

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

**Etude technico-économique d'une structure à
base de béton léger (argile expansée)
comparée à une structure à base de béton
ordinaire**

Présenté par :

Mohammed HAMZAOUI

Présenté et soutenu publiquement le 14/07/2022

Composante du jury :

Présidente	D.CHERID	M.C.A	ENP
Promotrice	K.DERAMCHI	Professeur	ENP
Promotrice	S.BENTALLA-KACED	M.C.B	ENP
Promoteur	N.DJELLOULI	Responsable développement	ALGEXPAN
Examinatrice	H.DJABALI-MOHABEDDINE	M.C.A	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

**Etude technico-économique d'une structure à
base de béton léger (argile expansée)
comparée à une structure à base de béton
ordinaire**

Présenté par :

Mohammed HAMZAOUI

Présenté et soutenu publiquement le 14/07/2022

Composante du jury :

Présidente	D.CHERID	M.C.A	ENP
Promotrice	K.DERAMCHI	Professeur	ENP
Promotrice	S.BENTALLA-KACED	M.C.B	ENP
Promoteur	N.DJELLOULI	Responsable développement	ALGEXPAN
Examinatrice	H.DJABALI-MOHABEDDINE	M.C.A	ENP

ENP 2022

ملخص:

تقدم هذه الرسالة دراسة فنية واقتصادية لهيكل خرساني خفيف من الطين الموسع مقارنة بنفس الهيكل في الخرسانة العادية. الغرض من هذا العمل هو دراسة جميع العناصر المهمة لموضوعي، من تعريف خصائص الطين الموسع الذي تنتجه شركة ALGEXPAN إلى تحليل هيكل المبنى R + 3 في الخرسانة الخفيفة في المرور من خلال تحديد خصائص وصياغة الخرسانة الطينية الموسعة خفيفة الوزن.

تم إجراء دراسة هيكل المبنى R + 3 باستخدام برنامجي ROBOT و ROBOT EXPERT للدراسة الثابتة والديناميكية، أما بالنسبة للدراسة الاقتصادية، فقد تم أخذ تكاليف المواد في الوقت الفعلي

الكلمات المفتاحية: طين موسع، خرسانة طينية ممددة خفيفة الوزن، دراسة هيكل خرساني خفيف الوزن، دراسة اقتصادية

Abstract:

This thesis presents a technical-economic study of a lightweight expanded clay concrete structure compared with the same structure in ordinary concrete.

The aim of this work is to study all the important elements of my subject, from the definition of the characteristics of the expanded clay produced by the company ALGEXPAN to the analysis of the R+3 building structure in light concrete, through the determination of the properties and the formulation of the light expanded clay concrete.

The study of the R+3 building structure was done with the help of ROBOT and ROBOT EXPERT software for the static and dynamic study, as for the economic study, the costs of materials were taken in real time

Keywords: expanded clay, light weight concrete, light weight concrete structure, economic study

Résumé :

Ce mémoire présente une étude technico-économique d'une structure en béton léger d'argiles expansées comparé avec la même structure en béton ordinaire.

Le but de ce travail consiste à étudier l'ensemble des éléments importants de mon sujet, de la définition des caractéristiques de l'argile expansée produit par l'entreprise ALGEXPAN jusqu'à l'analyse de la structure bâtiments R+ 3 en béton léger en passant par la détermination des propriétés et de la formulation du béton léger d'argile expansée.

L'étude de la structure bâtiments R+ 3 a été faite à l'aide des logiciels ROBOT et ROBOT EXPERT pour l'étude statique et dynamique, quant à l'étude économique, les coûts des matériaux ont été pris en temps réels

Mots clés : argile expansée, béton léger d'argiles expansées, étude structure en béton léger, étude économique

Remerciements :

Toute ma gratitude, grâce et remerciements vont à ALLAH clément et miséricordieux le tout puissant qui m'a donné la chance, la force, la patience, le courage et la volonté de finir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes deux directrices de mémoire, mesdames DERMACHI Karima et BENTAALLA-KACED Souad. Je les remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Mes remerciements vont aussi à mon tuteur de stage en entreprise, Monsieur DJELLOULI Nourredine qui m'as appris le métier et qui m'a permis de progresser dans certains domaines techniques.

Je tiens à remercier Madame CHERID Djamilia de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie, également, Madame DJABALI-MOHABEDDINE Hafida d'avoir accepté de juger ce travail. C'est un honneur de la compter parmi ce jury.

Je tiens également à remercier particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à tous mes professeurs pour leur enseignement, pour les nombreuses explications qu'ils m'ont patiemment inculquées et pour le grand bénéfice que j'ai tiré au contact de leur expérience.

Toute ma gratitude va à L'entreprise B.H.T Construction et tous ses ingénieurs qui m'ont permis de réaliser les essais.et m'ont orienté et ont mis à ma disposition toute leur expérience.

Enfin, je ne peux terminer sans remercier tous ceux qui m'ont soutenu et ont contribué, de près ou de loin, à ce travail.

Table des matières

Liste des tableaux

Listes des figures

Introduction générale	14
Chapitre I : Généralité et synthèse bibliographique	16
I.1 Introduction :	17
I.2 Partie 1 : Contexte de stage :	17
I.2.1 Historique :	18
I.2.2 Engagements de l'entreprise :	18
I.2.3 Produits de l'entreprise :	18
I.2.4 Qualité du produit :	19
I.3 Partie 2 : Synthèse bibliographique :	20
I.3.1 Définition du béton léger :	20
I.3.2 Historique du béton léger :	21
I.3.3 Types de béton léger :	22
I.3.3.1 Béton-gaz autoclavé :	22
I.3.3.1.1 Définition :	22
I.3.3.1.2 Constitution du produit :	23
I.3.3.1.3 Procédé de fabrication :	23
I.3.3.2 Béton d'agrégats légers :	24
I.3.3.2.1 Définition :	24
I.3.3.2.2 Classification :	24
I.3.3.2.3 Caractéristiques générales des granulats légers :	25
I.3.3.2.3.1 Masse volumique des granulats :	25
I.3.3.2.3.2 Granulométrie :	25
I.3.3.2.3.3 Qualité et propriétés du granulat :	25
I.3.3.2.4 Caractéristiques du béton de granulats léger :	26
I.3.3.3 Béton caverneux :	27
I.3.3.3.1 Définition :	27
I.3.3.3.2 Avantages des béton caverneux :	27
I.3.3.3.3 Inconvénient du béton caverneux :	28
I.3.3.3.4 Porosité et vides dans le béton caverneux :	28
I.4 Exemples de structure en béton léger :	28
I.4.1 Exemple 1 :	28

I.4.2	Exemple 2 :	29
I.4.3	Exemple 3 :	30
I.5	Conclusion :	30
Chapitre II	Granulats d'argiles expansées	31
II.1	Introduction :	32
II.2	Définition des granulats légers d'argiles expansées :	32
II.2.1	Description du matériau :	33
II.3	Caractéristiques du granulat d'argile expansée d'ALGEXPAN :	33
II.3.1	La masse volumique :	33
II.3.1.1	Masse volumique apparente des granulats en vrac :	33
II.3.1.1.1	Définition :	33
II.3.1.1.2	Mode opératoire :	34
II.3.1.1.3	Résultats :	34
II.3.1.2	Masse volumique réelle :	34
II.3.1.2.1	Définition :	34
II.3.1.2.2	Principe :	34
II.3.1.2.3	Mode opératoire :	34
II.3.1.2.4	Résultat :	35
II.3.1.3	Présentations des résultats :	35
II.3.2	L'analyse granulométrique du granulat d'argile expansée de BOUINAN.....	36
II.3.2.1	Les courbes granulométriques :	36
II.3.2.2	Module de finesse du sable (M_f) :	38
II.3.3	Les impuretés :	38
II.3.3.1	Essai d'équivalents de sable pour le sable léger utilisé 0/3 :	38
II.3.4	Résistance des grains : Détermination de la résistance à l'écrasement en vrac des granulats :	38
II.3.4.1	Le principe :	38
II.3.4.2	Mode opératoire :	39
II.3.4.3	Résultats :	39
II.3.5	Porosité et absorption de l'eau	39
II.3.5.1	Mode opératoire :	40
II.3.5.2	Résultats :	40
II.3.6	Réaction au feu.....	40
II.4	Procédé de fabrication :	41
II.4.1	Processus de production :	41

II.4.2	Indice d'expansion	42
II.5	Nature chimique des granulats légers :	43
II.5.1	Diagramme de Riley	43
II.5.2	Composition chimique de l'argile expansée d'ARGEX :	43
II.6	Domaine d'application de l'argile expansée :	43
II.6.1	Réduction de tassement	43
II.6.2	Réduction de poussée	44
II.6.3	Réduction de charge sur ouvrage d'art :	44
II.6.4	Ravoirages :	44
II.6.5	Toitures terrasses ou en pente :	44
II.6.6	Remplissages légers, isolants et réfractaires :	44
II.6.7	Toitures végétalisées :	45
II.6.8	Fabrication de béton :	45
II.7	Isolation thermique :	45
II.8	Conclusion :	45
Chapitre III	Béton léger d'argile expansée	46
III.1	Définition du béton léger d'argile expansée :	47
III.2	Constituants du béton léger :	47
III.2.1	L'eau :	47
III.2.2	Le ciment :	47
III.2.3	Les granulats :	47
III.2.4	Adjuvants :	48
III.3	Composition du béton léger d'argile expansée d'ALGEXPAN :	48
III.3.1	Objectif :	48
III.3.2	Principe de la méthode :	48
III.3.3	Définition des données de bases :	48
III.3.3.1	Résistance souhaitée :	48
III.3.3.2	Maniabilité désirée :	49
III.3.3.3	Dimension maximale des granulats :	49
III.3.4	Détermination des constituants :	49
III.3.4.1	Dosage en ciment et en eau :	49
III.3.4.2	Dosage des granulats :	50
III.3.4.2.1	Tracé de la Courbe Granulaire de Référence (CGR) :	50
III.3.4.2.2	Pourcentage de granulats trouvé graphiquement :	51
III.3.4.3	Adjuvant :	51

III.3.5	Coefficient de compacité (γ).....	51
III.3.6	Composition du béton léger :.....	52
III.4	Masse volumique théorique (ρ_{bt}) :.....	52
III.5	Propriétés du béton léger d'argile expansée :.....	52
III.5.1	Propriétés des bétons frais :.....	52
III.5.1.1	Essai sur béton frais :.....	52
III.5.1.1.1	La masse volumique du béton léger à l'état frais :.....	53
III.5.1.1.2	Consistance et affaissement au cône d'Abrams :.....	53
III.5.1.1.2.1	Résultats :.....	54
III.5.2	Propriétés des bétons durcis :.....	54
III.5.2.1	La masse volumique :.....	54
III.5.2.2	Légèreté :.....	55
III.5.2.3	Porosités :.....	55
III.5.2.4	Résistance à la compression :.....	55
III.5.2.4.1	Résultats :.....	56
III.5.2.4.2	Facteurs influençant la résistance à la compression :.....	58
III.5.2.4.2.1	Le granulat :.....	58
III.5.2.4.2.2	Le sable :.....	59
III.5.2.4.2.3	Le rapport E/C :.....	59
III.5.2.5	Résistance à la traction :.....	60
III.5.2.6	Module d'élasticité :.....	60
III.5.2.7	Comparaison des caractéristiques du béton léger avec le béton ordinaire :.....	61
III.5.2.8	Résistance à la compression et à la traction de calcul :.....	61
III.5.2.9	Propriétés thermiques :.....	62
III.5.3	Estimation du prix du béton léger :.....	63
III.5.3.1	Prix de revient :.....	63
III.5.3.2	Prix de revient d'un béton ordinaire :.....	63
III.6	Conclusion :.....	63
Chapitre IV : Etude Structure en béton léger.....		64
IV	64
IV.1	Introduction :.....	65
IV.2	Etude d'un plancher.....	65
IV.2.1	Objectif :.....	65
IV.2.2	Plancher en béton léger :.....	65
IV.2.2.1	Caractéristique du matériau :.....	65

IV.2.2.2	Evaluations des charges dues au poids propre du béton :	66
IV.2.2.3	Caractéristiques du plancher :	66
IV.2.2.3.1	Porté de la dalle :	67
IV.2.2.4	Évaluation des charges :	67
IV.2.2.5	Calcul d'un panneau dalle isostatique à l'ELU :	67
IV.2.2.5.1	Déterminations des moments :	67
IV.2.2.5.2	Calcul de l'effort tranchant et de la contrainte de cisaillement :	67
IV.2.2.6	Calcul du ferrailage : (Utilisation de l'organigramme de flexion simple) :	68
IV.2.3	Etude de la dalle en béton normal :	68
IV.2.3.1	Évaluation des charges :	68
IV.2.3.2	Calcul d'un panneau dalle isostatique à l'ELU :	68
IV.2.3.3	Calcul du ferrailage : (Utilisation de l'organigramme de flexion simple) :	69
IV.2.4	Comparaisons des sections d'acier pour les deux types de planchers :	69
	Le tableau ci-dessous affiche une comparaison des sections adoptés pour les deux planchers :	69
IV.2.5	Interprétations des résultats :	70
IV.2.5.1	De point de vue technique :	70
IV.2.5.2	De point de vue économique :	70
IV.3	Etude d'une structure bâtiment R+3 en béton léger (de densité 1500 kg/m ³) :	70
IV.3.1	Introduction :	70
IV.3.2	Description de la structure :	70
IV.3.2.1	Dimensions de l'ouvrage en plan :	71
IV.3.2.2	Dimensions en élévation :	72
IV.3.3	Système structurel :	72
IV.3.3.1	Planchers :	72
IV.3.3.2	Revêtement :	72
IV.3.3.3	Escaliers :	73
IV.3.4	Caractéristiques des matériaux :	73
IV.3.5	Prédimensionnement :	73
IV.3.5.1	Le plancher :	73
IV.3.5.1.1	Conditions :	73
IV.3.5.1.2	Évaluation des charges et surcharges :	74
IV.3.5.2	Prédimensionnement des poutres :	75
IV.3.5.3	Prédimensionnement des poteaux :	76

IV.3.5.4	Escalier:	77
IV.3.5.4.1	Evaluation des charges :	77
IV.3.5.5	Dimensionnement des voiles :	77
IV.3.6	Etude dynamique de la structure en béton léger	77
IV.3.6.1	Introduction :	77
IV.3.6.2	Modélisations :	78
IV.3.6.3	Disposition des voiles :	78
IV.3.6.4	Actions sismiques :	79
IV.3.6.4.1	Choix de la méthode de calcul :	79
IV.3.6.4.2	Méthode de l'analyse modale spectrale :	79
IV.3.6.4.2.1	Définition :	79
IV.3.6.4.2.2	Modes à considérer :	80
IV.3.6.4.2.3	Les caractéristiques de l'ouvrage :	80
IV.3.6.4.2.4	Spectre de réponse de calcul :	80
IV.3.6.4.2.5	Participation massique	82
IV.3.6.4.2.6	Interprétation des résultats :	82
IV.3.6.4.3	Vérification de la période fondamentale de la structure :	83
IV.3.6.4.4	Vérification de l'effort sismique à la base :	83
IV.3.6.4.5	Vérifications des déplacements inter-étages :	84
IV.3.6.5	Conclusion :	84
IV.3.7	Ferraillage des éléments structuraux	85
IV.3.7.1	Ferraillage des poteaux	85
IV.3.7.1.1	Recommandations du RPA 99 version 2003 :	85
IV.3.7.1.2	Stratégie à adopter pour le ferraillage :	85
IV.3.7.2	Ferraillage de la poutre :	86
IV.3.7.2.1	Sollicitation de calcul :	86
IV.3.8	Calcul des fondations :	87
IV.3.8.1	Introduction :	87
IV.3.8.2	Calcul des fondations :	88
IV.3.8.2.1	Semelles sous voile :	88
IV.3.8.2.2	Semelle isolée sous poteau :	89
IV.3.8.2.2.1	Homothétie des dimensions :	90
IV.3.8.2.2.2	Poids propre de la semelle :	90
IV.3.8.2.2.3	Ferraillage de la semelle :	91
IV.4	Comparaison des résultats avec un bâtiment R+3 en béton ordinaire :	91

IV.4.1	Caractéristiques des matériaux :	91
IV.4.2	Prédimensionnement du bâtiment R+3 en béton ordinaire :	91
IV.4.2.1	Prédimensionnement des poutres, poteaux, plancher :	91
IV.4.2.2	Dimensionnement des fondations :	92
IV.4.2.2.1	Semelle isolée :	92
IV.4.2.2.2	Semelle filante :	93
IV.4.3	Comparaison de l'analyse dynamique des 2 structures :	93
IV.4.4	Comparaison du ferrailage des éléments structuraux des deux structures :	94
IV.4.4.1	Ferrailage des éléments structuraux de la structure en béton ordinaire :	94
IV.4.4.1.1	Ferrailage de la poutre :	94
IV.4.4.1.2	Ferrailage des poteaux :	94
IV.4.4.1.3	Ferrailage des fondations :	95
IV.5	Etude économique de la structure :	96
IV.5.1	Devis quantitatif estimatif du béton de la structure en béton léger :	96
IV.5.1.1	Métré des éléments barres :	96
IV.5.1.2	Mètre d'éléments panneaux :	96
IV.5.1.3	Métré des fondations :	96
IV.5.1.4	Estimation du prix du béton total :	96
IV.5.2	Devis quantitatif estimatif du béton de la structure en béton ordinaire :	97
IV.5.3	Interprétation :	98
IV.5.4	Gain en armature du béton léger par rapport au béton ordinaire :	98
IV.5.4.1	Prix de l'armature en Algérie :	98
IV.5.4.2	Métré du ferrailage des deux structures :	98
IV.5.4.3	Gain en prix d'armatures (P_g) :	99
IV.5.5	Conclusion :	99
Conclusion générale		100
Références bibliographiques		103
Annexes		104
Annexe A		105
Annexes B		107

Liste des Tableaux :

Tableau I.1 : Les différentes fractions d'argile expansée produites par ALGEXPAN	18
Tableau I.2 : Classification des bétons en termes de masse volumique	20
Tableau I.3 : Classification du béton léger selon la norme NF EN 206/CN	21
Tableau I.4 : Répartition des matières premières minérales	23
Tableau I.5 : Pourcentage d'absorption selon le type le granulat	26
Tableau II.1 : Masse volumique des différentes fractions d'argile expansée	35
Tableau II.2 : nature et qualité du sable en fonction de SE	38
Tableau II.3 : Composition minérale du granulat d'argile expansée	43
Tableau III.1 : Pourcentage de granulat du béton léger	51
Tableau III.2 : Composition du béton léger	52
Tableau III.3 : Les différentes classes de résistance du béton léger	57
Tableau III.4 : comparaison des caractéristiques du béton léger avec du béton ordinaire : ...	61
Tableau IV.1 : Ferrailage du plancher en béton léger et choix des armatures	68
Tableau IV.2 : Ferrailage du plancher en béton ordinaire et choix des armatures	69
Tableau IV.3 : Comparaisons du ferrailage des deux planchers	70
Tableau IV.3 : Les différentes couches du plancher d'étage courant et leurs poids	74
Tableau IV.4 : Les différentes couches du plancher d'étage courant et leurs poids	74
Tableau IV.5 : surcharges d'exploitation	75
Tableau IV.6 : Dimensions des poutres	75
Tableau IV.6 : Evaluation des charges	77
Tableau IV.7 : déplacement inter-étage sans voiles	79
Tableau IV.8 : Résultats du spectre de réponse	82
Tableau IV.9 : analyse modale de la structure	83
Tableau IV.10 : déplacements inter-étage	85
Tableau IV.11 : Combinaison de charge la plus défavorable	86
Tableau IV.12 : choix des armatures	87
Tableau IV.13 : Armatures transversales	87
Tableau IV.15 : choix des armatures pour la poutre	88
Tableau IV.16 : comparaison de l'analyse dynamique des 2 structures	94
Tableau IV.17 : sollicitations de calcul déduites du logiciel ROBOT	95
Tableau IV.18 : choix du ferrailage	95
Tableau IV.19 : Sollicitations de calculs sur les poteaux	95
Tableau IV.20 : Ferrailage des poteaux	96

Tableau IV.21 : Métré des éléments barre.....	96
Tableau IV.22 : Mètre de éléments panneaux	97
Tableau IV.23 : Métré des fondations.....	97
Tableau IV.24 : Métré des éléments barre :	97
Tableau IV.25 : Mètre de éléments panneaux :	98
Tableau IV.26 : Métré des fondation	98

Listes des figures

Figure I.1 : Installation de l'usine de BOUINAN	17
Figure I.2 : Noyau en Opus caementitium d'une tombe.....	20
Figure I.1 Panthéon de Rome.....	20
Figure I.3 : Bloc de béton durci a l'autoclave	21
Figure I.4 : densité minimale et maximale de quelques types de béton de granulats léger	23
Figure I.5 : Bloc en béton caverneux.....	26
Figure I.6 : Passerelle piétonne traversant la rivière Vitava à České Budějovice (Budweis).....	27
Figure I.7 - Gauche : Linienstraße 40, Berlin, Allemagne. À droite : Heavy lifter, Rotterdam,	28
Figure I.8 - Gauche : Maison privée Schlaich, Berlin, Allemagne. Droite : Maison privée Thalmail. Aiterbach, Allemagne	29
Figure II.1 : Différentes fractions d'argile expansée.....	31
Figure II.2 : courbe granulométrique du sable 0/3	35
Figure II.3 : courbe granulométrique du gravier 3/8	35
Figure II.3: courbe granulométrique du gravier 8/15	36
Figure II.4 : courbe granulométrique du gravier 15/25	36
Figure II.5 : Process de fabrication de l'argile expansée.....	41
Figure II.6 : Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Riley 1950)	42
Figure II.7 : réduction de poussée du Leca.....	43
Figure III.1 : courbe granulométrique +courbe de référence	49
Figure III.2 : Confection des éprouvettes de béton léger.....	52
Figure III.3 : essai au cône d'Abrams.....	53
Figure III.3 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	53
Figure III.4 : porosité du béton	54
Figure III.5 : Baromètre indiquant la Resistance a l'écrasement de l'éprouvette.....	56
Figure III.6 : Ecrasement par compression du béton léger	57
Figure III.7 : implication du rapport E/C+S sur la résistance sur cube du béton léger	58
Figure IV.1 : Vue en plan du plancher	65

Figure IV.2 : Vue de la structure R+3 en plan	70
Figure IV.3 : Vue de la structure R+3 en plan	71
Figure IV.4 : escalier	76
Figure IV.5 Modèle en 3D.....	79
Figure IV.6 : Spectre de réponse de calcul	82
Figure IV.7 : Directions de déformation selon les modes	83
Figure IV.8 : Voile et poteau se trouvant sur la file de la semelle filante	88
Figure IV.9 : Semelle isolée.....	89
Figure IV.10 : Effort normal sur poteau	90

Introduction générale

L'évolution des matériaux de construction s'est faite progressivement et conjointement aux besoins humains et à l'essor économique.

De nos jours le secteur du Bâtiment et Travaux Publics (BTP) est parmi les secteurs les plus touchés par la pandémie. Les matériaux deviennent de plus en plus chers, ajouté à cela beaucoup de problèmes géotechniques liés à des constructions lourdes sur des sols peu résistants dus essentiellement à la masse volumique du béton ordinaire, et c'est ici que peut intervenir la solution du béton léger

Le béton ordinaire est un béton dont la masse volumique limite les utilisations et conduit à des pièces peu élancées nécessitant des fondations profondes et donc très coûteuses

La densité moindre du béton de granulats légers de structure permet de résoudre un certain nombre de ces problèmes liés à ses aspects

Bien que le béton léger n'étant pas une révolution puisqu'il a été utilisé dans les constructions au temps de l'empire romain, son utilisation a connu un grand développement au XXe siècle et a permis la réalisation d'ouvrages élancés de faible poids propre.

Ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en réduisant la partie fine du granulat.

Dans chacun des trois cas, la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

Pour développer un tel béton, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, il devient donc de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières premières.

Bien que la pratique du béton léger soit encore rare en Algérie, dans le monde, les besoins économiques et les intentions novatrices ont poussé la recherche dans ce domaine vers la conception et la construction d'ouvrages en béton léger, La question posée dans ce mémoire est la suivante : peut-on concevoir des ouvrages en béton léger d'argile expansée en Algérie ?

Le travail consiste à étudier l'ensemble des éléments important de mon sujet, de l'argile expansée jusqu'à la structure en béton léger en passant par le béton léger d'argile expansée.

Le mémoire est donc structuré en quatre chapitres cités ci-dessous :

- Chapitre 1 : Généralités et synthèse bibliographique
- Chapitre 2 : Granulat d'argile expansée
- Chapitre 3 : Béton léger d'argile expansée
- Chapitre 4 : Etude structure en béton léger

*Chapitre I : Généralité et synthèse
bibliographique*

I.1 Introduction :

Après les ouvrages en pierre, en terre cuite et en bois, le béton matériau hétérogène, a connu un développement intensif depuis près d'un siècle. C'est un matériau très économique offrant une bonne résistance à la compression et est très couramment utilisé dans la construction.

