

Département d'Architecture



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :
MASTER ACADEMIQUE

Filière :
ARCHITECTURE

Spécialité :
ARCHITECTURE ET TECHNOLOGIE

Présenté par :
**Fouad BOUHEZILA
Islam AMIROUCHE
Yaiche GUEMRAOUIE**

THEME :
**L'APPORT DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION AU
PROJET D'ARCHITECTURE
- CAS DU BETON LEGER -**

Soutenu le : 24/06/2018

Composition du Jury :

| | |
|-------------------|---|
| Amina AOUCI | MAB, Université Mohamed Seddik BENYAHIA - Jijel, Président du jury |
| Ibtissem HALLAL | MAA, Université Mohamed Seddik BENYAHIA - Jijel, Directeur de mémoire |
| Larbi BOUTAOUTAOU | MAA, Université Mohamed Seddik BENYAHIA - Jijel, Membre du Jury |

Dédicace

Nous dédions ce travail :

*A tous nos famille AMIROUCHE, BOU-
HEZILA et GUEMRAOUI et surtout à nous
précieuse parents. Pour leur soutien et leur pa-
tience au long de tous notre cursus universitaire.
Ainsi à nos chers frères, nos agréables sœurs, nos
grand père et grand-mère, nos oncles et nos
tantes, nos cousins et cousines que nous ne pou-
vons pas tous les mentionner.*

*A tous nos collègues de la filière Architecture
appartenant à notre département et particulière-
ment au promotion 2017/2018 de la spécialité
ARCHITECTURE ET TECHNOLOGIE. Pour
tous les moments et les souvenirs inoubliable.*

*A les anciens diplômés du département de la
promotion 2016/2017.*

*A tous nos amis, nos copains, nos camarades
et tous personne qui connus Fouad, Islam et
Yaiche.*

Remerciements

Nous remercions avant tout DIEU le tout puissant, de nous avoir aidé et de nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.

Tous d'abord, Nous adressons nos remerciements à notre chère encadreur Madame Hallal I. Qui nous a aidé avec son écoute, ses orientations, son expérience, son suivi, et ses conseils ; mais surtout pour sa disponibilité pondant toute l'années pour nous dirige à cette recherche.

Nous remercierons également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre manuscrit et de nous encourager pour la suite de nos études, ainsi à l'équipe administratifs présenter par le chef département pour leur accueil et leur patience.

Nous tenons à présenter nos vifs remerciements l'ensembles de nos collègues du la promotion 2017/2018 du département d'architecture et spécialement à nous camarade de la spécialité ARCHITECTURE ET TECHNOLOGIE.

Enfin, nous tenons à remercie toute personne qui a contribué et participé à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale : | 01 |
| Préambule..... | 02 |
| Motivation de choix du thème | 04 |
| Problématique | 05 |
| Hypothèses de recherches | 06 |
| Objectifs de recherche | 06 |
| Structure du mémoire | 07 |
| Partie I : Partie Théorique : | 08 |
| Chapitre 01 : Connaitre le béton : | 09 |
| Introduction | 10 |
| 1. C'est quoi le béton ? | 10 |
| 2. Origine, invention et évolution technique du béton | 10 |
| 3. Les constituants de béton | 11 |
| 3.1. Les granulats | 11 |
| 3.1.1. Historique | 12 |
| 3.1.2. Types Des Granulats | 12 |
| 3.1.3. Technique de fabrication des granulats | 12 |
| 3.1.3.1. Extraction..... | 12 |
| 3.1.3.2. Concassage..... | 12 |
| 3.1.3.3. Criblage..... | 12 |
| 3.1.3.4. Lavages..... | 13 |
| 3.1.3.5. Stockage et livraison..... | 13 |
| 3.1.4. Caractéristique des granulats..... | 13 |
| 3.1.4.1. Les caractéristiques géométriques..... | 13 |
| 3.1.4.2. Les caractéristiques physico-chimiques..... | 13 |

| | |
|---|----|
| 3.1.4.3. Les caractéristiques mécaniques..... | 14 |
| 3.2. Ciment..... | 14 |
| 3.2.1. Historique..... | 14 |
| 3.2.2. Procède De Fabrication Du Ciment..... | 15 |
| 3.2.2.1. L'extraction et concassage des matières premières..... | 15 |
| 3.2.2.2. Préparation de CRU..... | 15 |
| 3.2.2.3. Cuisson de cru (calcination)..... | 15 |
| 3.2.2.4. Broyage et livraison..... | 16 |
| 3.2.3. Types De Ciments..... | 16 |
| 3.2.3.1. En fonction de leur composition..... | 16 |
| 3.2.3.2. En fonction de leurs résistances normales..... | 17 |
| 3.3. L'eau de gâchage..... | 17 |
| 3.3.1. Types Des Eaux De Gâchage..... | 17 |
| 3.4. Les adjuvants..... | 18 |
| 4. Mise en œuvre du béton..... | 18 |
| 4.1. Le stockage des constituants..... | 18 |
| 4.2. Formulation du béton..... | 18 |
| 4.3. Préparation du béton..... | 19 |
| 4.4. Mise en forme de béton..... | 19 |
| 5. Performances du béton..... | 20 |
| 5.1. Comportement microscopique..... | 20 |
| 5.2. Résistance mécanique..... | 20 |
| 5.3. Comportement mécanique..... | 20 |
| 5.3.1. Comportement Du Béton A La Compression..... | 20 |
| 5.3.2. Comportement Du Béton A La Traction..... | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 5.4. Déformation des bétons..... | 21 |
| 5.4.1. Le Fluage..... | 21 |
| 5.4.2. Le Retrait..... | 21 |
| 5.4.3. Mouvements d'origine thermique..... | 22 |
| 5.5. Résistance au feu..... | 22 |
| 5.6. Résistance aux agressions de l'environnement..... | 22 |
| 5.6.1. Agressions D'origine Climatique..... | 22 |
| 5.6.2. Agressions D'origine Chimique..... | 22 |
| 5.6.3. Isolation Thermique..... | 23 |
| 5.6.4. Isolation Acoustique..... | 23 |
| 6. Progrès et diversification des bétons..... | 23 |
| 7. Types des bétons..... | 24 |
| 8. Principaux avantages et inconvénients du béton..... | 24 |
| 8.1. Avantages du béton..... | 24 |
| 8.2. Inconvénients Du Béton..... | 25 |
| Conclusion | 25 |
| Chapitre 02 : Le béton léger : | 26 |
| Introduction..... | 27 |
| 1. Le béton léger..... | 27 |
| 2. Différents types des bétons légers..... | 27 |
| 2.1. Le béton cellulaire..... | 27 |
| 2.1.1. Composition..... | 28 |
| 2.1.2. Domaine d'utilisation..... | 28 |
| 2.2. Le béton caverneux..... | 28 |
| 2.2.1. Composition..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2. Domaine d'utilisation..... | 29 |
| 2.3. Les bétons de granulats légers..... | 29 |
| 2.3.1. Les bétons de granulats légers naturels..... | 29 |
| 2.3.2. Les bétons de granulats légers artificiels..... | 30 |
| 2.3.3. Composition..... | 30 |
| 3. Classification du béton léger..... | 30 |
| 4. Formulation..... | 31 |
| 4.1. La nature de l'ouvrage..... | 31 |
| 4.1.1 Le béton léger structural..... | 31 |
| 4.1.2. Le béton léger architectural..... | 32 |
| 4.2. Propriétés des bétons légers..... | 32 |
| 4.2.1. La masse volumique..... | 32 |
| 4.2.2. La durabilité..... | 32 |
| 4.2.3. La rhéologie a l'état frais..... | 32 |
| 4.2.4. Les propriétés mécaniques..... | 33 |
| 4.3. Le dosage..... | 33 |
| 5. Les constituants du bétons légers..... | 33 |
| 5.1. Les liants hydrauliques..... | 34 |
| 5.2. Les ajouts minéraux..... | 34 |
| 5.3. Les ajouts cimentaires..... | 34 |
| 5.4. Les granulats légers..... | 34 |
| 5.5. Les adjuvants..... | 35 |
| 5.5.1. Les super plastifiants..... | 35 |
| 5.5.2. Les agents entraîneurs d'air..... | 35 |
| 6. Domaine de l'utilisation..... | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1. Les bétons d'isolation pure, non porteurs..... | 36 |
| 6.2. Les bétons porteurs et isolants..... | 36 |
| 6.3. Des bétons légers de structure..... | 36 |
| 7. Les avantages des bétons légers..... | 37 |
| 7.1. Avantages techniques..... | 37 |
| 7.2. Avantages de mises en œuvre..... | 37 |
| 7.3. Avantages économiques..... | 37 |
| 8. L'apport de béton léger..... | 38 |
| 8.1. L'isolation thermique..... | 38 |
| 8.2. L'isolation acoustique..... | 38 |
| 8.3. La réduction du poids des éléments construits..... | 39 |
| Conclusion..... | 40 |
| Chapitre 03 : performance thermique du béton léger : | 41 |
| Introduction..... | 42 |
| 1. Notion du confort thermique..... | 42 |
| 1.1. Définition du confort thermique du bâtiment..... | 42 |
| 1.2. Les paramètres de confort thermique..... | 42 |
| 1.3. Les facteurs influençant le confort thermique..... | 43 |
| 1.3.1. La forme..... | 43 |
| 1.3.2. L'orientation du bâtiment..... | 43 |
| 1.3.3. L'inertie thermique..... | 43 |
| 1.3.4. Les ponts thermiques..... | 43 |
| 1.3.5. Le coefficient de transmission thermique..... | 44 |
| 1.3.6. La conductivité thermique..... | 44 |
| 1.3.7. L'humidité relative de l'air..... | 44 |

| | |
|--|----|
| 1.4. Les facteurs d'inconfort thermique..... | 45 |
| 1.5. Evaluation du confort thermique..... | 45 |
| 2. L'isolation thermique..... | 45 |
| 2.1. Définition de l'isolation thermique..... | 45 |
| 2.2. Les types d'isolation..... | 46 |
| 2.2.1. L'isolation intérieure..... | 46 |
| 2.2.2. L'isolation extérieure..... | 46 |
| 2.2.3. L'isolation répartie..... | 47 |
| 2.3. Les types d'isolants..... | 47 |
| 2.3.1. Les isolants synthétiques..... | 47 |
| 2.3.2. Les isolants minéraux..... | 47 |
| 2.3.3. Les isolants d'origine végétale..... | 48 |
| 2.3.4. Les isolants d'origine animale..... | 48 |
| 2.3.5. Les isolantes nouvelles générations..... | 48 |
| 2.4. Les critères de choix des isolants..... | 49 |
| 3. Performances thermique des bétons légers..... | 49 |
| 3.1. La conductivité thermique..... | 49 |
| 3.2. La résistance thermique..... | 50 |
| 3.3. Coefficient de déperdition surfacique..... | 50 |
| 3.4. Coefficient de déperdition linéique..... | 50 |
| 3.5. Inertie thermique..... | 51 |
| Conclusion..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Partie II : Partie expérimentale : | 53 |
| Chapitre 04 : Présentation du cas d'études et de méthodologie de simulation : | 54 |
| Introduction..... | 55 |
| 1. Présentation de cite..... | 55 |
| 1.1. Présentation de la ville de Jijel..... | 55 |
| 1.2. Présentation de la région du Tassoust..... | 55 |
| 1.3. Les données climatiques..... | 56 |
| 1.3.1. Les vents..... | 56 |
| 1.3.2. La température..... | 57 |
| 1.2.3. L'humidité..... | 58 |
| 1.3.4. Les précipitations..... | 58 |
| 2.Présentation du bâtiment cas d'étude..... | 58 |
| 2.1 Fiche technique..... | 59 |
| 2.2. Description du projet..... | 59 |
| 3. Présentation de l'échantillon d'étude..... | 60 |
| 3.1. Forme et dimension..... | 60 |
| 3.2. Façade et ouverture..... | 60 |
| 3.3. Matériaux de construction..... | 60 |
| 4. La simulation numérique..... | 61 |
| 4.1. Définition..... | 61 |
| 4.2. L'objectif de la simulation..... | 61 |
| 4.3. Présentation de logiciel de simulation Ecotect 2011..... | 61 |
| 5. Les démarches de la simulation..... | 62 |
| 5.1. Préparation des plans..... | 62 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2. Importation des plans..... | 62 |
| 5.3. L'adaptation des paramètres relatives à l'objet d'étude..... | 62 |
| 5.4. La modélisation..... | 63 |
| 5.5. La définition des matériaux..... | 63 |
| 5.6. Définition du période d'utilisation..... | 64 |
| Conclusion..... | 64 |
| Chapitre 05 : Analyse et interprétation des résultats : | 65 |
| Introduction | 66 |
| 1. Scénario 1 : Les températures intérieures avant l'application de béton léger..... | 66 |
| 1.1. Composition des éléments constructifs de l du modèle 01..... | 66 |
| 1.1.1. Caractéristique du mur extérieur..... | 66 |
| 1.1.2. Caractéristique du mur intérieur..... | 67 |
| 1.1.3. Caractéristique du plancher toiture..... | 67 |
| 1.1.4. Caractéristique du plancher sol..... | 68 |
| 1.2. Interprétation des résultats de simulation du modèle 01..... | 68 |
| 2. Scénario 2 : Les températures intérieures après l'application de béton léger..... | 71 |
| 2.1 Composition des éléments constructifs de l du modèle 02..... | 71 |
| 2.1.1. Caractéristique du mur extérieur..... | 71 |
| 2.1.2. Caractéristique du mur intérieur..... | 72 |
| 2.1.3. Caractéristique du plancher toiture..... | 72 |
| 2.1.4. Caractéristique du plancher sol..... | 73 |
| 2.2. Interprétation des résultats de simulation du modèle 02..... | 73 |
| 3. Visualisation globale des résultats..... | 75 |
| Conclusion..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Conclusion générale : | 77 |
| Concision..... | 78 |
| Références bibliographiques | 79 |
| 1. Liste des références..... | 80 |
| 2. Bibliographie..... | 82 |

Liste des figures :

Chapitre 02 :

| | |
|--|-----|
| Figure n° 1 : Les types des bétons légers | 27. |
| Figure n° 2 : Conductivité thermique en fonction de différentes masses volumiques | 38. |
| Figure n° 3 : Valeurs des facteurs de diminution acoustique de différents matériaux..... | 39. |

Chapitre 03 :

| | |
|---|-----|
| Figure n° 4 : Coefficient de transmission thermique | 44. |
| Figure n° 5 : La conductivité thermique | 44. |
| Figure n° 6 : L'isolation par l'extérieur | 46. |
| Figure n° 7 : L'isolation répartie | 47. |

Chapitre 04 :

| | |
|--|-----|
| Figure n° 8 : Localisation géographique de Tassoust-Jijel | 56. |
| Figure n° 9 : Fréquence des vents | 57. |
| Figure n° 10 : Histogramme des précipitation à Jijel | 58. |
| Figure n° 11 : Plan de salle d'enseignements | 60. |
| Figure n° 12 : Le paramétrage du logiciel | 62. |
| Figure n° 13 : Modélisation de la 3D en Ecotect | 63. |
| Figure n° 14 : La définition des matériaux en Ecotect | 63. |
| Figure n° 15 : Réglage de la période journalière et annuelle à simuler | 64. |

Chapitre 05 :

| | |
|---|-----|
| Figure n° 16 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Mars) | 68. |
| Figure n° 17 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Juin) | 69. |
| Figure n° 18 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Septembre) | 70. |
| Figure n° 19 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Décembre) | 70. |
| Figure n° 20 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Mars) | 73. |

Figure n° 21 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Juin)74.

Figure n° 22 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Septembre)74.

Figure n° 23 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Décembre)75.

Liste des photos :

Chapitre 02 :

| | |
|---|-----|
| Photo n° 1 : Les granulats légers naturels | 30. |
| Photo n° 2 : Les granulats légers artificiels | 30. |

Chapitre 03 :

| | |
|--|-----|
| Photo n° 3 : Application d'une isolation intérieur | 46. |
| Photo n° 4 : Le polystyrène expansé | 47. |
| Photo n° 5 : La laine de verre | 47. |
| Photo n° 6 : Le liège | 48. |
| Photo n° 7 : La laine de mouton | 48. |
| Photo n° 8 : Les aérogels | 48. |

Chapitre 04 :

| | |
|--|-----|
| Photo n° 8 : Situation géographique du cas d'étude | 59. |
| Photo n° 9 : Plan de masse de cas d'étude | 59. |
| Photo n° 10 : Façade de salle d'enseignements | 60. |

Liste des tableaux :

Chapitre 01 :

| | |
|--|-----|
| Tableau n° 1 : Les types de ciment | 16. |
| Tableau n° 2 : Les types de béton | 24. |

Chapitre 03 :

| | |
|---|-----|
| Tableau n° 3 : La conductivité thermique par rapport la masse volumique | 50. |
| Tableau n° 4 : Calcul de la résistance thermique R d'un mur en béton légers | 50. |
| Tableau n° 5 : Calcul des déperditions | 51. |
| Tableau n° 6 : Comportement thermique d'une paroi en béton cellulaire | 52. |

Chapitre 04 :

| | |
|---|-----|
| Tableau n° 7 : Les températures moyennes mensuelles à Jijel (1999-2008) | 57. |
| Tableau n° 8 : L'humidité relative mensuelle à Jijel (1999-2008) | 58. |
| Tableau n° 9 : Les propriétés physiques des matériaux de construction | 61. |

Chapitre 05 :

| | |
|---|-----|
| Tableau n° 10 : Matériaux constituant du mur extérieur | 66. |
| Tableau n° 11 : Matériaux constituant du mur intérieur | 67. |
| Tableau n° 12 : Matériaux constituant du plancher toiture | 67. |
| Tableau n° 13 : Matériaux constituant du plancher sol | 68. |
| Tableau n° 14 : Matériaux constituant du mur extérieur | 71. |
| Tableau n° 15 : Matériaux constituant du mur intérieur | 72. |
| Tableau n° 16 : Matériaux constituant du plancher toiture | 72. |
| Tableau n° 17 : Matériaux constituant du plancher sol | 73. |
| Tableau n° 18 : Résultats de la simulation | 75. |

Liste des abréviations :

- ACCP** : L'Association Canadienne du Ciment Portland.
- BET** : Bureau d'Etude.
- BEUP** : Béton Fibré Ultra-Hautes Performances.
- BHP** : Béton à Haute Performances.
- CCV** : Composites Ciment Verre.
- Chap** : chapitre.
- CTC** : Contrôle Technique de la Construction.
- d/D**: La plus petite dimension / La plus grande dimension
- DLEP** : Direction de Logement et des Equipements Publics.
- DXF** : Drawing Exchange Format.
- Ed** : édition.
- EPS** : Polystyrène Expansé.
- EXT** : Extérieur.
- Hr** : Taux d'Humidité Relative de l'Air.
- Ibid** : traduction de ibidem : ici-même.
- INT** : Intérieur.
- NE** : Norme Européenne.
- NF** : Norme Française.
- Op. Cit.** : traduction de opere citato : ouvrage déjà citée.
- P** : page.
- PS** : Sable Piston.
- RT** : Résistance Thermique.
- TA** : Température Ambiante de l'Air.
- TMR** : Température Radiante Moyenne.
- U** : Le coefficient de transmission thermique.
-

| Unités utilisées par le logiciel Ecotect Analysis | |
|--|---|
| Temps | En heure (h) |
| Longueur | En mètre (m) |
| Surface | En mètre carré (m ²) |
| Volume | En mètre cube (m ³) |
| Masse | En Kilo gramme (Kg) |
| Température | En degré Celsius (°C) |
| Conductivité thermique | En Kilo Joule par heure mètre degré Celsius (Kj /h m°C) |
| La densité | (Kg / m ³) |

Introduction générale :

PREAMBULE :

« Avant la révolution industrielle, l'art de bâtir s'est développé à partir de matériaux traditionnels, le plus souvent locaux. Avec l'essor des sciences appliquées, des matériaux aux caractéristiques nouvelles sortent des ateliers de l'industrie naissante : le fer et la fonte au XIXe siècle, puis le béton et le verre au XXe siècle, et enfin les polymères et les composites, qui ont renouvelé le potentiel expressif des techniques de construction. ¹

Dans l'histoire de l'architecture, aucun édifice n'est construit totalement avec un seul matériau, sauf peut-être l'igloo. Les matériaux répondent à des attentes dans une composition globale de la construction, qui met en relation ces derniers pour accomplir leur capacité à satisfaire une ou des exigences précises.

Aujourd'hui, l'art de bâtir s'est internationalisé en se banalisant. Les enjeux du développement durable qui demandent de nouvelles réponses aux questions qui se posent en termes d'environnement, ont changé les habitudes de l'art de bâtir avec des matériaux tels que la pierre, la brique et les produits à base d'argile, les mortiers à base de ciment, ainsi que le béton. L'objectif étant d'éliminer ou de réduire leurs impacts négatifs en vue d'assurer une haute qualité environnementale. Mais le but principal, c'est de maîtriser la consommation énergétique depuis leur mise en œuvre et d'atteindre la performance de la construction tant recherchée.

Pour les matériaux de construction, de nouvelles habitudes sont à l'ordre du jour : durabilité, consommation énergétique maîtrisée, capacité à maintenir un environnement sain, etc... ; Les matériaux d'aujourd'hui influencent le choix de leur utilisation dans la construction en particulier et dans le projet architectural en général. Désormais, pour les concepteurs, pour de meilleures solutions architecturales, l'utilisation d'un matériau spécifique s'impose. Mais le choix final revient toujours à l'architecte.

En donnant à lui seul les réponses à de multiples questions, le béton a apporté aux concepteurs, depuis le début du XXe siècle, une liberté inimaginable avec les matériaux traditionnels. Il participe à la fois dans la solidité de la structure, à la beauté externe des parements, et de façon moins intéressante à la qualité interne des espaces. Il est le matériau de partout et de

¹ Hoyet, N. *Matériaux Et Architecture Durable*. Paris : DUNOD, 2013, p23.

chaque jour, accompagnant toutes les activités de l'homme, présent dans le plus banal comme dans l'exceptionnel, le béton reste toujours actuel.

