

## Remerciement :

Au terme de notre travail de fin d'études, nous tenons à adresser nos vifs remerciements et nos sincères gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à sa réussite. Nous tenons tout d'abord à remercier l'ingénieur chef de projets à NOVEC Monsieur Redouane HALIMY pour sa patience et sa disponibilité ainsi que son encadrement tout au long de la réalisation de notre projet, nous le remercions du fond de cœur pour les efforts qu'il a déployés et ses conseils afin d'assurer un bon déroulement du stage.

Nous tenons à remercier tout particulièrement M.DEBBAGH et M.MELIANI pour les efforts qu'ils n'ont cessé de déployer afin d'assurer un meilleur rendement de nos résultats et une meilleure direction de l'objectif de notre sujet.

Nous transmettons de même nos remerciements les plus sincères à Monsieur Issam BELABDIA, ingénieur responsable audit qualité à NOVEC, pour son assistance et son support tout au long de notre PFE.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur Oualid BOUHOUT pour nous avoir fournis de précieux conseils et recommandations concernant le calcul sur CBS et ROBOT MILLENIUM.

Enfin que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail trouve ici l'expression de notre reconnaissance.



*Dédicace*

*A celle qui a attendu avec patience les rangons de sa bonne  
éducation et de ses dévouements*

*A ma chère mère ;*

*A ma petite famille qui m'a toujours raffermi ;*

*A mon père ;*

*A mes chers frères ;*

*A mon amie linôme Nexha Talssi ;*

*A ma meilleure amie chère à mon cœur*

*Kawtar El Akhdar ;*

*A tous mes amis et camarades ;*

*Je dédie le fruit de ces indélébiles années d'études.*

*Asmaa Amdouni*



### *Dédicace*

*A Dieu vivant et éternel, par votre grâce que chaque exploit  
est atteint, toutes mes louanges et mes gratitude...*

### *A mes chers parents*

*Mes profonds remerciements pour votre support et votre soutien  
qui ne cessent d'être le socle de ma volonté d'aller de l'avant et ma  
reconnaissance pour toutes les peines endurées, toutes les privations  
et sacrifices consenties...*

*A mes chères sœurs avec tous mes vœux d'une vie prospère et  
heureuse*

*A ma meilleure amie pour son encouragement, son dévouement  
et sa présence auprès de moi tout au long de ce travail*

*A tous mes proches mes sincères sentiments...*

*Nexha Talssi*

## Table de matière :

REMERCIEMENT :.....	1
<u>LISTE DES FIGURES :</u> .....	7
<u>LISTE DES TABLEAUX :</u> .....	8
<u>LISTE DES ANNEXES :</u> .....	9
<b>I. RESUME :</b> .....	<b>10</b>
<b>II. PREAMBULE : LES ENJEUX DE L'ENERGETIQUE DU BATIMENT.</b> .....	<b>11</b>
I. APPROCHE MONDIALE : .....	11
1) <i>Le secteur des bâtiments : des enjeux énergétiques mondiaux et régionaux importants :</i> .....	11
II. APPROCHE NATIONALE : .....	12
1) <i>Les enjeux énergétiques et socio-économiques pour le Maroc :</i> .....	12
2) <i>Qu'est-ce que le Programme National d'Efficacité Énergétique dans le bâtiment ?</i> .....	13
<b>III. INTRODUCTION :</b> .....	<b>16</b>
<b>IV. PRESENTATION GENERALE DU PROJET :BATIMENT D'ACCUEIL AGROPOLIS A MEKNES</b> .....	<b>17</b>
I. PRESENTATION DU PROJET : .....	17
1) <i>Contexte du projet :</i> .....	17
2) <i>Le concept du projet :</i> .....	17
3) <i>Composantes du projet :</i> .....	20
4) <i>Particularité du projet :</i> .....	23
II. TRAVAIL DEMANDE : .....	24
III. REGLEMENTS EN VIGUEUR : .....	24
<b>V. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT</b> .....	<b>26</b>
I. CONCEPTION .....	26
II. ETAPES CONCEPTION .....	26
III. CONCEPTION PARASISMIQUE .....	27
1) <i>Système de portiques</i> .....	27
2) <i>Système de refends</i> .....	27
3) <i>Système mixte refends-portiques :</i> .....	27
IV. VARIANTES DE CONCEPTIONS DU PROJET .....	28
V. CHOIX DU TYPE DE PLANCHER : .....	28
1) <i>Différents types de plancher :</i> .....	28
2) <i>Choix final :</i> .....	29
VI. PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS STRUCTURAUX .....	29

