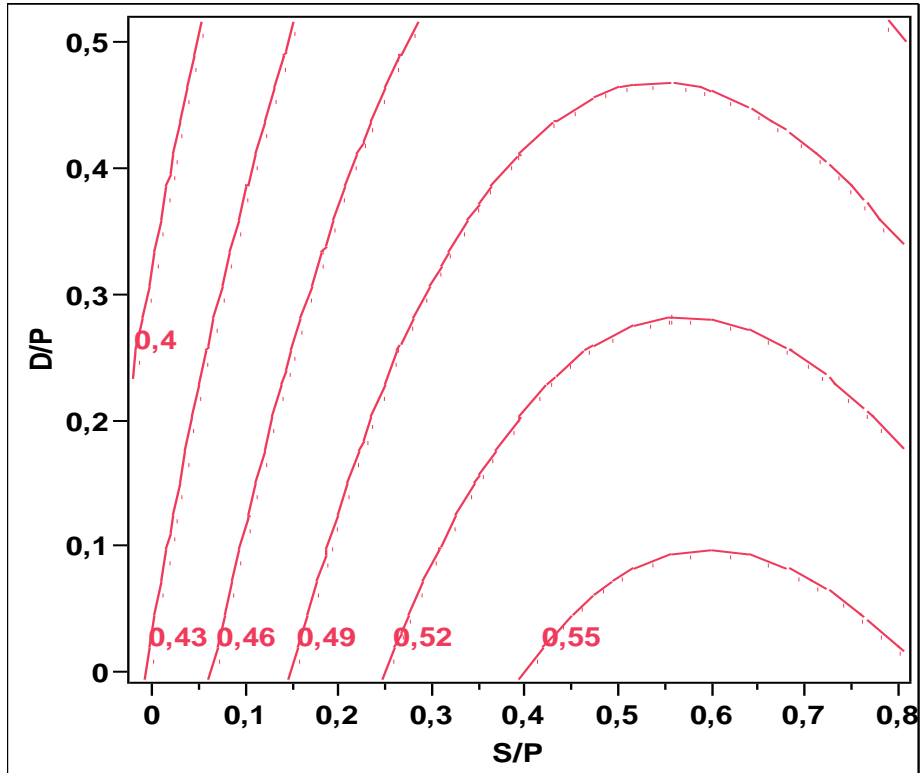


Figure IV. 6. Variation de la diffusivité en courbes isoréponses, en fonction de S/P et D/P (pour  $E/P=0,6$ ).

#### 4.3.3.7. Chaleur spécifique ( $c$ ) en ( $\text{MJ. m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )

La figure IV.7 ci-après montre la variation de la chaleur spécifique en courbes isoréponses, en fonction de S/P et D/P. D'après cette figure, on remarque que l'augmentation du rapport D/P diminue la chaleur spécifique ( $c$ ) quelque soit le rapport S/P. Par contre l'effet du rapport S/P est fortement influencé par celui du rapport D/P. Autrement dit, à faible rapport D/P ( $<0,25$ ), on constate que l'augmentation du rapport S/P augmente la chaleur spécifique. Mais, on remarque que l'effet du sable est inverse, c-à-dire lorsque S/P augmente, la chaleur spécifique diminue, lorsque  $D/P >0,25$ . Nos résultats sont accord avec les travaux de Kassou [41].