Le béton d'aujourd'hui n'est plus celui d'hier. Il n'arrête pas d'évoluer, de progresser. Il est sûrement le produit d'une centaine d'années d'études, d'expérimentation, de projets concrets, de constructions très nombreuses, de succès architecturaux, mais aussi d'immeubles moins heureux. Le béton est aujourd'hui un matériau plus maîtrisé qu'il ne l'était il y a quarante ou cinquante ans. Toutes les disciplines artistiques, scientifiques et techniques se sont alliées pour faire du béton le matériau de construction d'aujourd'hui qui offre des solutions constructives simples et économiques. Entrant sous l'aile du développement durable par la diversification de ses types, qui sont corrigent ses défaillances surtout matière de confort intérieur, ainsi à sa réponse aux enjeux nouveaux de performance énergétique et de qualité environnementale.

Le béton léger est l'un de ces bétons résultants des expérimentations. Il apporte des réponses et des solutions intéressantes en matière de confort thermique en corrigeant la mauvaise réputation des bétons courants. Grâce à l'utilisation des granulats légers, ces bétons ont une masse volumique inférieure à celle des bétons courants, les rendant plus denses et leur offrant la possibilité d'assurer une bonne isolation thermique.

MOTIVATION DE CHOIX DU THEME :

L'histoire du béton a, depuis ses premières applications, tracé le progrès de la construction. Ce progrès résulte tantôt des améliorations sur les composants même du béton, tantôt des adaptations des exigences de sa mise en œuvre, tantôt de ses applications à des nouveaux types d'ouvrage.

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons qui couvre tous ces progrès et qui offre des solutions rationnelles en répondant à aux questions particulières du projet architectural.

Aujourd'hui, à cause de ses caractéristiques, il se positionne comme le béton le mieux adapté à chaque condition de chantier, à chaque catégorie d'ouvrage et à chaque produit. Sa légèreté, extraite de sa masse volumique réduite, le rend adapté à tout type de coffrage et lui donne une grande souplesse et un habilité à être pompé sur des distances importantes. Sa grande densité lui donne une bonne résistance au feu et une faible conductivité thermique, ce qui augmente ses performances d'isolation ainsi que sa résistance à supporter les charges en allongeant sa capacité portante. Une solution à la fois architecturale et énergétique. Sa formulation par des granulats légers, extraits de ressources locales, offre des solutions économiques et environnementales.

Tous ces atouts prônent notre attention pour ce matériau et motivent notre choix thématique de la présente recherche. Les performances exceptionnelles du béton léger, ses réponses économiques, et ses solutions intelligentes avec l'opportunité d'être appliqué aux niveaux locaux, forment l'objet de notre étude. La nouveauté et l'originalité de ce matériau de construction nous permettra d'enrichir nos connaissances pour une éventuelle utilisation dans notre pays malgré la rareté de documentation et des recherches académiques sur cette thématique.

PROBLEMATIQUE :

La construction, qui est le fruit du projet architectural, ordonnance les différents matériaux qui la composent dans une globalité en vue de satisfaire un ou des objectifs bien précis. Généralement, c'est l'assurance du bien-être de l'être humain et de ses besoins en matière de confort qui sont recherchés grâce notamment à la conjonction de matériaux nouveaux dont la consommation des énergies est raisonnée. Le béton est l'un des matériaux qui cadrent le plus avec ces préoccupations de confort et de performance énergétique au vu de la facilité de sa mise en œuvre.

En effet, depuis le début du XXe siècle le béton a apporté aux bâtisseurs une indépendance et une autonomie inimaginables par rapport aux matériaux traditionnels, traçant ainsi un progrès fulgurant de la construction dans diverses utilisations. Le béton a, depuis ses premières applications, préfiguré le progrès de la construction. Ce progrès découle à la fois des améliorations sur les composants même du béton, des ajustements des exigences de sa mise en œuvre et enfin de ses applications à des nouveaux types d'ouvrage. Malgré ces perfectionnements, le béton tout en restant actuel, souffre encore d'une mauvaise réputation due en partie à sa grande conductivité thermique et à sa masse volumique trop importante.

Aujourd'hui de nouvelles aptitudes du béton sont expérimentées pour corriger cette réputation, car il reste et il restera le matériau de toujours, présent dans le plus banal comme dans l'exceptionnel, et dans ce cadre une attention particulière est donnée à la performance énergétique grâce à la proposition de nouveaux types de bétons capables d'allier le confort et la maîtrise énergétique tels que les bétons légers.

En Algérie, un programme national de maîtrise de l'énergie a été mis en place. L'objectif affiché vise l'efficacité énergétique et consiste à l'utilisation le moins possible d'énergie ; grâce entre autres à l'emploi de matériaux adaptés à cette exigence.

Les bétons légers, avec leur composition en granulats provenant de source naturelle locale, à cause de leur faible conductivité thermique et de leur performance énergétique et structurale se présentent comme une bonne solution aux problèmes posés en intégrant le souci de la maîtrise de la consommation énergétique tout le long des différentes phases de réalisation et d'utilisation des constructions.

Cette problématique ainsi posée, nous renvoie aux questionnements suivants :

- Qu'apportent-ils au projet architectural en général et à la construction en particulier ?
- Quels sont leurs comportements en matière de confort thermique par rapport aux bétons classiques ?

HYPOTHESES DE RECHERCHE :

Pour répondre au mieux aux questionnements posés dans ce travail de recherche, nous émettons les hypothèses suivantes :

- Les bétons légers peuvent corriger les problèmes des bétons classiques et apporter des solutions techniques pour le problème d'isolation thermique.
- Les bétons légers peuvent être utilisés à la fois comme éléments porteurs ou comme éléments de remplissage pour l'ensemble des travaux de construction et d'aménagement.
- Les bétons légers permettent une plus grande souplesse dans la conception des ouvrages et concurrencent les autres matériaux de construction en matière de mise en œuvre en induisant des économies notables.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE :

- Approfondissement des connaissances sur les spécificités des bétons légers, leurs caractéristiques et leurs performances.
- Confirmation des apports bénéfiques des bétons légers à la construction et au projet architectural.
- Evaluation de ces apports et expérimentation de leur impact sur le confort et les performances d'isolation thermiques des ambiances intérieures.

STRUCTURE DU MEMOIRE :

Le contenu de notre mémoire de recherche se développe depuis l'introduction générale, passant par une partie théorique comportant l'ensemble des notions en rapport avec la thématique de la recherche abordée et une partie opérationnelle comportant l'expérimentation du facteur qui marque notre intérêt au thème et se clôturant par une conclusion générale. D'une manière plus détaillée, il se structure comme suit :

Introduction générale :

C'est l'initiation du sujet sous forme d'un préambule, d'une problématique, de l'énoncé des hypothèses et des objectifs de la présente recherche ainsi que la structure de mémoire.

Première partie :

Composée de trois chapitres, elle comporte l'ensemble des notions théoriques liées au béton, et spécialement au béton léger et à ses apports où l'on tentera d'affiner nos connaissances sur la question :

- **Premier chapitre :** On présentera quelques connaissances globales du béton, ainsi que son évolution et ses caractéristiques, parachevé par ses avantages et ces inconvénients.

- **Deuxième chapitre :** On présentera les bétons légers, leurs types, leurs composants, leur formulation, leur domaine d'utilisation et leurs apports pour la conception architecturale.

- **Troisième chapitre :** On approfondira la recherche sur les apports de ces bétons en développant leurs performances thermiques après un bref rappel des notions du confort thermique.

Deuxième partie :

Elle comporte l'expérimentation de l'apport de béton léger sur le confort thermique par l'analyse et l'évaluation des résultats d'une simulation d'une salle d'enseignement, développée en deux chapitres :

- **Premier chapitre :** il sera dédié à une initiation à la simulation par la présentation de l'objet d'étude et des données climatiques relatives à sa zone (willaya de Jijel), ainsi qu'au processus d'expérimentation suivi lors de l'évaluation de la température intérieure de la salle.

- **Deuxième chapitre :** il comporte l'interprétation et la comparaison des résultats des scénarios obtenus et relevés du logiciel.

Conclusion générale :

On finalise notre recherche par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus et les recommandations proposées.

Partie I:

Partie Théorique :

Chapitre 01:
Connaitre le béton :

Introduction :

Le béton est un matériau facile à mouler, autorisant de grandes portées et compatible avec l'acier. Avec la chaux hydraulique de Louis Vicat et d'Auguste Pavin de Lafarge, le concept de liant durcissant au contact de l'eau s'impose. L'idée du ciment est déjà dans l'air. Le premier sera le portland écossais, suivi quelques années plus tard par des nouveaux ciments artificiels sont fabriqués. Avec le « ciment armé », premier nom du béton, viennent ensuite les entrepreneurs puis les ingénieurs qui vont inventer les nouveaux systèmes constructifs qui donnera au béton sa célébrité actuelle comme le matériau de partout et de chaque jour. Dans ce chapitre en va reconnaître ce matériau d'une manière plu détaillé.

1. C'est quoi le béton ?

Le béton est un matériau monolithique qui associe des granulats durs (grains de pierre, sable, gravier, cailloux) de diverses dimensions, par un liant hydraulique, généralement le ciment, à la présence d'eau. Pour former un mélange qui se présente sous forme d'une pate se durcit à l'air en selon la forme du moule dans lequel il a été coulé.

2. Origine, invention et évolution technique du béton :

Les premiers bétons ont été fabriqués à base de chaux, matériau dont la production associée à l'art du feu des potiers, remonte à la préhistoire. Ce liant a été utilisé dans les constructions de toutes les civilisations sous la forme d'enduit, de mortier ou pour stabiliser les terres. L'origine de cette invention n'a pas été datée. Ces premiers bétons ont été mis en œuvre massivement par les Romains. Avec ce matériau, ils ont pu édifier les ouvrages imposants qui marquent leur civilisation : infrastructures monumentales ou édifices emblématiques.

Le béton qu'ils mettaient en œuvre exploitait la technique de la fabrication de la chaux, amélioré grâce aux agrégats de pouzzolane (Pozzuoli, village situe sur les flancs du Vésuve au Nord de Naples, Italie) associée au mortier, conférait une résistance supérieure aux ouvrages. Les Romains constataient avec cette découverte les vertus des propriétés de l'agrégat. La technique tomba dans l'oubli en Occident, au profit des constructions en bois au cours du premier millénaire, puis, au Moyen-Age et à la Renaissance, au profit de l'art de bâtir qui conjugait la taille de pierre avec les connaissances en stéréotomie.²

² Hoyet, N. Op. Cit. p. 108.

Au siècle des lumières, la solidité des bétons romains aiguïsa la curiosité et certains s'essayèrent à le reproduire de nombreux essais plus empiriques que scientifiques, tant en France et Angleterre. Ils tracent le chemin de l'invention du ciment, par des formules sur la théorie d'hydratation de Louis Vicat en 1817 ; et ouvrant des nouvelles portes sur la recherche dans le domaine de production de fabrication de ciment. Le premier sera celle du ciment Portland par l'Écossais Aspdin qu'est déposé son brevet en 1824. Suivi de quelque année plus tard des ciments artificiels étant inventés, et des nouveaux brevets sont déposés sur le champ de leurs applications et leur fabrication ; qui exige des installations industrielles importantes (les cimenteries). Qui marque le début du développement de la technologie du béton.³

Les diverses expérimentations sur le béton se sont très vite accompagnées de son association avec des armature métallique, une association qui confère à l'ouvrage une capacité à résister autant à la compression qu'à la traction. C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor.

Le XXe siècle va voir le développement considérable du béton et, parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet. Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment ou dans les travaux publics.⁴

3. Les constituants de béton :

3.1. Les granulats :

Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton. Ils sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm.

Les granulats améliorent la matrice de ciment et augmentent la résistance de la pâte par la limitation de propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Donc le choix d'un granulats est un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues.

³ Hoyet, N. Ibid. p. 109.

⁴ Centre d'information sur le ciment et ses applications. *Les bétons : formulation, fabrication et mis en œuvre*. Paris : auteur, 2001, p. 77.

3.1.1. Historique :

Les roches dures, forment la matière première des granulats extraites des carrières parfois éloignées de leur lieu d'utilisation, telles que les grès, le granit ou le calcaire ont été utilisées pendant des siècles pour construire des édifices et des bâtiments. L'empire romain a bâti son immense réseau de routes et d'aqueducs en utilisant entre autres des granulats. L'essor, du XIX^{ème} siècle à nos jours ; l'invention du ciment et de béton au XIX^{ème} siècle à provoquer une accélération de l'utilisation de ces granulats. Aujourd'hui, on trouve différentes formes des granulats, telle : les morceaux de roche, les granulats de recyclage...

3.1.2. Types des granulats :

Les professionnels distinguent deux grands types principaux de granulats les plus utilisés pour le béton en fonction de leur nature et de leur origine. Ils sont soit :

- D'origine naturelle : telle les granulats minéralogiques (calcaire quartz), Les granulats alluvionnaires, et les granulats de carrière.
- D'origine artificielle : telle les sous-produits industriels, granulats industriels à hautes caractéristiques, granulats allégés par expansion ou frittage, et les granulats légers d'origine végétale et organique (bois, polystyrène expansé).

3.1.3. Technique de fabrication des granulats :

3.1.3.1) Extraction :

Il effectue par l'abattage à l'explosif pour les roches dures, par pelle mécanique pour les roches moins dures (granulats concassés) ; et par dragage en site aquatique (granulats alluvionnaires). Ensuite, cette matière première chargée et transportée au centre de traitement.

3.1.3.2) Concassage :

La phase de concassage permet de réduire, de façon successive, la taille des éléments. Il s'exécute dans des concasseurs de différents types (concasseurs giratoires, à mâchoires, à percussion, à projection centrifuge). C'est une opération primordiale pour les granulats de roches massives, et moins intéressante pour les granulats alluvionnaires.

3.1.3.3) Criblage :

Cette opération de criblage ou de tamisage permet de sélectionner les grains. Elle s'exécute en deux types des cribles : soit cribleur rotatif, ou cribleur vibrant. Le crible ne laissant passer dans ses mailles que les éléments inférieurs à une certaine taille. Pour obtenir des granulats tirés soit correspondant à une dimension précise, ou entrant dans une fourchette définie.

3.1.3.4) Lavages :

L'opération de lavage ou dépoussiérer permet d'obtenir des granulats propres. Il est réalisé généralement conjointement avec l'opération de criblage. La propreté des granulats est une nécessité. La présence de boues, d'argiles ou de poussière mélangées aux matériaux ou enrobant les grains, empêche leur adhérence avec les liants. Ce qui interdit alors leur utilisation.

3.1.3.5) Stockage et livraison :

Une fois réduit, traités, les granulats sont classés suivant leurs nature, leurs formes et leurs dimensions précis ; dans les aires de stockage soit sous forme de tas individualisés ou bien en trémies ou silos. Pour faire les livrer à la clientèle.

3.1.4. Caractéristiques des granulats :

Les caractéristiques des granulats sont déterminées par un ensemble des essais pour objectif d'effectuer son bon choix pour atteindre une bonne qualité du béton.

3.1.4.1) Les caractéristiques géométriques :

- Granulométrie : La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat. Elle consiste à tamiser le granulat, sur une série de tamis à mailles carrées avec des ouvertures carrées normalisées et s'échelonnent de 0,08 mm à 80 mm, et à peser le refus sur chaque tamis qui forme la classe granulaire caractérisé par le rapport d/D (d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains).
- Module de finesse : Le module de finesse d'un sable qui caractérise sa granularité comme le $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus, exprimés en pourcentages, sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5.0 mm.⁵
- Coefficient d'aplatissement : Il caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur.

3.1.4.2) Les caractéristiques physico-chimiques :

- Masse volumique en vrac ou masse volumique apparente : C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis.
- Porosité : C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Cependant, la porosité est importante dans le cas des granulats légers.

⁵ Centre d'information sur le ciment et ses applications. Op. Cit. p. 90.

- Propreté des granulats : Les granulats employés doivent être propres parce que ils sont influés la qualité du béton autant sur sa mise en œuvre que sur ses performances finales. La propreté est caractérisée par la teneur en particules fines (< 0,5 mm) essentiellement argileuses ou d'origine végétale ou organique dont une valeur acceptable mesurée par l'essai appelé « équivalent de sable piston PS ». L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm, qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

3.1.4.3) Les caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression. Par contre, il existe des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats. Tell :

- Essai Micro Deval : C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure.
- Essai Los Angeles : Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Le coefficient Los Angeles mesuré en fin d'essai caractérise le granulat et comparer à un coefficient de référence.

3.2. Ciment :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates d'aluminates de calcium porté à 1 450 - 1 550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante. Qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.⁶

3.2.1. Historique :

Dans l'Antiquité déjà, les Romains utilisaient un mortier hydraulique composé de la chaux mélangé des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles ou de brique pilée. Ils obtenaient « l'Opus Caementitium » ou « ciment romain » considéré comme le précurseur de notre béton et qui est à l'origine du mot « ciment ». Cette propriété d'hydraulicité du mélange est restée

⁶ Drouna, K. (communication personnelle [polycopie]). *Technique des matériaux de construction*. Jijel : Département d'architecture université Mohamed Seddik Ben Yahia, 2013, chap. III, p. 01.

totalement inexploité jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore en 1817 la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel.

En 1824, l'Écossais J. Aspdin élabore et breveta un produit proche du ciment obtenu par cuisson d'un mélange finement broyé de calcaire et d'argile. Ce liant permettait de confectionner un béton comparable à la pierre de la péninsule Portland, une pierre calcaire très résistante, qui est couramment utilisée dans la construction en Angleterre. C'est pour cette raison qu'on l'appelle « ciment Portland ».⁷

3.2.2. Procède de fabrication du ciment :

« Pour produire une tonne de clinker de ciment Portland, il faut compter une tonne et demie de matières premières »⁸. Ces matières premières sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 % et 20 %. La fabrication est résumée dans quatre opérations :

3.2.2.1) L'extraction et concassage des matières premières :

Ils sont extraits de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus par la brise des roches en morceaux sont transportés vers l'atelier de concassage, fréquemment à proximité de la carrière, pour être réduits en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

3.2.2.2) Préparation de CRU :

Les grains de calcaire et d'argiles sont finement broyés et mélangés pour former « le CRU » dans des proportions définies, en fonction de la technique de fabrication qui sera utilisée. A cette étape des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts (la bauxite, des oxydes de fer...) en faible proportion qui modifieront les propriétés du ciment.

Les cimenteries utilisent deux techniques pour l'homogénéiser le cru, par la voie sèche ou par voie humide. Avec la voie sèche consiste à homogénéiser le mélange dans des broyeurs-sécheurs ; on obtient une poudre à la finesse. Pour la voie humide les matières premières sont agglomérées sous forme de pâte.

3.2.2.3) Cuisson de CRU (calcination) :

La cuisson est réalisée en deux temps. Un premier temps, c'est la décarbonatation (faire détacher les molécules de gaz carbonique du calcaire) pour transformer en chaux ; par le passage

⁷ Holcim. *Guide pratique du béton*. 6^{ème} éd. Suisse : auteur, 2015, p. 10.

⁸ Holcim. *Ibid.*

de mélange de cru dans l'air chaud d'une température varier de 650 °C à 900 °C. Dans un deuxième temps, dans des fours rotatifs avec des température varie entre 1 450 °C et 1 550 °C.

La cuisson permet de transformer le CRU en CLINKER (forme de grains de 0.5 à 4 cm de diamètre) qui est refroidi rapidement, à une température de 50 à 250 °C, à la sortie de four pour éviter une forte cristallisation.⁹

3.2.2.4) Broyage et livraison :

Le clinker ensuite finement broyé par des fragmentations successives des grains, ce qui augmente la surface de contact du clinker pour développer les propriétés hydrauliques du ciment. Pour modifier et améliorer les propriétés du ciment et pour régulariser la prise, Des constituants sont associés au clinker.

En fin le ciment est expédié en vrac ou en sac sur les lieux de fabrication du béton.

3.2.3. Types de ciments :

3.2.3.1) En fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classe en fonction de leurs compositions selon les normes NF P15-301 (norme française), et NE 197-1 (norme européenne).

Tableau 1: Les types de ciment.
Source : Hoyet Nadia, 2013, p. 116.

| | | | | |
|--|----------------------------------|-----------------|--|--|
| Ciments courants, identifiés par types, selon la normalisation européenne EN 197-1 : | Ciment portland | CPA – CEM I | 95 à 100% de clinker | De teinte grise soutenue. Pour ouvrage de génie civile et de préfabrication : pont et grandes structures élance |
| | Ciments portland composé | CPJ – CEM II | Clinker :65 à 94% ; fillers calcaires : 6à 35 %. Mais aussi pouzzolane naturelle, cendres volantes ou schistes calcinés. | De teinte grise. Utilisé pour le bâtiment ou les traitements de sol. |
| | Ciment blanc | CEM I ou CEM II | Ciment portland ou portland composé, exempt de minéraux colorants tels les oxydes de fer. | De teinte blanche. Leur finesse et leur pureté induisent de bonnes performances. |
| | Ciment de haute-Fourneau | CHF CEM III | Clinker 20 à 64 %. Cendres volantes de haute-fourneaux. | Faible chaleur d'hydratation. Utilisé pour fondation, revêtements de tunnels ou pour béton immergés. |
| | Ciment pouzzolanique | CPZ CEM IV | Clinker : 45 à 90 %. Pouzzolane naturelle ; fumées de silice ; cendre volantes | N'est pas fabriqué en France. |
| | Ciment au laitier et aux cendres | CLC CEM V | Composées avec des laitiers de haut fourneau, des cendres et des pouzzolanes | La substitution du clinker pour d'autre constituants réduit les émissions de CO2.pour travaux hydraulique souterrains, fondations et travaux en milieu agressif. |

⁹ Hoyet, N. Op. Cit. p. 112.

| | | | | |
|--|------------------------|-----------------|--|--|
| Ciments spéciaux répond des normes spécifiques : | Ciment prompt naturel | CPN NF P 15-314 | Obtenu par cuisson de calcaires argileux. | Prise très rapide. Pour scellement, réparation, colmatage. Résiste aux milieux chimiquement agressifs. |
| | Ciment alumineux fondu | CA NF P 15-315 | Obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et de bauxite. | De couleur noire. Résistance très élevée au jeune âge. Peut être mis en œuvre par temps froid (-10°C). Réfractaire. Résiste les températures jusqu'à :1300 °C. |

3.2.3.2) En fonction de leurs résistances normales :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; dessous classe R sont associées à ces 3 classe principale pour designer des ciments dont les résistances au jeune Age sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5.¹⁰

3.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau additionnée au mélange de ciment, d'addition et de granulats lors du malaxage du béton. Il joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle est nécessaire au durcissement du ciment, puisque la réaction chimique du ciment (hydratation) est induite par l'eau. D'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais par sa consistance plastique. Le rapport eau/ciment, qui a une valeur maximale de 0.65, influe sur la résistance et la prise du béton.