Ce matériau existe en plusieurs variétés, citons-en quelques-unes telles que : le béton armé, le béton précontraint, le béton autoplaçant, béton haute performances, béton projeté ainsi que le béton léger, qui va être l'élément essentielle de notre étude.

Bien qu'en Algérie le béton léger reste peu pratiqué, ailleurs dans le monde, le besoin économique et l'intention d'innover ont incité à la recherche dans ce domaine jusqu'à concevoir et réaliser des structures en béton léger,

La problématique définie dans ce mémoire est la suivante : Peut-on concevoir la réalisation des structures en béton léger d'argile expansée ?

L'élaboration de ce rapport est destinée à la fois à répondre à cette problématique mais aussi à mettre en relief les missions réalisées durant ce stage. Pour ce faire, ce mémoire est structuré en quatre chapitres, le premier se composera de deux parties. La première consiste en la présentation de l'entreprise. La deuxième sera de définir le béton léger et de donner ses variantes, ainsi qu'une illustration de quelques structures réalisées en béton léger.

I.2 Partie 1 : Contexte de stage :

Elève ingénieur en dernière année d'études à l'école National Polytechnique, j'ai fait le choix de suivre la spécialité génie civil après l'obtention du diplôme d'accès aux grandes écoles,

Dans ce cadre et afin d'apporter à ma formation la dimension la plus professionnalisante possible, j'ai décidé d'effectuer mon stage dans une usine de fabrication de granulats léger d'argile expansée appelé ALGEXPAN.

ALGEXPAN est le seul fabricant de granulats d'argile expansée en ALGERIE et détenteur de l'unique gisement d'argile à propriétés d'expansion sur le territoire.

L'usine est implantée à BOUINAN (Blida) (Figure I -1) ou est produit le granulat avec une harmonie de résistance et de légèreté.

ALGEXPAN transforme l'argile en pierre poreuse et résistante par un traitement thermique sans additifs. L'usine extrait 1 m³ d'argile de la nature pour fabriquer 2 à 3 m³ de matériaux de construction. Le produit est à 100 % Algérien. La capacité de production est de 600 m³ par jour.



Figure I.1 : Installation de l'usine de BOUINAN

I.2.1 Historique :

La fabrication de l'argile expansée a démarré en Septembre 1977 en Algérie. Cette unité située à BOUINAN (wilaya de Blida), à proximité d'un important gisement, a été conçue au départ en collaboration étroite avec l'usine de préfabrication de Sidi- Moussa, dans le but de préfabriquer des panneaux porteurs d'argile expansée.

I.2.2 Engagements de l'entreprise :

L'entreprise s'engage à mettre à la disposition des bâtisseurs algériens un nouveau matériau à propriétés multiples de légèreté, de résistance mécanique et chimique, d'isolation, de durabilité, d'inaltérabilité, de résistance au feu, de non émission de gaz, de PH neutre, de non agressivité et non désintégration etc. autant de propriétés qui font du granulats un matériau de choix pour les solutions de légèreté dans le secteur du BTP et le secteur de l'agriculture.

I.2.3 Produits de l'entreprise :

Tableau I.1 : Les différentes fractions d'argile expansée produites par ALGEXPAN

(AN : Argile nodulaire, AC : Argile concassée)

Gamme Nodulaire-Masse Volumique [mm/mm]-[Kg/m ³]	Gamme Concassé-Masse Volumique [mm/mm]-[Kg/m ³]
Sable AN 0/3	Sable AC 0/3 600
Gravier AN 3/8	Sable AC 0/3 700
Gravier AN 8/15-500	Gravier AC 3/8 500
Gravier AN 8/15-700	Gravier AC 3/8 600
Gravier AN 15/25-500	Gravier AC 3/8 700
Gravier AN 15/25-700	/

I.2.4 Qualité du produit :



Isolation Thermique



Isolation Phonique



Légèreté



Coupe feu



Résistance

Applications du produit

- Béton léger pour tout élément préfabriqué
- Plaques de béton
- Isolation thermique
- Ecran acoustique
- Matériau réfractaire
- Matériau coupe-feu
- Béton flottable
- Remblai léger
- Chape légère etc ...

Application verte

- Substrat léger pour bouturage
- Paillage
- Drainage
- Hydroponie
- Terrasse végétalisée

I.3 Partie 2 : Synthèse bibliographique :

I.3.1 Définition du béton léger :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les projets de constructions. La tendance actuelle est d'augmenter l'attrait du béton en développant des produits plus légers avec une résistance suffisamment élevée.

Les bétons légers sont par définition des bétons dont la masse volumique sèche, à l'état durci, ne dépasse pas 2000 kg/m^3 . [1]

Il existe deux catégories de béton léger :

- **Les bétons légers structurels** : on leur attribue une résistance mécanique. Ils sont conformes à la norme béton CN, leur masse volumique se situe entre 800 kg/m^3 et 2000 kg/m^3 .
- **Les bétons légers non structurels** : ils n'ont pas de garantie de performance mécanique.

Cette légèreté est due à des vides qui peuvent se situer :

- **A l'intérieur des granulats**, dans le cas d'utilisation de granulats légers : c'est la technique la plus courante pour faire du béton léger. On remplace tout ou une partie des granulats courants (granulats de type gravillons et sable) par des granulats légers. De nombreux granulats spéciaux sont utilisables pour réaliser des bétons légers. Le choix du type de granulats dépend de la densité souhaitée.
- **Entre les granulats**, dans le cas de bétons caverneux : en retirant une grande partie du sable, on obtient alors un béton léger dit caverneux, contenant beaucoup de vides.
- **Dans la pâte de ciment**, dans le cas du béton mousse ou du béton cellulaire : grâce à des adjuvants spécifiques, on introduit une grande quantité d'air dans la pâte de ciment.

On peut classer les bétons selon leurs masses volumiques apparentes comme ce qui suit :

Tableau I.2 : Classification des bétons en termes de masse volumique

Type de béton	Masse volumique apparentes [kg/m^3]
Béton très lourds	>3000
Béton lourds	2500 à 3000
Béton normal	2200 à 2500
Béton léger	< 2100
Béton très léger	< 500

Les bétons légers peuvent eux aussi être classés, selon leurs masses volumiques, selon la norme européenne comme ce qui suit :

Tableau I.3 : Classification du béton léger selon la norme **NF EN 206/CN**

Classe de masse volumique	Masse volumique apparentes [kg/m ³]
D 1,0	>800 et <1000
D 1.2	>1000 et <1200
D 1.4	>1200 et <1400
D 1.6	>1400 et <1600
D 1.8	>1600 et <1800
D 2	>1800 et <2000

I.3.2 Historique du béton léger :

Le béton léger est un matériau qui date depuis l'antiquité des temps, de l'empire romain où plusieurs références européennes ont été construites à base de ce matériau, telles que le Panthéon de Rome, qui a été construit avec du béton romains [7] (un béton dont les agrégats sont des cendre volcaniques) mélangé à des billes d'argile creuses pour plus de légèreté. Ajouté à cela, prenons comme exemple l'utilisation d'agrégats légers naturels dans l'opus caementitium qui est l'une des clés de la réussite de la construction romaine.



Figure I.1 Panthéon de Rome



Figure I.2 : Noyau en Opus caementitium d'une tombe

Aux XIXe et XXe siècles, la production d'agrégats légers industriels a connu un développement important, notamment, aux Etats-Unis où au début de la 1ère guerre mondiale, des granulats expansés ont été utilisés dans la construction navale de plus de 14 coques de navires américains. Suite à cela, plusieurs industries américaines font leurs apparitions dans, notamment, la production de l'ardoise expansée qui a été utilisée comme agrégat pour le béton léger.

Et ce n'est que dans l'après-guerre que ce type de matériau de construction, relativement neuf, s'est réellement répandu dans le monde.

Plusieurs marques se sont distinguées tels que DURISOL, SIPOREX, ARGEX et YTONG dans la production du béton léger.

DURISOL, invention belgo-néerlandaise, a été fortement utilisée en Suisse à partir de la fin des années 1930 et est ensuite devenue très populaire dans de nombreux autres pays européens (y compris en Belgique)

Le béton-gaz autoclavé SIPOREX a été élaboré en Suède dès 1935 et produit à grande échelle en Belgique à partir de 1956/1957 par la S.A. Siporex-Brabant (située à Leeuw-Saint-Pierre).

Le béton de granulats légers ARGEX a quant à lui été produit pour la première fois au Danemark, en 1939, sous la marque internationale Leca.

I.3.3 Types de béton léger :

I.3.3.1 Béton-gaz autoclavé :

I.3.3.1.1 Définition :

Le béton-gaz autoclavé ou plus connu sous le nom de béton cellulaire autoclavé est un béton de densité allant de 100 à 800 kg/m³, selon Nicolas FATRE [1]. Il se compose à peu près de 80 % d'air c'est-à-dire que pour 1 m³ de matériau, on obtient 5 m³ de béton cellulaire.

Cet air se présente sous forme d'ensemble de cellules (microcellules et macro-cellules) qui confère au produit tous ses caractéristiques thermiques.



Figure I.3 : Bloc de béton durci à l'autoclave

Le béton cellulaire autoclavé est un nom commun pour le mortier de ciment contenant de la chaux et du gypse et un agent d'expansion où l'autoclavage est utilisé pour développer la résistance.

L'ingrédient d'expansion utilisé est principalement de la poudre d'aluminium (utilisé par les marques YTONG, SIPOREX, DUROX) comme agent gonflant.

Le béton cellulaire autoclavé présente selon BOUTIN.C deux avantages :

- Légèreté et faible conduction thermique

I.3.3.1.2 Constitution du produit :

En plus de l'eau, voici les % de matières premières minérales requis à la constitution du produit :

Tableau I.4 : Répartition des matières premières minérales

Matière première minérales	Pourcentage Approximatif de la masse totale [%]
Sable de quartz siliceux (≥ à 95 % de Silice)	60 à 70
Ciment Portland ou CEM I	15 a 25
Chaux	15 a 25
Agent d'expansion (poudre extrêmement fine)	≤ à 0,05
Gypse	1 à 3

Remarque :

Ces pourcentages peuvent être changés selon la densité désirée.

I.3.3.1.3 Procédé de fabrication :

Après avoir préparé les ingrédients secs (nettoyés, pulvérisés, calibrés et mélangés), de la poudre d'aluminium et de l'eau sont ajoutées juste avant de verser le mélange dans le moule.

La poudre d'aluminium provoque une réaction chimique moussante, entraînant une augmentation du volume et générant un matériau poreux avec des bulles d'air non communicantes. La quantité totale de poudre d'aluminium a une influence sur la densité finale du béton.

Le mélange est ensuite laissé sécher et prendre dans le moule, puis on retire ce dernier,

Les éléments en béton étaient alors sciés en morceaux et placés dans l'autoclave. Les pièces sont mises sous pression de vapeur pour finaliser la réaction chimique et donner au matériau toute sa résistance.

I.3.3.2 Béton d'agrégats légers :

I.3.3.2.1 Définition :

Le béton de granulats légers est préparé en utilisant des granulats légers ou des granulats de faible densité qui remplacent les granulats ordinaires utilisés dans le béton ordinaire

Selon la norme EN 13055, les LWA acronyme de « Lightweight aggregates » qui veut dire « agrégats légers » peuvent avoir les origines suivantes :

- Agrégats naturels, c'est-à-dire pierre ponce et scorie.
- Granulats fabriqués à partir de matériaux naturels et/ou de sous-produits de processus industriels, comme l'argile (Leca, LIAPOR), le schiste et l'ardoise (STALITE) et le verre recyclé (LIAVER, PORAVÉR).
- Les sous-produits des processus industriels, c'est-à-dire les cendres volantes (par exemple ("LYTAG")) et le laitier de hauts fourneaux, ainsi que d'autres granulats légers tels que : Polystyrène, Perlite, Vermiculite

I.3.3.2.2 Classification :

La densité du béton peut être influencée principalement par le type de granulats légers. Selon Williams PAUCHET, on pourra donc classer ses bétons selon trois types :

- Béton de basse densité : $< 700 \text{ Kg/m}^3$
- Béton de densité moyenne : Densité comprise entre 700 et 1300
- Béton structurel : $> 1400 \text{ Kg/m}^3$

Le graphique ci-dessous représente la densité minimale et maximale de quelques types de bétons de granulats légers :

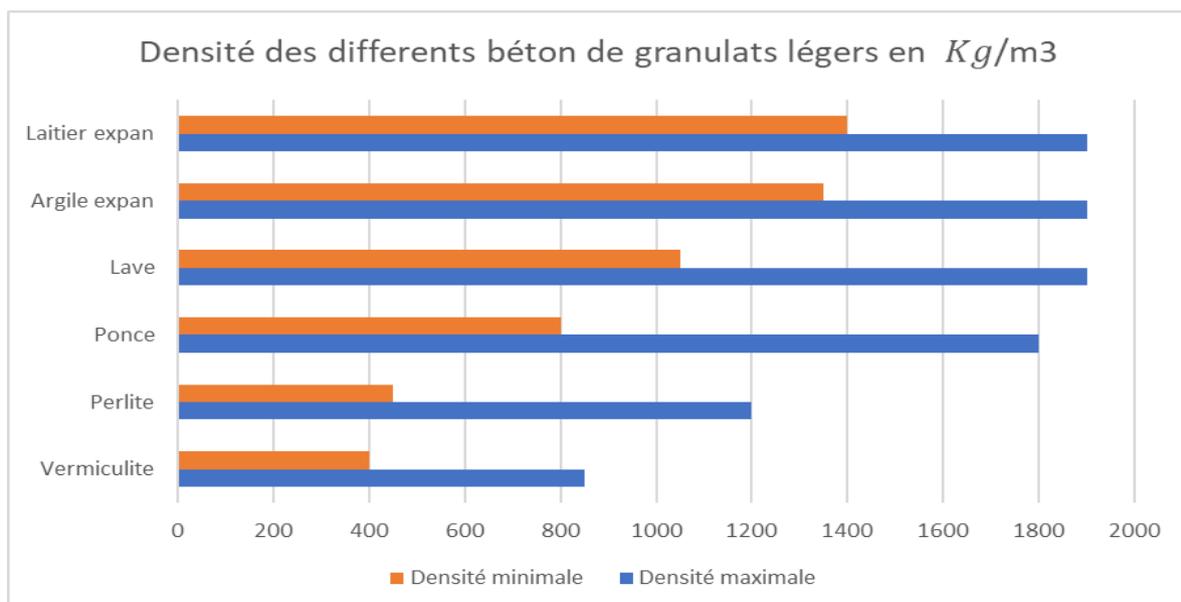


Figure I.4 : densité minimale et maximale de quelques types de béton de granulats légers

I.3.3.2.3 Caractéristiques générales des granulats légers :

I.3.3.2.3.1 Masse volumique des granulats :

Les granulats légers sont caractérisés par deux types des masses volumiques :

- Masse volumique apparente : Correspond aux granulats secs en vrac occupant l'unité de volume
- Masse volumique réelle des granulats : masse sèche d'un matériau granulaire rapportée à l'unité de volume de matière solide, y compris le volume des vides contenus dans les grains.

I.3.3.2.3.2 Granulométrie :

La granulométrie consiste à classer les granulats légers en trois classes granulaires : sable, grain moyen, gros grains, et cela afin d'étudier la taille des particules et leurs répartitions.

I.3.3.2.3.3 Qualité et propriétés du granulat :

- Les impuretés :

La présence d'impuretés au sein des granulats influe sur la qualité et les propriétés du béton ainsi que sur la conservation des armatures.

- Résistance des grains :

La résistance des grains est un aspect fondamental qui influe directement sur la résistance du béton, contrairement au béton ordinaire, qui lui ne tient pas compte de la résistance des grains du fait que cette résistance est nettement supérieure à celle du mortier.

Le béton léger quant à lui, de par la résistance moyenne des grains, peut avoir un plafonnement de résistance lorsque la résistance du mortier atteint celle du granulat. Ce dernier devient alors le point faible dans le béton.

- Porosité et absorption d'eau :

En règle générale, plus la porosité de l'agrégat est élevée, plus la conductivité thermique, la densité et la résistance du béton léger fabriqué avec celui-ci sont faibles.

Les agrégats à forte porosité, comme la vermiculite, donnent des bétons légers d'une excellente valeur d'isolation thermique mais peu résistants aux contraintes.

Les agrégats légers moins poreux peuvent produire des bétons suffisamment solides pour résister aux contraintes structurelles, mais plus denses et moins efficaces en termes d'isolation thermique que ceux fabriqués avec les agrégats à forte porosité [Shirley, 1975].

L'essai du pycnomètre est souvent réalisé pour déterminer l'absorption d'eau des granulats à 24 h. Cette dernière doit être prise en compte dans la formulation du béton et doit être ajoutée au volume d'eau initialement calculé.

Cette propriété du matériau peut être désavantageuse pour le béton car, avec le temps, cette eau va s'évacuer et entraîner une chute de résistance du béton et c'est pourquoi les bétons légers de hautes qualités sont ceux qui présentent des granulats légers à faible porosité (fasi Ur Rahman).

Le tableau ci-dessous exprime les pourcentages d'absorption de différents types de granulats :

Tableau I.5 : Pourcentage d'absorption selon le type le granulat

Type de granulat	Pourcentage d'absorption (en % du poids sec) à 24 h sous immersion totale
Argile expansée	20 à 30
Schiste expansé	10 à 15
Laitier expansé	25
Pouzzolane	10 à 25
Cendre volante frittée	20
Vermiculite exfoliée	880
Perlite expansée	1000

I.3.3.2.4 Caractéristiques du béton de granulats léger :

Une caractéristique importante du béton léger à base de granulats est la bonne liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydratée qui les entoure. Ceci est la conséquence de plusieurs facteurs.

Tout d'abord, la texture superficielle rugueuse de nombreux granulats légers est propice à un bon emboîtement mécanique entre les deux matériaux. En fait, il y a souvent une certaine pénétration de la pâte de ciment dans les pores ouverts en surface des particules de granulats grossiers.

Deuxièmement, les modules d'élasticité des particules de granulats légers et de la pâte de ciment durcie ne sont pas très différents les uns des autres [Neville, 1995].

I.3.3.3 Béton caverneux :

I.3.3.3.1 Définition :

Le béton caverneux est un béton léger réalisé à partir des composantes suivantes : du ciment, de l'eau et les granulats grossiers en omettant les granulats fins et même du sable, quoiqu'une petite quantité de sable est permise pour améliorer les propriétés mécaniques du béton.

Le nom du béton est attribué pour l'air qu'il contient et qui ressemble à des cavernes. Cet air est dû essentiellement à l'absence de granulats fins et de sable. On l'appelle aussi béton drainant puisqu'il a une forte porosité qui lui permet une absorption de l'eau avantageuse dans quelques applications



Figure I.5 : Bloc en béton caverneux

I.3.3.3.2 Avantages des béton caverneux :

Le béton caverneux présente plusieurs avantages tels que :

- Une densité inférieure de 25 à 30 % par rapport au béton ordinaire
- Utilisation comme béton de remplissage ou pour s'opposer aux remontées capillaires.
- Une meilleure caractéristique d'isolation thermique par rapport au béton normal. Il est donc utile pour la construction de murs extérieurs.
- Comme il ne contient pas de granulats fins, la surface nécessaire au revêtement de ciment est considérablement réduite. Ainsi, la quantité de ciment nécessaire est réduite par rapport au béton normal. Donc, c'est économique.
- La ségrégation n'étant pas un problème puisqu'en l'absence de granulats fins, les granulats grossiers peuvent être en bas.
- La vibration peut se faire facilement juste en tassant avec une tige
- Diminution des inondations

I.3.3.3 Inconvénient du béton caverneux :

Le désavantage que présente ce type de béton c'est qu'il ne peut pas être utilisé comme béton armé avec ce taux de perméabilité élevée qui peut entraîner la corrosion des armatures.

I.3.3.4 Porosité et vides dans le béton caverneux :

La porosité du béton caverneux est l'une des propriétés physiques qui le diffère par rapport au béton normal. Le nombre de pores dans ce béton donne indication de l'affaiblissement de la résistance du béton.

À mesure que le nombre de pores augmente, la perméabilité augmente également. L'eau a tendance à couler et à occuper l'espace dans la microstructure du béton, ce qui est susceptible d'affecter directement sa densité relative lorsque l'eau s'assèche.

I.4 Exemples de structure en béton léger :

I.4.1 Exemple 1 :

Béton léger réalisé avec du sable de poids normal et dans une gamme de densité du béton supérieure à $1,5\text{kg/dm}^3$

Prenons comme exemple la passerelle piétonne traversant la rivière Vitava en République Tchèque. Elle a une portée principale de 75 m et se compose de 54 éléments préfabriqués fabriqués avec du LC35/38 (Classe de résistance du béton léger)

Les éléments reposent sur deux jeux de câbles et forment le tablier du pont.



Figure I.6 : Passerelle piétonne traversant la rivière Vitava à České Budějovice (Budweis)

I.4.2 Exemple 2 :

Béton léger autoplaçant fabriqué avec du sable léger et dans une gamme de densité supérieure à $1,3\text{kg/dm}^3$

La conductivité thermique est encore trop élevée pour utiliser le béton léger avec des densités supérieures à $1,3\text{kg/dm}^3$ comme seul matériau d'isolation pour les murs extérieurs.

Ici, l'excellente combinaison de la résistance et de la densité est importante. Un béton léger de couleur noire a formé l'enveloppe extérieure des murs sandwichs extérieurs de l'immeuble d'appartements et de bureaux L40 (Fig. 4 gauche) et a permis de réduire le poids du parement en porte-à-faux.

Les exigences relatives à la coque en béton de l'engin de levage lourd étaient encore plus sévères (Figure I.7 à droite). Un béton léger spécifique a été choisi car une densité de démoulage inférieure à 1600kg/m^3 était obligatoire pour la flottabilité nécessaire.



Figure I.7 - Gauche : Liniestraße 40, Berlin, Allemagne. À droite : Heavy lifter, Rotterdam,

I.4.3 Exemple 3 :

Béton léger fabriqués avec du sable léger et des densités sèches inférieures à $0,8 \text{ kg/dm}^3$. Actuellement, les exemples les plus marquants d'exécution de ce type de béton en Allemagne sont deux maisons privées.

La première a atteint une résistance de $7,4 \text{ MPa}$ pour une densité de $0,76 \text{ kg/dm}^3$ (Fig. I.8 à gauche) et une construction plus récente a battu le record de LC avec $8/9 \text{ MPa}$ de résistance et une densité de $0,725 \text{ kg/dm}^3$ (Figure I.8 à droite).



Figure I.8 - Gauche : Maison privée Schlaich, Berlin, Allemagne. Droite : Maison privée Thalmer, Aiterbach, Allemagne

I.5 Conclusion :

Malgré qu'il ne soit pas une révolution, le béton léger a connu un grand développement dans l'industrie, par ses nombreux types et façons de fabrication, dans ce qui va suivre, nous nous intéresseront seulement au béton d'agrégats légers d'argiles expansées.

Chapitre II : Granulats d'argiles expansées

II.1 Introduction :

Les granulats légers structurels d'argiles expansées peuvent être utilisés pour fabriquer du béton léger structurel à haute performance.

Ce matériau a été utilisé dans de grandes structures aux États-Unis et en Europe. Alors que les ingénieurs structurels tentent de développer des conceptions toujours plus créatives et agressives, le béton léger continue d'être une bonne solution pour améliorer à la fois l'efficacité structurelle et la durabilité des structures, contribuant au succès de certaines des conceptions les plus avant-gardistes, ainsi que de nombreux projets plus ordinaires, y compris les nouvelles constructions et les projets de réhabilitation.

II.2 Définition des granulats légers d'argiles expansées :

L'argile expansée ou bien LECA acronyme de « Lightweight expanded clay aggregates » est un matériau granulaire léger manufacturé à partir d'argile bien spécifique telle que le schiste.



Figure II.1 : Différentes fractions d'argiles expansées

II.2.1 Description du matériau :

Sous l'action de fortes températures (1100°C - 1300°C) certaines argiles possèdent la propriété de gonfler à la suite d'un dégagement de gaz lié à un ramollissement de la matière. Parallèlement une peau extérieure se forme par vitrification à la surface du matériau. Après refroidissement, on obtient un produit léger à texture alvéolaire très marqué, de couleur grisâtre, de forme plus ou moins arrondie.

Les deux conditions régissant le phénomène d'expansion sont simultanément l'obtention d'une masse visqueuse et d'un dégagement gazeux.

L'argile expansée est un matériau léger, sa masse volumique apparente peut varier de 250 à 800 Kg/m^3 et qui donc contient des vides.

Quelques vides peuvent être accessibles saturés et d'autres ne le sont pas.

Le granulat présente une double porosité : la 1ère c'est à l'intérieur des grains et la 2ème c'est la porosité intergranulaire.