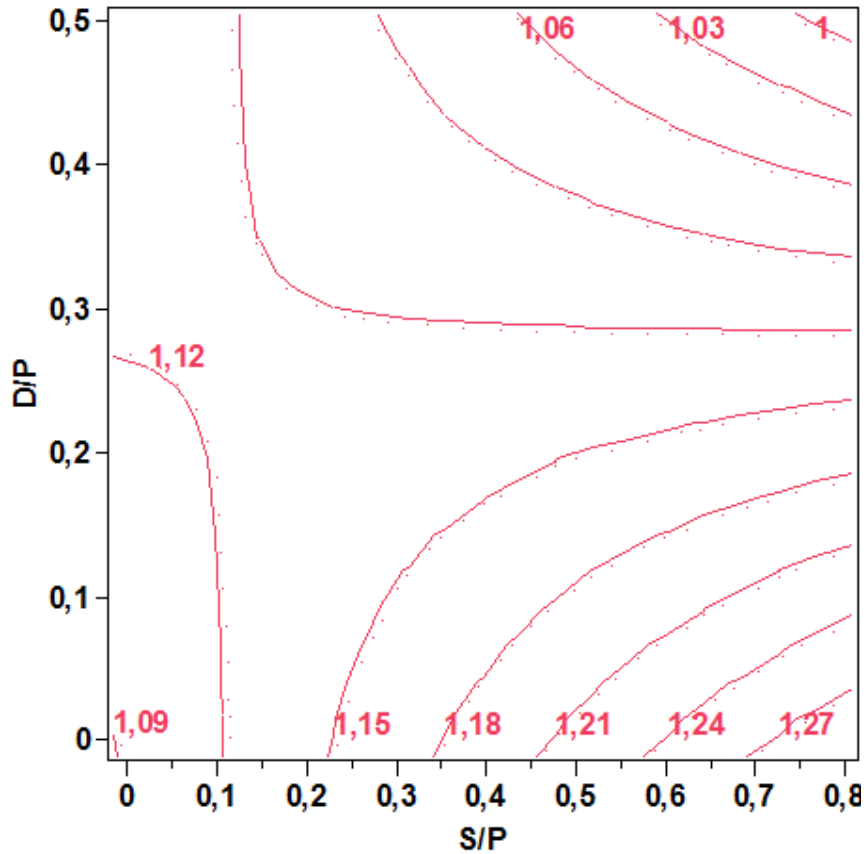


Figure IV. 7. Variation de la chaleur spécifique en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P (pour E/P=0,6).

#### 4.3.3.8. Variation dimensionnelle ( $\mu\text{m/m}$ )

Les résultats du retrait des bétons de plâtre étudiés en fonction de la variation des rapports D/P et S/P sont présentés dans la **Figure IV. 8**. D'après cette dernière, on remarque que, dans le cas d'un rapport E/P=0.6, le retrait est fortement influencé par la teneur en eau. A cet effet, quelque soit les valeurs des rapports D/P et S/P, le retrait augmente. Par contre, pour des valeurs faibles en E/P, on remarque, d'après le profileur de prévision dans la Figure IV. 9, que le retrait diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P, malgré l'effet négligeable du sable.

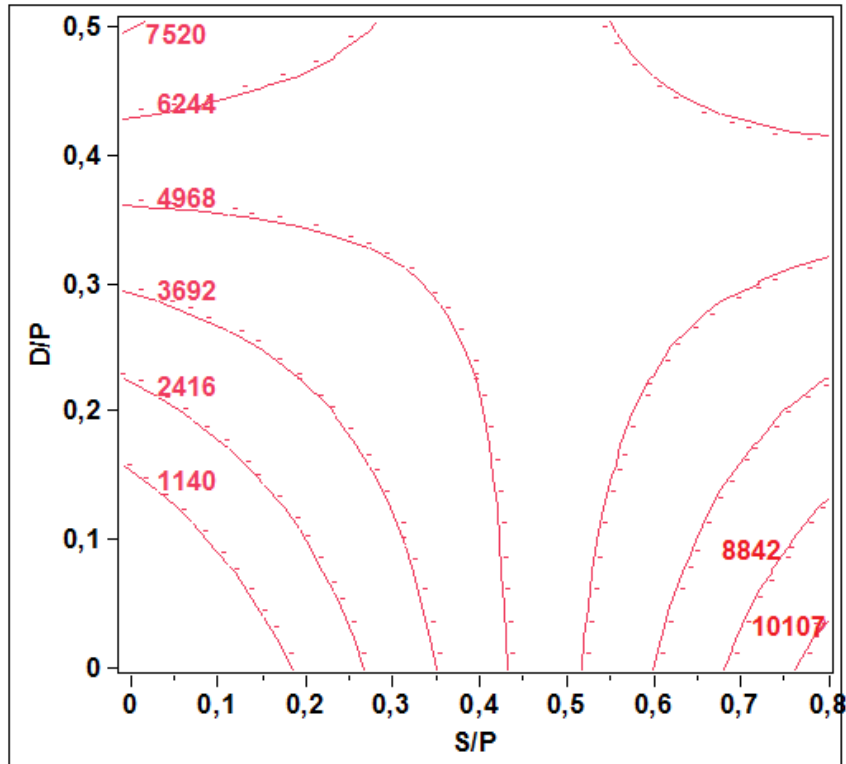


Figure IV. 8 .Variation dimensionnelle en courbes iso réponses, en fonction de S/P et D/P (pour E/P=0,6)