1) Dalle :	29
2) Voiles :	30
3) Poutres :	30
4) Plans de coffrage :	30
<b>VII. MODELISATION PAR LOGICIEL :</b>	<b>31</b>
1) Paramètres de la modélisation :	31
a) Charges appliquées :	31
b) Caractéristiques des matériaux :	32
c) Données géotechniques :	32
d) Zonage sismique :	32
e) Modélisation informatique :	33
2) Pré-dimensionnement par CBS-PRO :	34
a) Dalle :	34
b) Voiles et Poutres :	35
c) Poteaux :	37
d) Semelles :	38
<b>VIII. CALCUL DU FERRAILLAGE DES ELEMENTS EN BA PAR CBS PRO ET ROBOT MILLENIUM : STATIQUE ET DYNAMIQUE.</b>	<b>40</b>
1) Calcul statique :	40
a) Poutres :	41
b) Voiles :	42
c) Poteaux :	44
d) Semelles :	45
2) Calcul dynamique : méthode simplifiée :	47
<b>VI. TRAITEMENT THERMIQUE DE LA STRUCTURE</b>	<b>50</b>
I. ZONAGE CLIMATIQUE :	50
II. EVALUATION ENERGETIQUE :	54
1) Les Déperditions dans le bâtiment :	54
2) Les apports d'énergie dans le bâtiment :	55
3) Performance énergétique d'un bâtiment :	55
a) La toiture-terrasse :	55
b) Les parois verticales :	55
c) Les fenêtres :	56
d) Les ponts thermiques :	56
e) Le sol :	57

f)	Le renouvellement de l'air : .....	57
g)	Besoin de chauffage.....	57
III.	DISPOSITIONS D'ISOLATION : .....	58
1)	<i>Spécifications thermique de la zone de Meknès</i> .....	58
2)	<i>Isolation des parois verticales</i> : .....	59
a)	Définition générale : .....	59
b)	Performances : .....	60
3)	<i>Isolation des terrasses</i> : .....	62
a)	Définition générale : .....	62
b)	Performances : .....	62
c)	Emplacement de pare-vapeur : .....	63
4)	<i>Isolation du plancher bas</i> : .....	64
a)	Définition : .....	64
b)	Procédure : .....	65
5)	<i>Traitement des ouvertures (fenêtres, portes)</i> : .....	66
a)	Définition : .....	66
b)	Performance thermique : .....	66
c)	Caractéristiques: .....	67
d)	Aluminium à rupture pont thermique : .....	68
e)	Minimiser les surchauffes : .....	69
f)	OPTIMISER L'ORIENTATION DU BÂTIMENT : .....	70
6)	<i>Confort d'été</i> : .....	71
a)	Définition : .....	71
b)	Solutions possibles : .....	71
7)	<i>Ponts thermiques</i> : .....	72
a)	Définition : .....	72
b)	Poteaux porteurs ou chaînages intégrés dans une paroi courante isolée: .....	73
c)	Intersection paroi intérieure / mur extérieur isolé par l'intérieur .....	75
d)	Au point de raccordement entre la façade et la dalle : .....	75
VII.	<b>EVALUATION DE SURCOUT</b> .....	79
I.	COMPARAISON ENTRE STRUCTURE ISOLEE ET NON ISOLEE .....	79
1)	<i>Données d'entrée</i> : .....	79
2)	<i>Bilan thermique</i> : .....	80
a)	Définition : .....	80

b)	Bilan Thermique du Bâtiment : .....	81
c)	Choix des installations de climatisation/chauffage : .....	82
3)	<i>Comparaison de consommation</i> : .....	84
a)	Consommation électrique des appareils : .....	84
b)	Bilans de puissances électriques:.....	86
c)	Comparatif de consommation totale du bâtiment : .....	89
4)	<i>Estimatif du cout</i> : .....	89
a)	Surcoût de la structure : .....	89
b)	Taux de retour sur investissement : .....	90
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSION</b> : .....	<b>92</b>
<b>IX.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE &amp; WEBOGRAPHIE</b> : .....	<b>94</b>
	<b><u>ANNEXES</u></b> .....	<b>95</b>

**Liste des figures :**

Figure 1 :	Consommation d'énergie finale du secteur du bâtiment dans le monde en 2007.....	11
Figure 2 :	Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la méditerranée su sud sur la période 2012-2030.....	12
Figure 3 :	Structure de la consommation par secteur au Maroc .....	13
Figure 4 :	Plan de situation du bâtiment Agropolis à Meknès .....	19
Figure 5 :	Plan de masse du bâtiment .....	19
Figure 6 :	Vue Architecturale 3D du bâtiment .....	20
Figure 7 :	Plan de la structure divisée en 3 blocs .....	21
Figure 8 :	Carte sismique du Maroc.....	33
Figure 9 :	Pré-dimensionnement des voiles et poutres du RDC, Bloc 1, Tranche 1.....	35
Figure 10 :	Pré-dimensionnement des voiles et poutres du RDC, Bloc 2, Tranche 1. ....	36
Figure 11 :	Pré-dimensionnement des voiles et poutres RDC, Tranche 2.....	36
Figure 12 :	Pré-dimensionnement des poteaux du RDC, Bloc 1, Tranche 1.....	37
Figure 13 :	Pré-dimensionnement des poteaux du RDC, Bloc 2, Tranche 1.....	37
Figure 14 :	Pré-dimensionnement des poteaux du RDC, Tranche 2. ....	38
Figure 15 :	Pré-dimensionnement des semelles du RDC, Bloc 1, Tranche 1.....	38
Figure 16 :	Pré-dimensionnement des semelles du RDC, Bloc 2, Tranche 1. ....	39
Figure 17 :	Pré-dimensionnement des semelles du RDC, Tranche 2.....	39
Figure 18 :	Model du RDC du Bloc 1, Tranche 1. ....	40
Figure 19 :	Plan d'exécution de la poutre POU1_01 du RDC, Bloc 1, Tranche 1.....	41