II.3 Caractéristiques du granulat d'argile expansée d'ALGEXPAN :

II.3.1 La masse volumique :

II.3.1.1 Masse volumique apparente des granulats en vrac :

II.3.1.1.1 Définition :

La masse volumique apparente (en vrac) d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

Selon Mahyuddin Ramli, la masse volumique apparente des granulats légers en vrac varie en sens inverse de la taille des grains. Ceci s'explique par le fait que les gros granulats sont, en général, plus expansés que les petits et possèdent alors une concentration de matière plus faible.

Mais la différence de poids volumique entre fins et gros granulats dépend du procédé de fabrication. Toutes les études de masse volumique apparente entreprises jusqu'à présent admettent qu'en général la masse volumique des gros granulats se situe entre le 1/3 et les 2/3 de celui des granulats normaux.

La densité apparente, à l'état sec, est comprise entre environ 380 kg/m^3 et 870 kg/m^3 pour les gros granulats et 700 kg/m^3 à 1200 kg/m^3 pour les granulats fins.

Pour les agrégats normaux, les chiffres correspondants sont d'environ 1400 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 .

II.3.1.1.2 Mode opératoire :

Le mode opératoire pour le calcul de la masse volumique en vrac doit être respecté comme suit :

- Déterminer le volume du récipient = V
- Noter la masse du récipient propre et vide = M_0
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel.
- Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient.
- Noter la masse du récipient rempli M_1 .
- Renouveler l'opération au moins deux (2) fois avec un autre échantillon du même type

II.3.1.1.3 Résultats :

Le résultat est obtenu à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_A = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

Avec :

ρ_A est la masse volumique en vrac du granulat

II.3.1.2 Masse volumique réelle :

II.3.1.2.1 Définition :

Masse sèche d'un matériau granulaire rapportée à l'unité de volume de matière solide, y compris le volume des vides contenus dans les grains.

II.3.1.2.2 Principe :

Le principe consiste à utiliser le pycnomètre pour l'essai afin de déterminer les volumes des vides contenus dans les grains et ainsi trouver la masse volumique réelle du granulat léger.

L'essai est effectué conformément à la norme **NF EN 1097-6 (2001)**

II.3.1.2.3 Mode opératoire :

Pesage des différentes masses :

- M_f : Masse du pycnomètre + la prise d'essai + l'eau jusqu'au trait de jauge au moment du mesurage final
- M_w : Masse des granulats superficiellement secs au moment de l'essai
- M_p : la masse du pycnomètre à l'étalonnage
- V_p : Volume du pycnomètre
- M_s : Masse des granulats séchés à l'étuve

II.3.1.2.4 Résultat :

La masse volumique réelle du granulat ρ_R est calculée selon l'expression suivante :

$$\rho_R = \frac{M_s}{M_p + V_p \times \rho_w + M_w - M_f} \rho_w$$

II.3.1.3 Présentations des résultats :

Les valeurs des résultats sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Masse volumique des différentes fractions d'argile expansée

	Masse volumique en vrac (Kg/m³)	Masse volumique Absolue (Kg/m³)
Sable 0/3	713	1648
Gravier 3/8	647	1288
Gravier 8/15	575.5	1199
Gravier 15/25	552	1010

II.3.2 L'analyse granulométrique du granulat d'argile expansée de BOUINAN

II.3.2.1 Les courbes granulométriques :

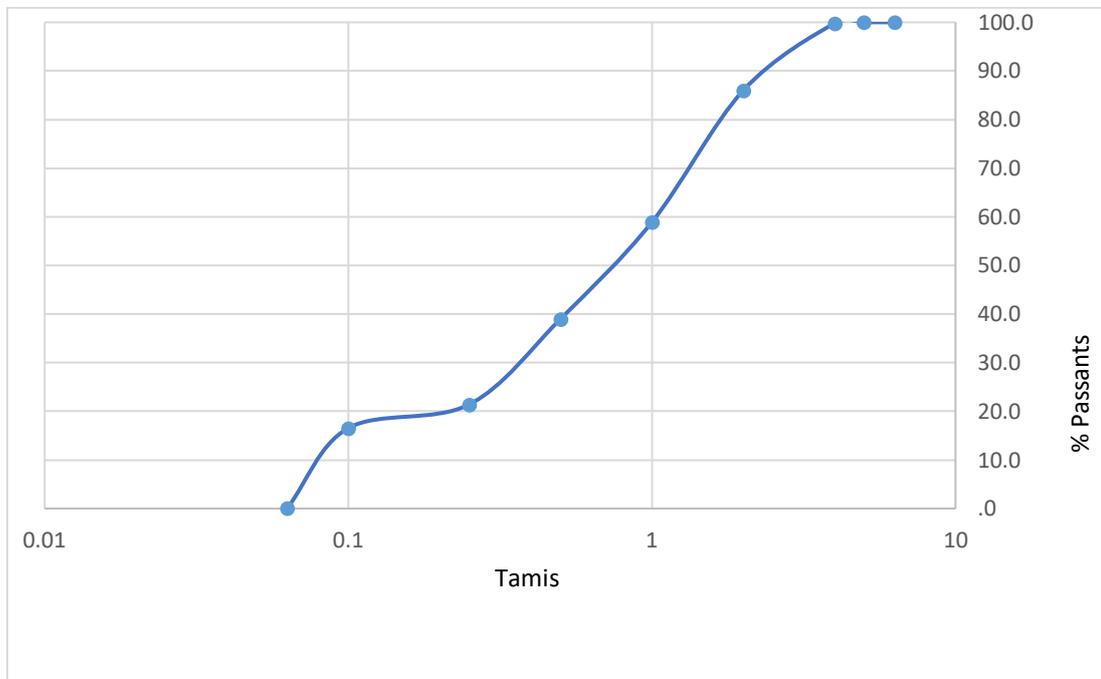


Figure II.2 : courbe granulométrique du sable 0/3

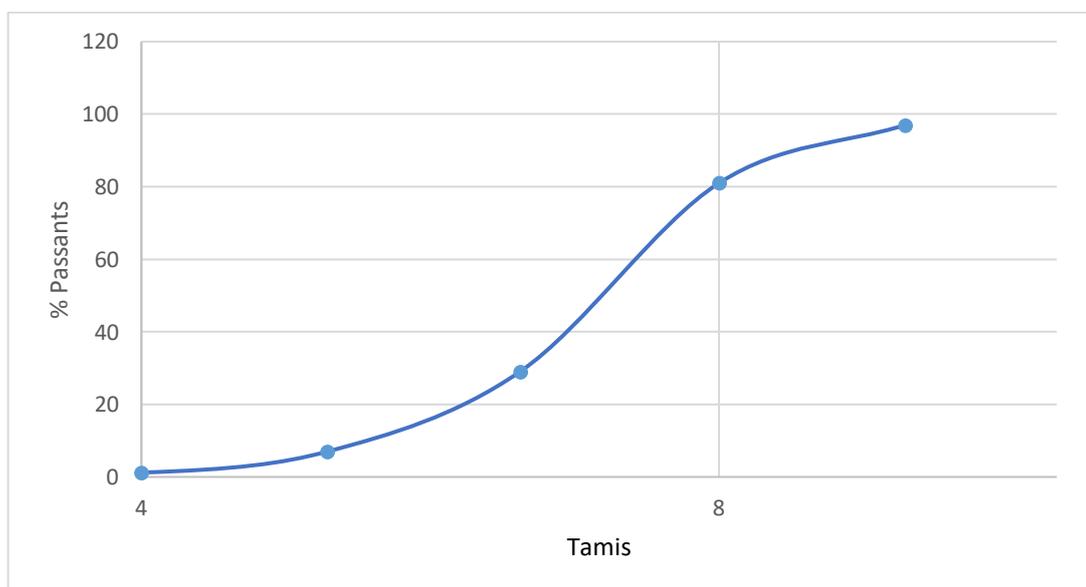


Figure II.3 : courbe granulométrique du gravier 3/8

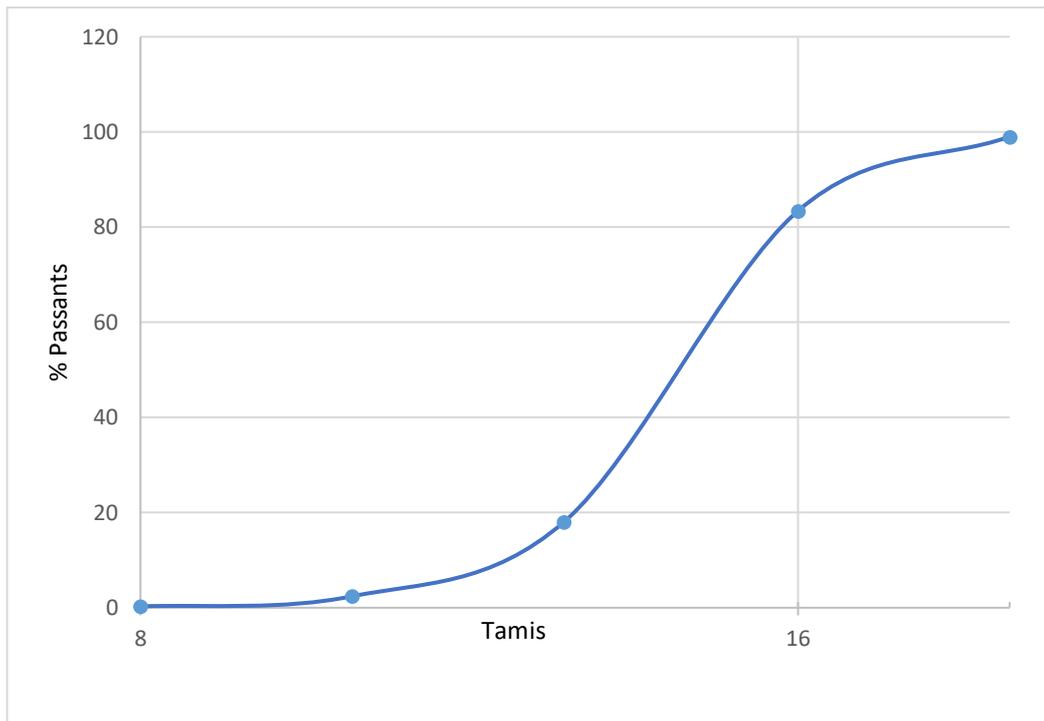


Figure II.3: courbe granulométrique du gravier 8/15

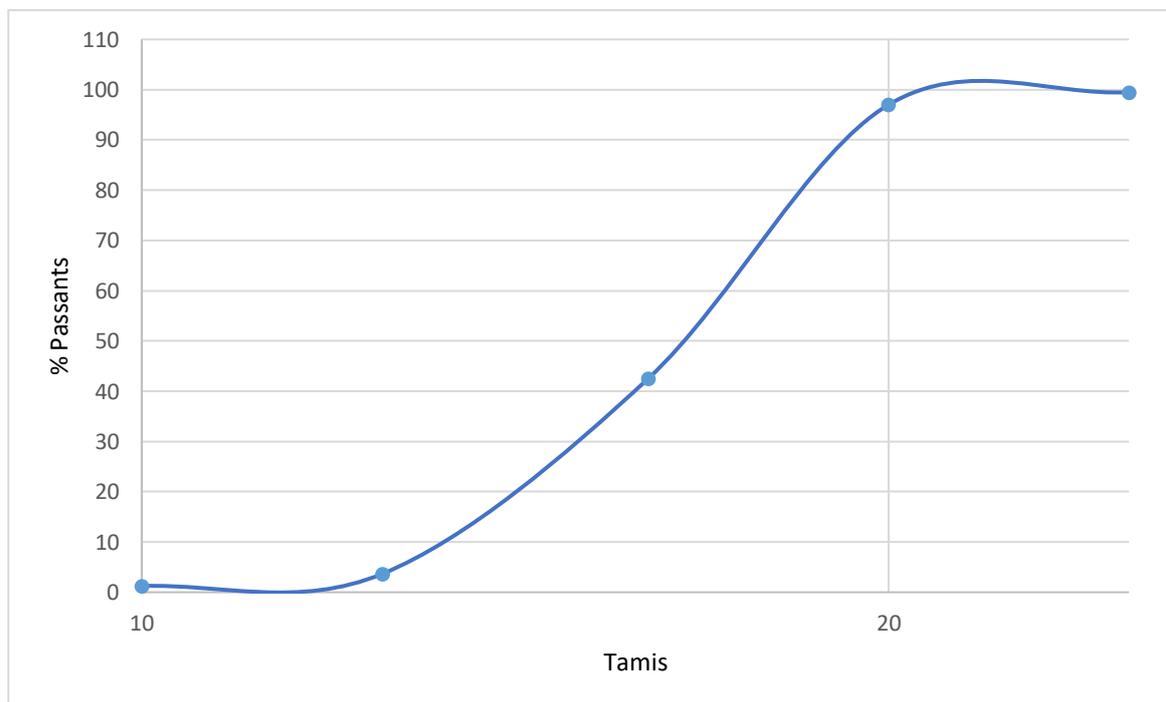


Figure II.4 : courbe granulométrique du gravier 15/25

Interprétations des courbes granulométriques :

La forme des courbes granulométriques obtenue apporte les renseignements suivants :

Continuité de la granularité , une faible proportions d'éléments fins et un diamètre maximale des granulates obtenue égale à 20 mm

II.3.2.2 Module de finesse du sable (M_f) :

M_f est calculé par la relation suivante :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulé en \% des tamis} = \frac{82 + 78.6 + 61 + 41.1 + 14}{100} = 2.767$$

II.3.3 Les impuretés :

II.3.3.1 Essai d'équivalents de sable pour le sable léger utilisé 0/3 :

Le résultat de l'ES a conclu que $SE = 69$ donc d'après le tableau ci-dessous, on obtient un sable de propreté admissible pour le béton léger

Tableau II.2 : nature et qualité du sable en fonction de SE

SE	Nature et qualité du sable
$SE < 60$	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq SE < 70$	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait
$70 \leq SE < 80$	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$SE > 80$	Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.3.4 Résistance des grains : Détermination de la résistance à l'écrasement en vrac des granulats :

II.3.4.1 Le principe :

Selon la norme **NF EN 13055-1**, la résistance à l'écrasement des granulats est définie comme étant la force nécessaire pour enfoncer le piston sur une certaine profondeur dans le cylindre remplis de granulats légers qui sont préalablement compactés par vibration dans un cylindre en acier.

II.3.4.2 Mode opératoire :

Deux modes opératoires existent :

- Le 1^{er} pour les granulats de densité $> 150 \text{ Kg/m}^3$
- Le 2^{ème} pour les granulats de densité $< 150 \text{ Kg/m}^3$

Par conséquent le 1^{er} mode opératoire est choisi pour l'essai et qui consiste à préparer le dispositif, puis le placer dans une presse hydraulique.

En premier lieu, après avoir remplis le cylindre inférieur de granulats légers, le cylindre est mis sous vibration afin de compacter le granulat. Les vibrations se font sur une table vibrante. Le temps de vibration va de 3s à 60 s

Deuxièmement, positionner le cylindre de guidage supérieur sur le cylindre inférieur et placer doucement le piston sur la surface du granulat léger compacté puis mettre le tout sur une presse hydraulique

Finalement, exercer sur le piston une force croissante pour atteindre un enfoncement de 20 mm en 100 s environ et noter la force exercée en newtons.

II.3.4.3 Résultats :

$$C_a = \frac{L + F}{A}$$

C_a est la résistance à l'écrasement, en newtons par millimètre carré, déterminée conformément la méthode 1 ;

- L est le poids du piston, en newtons
- F est la force de compression, en newtons ;
- A est l'aire du piston, en millimètres carrés.

II.3.5 Porosité et absorption de l'eau

En général, les bétons légers ont des valeurs d'absorption d'eau considérablement plus élevées que les bétons de poids normal.

Cependant, une absorption élevée ne signifie pas nécessairement que les bétons auront une mauvaise durabilité ou une perméabilité élevée.

Le coefficient d'absorption d'eau en 24 h du granulat est déterminé par un essai utilisant le pycnomètre.

Le coefficient d'absorption d'eau est le pourcentage en masse du granulat et qui représente l'absorption d'eau du granulat en 24 h.

II.3.5.1 Mode opératoire :

Le mode opératoire est établi comme suit :

- Préparation des éprouvettes de granulats légers en les séchant à l'étuve (110 ± 5) °C puis en pesant l'éprouvette et la notant M4.
- Placer l'éprouvette avec précaution dans le pycnomètre
- Remplir le pycnomètre d'eau à (22 ± 3) °C
- Remuer l'éprouvette en faisant tourner et en tapotant doucement le pycnomètre ou appliquer une légère vibration pour éliminer l'air occlus.
- Ajouter de l'eau au besoin au cours de l'essai afin d'en maintenir le niveau proche du repère de l'entonnoir.
- Vider l'eau du pycnomètre lorsque $t = 24$ h
- Transférer l'éprouvette sur un tissu sec et éliminer l'eau de surface en faisant rouler doucement l'éprouvette dans le tissu pendant 15 s maximum et peser l'éprouvette, M1(24h).

M1(24h) est la masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs après 24 h, en grammes ;

M2(24h) est la masse du pycnomètre, de l'entonnoir, de l'eau et des granulats saturés après 24 h, en grammes ;

M3 est la masse du pycnomètre, de l'entonnoir, de l'eau selon l'étalonnage, en grammes

M4 est la masse des granulats superficiellement secs à l'issue de l'essai, en grammes

II.3.5.2 Résultats :

L'absorption d'eau du granulat est calculée par la formule suivante :

$$W_f = \frac{M_4 - (m_2 - m_1)}{m_2 - m_1} \times 100 = 21\%$$

Avec :

m_2 : la masse du pycnomètre, de l'entonnoir, de la prise d'essai sèche en gramme

m_1 : la masse du pycnomètre, de l'entonnoir en gramme

W_f : Absorption d'eau du granulat en 24h qui est exprimé en pourcentage de masse

II.3.6 Réaction au feu

L'Argile Expansée est un produit minéral et incombustible, avec une réaction au feu Euroclasse A1 (selon NF EN 13501-1).

Clinkerisée à 1200 °C, elle est indestructible même en cas d'incendie très grave, elle ne fond ni ne se détériore, ne produit pas de fumées ou de gaz toxiques.

II.4 Procédé de fabrication :

On peut classer les installations industrielles d'expansion en trois catégories ;

- Expansion en four rotatif.
- Expansion sur grille mobile.
- Expansion en lit fluidisé.

L'usine ALGEXPAN utilise des installations pour une expansion en four rotatif,

II.4.1 Processus de production :

Après l'extraction de l'argile depuis la carrière située à côté de l'usine de production, l'argile est ensuite placée afin de subir le 1^{er} concassage et cela pour éliminer tous les corps étrangers ainsi que les grosses pierres,

Le tas d'argile va ensuite être stocké pour subir le procédé industriel suivant :

Avant d'être placée dans le four rotatif pour l'expansion, l'argile est humidifiée, puis façonnée en forme de bâtonnets de dimension spécifique afin de donner aux granulats d'argile expansée la granulométrie exigée par le producteur.

Le passage au four rotatif long de 70 m passe par deux étapes :

- Le séchage dans les 40 premiers mètres du four se fait aux alentours de 400°C. Cette partie du four assure aussi la granulation de la pâte sèche
- Le gonflement et l'expansion dans les 30 derniers mètres du four se fait aux alentours de 1200 °C

Tout au long du four, l'argile est en rotation afin d'obtenir une cuisson homogène et de maintenir la forme initiale des bâtonnets.

A la sortie du four, l'argile expansée d'ALGEXPAN est refroidie, criblée puis stockée pour la livraison. L'argile expansée concassée est obtenue par broyage puis par criblage dans différentes granulométries.

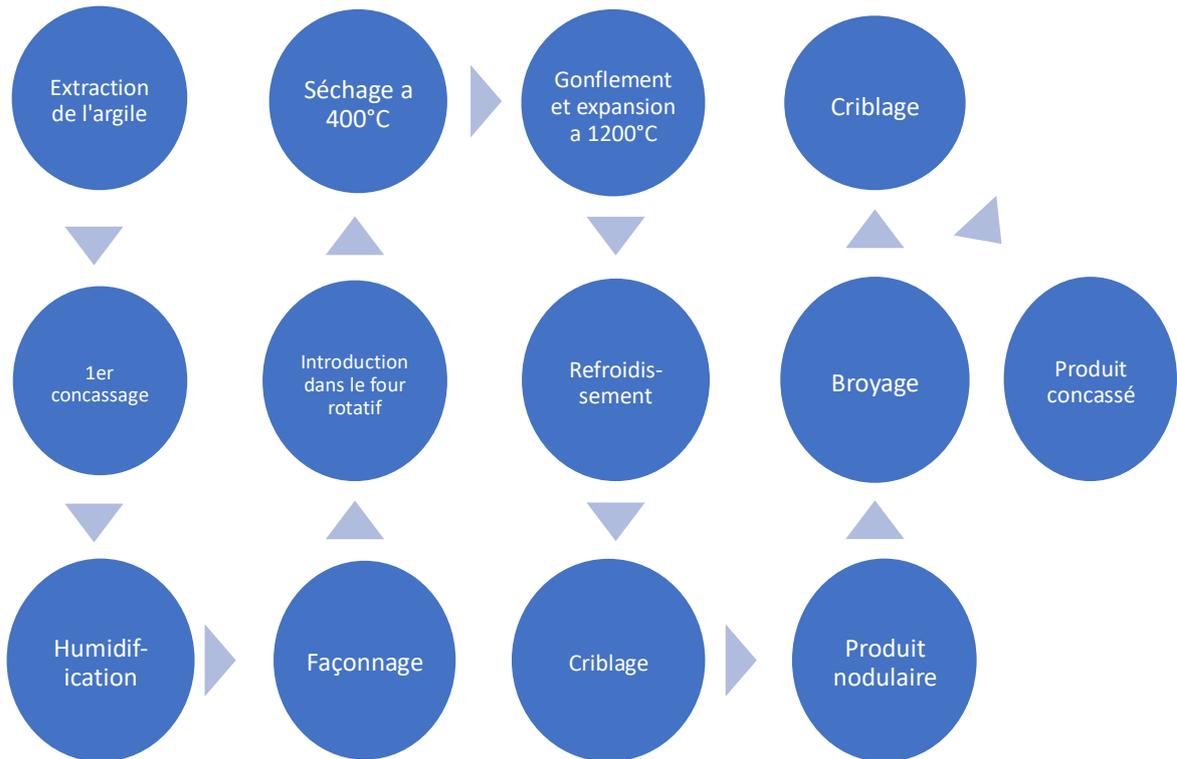


Figure II.5 : Process de fabrication de l'argile expansée

II.4.2 Indice d'expansion

L'indice d'expansion est un paramètre adimensionnel qui caractérise l'aptitude à l'expansion de la matière première utilisée pour la fabrication des granulats légers.

D'après Ozguven et Gündüz 2015 , l'indice d'expansion d'un matériau peut s'exprimer à partir de la relation suivante:

$$I_E = \frac{\rho_{Int}}{\rho_{exp}}$$

I_E : indice d'expansion

ρ_{int} : masse volumique réelle des granules avant expansion

ρ_{exp} : masse volumique réelle des granules après expansion

Selon les auteurs, les résultats obtenus sur trois différents types d'argile indiquent que l'indice d'expansion peut varier entre 1,1 et 5,5 (c'est-à-dire que le volume final des granules peut atteindre entre 1,1 et 5,5 fois le volume initial) selon la nature de l'argile, la taille initiale des granules et la température de cuisson.

II.5 Nature chimique des granulats légers :

II.5.1 Diagramme de Riley

D'après les travaux de (Riley 1950), la composition chimique des argiles expansibles appartient au domaine délimité sur le diagramme ternaire à la Figure II.6

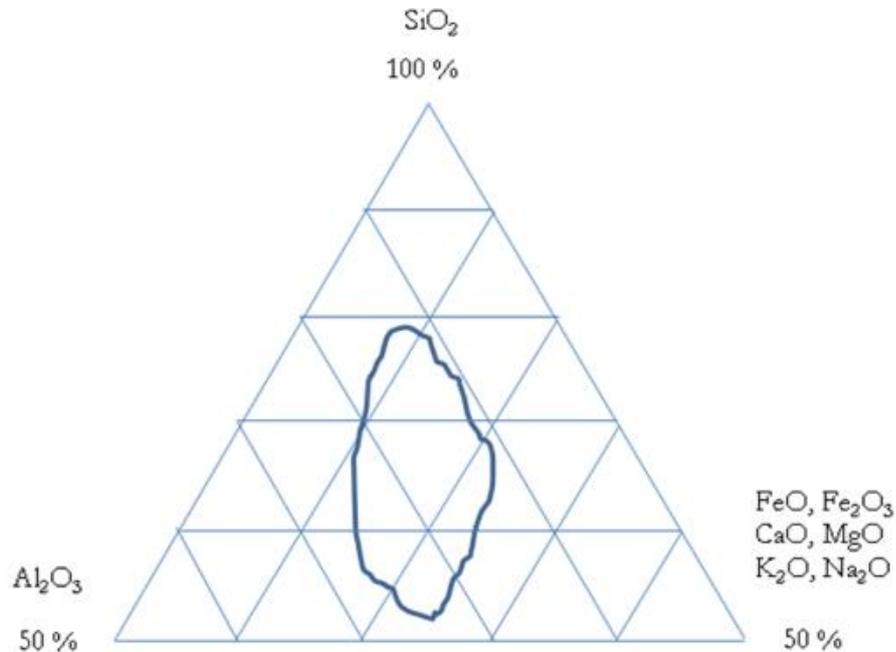


Figure II.6 : Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Riley 1950)

II.5.2 Composition chimique de l'argile expansée d'ARGEX :

La composition chimique des granulats légers dépend de la matière première utilisée. En général, ils sont constitués de silice, d'alumine, de chaux, d'oxydes métalliques et d'alcalins. Le Tableau II.3 présente la composition minérale du granulat d'argile expansée :

Tableau II.3 : Composition minérale du granulat d'argile expansée

Composé Chimique	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	S
Pourcentage du composé chimique	55-65	15-19	12-16	1-3	1-2	0,15-0,25	1,5-3,5	0,3-0,7	0,8-1	0,7-1,3

II.6 Domaine d'application de l'argile expansée :

II.6.1 Réduction de tassement

Pour alléger des remblais sur sols compressibles, versants instables et contre les ouvrages d'art fondés sur pieux.