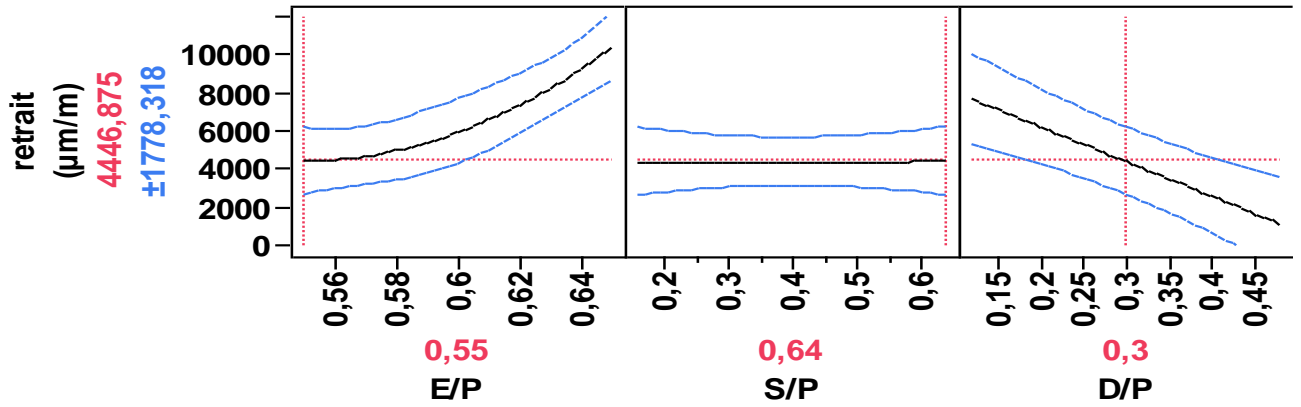


Figure IV. 9. Profilur de prévision du retrait.

#### 4.4. Conclusion

Cette partie de notre travail est la plus importante. Elle résume les résultats trouvés ainsi que les discussions et les interprétations tirées. La réalisation de cette partie expérimentale est bien menée à l'aide de l'approche statistique. Nous avons utilisé la méthode de plans d'expériences (un plan central composite), qui donne la possibilité d'acquérir le maximum d'information en faisant le minimum d'essais au laboratoire, ce qui est avantageux par rapport aux études paramétriques.

La méthode appliquée permet de mieux analyser les résultats trouvés, d'établir des modèles mathématiques, donnant les effets des facteurs séparément et toutes interactions possibles entre ces facteurs influençant les réponses et d'offrir aussi une représentation graphique très claire de la variation des réponses étudiées en fonction des rapports E/P, D/P et S/P.

Dans ce chapitre on a pu trouver des résultats intéressants. La masse volumique ( $M_v-28$ ) augmente avec l'augmentation du rapport S/P et diminue avec l'augmentation du rapport D/P. Concernant la résistance à la compression ( $R_c-28$ ), elle diminue en fonction de l'augmentation du rapport S/P pour un dosage donné de D/P, puis elle augmente. En plus, la résistance à la flexion à 28 jours ( $R_f-28$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P, et s'améliore sensiblement par l'augmentation du rapport S/P.

D'autre part, la porosité accessible à l'eau désaérée ( $P_a$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport S/P et augmente en fonction de l'augmentation du rapport D/P. La conductivité thermique, la diffusivité et la chaleur spécifique diminuent en fonction de l'augmentation D/P. Finalement, le retrait diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P pour des valeurs faibles du rapport E/P.

## Conclusions Générales

Ce travail avait pour but de valoriser une ressource locale (sables de dunes) et un déchet de plastique dans la formulation de béton de plâtre. Pour la réalisation de ce travail expérimental, nous avons utilisé la méthode de plans d'expériences, qui permet de tirer le maximum d'information en faisant le minimum d'essais, ce qui est avantageux par rapport aux études paramétriques classiques. Ces méthodes statistiques permettent aussi d'établir des modèles mathématiques reliant les différentes propriétés étudiées (masse volumique, la porosité accessible à l'eau désaérée, retrait, la conductivité thermique, la diffusivité, la chaleur spécifique et les résistances mécaniques à la compression et à la flexion de 28 jours) aux facteurs de l'étude (le rapport eau/plâtre (E/P), le rapport déchet plastique/plâtre (D/P) et le rapport sable/plâtre (S/P)).