L'eau destinée au gâchage doit être claire, incolore et inodore. Elle ne doit pas : former de mousse persistante après agitation ; contenir une quantité trop importante de substances nuisibles pour éviter les phénomènes de :

- Ralentissement ou suppression du processus de prise et de durcissement.
- Entraînement excessif d'air impliquant une baisse de résistance du béton.
- Corrosion des armatures.

3.3.1. Types des eaux de gâchage :

L'eau potable peut être utilisée sans contrôle comme eau de gâchage. Tous les autres types d'eau comme les eaux récupérées dans les centrales à béton, l'eau de la nappe phréatique, les eaux superficielles naturelles ainsi que les eaux à usage industriel doivent au contraire être soumises à des analyses en conformité avec les normes.

¹⁰ Drouna, K. Op. Cit. p. 09.

3.4. Les adjuvants :

Les adjuvants se présente sous la forme de résine liquide issues de la technologie des polymères. Ils modifient en les améliorant les propriétés du béton. D'usage récent, ils sont de plus en plus employés, notamment pour les bétons de haute performance. Ils entrent pour moins de 5% dans la masse globale des bétons. Ils se classent en trois types principaux :

- Les plastifiant et super-plastifiants : ont l'effet de modifier l'ouvrabilité des bétons.
- Les accélérateurs et les retardateurs de prise : modifiant les délais de prise, utiles en fonction des conditions climatique.
- Les entraîneurs d'air, les hydrofuges et les rétenteurs d'eau : améliorent la résistance des bétons vis-à-vis de l'extérieur.

Les bétons peuvent recevoir d'autre adition sous forme des poudres pour des raison d'esthétique telle : teinte de couleurs, des oxydes métalliques...

4. Mise en œuvre du béton :

Pour la fabrication de béton ; il faut mélanger les constituants déterminés, par formulation choisie, en fonction des caractéristique physique et mécanique souhaités. Du stockage jusqu'au livraison sur l'ouvrage, les opérations successives de fabrication doivent respecter un ensemble de contraintes conservant les qualités des constituant, de façon que leur mélange soit homogène.

4.1. Le stockage des constituants :

Les granulat (sables, graviers, cailloux...) doivent être stockés par nature et par classe granululaire dans des silos qui protègent des intempéries, ou plus souvent placés à l'aire libre sur des chape de béton de propreté pour éviter les salissures dues au contact avec le sol. Pour les ciments, sont très sensible.

Ils doivent stocker soit dans des sacs dans un abris couverte sur plancher isolé, soit dans des silos étanche et propre. Pour l'eau il est fournis directement par les réseaux de distribution d'eau est utilisable directement sans stockage.

4.2. Formulation du béton :

La formulation du béton, c'est-à-dire le choix et le dosage précis des constituants du béton, est une opération très importante dans le processus de construction car elle détermine le comportement ultérieur de la matière en œuvre. Cette opération est effectuée en anticipation de la qualité et les performances attendus des ouvrages. On intègre à cette étape les exigences définies par les propriétés physiques et architecturales souhaitées.

4.3. Préparation du béton :

Elle s'effectue par le malaxage des matériaux qui entrent dans la composition de béton voulu avec ses dosage précise, pour but d'obtenir un mélange homogène des constituant. L'exécution de cette opération se développe soit directement sur chantier, pour petit ouvrage, dans des bétonnières ou des malaxeurs mobiles ; soit industriellement, pour les chantiers relativement peu éloignés, sous forme :

- Bétons prêts à l'emploi : préparent en usine dans des centrale à béton ; de grande capacité, automatisé et parfaitement équipé pour satisfaire les exigences les plus stricts en matière de protection de l'environnement ; et sont livré frais est prêt à être coulée.
- Béton préfabriqué : consiste à mouler en usine des éléments de la construction ou des parties d'ouvrage qui seront monter sur chantier.

4.4. Mise en forme de béton :

C'est une étape fondamentale de la constricton au cours de laquelle le béton prend sa forme définitive. Tous les acteurs sont concernés, de l'ouvrier au chef d'équipes, en passant par le chef de chantier, le conducteur de travaux, l'ingénieur de l'opération, arrivant à l'architecte qui a un rôle très important dans le contrôle de cette opération ; qui se passe selon une des techniques suivantes :

- Béton projeté : la technique comprise de mis en œuvre le béton par projection sur une surface, plus souvent armes en treillis métallique, à l'aide d'une machine à air comprimé qui envoie le béton avec une force telle qu'il est compacté en surface. Ce béton projeté possède les mêmes propriétés qu'un béton banché.
- Béton banché : le béton est coulé entre des banches (parois du coffrage mobile) et adopte en durcissant la forme de ces derniers. Ils ne doivent pas se déformer sous l'effet de la poussée du béton, ni lors de la vibration. Cette technique demande une logistique de chantier rigoureuse pour effectuer une rotation optimisée des banches.
- Béton préfabriqué : il consiste de monter sur chantier les éléments de construction mouler en usine à l'aide de mortier ou avec des accrochages mécaniques.

A la fin de mise en œuvre l'édifice conçu en béton peut reçoit des opérations de finition et du protection, telle : le traitement des façades, emploi des bâches étanches, installation des tôles.

5. Performances du béton :

5.1. Comportement microscopique :

La microstructure du béton fait apparaître des grains de matériaux incohérents (graviers, sables) reliés par des colonnes très fines constituées de cristaux enchevêtrés : le ciment. Les graviers et les sables ont leur propre cohésion interne : cristalline pour les quartz, les feldspaths, les calcites et les silex ; résultant de leur propre formation pour les roches sédimentaires (grès et calcaires). Le ciment établit des pontages entre ces grains par la mise en jeu de liaisons de contact entre les surfaces.¹¹

5.2. Résistance mécanique :

Dans les poteaux et les arcs, la matière est sollicitée en compression ; Dans les poutres, l'énergie nécessaire à la déviation est mobilisée par une déformation de nomme flexion et se traduit par l'apparition d'une courbure caractérisée par sa flèche. La résistance d'un béton est une notion toute relative à l'élément conçu et elle dépende de la méthode d'essai employer, sur les éprouvettes de forme cylindrique (couramment utilisé), pour évaluer la résistance sous les charges appliquées.

La résistance en compression se mesure par la compression axiale de cylindre droit de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre après 28 jours de coulage. La mesure de résistance en traction se fait par la mise en traction de cylindre, il est nécessaire de sciage les extrémités de cylindre et le coulage de tête de traction parfaitement centrées. Pour la résistance en flexion s'effectue en association avec la traction par l'essai la plus courante traction-flexion sur des éprouvettes prismatique d'élanement.

5.3. Comportement mécanique :

5.3.1. Comportement du béton a la compression :

Lorsqu'un effort de compression tend à rapprocher les grains entre eux et à ciment on parle d'effort de compression. Les forces internes cristallines de nature électrostatique sont alors sollicitées et s'opposent au rapprochement imposé. Il y a apparition d'une déformation (raccourcissement) dans le sens des efforts appliqués et, la quantité de matière restant constante, d'une déformation latérale (gonflement), la rupture n'aura lieu qu'au moment où l'énergie fournie sera supérieure à l'énergie interne de cristallisation des constituants les plus faibles ou à la possibilité

¹¹ Bourcier, J., Rollet, J., et Schumacher, J. *Construire avec les bétons*. Paris : LE MONITEUR, 2000, partie II, p. 445.

de déformation latérale du bloc sollicité (on appelle phénomène de flambement l'éclatement transversal ou l'instabilité de la forme).¹²

5.3.2. Comportement du béton a la traction :

Les efforts de traction agissant sur le bloc de matière sont divergents, c'est-à-dire qu'ils ont tendance à éloigner les constituants les uns des autres. Les grains et les cristaux de ciment résistent en interne par leurs forces de cohésion électrostatique, mais ils tendent à se séparer. Les forces de liaison de contact sont faibles, tout comme les forces internes des aiguilles de ciment. La rupture aura lieu très vite et proviendra de la séparation des grains et du ciment ou de la rupture des aiguilles.¹³

5.4. Déformation des bétons :

5.4.1. Le fluage :

Sous l'action des charges de traction ou de compression appliquées, les matériaux sont susceptibles de se déformer de façon différée par réorganisation interne de leur structure. Cette déformation différée est facilement observable dans les matériaux organiques (fils de Nylon) et dans certains matériaux reconstitués (le bois aggloméré).

Le béton va également évoluer sous chargement. La déformation produite sous le poids propre ou sous les charges permanents (cloisons, revêtement de sol) vent s'accroître au fil du temps jusqu'à atteindre deux fois sa valeur de départ. On parle alors de déformation différée du béton. Les éléments placés sur les supports en béton vont subir un déplacement entraîné par le fluage du béton. C'est pourquoi il est souhaitable d'attendre le plus longtemps possible avant de poser les cloisons d'un bâtiment à dalles en béton pour tenir en compte ces déplacements différés et éviter d'éventuelles fissurations. Les règles professionnelles fixent les valeurs limites des déformations des supports en fonction du risque encouru.

5.4.2. Le retrait :

On observe sur une éprouvette de pâte, pure de ciment, de mortier, de béton ; exposée à l'air, une diminution de longueur d'environ 2 mm par mètre pendant son durcissement. Quatre phénomènes interviennent dans cette variation de volume du béton, qui sont : le ressuage, le retrait plastique, la contraction thermique après la prise, l'auto dessiccation.

¹² Bourcier, J., Rollet, J., et Schumacher, J., Op. Cit.

¹³ Ibid.

5.4.3. Mouvements d'origine thermique :

La dilatation thermique caractérise la variation dimensionnelle subit un matériau, un ouvrage ou un élément d'ouvrage sous l'effet de la température. Le béton, est comme la plupart des matériaux, est dilatable : leurs dimensions s'accroissent sous l'effet d'une augmentation de la température, de même un abaissement de la température les fait se rétracter.

5.5. Résistance au feu :

Le béton est un matériau incombustible, par contre aux autres matériaux qui participent à la propagation et à l'alimentation du feu. A partir de 800 °C, le calcaire contenu dans le ciment se décompose et à partir de 1 300 °C, le béton devient une masse en fusion. Pourtant, les essais au feu et l'expérience ont montré qu'une structure en béton conserve sa résistance mécanique pendant un certain laps de temps alors qu'il est soumis à une température de plus de 1 000 °C. Cette propriété vient du fait que le béton présente une inertie à la propagation du flux de chaleur dans sa masse. Ainsi, un poteau de section carrée de 45 cm de côté est stable au feu pendant 4 heures. Il conserve ses propriétés mécaniques pendant cette durée. Un mur porteur en béton armé de 15 cm d'épaisseur est coupe-feu 2 heures. Il conserve ses propriétés mécaniques pendant cette durée et par ailleurs la température moyenne de la surface qui n'est pas exposée au feu reste inférieur à 140 °C.¹⁴

5.6. Résistance aux agressions de l'environnement :

5.6.1. Agressions d'origine climatique :

Elles sont de deux types bien différents : d'une part, les cycles de gel-dégel et, d'autre part, l'utilisation de sels fonçants pour déglacer les chaussées. Si l'on se limite au domaine des constructions, Whiting a bien cerné les conditions qui prévalent pour ce qui concerne le gel-dégel : « *Les bétons suffisamment âgés, lorsqu'ils sont secs, résistent naturellement aux cycles de gel-dégel sans précautions particulières... Les risques de dégradation par le gel n'existent que lorsque le béton est au contact de l'eau.* »¹⁵. L'explication de l'action du gel reste complexe et fait encore l'objet de recherches.

5.6.2. Agressions d'origine chimique :

Le béton résiste à des agents agressifs sont contenus dans l'atmosphère, en particulier le dioxyde de carbone, mais il s'agit aussi des chlorures et des sulfates, véhiculés par l'humidité ambiante. Le béton subit les efforts de ces agressions par le jeu des cycles de séchage et de

¹⁴ Hoyet, N. Op. Cit., p. 127.

¹⁵ Bourcier, J., Rollet, J., et Schumacher, J. Op. Cit., p. 458.

mouillage créés par les variations permanentes de l'humidité de l'atmosphère. Chlorures et sulfates seront abordés par la suite, car ils sont aussi dans les sols et parfois dans les eaux de pluie.

5.6.3. Isolation thermique :

Les expérimentations ont montré que le flux de chaleur propage lentement dans la masse des matériaux lourds, tels le béton. Tout matériaux transmettant la chaleur, sont caractérisé par sa conductivité thermique : faible pour les matériaux isolants et forte pour les métaux ; pour le béton elle est plus ou moins élevée ($1.75 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) lui rendre peut isolant.

5.6.4. Isolation acoustique :

L'isolation acoustique des bâtiments est fondée sur l'affaiblissement de la transmission des ondes des nuisances sonores propagent, émissent depuis les sources soit d'environnements extérieurs ou d'intérieurs, par l'ensemble des parois du bâtiments (façades, murs, planchers). La gamme des expérimentations montrant que le béton permet toujours d'obtenir des résultats efficaces en matière d'isolement acoustique. Il offre une solution efficace à la réalisation des parois et fournies des reposes souvent performantes pour le degré d'affaiblissement acoustique.

6. Progrès et diversification des bétons :

Depuis les premières applications du concept actuel du béton, au milieu du XIXe siècle, jalonnée de progrès résultant tantôt d'améliorations sur les constituants, tantôt d'adaptations des conditions de mise en œuvre, tantôt de l'application du matériau a de nouveaux types d'ouvrages. Les bétons contemporains résultent de ces progrès parfois imperceptibles dont il peut être intéressant de donner quelques exemples :

- Les ciments blancs déjà connus au début du siècle ont contribué au développement des bétons de parement.
- L'utilisation et la maîtrise du gypsage des ciments ont permis de retarder la prise et ont rendu possible les coulages en grande masse et la livraison de béton prêt à l'emploi.
- La mise au point de ciments spéciaux tels que les ciments alumineux ainsi que les ciments aux laitiers de hauts-fourneaux.
- Les outils de mise en place, coffrage, vibrateurs, pompes à projeter sont devenue plus fiables.
- Les moyens de traitement de surface se sont diversifiés (allant du béton lavé au béton désactiver en passant par le béton acidé) et sont appliqués aussi bien dans le bâtiment qu'en génie civil.

7. Types des bétons et ses caractéristiques :

Tableau 2: Les types de béton.
Source : Hoyet Nadia, 2013, p. 118.

| Types de béton | Propriétés et caractéristiques | Utilisation |
|--|---|---|
| Béton ordinaire | Résistance à la compression : 20 MaP | Ouvrage courants |
| Béton à hautes performances (BHP) | Résistance à la compression renforcée : 50 à 100 MaP, porosité réduite, performances mécaniques améliorées, grande durabilité (gel, érosion, corrosion) | Eléments structuraux élancés (section portantes réduites), ouvrages soumis à des conditions environnementales sévères |
| Béton fibré ultra-hautes performance : BEUP | Amélioration des propriétés des BHP (meilleures résistance mécanique et durabilité) ou des bétons de fibres classiques | Eléments structuraux très élancés ou fortement chargés, éléments de mur ou de façades, éléments décoratifs |
| Béton de fibres métalliques | Résistance à la traction améliorée, bonne résistance aux chocs | Dallages, caniveaux, regards |
| Béton de fibres synthétiques | Limitation du retrait, bonne résistance aux chocs | Dallages, éléments de murs, sculptures |
| Bétons de fibres de verre ou CCV : composites ciment verre | Bonne résistance à la flexion | Eléments décoratifs, vêtements, coques d'habillage |
| Bétons légers caverneux – béton granulats légers – béton de bois – béton de liège | Masse volumique réduite (entre 1 000 et 1 800 kg/m ³), perméabilité à l'air et à l'eau, absorption acoustique | Réduction des bruits d'impact : écrans acoustiques, chapes flottantes, allègement des ouvrages et drainage |
| Bétons isolants légers : - béton cellulaire – béton de polystyrène – béton mousse | Masse volumique réduite (375 à 800 kg/m ³), conductivité thermique réduite : (0.3 à 0.16 w/mK) | Murs et parois isolantes, chapes légères et isolantes |

8. Principaux avantages et inconvénients du béton :

8.1. Avantages du béton :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé dans des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses.
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisantes pour ne pas poser le problème de stabilité.

- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu énergie pour sa fabrication.

8.2. Inconvénients du béton :

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste les quelques inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé.
- Sa faible isolation thermique.
- Le cout élevé en cas de modification d'un ouvrage.

Conclusion :

Un béton durci performant et souple à l'emploi, admet à être présenter dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics. Il a mérité sa place par ses caractéristiques et ses propriétés en matière de résistance au feu, aux charges, aux agressions d'environnement. Son isolation phonique, sa protection d'édifice contre les risques d'accroissement de l'humidité, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité des formes, des couleurs et des immenses possibilités de conception. Le béton est devenu une partie de notre cadre de vie, mais avec une utilisation d'une façon timide dans les remplissages et dans les ambiances intérieures à cause de ses inconvénients qui sont faire limiter leur application que dans les éléments structuraux et dans les ossatures.

Chapitre 02:
Le béton léger :

Introduction :

Les bétons légers peuvent présenter des avantages spécifiques comparativement aux bétons classiques. Ils sont inventés pour corriger les inconvénients des bétons courants ; comme le poids spécifique, l'aptitude d'offrir le confort thermique, ainsi à d'autre solution technique. Dans ce chapitre on va définir les différentes notions concernant ce thème, afin de bien comprendre les propriétés et l'apport de ces bétons au projet architecturale. Ainsi à l'extraction les interventions pour corriger les défaillances des bétons traditionnelles.

1. Le béton léger :

Le béton léger est un matériau artificiel, composé en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (le plus souvent du sable et des gravillons). Il fait partie de la gamme des bétons spéciaux. On obtient par l'ajout au mélange des ingrédients spécifiques, ou à l'aide de techniques spéciales de production qui permettent d'obtenir une diminution de masse volumique, soit 500 à 900 kg/m³ pour le béton léger au lieu des 2 000 à 2 500 kg/m³ d'un béton « ordinaire ». ³¹

2. Différents types des bétons légers :

- Les bétons cellulaires. (A gauche)
- Les bétons sans fines (caverneux). (Au milieu)
- Les bétons de granulats légers. (À droite)

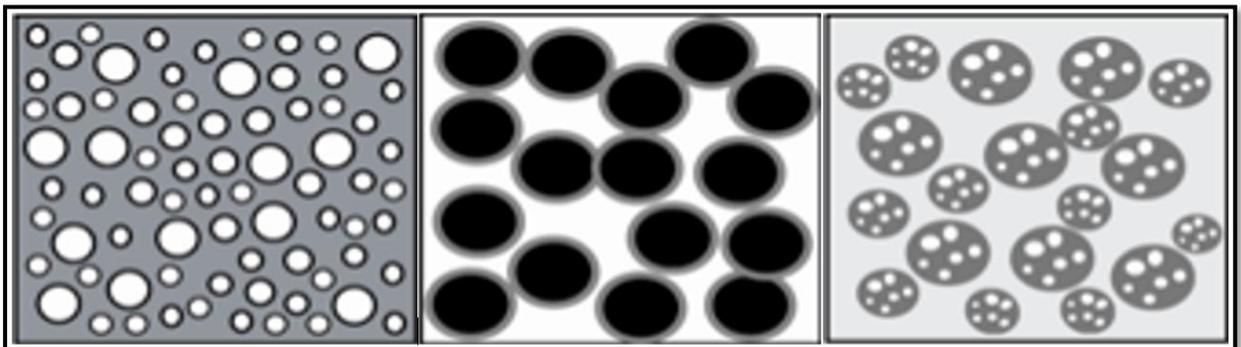


Figure 1 : Les types des bétons légers.
Source : Shink, M., 2003, p. 04.

2.1. Le béton cellulaire :

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland.

³¹ <http://matériauxdeconstructiondapresguerre.be/materiel/beton-leger/>. (Consulté le : 12/06/2018).

Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi ces agents, la d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel ; et d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis ; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier.

2.1.1. Composition :

Le béton cellulaire est un matériau silico-calcaire autoclave, constitué uniquement de matériaux minéraux (Sable, ciment, chaux, gypse), et un agent d'expansion pour obtenir les bulles d'air. Le béton cellulaire est constitué d'environ 80 % d'air et de 20 % de matière. En fonction de la quantité de matière et de composition utilisée, les performances physiques et mécanique du produit peuvent être adaptées à l'usage demandé. Pour les usages courants, la masse volumique se situe entre 400 et 500 kg/m³.³²

2.1.2. Domaine d'utilisation :

Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeter. Le béton cellulaire est un matériau à l'opportunité d'être mouler, malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés recherchées pour l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie.³³

Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai.

2.2. Le béton caverneux :

Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton. Un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une épaisseur de 1 à 3 mm. Cette

³² Guegan, C. et al. *Memento du béton cellulaire*. Paris : Eyrolles, 2005, chap. I, p. 04.

³³ Shink, M. *Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers*. [En ligne] Thèse de doctorat en génie civile. Québec : Université Laval, 2003, chap. I, p. 05. Disponible sur : <http://docplayer.fr/28537174-Compatibilite-elastique-comportement-mecanique-et-optimisation-des-betons-de-granulats-legers.html>. (Consulté le : 19/03/2018).

substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression.³⁴

2.2.1. Composition :

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainant³⁵. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats.

2.2.2. Domaine d'utilisation :

Leur utilisation n'est généralement pas associée à la recherche de la légèreté du produit, mais bien davantage pour les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment. On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux.³⁶

2.3. Les bétons de granulats légers :

Le béton de granulats légers se distingue aux autres par sa masse volumique réduite, obtenue grâce à l'ajout de granulats légers à haute porosité ou de faible masse volumique. Ce n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques. On trouve un bon nombre de références en liaison avec son utilisation. Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers. Ils existent en nombreuse variété, que l'on peut classer de différentes façons. La classification la plus courante est celle basée sur l'origine des granulats. On peut ainsi distinguer deux grands groupes.

2.3.1. Les bétons de granulats légers naturels :

Il s'agit des bétons fabriqués avec de la ponce ou de la pouzzolane matériaux volcaniques naturels de structures très poreuses qui permettent par concassage des granulats légers. Ces ma-

³⁴ Contant, M. *Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux*. [En ligne] Projet d'application en génie de la construction. Montréal : Ecole de la technologie supérieure, 2000, chap. I, p. 06. Format PDF. Disponible sur : http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape4/PQDD_0018/MQ56050.pdf. (Consulté le : 19/03/2018).