II.6.2 Réduction de poussée

Pour limiter les efforts horizontaux sur murs de soutènement et structures de quai.

Pour les mêmes paramètres entrant dans le calcul de la poussée des terres avec une densité moindre, on peut avoir selon géo Leca une diminution de 80 % de poussée des terres car la densité du LECA est 5 fois moins inférieure que celle du remblai classique.

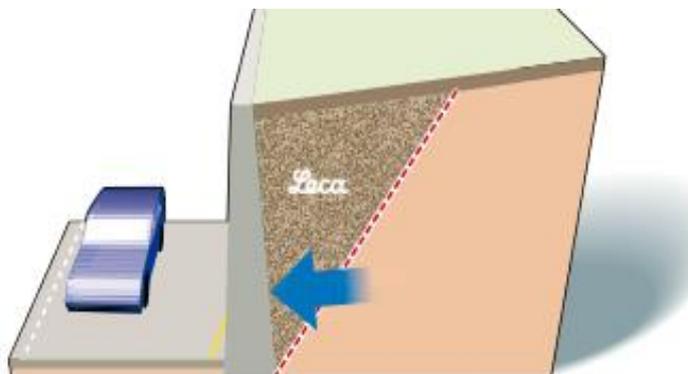


Figure II.7 : réduction de poussée du Leca

II.6.3 Réduction de charge sur ouvrage d'art :

Pour limiter le poids des charges rapportées sur parkings, tunnels enterrés...

II.6.4 Ravoirages :

Grâce à son faible poids spécifique, l'argile expansée permet de réaliser des ravoirages pouvant enrober des réseaux (électriques, sanitaires), même de grosse épaisseur, avec des charges réduites sur les structures.

II.6.5 Toitures terrasses ou en pente :

L'utilisation de l'argile expansée en toiture garantit l'isolation et une grande inertie thermique, des facteurs indispensables pour le confort en hiver comme en été.

Elle est légère, donc idéale pour réaliser des couches de grosse épaisseur sans pour autant surcharger les structures porteuses.

Elle peut être utilisée pour créer en une seule opération des pentes et l'isolation thermique, pour réaliser des couches drainantes ou pour lester les membranes d'étanchéité.

II.6.6 Remplissages légers, isolants et réfractaires :

Pour la réalisation de bâtiments neufs ou, plus souvent, de travaux de rénovation de constructions anciennes, il faut souvent réaliser des remplissages avec un matériau stable, durable, léger et incombustible : par exemple, au-dessus, de voutes, voutains, de planchers, etc.

L'argile expansée se prête de façon idéale à ce genre d'applications et également comme remplissage à proximité de constructions combustibles.

Elle est couramment utilisée dans le secteur civil et industriel pour l'isolation, la protection contre le feu et la mise en sécurité de citernes, de réservoirs non utilisés, de conduites enterrées et pour l'isolation contre de hautes températures, possiblement « réfractaire ».

II.6.7 Toitures végétalisées :

LECA est utilisé dans deux fonctions pour les systèmes de toiture végétalisée comme granulat léger pour la réalisation des couches drainantes efficaces, favorisant l'évacuation des eaux de pluie et comme constituant du substrat pour alléger et améliorer son efficacité par l'oxygénation des systèmes racinaires

II.6.8 Fabrication de béton :

L'autre des principales utilisations du LECA est la fabrication des bétons (ceux dont la masse volumique est inférieure à 2000 kg/m³)

Le remplacement d'une partie de l'agrégat conventionnel du béton par un granulat léger provoque une modification des propriétés du béton, y compris la réduction de la densité de poids et les variations de la résistance et le module d'élasticité du béton.

En plus des bétons conventionnels, le LECA a également été utilisé dans les différents types de bétons tels que :

- Bétons autoplaçants.
- Béton autoplaçant renforcé de fibres d'acier.
- Béton résistant aux hautes températures.
- Fibres de polypropylène.

Des essais ont également été effectués avec d'autres bétons légers spéciaux, tels que :

- Le béton avec LECA et caoutchouc.
- Le béton avec mousse et LECA.
- Le béton avec déchets de céramique rouge comme granulat fin et LECA comme granulat grossier.

II.7 Isolation thermique :

Grâce à un pourcentage élevé de vides d'air, l'Argile Expansée a une valeur faible de conductibilité thermique Lambda de 0,085 à 0,16 W/(m.K).

Elle est performante pour les applications d'isolation thermiques (selon NF EN 14063-1), idéale dans les cas d'isolation porteuse.

II.8 Conclusion :

Ces différentes caractéristiques du granulat d'argiles expansée doivent être prises en considérations dans la formulation du béton tels que l'absorption d'eau qui est une caractérisation essentielle qu'il faut prendre en compte lors de notre formulation.

*Chapitre III : Béton léger d'argile
expansée*

III.1 Définition du béton léger d'argile expansée :

Le béton léger d'argile expansée est un béton de masse volumique moindre que le béton ordinaire (1400 à 1900 kg/m³ pour le béton léger et de 2200 à 2500 kg/m³ pour un béton classique).

Le béton léger d'argile expansée structurelle est un matériau très polyvalent en raison de la combinaison d'une résistance suffisante avec un poids structurel minimal.

En fonction de l'utilisation prévue, l'accent est mis soit sur la capacité de charge et la densité minimale correspondante, comme c'est le cas pour le béton léger structurel.

III.2 Constituants du béton léger :

Aux deux objectifs principaux qui influencent la composition du béton normal, l'obtention d'une résistance suffisante est une bonne aptitude à la mise en œuvre,

Mis à part les granulats, le béton d'argile expansée a les mêmes constituants que le béton ordinaire.

III.2.1 L'eau :

L'eau pose un grand problème dans le béton léger. L'eau contenue est constituée par l'eau emprisonnée dans les pores des granulats et par l'eau d'hydratation de la pâte de ciment qui conditionne l'ouvrabilité et la résistance du béton.

L'eau absorbée par les granulats, surtout avant l'introduction du ciment dans le mélange, n'a aucune influence néfaste sur les résistances finales du béton. Au contraire, elle constitue une réserve interne d'humidité rendant la protection du béton frais moins critique et l'hydratation du ciment plus complète surtout en surface.

Le Professeur R.H. EVANS affirme en s'appuyant sur ses expériences sur les cendres volantes que cette eau qui sert à réaliser un équilibre humide du béton peut entraîner à la longue une déformation différée du béton.

La quantité d'eau servant à hydrater le ciment doit être choisie en fonction des résistances à obtenir et des caractéristiques d'ouvrabilité recherchées.

III.2.2 Le ciment :

Les natures et classes de ciments utilisables pour les bétons légers sont les mêmes que pour les bétons ordinaires.

Tous les spécialistes recommandent une teneur en ciment comprise entre 300 kg et 450 kg par mètre cube.

III.2.3 Les granulats :

Le granulat léger d'argile expansée est l'élément qui caractérise ce béton et qui le différencie par rapport au béton ordinaire. Les fractions utilisées pour la composition de ce béton sont :

- Leca 3/8, 8/15, 15/25 et le sable léger 0/3

III.2.4 Adjuvants :

Comme pour les bétons ordinaires, il n'y a lieu de recourir à l'utilisation d'adjuvants que dans des circonstances particulières dépendant, soit de la conception des ouvrages, soit des conditions d'exécution.

III.3 Composition du béton léger d'argile expansée d'ALGEXPAN :

La méthode de formulation de béton utilisée dans cette étude est la méthode de DREUX GORISSE

III.3.1 Objectif :

Dreux a mis au point une méthode simple, pratique tenant compte des expériences récoltées sur le terrain, qu'il faut corriger par la suite par des essais sur béton frais et béton durci.

Cette méthode consiste à déterminer, en fonction du type d'ouvrage ou de la partie d'ouvrage, le mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en ciment et en eau.

III.3.2 Principe de la méthode :

Le principe consiste à déterminer les paramètres nécessaires à la fabrication d'un béton ayant au moment de la mise en œuvre une consistance convenable, et après durcissement les qualités recherchées pour la construction d'un ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage. Ces paramètres sont :

- 1) le dosage en ciment (choix du ciment en fonction de sa classe vraie et des critères de mise en œuvre) et le dosage en eau en fonction de la résistance et de la consistance souhaitées
- 2) les volumes absolus des granulats (sable, gravillons et graviers de façon à obtenir un squelette granulaire avec un minimum de vides),

III.3.3 Définition des données de bases :

Il s'agit de définir les différentes quantités des composants à introduire dans le malaxeur afin d'obtenir un béton répondant aux exigences requises. Les données du problème sont :

- 1) une résistance moyenne souhaitée à 28 jours,
- 2) une ouvrabilité désirée caractérisée par un affaissement au cône d'Abrams.

III.3.3.1 Résistance souhaitée :

Elle est obtenue à partir de la résistance de calcul f_{c_j} ou $f_{c_{28}}$ nécessaire à la construction d'un ouvrage donné.

En tenant compte des dispersions et des écarts quadratiques, la résistance moyenne visée à 28 jours doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15% à la résistance de calcul f_{c_j} , soit :

$$\text{Résistance ciblée} = f_{c_{28}} = 45 \text{ Mpa}$$

$$f_c = f_{c_{28}} + 15\% = 51.75 \text{ Mpa}$$

III.3.3.2 Maniabilité désirée :

Affaissement ciblé = 9 cm pour un béton plastique à vibration normale pour la construction d'ouvrage d'art et ouvrages courants.

III.3.3.3 Dimension maximale des granulats :

Elle est prise à $D_{\max} = 20 \text{ mm}$, vérifiant toutes les conditions régissant des caractéristiques des pièces à bétonner.

III.3.4 Détermination des constituants :

III.3.4.1 Dosage en ciment et en eau :

La détermination approximative du dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée :

Le dosage en ciment et en eau dépend de la résistance souhaitée, de la qualité du ciment ainsi que des granulats. La formule approximative la plus utilisée est celle de Bolomey.

Elle permet de fixer un rapport C/E en fonction de la résistance visée et de la classe vraie du ciment, et qui est :

$$f_c = G \times \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Où :

f_c = résistance moyenne en compression visée à 28 jours

C = dosage en ciment en kg/m³ de béton

E = dosage en eau totale sur matériaux secs en litres par mètre cube de béton

σ_c = classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

G = coefficient granulaire sans dimension

G = 0.5 pour $20 \leq D \leq 31,5$ et pour une bonne qualité des granulats

$$\frac{C}{E} = \frac{f_c}{G \times \sigma_c} + G = \frac{1.15 \times 45}{0.5 \times 55} + 0.5 = 2.38$$

Fixons le dosage à 380 kg/m³.

Dosage en eau y compris la correction a apportée :

$$E' = C \times 0.42 + 2\% = 162.8 \text{ l}$$

Correction par rapport à l'absorption d'eau :

$$E_{\text{ajouté}} = 30 \text{ l}$$

III.3.4.2 Dosage des granulats :

III.3.4.2.1 Tracé de la Courbe Granulaire de Référence (CGR) :

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable et de gravier permettant d'obtenir un squelette granulaire avec un minimum de vides. Ce qui veut dire, dans quelle proportion mélanger le sable et le gravier pour -obtenir la meilleure compacité ?

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composant le béton à formuler. Et, pour déterminer les pourcentages de sable et de gravillon, il suffit de tracer les lignes de partage entre chaque granulats en joignant les points suivants :

M : point de la courbe granulométrique du sable pour un tamisât de 95 %

N : point de la courbe granulométrique du sable pour un tamisât de 5 %

La droite de partage MN coupe la courbe de référence en I. Le point d'intersection(I) entre ces deux droites de partage et la courbe de référence détermine les pourcentages en volume absolu des différents granulats, l'analyse granulométrique est donnée dans la figure III.1

— CGR — Courbe granulométrique — Ligne de partage

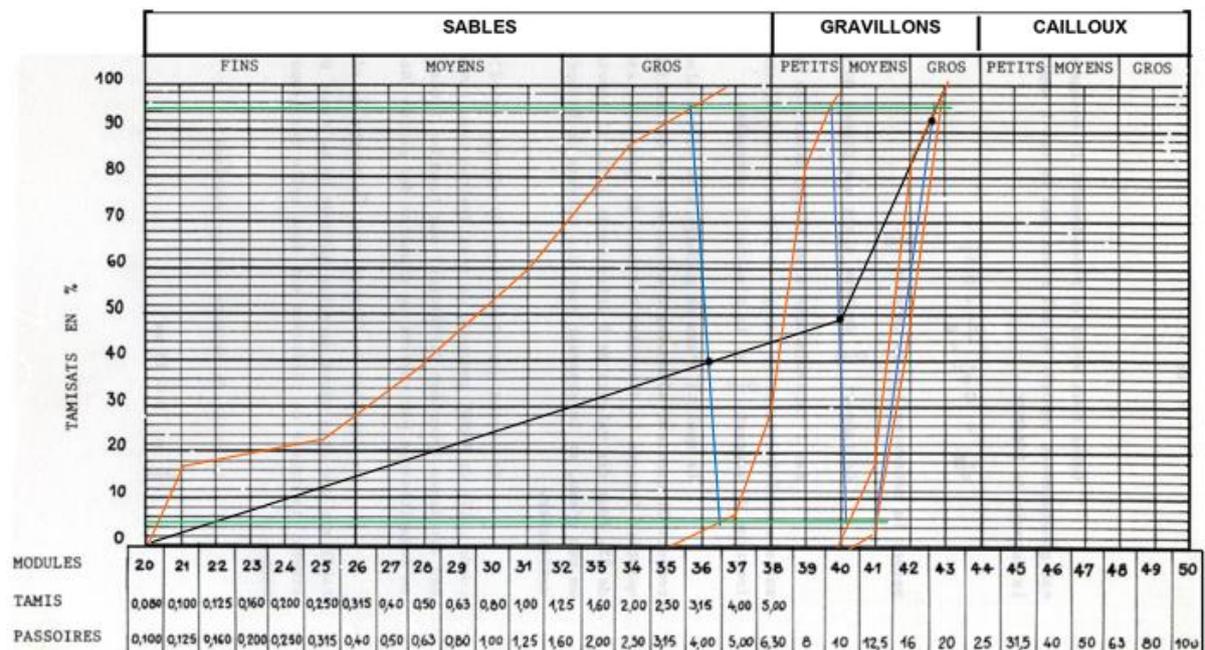


Figure III.1 : courbe granulométrique + courbe de référence

➤ Les coordonnées des points O, A, B :

O (0,080 mm, 0%)

B (M_{44} , 100%)

$$X_A = 10 \text{ mm}$$

A:

$$Y_A = 50 - \sqrt{1.25 D} + K' = 50 - \sqrt{1.25 \times 20} + 3.602 = 48.6 \%$$

$$K' = K + K_s + K_p = 3.602 \quad K = +2 \quad K_s = 1.602 \quad K_p = 0$$

III.3.4.2.2 Pourcentage de granulats trouvé graphiquement :

Tableau III.1 : Pourcentage de granulats du béton léger

Les granulats	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Pourcentage de granulats %	40	8	45	7

III.3.4.3 Adjuvant :

Utilisation d'adjuvant superplastifiant a pour but d'augmenter la résistance et la durabilité à l'états durci du béton léger ainsi que sa maniabilité à l'état frais, ce qui lui permet d'être mis en place plus facilement, il est égal à 1% du dosage du ciment utilisé :

$$m_a = \frac{m_c}{100}$$

Avec :

m_a : Dosage en adjuvant pour la composition du béton léger

m_c : Dosage en ciment pour la composition du béton léger

III.3.5 Coefficient de compacité (γ)

Les grains solides ne remplissent pas la totalité du volume de béton à cause de la présence d'eau interstitielle et de poches d'air. Pour évaluer la masse des granulats, il faut donc déterminer la compacité du béton γ

(Rapport du volume absolu des matières solides au volume total de béton frais) :

Pour un affaissement = 9 cm

$$\gamma = 0,81 - 0,03 - 0,03 + 0,006 = 0,744$$

$$v_c = \frac{c}{\rho_c} = \frac{350}{3,1} = 122,6 \text{ L/m}^3$$

$$v_{abs} = 1000\gamma - v_c = 1000 \times 0,744 - 122,6 = 621,4 \text{ L/m}^3$$

➤ Dosage des granulats par mètre cube de béton :

$$M_S = v_{abs} \times S\% \times \rho_s = 621,4 \times 0,4 \times 1,64 = 407 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M_{\frac{8}{15}} = v_{abs} \times G_{\frac{8}{15}} \% \times \rho_{\frac{8}{15}} = 621.4 \times 0.45 \times 1.2 = 335.6 \frac{kg}{m^3}$$

$$M_{\frac{3}{8}} = v_{abs} \times G_{\frac{3}{8}} \% \times \rho_{\frac{3}{8}} = 621.4 \times 0.08 \times 1.28 = 63.6 \frac{kg}{m^3}$$

$$M_{\frac{15}{25}} = v_{abs} \times G_{\frac{15}{25}} \% \times \rho_{\frac{15}{25}} = 621.4 \times 0.07 \times 1 = 43.5 \frac{kg}{m^3}$$

III.3.6 Composition du béton léger :

La composition du béton léger pour un mètre cube, étant constituée de sable, de gravier 3/8, 8/15, 15/25, d'eau, de ciment et d'adjuvant est résumée dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Composition du béton léger

Constituant	Sable 0/3	8/15	3/8	15/25	Eau	Ciment	Adjuvant
Dosage (kg/m ³)	407	335.6	63.6	43.5	192.8	380	3.8

Remarque :

Les dosages des granulats sont nettement inférieurs dans la composition du béton léger par rapport au béton ordinaire et cela du fait de la faible masse volumique des granulats légers.

III.4 Masse volumique théorique (ρ_{bt}) :

La masse volumique théorique du béton léger est obtenue en sommant le dosage de tous les constituants tels que :

$$\rho_{bt} = \sum M_i = 407 + 335.6 + 63.6 + 43.5 + 192.9 + 3.8 + 380 = 1426.4 \frac{kg}{m^3}$$

Remarque :

La diminution de la masse volumique des granulats induit une diminution de la masse volumique du béton d'argile expansée par rapport au béton ordinaire qui est aux alentours de 2400 kg/m³

III.5 Propriétés du béton léger d'argile expansée :

III.5.1 Propriétés des bétons frais :

III.5.1.1 Essai sur béton frais :

Sur cet essai les constituants du béton vont être ceux de la composition calculée préalablement, le volume choisit est celui approximativement de cinq éprouvettes cubique de paramètre a=15cm. Nous avons donc choisit de produire un volume déterminé de

$$v_d = \frac{1}{30} = 0.033 m^3$$

Pour cela les masses devront toutes être divisées par 30 et ce qui nous fait :

$$M_s = 13.56 kg$$

$$M_{\frac{8}{15}} = 11.18 kg$$

$$M_{\frac{3}{8}} = 2.12 kg$$

$$M_c = 12.6 \text{ kg}$$

$$M_{8/15} = 1.5 \text{ kg}$$

$$E = 5.5 \text{ L} + 1 \text{ L} = 6.5 \text{ L}$$



Figure III.2 : Confection des éprouvettes de béton léger

III.5.1.1.1 La masse volumique du béton léger à l'état frais :

La mesure de la masse volumique du béton frais compacté permet de contrôler le rendement, principalement lors de la mise au point du mélange.

La masse volumique a été calculée par la relation suivante : $\rho_f = (m_f - m_e) / v = 1570 \text{ kg/m}^3$

Avec :

- ρ_f est la masse volumique du béton à l'état frais
- m_f est la masse de l'éprouvette remplie de béton frais
- m_e est la masse de l'éprouvette
- v = volume de l'éprouvette

III.5.1.1.2 Consistance et affaissement au cône d'Abrams :

La consistance est l'aptitude de mise en œuvre du béton. Elle concerne non seulement le serrage du béton dans le moule mais aussi le transport, le coulage et la finition.

Par rapport à un béton ordinaire, la consistance des bétons légers non pré-mouillé diminue plus fortement en fonction du temps qui s'écoule entre la confection et l'instant précis de la mesure à cause de l'absorption d'eau des granulats.

L'ouvrabilité (ou maniabilité) se traduit par la capacité du béton de bien remplir tous l'espace du coffrage et d'assurer un bon enrobage des armatures.

L'ouvrabilité d'un béton est couramment appréciée par le test du cône d'Abrams, où le béton est mis dans un moule conique, l'affaissement du béton une fois le moule enlevé donne une appréciation sur sa maniabilité.

La mise en place du béton dans le moule se fait en quatre couches d'épaisseurs égales, piquées à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche.

Le cône est ensuite enlevé doucement sans secousse



Figure III.3 : essai au cône d'Abrams

III.5.1.1.2.1 Résultats :

L'affaissement Aff a été trouvé par la mesure de trois essais en prenant la moyenne des ces derniers :

$$Aff = 8.5 \text{ cm}$$

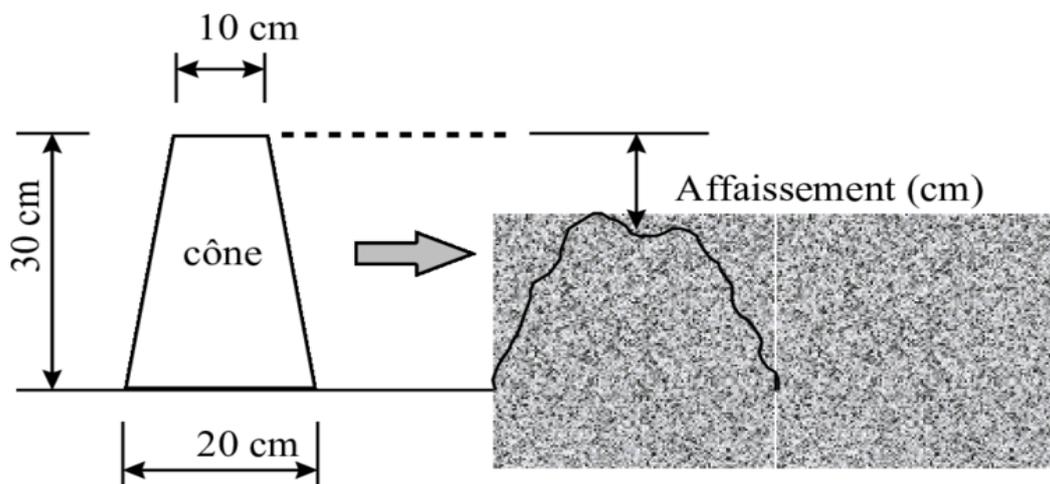


Figure III.3 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

III.5.2 Propriétés des bétons durcis :

III.5.2.1 La masse volumique :

La masse volumique du béton léger de structure dépend essentiellement des matériaux mis en œuvre et de la composition du béton.

III.5.2.2 Légèreté :

L'emploi des bétons Légers d'argile expansée a pour première conséquence une diminution (minimale) de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons.

La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2400kg/m³ alors qu'elle se situe autour de 1500 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire.