La méthode statistique appliquée permet d'analyser les résultats trouvés d'établir des modèles mathématiques, de donner toutes les interactions possibles sur les réponses et d'offrir aussi une représentation graphique très claire de la variation des réponses étudiées en fonction des rapports E/P, D/P et S/P.

Les résultats trouvés à l'issue de cette étude expérimentale montrent que:

- La masse volumique ( $M_v-28$ ) augmente avec l'augmentation du rapport S/P (de 1320 à 1560  $\text{kg/m}^3$ ) et diminue avec l'augmentation du rapport D/P (de 1280 à 1240  $\text{kg/m}^3$ ).
- La résistance à la compression ( $R_c-28$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport S/P quelque soit le rapport D/P, elle atteint la valeur de 5 MPa, puis elle augmente (optimum qui correspond à environ  $S/P=0.45$ ).
- La résistance à la flexion à 28 jours ( $R_f-28$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P (de 4 à 1,5MPa), par contre l'augmentation du rapport S/P entraîne une légère amélioration de  $R_f-28$ ,
- La porosité accessible à l'eau désaérée ( $P_a$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport S/P. Par contre on remarque une amélioration du  $P_a$  en fonction de l'augmentation du rapport D/P (jusqu'à une valeur maximale environ  $D/P=0.2$ ) puis elle diminue (de 24 à 19%).
- La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est fortement influencée par le rapport S/P ; elle augmente en fonction de l'augmentation du rapport S/P (de 0.5 à 0.71  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), et on remarque l'effet bénéfique du déchet de plastique, qui diminue les valeurs de  $\lambda$ , notamment aux dosages élevés de sable.

- La variation de la diffusivité ( $\alpha$ ) diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P (de 0,43 à 0.4 mm<sup>2</sup>/s), Par contre l'augmentation du rapport S/P augmente ( $\alpha$ ) (de 0.43 à 0.55 mm<sup>2</sup>/s) (jusqu'à une valeur maximale à environ S/P=0.6) puis elle diminue.
- La chaleur spécifique (C) diminue avec l'augmentation du rapport D/P (de 1,06 à 1 MJ. m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>), par contre l'effet du rapport S/P est fortement influencé par celui du rapport D/P ; à faible rapport D/P (<0.25), l'augmentation du rapport S/P augmente la chaleur spécifique et au-delà de cette valeur, C diminue.
- Le retrait diminue en fonction de l'augmentation du rapport D/P pour des valeurs faibles du rapport E/P. Par contre, pour des rapports élevés en E/P (>0.6), le retrait augmente quelque soit les rapports S/P et D/P.

D'après ces résultats obtenus à l'issue de notre étude, nous pouvons conclure l'effet bénéfique de l'introduction de déchets de plastiques pour l'amélioration des propriétés physiques et thermiques du plâtre notamment lorsqu'on introduit le sable.

Selon la classification de RILEM, le composite obtenu est un béton léger de construction et d'isolation.

Comme perspective, nous recommandons d'élargir le domaine d'étude et les réponses à savoir :

- Etude de l'effet de l'adjuvantage des mélanges à base de plâtre.
- Faire une étude de corrélation entre les propriétés mécaniques et la microstructure du composite avec un microscope électronique à balayage équipé d'une microanalyse.
- Etude de durabilité des composites de plâtre à base de déchets plastiques, en vérifiant la compatibilité chimique entre la matrice plâtre et les déchets plastiques.
- Etude du comportement thermo-physiques des bétons en fonction de leur destination notamment dans le cas des murs extérieurs d'une habitation en milieu aride afin de minimiser des facteurs climatiques extérieurs pour cela une application théorique par simulation par le logiciel EnergyPlus pour déterminer les températures de surfaces intérieures et extérieures du murs et de la technique constructive.
- Etude de l'effet de l'incorporation d'autres déchets et ajouts.
- Etude de comportement phonique du composite de plâtre à base de déchets plastiques.

En fin, nous espérons que cette étude contribuera à une large diffusion des éléments à base de plâtre et de bétons de plâtre légers.