³⁵ Shink, M., Op. Cit., p. 05.

³⁶ Contant, M., Op. Cit., p. 07.

tériaux sont relativement peu connus en Algérie, leur emploi reste donc sans domaine d'application, mais il n'est pas exclu, que dans l'avenir, certaines de leurs propriétés les rendent plus avantageux pour certaines réalisations.



*Photos 1 : Les granulats légers naturels.
Source : <https://www.lafarge.fr/granulats-legers>.*

2.3.2. Les bétons de granulats légers artificiels :

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase Taiwan, et N.Y.T. (Neopolitan Yellow Tuff) en Italie ; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore le polystyrène expansé (EPS) :



*Photos 2 : Les granulats légers artificiels.
Source : <https://www.lafarge.fr/granulats-legers>.*

2.3.3. Composition :

L'étude de la formulation d'un béton de granulats légers consiste à définir la composition optimale des granulats et le dosage en ciment et en eau, de façon à atteindre les propriétés du béton recherchées.

3. Classification du béton léger :

La classification des bétons légers est en fonction de la masse volumique, cette classification classe les bétons légers en trois catégories :

- **Le béton léger de structure** : dont la masse volumique est comprise entre 1 350 et 1 900 kg/m³ ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.
- **Le béton léger de faible masse volumique** : il a une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m³ n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique.
- **Le béton de résistance moyenne se situe entre les deux** : sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa.

4. Formulation :

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons de granulats rigides. Une attention particulière doit cependant être portée à la densité apparente et à l'absorption des granulats.

L'étude de la formulation d'un béton consiste à définir la composition optimale des granulats et le dosage en ciment et en eau, de façon à atteindre les propriétés du béton recherchées.³⁷ Dans l'ensemble, le processus de formulation comprend les étapes suivantes :

- Définir la nature de l'ouvrage.
- Etablir les propriétés du béton en fonction de la nature de l'ouvrage.
- Etablir le dosage des constituants permettant d'atteindre les propriétés recherchées.

4.1. La nature de l'ouvrage :

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

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

³⁷ Dreux, G. et Festa, J. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. 8^{ème} éd. Paris : Eyrolles, 1998, p. 339.

4.1.1 Le béton léger structural :

L'Association canadienne du ciment Portland (ACCP) définit le béton léger structural comme un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 15 MPa dont la masse volumique est inférieure à 1 850 kg/m³.

4.1.2. Le béton léger architectural :

L'association canadienne du ciment Portland définit un béton léger architectural comme étant un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours comprise entre 0,7 et 7 MPa et dont la masse volumique varie entre 240 à 1 440 kg/m³.

On peut obtenir un béton de masse volumique aussi faible de trois façons :

- Par l'utilisation de granulats ultra- légers (la perlite, la vermiculite et les billes de polystyrène, ...).
- Par l'utilisation d'un agent moussant.
- Par la confection d'un béton caverneux.

4.2. Propriétés des bétons légers :

La description des propriétés des bétons axée sur les éléments suivants :

- La faible masse volumique.
- La durabilité.
- La rhéologie à l'état frais.
- Les propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité, etc.).

4.2.1. La masse volumique :

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulats et en faisant varier les proportions des différents constituants.³⁸

4.2.2. La durabilité :

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

³⁸ Herihiri, O. *Formulation et caractérisation des bétons légers*. [En ligne] Thèse de magistère en génie civile. Biskra : Université Mohamed Khider, 2010, chap. I, p. 56. Format PDF. Disponible sur : http://thesis.univ-biskra.dz/2652/1/M%C3%A9moire_GC_2010.pdf. (Consulté le : 13/04/2018).

4.2.3. La rhéologie a l'état frais :

La rhéologie du béton à l'état Frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité. Les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages.³⁹

4.2.4. Les propriétés mécaniques :

Parmi les propriétés mécaniques, on retrouve la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. Ces propriétés sont des paramètres secondaires dans la conception d'un béton ultra-léger puisque leur importance est relativement mineure pour ce type de béton. Toutefois, on ne peut les négliger puisque tous les bétons, peu importe l'application, nécessitent un minimum de résistance mécanique.⁴⁰

4.3. Le dosage :

Le dosage consiste essentiellement à déterminer la proportion des constituants de manière à produire le béton répondant aux qualités du béton recherchées. Cependant, ce dosage n'est pas aléatoire puisque l'obtention des qualités recherchées repose sur des principes, tel : la qualité de la pâte, type de granulat, rhéologie.

Les propriétés du béton varient essentiellement en fonction des matériaux utilisés et de leur dosage. Les principes de dosage font référence à quatre principaux facteurs :

- La qualité de la pâte de ciment hydraté.
- La qualité des granulats.
- La rhéologie recherchée.
- Les propriétés mécaniques.

5. Les constituants du bétons légers :

Le béton conventionnel est un matériau relativement simple à fabriquer dont les composantes sont bien connues. Cependant, l'arrivée de nouvelles contraintes techniques, économiques et environnementales a conduit les chercheurs à expérimenter de nouveaux matériaux

³⁹ Contant, M. Op. Cit, p.08.

⁴⁰ Benmalek, M. et Bederina, M. Conférence : « *Les performances mécaniques et thermiques d'un béton léger à base de déchets industriels solides et de granulats de bois* ». 2014, Université du 08 mai 1945 à la faculté des Sciences et de la technologie de Guelma, Guelma : auteur, 2014, p. 06.

au fil des années. Cette section a donc pour but de présenter une description sommaire des principaux constituants des bétons légers.

5.1. Les liants hydrauliques :

Tous les ciments et Les liants hydrauliques, sous forme des poudres minérales qui ont la propriété de réagir au contact de l'eau et de former des hydrates, sont aptes à la production de bétons légers. En cas d'éléments de construction ayant une section supérieure à 40 cm, il faut tenir compte du fait que le granulats léger peut freiner la dissipation de la chaleur d'hydratation. Par conséquent, les températures plus élevées au sein de l'élément de construction peuvent engendrer des fissures. Pour ces cas-là, il est recommandé de choisir des ciments à faible chaleur d'hydratation.

5.2. Les ajouts minéraux :

On définit les ajouts minéraux comme étant tout matériau autre que le ciment, l'eau, les granulats qui sont ajoutés au béton et qui ont une réaction d'hydratation avec l'eau et le ciment. Il existe trois grandes familles d'ajouts minéraux :

- Les cendres volantes, sous-produits de la combustion du charbon dans les centrales thermiques.
- Les laitiers de haut fourneau. Sous-produits de la production de la fonte.
- Les laitiers de haut fourneau. Sous-produits de la production de la fonte.

5.3. Les ajouts cimentaires :

Il est possible d'ajouter de la fumée de silice dans la formulation du béton léger pour améliorer ses résistances mécaniques. La fumée de silice est un ajout cimentaire qui réagit avec le ciment et l'eau du béton (action pouzzolanique) et comble les vides interstitiels entre les granulats du béton.⁴¹

5.4. Les granulats légers :

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Considérant l'importance de ceux-ci, il convient donc d'exposer les principales caractéristiques et les types de granulats utilisés dans la confection de bétons de granulats légers. La granulomé-

⁴¹ Herihiri, O. Op. Cit, p.52.

trie, la forme, la texture, la densité, l'absorption, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la réactivité, la propriété thermique et la résistance au gel sont autant de caractéristiques d'un granulat qui vont influencer directement la formulation du béton.

Les grandes familles des granulats légers sont les suivantes :

- Granulats naturels : (d'origine minérale ou végétale).
- Granulats obtenus par traitements : (d'origine minérale ou végétale).
- Granulats fabriqués spécialement : (granulats artificiels).
- Les matériaux légers de recyclage : (Les plastiques, Les caoutchoucs).

5.5. Les adjuvants :

Dans le béton, les adjuvants sont devenus des composants indispensables pour atteindre les propriétés recherchées. On utilise ces adjuvants chimiques, entre autres, pour retarder ou pour accélérer la prise du ciment, pour réduire la quantité d'eau dans la pâte. Pour fluidifier ou pour entraîner de l'air. Leurs multiples applications résultent de leurs effets chimiques ou physiques sur les grains de ciment et sur la pâte de ciment.

Malgré cette diversité, deux catégories d'adjuvants sont plus souvent utilisées pour la confection de bétons légers. Il s'agit des plastifiants pour leur aptitude à fluidifier le béton et les agents entraîneurs d'air pour contrer les effets dus aux cycles de gel-dégel.

5.5.1. Les super plastifiants :

Les super plastifiants sont des produits de synthèse, fabriqués pour les besoins de l'industrie du béton. Ils sont constitués de polymères dont la composition et la taille sont ajustées pour optimiser l'effet dispersant. La pureté de ces produits de synthèse permet de les utiliser à fort dosage, sans être à la prise avec des effets secondaires tels que l'entraînement d'air et les retards de prise du ciment. Cependant, leur coût est relativement élevé.

5.5.2. Les agents entraîneurs d'air :

On retrouve sur le marché plusieurs agents entraîneurs d'air, mais leur composition chimique se résume à quelques produits dont les plus utilisés sont les sels des acides gras. L'air entraîné améliore la maniabilité du béton Frais et la durabilité des matériaux face aux cycles de gel dégel en présence ou non de sels fondants.⁴²

⁴² Yang, K., *Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers*. [En ligne] Thèse doctorat en génie civil. Pontoise : Ecole doctorale sciences et ingénierie, 2008, chap. II, p. 66. Format PDF. Disponible sur : <http://biblioweb.u-cergy.fr/theses/08CERG0395.pdf> (Consulté le : 08/04/2018).

6. Domaine de l'utilisation :

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

6.1. Les bétons d'isolation pure, non porteurs :

Leur masse volumique est faible (600 kg/m^3) de même que leur résistance à la compression (de 1,5 à 5 MPa). Ces bétons sont utilisés principalement :

- En forme de pente isolante pour toiture-terrasse.
- En isolation de sols sur terre-plein.
- La préfabrication des éléments architecturaux.
- La protection d'étanchéité sur terrasse.
- Chapes, plancher, dalles d'isolation.
- Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation.
- Le rattrapage de niveau.

6.2. Les bétons porteurs et isolants :

Leur masse volumique varie de $1\ 000$ à $1\ 300 \text{ kg/m}^3$ et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- Des murs banchés ou préfabriqués.
- Des blocs à maçonner.
- Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage.
- Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces.
- La protection incendie.

6.3. Des bétons légers de structure :

Ils ont une masse volumique de $1\ 700$ à $1\ 800 \text{ kg/m}^3$ et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité. Ces bétons sont utilisés pour :

- Ouvrage où le poids mort est important par rapport au poids total.
- Immeuble de grande hauteur.
- Portée importantes (poutres, voiles).

- Structures marines immeubles.
- Surélévation d'immeubles existants.
- Restauration d'anciens immeubles.

7. les avantages des bétons légers :

7.1. Avantages techniques :

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0.4 à 1.2 en comparaison de 2.2 à 2.5 pour un béton classique.
- Isolant : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- Non inflammable : La chape en béton léger est classée M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- Imputrescible : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.

7.2. Avantages de mises en œuvre :

- Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers.
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes).

7.3. Avantages économiques :

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

8. L'apport de béton léger :

8.1. L'isolation thermique :

Une des propriétés intéressantes des bétons légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Les bétons légers sont constitués de bonnes isolations thermiques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20, pour des densités de 400 kg/m³ et 0.30 à pour des densités de 800 kg/m³.

La demande d'une isolation adaptée s'est considérablement accrue. En effet une bonne isolation thermique est économiquement rentable et les économies d'énergie sont devenues une préoccupation majeure des architectes, des concepteurs et des constructeurs. Par ailleurs, les bétons légers ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70 %). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments.⁴³

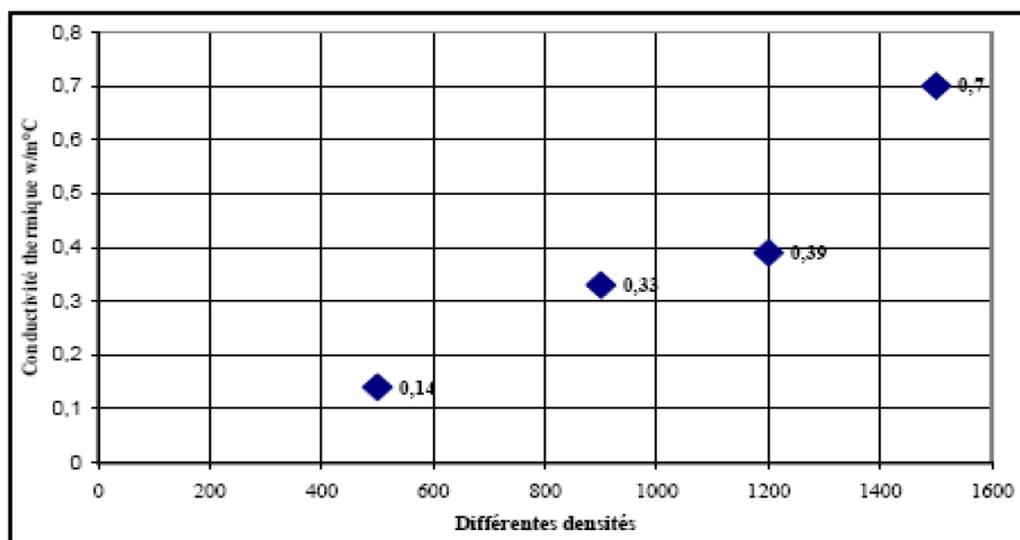


Figure 2 : Conductivité thermique en fonction de différentes masses volumiques.

Source : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001820/document>.

8.2. L'isolation acoustique :

Rappelons que le son est une vibration acoustique capable une fois parvenue à l'oreille d'éveiller une sensation auditive. La propagation du son c'est à partir d'un ébranlement initial que va s'effectuer la propagation du son. L'isolation acoustique a pour but de traiter la propagation des bruits entre deux locaux voisins.

⁴³ Milled, K. *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé*. [En ligne] Thèse de doctorat en Mécanique, Structures et Matériaux. Bayonne : Ecole nationale des ponts et chaussées, 2006, p. 06. Format PDF. Disponible sur : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001820/document> (Consulté le 21/04/2018).

En effet, l'énergie acoustique se transmet entre des locaux voisins par trois voies :

- La transmission directe : dépend de la nature de la paroi séparative.
- Les transmissions latérales : dépendent de la nature des parois latérales et du type de liaison entre les parois.
- Les transmissions parasites : dépendent des différents défauts de la paroi.

Les recherches réalisées permettent de caractériser les propriétés intéressantes d'insonorisation du matériau béton. C'est intéressant pour nous de connaître le facteur de diminution acoustique de murs simples pour obtenir une isolation suffisante entre des locaux.

Dans cette essai les chercheurs comparent la capacité d'isolation de divers matériaux fréquemment employés dans la construction avec le Polysbéton des bétons légers. La figure (5) montre que les valeurs du facteur de diminution acoustique pour le Polysbéton est proche de celui du bois, du plastique et du bouchon.

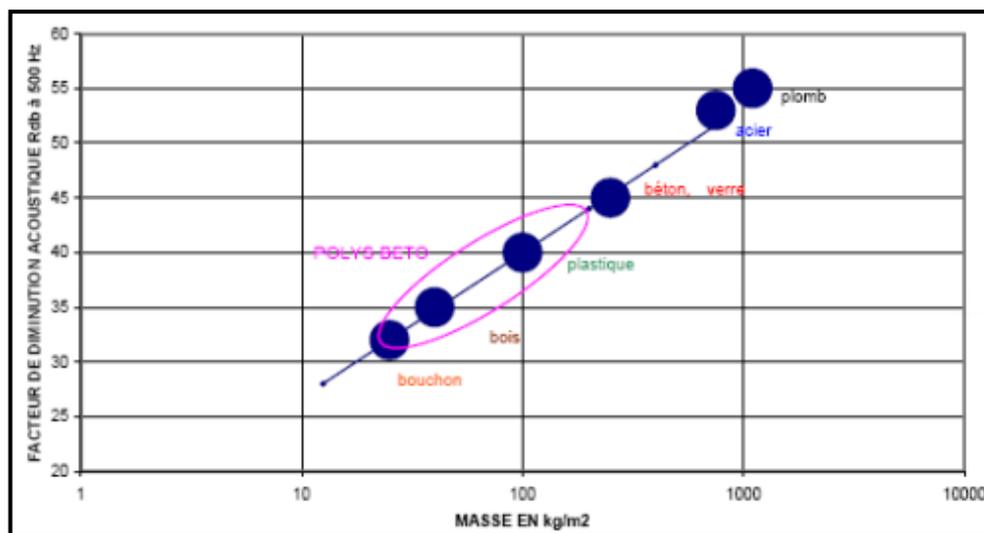


Figure 3 : Valeurs des facteurs de démunitions acoustique.
Source : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001820/document>.

8.3. La réduction du poids des éléments construits :

Ce qui distingue le béton léger du béton ordinaire est sa faible masse volumique. La masse volumique du béton ordinaire varie de 2 200 à 2 600 kg/m³ tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850 kg/m³. L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids des éléments construits avec ce béton et par la suite des dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations, et par conséquent les dimensions de cette dernière ; ce qui permet la construction sur des sols de faible capacité portante. La technologie de ces bétons peut être profitable pour la construction.

Conclusion :

A partir de ces données, Nous avons pu constater que l'application des bétons légers est très importante afin d'arriver à résoudre les problèmes et vraiment corriger les mauvaises aptitudes des bétons traditionnels surtout en matière de confort thermique. Ils ont aussi d'autre solution pour l'isolation acoustique à cause des boules d'air qu'il contient, et pour la légèreté des éléments reliés à sa faible masse volumique.

Parallèlement, les bétons légers offrent des nouvelles possibilités comme l'habiliter de construire sur des sols à capacité portante réduite. Et fournissant des bénéfices arrivant comme des résultats de leur application, telle que la réduction des sections des éléments porteurs, la facilitation de la mise en œuvre et la réduction des exigences de chantier, la diminution des délais de réalisation, la conservation d'énergie pendant la réalisation et la mise en service, la préservation de l'environnement et des ressources naturelles. Ils font, par ses caractéristiques et ses performances présentées, changer et corriger l'ancienne vue des bétons traditionnelles.

Chapitre 03:
Performance thermique
du béton léger :

Introduction :

Le confort peut être défini comme le degré de désagrément ou de bien être produit par les caractéristiques de l'environnement d'une construction. Une telle définition considère une interaction entre l'individu et l'espace qui l'entoure. C'est-à-dire ; entre des conditions ambiantes physiquement mesurables et certaines conditions individuelles qui affectent notre perception. La qualité de vie à l'intérieur de l'espace a été souvent rapprochée à une appréciation thermique en premier lieu. L'isolation est un moyen essentiel pour obtenir un niveau de confort satisfaisant dans le bâtiment. Il ne s'agit pas seulement de poser un maximum de plaques d'isolants : il faut penser le projet architectural en générale de la conception jusqu'au le matériau utiliser, pour qu'il soit efficace. Dans ce chapitre en va définir les performances thermiques des bétons légers.

1. Notion du confort thermique :

1.1 Définition du confort thermique du bâtiment :

On dit que le rôle premier d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur, et d'assurer à ses habitants un climat agréable à l'intérieur et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La qualité architecturale participe, à notre avis, aux conditions de confort ou réciproquement, le confort offert par un bâtiment est un des aspects de son architecture.

1.2 Les paramètres de confort thermique :

Le confort thermique dépend de six paramètres, sont :

- Le métabolisme : qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36.7 °C. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.
- L'habillement : qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
- La température ambiante de l'air TA et sa vitesse qui influe l'échanges de chaleur par convection.
- La température moyenne des parois (température radiante moyenne) TMR.

- L'humidité relative de l'air (HR), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température t_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.⁴⁴

1.3. Les facteurs influençant le confort thermique :

1.3.1. La forme (géométrie, conception) :

Du point de vue de la consommation d'énergie, la forme optimale pour une construction est celle qui perd le minimum de chaleur pendant la période hivernale et en gagnant le minimum pendant la période estivale. L'ensemble des chercheurs ont essayé de trouver la forme optimale qui perd le minimum de chaleur en hiver, et énoncent trois principes :

- Le carré n'est pas la forme optimale quelle que soit la localisation de la construction.
- Toutes les formes allongées dans la direction Nord-Sud sont moins efficaces que la forme carrée, aussi bien en hiver qu'en été.
- Il existe une forme optimale générale donnant les meilleurs résultats dans chaque cas, et pour tous les climats, c'est la forme allongée dans la direction Est -Ouest.

1.3.2. L'orientation du bâtiment :

Le choix de l'orientation est soumis à de nombreuses considérations, telles que :

- La vue ; le bâtiment doit offrir des ouvertures sur les paysages existants.
- La position par rapport aux voies.
- La topographie du site.
- La position des sources des nuisances et la nature du climat (facteurs climatiques ; Les radiations solaires et le vent).

1.3.3. L'inertie thermique :

Pour faire simple, c'est la capacité du bâtiment à stocker de la chaleur dans ses murs, ses planchers, etc.... Plus l'inertie du bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit lentement. Ce laps de temps est le déphasage. Plus les murs sont épais et les matériaux qui les constituent sont lourds, plus l'inertie est importante et donc le temps de déphasage important. C'est pourquoi il faut privilégier l'isolation côté extérieur qui protège extérieurement l'habitation et permet intérieurement à l'inertie thermique des murs de jouer son rôle.

1.3.4. Les ponts thermiques :

⁴⁴ Halloufi, W. (communication personnelle [polycopie]). *Le confort thermique dans le bâtiment*. Jijel : Département d'architecture université Mohamed Seddik Ben Yahia, 2016, chap. II, p. 01.

Les ponts thermiques sont des points de jonction où l'isolation n'est pas continue et qui provoquent des pertes de chaleur. Bête noire du poseur de l'isolant, les ponts thermiques pèsent d'autant plus dans le pourcentage de déperditions de la maison que celle-ci est bien isolée.

Les ponts thermiques intégrés rassemblent les ponts thermiques créés dans la paroi par des éléments tels que les ossatures métalliques, appuis et autres accessoires. Ils ne doivent pas être confondus avec les ponts thermiques des liaisons qui caractérisent eux les interfaces de parois.⁴⁵

1.3.5. Le coefficient de transmission thermique :

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est la quantité de chaleur traversant cette paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi.