L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction

III.5.2.3 Porosités :

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom ($A\theta$) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée Φ_g , due à la présence de l'air intraparticule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique

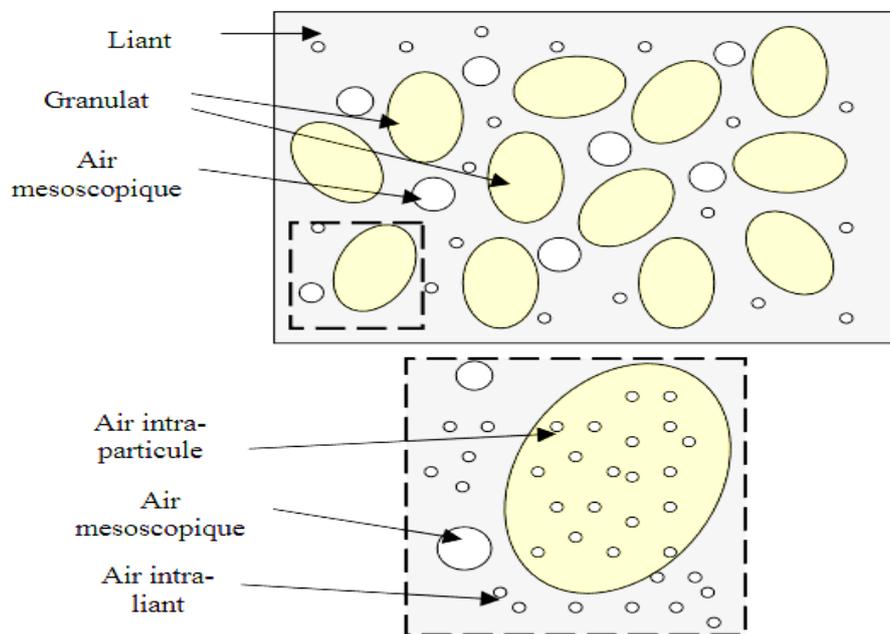


Figure III.4 : porosité du béton

III.5.2.4 Résistance à la compression :

La résistance à la compression des bétons est considérée comme la plus importante des résistances mécaniques, la plus représentative et elle est la plus utilisée comme point de repère et de comparaison.

Le béton léger à base de Leca peut être produit avec une large plage de densité et de classe de résistance. La norme **EN 206-1** classe les bétons légers dans une gamme de densité après séchage au four entre D1,0 : 800 kg/ m³ et D2,0 : 2000 kg/ m³ comme indiqué dans le Tableau III.3.

La plage de résistance à la compression est comprise entre LC 8 / 9 à LC 80/88.

Les classes de résistance à la compression pour les bétons allégés sont sensiblement différentes de celles pour les bétons de densité classique.

En effet, la relation entre résultats sur éprouvette cubique et cylindrique est sensiblement différente des bétons classiques.

La norme **EN 206-1** estime que béton léger et béton classique sont similaires pour toutes les autres propriétés et classifications.

Tableau III.3 : Les différentes classes de résistance du béton léger

Classes de résistance	LC 8/9	LC 12/13	LC 16/18	LC 20/22	LC 25/28	LC 30/33	LC 35/38	LC 40/44	LC 45/50
Résistance caractéristique sur cube (MPa)	9	13	18	22	28	33	38	44	50
Résistance caractéristique sur cylindre (MPa)	8	12	16	20	25	30	35	40	45

Si les essais pour la détermination de la résistance du béton léger ne peuvent pas être réalisés, cette dernière peut être définie en utilisant une formule qu'a proposée H.H. BACHE au Congrès de la R.I.L.E.M. (Budapest 1967) et qui est la suivante :

$$\sigma_{LWAC} = (\sigma_{LWA})^n + (\sigma_{mortar})^{1-n}$$

- σ_{LWAC} est la résistance à la compression du béton léger
- σ_{LWA} est la résistance des grains Leca
- σ_{mortar} est la résistance du mortier
- n est le pourcentage de volume du granulat Leca dans le mélange

III.5.2.4.1 Résultats :

- Essai de compression de l'éprouvette à l'aide d'une presse hydraulique avec son dispositif



Figure III.4 : Presse hydraulique

Par écrasement des éprouvettes cubiques grâce à un dispositif et une presse hydraulique, la résistance à l'écrasement à 10 jours est donnée par le baromètre $f_{c10} = 28 \text{ MPa}$

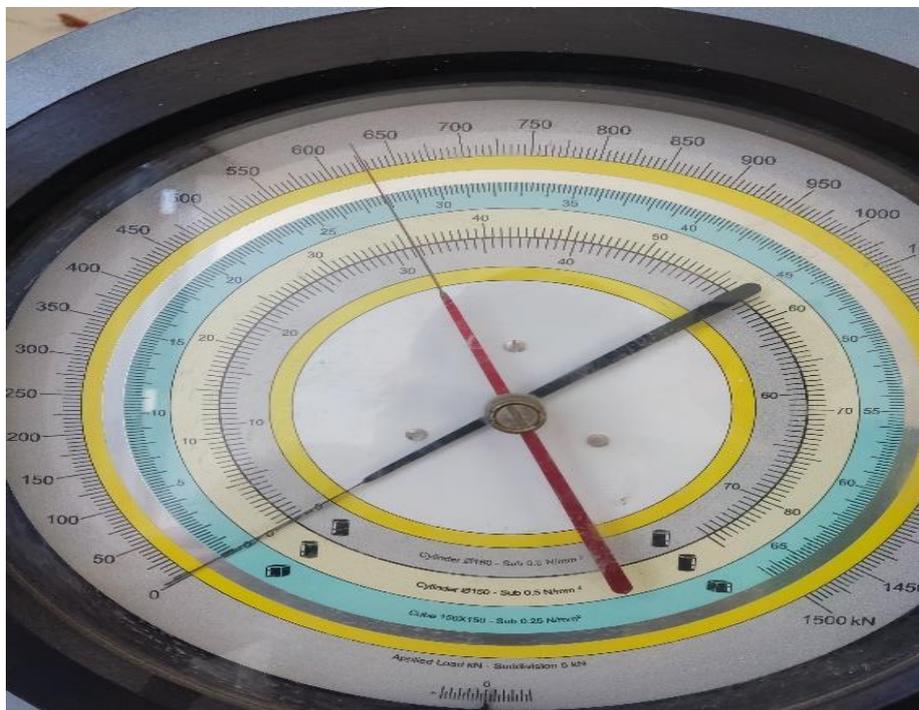


Figure III.5 : Baromètre indiquant la résistance a l'écrasement de l'éprouvette d'argile expansée à l'âge de 10 jours



Figure III.6 : Ecrasement par compression du béton léger

III.5.2.4.2 Facteurs influençant la résistance à la compression :

La résistance à la compression du béton léger dépend non seulement de la composition du béton (nature du granulat léger, teneur en ciment et classe de résistance) mais également des conditions de conservation.

III.5.2.4.2.1 Le granulat :

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton.

En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides.

Si le béton contient des granulats rigides plus résistants que le mortier, ceux-ci constituent les points durs du système. Les contraintes imposées au matériau, entraînent des déformations notables dans le liant et négligeables dans le granulat.

Pour le béton ordinaire des zones de concentrations de contraintes naissent donc dans le mortier, qui fissure.

L'adhérence entre les granulats et le mortier étant insuffisante pour supporter les niveaux de sollicitation imposés, la fissuration du mortier se produit autour des grains qui se décollent de la pâte de ciment.

La résistance du béton est donc pilotée par la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et le granulat rigide.

A l'inverse, dans le cas du béton léger contenant des granulats de faible résistance, les contraintes cheminent à travers la pâte, contournant les « points faibles » du matériau.

Le mortier subit des niveaux de sollicitation élevés et les déformations de la pâte et des granulats sont importantes.

Une fois les granulats écrasés, ils ne participent plus vraiment à la résistance du matériau et le mortier finit par céder.

La résistance des granulats pilote donc la résistance en compression du béton léger. Ce mode de rupture est possible car les granulats légers possèdent une surface poreuse importante qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le grain.

Ce n'est donc pas la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite comme dans le cas de granulats rigides mais le granulat qui cède.

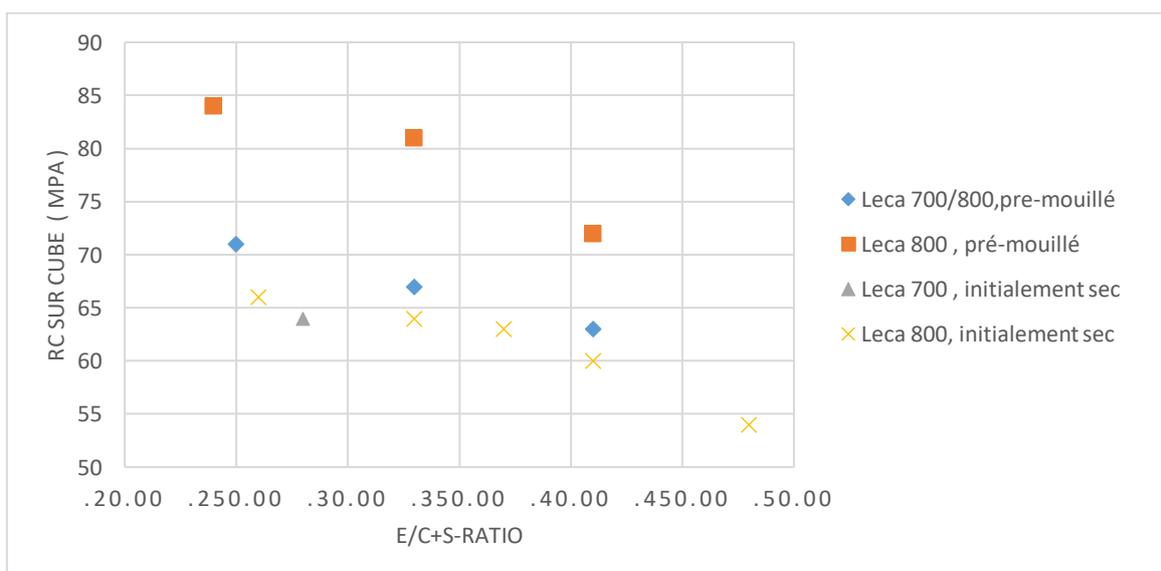
III.5.2.4.2.2 Le sable :

Les sables légers d'argile ou de schiste expansé ont une influence défavorable sur le niveau des résistances, malgré de bonne résistance obtenue avec le sable léger, l'utilisation du sable ordinaire donne de meilleure résistance au béton.

Pour les bétons de structure les plus résistants, et notamment pour les éléments de structure armés fortement sollicités, de même que pour les ouvrages précontraints il est recommandé de recourir à l'utilisation exclusive de sable de rivière. [8]

III.5.2.4.2.3 Le rapport E/C :

Ci-dessous une figure montrant la relation entre le rapport eau/ciment + fumée de silice ($E/(C+S)$) et la résistance à la compression du béton léger d'argile expansée [8],



, Figure III.7 : implication du rapport $E/(C+S)$ sur la résistance sur cube du béton léger

Interprétation :

Comme on peut le voir, la résistance suit alors une courbe progressivement décroissante avec l'augmentation du rapport E/C+S

Le pré-mouillage des granulats légers donne au béton de meilleure résistance à la compression que lorsqu'ils sont introduits initialement secs.

III.5.2.5 Résistance à la traction :

La résistance à la traction du béton peut être évaluée sur la base de la résistance à la compression.

Dans le cas du béton léger, la résistance à la traction doit être corrigée par un facteur de correction dépendant de la masse volumique selon l'équation suivante :

$$\eta_1 = 0,4 + \frac{0,6\rho}{2200}$$

η_1 = Coefficient pour la détermination de la résistance a la traction

ρ est la masse volumique après séchage du béton à l'étuve [Kg/m³]

La résistance à la traction devient :

$$f_t = \eta_1 \times 0.3 f_c^{0.67}$$

III.5.2.6 Module d'élasticité :

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2$$

$$E_{lcm} = E_{cm} \times \eta_E$$

$$E_{cm} (25 \text{ mpa}) = 31 \text{ Gpa}$$

Les valeurs ainsi obtenues sont approximatives, lorsque des données précises sont nécessaires, par exemple lorsque les déflexions sont d'une grande importance, des essais doivent être effectués pour déterminer les valeurs E_{lcm} conformément à la norme **ISO 6784**.

III.5.2.7 Comparaison des caractéristiques du béton léger avec le béton ordinaire :

Les caractéristiques du béton léger données dans le tableau ci-dessous proviennent de l'EUROCODE section 11.

Tableau III.4 : comparaison des caractéristiques du béton léger avec du béton ordinaire :

	Béton léger	Béton ordinaire
Resistance a la compression	F_{ic}	F_c
Resistance a la traction	$f_t = \eta_1 \times 0.3 f_c^{0.67}$	$f_{tj} = 0.6 + 0,06 f_{cj}$
Module d'élasticité	$E_{lcm} = E_{cm} \times \eta_E$	E_{cm}
$\varepsilon_{cu1}(\text{‰})$	$K_{f_{icm}}/E_{lci} \eta_1$	3.5
$\varepsilon_{cu2}(\text{‰})$	2	2
$\varepsilon_{cu3}(\text{‰})$	$3.5 \eta_1$	3.5

III.5.2.8 Résistance à la compression et à la traction de calcul :

- La valeur de la résistance à la compression de calcul est définie comme suit :

$$f_{lcd} = \frac{\alpha_{lcc} f_{lck}}{\gamma_c}$$

yc est le facteur de sécurité partiel pour le béton : $\gamma_c = 1.5$

α_{lcc} est le coefficient qui prend en compte les effets à long terme sur la résistance à la compression et des effets défavorables résultant de la façon dont la charge est appliquée.

$$\alpha_{lcc} = 0.85$$

- La valeur de la résistance à la traction de conception est définie comme suit :

$$f_{lctd} = \frac{\alpha_{lct} f_{lctk}}{\gamma_c}$$

Où γ_c est le facteur de sécurité partiel pour le béton $\gamma_c = 1.5$

α_{lcc} est un coefficient qui tient compte des effets à long terme sur la résistance à la traction et des effets défavorables résultant de la façon dont la charge est appliquée. =0.85

III.5.2.9 Propriétés thermiques :

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ . Elle est définie comme étant 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.

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau.

La conductivité thermique λ 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 en ajoutant l'air intra-particules.

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 expansée ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) 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.

III.5.3 Estimation du prix du béton léger :

III.5.3.1 Prix de revient :

On nous référant à la masse volumique en vrac des granulats et à la composition finale du béton léger, l'estimation du prix en prenant quelque majoration peut être évalué grâce au tableau suivant :

Constituants :	Sable 0/3	3/8	8/15	15/25	Ciment	Adjuvant
Prix (D.A)	3000 /m ³	6000/m ³	5000/m ³	5000/m ³	5800/t	140/L
ρ_a KG/m ³	713	647	575.5	552	/	/
Prix (D.A) par m ³ de béton	1809	621	3040	400	2200	840
			Total \approx 8900 D.A			

Le prix calculé est relativement cher par rapport au béton ordinaire, et ceci est dû au prix conséquent des granulats légers.

III.5.3.2 Prix de revient d'un béton ordinaire :

Le prix de revient d'un béton ordinaire est estimé à 3800 D.A (selon l'entreprise BHT Construction), pour un même dosage ciment, ce qui voudrait dire que le béton léger est 2,3 fois plus cher que le béton ordinaire.

III.6 Conclusion :

Malgré l'obtention de bons résultats lors des essais à l'état frais et à l'état durci du béton d'argiles expansées, d'autre essais doivent être mise en œuvre pour une caractérisation complète de ce type de matériau, les essais de flexion en 2 point et les essais de retrait et de fluage doivent être réalisée pour étudier les déformations que peut subir ce matériau par rapport au béton ordinaire.

La cherté de ce matériau revient principalement à la rareté de la production de ce matériau en ALGERIE, puisque l'entreprise ALGEXPAN est le seule détenteur et exploitateur de gisement de schiste dans le pays.

*Chapitre IV : Etude Structure en béton
léger*

IV.1 Introduction :

Les normes de calculs utilisées dans le présent chapitre sont le BAEL 91 modifié 99 et le RPA99V2003

La norme européenne de l'Eurocode 2 concernant le calcul de structures en béton pour le bâtiment « EN-1992-1-1, Section 11 », fournit des exigences supplémentaires pour le béton de granulats léger. Toutes les sections du document sont applicables pour ce type de béton en remplaçant les caractéristiques de résistance et de déformation du béton ordinaire par celles du béton léger définies dans la section 11.

Bien que le béton léger soit hors domaine d'application du code BAEL 91, l'Eurocode quant à lui ouvre la porte à des structures en béton légers. On se réfère à une étude comparative entre les méthodes de calculs des deux documents faites par Donatien Jacob Bonkougou qui admet que les choix de sections d'armatures étant identiques pour les deux méthodes de calcul des éléments porteurs tels que : les poutres, les semelles, les longrines,

Dans ce présent chapitre, il y a lieu d'appliquer le BAEL 91 modifié 99 pour les calculs manuels et d'utiliser NF EN-1992-1-1 dans le calcul automatique du logiciel ROBOT et ROBOT Expert.

L'étude structure dans ce chapitre se fera comme suit :

- Une étude d'un plancher à charge d'exploitation élevé
- Une étude d'une structure Bâtiment R+3 en béton léger
- Une étude d'une structure Bâtiment R+3 en béton ordinaire
- Comparaison des deux structures
- Etude économique

IV.2 Etude d'un plancher

IV.2.1 Objectif :

L'objectif de cette étude est d'appliquer les caractéristiques et les exigences supplémentaire que prescrit l'Eurocode pour le béton léger ainsi que de comparer les résultats obtenus avec un plancher à base de béton ordinaire.

IV.2.2 Plancher en béton léger :

IV.2.2.1 Caractéristique du matériau :

- Béton léger :
 - La résistance caractéristique du béton à la compression à 28jours sera 25 MPa.
 - La densité du béton est prise à 18.1 KN/m^3 , le dosage du ciment étant de 380Kg/m^3
- Armatures : Les aciers utilisés sont les suivants :
 - Aciers haute adhérence FeE400 pour les armatures longitudinales et transversales.

IV.2.2.2 Evaluations des charges dues au poids propre du béton :

La charge du poids propre des éléments en béton léger G' subit une réduction par rapport au béton ordinaire G . Cette réduction est due à la différence entre la masse volumique du béton léger ρ_{bl} et celle du béton ordinaire ρ_{bn} telle que :

- $\rho_{bn} = 25 \text{ KN.m}^{-3}$
- $\rho_{bl} = 18.1 \text{ KN.m}^{-3}$

Donc

- $G' = \rho_{bl} \times a \text{ KN.m}^{-2}$
- $G = \rho_{bn} \times a \text{ KN.m}^{-2}$

La relation entre G' et G va être comme suit :

$$G' = \frac{18.1}{25} \times G = 0.724 G = \alpha' G, \quad \alpha' = 0.724$$

IV.2.2.3 Caractéristiques du plancher :

Ce plancher supporte un revêtement représentant un poids de 0.3 KN/m^2 et une charge d'exploitation q de 10 KN/m^2 .

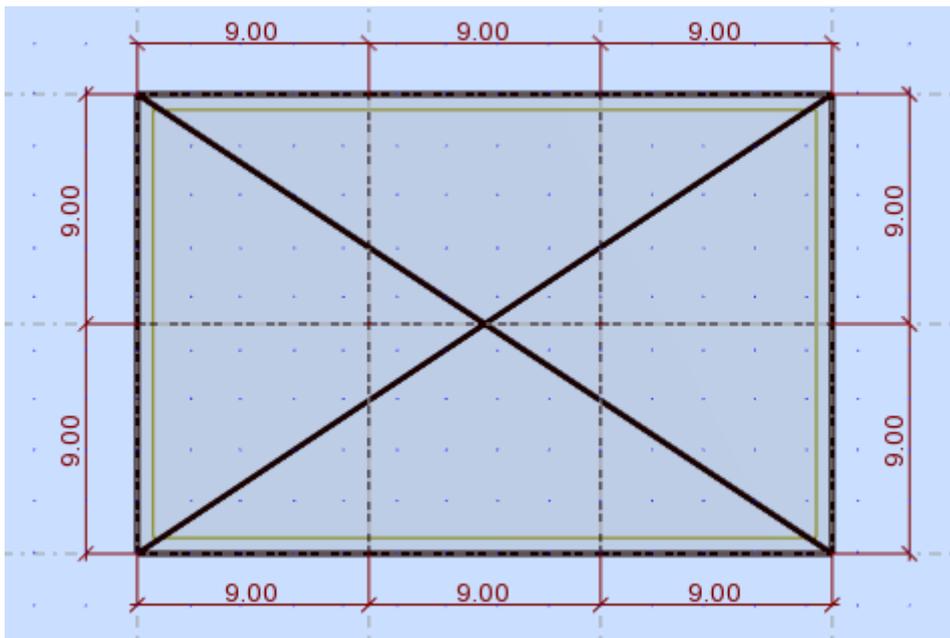


Figure IV.1 : Vue en plan du plancher

L'épaisseur est définie à 16 cm

Les dimensions des poutres et poteaux sont :

- Poteau (cm^2) : 60×60
- Poutre (cm^2) : 40×40

IV.2.2.3.1 Porté de la dalle :

$$\bullet \quad l_x = 9 - 2 \times 0,2 = 8,6 \text{ m} \qquad l_y = 9 - 2 \times 0,2 = 8,6 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{l_x}{l_y} = 1 \quad \begin{cases} ux = 0.044 \text{ (ELS)} \\ uy = 1 \text{ (ELS)} \\ ux = 0.037 \text{ (ELU)} \\ uy = 1 \text{ (ELU)} \end{cases}$$

IV.2.2.4 Évaluation des charges :

$g = \text{poids propre de la dalle} + \text{poids propre du revêtement}$

$$g = 18.1 \times 0.16 + 0.3 = 3.196 \frac{\text{kn}}{\text{m}^2}$$

IV.2.2.5 Calcul d'un panneau dalle isostatique à l'ELU :

À l'état limite ultime :

$$Elu = 1.35g + 1.5q = 1.35 \times 3.196 + 1.5 \times 10 = 19.315 \text{ kn.m}^{-2}$$

À l'état limite de service :

$$Els = g + q = 3.196 + 10 = 13.196 \text{ kn.m}^{-2}$$

IV.2.2.5.1 Déterminations des moments :

$$M_{0x} = \mu_x p l_x^2 = 0.037 \times 19.3146 \times 8.6^2 = 52.85 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$M_{0y} = M_{0x} = 52.85 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

Moment en travée, à l'appui de rive et à l'appui central :

$$M_{tx} = M_{ty} = 0.85 M_{0x} = 44.92 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$M_{arx} = M_{ary} = 0.3 M_{0x} = 15.85 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$M_{acx} = M_{acy} = 0.5 M_{0x} = 26.425 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

IV.2.2.5.2 Calcul de l'effort tranchant et de la contrainte de cisaillement :

L'effort tranchant maximal se produit au milieu du grand côté et sa valeur ultime sur une bande de 1,00 m de large est :

$$\bullet \quad \text{A l'appui de rive : } T'_{max} = \frac{p u l_x l_y}{2l_x + l_y}$$

$$\bullet \quad \text{A l'appui central : } T_{max} = 1.15 \times T'_{max} = 63.664 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

La contrainte de cisaillement est donc donnée par :

$$\tau_U = \frac{T_{max}}{b_0 d} = 0.489 \text{ Mpa} \leq 0.05 f_{c28} = 1.25 \text{ Mpa} \quad , \text{ La condition est satisfaite, pas besoin d'armatures d'effort tranchant (c'est pratiquement le cas dans les dalles).}$$

IV.2.2.6 Calcul du ferrailage : (Utilisation de l'organigramme de flexion simple) :

Le ferrailage est résumé dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.1 : Ferrailage du plancher en béton léger et choix des armatures

/	M (KN/m)	μ	α	Z	As (cm ²)	Nb, esp (cm)
En travée	44.92	0.17	0.23	0.12	10.76	7HA14, 14
Appui de rive	15.85	0.06	0.08	0.13	3.5	3 HA 12, 32
Appui central	26.425	0.1	0.132	0.13	5.84	5 HA 12, 19.3

IV.2.3 Etude de la dalle en béton normal :

- Les Portées de la dalle ne changent pas.

IV.2.3.1 Évaluation des charges

$g = \text{poids propre de la dalle} + \text{poids propre du revêtement}$

$$g = 25 \times 0.16 + 0.3 = 4.3 \frac{\text{kn}}{\text{m}^2}$$

IV.2.3.2 Calcul d'un panneau dalle isostatique à l'ELU :

- À l'état limite ultime :

$$Elu = 1.35g + 1.5q = 1.35 \times 4.3 + 1.5 \times 10 = 20.805 \text{ kn.m}^{-2}$$

- À l'état limite de service :

$$Els = g + q = 4.3 + 10 = 14.3 \text{ kn.m}^{-2}$$

$$M_{0x} = M_{0y} = \mu_x p l_x^2 = 0.037 \times 20.805 \times 8.6^2 = 57 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

- Moment en travée, à l'appui de rive et à l'appui central :

$$M_{tx} = M_{ty} = 0.85 M_{0x} = 48.45 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$M_{arx} = M_{ary} = 0.3 M_{0x} = 17.1 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$M_{acx} = M_{acy} = 0.5 M_{0x} = 28.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

- Calcul de l'effort tranchant :

L'effort tranchant maximal se produit au milieu du grand côté et sa valeur ultime sur une bande de 1,00 m de large est :

- A l'appui de rive : $T'_{max} = \frac{p_u l_x l_y}{2l_x + l_y}$
- A l'appui central : $T_{max} = 1.15 \times T'_{max} = 68,59 \frac{KN}{m}$
- La contrainte de cisaillement est donc donnée par :

$$\tau_U = \frac{T_{max}}{b_0 d} = 0.508.9 \text{ Mpa} \leq 0.05 f_{c28} = 1.25 \text{ Mpa}$$

La condition est satisfaite, pas besoin d'armatures d'effort tranchant.