## Références Bibliographiques

- [1]. **Daligang. D.** Plâtre. Techniques de l'Ingénieur, 'Traité Construction' (C910): 24 p, jan 2002.
- [2]. Les Industries du plâtre. La plaque de plâtre au cœur de la construction durable. [Http://www.lesindustriesduplatre.org](http://www.lesindustriesduplatre.org), 21/03/2018.
- [3]. **Meille. S.** Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure. Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon. 2001.
- [4]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A2tre>.2018.
- [5]. **Fabien Betene Ebanda.** Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales“. Thèse de Doctorat, Université blaise pascal – Clermont .2. Cameroun.2012.
- [6]. **Guergab. Z & Abdelali. H.** Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre léger à base de granulats de polystyrène expansé. Mémoire de Master. Université de Laghouat. 2013.
- [7]. **Amitouche. N .** Contribution à l'étude des propriétés physico-mécaniques des plâtres  $\alpha$  et  $\beta$  avec l'ajout des fibres et de super plastifiant. CETIM. Boumerdes. Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira-Bejaia. 2016.
- [8]. **Costes. J.** Le plâtre traditionnel et moderne. Edition Eyrolles.1981.
- [9]. [www.svt. ac-versailles.fr](http://www.svt.ac-versailles.fr).
- [10]. **Edgar-Alejandro Pachon-Rodriguez .**Étude de l'influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides -fluage du plâtre. Thèse de Doctorat. Université Claude Bernard - Lyon I. France.2011.
- [11]. **Jaffel. H.** Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution. cas du plâtre. Thèse De doctorat Ecole Polytechnique.2006.
- [12]. [www.ruedeslumieres.morkitu.org](http://www.ruedeslumieres.morkitu.org).
- [13]. **Abreal. A.** Le GYPSE. Plus qu'un minéral, un minerais.
- [14]. **Langer William. H.** Potentiel d'exploitation minière industrielle. 2012.

- [15]. **Ministère de l'énergie et des mines**. [www.mem-algeria.org](http://www.mem-algeria.org).
- [16]. <http://idgt.over-blog.com/article-visite-de-la-carriere-de-cormeilles-en-p-57577272.html>.
- [17]. <http://www.placoplatre.fr/L-ENTREPRISE/Carrieres-de-gypse/Carriere-de-Bernouille>.
- [18]. [http://ruedeslumieres.morkitu.org/apprendre/telecharger/gypse\\_PDF/Gypse%20V%20-%20La%20fabrication%20du%20pl%20E2tre.pdf](http://ruedeslumieres.morkitu.org/apprendre/telecharger/gypse_PDF/Gypse%20V%20-%20La%20fabrication%20du%20pl%20E2tre.pdf)
- [19]. [https://www.lafarge.dz/4\\_3\\_1-ManufacturingProcess](https://www.lafarge.dz/4_3_1-ManufacturingProcess)
- [20]. **Secret de fabrication du plâtre** - Le plâtre industriel- L'Entrevous - numéro 23 – page 13. **Société Chimique de France**. [www.societechimiquedefrance.fr](http://www.societechimiquedefrance.fr)
- [21]. **Marteau. P.** Mémento roches et minéraux industriels -gypse et anhydrite (R37722). Juin. 1993.
- [22]. **Ghomari. F.** Science des matériaux de construction. Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen.
- [23]. **Wikipédia – plaques et carreaux de plâtre** – mise à jour Juin.2011.
- [24]. **Rachedi. M.** Contribution à l'Etude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier. Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla .2013.
- [25]. **Hamida. M. L.** Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction. Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine.2010.
- [26]. **RILEM.** Commission des bétons légers, Terminologie et définitions. Matériaux et Construction, N°13, p 60-69. 1970.
- [27]. **CONTANT. M.** Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux. Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000.
- [28]. **Neville. A. M.** Propriétés des Bétons, Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris.2000.