Figure 20 : Plan d'exécution de la voile P1_05 du RDC, Bloc 1, Tranche 1. ....	43
Figure 21 : Plan d'exécution du poteau POT1_04 du RDC, Bloc 1, Tranche 1.....	44
Figure 22 : Plan d'exécution de la semelle isolée SIO_04 , Bloc 1, Tranche 1. ....	45
Figure 23 : Plan d'exécution de la semelles filante SF0_05 , Bloc 1, Tranche 1. ....	46
Figure 24 : Spectre pour la direction X, Bloc 1, Tranche 1. ....	47
Figure 25 : Spectre pour la direction Y, Bloc 1, Tranche 1.....	47
Figure 26 : Carte du zonage climatique du Maroc selon degrés jours de chauffage (DJCH) à base de 18 °C.....	51
Figure 27 : Carte du zonage climatique du Maroc selon degrés jours de climatisation (DJCL) à Base de 21 °C.....	52
Figure 28 : Zonage climatique du Maroc adapté aux besoins de la réglementation thermique dans le bâtiment. ....	53
Figure 29 : besoins énergétiques spécifiques de chauffage et climatisation : 12 localités du Maroc. .	54
Figure 30 : Quantification des principales déperditions énergétiques. ....	55
Figure 31 : Contraintes constructives et géométriques dans un pont thermique. ....	57
Figure 32 : Inventaire des déperditions & apports dans un bâtiment. ....	57
Figure 33 : Mode d'isolation des façades par la laine de verre.....	60
Figure 34 : Mode d'isolation de la terrasse.....	64
Figure 35 : Mode d'isolation du plancher bas. ....	65
Figure 36 : Principe de fonctionnement d'un vitrage à faible émissivité.....	68
Figure 37 : Fenêtres en Aluminium à rupture pont thermique.....	69
Figure 38 : Principaux ponts thermiques présents dans un bâtiment. ....	72
Figure 39 : Lignes de flux de différents ponts thermiques.....	73
Figure 40 : Différence de température dans les poteaux porteurs/chainages avant isolation. ....	74
Figure 41 : Différence de température dans poteaux porteurs/ chainages après isolation. ....	74
Figure 42 : Lignes de flux dans l'intersection d'une paroi intérieure/ mur extérieur. ....	75
Figure 43 : Isolation intérieure de l'intersection d'une paroi intérieure /mur extérieur.....	75
Figure 44 : Pont thermique d'un plancher. ....	76
Figure 45 : l'emplacement des rupteurs thermiques continus dans un bâtiment isolé par l'intérieur.77	
Figure 46 : Différentes vues d'un rupteur. ....	78

**Liste des Tableaux :**

Tableau 1 : Epaisseurs des dalles alvéolées. ....	29
Tableau 2 : Charges permanentes.....	31

Tableau 3 : Charges d'exploitation.....	31
Tableau 4 : Caractéristiques des matériaux. ....	32
Tableau 5 : Données géotechniques du site. ....	32
Tableau 6 : Poids mort des différents types de dalles alvéolées. ....	34
Tableau 7 : Déplacements selon X du Bloc 1, Tranche 1.....	48
Tableau 8 : Déplacements selon Y du Bloc 1, Tranche 1.....	48
Tableau 9 : Déplacements admissibles pour chaque niveau du Bloc 1, Tranche 1.....	49
Tableau 10 : Exigences limites règlementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments à usage bureaux .....	58
Tableau 11 : Données d'entrée de la zone climatique de Meknès.....	79
Tableau 12 : Bilan thermique du bâtiment suivant l'isolation normale et isolation renforcée.....	82
Tableau 13 : Bilan de consommation des appareils du bâtiment suivant l'isolation normale. ....	84
Tableau 14 : bilan de consommation des appareils du bâtiment suivant l'isolation renforcée. ....	85
Tableau 15 : Bilan de puissance totale en KVA du bâtiment sans isolation.....	87
Tableau 16 : Bilan de puissance totale en KVA du bâtiment avec isolation.....	88
Tableau 17 : Comparatif de consommation totale du bâtiment.....	89
Tableau 18 : Récapitulatif des prix du bâtiment suivant l'isolation normale et renforcée.....	90

### Liste des Annexes :

Annexe 1 : Plans architecturaux du bâtiment

Annexe 2 : Plans de coffrage de la structure.

Annexe 3 : Plans de Pré-dimensionnement des éléments structuraux du Bloc 1, Tranche 1.

Annexe 4 : Plans de Pré-dimensionnement des éléments structuraux du Bloc 2, Tranche 1.

Annexe 5 : Plans de Pré-dimensionnement des éléments structuraux de la Tranche 2.

Annexe 6 : Plans d'exécution des quelques éléments structuraux du Bloc 2, Tranche 1.

Annexe 7 : Plans d'exécution des quelques éléments structuraux de la Tranche 2.

Annexe 8 : Résultats du Calcul simplifié du Bloc 2 de la Tranche 1 & Tranche 2.

## I. Résumé :

Le présent mémoire consiste à évaluer l'apport de l'efficacité énergétique sur la consommation en énergie d'un bâtiment. L'ouvrage faisant l'objet de cette étude est le Bâtiment d'Accueil Agropolis à Meknès, destiné à un usage de bureaux.