IV.2.3.3 Calcul du ferrailage : (Utilisation de l'organigramme de flexion simple) :

Le ferrailage est résumé dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : Ferrailage du plancher en béton ordinaire et choix des armatures

	M (KN/m)	μ	α	Z	As (cm ²)	Nb, esp (cm)
En travée	48.45	0.184	0.26	0.12	11.6	6HA16, 16.6
Appui de rive	17.1	0.065	0.085	0.131	3.75	3 HA 12, 32
Appui centrale	28.5	0.121	0.134	0.135	6.7	6 HA 12, 16.6

IV.2.4 Comparaisons des sections d'acier pour les deux types de planchers :

Le tableau ci-dessous affiche une comparaison des sections adoptés pour les deux planchers

Tableau IV.3 : Comparaisons du ferrailage des deux planchers

Plancher	Béton léger	Béton normal
Moment en travée (KN/m)	44.92	48.5
Ferrailage en travée cm ²	10.76	11.6
Nb, esp (cm)	7HA14, 14	6HA16, 16.6
Moment sur l'appui de rive	15.85	17.1
Ferrailage sur appui de rive	3.5	3.75
Nb, esp (cm)	3 HA 12, 32	3 HA 12, 32

Moment sur appui centrale	26.425	28.5
Ferraillage sur appui centrale	5.84	6.7
Nb, esp (cm)	5 HA 12, 19.3	6 HA 12, 16.6

IV.2.5 Interprétations des résultats :

IV.2.5.1 De point de vue technique :

La charge d'exploitation est dans ce cas la dominante par rapport à la charge permanente et donc les combinaisons de charge et les moments calculés auront une faible diminution par rapport aux efforts appliqués à un plancher en béton normal.

IV.2.5.2 De point de vue économique :

Malgré un léger gain en armature, le béton léger reste cher et donc n'est pas satisfaisant de point de vue économique pour ce type de chargement, il serait donc intéressant de voir l'application du béton léger dans des structures possédant de faibles charges d'exploitation ou bien dans des bâtiments d'habitation, là où la charge permanente est conséquente.

IV.3 Etude d'une structure bâtiment R+3 en béton léger (de densité 1500 kg/m³) :

IV.3.1 Introduction

Cette partie consiste en l'étude d'un bâtiment R+3 à usage d'habitation et de commerce. Elle comporte quatre grandes parties :

- Le prédimensionnement.
- L'étude dynamique du bâtiment.
- Le ferraillage des éléments principaux (poteaux, poutres).
- Calcul des fondations (dimensionnement et ferraillage).

IV.3.2 Description de la structure :

IV.3.2.1 Dimensions de l'ouvrage en plan :

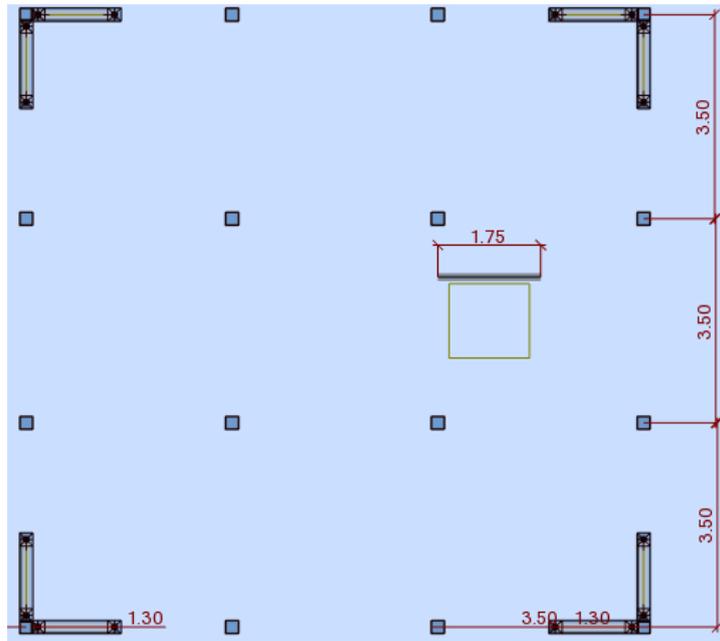


Figure IV.2 : Vue de la structure R+3 en plan

Les dimensions du bâtiment en question sont :

- Sens longitudinal $L = 10.5\text{m}$.
- Sens transversal $l = 10.5\text{m}$

IV.3.2.2 Dimensions en élévation :

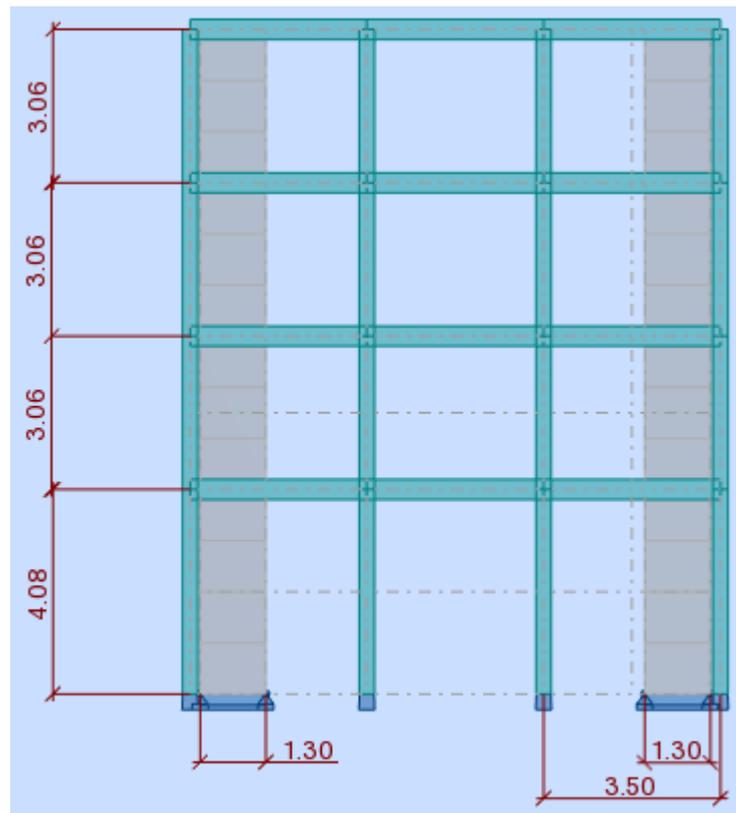


Figure IV.3 : Vue de la structure R+3 en plan

Les différentes hauteurs sont :

- Hauteur rez-de-chaussée $H_r = 4.08$ m.
- Hauteur niveau courant $H_c = 3.06$ m.
- Hauteur totale du bâtiment $H = 13.26$ m.

IV.3.3 Système structurel :

IV.3.3.1 Planchers

Les planchers sont considérés comme des diaphragmes rigides d'épaisseur relativement faible par rapport aux autres dimensions de la structure.

Pour ce type de bâtiment, le choix est généralement porté sur des planchers à corps creux.

IV.3.3.2 Revêtement :

Le revêtement du bâtiment est constitué par :

- Un carrelage de 2cm pour les chambres, les couloirs et les escaliers.
- De la céramique recouvrant les murs dans les salles d'eau.
- De l'enduit de plâtre pour les murs intérieurs et plafonds.
- Du mortier de ciment pour le crépissage des façades extérieures.

IV.3.3.3 Escaliers :

Les escaliers utilisés dans ce bâtiment sont des escaliers droits avec deux volées et paliers inter étage.

IV.3.4 Caractéristiques des matériaux :

- Béton léger :
 - Densité du béton léger autour de 1500 Kg /m³.
 - Le ciment utilisé sera de classe CPA325, le dosage est de 380Kg/m³.
 - La résistance caractéristique du béton à la compression à 28jours sera de 25 MPa,
- Armatures :

Les aciers utilisés sont les suivants :

- Aciers haute adhérence FeE400 pour les armatures des semelles, des escaliers et des voiles.
- Des armatures longitudinales des poteaux et des poutres.
- Treillis soudés Φ 5mm, 150X150 pour les dallages et dalles de compression.
- Sol :

Le taux de travail retenu est pris tels que : $\sigma_{sol} = 0,2 \text{ MPA}$

IV.3.5 Prédimensionnement

Cette étape représente le point de départ et la base de la justification à la résistance, la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

Pour ce faire, nous commençons le prédimensionnement du sommet vers la base :

- Les planchers.
- Les poutres.
- Les poteaux.
- Les voiles

IV.3.5.1 Le plancher :

L'épaisseur des planchers est déduite à partir des conditions suivantes :

IV.3.5.1.1 Conditions :

- Conditions de résistance au feu :
 - $e=7 \text{ cm}$ pour une heure de coupe-feu.
 - $e=11 \text{ cm}$ pour deux heures de coupe-feu.
 - $e=17,5 \text{ cm}$ pour quatre heures de coupe-feu.

➤ Isolation phonique :

Selon les règles CBA93, l'épaisseur du plancher doit être supérieure ou égale à 13cm, pour obtenir une bonne isolation acoustique

Le plancher choisis est un plancher corp-cœur d'hourdis de 16 cm + 4 cm de dalle de compression

IV.3.5.1.2 Évaluation des charges et surcharges :

Plancher étage courant :

Tableau IV.3 : Les différentes couches du plancher d'étage courant et leurs poids

Couches	Epaisseur (cm)	G (KN/m ²)
Carrelage	2	0.5
Mortier de pose	2	0.4
Lit de sable	3	0.36
Cloison répartie	5	1
Plancher (corps creux 16+4)	16+4	1.65
Enduit ciment sous plafond	3	0.54
Charge permanente	/	4.45

Plancher terrasse inaccessible :

Tableau IV.4 : Les différentes couches du plancher d'étage courant et leurs poids

Couches	Epaisseur (cm)	G (KN/m ²)
Protection lourde en gravillon	5	0.85
Etanchéité multicouche	2	0.12
Plaque de liège	4	0.16
Forme de pente	10	2.2
Plancher (corps creux 16+4)	16+4	1.65
Enduit ciment sous plafond	3cm	0.54
Charge permanente	/	5.52

Les surcharges d'exploitation sont données par le tableau :

Tableau IV.5 : surcharges d'exploitation

Zone	Charge d'exploitation Q (KN/m ²)
Niveau courant	1.5
Niveau terrasse	1
Escalier	2.5
Locaux commerciaux	2.5

IV.3.5.2 Prédimensionnement des poutres :

- b : largeur de la base de la poutre.
- h : hauteur totale de la poutre.

Le prédimensionnement des poutres est donné par les formules empiriques suivantes :

- $\frac{\text{portée}}{15} \leq h \leq \frac{\text{portée}}{10}$
- $\frac{h}{b} \leq 4$
- $h \geq 30\text{cm}$
- $b \geq 20\text{cm}$
- $0.3h \leq b \leq 0.7h$

Puisqu'on a des portées identiques, nous prendrons les mêmes dimensions pour les poutres primaires que secondaires telles que :

Tableau IV.6 : Dimensions des poutres

/	Dimensions en cm (b, h)
Poutre primaire de sens X-X	(30,40)
Poutre secondaire de sens Y-Y	(30 40)

IV.3.5.3 Prédimensionnement des poteaux :

Les poteaux sont des éléments structuraux chargés de transmettre les charges verticales aux fondations et du contreventement total ou partiel du bâtiment.

Le prédimensionnement des poteaux se fait par la vérification à la résistance d'une section choisie intuitivement avec une section d'armatures de 0,1% de la section de béton sous l'action de l'effort normal maximal (le poteau le plus chargé), déterminé par la descente de charges.

L'effort normal maximal obtenu par la descente des charges obtenu par ROBOT doit vérifier l'inégalité suivante :

$$Nu \leq N_u^- = \alpha \left[\frac{br \times fc_{28}}{0.9\gamma_b} + \frac{As \times fe}{\gamma_s} \right]$$

- Nu: Effort normal maximal à l'ELU
- Br: Section réduite du poteau calculée à partir des dimensions réelles du poteau réduites de 2cm.
- $\gamma_s=1,15$ coefficient de sécurité de l'acier.
- $\gamma_b=1,5$ coefficient de sécurité du béton.
- F_{c28} et F_e résistances caractéristiques du béton et de l'acier respectivement.
- As section d'armatures dans le poteau prise à 0,1% de la section réelle du poteau.
- α coefficient fonction de l'élancement du poteau :

$$\lambda_1 = \frac{0.7L\sqrt{12}}{b} = \frac{0.7 \times 4.08 \times \sqrt{12}}{0.3} = 33 \leq 35$$

$$\alpha = \frac{0.85}{1 + 0.2 \left(\frac{\lambda_1}{35} \right)} = 0.715$$

L'effort normal maximal sous le poteau le plus chargé est tiré de ROBOT :

$$Nu = 455.55 \text{ Kn}$$

$$455.5 = Nu \leq 0.715 \left[\frac{0.28^2 \times 25}{0.9 \times 1.5} + \frac{0.3^2 \times 400}{1000 \times 1.15} \right] = 1060 \text{ Kn}$$

Donc la section du poteau choisie est de (30cmx30cm)

IV.3.5.4 Escalier:

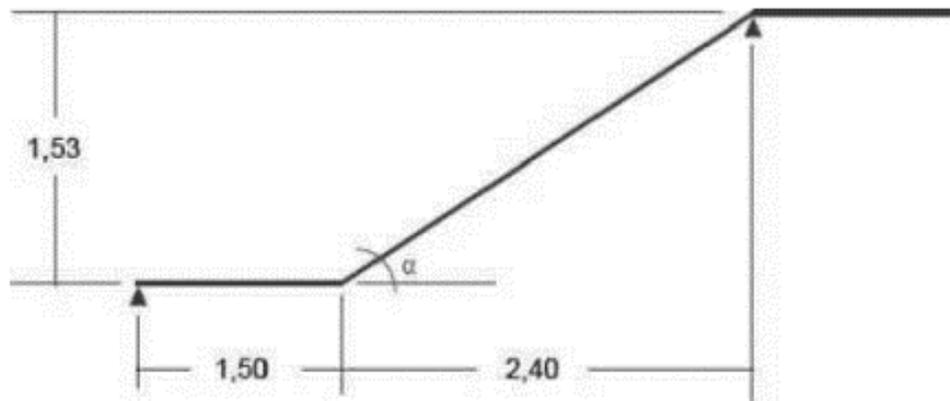


Figure IV.4 : escalier

On adoptera une épaisseur $e=15\text{cm}$. Cette épaisseur sera adoptée pour tous les paliers.

IV.3.5.4.1 Evaluation des charges :

Les charges des différents éléments constituant la paillasse et le palier sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.6 : Evaluation des charges

Elément	Palier	Paillasse
G (KN/m ²)	3.32	5.84
Q (KN/m ²)	2.5	2.5

IV.3.5.5 Dimensionnement des voiles :

D'après le RPA99 version 2003, les voiles doivent vérifier les conditions suivantes :

- $e \geq 15\text{cm}$
- $l \geq 4e$, Avec $l=130\text{ cm}$ (dimensions du voile)

On prendra $e = 15\text{cm}$

IV.3.6 Etude dynamique de la structure en béton léger

IV.3.6.1 Introduction :

En plus d'être soumise à des charges verticales, une structure est confrontée aussi à des charges horizontales telles que les forces sismiques pouvant compromettre la stabilité de la structure. Les secousses sismiques étant sans doute celles qui ont le plus d'effets destructeurs dans les zones urbanisées.

Une analyse dynamique est donc primordiale pour la détermination des caractéristiques dynamiques propres de la structure lors de ses vibrations.

Une telle étude pour notre structure telle qu'elle se présente, est souvent très complexe c'est pourquoi on fait souvent appel à des modélisations qui permettent de simplifier suffisamment les problèmes pour permettre l'analyse.

IV.3.6.2 Modélisations :

Pour modéliser la structure en trois dimensions, nous allons utiliser le logiciel ROBOT.

Le modèle adopté comporte quatre niveaux avec un encastrement à la base. Le modèle ne comporte que les éléments porteurs (poutres, poteaux et voiles) et les planchers, le reste des éléments est introduit comme surcharge.

Les planchers utilisés sont déclarés diaphragmes rigides pour des planchers rigides

La structure est considérée régulière en plan comportant des planchers rigides. L'analyse est faite séparément dans chacune des deux directions principales du bâtiment.

Celui-ci est alors représenté dans chacune des deux directions de calcul par un modèle plan, encasté à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers avec un seul DDL en translation horizontale.

IV.3.6.3 Disposition des voiles :

➤ Vérifications des déplacements inter-étages de la structure sans voile :

Les déplacements latéraux d'un étage par rapport à l'étage qui s'en suit ne doit pas dépasser les 1% de la hauteur de l'étage.

Les résultats obtenus grâce au logiciel ROBOT sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : déplacement inter-étage sans voiles

/	Déplacement limite (cm)	dr UY [cm]	dr UX [cm]
Etage 1	4.08	4,8 (non vérifié)	5,6 (non vérifié)
Etage 2	3.06	2,2	2,2
Etage 3	3.06	1,6	1,5
Etage 4	3.06	1,9	1,3

Interprétations :

On conclue donc que la structure a besoins de mur pour la rigidification de la structure Afin de ne pas soumettre la structure à une torsion d'axe vertical, les différents codes parasismiques préconisent la répartition symétrique des éléments de contreventement par rapport au centre de gravité du niveau.

Par conséquent nous allons opter pour des dispositions de voiles symétriques de telle façon à avoir un comportement dynamique dominé par des oscillations de translations pures suivants les deux directions principales de la structure.

Et leur disposition se fera de façon à rapprocher au maximum le centre de torsion du centre de gravité et d'une façon symétrique.

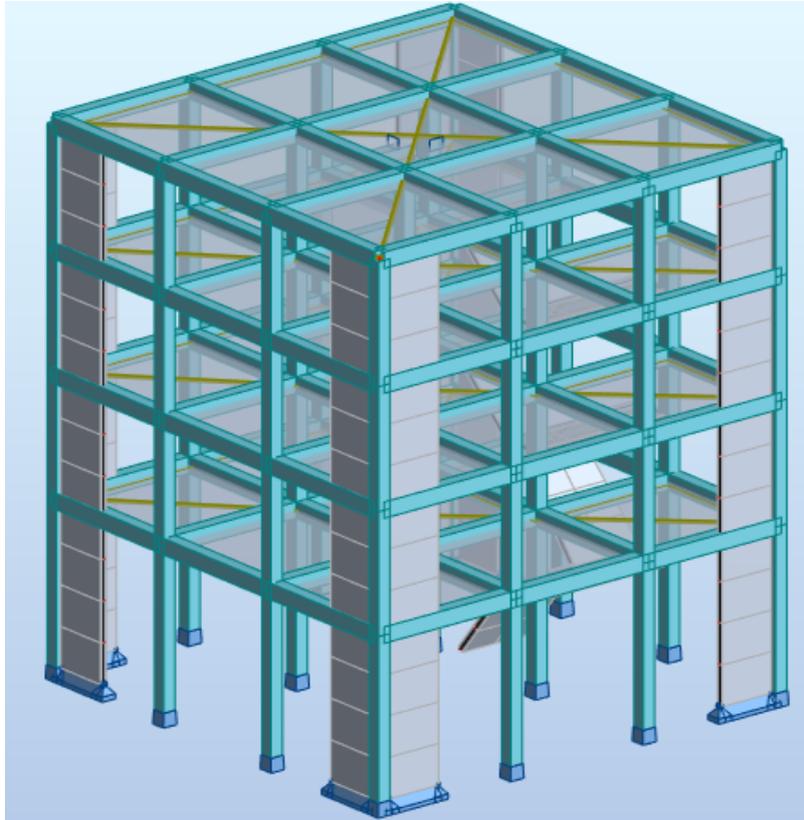


Figure IV.5 Modèle en 3D.

IV.3.6.4 Actions sismiques :

IV.3.6.4.1 Choix de la méthode de calcul :

Les règles parasismiques algériennes (RPA99/version2003) proposent trois méthodes de calcul des sollicitations, qui sont :

- La méthode statique équivalente.
- La méthode d'analyse modale spectrale.
- La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes

La méthode de calcul utilisée pour cette étude est la méthode d'analyse modale spectrale. Pour la vérification, nous utiliserons la méthode statique équivalente.

IV.3.6.4.2 Méthode de l'analyse modale spectrale :

IV.3.6.4.2.1 Définition :

La méthode de calcul dite « modale spectrale » permet d'accéder, pour chaque mode aux efforts maximaux requis pour le dimensionnement des systèmes

Dans la pratique, l'analyse spectrale est la méthode la plus utilisée pour le calcul au séisme.

La simplicité de la définition du chargement (spectre de réponse de conception) qui représente une enveloppe des spectres de réponse des accélérogrammes typiques d'une région, a rendu cette méthode très appréciée par les projeteurs.

Il s'agit, en effet, de rechercher pour chaque mode de vibration le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques.

Ces derniers sont représentés par un spectre de réponse de calcul.

Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

IV.3.6.4.2.2 Modes à considérer :

Le nombre de modes de vibration à considérer doit être tel que

- Les masses cumulées modales effectives pour les modes retenus soient au moins égales à 90% de la masse totale de la structure.
- Le minimum de modes à retenir est de trois.

Dans le cas où les conditions citées ci-dessus ne sont pas observées, le nombre de modes à considérer est donné par l'inégalité suivante :

$$K \geq 3 \times \sqrt{N} \quad T_k \leq 0.2 \text{ s}$$

N : Nombre de niveaux au-dessus du sol

T_k : Période du mode K. A partir de ces conditions, on en conclut que le nombre de modes à prendre en compte doit être égal à cinq.

IV.3.6.4.2.3 Les caractéristiques de l'ouvrage :

- Zone III : sismicité élevée.
- Groupe 2 : ouvrages courants et d'importance moyenne.
- Site S3 : $T_1 = 0,15 \text{ s}$ et $T_2 = 0,5 \text{ s}$.
- Système de contreventement : $R=5$ (structure à contreventement mixte avec interaction).
- Coefficient d'accélération de la zone $A=0,25$.
- Facteur de qualité $Q=1,2$.

IV.3.6.4.2.4 Spectre de réponse de calcul :

Le calcul des forces sismiques de notre bâtiment a été mené suivant la méthode d'analyse modale spectrale.

Le principe est de rechercher pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul.

Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure. Le RPA99 version 2003 (Art 4-3-3) recommande le spectre de réponse de calcul donné par la fonction suivante :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A(1 + \frac{T}{T_1}(2.5\eta\frac{Q}{R} - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)(\frac{Q}{R}) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)(\frac{Q}{R})(\frac{T_2}{T})^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A)(\frac{T_2}{3})^{2/3}(\frac{3}{T})^{5/3}(\frac{Q}{R}) & T > 3.0s \end{cases}$$

Avec : T1, T2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site (RPA tableau 4.7)

➤ T1=0.15 s

➤ T2=0.5 s

η : Facteur de correction d'amortissement donné par la formule :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \epsilon}} = 0.76 \geq 0.7$$

ξ (%) : Pourcentage d'amortissement critique égal pour les structures mixtes en béton armé à 10% (RPA tableau 4-2).

Tableau IV.8 : Résultats du spectre de réponse

T(s)	Sa/g	T(s)	Sa/g	T(s)	Sa/g
0	313	1,2	0,080	3,2	0,038
0,1	0,2	1,4	0,419	3,4	0,034
0,2	0,143	1,6	0,264	3,6	0,031
0,3	0,143	1,8	0,201	3,8	0,028
0,4	0,143	2	0,166	4	0,026
0,5	0,143	2,2	0,143	4,2	0,024
0,6	0,127	2,4	0,127	4,4	0,022
0,7	0,114	2,6	0,114	4,6	0,021
0,8	0,105	2,8	0,105	4,8	0,019
0,9	0,097	3	0,097	5	0,018

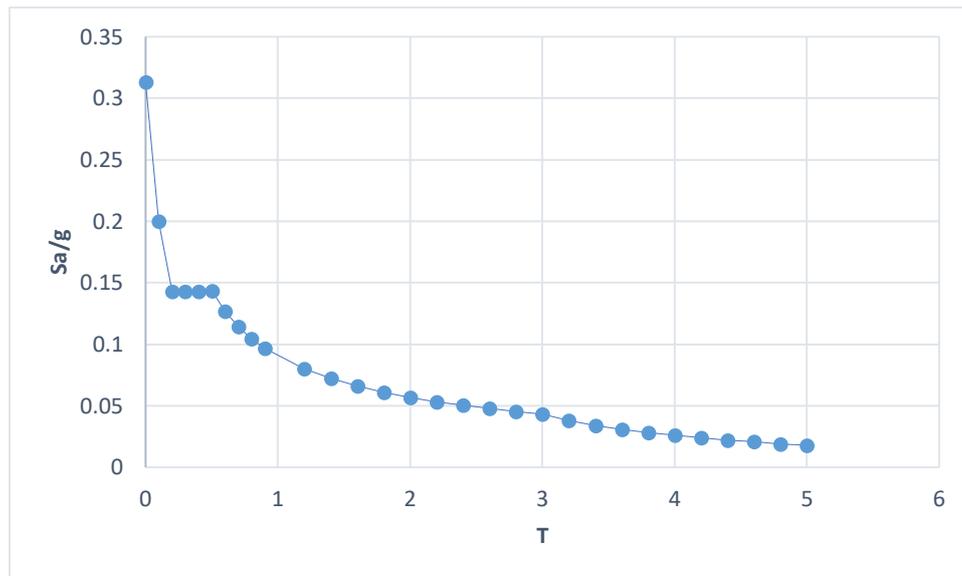


Figure IV.6 : Spectre de réponse de calcul

IV.3.6.4.2.5 Participation massique

Le coefficient de participation massique correspond au $i^{\text{ème}}$ mode de vibration, représente le pourcentage d'énergie sismique absorbé à ce mode par le bâtiment. La somme de ces coefficients représente la quantité d'énergie totale absorbée par le bâtiment.