Le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique totale (R_T) de la paroi. $U = 1 / R_T$ Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée.⁴⁶

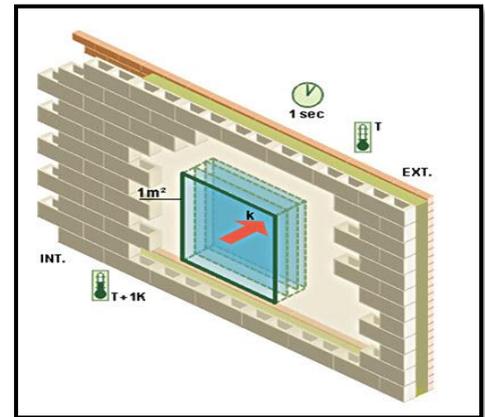


Figure 4: Coefficient de transmission thermique.
Source: (<https://www.energiepluslesite.be>).

1.3.6. La conductivité thermique :

La conductivité thermique (λ) est une caractéristique propre à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage pendant 1 seconde, à travers 1 m² d'un matériau, avec 1 m d'épaisseur, lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1°C).⁴⁷

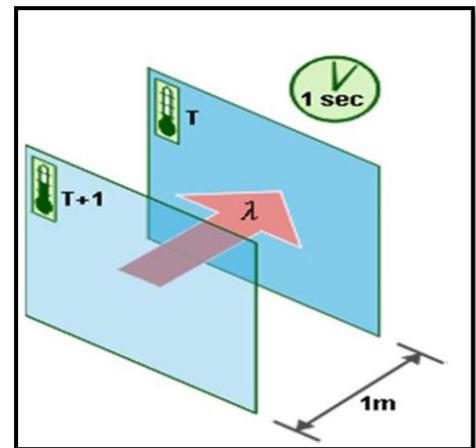


Figure 5: La conductivité thermique.
Source: (<https://www.energiepluslesite.be>).

1.3.7. L'humidité relative de l'air :

Dans les bâtiments d'habitation, l'humidité relative peut avoir un impact non négligeable sur le confort thermique. On parle de teneur en humidité (gr/kg). Le taux d'humidité relative de l'air (Hr) est le rapport (exprimé en pourcentage) entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale d'eau que l'air peut contenir (avant que la vapeur ne se condense = gouttes d'eau).

⁴⁵ Lecheheb, M. (communication personnelle [polycopie]). *Construction et les ambiances thermiques et hygrométriques*. Jijel : Département d'architecture université Mohamed Seddik Ben Yahia, 2016, chap. II, p. 32.

⁴⁶ <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16892>. (Consulter le 15/04/2018).

⁴⁷ Lecheheb, M., Ibid.

Le confort est celui que ressent notre corps à une température donnée. Celui-ci tente d'évacuer, en permanence, par la transpiration (et la respiration), son excédent de chaleur.

1.4. Les facteurs d'inconfort thermique :

Malgré la réalisation d'un confort thermique global, des zones d'inconforts sont susceptibles d'être observées dans les bâtiments. Un environnement thermique inégal peut être la source d'inconfort pour certaines parties du corps. L'insatisfaction thermique peut être causée par un inconfort, causée par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps (tête, pieds, ou mains), par exemple, un courant d'air.

Un inconfort local peut également être dû à des différences de températures anormalement élevées entre la tête et la cheville, avec un sol trop chaud ou trop froid, ou à une asymétrie de rayonnement thermique. Ainsi, le confort thermique peut être affecté par plusieurs facteurs, citons : Le courant d'air local, l'asymétrie de la température de rayonnement, la différence verticale de la température de l'air et la température des planchers.⁴⁸

1.5. Evaluation du confort thermique :

L'évaluation du confort thermique dans les espaces est un paramètre capital dans toute conception architecturale. Les premières recherches se sont basées sur les enquêtes de terrain avec des questionnaires en classifiant la sensation thermique (très chaud, neutre et très froid) ainsi que sur les essais de laboratoires sous des conditions climatiques artificielles.

Cette évaluation a conduit plusieurs chercheurs à développer et à élaborer des indices de prédiction des niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments.

En plus des indices thermiques, des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort, connus sous le nom de diagrammes bioclimatiques, ils sont l'aboutissement direct de la connaissance du climat, ces outils sont également développés pour permettre d'obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux variables climatiques.⁴⁹

2. L'isolation thermique :

⁴⁸ Mazari, M. *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public*. Thèse de magister en architecture. Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2012, chap. I, p. 14.

⁴⁹ Ibid.

2.1. Définition de l'isolation thermique :

L'isolation thermique représente l'ensemble des moyens mis en œuvre qui consiste à diminuer le transfert (réduction des pertes de chaleur) visant ainsi l'économie d'énergie-chaleur ou à maintenir les paramètres des agents thermiques dans certaines limites fonctionnelles établies.⁵⁰

L'isolation d'un bâtiment permet de réduire ses consommations d'énergie : l'hiver, on limite les déperditions de chaleur et l'été, on empêche la chaleur de rentrer. Les murs constituent la plus grande surface d'échange entre l'intérieur et l'extérieur, il est donc nécessaire de les isoler.

2.2. Les types d'isolation :

Pour isoler une enveloppe, trois manières d'isolation sont disponibles. Il s'agit de L'isolation intérieure, l'isolation extérieure et celle répartie.

2.2.1. L'isolation intérieure :

Ce type d'isolation est largement utilisé grâce à ses multiples avantages. La facilité de mettre en œuvre représente un de ses bienfaits avec une application moins chers que d'autres types d'isolation et ne nécessite pas l'intervention d'un professionnel. Alors que ses inconvénients sont plus importants car elle diminue l'espace habitable, supprime les bienfaits de l'inertie thermique, provoque la condensation des parois et n'élimine pas les ponts thermiques.



Photo 3 : Application d'une isolation intérieur.
Source : <http://www.finexto.com/>.

2.2.2. L'isolation extérieure :

Elle est plus performante que le premier type d'isolation grâce à la suppression de tous les ponts thermiques, l'augmentation de l'effet de l'inertie thermique et La protection de la maçonnerie des intempéries et des variations de la température. L'isolation par l'extérieur est caractérisée

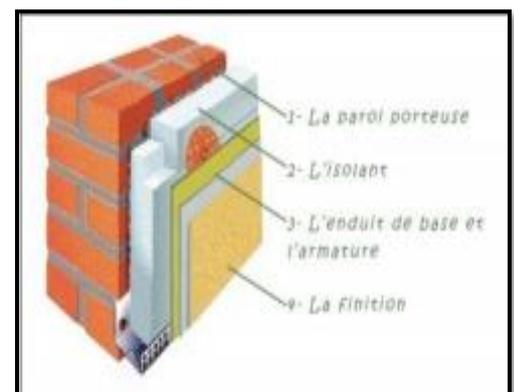


Figure 6 : L'isolation par l'extérieur.
Source ; <http://www.finexto.com/>.

⁵⁰ Roulet, C. *Éco-confort Pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. [En ligne] Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012, p. 26. Disponible sur : <https://books.google.dz/books?id=wEHBZtBPEQgC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>. (Consulter le 04/02/1018).

aussi par son empêchement du froid et de la chaleur d'arriver aux parois intérieures et la préservation des surfaces des espaces intérieurs.

Mais son inconvénient majeur reste son coût élevé et le besoin d'un professionnel pour son application.

2.2.3. L'isolation répartie :

Elle est caractérisée par l'utilisation de l'isolation en tant que matériau de construction. Son rôle majeur est la stabilité de la construction, le remplissage et l'isolation en même temps.

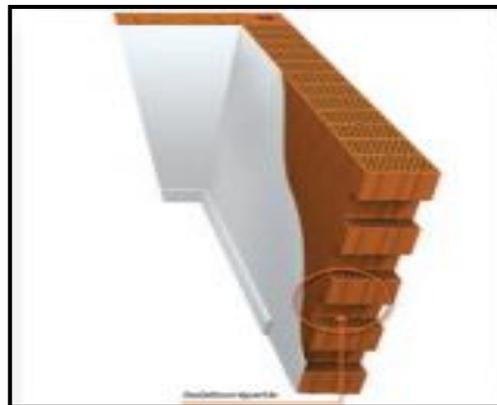


Figure 7 : L'isolation répartie.

Source <http://isolation.maison-materiaux.com>.

2.3. Les types d'isolants :

Un matériau est généralement considéré comme "isolant" lorsque son coefficient de conductivité thermique à l'état sec est inférieur ou égal à 0.07 W/m.K.

Les isolants thermiques disponibles sur le marché sont de sources très diverses (minérales, végétales, synthétiques...) et se présentent sous des formes très variées (panneaux rigides, vrac, rouleaux...). Permet les grandes catégories d'isolants :

2.3.1. Les isolants synthétiques :

Ils sont des matériaux fabriqués de manière synthétique. Tels que le polystyrène expansé (PSE) qui est un matériau produit à partir de pétrole brut, il est fait de billes d'un très petit diamètre (0.2 mm à 0.3 mm) expansées à la vapeur d'eau et compressées ensemble lors d'un moulage emprisonnant l'air sec et mobile. C'est un isolant très léger car composé à 98% d'air.⁵¹



Photo 4 : Le polystyrène expansé.

Source : <http://www.econologie-maison.fr/>.

2.3.2. Les isolants minéraux :

Ils ont d'origine naturelle non organique. Tels que :

- La laine de verre : elle est composée de la silice (sable), du verre de récupération (ou calcaire) transformé par fusion, fibrage, et polymérisation.



Photo 5 : La laine de verre.

Source : <https://www.tanguy.fr/>.

⁵¹ <https://www.samse.fr/isolation-combles-amenageables/isolation-polystyrene-expanse>.(Consulté le : 16/05/2018).

2.3.3. Les isolants d'origine végétale :

Ces isolants combinent généralement un matériau issu de sources renouvelables. Tels :

- Le liège : Le liège est un isolant naturel, issu d'un arbre méditerranéen, il existe deux sortes de lièges, mâle et femelle. Pour l'isolation, c'est le liège mâle et le déchet de liège femelle qui sont utilisés.



Photo 6 : Le liège.
Source : <http://www.guehenno-online.fr/>.

2.3.4. Les isolants d'origine animale :

Il s'agit principalement de laine de mouton, pure ou mélangée, et de plumes de canard. ... Ces isolants sont nettoyés, dégraissés, traités contre leurs ennemis naturels (mites, acariens), puis mélangés à un liant (polypropylène, polyester) et conditionnés en rouleau ou en panneau semi-rigide.⁵²



Photo 7 : La laine de mouton.
Source : <https://www.toutsurisolation.com/>.

2.3.5. Les isolantes nouvelles générations :

Par plus d'amélioration, la nouvelle génération d'isolant par une épaisseur raisonnable, a une performance bien meilleure que celle classique. Parmi ces isolants :

Des matériaux nano-poreux aux caractéristiques futuristes conçues par Steven Kistler en 1931.

C'est une matière solide la plus légère qui contient 99.8 % d'air. Les principaux gaz utilisés dans ces

matières sont l'azote et l'oxygène et un gel de silice en phase aqueuse. Les performances exceptionnelles des aérogels peuvent encore être améliorées par l'ajout du carbone à la silice. Sa conductivité thermique est de 0.011 à 0.013 W/m.K.⁵³



Photo 8 : Les aérogels.
Source : <http://www.lamy-expertise.fr/>.

2.4. Les critères de choix des isolants :

Lors de choix d'un matériau d'isolation, il est intéressant de prendre en compte les critères suivants :

⁵² <https://www.leguidedelamaison.com/338-les-isolants-d-origine-animale.htm.pdf>. (Consulter le 17/05/2018).

⁵³ Gallauziaux, T. et Fedullo, d. *L'isolation par l'extérieur*. France : Eyrolles, 2010, p. 41.

- **Propriétés thermiques** : Elles sont généralement décrites par des notions telles que la conductibilité thermique, la résistance thermique et le coefficient de transmission.
- **Propriétés techniques** : Le comportement au feu, la perméabilité à la vapeur d'eau, le Comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, etc. Le comportement au feu, la perméabilité à la vapeur d'eau, le Comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, etc.
- **Propriétés environnementales** : Impact énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, maintenance traitement en fin de vie (recyclage) etc. Parmi cet impact nous retrouvons : les émissions de gaz à effet de serre, la production de gaz acidifiants, l'origine des ressources (renouvelable non-renouvelable), l'économie des ressources.
- **Propriétés économiques** : Coût du matériau, de sa mise en œuvre et selon le cas de sa maintenance, en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre.⁵⁴

3. Performances thermique des bétons légers :

3.1. La conductivité thermique :

Le coefficient de la conductivités thermique (λ), exprime la quantité de chaleur transmise par seconde à travers un surface d'1 m² et une épaisseur d'un mètre de matériau homogène pour une différence de température entre les parois de 1K (Kelvin). Il dépend de :

- La masse volumique du matériau : (λ) diminue avec la masse volumique (augmentation du pouvoir isolant). La masse volumique des bétons légers dépend de leur utilisation ; pour l'isolation il varie entre 350 et 900 (kg/m³).
- La teneur en eau : Pour les bétons légers (cas du béton cellulaire), la teneur en eau à l'état d'équilibre prise en compte est de 4 %. la valeur de conductivité thermique correspondant à cet état d'équilibre est appelée « conductivité thermique utile ».⁵⁵

⁵⁴ http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF_Eco_construction_MAT14_Part_FR.PDF. (Consulter le :14/05/2018).

⁵⁵ Syndicat national du béton cellulaire. *Mémento du béton cellulaire*. 1^{er} éd. Paris : Eyrolles, 2005, p. 28.

Tableau 3 : La conductivité thermique par rapport la masse volumique.

Source : Auteur.

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Masse volumique nominale (kg/m ³) | 370 | 400 | 450 | 500 |
| Conductivité thermique utile (W/m.K) | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.17 |

3.2. La résistance thermique :

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur réalisé par conduction. Elle s'exprime m².K/W. Elle est calculée avec la formule suivante : $R = e/\lambda$.

Exemple : en prend les valeurs précédent extraits de l'avis technique JUMBO 16/01-403, date de validité 28 février 2007, et une épaisseur de 30 cm de mur en béton légers et on calcul la résistance thermique R.⁵⁶

Tableau 4 : Calcul de la résistance thermique R d'un mur en béton légers.

Source : Auteur.

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Masse volumique nominale (kg/m ³) | 370 | 400 | 450 | 500 |
| Conductivité thermique utile (W/m.K) | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.17 |
| Résistance thermique (m ² .K/W) | 2.72 | 2.5 | 2.30 | 1.76 |

3.3. Coefficient de déperdition surfacique :

C'est la quantité de chaleur passant par seconde à travers 1 m² de matériau en régime stationnaire pour une différence de température de 1K entre deux ambiances.

3.4. Coefficient de déperdition linéique :

Traduit ce que l'on appelle un pont thermique, qui entraînent des déperditions supplémentaires qui peuvent dépasser pour certains types de bâtiments, 40 % des déperdition thermique totales.

- Exemple : murs extérieurs en béton Léger (cellulaire) de 30 cm épaisseur ; plancher sur vide sanitaire avec chape flottante isolé, faux plafond isolé.⁵⁷

⁵⁶ Lecheheb, M. Op. Cit., p. 30.

⁵⁷ Syndicat national du béton cellulaire. Op. Cit., p. 28.

Tableau 5 : calcul des déperditions.

Source : Syndicat national du béton cellulaire, 2005, p. 04.

| Déperdition surfacique | | S(m ²) | U | SxU | U | SxU |
|------------------------|---------------|--------------------|-------------|----------------|------|------|
| Murs | Extérieur | 16.76 | 0.40 | 6.70 | 0.39 | 6.54 |
| Déperdition linéiques | | L(m) | Y | LxY | Y | LxY |
| Mur/plancher bas | Sur extérieur | 8.00 | 0.50 | 4.00 | 0.07 | 0.56 |
| Mur/plancher in-ter | Sur extérieur | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mur/toiture | | 8.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.24 |
| Angle de mur | Sortant | 2.50 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.18 |
| Angle de mur | Refend | 2.50 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.23 |
| Appuis de porte | | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.14 |
| Appuis de fenêtre | | 1.20 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.17 |
| Linteau | | 2.10 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.17 |
| Tableau | | 6.40 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.38 |
| | 6.70 | W | 6.54 | W | | |
| | 4.00 | W | 2.06 | W | | |
| | 16.76 | m ² | 16.76 | m ² | | |
| | 10.70 | | 8.60 | W | | |

3.5. Inertie thermique :

Autre l'isolation thermique, la notion de confort thermique dans un bâtiment dépend aussi de la capacité thermique de la paroi, du temps de refroidissement de cette paroi, de l'amortissement thermique et du déphasage au travers de cette paroi.

Ces différents éléments ont été déterminés pour des parois en béton cellulaire de 30 cm et de 25 cm d'épaisseur (hygrothermique dans le bâtiment-confort thermique d'hiver, d'été, condensations, Maurice Croiset).

Le tableau ci-dessous rassemblent les éléments permettant d'apprécier le comportement thermique d'une paroi en béton cellulaire, sur un cycle de 24 heures.⁵⁸

⁵⁸ Syndicat national du béton cellulaire. Op. Cit., 2005, p. 49.

Tableau 6 : Comportement thermique d'une paroi en béton cellulaire.

Source : Syndicat national du béton cellulaire, 2005, p. 50.

| Épaisseur de paroi (cm) | Caractéristique | | |
|----------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|
| | Masse volumique (kg/m ³) | Conductivité thermique (W/m.K) | Chaleur massique (J/kg.K) |
| 30 | 400 | 0.12 | 1000 |
| 25 | 400 | 0.12 | 1000 |

Conclusion :

L'isolation thermique est un moyen efficace pour diminuer la déperdition d'énergie et accroître le confort des constructions. Il existe plusieurs matériaux d'isolation adaptés à chaque situation : pour les murs, les plancher ou les plafonds, pour les fenêtres, pour l'intérieur ou l'extérieur. Des solutions techniques diversifiées permettent de traiter chaque cas avec efficacité. Ces matériaux considérés comme des guides pour aider l'architecte à prendre les bonnes décisions à la phase d'esquisse pour assurer un meilleur confort thermique.

Les bétons légers présente l'avantage d'être un matériau isolant homogène et qui ne nécessite donc pas l'ajout d'autre isolant. Cela permet d'éviter une opération de mise en œuvre complémentaire et délicate, ainsi aux risques de ponts thermiques dus à la pose non parfaitement jointive des éléments isolants.

Partie II:

Partie Expérimentale :

Chapitre 04:
Présentation du cas
d'études et de méthodologie de simulation :

Introduction :

Le choix des matériaux se fait à base de plusieurs critères parmi ces critères sa performance vis-à-vis les conditions du contexte où elle s'inscrit, afin de créer des ambiances internes agréables répond aux conditions de confort intérieur. A ce stade, nous avons envisagés d'effectuer une étude à l'aide d'un logiciel de simulation, dans le but d'examiner les performances d'objet de notre de thème d'étude « le béton léger » en matière de confort thermique et l'analyse de son comportement au sein d'un exemple à l'aide d'un logicielle de simulation.

Nous avons choisi comme cas d'étude : la Faculté des sciences de gestion et d'économie d'université Mohamed Seddik Ben Yahia, pour être en cohérence avec notre thème du projet de fin d'étude « Faculté des sciences et de technologie », ou nous allons appliquer nos objectifs d'étude pour servir les résultats et les recommandations attendu dans la conception du projet finale.

1. Présentation de cite :

1.1. Présentation de la ville de Jijel :

La wilaya de Jijel se situe au Nord-Est de l'Algérie à 357 Km à l'Est de la capitale Alger, entre les wilayas de Bejaia à l'Ouest, Sétif au Sud-Ouest, Mila au Sud et au Sud-Est, Skikda à l'Est et la mer méditerranée au Nord. Elle est située à 36°49 Nord de latitude et 05°47 Est de longitude, sa l'altitude elle varie entre 10 m dans l'ancienne ville et 400 m dans la nouvelle extension.

Avec ses 120 Km de côtes, la ville de Jijel est caractérisée pleinement par un climat méditerranéen dont les caractéristiques générales sont la douceur de l'hiver et la chaleur de l'été. Il possède une autre caractéristique : l'importance des vents soufflant de la terre vers la mer.

1.2. Présentation de la région du Tassoust :

La région de « Tassoust » couvre la partie Nord de la commune de l'Emir Abdelkader, elle se trouve à 6 km au Nord-Est du chef-lieu de la wilaya de Jijel. Elle est dotée d'une latitude de 36°48 au Nord, une longitude de 5°50 à l'Est et une altitude de 23 m.⁵⁹ La région de Tassoust est limitée par :

⁵⁹ <http://www.wilaya-jijel.dz/jijel/index.php/presentation/pres>. (Consulter le : 07/05/2018).

- Au Nord : par la mer Méditerranée.
- Au Sud : par la commune d'Emir Abdelkader.
- A l'Est : par la commune de Taher.
- A l'Ouest : par Oued Mencha.



Figure 8 : Localisation géographique de Tassoust, Jijel.
Source : <http://www.wilayadejijel.net/page1.htm>.

1.3. Les données climatiques :

Les paramètres climatiques ont une grande influence sur le comportement thermique du bâtiment, donc la maîtrise d'un climat intérieur confortable pour les usagers exige de connaître et de comprendre les caractéristiques microclimatiques. Ces paramètres sont généralement les températures, l'humidité de l'air et les conditions de vent. Elles constituent l'ensemble de donnée de base pour les outils de simulation numérique.

La région de Tassoust s'intègre au climat de la zone Jijel-Taher qui est de type Méditerranéen subhumide. Qu'il se caractérise par un ensoleillement important, de fréquents vents violents, des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

1.3.1. Les vents :

Les vents dominants viennent de deux directions : du Nord-Ouest et du Nord-Est fréquent d'Octobre à Avril, chargés d'humidité, les vents Sud sont très rares et ils ne fréquentent pas la région qu'en été et particulièrement au mois de Juillet.