Notre projet de fin d'études consiste à faire la conception et le dimensionnement des différentes composantes de ce bâtiment afin d'assurer la meilleure efficacité énergétique possible.

### **L'étude sera ainsi répartie en trois phases :**

- Phase 1 : Conception et dimensionnement de la structure
- Phase 2 : Traitement thermique de la structure
- Phase 3 : Evaluation de l'apport du traitement thermique sur la consommation énergétique du bâtiment par une comparaison entre les bilans thermiques et de puissances du bâtiment avant et après la mise des dispositions de l'isolation.

## II. Préambule : les enjeux de l'énergétique du bâtiment.

### I. Approche mondiale :

#### 1) Le secteur des bâtiments : des enjeux énergétiques mondiaux et régionaux importants :

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente à lui seul autour de 35 % de la consommation d'énergie finale et contribue à hauteur d'un tiers environ des émissions de CO<sub>2</sub>, comme le montre le graphique suivant :

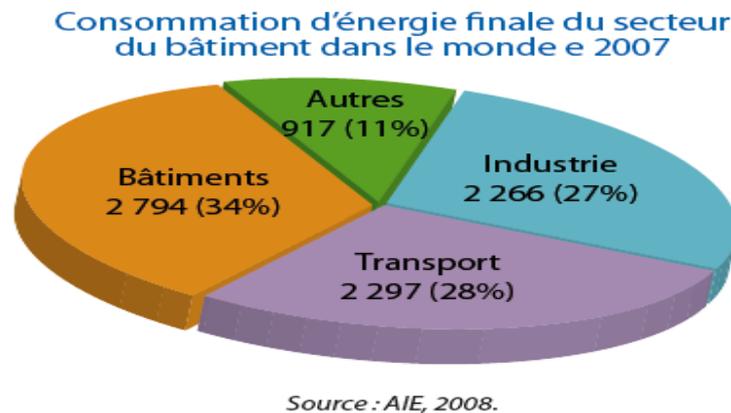
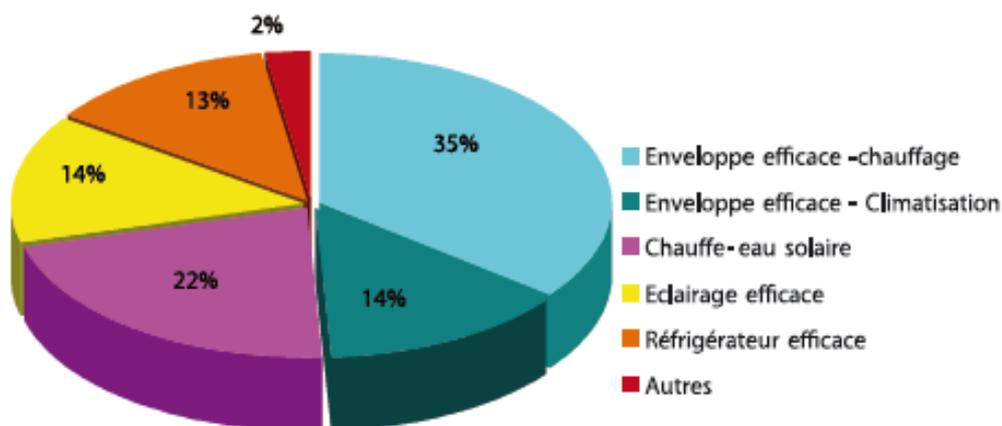


Figure 1 : Consommation d'énergie finale du secteur du bâtiment dans le monde en 2007

## Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la méditerranée du sud sur la période 2010-2030



Source : Etude régionale sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment, Plan Bleu, A. Mourada, 2010.

Figure 2 : Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la méditerranée du sud sur la période 2012-2030

## II. Approche Nationale :

### 1) Les enjeux énergétiques et socio-économiques pour le Maroc :

Le secteur du bâtiment possède aujourd'hui le plus fort potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique. Au Maroc, le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'énergie primaire : **36 % de l'énergie totale consommée**, dont 29 % pour le résidentiel et 7 % pour le tertiaire. Il est également l'un des plus grands responsables des émissions de CO<sub>2</sub>. Réduire la consommation énergétique dans les bâtiments représente donc un enjeu économique et écologique majeur.

Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement dans les années futures pour deux raisons :

- L'évolution importante du parc de bâtiments à cause des grands programmes annoncés : Plan Azur de l'hôtellerie, programme d'urgence de l'éducation nationale, programme des 150 000 logements par an, programme de réhabilitation des hôpitaux, etc.

- L'augmentation sensible du taux d'équipement des ménages en appareils électroménagers du fait de l'amélioration du niveau de vie et la baisse des prix de ces équipements (chauffage, climatisation, chauffage de l'eau, réfrigération, etc.).