Tableau IV.9 : Analyse modale de la structure

Mode	Période [sec]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
1	0,45	0,23	82,34	0,23	82,34
2	0,45	83,03	0,22	83,25	82,56
3	0,31	0,01	0,6	83,26	83,16
4	0,14	1,32	11,36	84,59	94,52
5	0,14	11,34	1,34	95,93	95,86
6	0,09	0	0	95,93	95,86
7	0,08	0,02	0	95,94	95,86
8	0,07	0	0	95,94	95,86
9	0,07	0	0,12	95,95	95,99
10	0,06	0	2,15	95,95	98,14

IV.3.6.4.2.6 Interprétation des résultats :

- Le modèle choisi présente une période fondamentale T égale à 0,4 s,
- Le premier mode est un mode de translation suivant (y-y)

- Le deuxième mode est un mode de translation suivant (x-x).
- Le troisième mode est un mode de torsion.

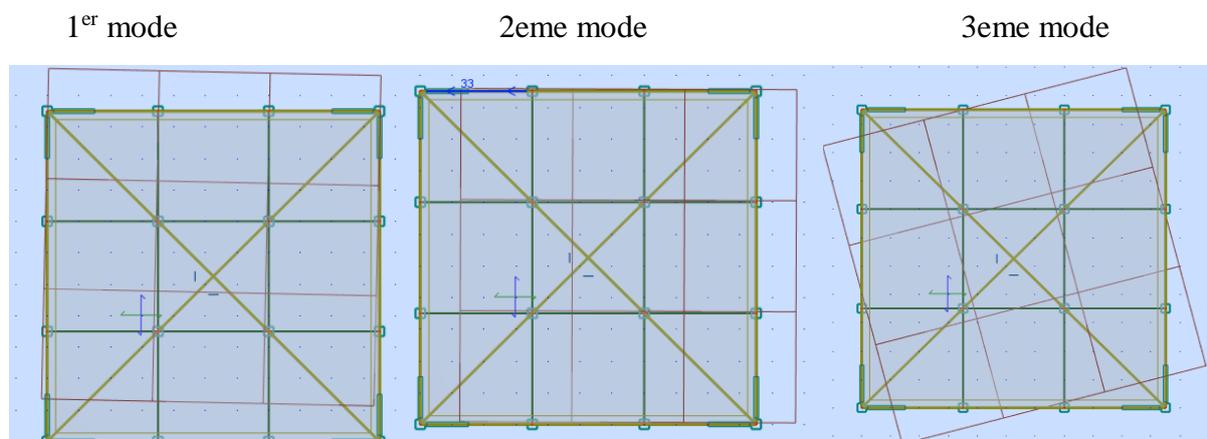


Figure IV.7 : Directions de déformation selon les modes

- les facteurs de participation massique ont atteint les 90% à partir du cinquième mode de vibration.

IV.3.6.4.3 Vérification de la période fondamentale de la structure :

Selon l'art (4.2.4) du RPA99/v200,3 les valeurs de T calculé à partir des formules de Rayleigh ou de méthodes numériques ne dépassent pas celles estimées à partir des formules empiriques appropriées T_e de plus de 30%.

$$T_e = C_t \times H_n^{3/4}$$

H_n = hauteur totale de la structure.

C_t = coefficient, fonction du type de contreventement [Tab4.6 RPA99/2003] (= 0.05).

$$T_e = 0.347 \text{ s}$$

$$0.45 = T \geq 1.3 T_e = 0.4511$$

Condition vérifiée

IV.3.6.4.4 Vérification de l'effort sismique à la base :

L'effort sismique obtenu par combinaison des valeurs modales doit être supérieur à 80% de l'effort calculé par la méthode statique équivalente. Autrement dit, il faut vérifier l'inégalité suivante :

$$V_m \geq 0.8 V_s$$

Avec

- V_m est L'effort sismique obtenu par combinaison des valeurs modales
- V_s es l'effort calculé par la méthode statique équivalente

Calcul de V_s :

$$V_s = \frac{ADQ}{R} W$$

A : coefficient d'accélérations de zone (zone III groupe d'usage 2), $A=0,25$.

D : facteur d'amplification dynamique moyen, fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T).

Catégorie du site S_3 implique que : $T_1=0.15$ s, $T_2=0.5$ s

On a $T=0.47$ donc $T_1 \leq T \leq T_2$ donc :

$$D = 2.5\eta = 2.5 \sqrt{\frac{7}{2 + \epsilon}} = 1.9$$

Q : facteur de qualité, $Q=1,2$.

R : coefficient de comportement (structure a contreventement mixte avec interaction) $R=5$.

W : poids du bâtiment = 3892 KN

V_m : Effort tranchant à la base du bâtiment déterminé par la méthode modale spectrale à l'aide de " Autodesk Robot ".

$$V_s = \frac{0.25 \times 1.9 \times 1.2}{5} \times 3892 = 443.7 \text{ Kn}$$

$$0.8V_s = 354.96 \text{ KN} \leq V_m = 459.67 \text{ KN}$$

Condition vérifiée

IV.3.6.4.5 Vérifications des déplacements inter-étages :

Les déplacements latéraux d'un étage par rapport à l'étage qui s'en suit ne doit pas dépasser les 1% de la hauteur de l'étage :

Les résultats obtenus grâce au logiciel ROBOT sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : déplacements inter-étage

/	Déplacement limite (cm)	dr UX [cm]	dr UY [cm]
Etage 1	4.08	1,5	1,4
Etage 2	3.06	1,3	1,3
Etage 3	3.06	1,3	1,3
Etage 4	3.06	1,2	1,2

IV.3.6.5 Conclusion :

Cette étude nous a permis de vérifier que la conception de notre bâtiment était tout à fait correcte, compte tenu de la plupart des exigences spécifiées par le code sismique parasismique algérien (RPA99/2003), telles que les efforts tranchants, les déplacements,

De même que la méthode modale spectrale permet de comprendre le comportement de la structure et de déterminer les efforts subis par chaque élément.

La structure est stable, c'est ainsi que nous allons passer au ferrailage des éléments de la structure.

IV.3.7 Ferrailage des éléments structuraux

IV.3.7.1 Ferrailage des poteaux

IV.3.7.1.1 Recommandations du RPA 99 version 2003 :

Les poteaux sont calculés en flexion composée déviée dans les deux sens, en tenant compte des combinaisons :

- ELU : $1,35G+1,5Q$
- ELS : $G+Q$
- Accidentelle : $G+Q+E$, $G+Q-E$
- Accidentelle : $0.8G+E$, $0.8G-E$

Les armatures longitudinales :

- Les armatures longitudinales doivent être à haute adhérence, droites et sans crochet.
- Le pourcentage minimal sera de : 0,90 % de la section du poteau (Zone III)
- Poteau (30x30) : $As_{min} = 0,009 \times 30 \times 30 = 8.1 \text{ cm}^2$.

Le pourcentage maximal en zone courante sera de :

4 % (Zone III) Poteau (30x30) : $As_{max} = 0.04 \times 30 \times 30 = 36 \text{ cm}^2$.

IV.3.7.1.2 Stratégie à adopter pour le ferrailage :

Le ferrailage de l'élément poteau de la structure se fait par rapport au poteau subissant le plus d'efforts pour pouvoir ferrailer en prenant compte le cas le plus défavorable. Pour le déterminer ROBOT nous permet de voir toutes les sollicitations que subissent les poteaux pour différentes combinaisons de charge.

La combinaison de charge la plus défavorable est donnée comme suit :

Tableau IV.11 : Combinaison de charge la plus défavorable

Combinaison	N	MY	Mz
ELU	552.2	8.28	-8.28
ACC	-71.34	2.19	9.18

Pour ce type de combinaison et en utilisant ROBOT Expert, on trouve que :

$As=0.9 \text{ cm}^2$, mais avec la limitation que prend en compte le RPA pour la section minimale, la section d'armature devient :

$As=8.1 \text{ cm}^2$. Voici un tableau récapitulatif du ferrailage de l'élément poteau :

Tableau IV.12 : choix des armatures

Elément	Section (cm ²)	Combinaison de calcul	N	MY	Mz	As	Asmin	Choix des armatures
Poteau	30x30	G+Q+Ex	552.2	8.28	8.28	4.5	8.1	6HA14
		1,35G+1,5Q	71.34	2.19	9.18			

➤ Armatures transversales

Les armatures transversales sont disposées de manière à empêcher tout mouvement des aciers longitudinaux vers les parois du poteau.

Le ferrailage obtenu est donné dans le tableau :

Tableau IV.13 : Armatures transversales

Poteau (cm ²)	Vu (KN)	Armatures transversales	Armature adopté
30x30	21.69	0.4	2T8

IV.3.7.2 Ferrailage de la poutre :

IV.3.7.2.1 Sollicitation de calcul :

La poutre est supposée soumise à la flexion simple. Les sollicitations de calcul ont été déduites du logiciel ROBOT.

Tableau IV.14 : Sollicitations de calcul

En Appuis		En travée	
$M_{Elu}(Kn. m)$	$M_{Els}(Kn. m)$	$M_{Elu}(Kn. m)$	$M_{Els}(Kn. m)$
-24.47	-17.74	22.81	16.5

$A_{calculé}$ est obtenu en injectant les moments maximaux en travée et en appuis à l'ELS et à l'ELU dans ROBOT Expert.

- Les exigences de la réglementation :

$$BAEL\ 91 : A_{min} = 0.23 \times \frac{F_{t28}}{F_e} \times b \times h = 0.23 \times \frac{2.09}{400} \times 0.4 \times 0.3 = 1.44\text{cm}^2$$

$$f_{t28} = \eta_1 \times 0.3 f_c^{0.67} = \left(0.4 + \frac{0.6 \times 1500}{2200}\right) \times 0.3 \times 25^{0.67} = 2.09$$

Avec :

$$\eta_1 = 0,4 + \frac{0,6\rho}{2200}$$

$$\text{RPA : } A_{min} = 0.5\% bh = \frac{0.5}{100} \times 0.4 \times 0.3 = 6 \text{ cm}^2$$

Tableau IV.15 : choix des armatures pour la poutre

	A _{min}		A _{calculé}		A _{max}		Choix des armatures	
	BAEL	RPA	A _t	A'	A _t	A'	A _{tendue}	A'
En appuis	1.44	6	A _t	A'	A _t	A'	A _{tendue}	A'
			1.6	0	6	0	2 x3HA16	0
En travée	1.44	6	A _t	A'	A _t	A'	A _{tendue}	A'
			1.5	0	6	0	2x3HA16	0

IV.3.8 Calcul des fondations :

IV.3.8.1 Introduction :

La fondation d'une construction est constituée par les parties de l'ouvrage qui sont en contact avec le sol auquel elles transmettent les charges de la superstructure et assurent sa stabilité. Elle doit donc constituer un ensemble rigide capable de remplir les fonctions suivantes :

- Réaliser l'encastrement de la structure dans le terrain.
- Jouer un rôle d'appuis.
- Assurer la liaison avec le sol et répartir les efforts.

Il existe plusieurs types de fondations, dont les plus importantes sont :

Fondation superficielle :

- Semelle isolée.
- Semelle filante.
- Radier général.

Fondation profonde :

- Puit. , Pieu.

Le choix du type de fondation dépend des paramètres suivants :

- Type d'ouvrage à construire.
- Nature et homogénéité du sol.

- Raison économique.
- Facilité de réalisation et importance de charge dans le projet

Compte tenu des conditions de choix citées plus haut, nous avons opté pour le type de fondation semelles (sous poteaux et sous voiles)

IV.3.8.2 Calcul des fondations :

Pour répondre aux exigences imposées par la sécurité et l'économie tout en respectant les caractéristiques de l'ouvrage, il faut respecter la condition suivante :

$$\sigma = \frac{N}{S} \leq \bar{\sigma}_{sol}$$

Avec

$\bar{\sigma}_{sol}$: taux de travail (contrainte admissible) du sol.

N : effort normal appliqué sur la fondation.

S : surface de la fondation.

IV.3.8.2.1 Semelles sous voile :

L'effort normal supporté par une semelle filante est égal à la somme des efforts normaux revenant à chaque voile et poteaux se trouvant sur une même file.

Cet effort est obtenu en s'aidant du logiciel ROBOT.

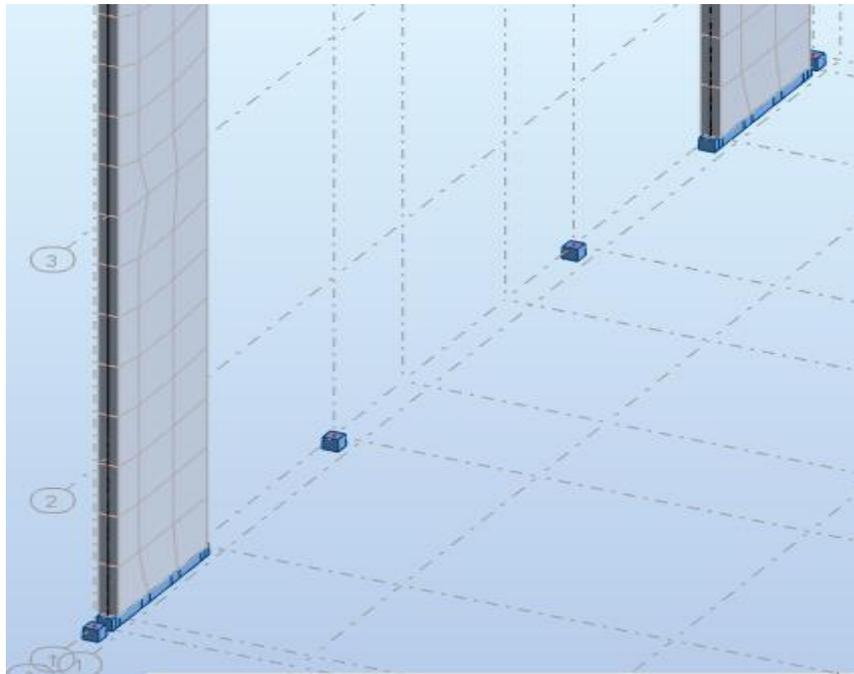


Figure IV.8 : Voile et poteau se trouvant sur la file de la semelle filante

Il faut vérifier que l'inégalité suivante est satisfaite :

$$\sigma = \frac{N}{S} = \frac{\sum p_i}{B \times A} \leq \bar{\sigma}_{sol}$$

P_i = Effort sous voiles ou poteau

A = largeur de la semelle

Le bâtiment étudié est fondé sur un sol possédant un taux de travail égal à 0.2 MPa.
L'inégalité précédente :

$$A \geq \frac{\sum p_i}{B \times \bar{\sigma}_{sol}} = \frac{1195.67}{0.2 \times 10^3 \times 10.5} = 0,57 \text{ m}$$

$$A \geq 0.57 \text{ m}$$

$$A = 0.8 \text{ m}$$

La hauteur H de la semelle est fixée en respectant la condition suivante :

$$H \geq \frac{A - a}{4} + 5 \text{ cm} \gg H = 25 \text{ cm}$$

Où : a = épaisseur du voile. A = longueur de la semelle. H = hauteur de la semelle.

Ferraillage de la semelle filante :

Les sollicitations des semelles figurent dans le tableau :

/	$M_{\max}(\text{kN.m})$	$M_{\min}(\text{kN.m})$
Semelle	158.03	-52,4

La section est obtenue à partir du moment : $M_{\max} = 158.03 \text{ kN.m}$

Robot Expert nous donne une armature pour :

- $As_{inf} = 24.2 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \times 6 \text{ HA16}$
- $As_{sup} = 7 \text{ cm}^2 \rightarrow 5 \times \text{HA14}$

IV.3.8.2.2 Semelle isolée sous poteau :

On adoptera une semelle homothétique, c'est-à-dire le rapport de A sur B est égal au rapport a sur b : (on a des poteaux carrés).

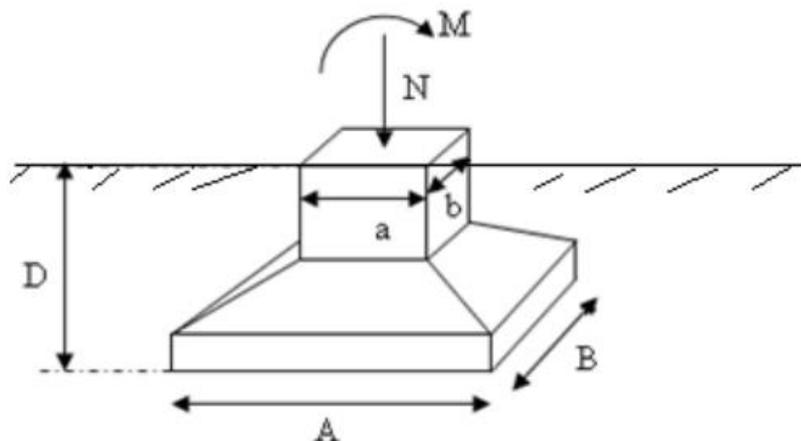


Figure IV.9 : Semelle isolée

Pour le prédimensionnement, il faut considérer uniquement l'effort normal N qui est obtenu à la base du poteau le plus sollicité du RDC.

IV.3.8.2.2.1 Homothétie des dimensions :

Poteau carré → Semelle carrée (homothétique) → $A' = b' \times b'$

➤ Dimensions de la semelle à l'état limite ultime :

Suivant le respect de la relation ci-dessous :

$$\sigma_{sol} = \frac{Q_u}{b'^2}$$

L'effort normal à l'ELU à la base du poteau le plus sollicité du RDC a été calculé à l'aide de Robot.

$$Q_u = 455.5 \text{ KN}$$

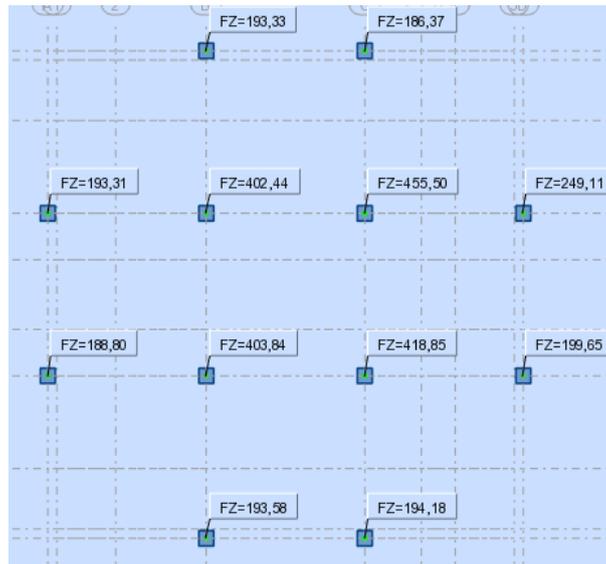


Figure IV.10 : Effort normal sur poteau

Donc La relation devient :

$$b' \geq \sqrt{\frac{Q_u}{\sigma_5}} \rightarrow b' \geq 1.5 \rightarrow b' = 1.8m$$

Sa hauteur utile vaut :

$$150 = b' - b \geq d \geq \frac{b' - b}{4} = \frac{180 - 30}{4} \geq 37.5cm \rightarrow d = 60 \text{ cm}$$

IV.3.8.2.2.2 Poids propre de la semelle :

$$P_{semelle} = 0.6 \times 1.8^2 \times 18.1 = 35.19 \text{ KN}$$

Q_u devient alors comme suit :

$$Q_u = 455.5 + 1.35 \times 35.19 = 503.01 \text{ KN}$$

$$b' \geq \sqrt{\frac{Q_u}{\sigma_5}} \rightarrow b' \geq 1.58 \text{ m}$$

Donc, $b' = 1.8 \text{ m}$

IV.3.8.2.2.3 Ferrailage de la semelle :

L'enrobage $c = 4 \text{ cm}$; donc $d' = 56 \text{ cm}$.

- Armatures principales :

$$A_s = \frac{Q_u(b' - b)}{8d'\sigma_{st}} = \frac{503.01 \times (1.8 - 0.4) \times 10^{-3}}{8 \times 0.56 \times 348} = 4.6 \text{ cm}^2$$

- Longueur de scellement et diamètre requis

Pour les résistances données ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$, f_{eE400}), la longueur de scellement est calculée par interpolation telle que :

$$\text{Armature sans crochet : } l_s = 35.3\varnothing \leq \frac{b'}{4} \rightarrow \varnothing \leq 12.7 \text{ mm}$$

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

La solution est donc de choisir $\varnothing 12 = 1.13 \text{ cm}^2$

Le nombre de barres nécessaires est : $N = \frac{4.6}{1.13} = 4.07 = 5 \text{ barres de } \varnothing 12$ espacées sur 180 cm de 36 cm.