- [29]. **American Concrete Institute.** Guide pour le béton de structure à base de granulats légers, Traduction du CATED, SDT BTP.1970.
- [30]. **Pimienta. P, Chandellier. J, Rubaud. M, Dutruel. F, Nicole.H.** Etude de faisabilité des procédés de construction à base de Béton de Bois, Cahier du CSTB, Livraison 346, N°2703,1994.
- [31]. **Arnoud. M, Virlogeux. M.** Granulats et Bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.1986.
- [32]. **Ledhem. A.** Contribution à l'étude d'un béton de bois, Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.1997.
- [33]. **Ayadi. A, Iratini. A.** Elaboration et caractérisation d'un matériau isolant à base de déchets de verre, Proceeding of International Seminary GEOMAT'02, M'sila, Algérie 10-11 Mars .2002.
- [34]. **Guettala. A , Mezghiche. B , Chebili. R .** Valorisation d'un déchet industriel pour la confection d'un béton de sable, Proceeding of International Seminary GEOMAT'02, M'sila. Algérie 10-11 Mars. pp.413-421. 2002.
- [35]. **Ferhat. A.** Caractérisation physicomécanique à court terme d'un Béton léger élaboré à partir d'agrégat pouzzolanique, Mémoire de Magister de l'université d'Oran.2002.
- [36]. **Shink. M.** Compatibilité élastique. Comportement mécanique et optimisation des Bétons de granulats légers, Thèse de Doctorat de l'université de Laval Avril.2003.
- [37]. **Corman. P.** Bétons légers d'aujourd'hui, Edition Eyrolles.Paris.1961.
- [38]. **Steiger. R. W, Hurd. M. K.** Lightweight insulating concrete for floors and roof decks. The Aberdeen Group Michigan.1978.
- [39]. **Véronique. Cerezo.** Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: Approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon. France.2005.
- [40]. **Zitani Ilyas.** Caractérisation physico -mécanique et thermique d'un béton de plâtre léger à base des granulats de liège. Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Civil Université de laghouat .2011.

- [41].**Kassou Younes.** Contribution à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments : Elaboration d'un composite plâtre –bois. Mémoire de Magistère. Université Amar Telidji de laghouat .2015.
- [42].**Bentchikou. M.** Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique (Cas de béton de fibres de papiers recyclés). Thèse de Doctorat de l'ENP d'Alger. 2008.
- [43].**Laoubi. H , Meddah. A , Bedrina. M, Djoudi. A.** Les performances thermomécaniques d'un béton de plâtre léger a base de déchets de caoutchouc. 3<sup>rd</sup> international symposium on materials and sustainable Development ISMSD2017 Boumerdes - Algeria, November 07 & 08.2017.
- [44]. **Lacroix. R, Fuentes. A.** Traité de béton Armé. Editions Eyrolles, Paris.1982.
- [45]. **Steopoe. A.** La durabilité du béton. Edition Eyrolles. Paris. 1970.
- [46].**Yang. K.** Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation, Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-pontoise.2008.
- [47].**Dossier Enseignant.** Voyage en industrie, CAP SCIENCES.2006.
- [48].**Ghernouti. Y., Rabehi. B., Bouziani. T., Ghezraoui. H., Makhloufi. A.** Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). Construction and Building Materials, 82. 2015.p. 89-100
- [49]. **Djoudi. A.** Etude de la durabilité et le comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés avec les fibres végétales du palmer. Thèse de Doctorat.2015.
- [50].**C.N.E.R.I.B.** Recommandation pour la Construction en plâtre' Centre National d'Etude et de Recherche Intégré au Bâtiment.1993.
- [51].**Andréa .Stanojlovic-Davidovic.** Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles – Application à l'emballage alimentaire. Thèse de Doctorat université du sud Toulon – Var. 2006.
- [52].**Vimane. P.** Cours en ligne Matériaux de construction. Agence universitaire de la Francophonie [www.coursenligne.refer.org](http://www.coursenligne.refer.org)

[53] .**Papadakis .M, Venuat. M.** Industrie de la chaux du ciment et du plâtre. Edition Dunod Paris. **1970.**

[54].**Bedrina. M.** Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux : effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau. Mémoire de Magister, Université Amar Telidji de Laghouat. **2000.**

[55].**Bessenouci M. Z.** ‘Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l’habitat’. Mémoire de magister. Université Abou Bakr Belkaid .Tlemcen.2009.

**NORMES AFNOR EUROPEENNES (1981)**

**NF P 18-560.** Analyse granulométrique par tamisage.

**NF P 18-555.** Mesure de la masse volumique, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau

**NFP 18-400.** Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques.

**NFB 12-301 .**Finesse de mouture

**NFB 12-401 .**Prise

## Annexes

### 6.1. Annexe A : Cinétique de variation de la masse volumique et du retrait

Les figures A-1 et A-2 présentent les variations de la masse volumiques et du retrait en fonction de l'âge respectivement :