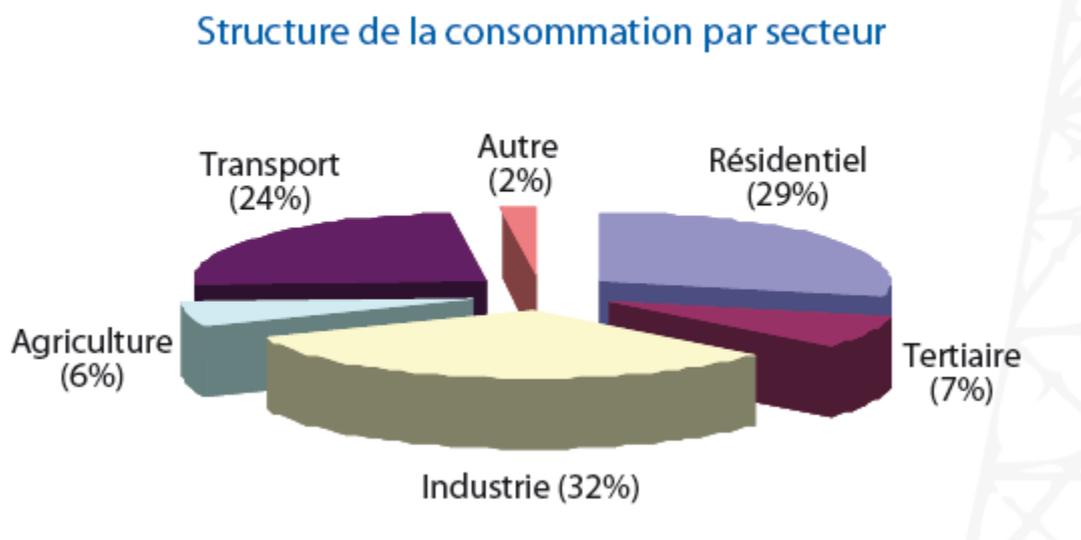


Figure 3 : Structure de la consommation par secteur au Maroc

## 2) Qu'est-ce que le Programme National d'Efficacité Énergétique dans le bâtiment ?

Le programme national de l'efficacité énergétique dans le bâtiment s'inscrit dans le cadre de la politique énergétique gouvernementale. Sa mise en œuvre est assurée par l'Agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (**ADEREE**). Il contribuera ainsi à l'objectif national d'économie de 12 % d'énergie fossile à l'horizon 2020, notamment par l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments au Maroc.

Ce programme cherche également à répondre à différents problèmes rencontrés dans le secteur, tels que l'augmentation des prix des énergies fossiles, l'absence de considérations énergétiques dans la conception, la construction, l'équipement et la gestion des bâtiments ou bien encore l'augmentation sensible des dépenses énergétiques suite à des attentes

fortes en termes de qualité de service et de confort social de la part des usagers.

Le programme se base sur trois principaux axes correspondant aux étapes de conception, de construction, d'équipement et de gestion des bâtiments :

- L'aménagement urbain, la conception et la construction des bâtiments.
- Le fonctionnement des équipements (climatisation, chauffage, etc.).
- La gestion des services énergétiques dans les bâtiments.

Quelle est la démarche de mise en place de la réglementation thermique dans le secteur du bâtiment au Maroc ?

Le Programme repose sur l'élaboration d'un code d'efficacité énergétique dans le bâtiment constitué d'un ensemble de textes réglementaires. La méthodologie adoptée par l'ADEREE pour l'élaboration de cette réglementation thermique se décline ainsi :

- Création d'une unité chargée de la réglementation énergétique du bâtiment.
- Élaboration et mise en place d'une réglementation énergétique pour les bâtiments résidentiels et tertiaires.
- Élaboration de normes et de guides techniques pour les professionnels du bâtiment et mise en place d'une stratégie de mobilisation et sensibilisation.
- Développement et dissémination des standards et des lignes directrices auprès des professionnels.
- Identification et promotion des investissements en efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment.

Afin de mener à bien le projet de développement et d'application de la réglementation thermique dans le bâtiment au Maroc, certains aspects sont à prendre en considération, tels que :

- La communication, la sensibilisation et la formation des intervenants dans le secteur.
- L'intégration des spécifications techniques de la réglementation thermique dans les cahiers des charges de construction.
- La normalisation des matériaux de construction, y compris les isolants thermiques.
- La mise en place de systèmes de labellisation des performances énergétiques des bâtiments.
- La capitalisation sur les bonnes pratiques d'efficacité énergétique, dans le cadre du processus d'élaboration de la réglementation thermique.

Le programme d'efficacité énergétique dans le bâtiment constitue une grande avancée en termes d'amélioration des performances énergétiques et de développement durable. L'aboutissement du projet est prévu pour 2013. Bien sûr, sa réussite et sa concrétisation dépendront de l'engagement et de l'implication de l'ensemble des acteurs du secteur du bâtiment.

### III. Introduction :

Le cursus d'Elève Ingénieur Génie Civil à L'Ecole Hassania des Travaux Publics prévoit un projet de fin d'études en Troisième Année visant à mettre en application les acquis de la formation d'ingénieur, et ce, dans le cadre d'un projet de construction ou d'aménagement.

Ce projet de fin d'étude est une occasion pour travailler sur un sujet relevant de la problématique d'économie d'énergie et a pour objectif l'évaluation et l'application des solutions pouvant réduire la consommation énergétique d'un bâtiment tertiaire. Nous avons développé le long de cette étude les phases nécessaires du travail, à savoir le dimensionnement de la structure, les critères du traitement thermique à suivre et la spécification des solutions d'isolation et d'optimisation de la consommation d'énergie du bâtiment.