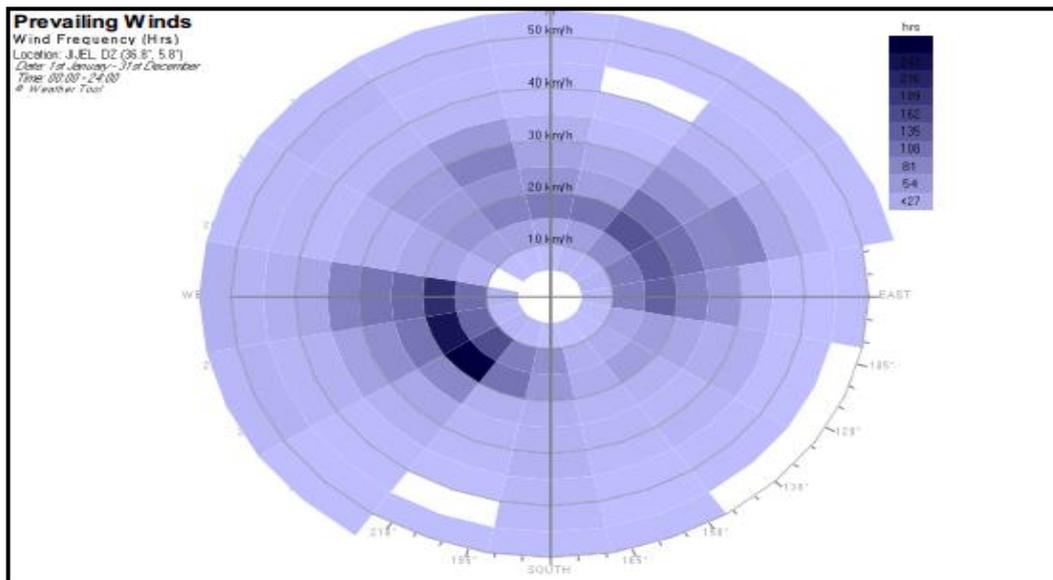


Figure 9 : Fréquences des vents.
Source : Ecotect Analysis 2011.

Ce graphique Figure montre la fréquence et la vitesse du vent soufflant de chaque direction, Lorsque'on se déplace vers l'extérieur sur l'échelle radiale, la fréquence associée au vent venant de cette direction augmente.

1.3.2. La température :

La période qui s'étale du mois de Novembre au mois d'Avril correspond à la période relativement froide avec un minimum durant le mois de Février (11.3 °C), alors que la période chaude commence à partir du mois Mai jusqu'au mois de Septembre avec un maximum marqué durant le mois d'Aout (26 °C). La température moyenne annuelle est de l'ordre de 17.93 °C.

Tableau 7: Les températures moyennes mensuelles à Jijel, (1999/2008).

Source : Station métrologique de Jijel.

| Mois | Jan. | Fév. | Mar. | Avr. | Mai | Jun. | Jui. | Aou. | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tempé- tures moyennes annuelles (C°) | 11.2 | 11.6 | 13.5 | 16.0 | 19.1 | 23.0 | 25.6 | 26.4 | 23.7 | 21.1 | 15.6 | 12.5 |
| Tempé- tures moy. Max. (C°) | 16.2 | 16.4 | 18.9 | 20.9 | 24.0 | 28.2 | 30.8 | 31.8 | 28.8 | 26.5 | 20.4 | 17.4 |
| Tempé- tures moy. Min. (C°) | 06.2 | 06.4 | 08.3 | 10.2 | 16.6 | 17.0 | 19.6 | 20.6 | 18.4 | 15.7 | 10.8 | 07.9 |

1.2.3. L'humidité :

Les valeurs moyennes d'humidité sont en général très élevées toute l'année et leurs amplitudes saisonnières relativement faibles, le minimum s'observe au mois de mars et le maximum au mois de Juin.

Tableau 8: L'humidité relative mensuelle à Jijel, (1999/2008)

Source : Station météorologique de Jijel.

| Mois | Jan. | Fév. | Mar. | Avr. | Mai | Jun. | Jui. | Aou. | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Humidité relative moy. annuelles (%) | 78.4 | 77.1 | 75.9 | 75.7 | 77.3 | 77.3 | 71.3 | 70.5 | 75.0 | 73.6 | 75.9 | 77.3 |
| Humidité relative moy. Max. (%) | 92.8 | 92.7 | 92.7 | 93.2 | 93.3 | 92.2 | 90.4 | 89.1 | 91.6 | 92.0 | 91.6 | 91.7 |
| Humidité moy. Min. (%) | 54.0 | 54.1 | 54.4 | 52.8 | 56.4 | 51.4 | 48.8 | 48.0 | 51.7 | 51.1 | 54.8 | 55.9 |

1.3.4. Les précipitations :

Pour les pluies la ville est classée parmi les zones les plus pluvieuses d'Algérie, la pluviométrie moyenne est entre 800 et 1 200 mm/an, et le nombre de jours de pluie par ans est de 111 jours.

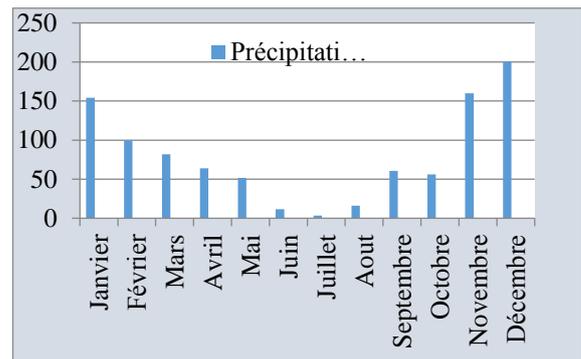


Figure 10 : Histogramme des précipitations à Jijel (2008).
Source : Station météorologique de Jijel.

2. Présentation du bâtiment cas d'étude :

Dans le but de présente les caractères des bétons légers et d'examine nos objectifs poser au début de l'étude. Nous avons choisi comme cas d'étude une salle d'enseignement appartient à la faculté des sciences économiques. Qui se situe au côté Nord-Est du pôle universitaire de Mohamed Seddik Benyahia à Tassoust.



Photo 9 : Satiation géographique du cas d'étude.

Source : <https://www.google.com/maps/@36.8050243,5.8394426,607m/data=!3m1!1e3>. (Consulter le 07/05/2018).

2.1. Fiche technique :

- Maître de l'ouvrage : DLEP. Jijel
- Maître de l'œuvre : BET L. Krid.
- Contrôle technique : CTC/Est-Antenne de Jijel.
- Entreprises : SARL S.E.T.E.M (Gros œuvre + TCE).
- Délai de réalisation : 16 mois.
- Surface total : 8 200 m².
- Délai de réalisation : 18 mois.
- Réception des travaux : 2006.

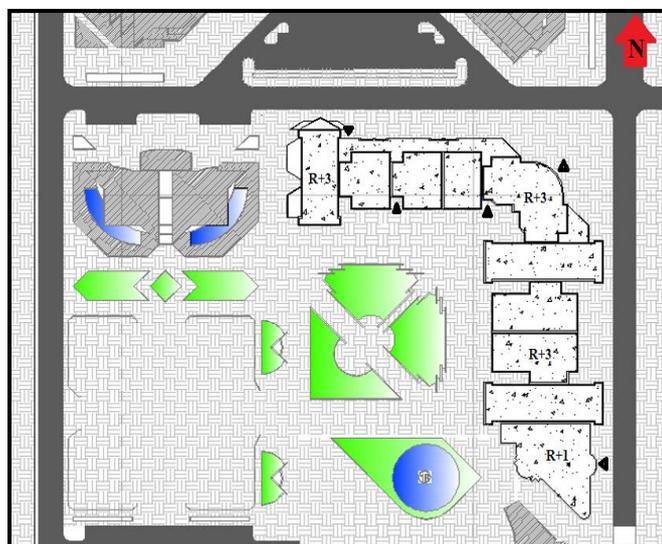


Photo 10 : Plan de masse de cas d'étude.

Source : Auteur.

2.2. Description du projet :

- La structure du bâtiment est réalisée en poteaux-poutres coulées sur place.
- Les murs extérieurs : L'enveloppe est en double cloison de briques de 15 cm à l'extérieur et 10 à l'intérieur séparées par une lame d'air de 5 cm.
- Le revêtement extérieur est en enduit de ciment et en plâtre pour l'intérieur.
- Les murs intérieurs : construits en simple cloison de briques de 10 cm d'épaisseur avec un enduit en plâtre.
- Les planchers : sont réalisés en poutrelles et hourdis avec dalles de répartition coulées sur place, le revêtement des sols est en carrelage sur sable.
- La toiture : c'est une toiture terrasse en poutrelles et hourdis.

- Le vitrage : le vitrage utilisé est un simple vitrage pour les murs rideaux.

3. Présentation de l'échantillon d'étude :

La conception des salles de classes exige plusieurs conditions pour le bien-être des utilisateurs, de ce fait la salle d'enseignement ne doit pas se considérer en tant qu'espace rectangulaire mais plutôt comme interaction de différents facteurs d'une ambiance.

L'environnement extérieur et intérieur de cette espace ayant la capacité de favoriser ou défavoriser les activités des étudiants et des enseignants, il influe sur leur santé, leur confort, leur déroulement et leur bien-être. Alors, est pour ces raisons déjà évoquer, nous avons choisi comme objet de simulation de départ dans cette recherche une salle d'enseignement des travaux dirigés. Elle se positionne au premier étage d'immeuble de la faculté et elle est orienter vers l'Est.

3.1. Forme et dimension :

La salle objet d'étude de forme rectangulaire, qui mesure 8.40 m de longueur sur 8.20 m de largeur, sa surface et donc de 86 m² avec une hauteur sous plafond de 4.08 m.

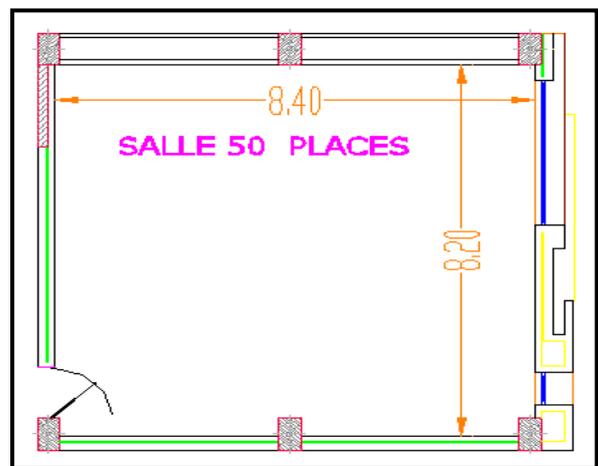


Figure 11 : Plan de salle d'enseignement.
Source : Auteur.

3.2. Façade et ouverture :

Les façades des salles de TD sont presque totalement vitrées, la salle reçoit la lumière du jour à partir deux ouvertures de 1 m² de surface pour chaque ouverture et le reste de façade est complètement vitrée.

3.3. Matériaux de construction :

En plus de rôle esthétique et structural des matériaux de construction, chaque matériau a des propriétés physiques propre à lui, ces propriétés influent sur les performances thermique et acoustique du matériau, donc il est nécessaire de connaître les matériaux de construction et leurs propriétés physique avant de faire une simulation, Pour notre cas on doit connaître la conductivité thermique des matériaux utilisés.



Photo 11 : Façade Ouest de la salle.
Source : Auteur.

Pour notre cas d'étude, le matériau utilisé pour le remplissage des murs c'est la brique et parpaing pour le plafond.

Tableau 9 : Les propriétés physique des matériaux de construction.

Source : Auteur.

| Matériau | Epaisseur (mm) | Conductivité thermique (W/m.K) |
|------------------|----------------|--------------------------------|
| Enduit ciment | 20 | 0.8 |
| Brique extérieur | 150 | 0.39 |
| Lame d'air | 50 | 0.28 |
| Brique intérieur | 100 | 0.39 |
| Enduit ciment | 10 | 0.8 |

4. La simulation numérique :

4.1. Définition :

C'est l'un des outils utilisés par architectes, qui consiste à simuler (faire paraître comme réelle une chose qui ne l'est pas) un système ou bien un phénomène donné afin d'étudier son fonctionnement, ses propriétés et de prédire ainsi son évolution.

La simulation numérique repose sur la programmation des modèles théoriques ou mathématiques adaptés aux moyens numériques. C'est donc une série de calculs utilisant souvent la technique dite des éléments finis effectuée sur un support matériel "ordinateur" dont les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats par des "images de synthèse".

4.2. L'objectif de la simulation :

Le but de cette simulation est d'évaluer l'impact des matériaux de constructions sur le confort thermique intérieur des salles d'enseignement (évaluation des températures), et montrer l'effet de l'utilisation des bétons légères sur ces ambiances intérieur.

4.3. Présentation de logiciel de simulation Ecotect Analysis 2011 :

Le logiciel d'analyse de conception durable Ecotect Analysis est un outil de conception de bâtiment durable complet, depuis la conception jusqu'au détail. Ecotect Analysis offre un large éventail de fonctionnalités de simulation et d'analyse énergétique des bâtiments qui peuvent améliorer les performances des bâtiments existants et des nouvelles conceptions de bâtiments.

Il associe un modeleur 3D avec des analyses solaires, thermiques, acoustiques et de coût, ainsi à beaucoup plus d'autres outils plus spécialisés. Ecotect est un outil d'analyse simple et qui donne des résultats très visuels. Il est conçu pour guider progressivement le processus de

conception par la fourniture de rétroaction visuelle et analytique afin d'obtenir une conception environnementale la plus efficace selon les informations détaillées disponible.

5. Les démarches de la simulation :

5.1. Préparation des plans :

La première partie commence avec le logiciel Autodesk-Autocad 2016, par lequel on a redessiné le plan de la salle avec un seul trait, et on doit enregistrer le plan sous format DXF puis on importe le plan à l'Ecotect.

5.2. Importation des plans :

Les plans modelés à l'aide du logiciel Autocad 2016, ont été importés vers Ecotect sous format DXF, tout en prenant compte la compatibilité des échelles, par l'ajustement des unités.

5.3. L'adaptation des paramètres relatives à l'objet d'étude :

Pour avoir des résultats précises on doit définir tous les paramètres relatifs à notre cas d'étude, à savoir :

1. La description du projet : donner un nom au projet, et déterminer sa fonction.
2. Déterminer l'orientation du bâtiment.
3. Déterminer les données climatiques de la région de Jijel, ces données définissent les paramètres nécessaires pour la simulation telles que : les températures, le régime des vents, l'humidité, l'ensoleillement.
4. Fixer la nature de cite et l'environnement du bâtiment (urbain, rural, etc.), car le logiciel intégré dans ses calculs des coefficients liées à des paramètres microclimatiques tel que : la pollution, la nébulosité, la rugosité.

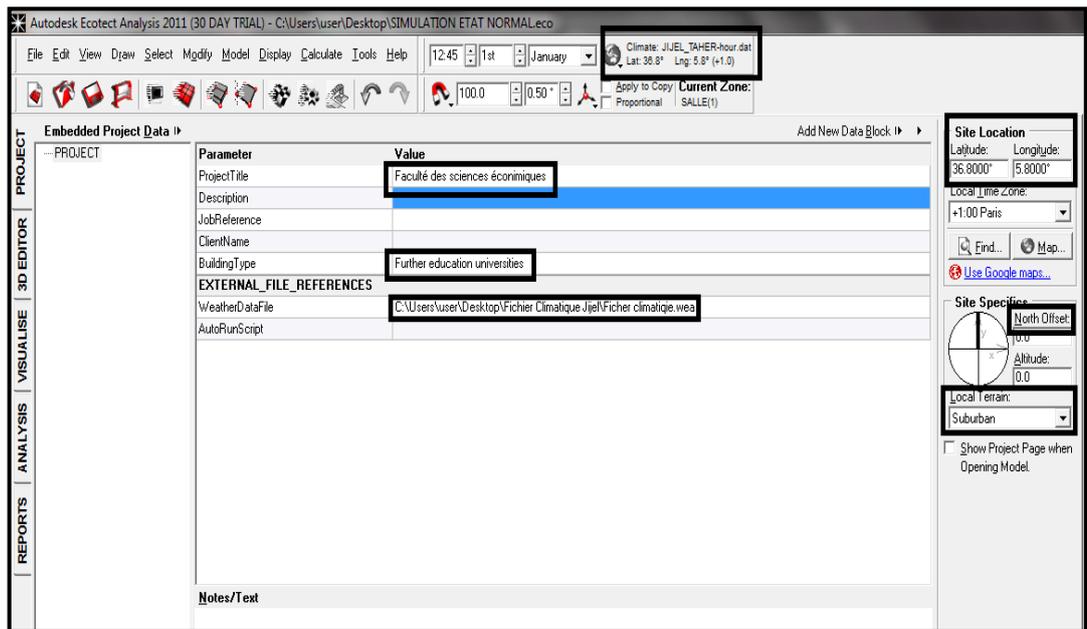


Figure 12 : Le paramétrage du logiciel.
Source : Ecotect Analysis 2011.

5.4. La modélisation :

A l'aide de la barre 'modélisation' de l'Ecotect, on a modélisé la 3D de la salle, et tous ce qui peuvent entrainer une influence sur le climat thermique à l'intérieur, dont chaque espace est représenté sous forme d'une zone.

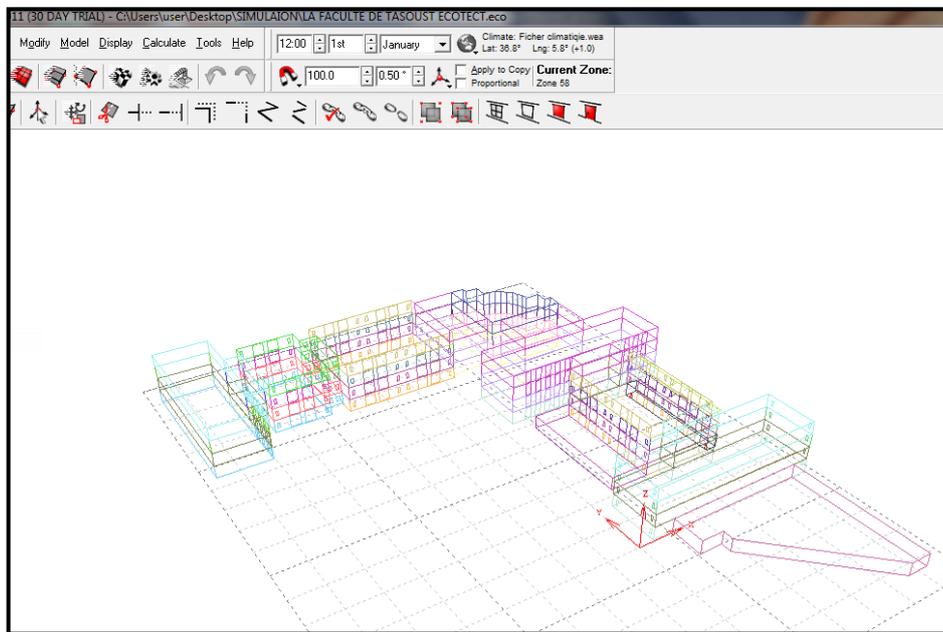


Figure 13 : Modalisation de 3D en Ecotect.
Source : Ecotect Analysis 2011.

5.5. La définition des matériaux :

Avant de faire la simulation il faut définir les composants de chaque paroi, ses caractéristiques physique et son épaisseur.

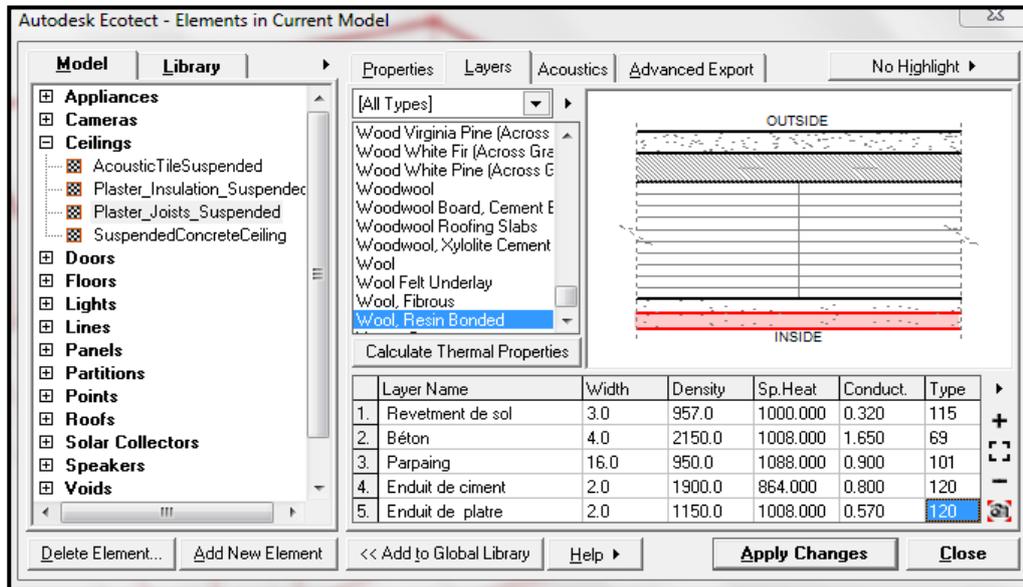


Figure 14 : La définition des matériaux en Ecotect.
Source : Ecotect Analysis 2011.

6.6. Définition du période d'utilisation :

Ecotect offre la possibilité de simuler les données relatives aux plusieurs journée de l'année, on a réglé donc les paramètres selon la période d'utilisation de la salle, du 1^{er} septembre au 30 juin, de 8 heures du matin jusque à 5 heures.

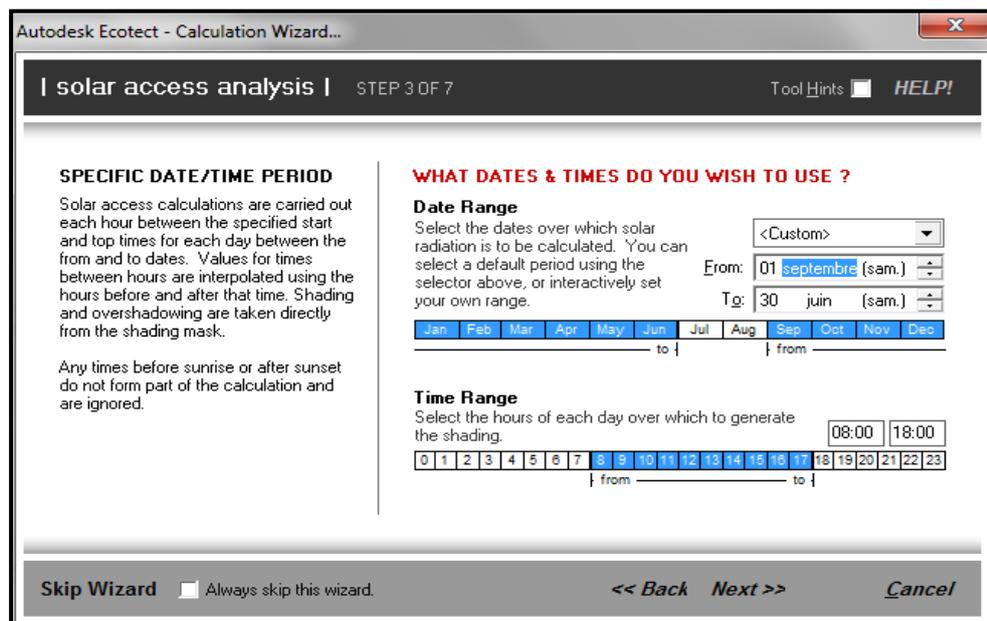


Figure 15 : Réglage de la période journalière et annuelle à simuler.