Hauteur de rive $e \geq \max(15 \text{ cm} ; 12\varnothing + 6 \text{ cm}) = 20.4 \text{ cm} \rightarrow e = 25 \text{ cm}$

- Armatures de répartition :

$$A_R = A_s \times \frac{b'}{4} = 4.6 \times \frac{1.8}{4} = 2.07 \text{ cm}^2$$

IV.4 Comparaison des résultats avec un bâtiment R+3 en béton ordinaire :

IV.4.1 Caractéristiques des matériaux :

- Béton ordinaire :

Densité du béton choisis est de 2500 Kg / m^3

Le ciment utilisé sera de classe CPA325, le dosage est de 380 Kg/m^3

La résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours sera de 25 MPa ,

- Armatures et sol : on utilisera les mêmes caractéristiques que pour la structure en béton léger

IV.4.2 Prédimensionnement du bâtiment R+3 en béton ordinaire :

IV.4.2.1 Prédimensionnement des poutres, poteaux, plancher :

Pour le prédimensionnement des éléments structuraux, on prendra les mêmes dimensions choisis pour les poutres et le plancher dans le cas de la structure de béton léger, tandis que pour le poteau une vérification s'impose :

- Vérification de la résistance de la section armée avec 0,1% de la section du béton :

L'effort normal maximal obtenu par la descente des charges doit vérifier l'inégalité suivante :

$$N_u \leq N_u^- = \alpha \left[\frac{br \times f_{c28}}{0.9\gamma_b} + \frac{As \times f_e}{\gamma_s} \right]$$

L'effort normal obtenu sous le poteau le plus chargé est tiré de ROBOT

$$Nu = 911.84 \text{ Kn}$$

$$911.84 = Nu \leq 0.715 \left[\frac{0.28^2 \times 25}{0.9 \times 1.5} + \frac{0.3^2 \times 400}{1000 \times 1.15} \right] = 1060 \text{ Kn}$$

Condition vérifiée donc la section du poteau est de 30x30

IV.4.2.2 Dimensionnement des fondations :

IV.4.2.2.1 Semelle isolée :

Le dimensionnement se fera en respectant la condition suivante :

$$\sigma_{sol} = \frac{Q_u}{b'^2}$$

L'effort normal à l'ELU à la base du poteau le plus sollicité du RDC

$$QU = 911.84 \text{ kn}$$

Donc on aura :

$$b' \geq \sqrt{\frac{Q_u}{\sigma_5}} \rightarrow b' \geq 2.14 \rightarrow b' = 2.5 \text{ m}$$

➤ Sa hauteur utile vaut :

$$220 = b' - b \geq d \geq \frac{b' - b}{4} = \frac{220 - 30}{4} \geq 47.5 \text{ cm} \rightarrow d = 60 \text{ cm}$$

➤ Vérification avec le poids de la semelle :

$$P_{semelle} = 0.6 \times 2.5^2 \times 25 = 93.75 \text{ KN}$$

$$Q_u = 911.84 + 93.75 = 1005.6 \text{ KN}$$

$$b' \geq \sqrt{\frac{Q_u}{\sigma_5}} \rightarrow b' \geq 2.24 \text{ m}$$

Donc $b' = 2.5 \text{ m}$

➤ Longueur de scellement et choix de \emptyset :

Pour les résistances données ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$, f_{eE400}), la longueur de scellement est calculée par interpolation telle que :

$$\text{Armature sans crochet : } l_s = 35.3\emptyset \leq \frac{b'}{4} \rightarrow \emptyset \leq 17.7 \text{ mm}$$

$$\emptyset = 16 \text{ mm}$$

➤ Hauteur de rive :

$$e \geq \max(15 \text{ cm}; 12\emptyset + 6 \text{ cm}) = 25.2 \text{ cm} \rightarrow e = 30 \text{ cm}$$

IV.4.2.2 Semelle filante :

- Condition de résistance :

$$\sigma = \frac{N}{s} = \frac{\sum p_i}{B \times A} \leq \bar{\sigma}_{sol}$$

$$A \geq \frac{\sum p_i}{B \times \bar{\sigma}_{sol}} = \frac{177.47}{0.2 \times 10^3 \times 10.5} \geq 0.85 \text{ m}$$

En prendra A=1.2 m

- La hauteur H de la semelle est fixée en respectant la condition suivante :

$$H \geq \frac{A - a}{4} + 5 \text{ cm} \rightarrow H = 30 \text{ cm}$$

IV.4.3 Comparaison de l'analyse dynamique des 2 structures :

Tableau IV.16 : comparaison de l'analyse dynamique des 2 structures

/	Structure en béton ordinaire	Structure en béton léger
Disposition des voiles	Disposition en forme de L	Disposition en forme de L
Modes à considérer	5	6
Période fondamentale T	0.45	0.39
1 ^{er} mode	Translation suivant y-y	Translation suivant y-y
2 ^{eme} mode	Translation suivant x-x	Translation suivant x-x
3 ^{eme} mode	Torsion	Torsion
Vérification de T	$0.45 = T \leq 1.3T_e = 0.4511$	$0.39 = T \leq 1.3T_e = 0.4511$
W (KN)	3892	5564.67
V _s (KN)	443.7	634.4
V _m (KN)	459.67	850.23
Vérification de l'effort sismique	$0.8V_s = 354.96 \leq V_m$	$0.8V_s = 407.52 \leq V_m$
Vérification du déplacement inter étages	Vérifié	Vérifié

IV.4.4 Comparaison du ferrailage des éléments structuraux des deux structures :

IV.4.4.1 Ferrailage des éléments structuraux de la structure en béton ordinaire :

IV.4.4.1.1 Ferrailage de la poutre :

- Sollicitations de calcul :

Tableau IV.17 : sollicitations de calcul déduites du logiciel ROBOT

En Appuis		En travée	
$M_{Elu}(Kn.m)$	$M_{Els}(Kn.m)$	$M_{Elu}(Kn.m)$	$M_{Els}(Kn.m)$
-71.14	-51.39	77.91	56.21

- Ferrailage :

Tableau IV.18 : choix du ferrailage

	A_{min}		$A_{calculé}$		A_{max}		Choix des armatures	
	BAEL	RPA	A_t	A'	A_t	A'	A_{tendue}	A'
En appuis	1.44	6	A_t	A'	A_t	A'	A_{tendue}	A'
			6.1	0	6.1	0	2x3HA16	0
En travée	1.44	6	A_t	A'	A_t	A'	A_{tendue}	A'
			6.7	0	6.7	0	2x4HA16	0

IV.4.4.1.2 Ferrailage des poteaux :

- Sollicitations de calcul :

Le poteau est supposé travailler en flexion composée déviée.

Tableau IV.19 : Sollicitations de calculs sur les poteaux

Combinaison	N	MY	Mz
ELU	738.84	-25.22	-69.22
ACC	-652.37	-8.680	58.43

➤ Ferrailage :

Tableau IV.20 : Ferrailage des poteaux

Élément	Section (cm ²)	Combinaison de calcul	N (KN)	MY	Mz	As	Asmin	Choix des armatures
Poteau	30x30	ACC	738.84	25.22	69.22	14	8.1	7HA16
		ELU	473.99	8.680	58.43			

IV.4.4.1.3 Ferrailage des fondations :

➤ Semelle isolée :

- Armatures principales :

$$A_s = \frac{Q_u(b' - b)}{8d'\sigma_{st}} = \frac{1005.6 \times (250 - 30)}{8 \times 56 \times 348} = 14,1 \text{ cm}^2$$

La solution est donc de choisir $\emptyset 16 = 2.01 \text{ cm}^2$

Le nombre de barres nécessaires est : $N = \frac{14.1}{2.01} = 7.001 = 7 \text{ barres de } \emptyset 16$ espacées sur 250 cm de 35 cm.

- Armatures de répartition :

$$A_R = A_s \times \frac{b'}{4} = 14.1 \times \frac{2.50}{4} = 8.81 \text{ cm}^2$$

➤ Semelle filante :

Les sollicitations des semelles figurent dans le tableau :

/	M _{max} (kN.m)	M _{min} (kN.m)
Semelle filante	237.5	-78,6

Robot Expert nous donne une armature pour :

- $A_{s_{inf}} = 28.1 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \times 7 \text{ HA16}$
- $A_{s_{sup}} = 8.6 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \times \text{HA14}$

IV.5 Etude économique de la structure :

IV.5.1 Devis quantitatif estimatif du béton de la structure en béton léger :

IV.5.1.1 Métré des éléments barres :

Tableau IV.21 : Métré des éléments barres

Eléments barre	Nombre	Longueur [m]	Section [bxh]	Volume [m ³]
Poteau	48	3,06	30x30	13,22
Poteau	16	4,08	30x30	5,88
Poutre P	48	3,5	30x40	20,16
Poutre S	48	3,5	30x40	20,16

$v_1 =$ Volumes totaux : 59.42 m³

IV.5.1.2 Mètre d'éléments panneaux :

Tableau IV.22 : Mètre de éléments panneaux

Eléments panneau	Nombre	Surface [m ²]	Volume [m ³]
Plancher	4	404,25	26,12
Escalier	12	44,18	7,51
Voile	8	137,9	20,69

$v_2 =$ Volumes totaux : 54.35 m³

IV.5.1.3 Métré des fondations :

Tableau IV.23 : Métré des fondations

Elément fonda-tion	Nombre	Longueur	Largeur	Hauteur D	Hauteur e	Volume(m ³)
Semelle isolé	4	1,8	1,8	0,6	0,25	4.416
Semelle filante	4	10,5	0,8	0,25	0,25	8.4

$v_3 =$ Volumes totaux : 12.816 m³

IV.5.1.4 Estimation du prix du béton total :

Le prix du béton est un prix de revient donc cette valeur ne va pas définir la valeur exacte du prix du béton de la structure. Elle est utilisée à titre comparatif.

V : Volume total du béton de la structure :

$$V = v_1 + v_2 + v_3 = 126.586 \text{ m}^3$$

P₁ : Prix du béton de la structure :

$$P_1 = P' \times V = 8900 \times 126.586 = 1126615.4 \text{ d. a}$$

IV.5.2 Devis quantitatif estimatif du béton de la structure en béton ordinaire :

Tableau IV.24 : Métré des éléments barres :

Eléments barre	Nombre	Longueur [m]	Section (bxh)	Volume [m ³]
Poteau	48	3,06	30x30	13,22
Poteau	16	4,08	30x30	5,88
Poutre P	48	3,5	30x40	20,16
Poutre S	48	3,5	30x40	20,16

v₁ = Volumes totaux : 59.42 m³

Tableau IV.25 : Métré d'éléments panneaux :

Eléments panneau	Nombre	Surface [m ²]	Volume [m ³]
Plancher	4	404,25	26,12
Escalier	12	44,18	7,51
Voile	8	137,9	20,69

v₂ = Volumes totaux : 54.35 m³

Tableau IV.26 : Métré des fondations :

Elément fondation	Nombre	Longueur	Largeur	Hauteur D	Hauteur e	Volume m ³
Semelle isolé	4	2,5	2,5	0,6	0,3	7.6
Semelle filante	4	10,5	1,2	0,3	0,3	15.12

v₃ = Volumes totaux : 22.72 m³

➤ Estimation du prix du béton total :

V : Volume total du béton de la structure :

$$V = v_1 + v_2 + v_3 = 136.49 \text{ m}^3$$

P₂ : Prix du béton de la structure :

$$P_2 = P'' \times V = 3800 \times 136.49 = 518662 \text{ d. a}$$

IV.5.3 Interprétation :

La différence de prix du béton entre les deux structures (P_d) est estimée à

$$P_d = P_2 - P_1 = 607945,4 D.A$$

IV.5.4 Gain en armature du béton léger par rapport au béton ordinaire :

IV.5.4.1 Prix de l'armature en Algérie :

Le prix d'armature en Algérie est estimé à 14600 D.A le quintal

La masse volumique de l'acier est prise à $7,8\text{g/cm}^3$

Donc p : le prix des armatures par volume est égal à $1.4 D.A/\text{cm}^3$

IV.5.4.2 Métré du ferrailage des deux structures :

BL : Béton léger

BN : Béton normal

Tableau IV.27 : métré du ferrailage des deux structures

Elément	Poteau				Poutre	Fondation						
	H=4.08		H=3.06			Semelle filante				Semelle isolée		
	BN	BL	BN	BL		BN	BL	BN	BL	BN	BL	
Nombre d'éléments	16	16	48	48	96	96	4		4		4	4
Nombre de barres	7	6	7	6	8	6	14	6	12	5	7	5
Longueur développé (cm)	512	512	410	410	492	492	1099.6	1092.4	1099.6	1092.4	294	224
Type D'armature	HA16	HA14	HA16	HA14	HA16	HA16	HA16	Ha14	HA16	HA14	HA16	HA12
Volume d'armature total(cm^3)	115262	75694	276898	181843	759490	569618	123770	40375	106089	33646	16546	5062

➤ Longueur développée (L) :

Pour les poteaux :

$$L = \text{hauteur} + \text{épaisseur de la dalle} + \text{recouvrement}$$

$$L = 408 + 20 + 60 \times 1,4 = 512 \text{ cm}$$

Pour les poutres :

$$L = Le + a - 2 \times c + Lr + La = 492 \text{ cm}$$

Lr est le recouvrement tel que $Lr = 60\emptyset$

La est l'ancrage tel que $La = 15\emptyset$

- Le : longueur entre nus d'appuis égale à 350 cm
- a : la largeur du poteau étant de 30 cm
- c : l'enrobage pris à 4cm

Pour la semelle isolée :

$$L = b - 2 \times c + d - 2 \times c$$

- b : dimension de la semelle isolé
- d : hauteur utile de la semelle

Pour la semelle filante :

$L = L' - 2 \times c + 36\emptyset$ avec L' : la longueur de la semelle

IV.5.4.3 Gain en prix d'armatures (P_g) :

V_{bl} : Volume total des armatures de la structure en béton léger

$$V_{bl} = 75694 + 181843 + 569618 + 106089 + 33646 + 5062 = 971952 \text{ cm}^3$$

V_{bn} : Volume total des armatures de la structure en béton ordinaire

$$V_{bn} = 115262 + 276898 + 759490 + 123770 + 40375 + 16546 = 1332341 \text{ cm}^3$$

$$P_g = p \times (V_{bn} - V_{bl}) = 1.4 \times (1332341 - 971952) = 504544.6 \text{ D.A}$$

IV.5.5 Conclusion :

En étudiant les deux paramètres de notre étude économique qui sont le prix du béton et celui des armatures nous pouvons calculer la différence de prix (Di) entre les deux structures qui est de :

$$Di = 607945,4 - 504544.6 = 1030400 \text{ D.A}$$

On en conclue que la structure en béton ordinaire est plus économique que celle en béton léger. Par contre, plusieurs paramètres peuvent entrer en jeu pour équilibrer la différence tels que :

- Moins d'armature implique moins de main d'œuvre et donc un gain en argent.
- La facilité de mise en œuvre pour des éléments préfabriqués.

Conclusion générale

Cette étude avait pour but d'analyser du point de vue technique et économique une structure en béton léger et aussi de la comparer avec une structure en béton ordinaire.

L'élément important de cette étude est le granulats d'argile expansée car de par ses caractéristiques de légèreté, d'absorption, d'isolation et de résistance, il influe et différencie le béton léger d'argile expansée d'un béton ordinaire.

La formulation du béton d'argile expansée a été faite en tenant compte de l'absorption du granulats en eau.

Un faible rapport E/C, un dosage en adjuvant superplastifiant, et un bon choix de proportion de granulats des différentes fractions dans le mélange nous ont amenés à de bons résultats tant dans le béton à l'état frais de par sa bonne maniabilité, que dans le béton à l'état durci avec une résistance à l'écrasement atteignant à 10 jours 28 MPA.

Du côté économique le prix du béton léger est 2,3 fois plus cher que le béton ordinaire.

L'Eurocode de par la norme EN-1992-1-1 donne les caractéristiques de résistance et de déformabilité de ce béton léger et prescrit des exigences supplémentaires pour ce dernier.

Pour ce qui est de l'étude structure, une étude d'un plancher a été en premier lieu effectuée pour appliquer les caractéristiques et les exigences données par la norme européenne et aussi de la comparer avec celle d'un plancher à base de béton ordinaire.

La différence en armatures des deux planchers était relativement faible et cela s'explique par la forte charge d'exploitation appliquée aux planchers qui réduit l'impact qu'à la réduction du poids du plancher de béton léger.

En second lieu, deux structures R+3, une en béton léger et l'autre en béton ordinaire ont été étudiées (la deuxième a été utilisée à titre comparatif avec la première)

Le prédimensionnement des éléments porteurs tels que les poutres, les poteaux, les voiles et le plancher est similaire pour les deux structures. Tandis que pour les fondations, les dimensions des semelles de la structure ordinaire sont plus grandes que celles de la structure légère et ceci est dû au poids de la structure ordinaire qui est plus conséquent.

Les résultats de l'analyse dynamique de la structure en béton léger donnent de bonnes caractéristiques dynamiques et donc un bon comportement face aux forces horizontales telles que le séisme.

Le ferrailage des éléments structuraux donne un gain en armatures pour la structure en béton léger par rapport à celle en béton ordinaire et c'est dans cette optique qu'est réalisée l'étude économique.

Les deux paramètres étudiés qui sont le gain en prix d'armature et le déficit par rapport au prix du béton ont donné des conclusions telles que : la structure en béton ordinaire est plus économique que celle en béton léger. D'autres paramètres peuvent entrer en jeu pour équilibrer cette différence.

Néanmoins la structure en béton léger est réalisable en Algérie en respectant scrupuleusement les règlements et les exigences prescrites par l'EUROCODE. Cela permettra de concevoir des structures plus élancées grâce au faible poids volumique du béton.

Références bibliographiques

- [1] FATRE, Nicolas, Béton cellulaire autoclavé dans la construction, béton dans la construction, 4^{ème} Edition, Novembre 2013, C2219, <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [2] PAUCHET, Williams, béton léger, technique du bâtiment : Connaitre les matériaux de la construction, 3^{ème} Edition, Janvier 2022, Technique du bâtiment ; l'enveloppe du bâtiment, TBA1022, <https://www.techniques-ingenieur.fr/>.
- [3] AFNOR, Eurocode 2, Calcul des structures en béton Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, NF EN 1992-1-1, Octobre 2005.
- [4] AFNOR, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, partie 6, NF EN 1097-6, Juin 2001, Paris.
- [5] AFNOR, Granulats légers Partie 1 : Granulats légers pour bétons et mortier NF EN 13055-1 Décembre 2002, Paris
- [6] Neville, A. M. (1995) Properties of Concrete (Fourth and Final Edition). England, Logman Group Limited.
- [7] Rapport d'études et recherches : Méthodologie de formulation des bétons auto plaçant légers, Septembre 2015, réalisé par Latifou BELLO.
- [8] Nordic Concrete Federation: Nordic mini-seminar: Structural lightweight aggregate concrete Trondheim, Norvege , 20 fevrier, 2019, Edition n.15
- [9] R. Vijayalakshmi* and S. Ramanagopa, Indian Journal of Science and Technology, Structural Concrete using Expanded Clay Aggregate: A Review, April 2018
- [10] Ozguven A., Gündüz L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate (2015), Cement & Concrete Composites 34 (2012) 781-787
- [11] Leca, géo leca ,argile
expansée, <https://www.lecasystem.fr/client/files/0000000001/1573.pdf>

Cours, règlement et ouvrage :

- [12] RPA99/2003 (Règles Parasismiques Algériennes 1999 version 2003), 2004. Centre National de Recherche Appliqué en Génie-Parasismique
- [13] BAEL91/99 (Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé), 1999. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- [14] Cours de structure béton à l'Ecole Nationale Polytechnique Dr BAUCHE.
- [15] Cours de constructions parasismiques de l'Ecole National Polytechnique, Dr BAUCHE

Annexes

Annexe A

ROBOT

1. INTRODUCTION

Le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010 est un progiciel CAO/DAO destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot permet de modéliser les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée. C'est un programme d'analyses dynamique et statique des structures basées sur une formulation en éléments finis avec des fonctions destinées à la conception de bâtiments. Le concept de base est de créer un modèle comportant la structure du bâtiment et les niveaux (planchers) et les escaliers. Tous les autres éléments sont représentés comme des chargements.

La méthode d'analyse contient une large variété d'options de l'étude statique et dynamique. Les méthodes numériques utilisées permettent un transfert automatique des charges de niveaux aux éléments porteurs.

Le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional propose aux ingénieurs et calculateurs des fonctionnalités d'analyses avancées pour tous les types de structures, des plus simples aux plus complexes.

Il permet une meilleure gestion des flux de travail, et, son interopérabilité avec notre solution Autodesk Revit Structure augmente considérablement les possibilités et processus du BIM (modélisation des données du bâtiment). Les ingénieurs peuvent ainsi calculer et dimensionner plus rapidement des ouvrages et bâtiments, dans tous les domaines de la construction et du génie civil.

2. LIAISONS BIDIRECTIONNELLES avec Revit Structure

Les liaisons bidirectionnelles avec le logiciel Autodesk Revit Structure permettent la mise à jour de résultats précis d'analyse structurelle et de conception dans l'ensemble du modèle en s'appuyant sur la documentation de construction coordonnée fournie par la maquette numérique intelligente du bâtiment (BIM).

3. Puissants flux de travail dédiée à l'analyse et à la documentation structurelles

Créez des modèles de structure et effectuez des analyses structurelles dans Robot Structural Analysis Professional, puis transférez facilement vos modèles et résultats dans AutoCAD Structural Detailing afin de générer des plans de fabrication. Dans cet écosystème de logiciels d'ingénierie, les ingénieurs structure bénéficient d'un flux de travail intégré de la conception, à l'analyse et à la fabrication. ANNEXES 79 Département Génie Civil - ENP- Année 2015/2016

4. Maillage automatique et modélisation perfectionnés

Grâce aux puissantes techniques de maillage automatique, les ingénieurs structure peuvent travailler en toute simplicité avec les modèles complexes. Pour chaque panneau, vous pouvez manipuler indépendamment les paramètres de génération de maillage automatique native et définir manuellement les paramètres de maillage, ce qui permet de créer des maillages éléments finis de haute qualité.

5. Interface localisée pour les marchés internationaux

Robot Structural Analysis Professional facilite le travail des équipes de conception multinationales en prenant en charge de nombreuses langues, dont l'anglais, le français, le roumain, l'espagnol, le néerlandais, le russe, le polonais, le chinois et le japonais. Vous pouvez effectuer des analyses structurelles dans une langue et éditer les résultats dans une autre langue. De même, les unités anglo-saxonnes et métriques peuvent être utilisées conjointement dans un même modèle de structure.

6. Prise en charge des matériaux et des codes de conception

Robot Structural Analysis Professional propose 60 bases de données de sections et de matériaux du monde entier. Avec 70 codes de conception intégrés, les ingénieurs structure peuvent travailler avec des formes de profilés spécifiques à certains pays, en unités anglosaxonnes ou métriques, mais aussi avec des normes de construction spécifiques aux pays concernés, le tout dans le même modèle intégré.

7. Une solution de conception intégrée pour le béton armé et l'acier

Robot Structural Analysis Professional intègre des modules de conception pour le béton armé et les structures en acier basés sur 40 normes acier internationales et 30 normes béton armé, ce qui simplifie le processus de conception et facilite le choix et la validation des éléments structurels.

8. Interface de programmation d'application (API) souple et ouverte

Robot Structural Analysis Professional utilise les technologies Microsoft COM (Component Object Model), qui permettent de bénéficier des avantages d'une interface de programmation (API) à la fois ouverte et flexible.

9. Charges structurelles et combinaisons de charges Selon la durée et le type de charge

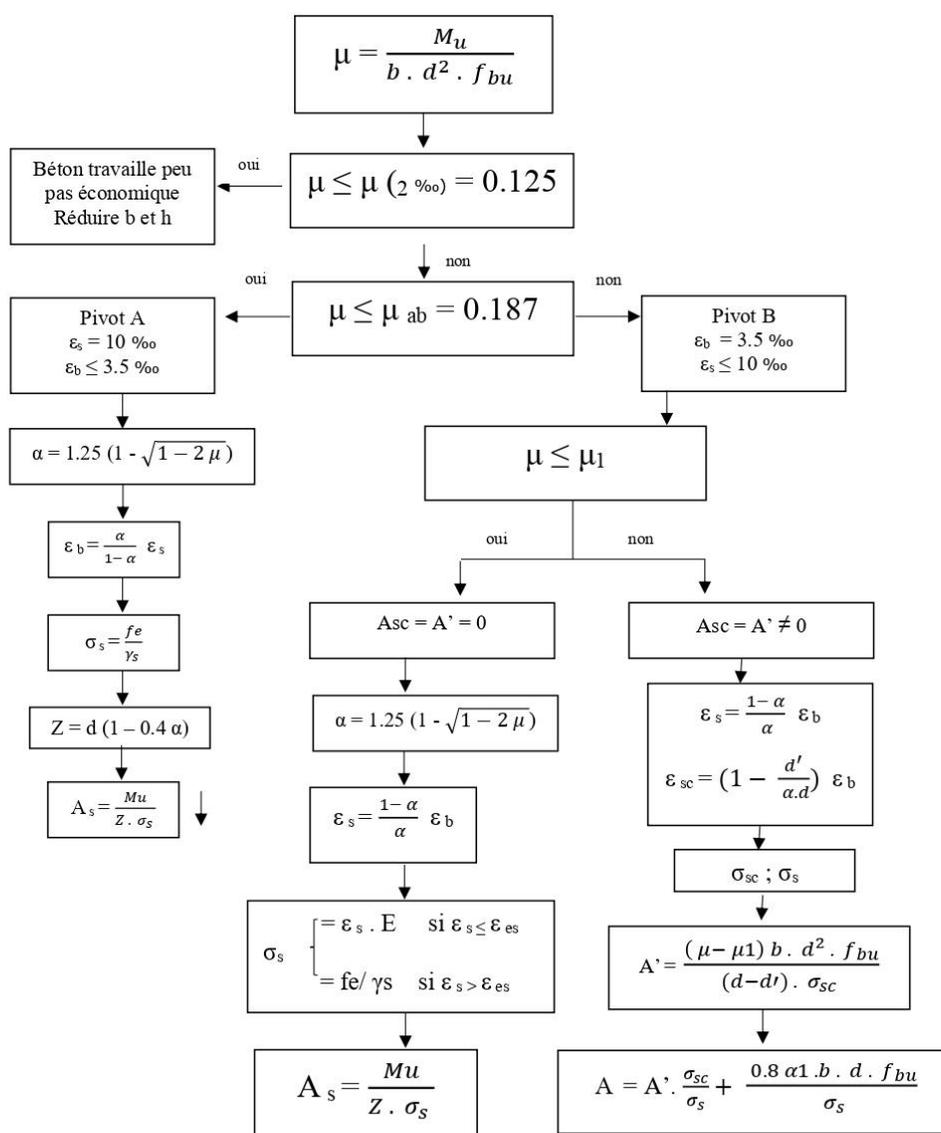
Vous pouvez créer des charges définies de plusieurs natures (permanente, exploitation, vent ou séisme). Vous pouvez ensuite appliquer plusieurs types de charges (nodales, linéaires ou planaires) à une structure en fonction des cas de charges définies. La définition manuelle et automatique des combinaisons de charges en fonction de différentes normes nationales est possible.

Annexes B

Organigramme Flexion simple ; section rectangulaire bXh

Données : M_u , h , b , $d = 0.9 h$, $d' = 0.1 h$, f_{c28} , f_e , $E = 2 \cdot 10^5 \text{ Mpa}$

$$f_{bu} = \frac{0.85 f_{cj}}{\theta \cdot \gamma_b} ; \alpha_1 = \frac{7}{7+2 \varepsilon_{es}} ; \mu_1 = 0.8 \alpha_1 (1 - 0.4 \alpha_1)$$



$$A_s \geq A_{smin} = \max \{ b \cdot h / 1000 ; 0.23 \cdot b \cdot d \cdot f_{t28} / f_e \}$$