L'exécution du projet nécessite l'implication de plusieurs intervenants, d'abord l'architecte qui effectue la conception architecturale du projet, ensuite l'ingénieur de structure qui effectue le dimensionnement et le calcul de structure, puis la division des fluides qui intervient sur le plan du traitement énergétique du bâtiment. L'intégration de ces trois fonctions a été respectée pour définir le plan de notre étude.

## IV. Présentation générale du projet : *Bâtiment d'Accueil Agropolis à Meknès*

### **I. Présentation du projet :**

#### **1) Contexte du projet :**

Le choix d'implantation de ce projet à Meknès a été motivé principalement par :

La région de Meknès Tafilalet, dont Meknès est la capitale, bénéficie de nombreuses potentialités notamment naturelles et historiques ainsi que son savoir-faire dans le domaine agro-industriel. De plus, la région est présentée sur son territoire de plusieurs instituts de recherche et de formation dans ces domaines.

Sa situation géographique centrale, qui lui a permis de lancer avec un grand succès le Salon International de l'Agriculture du Maroc.

En outre, la région jouit d'une localisation stratégique sur l'axe autoroutier Rabat- Fès et proximité de l'aéroport de Fès. Elle bénéficie également, de la présence d'instituts de recherche et d'enseignement supérieur (Ecole Nationale de l'Agriculture, Institut National de la Recherche Agronomique, Université Moulay Ismail, Université Al Akhawayn, etc.).

#### **2) Le concept du projet :**

Le Concept retenu est celui d'un Pôle de compétitivité dédié à l'Agro-industrie. Il s'agit d'un concept novateur qui vise à améliorer la compétitivité du secteur, à travers l'intégration de l'ensemble de la chaîne de valeur de l'amont vers l'aval, l'implication de tous les acteurs du secteur et la mise en place d'une offre complète pour l'accueil des entreprises.

Pour donner une visibilité internationale à ce projet, le pôle de compétitivité a été intégré urbanistiquement au sein d'une cité dédiée à l'Agro-industrie : AGROPOLIS

Les composantes principales du projet AGROPOLIS sont les suivantes :

- Une zone d'activités à vocation agro-industrielle et logistique ;
- Une cité intelligente regroupant les fonctions de support aux activités industrielles en matière de Formation, Recherche & Développement, Innovation et transfert de technologies, activités tertiaires et d'animation ;
- Une structure d'animation pour améliorer la concertation et les synergies entre l'ensemble des acteurs.

Le site du projet se situe dans la commune de Sidi Slimane Moul Kifane, à quelques kilomètres au Sud de la ville de Meknès.

Ce site bénéficie de plusieurs atouts notamment :

- ✓ Desserte par l'autoroute Fès- Meknès
- ✓ Connexion par la route nationale n° 6 et par le réseau urbain de la ville de Meknès
- ✓ Proximité des organismes de formation, de recherche et de développement (Ecole Nationale de l'Agriculture, Centre Régional de l'Institut National de la Recherche Agronomique...)
- ✓ Proximité du réseau ferroviaire
- ✓ Proximité de l'aéroport de Fès Saïs