Source : Ecotect Analysis 2011.

Conclusion :

Ce chapitre était consacré pour la présentation du cas d'étude et pour l'explication de la méthode de simulation, et la démonstration de quelques scènes qu'on a pu établir par l'Ecotect Analysis 2011, et l'insertion des données et des informations qu'on doit analyser. On a commencé par une présentation du logiciel et l'objectif de simulation. Puis on s'est étalé sur les méthodes et les étapes suivies pour la modélisation en 3^{ème} dimension de la salle objet d'étude, et le paramétrage de l'Ecotect selon les données climatiques de la région de Jijel. Afin de l'élaboration des résultats après le lancement de l'analyse sous forme des courbes et des graphes.

Chapitre 05:
Analyse et interprétation
des résultats :

Introduction :

Pour saisir l'ambiance thermique à l'intérieur de la salle d'enseignement de la faculté des sciences économiques, il est important d'interpréter les résultats de simulation qu'on a eus après l'analyse des données saisies précédemment. Pour ce faire on va dans un premier lieu évaluer physiquement la quantité de la chaleur en comparant les ambiances thermiques obtenus aux celles recommandés.

1. Scénario 01 : Les températures intérieures avant l'application de béton léger :

1.1. Composition des éléments constructifs de modèle 01 (cas initial) :

1.1.1. Caractéristique du mur extérieur :

Tableau 10 : Matériaux constituant du mur extérieur.

Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité thermique (KJ/h.m.K) | Densité (Kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma |
|---------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--------|
| Exterieur -----> | Plaque d'aluminium | 5.56 | 825 | 0.03 | |
| | Ame d'air | 0.047 | 1 | 0.02 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Brique creuse | 0.39 | 650 | 0.15 | |
| | Ame d'air | 0.047 | 1 | 0.05 | |
| Intérieur -----> | Brique creuse | 0.39 | 650 | 0.10 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |

1.1.2. Caractéristique du mur intérieur :

Tableau 11 : Matériaux constituant du mur intérieur.

Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité thermique (KJ/h.m.K) | Densité (Kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--------|
| Extérieur -----» Intérieur | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Brique creuse | 0.39 | 650 | 0.10 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |

1.1.3. Caractéristique du plancher toiture :

Tableau 12 : Matériaux constituant du plancher toiture.

Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité thermique (KJ/h.m.K) | Densité (Kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--------|
| Extérieur -----» Intérieur | Carrelage | 3.79 | 2300 | 0.03 | |
| | Sable +mortier | 0.4100 | 2000 | 0.02 | |
| | Béton | 1.65 | 2150 | 0.04 | |
| | Hourdi | 0.90 | 950 | 0.16 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |

1.1.4. Caractéristique du plancher sol :

Tableau 13: Matériaux constituant du plancher sol.

Source : Auteur.

| Matériaux | Conductivité Thermique (KJ/h.m.K) | Densité (kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma | |
|----------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--------|--|
| Ext -----» Int | Carrelage | 3.79 | 2300 | 0.03 | |
| | Sable + mortier | 0.4100 | 2000 | 0.02 | |
| | Béton | 1.65 | 2150 | 0.15 | |
| | Pierre | 1.40 | 1895 | 0.20 | |

1.2. Interprétation des résultats de simulation du modèle 01 :

Les résultats de simulation via Ecotect 2011 se représentée courbes d'évaluation de température, désignées en 3 zones qui se distinguent par couleur (le rouge est la zone d'inconfort avec sensation du chaud, le blanc au milieu désigne la bande optimale du confort, et le bleu c'est la zone d'inconfort avec sensation du froid). L'étude s'effectuera pendant les journées spécifiques du 21 (Mars, Juin, Septembre et Décembre).

➤ Le 21 Mars :

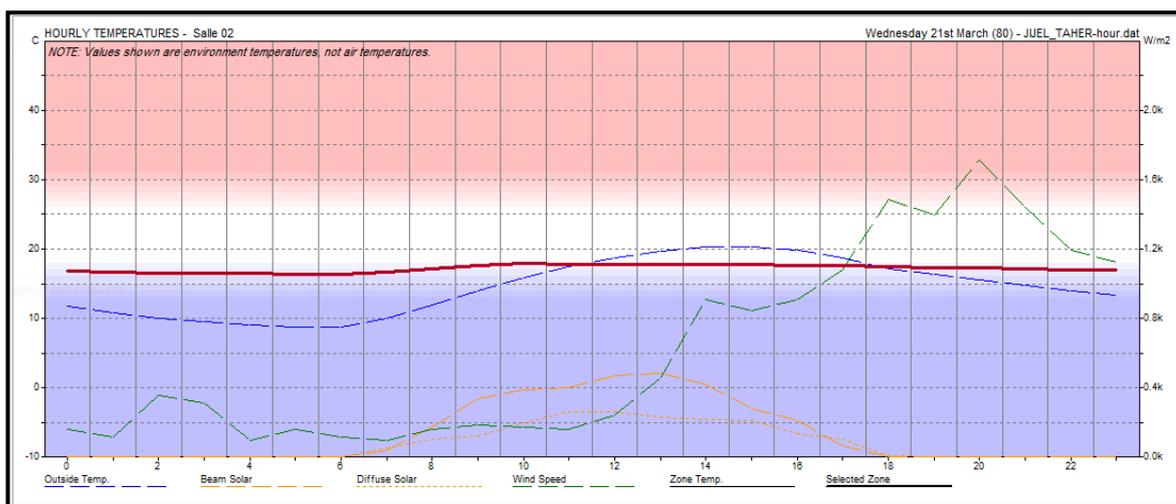


Figure 16 : La courbe d'évaluation temporelle de la température intérieure de la salle (21 Mars).

Source : Auteur.

On remarque que :

- Les températures intérieures pour la journée du 21 Mars sont à limite inférieure de la zone de confort.
- La température maximale à l'intérieur de la salle 18 °C.
- [08 :00 à 11 :30] : la température intérieure dépasse celle de l'extérieur, tandis qu'elle à la limite inférieure de la zone d'inconfort avec sensation du froid.
- [11 :30 à 17 :30] : la température extérieure dépasse celle de l'intérieure, tandis qu'elle est à la limite inférieure de la zone du confort.

➤ **Le 21 Juin :**

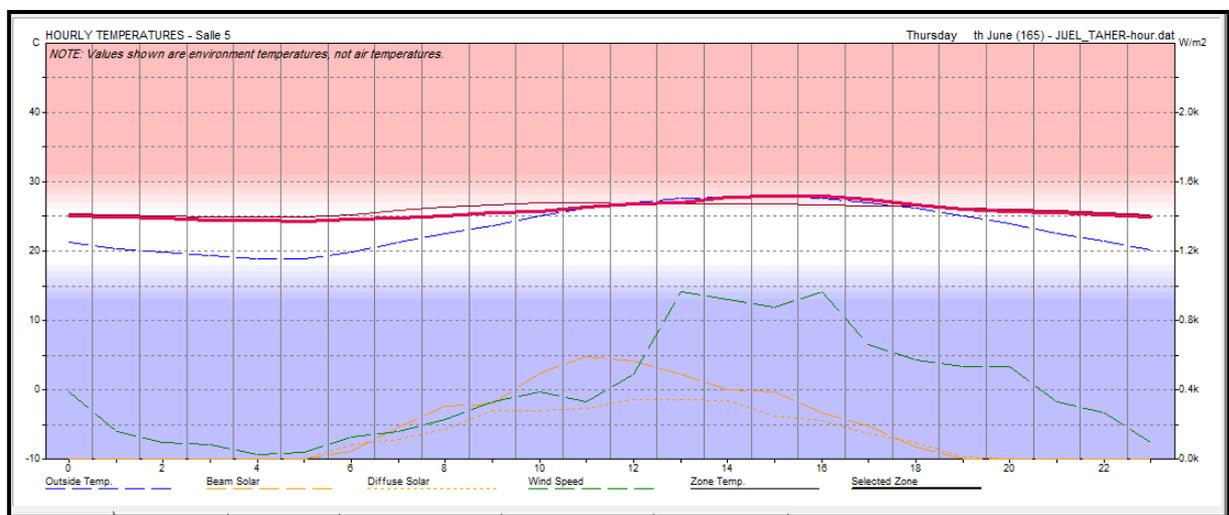


Figure 17 : La courbe d'évaluation temporelle de la température intérieure de la salle (21 Juin).
Source : Auteur.

On remarque que :

- Dans le jour de 21 Juin les températures ont l'intérieure a des moyennes élevé, la température extérieure dépasse celle de l'intérieur pendant tout la journée.
- Situation non confortable ce qui nécessitera la climatisation.

➤ **Le 21 Septembre :**

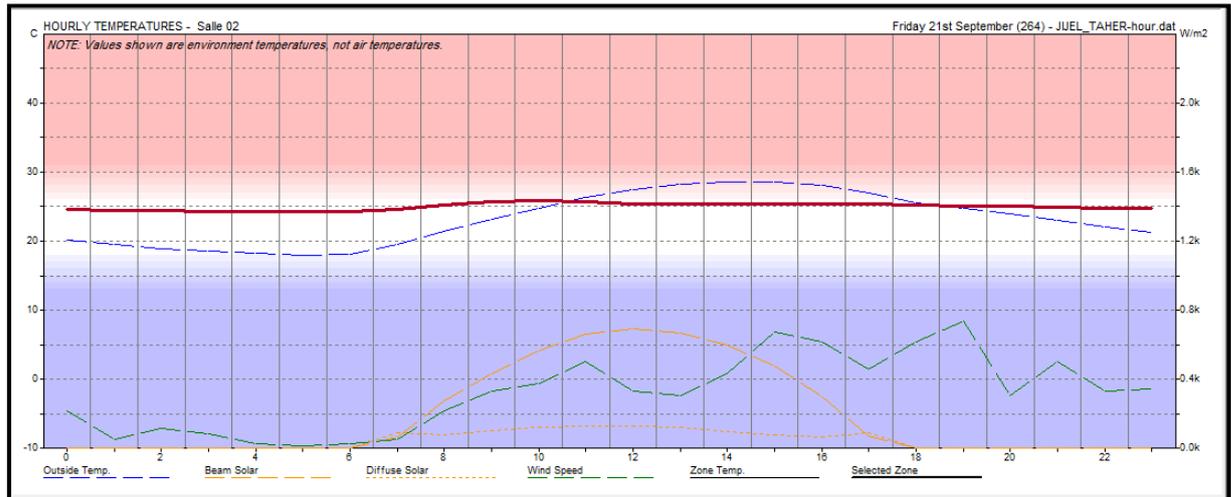


Figure 18 : La courbe d'évaluation temporelle de la température intérieure de la salle (21 Septembre).
Source : Auteur.

On remarque que :

- Les températures intérieures pour la journée du 21 septembre sont à limite supérieur de la zone de confort.
- La température maximale à l'intérieur de la salle 25 °C.
- [08 :00 à 10 :30] : la température intérieure dépasse celle de l'extérieur, tandis qu'elle à la limite inferieur de la zone d'inconfort avec sensation du froid.
- [10 :30 à 18 :00] : la température extérieure dépasse celle de l'intérieure, tandis qu'elle est à la limite inferieur de la zone du confort.

➤ **Le 21 Décembre :**

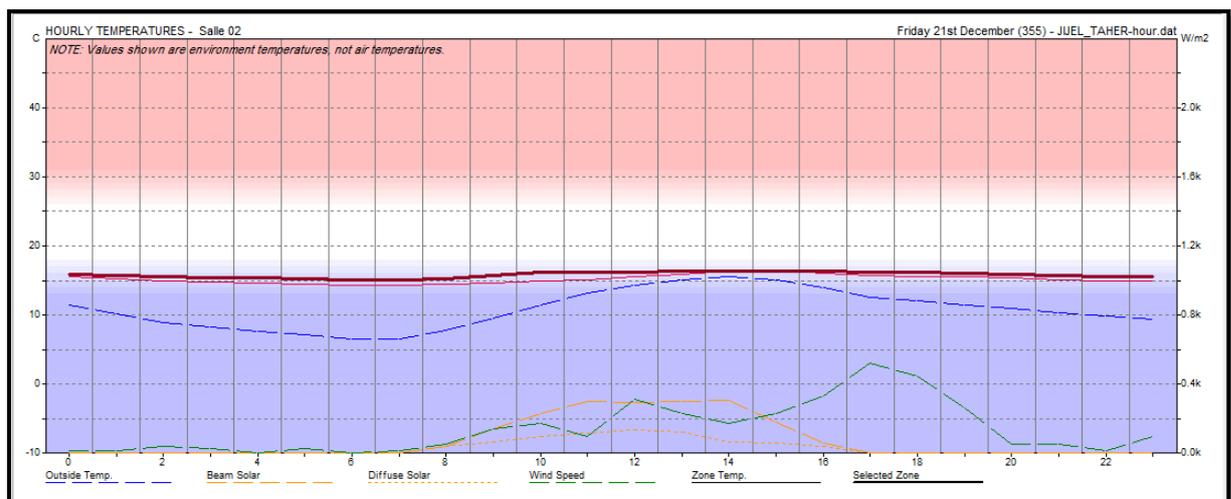


Figure 19 : La courbe d'évaluation temporelle de la température intérieure de la salle (21 Décembre).
Source : Auteur.

On remarque que :

- Les températures intérieures pour la journée du 21 Décembre sont à limite inférieure de la zone de confort.
- La température maximale à l'intérieur de la salle 17.5 °C.
- La température extérieure dépasse celle de l'intérieure pendant tout la journée.
- Situation non confortable ce qui nécessitera l'installation des équipements de chauffage.

2. Scénario 02 : Les températures intérieures après l'application de béton léger :

2.1 Composition des éléments constructifs de l du modèle 02 (cas proposé) :

2.1.1. Caractéristique du mur extérieur :

Tableau 14 : Matériaux constituant du mur extérieur

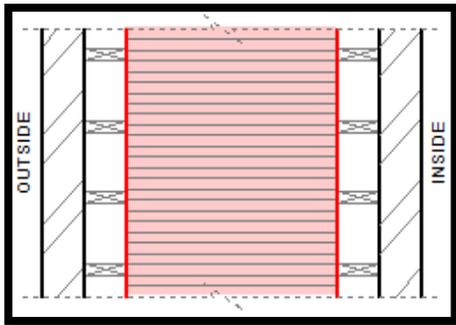
Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité Thermique (KJ/h.m.K) | Densité (kg/m ³) | Épaisseur (m) | Schéma |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--------|
| Exterieur ----->> | Plaque d'aluminium | 5.56 | 825 | 0.03 | |
| | Ame d'air | 0.047 | 1 | 0.02 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Béton légers | 0.09 | 350 | 0.15 | |
| | Ame d'air | 0.047 | 1 | 0.05 | |
| Intérieur ----->> | Béton légers | 0.09 | 350 | 0.10 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |

2.1.2. Caractéristique du mur intérieur :

Tableau 35 : Matériaux constituant du mur intérieur.

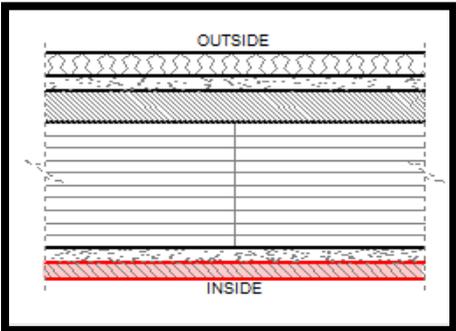
Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité Thermique (KJ/h.m.K) | Densité (kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|---|
| Exterieur -----» Intérieur | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 |  |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Béton Légers | 0.09 | 350 | 0.10 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |

2.1.3. Caractéristique du plancher toiture :

Tableau 16 : Matériaux constituant du plancher toiture.

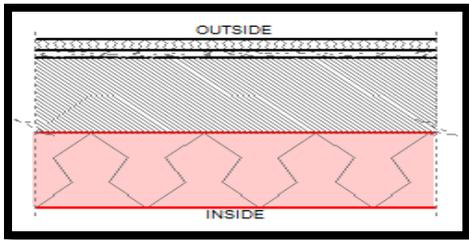
Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité Thermique (KJ/h.m.K) | Densité (kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|---|
| Exterieur -----» Intérieur | Carrelage | 3.79 | 2300 | 0.03 |  |
| | Sable +mortier | 0.4100 | 2000 | 0.02 | |
| | Béton | 1.65 | 2150 | 0.04 | |
| | Hourdi | 0.90 | 950 | 0.16 | |
| | Enduit de ciment | 0.800 | 1900 | 0.02 | |
| | Enduit de plâtre | 0.57 | 1150 | 0.02 | |

2.1.4. Caractéristique du plancher sol :

Tableau 17 : Matériaux constituant du plancher sol.

Source : Auteur.

| Matériaux | | Conductivité Thermique (KJ/h.m.K) | Densité (kg/m ³) | Epaisseur (m) | Schéma |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--|
| Ext ----- » ----- Int | Carrelage | 3.79 | 2300 | 0.03 |  |
| | Sable + mortier | 0.4100 | 2000 | 0.02 | |
| | Béton | 1.65 | 2150 | 0.15 | |
| | Pierre | 1.40 | 1895 | 0.20 | |

2.2. Interprétation des résultats de simulation du modèle 02 :

➤ Le 21 Mars :

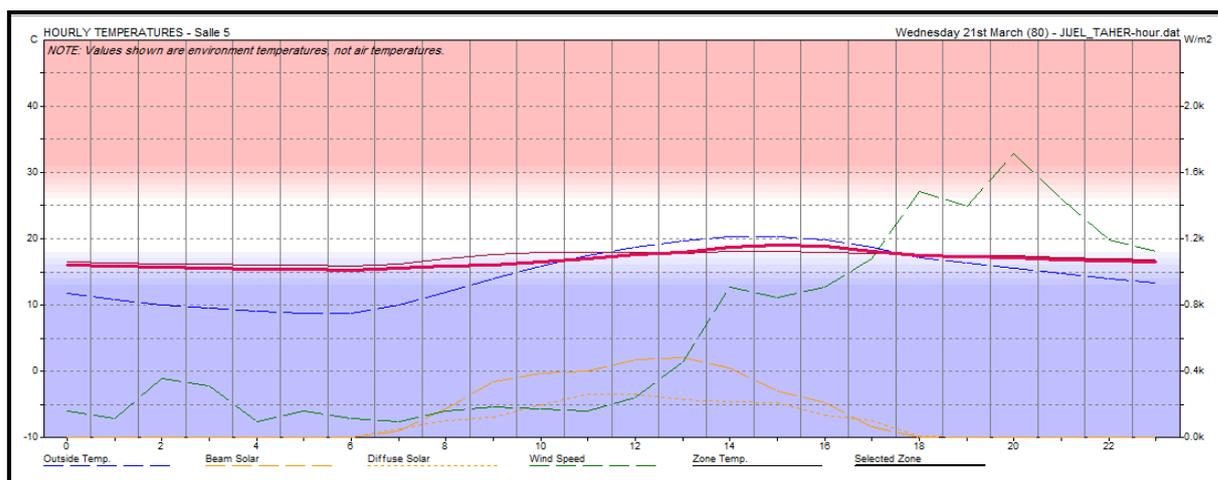


Figure 20 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Mars)

Source : Auteur.

On remarque que :

- Les températures intérieures pour la journée du 21 Mars sont à limite inférieure de la zone de confort.
- La température maximale à l'intérieur de la salle 20 °C.
- [08 :00 à 11 :00] : la température intérieure dépasse celle de l'extérieur, tandis qu'elle à la limite inferieur de la zone d'inconfort avec sensation du froid.
- [11 :00 à 17 :00] : la température extérieure dépasse celle de l'intérieure, tandis qu'elle est à la limite inferieur de la zone du confort.

➤ **Le 21 Juin :**

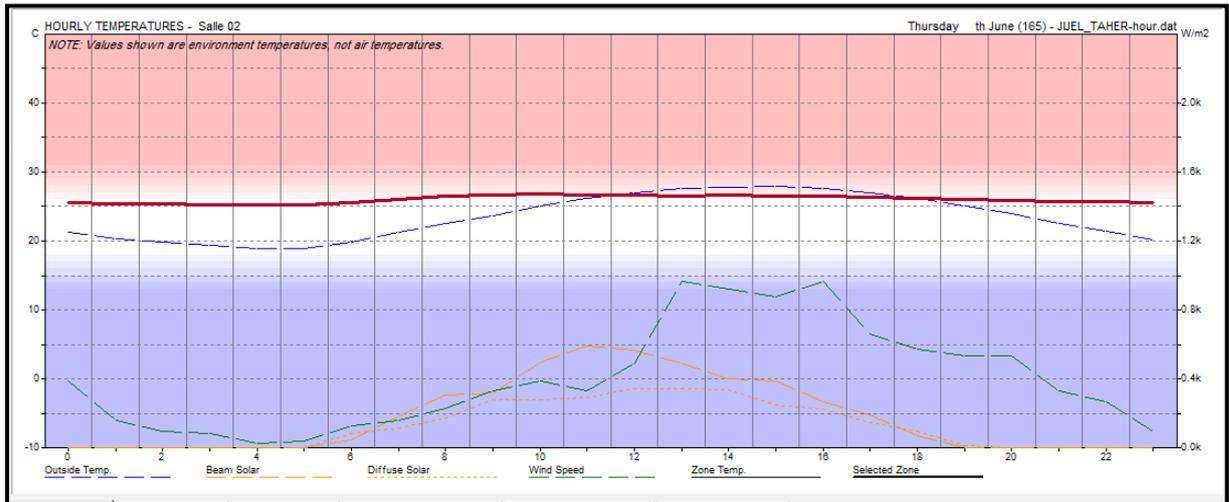


Figure 21 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Juin).