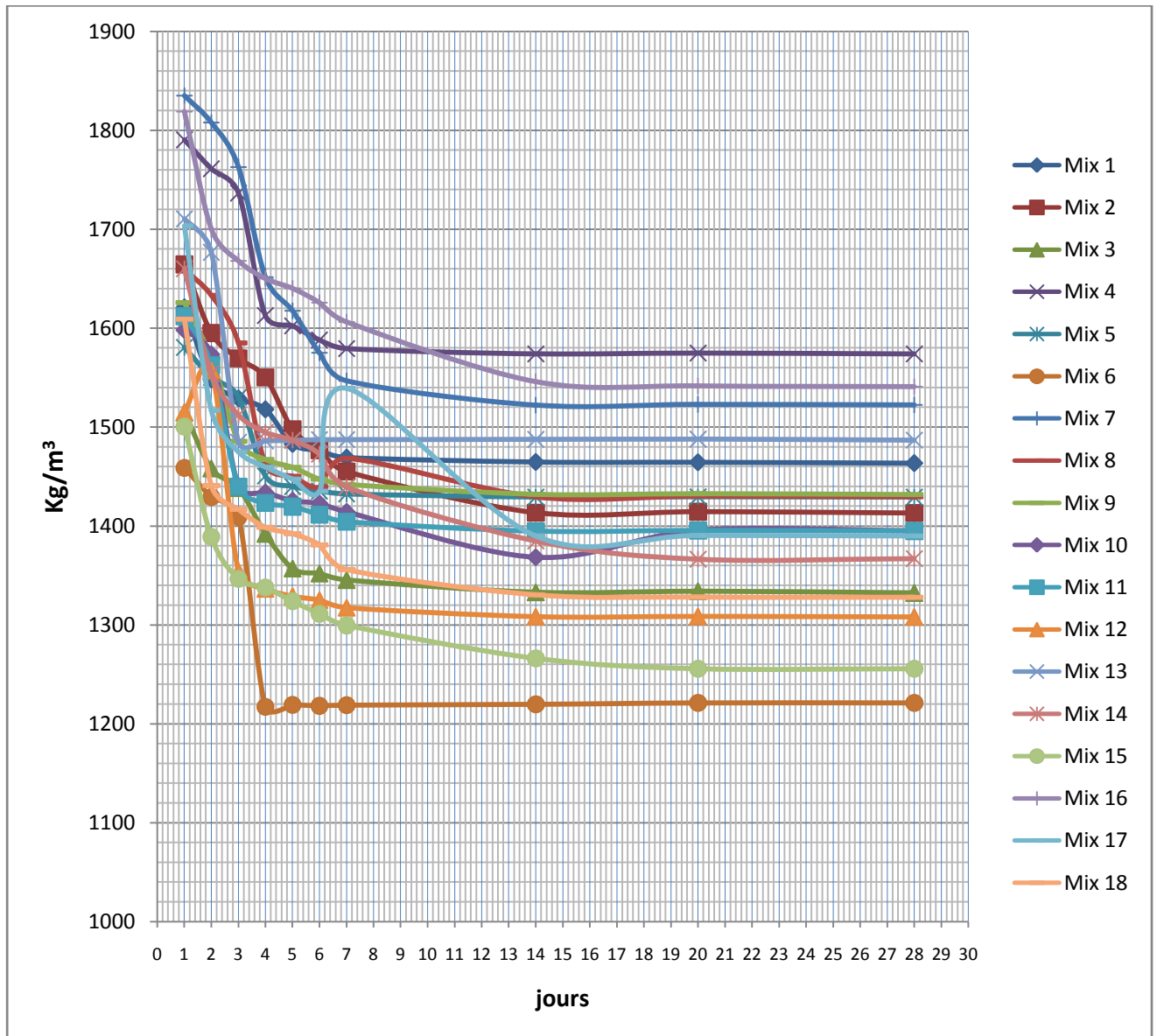


Figure A. 1. Variation de la masse volumique en Kg/m<sup>3</sup>

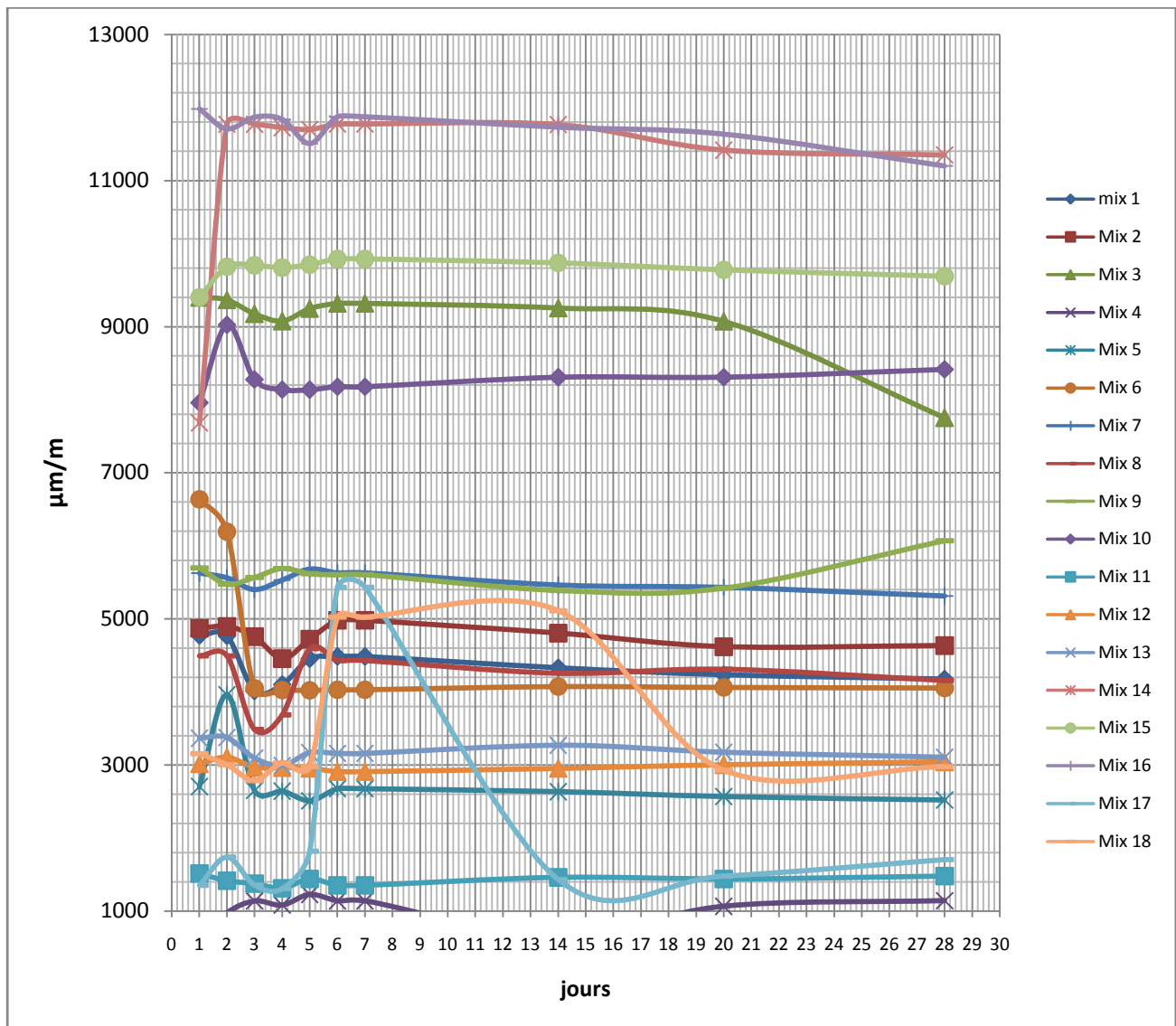


Figure A. 2.Variation dimensionnelle, en  $\mu\text{m}/\text{m}$  .

6.2. Annexe B : Aspect et distribution granulaire du déchet dans le béton de plâtre



Figure B. 1. Distribution granulaire (mix 8)



Figure B. 2. Distribution granulaire (mix 5)



Figure B. 3. Distribution granulaire (mix 1)



Figure B. 4. Distribution granulaire (mix 15)



Figure B. 5. Distribution granulaire (mix 2)



Figure B. 6. Distribution granulaire (mix 11)

Les figures B.7et B.8, présentent la confection et la conservation des éprouvettes respectivement.



Figure B. 7. Confection des éprouvettes



Figure B. 8. Conservation des éprouvettes.

Les Figures B.9 et B.10 présentent le dispositif et les échantillons utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau désaérée respectivement.



Figure B. 9. Dispositif et échantillon utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau.



Figure B. 10. Echantillons pour l'essai de porosité.