Figure 4 : Plan de situation du bâtiment Agropolis à Meknès

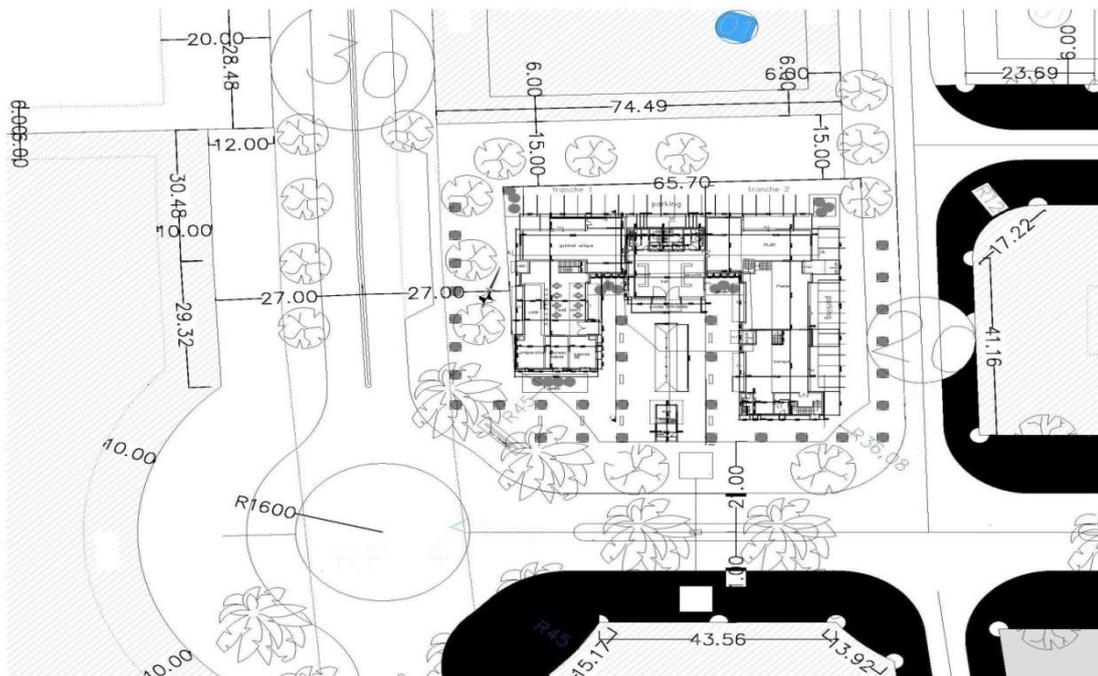


Figure 5 : Plan de masse du bâtiment

### 3) Composantes du projet :

Le programme du projet est conçu sur la parcelle E1 d'une superficie de 3.700 m<sup>2</sup> et comprend, un bâtiment d'accueil composé de :



**Figure 6 : Vue Architecturale 3D du bâtiment**

- ✓ RDC : Banque, Restaurant, Accueil, guichet unique et locaux techniques, commerces etc ...
- ✓ Etage 1: business Center, plateaux de bureaux, salles de réunion.
- ✓ Etage 2 : Plateaux de bureaux et salles de réunion.
- ✓ Etage 3 : Espace polyvalent et accès terrasses jardins.

Totalisant une surface d'environ 5600 m<sup>2</sup>.

#### **Détails des différents niveaux du projet :**

Le projet est divisé en 2 tranches : tranche 1 et tranche 2 :

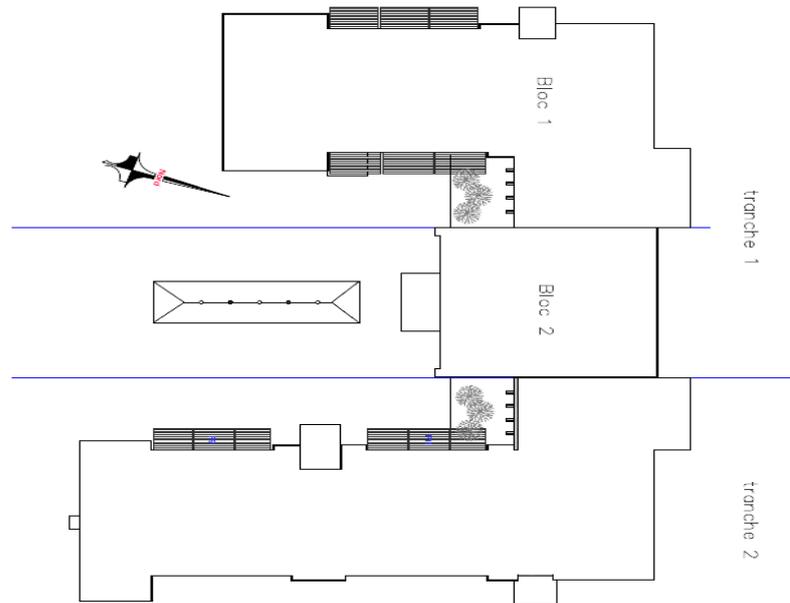


Figure 7 : Plan de la structure divisée en 3 blocs

○ **Tranche 1, divisé en 2 blocs :**

-Rez-de-chaussée: avec une surface totale de 679m<sup>2</sup> et qui comprend :

- ✓ Food court + bureau tabac + agence de téléphone : 270m<sup>2</sup>
- ✓ Accueil : 147m<sup>2</sup>
- ✓ Guichet unique : 150m<sup>2</sup>
- ✓ Circulation + locaux techniques + WC : 112m<sup>2</sup>

Avec un parking : 23m<sup>2</sup>

- Mezzanine : avec une surface totale de 679-147 = 532m<sup>2</sup> et contenant :

- ✓ Food court : 270m<sup>2</sup>,
- ✓ business center: 150m<sup>2</sup>,
- ✓ Circulation + locaux techniques + WC: 112m<sup>2</sup>

- 1er étage et 2eme étage : totalisant chacun à la fois 679m<sup>2</sup> de surface et comprennent :

- ✓ Plateaux bureaux : 270+150= 420 m<sup>2</sup>,
- ✓ salle de réunion : 92 m<sup>2</sup>
- ✓ Circulation + locaux techniques + WC : 167 m<sup>2</sup>

-3ème étage : avec une surface totale de 679m<sup>2</sup> comprenant :

- ✓ Salle de de gestion : 147m<sup>2</sup>
- ✓ Circulation + locaux techniques + WC : 112 m<sup>2</sup>
- ✓ une terrasse : 420m<sup>2</sup>

-Une terrasse: 679 m<sup>2</sup>

- Tranche 2 :

-Rez-de-chaussée: avec une surface totale de 591 m<sup>2</sup> et qui comprend :

- ✓ Banque: 165 m<sup>2</sup>,
- ✓ plateaux bureaux : 356 m<sup>2</sup>,
- ✓ circulation+ locaux technique+ WC = 70 m<sup>2</sup>

Avec un parking 23 m<sup>2</sup>

-Mezzanine: avec une surface totale de 591m<sup>2</sup> et qui comprend :

- ✓ Plateaux bureaux : 356 m<sup>2</sup>,
- ✓ Banque: 165 m<sup>2</sup>,
- ✓ circulation+ locaux technique+ WC : 70 m<sup>2</sup>