Source : Auteur.

On remarque que :

- Les températures intérieures pour la journée du 21 Mars sont à limite supérieur de la zone de confort.
- La température maximale à l'intérieur de la salle 26 °C.
- [08 :00 à 11 :00] : la température intérieure dépasse celle de l'extérieur, tandis qu'elle à la limite inferieur de la zone d'inconfort avec sensation du froid.
- [11 :00 à 17 :00] : la température extérieure dépasse celle de l'intérieure, tandis qu'elle est à la limite inferieur de la zone du confort.

➤ **Le 21 Septembre :**

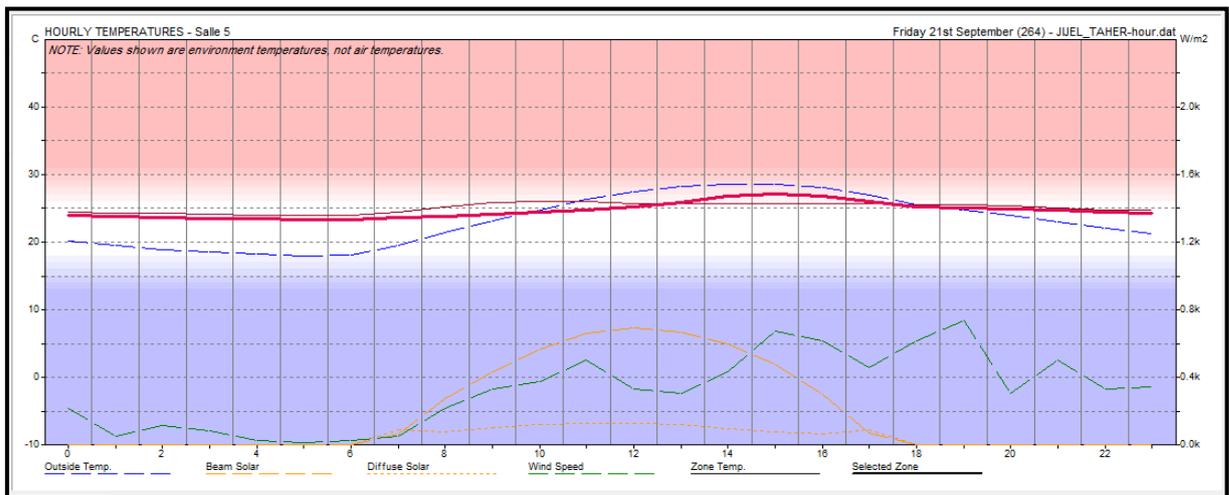


Figure 22 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Septembre).

Source : Auteur.

On remarque que :

- Les températures sont à la zone du confort durant toute la journée.
- La température maximale est 28°C.
- Les températures sont placées à la zone du confort Avec une augmentation de température durant l'après-midi.

➤ **Le 21 Décembre :**

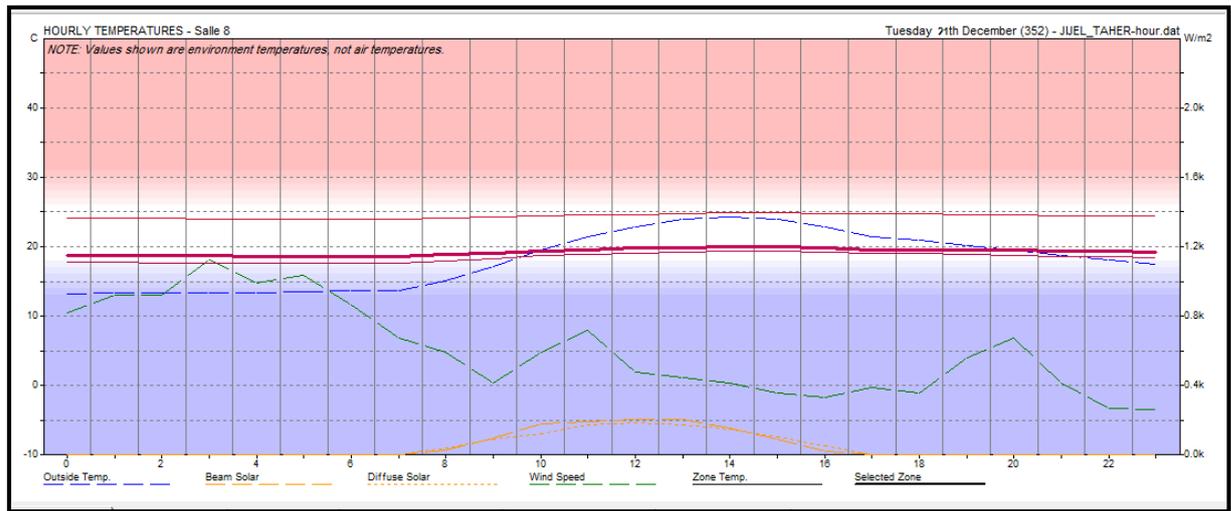


Figure 23 : La courbe d'évolution temporelle de la température intérieure de la salle (21 Décembre)

Source : Auteur.

On remarque, que les températures assurent la zone du confort avec une température maximale de 20°C. La température à l'extérieur dépasse celle de l'intérieur dans la plupart du temps de la journée.

3. Visualisation globale des résultats :

Tableau 18 : Résultats de la simulation.

Source : Auteur.

| Journée | Salle étudié | | Salle proposé | |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Température minimale | Température maximale | Température minimale | Température maximale |
| 21 Mars | 15°C | 18°C | 15°C | 19.80°C |
| 21 Juin | 25°C | 28.5°C | 24.50°C | 26°C |
| 21 Septembre | 23°C | 26°C | 23°C | 28°C |
| 21 Décembre | 15°C | 17.5°C | 17°C | 20°C |

En effet les résultats de la simulation ont montré que l'utilisation des bétons léger peu améliorer l'ambiance thermique à l'intérieur de la salle. Les résultats qui accompagnent le changement de type de matériau utilisé montrent que la qualité du matériau et ces propriétés physique influe sur le confort thermique à l'intérieur de la salle.

Conclusion :

Après l'étude comparative des températures intérieures des deux salles on peut affirmer que l'utilisation des bétons léger peut répondre aux exigences de confort des espaces intérieurs avec les mêmes performances que la brique et mieux que les bétons traditionnels, qui il est connu avec sa bonne isolation thermique.

D'après les résultats précédents l'utilisation des bétons légers diminue la consommation énergétique, par l'amélioration des températures intérieurs (environ 3°C). Le niveau de la consommation énergétique possède un impact direct sur le confort de bâtiment.

A travers cette étude, on a distingué que l'utilisation des bétons léger pour résoudre l'un des problèmes le plus important des bétons traditionnels qui est l'isolation thermique.

Conclusion générale :

Conclusion générale

Bien que connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, les bétons légers ont été employés dans notre pays de façon timide et individuelle. Ils connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt, qui semble tout à fait mérité en raison de leurs propriétés techniques et économiques intéressantes.

Tout le long de la présente recherche, on a procédé à la caractérisation et à l'apport des bétons légers. On a pu dégager les caractéristiques principales des bétons légers et conclure que ces bétons obtenus par incorporation d'air pouvaient se diviser en trois catégories selon la façon dont l'air est introduit dans le béton. Lorsque l'air est incorporé dans la pâte de ciment, le béton est qualifié de « béton cellulaire », lorsqu'il vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats, le béton est qualifié de « béton caverneux », et en fin lorsque les granulats sont eux-mêmes allégés, le béton est alors qualifié de « béton de granulats légers ».

Les bétons légers, de résistance parfois comparable à celle des bétons classiques, peuvent permettre une plus grande souplesse dans la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies. Par ailleurs, le béton léger trouve des applications relativement courantes dans la confection de structures isolantes. La présence de granulats légers dans le béton léger réduit en effet sensiblement le coefficient de conductivité thermique, permettant ainsi une meilleure isolation thermique.

L'étude bibliographique synthétique de l'ensemble des connaissances sur le confort thermique dans le bâtiment, nous a permis quant à elle de comprendre la complexité de ce sujet. Mais c'est au cours de la partie opérationnelle qu'on a pu réellement démontrer globalement l'apport avantageux du béton léger. En effet, et à l'aide d'un outil de simulation « Ecotect 2011 », une étude du confort thermique dans une salle de TD de la faculté des sciences économiques du pôle universitaire Tassoust. Les résultats de cette étude montrent parfaitement que les performances thermiques de bétons légers sont pratiquement les mêmes que la brique et mieux que des bétons traditionnels. Après avoir confirmé nos hypothèses de travail, on a pu conclure que les bétons légers peuvent résoudre les problèmes des bétons traditionnels et apporter des solutions techniques pour les problèmes d'isolation thermique.

L'influence des propriétés des granulats légers sur la conception architecturale et en particulier dans l'aspect du confort thermique des constructions n'est plus à démontrer. Par ailleurs, et vu la nouveauté de ces matériaux et la diversité des logiciels de simulation, il est difficile en une période limitée de toucher à toutes les propriétés et les apports des bétons légers. Des études plus poussées permettraient d'affiner les résultats et de se projeter en avant dans ce domaine.

Références biblio- graphiques:

Références bibliographiques :

Ouvrages :

- Bourcier Jacques, Rollet Michel et Schumacher Jean. *Construire avec les bétons*. Paris: LE MONITEUR, 2000, partie II, p. 445.
- Centre d'information sur le ciment et ses applications. *Les bétons : formulation, fabrication et mis en œuvre*. Paris : auteur, 2001, p. 77.
- Claude Parent. *Construire avec les bétons*. Paris : LE MONITEUR, 2000, p. 21.
- Dreux Georges et Festa Jean. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. 8^{ème} éd. Paris : Eyrolles, 1998, p. 339.
- Evrard Arnaud et De Herde André. *Architecture et climat*. Bruxelles : Fédération de L'Industrie Cimentière Belge, 2005.
- Evrard Arnaud et De Herde André. *Béton et construction durable*. Bruxelles : Fédération de L'Industrie Cimentière Belge, 2005.
- Fédération de l'industrie cimentière belge, les grands défis du béton construction passive et transformation urbaines. Bruxelles : FEBELCM, 2012.
- Gallauziaux Thierry et Fedullo David. *L'isolation par l'extérieur*. France : Eyrolles, 2010, p. 41.
- Guegan Christian, Legras Philippe, Mazzoleni Jean-François et Colin Christian. *Memento du béton cellulaire*. Paris: Eyrolles, 2005, chap. I, p. 04.
- Granju Jean-Louis. *Béton armé (théorie et applications selon euro code 02)*. Paris : EYROLLES, 2004.
- Holcim. *Guide pratique du béton*. 6^{ème} éd. Suisse : auteur, 2015, p. 10.
- Hoyet, Nadia. *Matériaux Et Architecture Durable*. Paris : DUNOD, 2013, p. 23.
- Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (IREX). *Les béton auto-plaçants*. France : Corlet, 2011.
- Neville Adem. *Properties of concrete*. London: PEARSON, 2011, 5^{ème} édition.
- OLGAYAY Victor. *Design with the climate*. New Jersey: Princeton University, 1963.
- Ollivier Jean-Pierre et Vichot Angélique. *La durabilité des bétons*, France : Presses des ponts, 2008, 1^{er} et 2^{ème} Edition.

- Roulet Claude-Alain. *Éco-confort Pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. [En ligne] Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012, p. 26. Disponible sur : <https://books.google.dz/books?id=wEHBZtBPEQgC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>. (Consulter le 04/02/1018).
- Syndicat national du béton cellulaire. *Mémento du béton cellulaire*. 1^{er} éd. Paris : Eyrolles, 2005, p. 28.

Thèses de doctorat :

- Milled Karim. *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé*. [En ligne] Thèse de doctorat en Mécanique, Structures et Matériaux. Bayonne : Ecole nationale des ponts et chaussées, 2006, p. 06. Format PDF. Disponible sur : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001820/document> (Consulté le 21/04/2018).
- Shink Mélanie. *Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers*. [En ligne] Thèse de doctorat en génie civile. Québec : Université Laval, 2003, chap. I, p. 05. Disponible sur : <http://docplayer.fr/28537174-Compatibilite-elastique-comportement-mecanique-et-optimisation-des-betons-de-granulats-legers.html>. (Consulté le : 19/03/2018).
- Yang Ke. *Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers*. [En ligne] Thèse doctorat en génie civil. Pontoise : Ecole doctorale sciences et ingénierie, 2008, chap. II, p. 66. Format PDF. Disponible sur : <http://biblioweb.u-cergy.fr/theses/08CERG0395.pdf> (Consulté le : 08/04/2018).

Thèses de magister :

- Calais Thomas. *Propriétés mécanique et durabilité d'un béton léger*. Thèse pour l'obtention du grade de maitre ès sciences en génie civil. Québec : université Laval, 2013.
- Herihiri Ouided. *Formulation et caractérisation des bétons légers*. [En ligne] Thèse de magistère en génie civile. Biskra : Université Mohamed Khider, 2010, chap. I, p. 56. Format PDF. Disponible sur : http://thesis.univ-biskra.dz/2652/1/M%C3%A9moire_GC_2010.pdf. (Consulté le : 13/04/2018).
- Mazari Mohammed. *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public*. Thèse de magister en architecture. Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2012, chap. I, p. 14.
- Zambon Agnes, Saiyouri Nadia et Sbartai Zoubir-Mehdi. *Formulation et comportement d'un béton allégé à base de sédiments marins*. Thèse de master en génie civil. Bayonne : Universitaires de génie civil, 2015.

Site d'internet :

- http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF_Eco_construction_MAT14_Part_FR.PDF. (Consulter le :14/05/2018).
- <http://materiauxdeconstructiondapresguerre.be/materiel/beton-leger/>. (Consulté le : 12/06/2018).
- <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16892>. (Consulter le 15/04/2018).
- <http://www.wilaya-jijel.dz/jijel/index.php/presentation/pres>. (Consulter le : 07/05/2018).
- <https://www.leguידedelamaison.com/338-les-isolants-d-origine-animale.htm.pdf>. (Consulter le 17/05/2018).
- <https://www.samse.fr/isolation-combles-amenageables/isolation-polystyrene-expande>.(Consulté le : 16/05/2018).
- <http://materiauxdeconstructiondapresguerre.be/materiel/isolation-thermique-et-acoustique/>.
- <http://www.guidebeton.com/beton-leger>.
- https://combles.ooreka.fr/comprendre/materiau_beton_leger.
- <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/le-beton-leger-au-service-de-l-isolation-thermique.33586>.

Rapports des conférences et des projets d'application :

- Benmalek Mohammed Larbi et Bederina Madani. *Les performances mécaniques et thermiques d'un béton léger à base de déchets industriels solides et de granulats de bois*. 2014, Université 08 mai 1945 à la faculté des Sciences et de la technologie de Guelma, Guelma : auteur, 2014, p. 06.
- Contant Marc. Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux. [En ligne] Projet d'application en génie de la construction. Montréal : Ecole de la technologie supérieure, 2000, chap. I, p. 06. Format PDF. Disponible sur : http://www.collectionsca.nada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape4/PQDD_0018/MQ56050.pdf. (Consulté le : 19/03/2018).

Cours, guide, et revu périodique :

- Drouna, K. (communication personnelle [polycopie]). *Technique des matériaux de construction*. Jijel : Département d'architecture université Mohamed Seddik Ben Yahia, 2013.

- Groupement belge du béton. Technologie du béton. [En ligne]. Belge : auteur, 2007. Disponible sur : https://www.gbb-bbg.be/fileadmin/gbb/PDF/FR/Formations/Cours_Liege/FolderLi_ge_pour_mailing__2_.pdf. (Consulter le : 25/05/2018)
- Halloufi Wahide. (Communication personnelle [polycopie]). *Le confort thermique dans le bâtiment*. Jijel : Département d'architecture université Mohamed Seddik Ben Yahia, 2016.
- Laterlite. *Bétons prêts à l'emploi légers, isolants et structurels*. Guide technique. France : auteur, 2015.
- Lecheheb Mostafa. (Communication personnelle [polycopie]). *Construction et les ambiances thermiques et hygrométriques*. Jijel : Département d'architecture université Mohamed Seddik Ben Yahia, 2016.

Résumé :

Parmi les données de base de tout conception architecturale les matériaux de construction, pas seulement pour leur rôle structurel, ils offrent aussi des avantages tant économiques qu'environnementaux.

Ce mémoire est consacré à l'étude de l'apport des bétons légers pour la conception architecturale. Le béton léger, fait partie de la gamme des bétons spéciaux. Ces caractéristiques suggèrent de nouvelles applications. Ces bétons sont normalement réalisés par trois manières : en employant les granulats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de 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.

Ce qui distingue le béton léger du béton ordinaire est sa faible masse volumique. La masse volumique du béton ordinaire varie de 2 200 à 2 600 kg/m³ tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1 850 kg/m³. L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids et de dimensions des éléments construits. Les bétons légers aussi ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments. Ce dernier est un matériau isolant, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable, et élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs.

L'objet de cette initiation à la recherche est d'étudier le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment avec le changement des matériaux locaux par le béton léger à l'aide du logiciel de simulation Ecotect Analysis 2011, pour déterminer l'effet de l'utilisation de ces bétons sur le bien être thermique des occupants et élaborer des orientations sur l'utilisation des bétons légers dans le domaine de la construction, et en particulier au niveau du confort thermique.

Mots clés : Conception architecturale, Béton léger, Masse volumique, Comportement thermique, Confort thermique, Simulation, Ecotect.

Abstract:

Among the basic data of any architectural design building materials, not only for their structural role, they also offer both economic and environmental benefits.

This thesis is devoted to the study of the contribution of lightweight concretes for architectural design. Lightweight concrete is part of the range of special concretes. These features suggest new applications. These concretes are normally made in three ways: by using light aggregates, aeration or gas, or by making a reduction of the fine part of the granulate. In each of the three cases the reduction of the density of the concrete is carried out by an increase of the air voids in the concrete.

What distinguishes lightweight concrete from ordinary concrete is its low density. The density of ordinary concrete varies from 2 200 to 2 600 kg / m³ while that of light concrete varies between 300 and 1 850 kg / m³. The use of a concrete of low density contributes to the reduction of the weight and dimensions of the elements built. Lightweight concrete also has low thermal conductivity and sound insulation. Therefore, they can provide a very interesting technical solution to the problem of thermal and acoustic insulation in buildings. The latter is an insulating material, which absorbs excess heat during the day, in summer. It offers a dry and comfortable space and eliminates the moisture that can condense on the walls.

The purpose of this research initiation is to study the thermal behaviour of the building envelope with the change of local materials by lightweight concrete using the Ecotect Analysis2011 simulation software, to determine the effect of the use of these concretes on the thermal well-being of the occupants, and to develop guidelines on the use of lightweight concrete in the field of construction, and in particular at the level of thermal comfort.

Key words: Architectural design, Lightweight concrete, Density, Thermal behavior, Thermal comfort, Simulation, Ecotect.

ملخص :

من بين البيانات الأساسية لأي تصميم معماري مواد البناء، ليس فقط لدورها الهيكلي، فإنها توفر أيضاً مزايا اقتصادية وبيئية.

هذه الأطروحة مكرسة لدراسة مساهمة الخرسانة خفيفة الوزن للتصميم المعماري. الخرسانة خفيفة الوزن هي جزء من مجموعة من الخرسانات الخاصة. لها مميزات تسمح بتطبيقات جديدة. تصنع هذه الخرسانة عادة بثلاث طرق: باستخدام المجاميع الخفيفة أو التهوية أو الغاز، أو عن طريق تقليل الحصى. في كل من الحالات الثلاث، يتم تقليل كثافة الخرسانة عن طريق زيادة فراغ الهواء في الخرسانة.

ما يميز الخرسانة خفيفة الوزن من الخرسانة العادية هو كثافتها المنخفضة. تتراوح كثافة الخرسانة العادية من 2200 إلى 2600 كجم / م³ بينما تتراوح الخرسانة الخرسانية بين 300 و1850 كجم / م³. يساهم استخدام الخرسانة منخفضة الكثافة في تقليل وزن وأبعاد العناصر المبنية. الخرسانة خفيفة الوزن لديها أيضاً ناقلية حرارية منخفضة وعزل صوتي جيد. لذلك، يمكنهم توفير حل تقني مثير للاهتمام لمشكلة العزل الحراري والصوتي في المباني. تعتبر الخرسانة الخفيفة مادة عازلة، تمتص الحرارة الزائدة خلال النهار، في الصيف. توفر مساحة جافة ومريحة، وتزيل الرطوبة التي يمكن أن تتكاثف على الجدران.

الغرض من هذا البحث هو دراسة السلوك الحراري لمواد البناء مع تغيير المواد المحلية بواسطة خرسانة خفيفة باستخدام برنامج محاكاة Ecotect Analysis 2011، ووضع مبادئ توجيهية بشأن استخدام الخرسانة خفيفة الوزن في مجال البناء، وعلى وجه الخصوص على مستوى الراحة الحرارية.

الكلمات المفتاحية : التصميم المعماري، الخرسانة الخفيفة، الكتلة الحجمية، السلوك الحراري ، الراحة الحرارية، المحاكاة.

Résumé :

Parmi les données de base de tout conception architecturale les matériaux de construction, pas seulement pour leur rôle structurel, ils offrent aussi des avantages tant économiques qu'environnementaux.

Ce mémoire est consacré à l'étude de l'apport des bétons légers pour la conception architecturale. Le béton léger, fait partie de la gamme des bétons spéciaux. Ces caractéristiques suggèrent de nouvelles applications. Ces bétons sont normalement réalisés par trois manières : en employant les granulats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de 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.

Ce qui distingue le béton léger du béton ordinaire est sa faible masse volumique. La masse volumique du béton ordinaire varie de 2 200 à 2 600 kg/m³ tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1 850 kg/m³. L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids et de dimensions des éléments construits. Les bétons légers aussi ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments. Ce dernier est un matériau isolant, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable, et élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs.

L'objet de cette initiation à la recherche est d'étudier le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment avec le changement des matériaux locaux par le béton léger à l'aide du logiciel de simulation Ecotect Analysis 2011, pour déterminer l'effet de l'utilisation de ces bétons sur le bien être thermique des occupants et élaborer des orientations sur l'utilisation des bétons légers dans le domaine de la construction, et en particulier au niveau du confort thermique.

Mots clés : Conception architecturale, Béton léger, Masse volumique, Comportement thermique, Confort thermique, Simulation, Ecotect.