- 1<sup>er</sup> étage et 2<sup>ème</sup> étage : totalisant une surface de 659m<sup>2</sup> chacun et qui comprennent à la fois :

- ✓ Plateaux Bureaux : 165+356 : 589m<sup>2</sup>,
- ✓ Circulation + locaux techniques + WC : 70 m<sup>2</sup>

- Une terrasse de surface 591m<sup>2</sup>

**Remarque : Les plans architecturaux de la structure élaborés par l'architecte figurant les différentes composantes seront présentés en ANNEXE 1.**

#### 4) Particularité du projet :

Créer le microclimat intérieur nécessaire exige beaucoup d'énergie. C'est pourquoi la construction et le fonctionnement d'un bâtiment ont un impact – direct et indirect – très important sur l'environnement. En effet, outre l'utilisation des ressources comme l'énergie et les matières premières, les bâtiments produisent également des déchets et génèrent des émissions atmosphériques pouvant être nuisibles à l'environnement. Face à la croissance économique et démographique continue, concepteurs et constructeurs doivent alors relever un défi bien particulier, celui de répondre aux multiples exigences qu'impose le bâtiment : fournir des installations – neuves et rénovées – répondant aux critères d'accessibilité, de sécurité, de robustesse et d'efficacité, tout en minimisant l'impact sur l'environnement.

La conception durable vise essentiellement à éviter l'épuisement des ressources comme l'énergie, l'eau et les matières premières, à empêcher la dégradation de l'environnement causée par les installations et infrastructures tout au long de leur cycle de vie ; et à créer des environnements artificiels vivables, confortables, sûrs et efficaces.

Donc dans notre projet de bâtiment, on va essayer de respecter les réglementations concernant l'efficacité énergétique afin de promouvoir le secteur du bâtiment en matière de la préservation de l'environnement.

## II. Travail demandé :

---

- Elaboration des plans de coffrage
  - Définition des caractéristiques du plancher à utiliser
  - Pré-dimensionnement par le logiciel robot par un calcul statique et dynamique des éléments en béton armé (poutres, poteaux, voile, semelles...)
  - Etablissement des plans d'exécution avec ferrailage des éléments en béton armé
  - Réception du bilan thermique de la structure sans isolation
  - Etablissement des dispositions de l'isolation du bâtiment
  - Réception du bilan thermique de la structure avec isolation
  - Evaluation de l'apport de l'efficacité énergétique sur la structure en matière de consommation d'énergie annuelle
- 

## III. Règlements en vigueur :

Pour la réalisation du projet, nous avons basé notre travail sur les règlements suivants :

- Règlement RPS 2000 de construction parasismique.
- Règles BAEL 91 pour le dimensionnement des éléments en béton armé.
- **Réglementation thermique :**

### **Loi n° 47-09 relative à l'efficacité énergétique**

Cette loi met la lumière sur les grandes lignes qui se portent sur l'efficacité énergétique afin de bien clarifier ses notions ainsi que les buts qu'elle vise réaliser. Nous allons en citer quelques articles qui s'avèrent primordiaux pour la compréhension de cette nouvelle tendance qui régit le domaine des constructions :

**Article premier** : au sens de la présente loi, on entend par :

Efficacité énergétique : toute action, quelle que soit l'activité du secteur considéré, tendant à :

- La gestion optimale des ressources énergétiques ;

- La maîtrise de la demande d'énergie ;
- La compétitivité de l'activité économique ;
- La maîtrise des choix technologiques d'avenir ;
- L'utilisation rationnelle de l'énergie ;

Article 3 : par complément à la législation relative à l'urbanisme. « les règlements généraux de construction » doivent également fixer les règles d'efficacité énergétique des constructions afin de garantir un meilleur bilan énergétique des bâtiments par zones climatiques en traitant, notamment, de l'orientation, de l'éclairage, de l'isolation et des flux thermiques, ainsi que les apports en énergie renouvelable afin de renforcer les niveaux de performance des constructions à édifier ou à modifier.

L'étude d'impact énergétique a pour objet :

- D'évaluer de manière méthodique et préalable, les consommations énergétiques prévisionnelles du projet ;
- D'évaluer les potentiels d'efficacité énergétique que présente le projet ;
- D'identifier les ressources énergétiques locales mobilisables pour le projet et leur potentiel ;
- D'atténuer les niveaux de consommation prévisionnelle d'énergie fossile en développant l'efficacité énergétique du projet et en valorisant dans une approche intégrée les potentiels des énergies renouvelables réalisables conformément à la législation en vigueur ;

## V. Conception et Dimensionnement

### I. Conception

La conception de l'ouvrage est la phase la plus importante dans l'étude d'une construction, elle consiste dans le choix de la structure la plus optimale, c'est-à-dire celle qui respecte le plus, les exigences du maître d'ouvrage, de l'architecte et du bureau de contrôle, tout en gardant une structure bien porteuse, facile à exécuter et moins coûteuse sur le plan économique. Aussi, le respect des normes qui réglementent le type de la structure étudiée est indispensable.

### II. Etapes Conception

La conception se base sur les plans d'architecte, ces plans sont donnés ou reproduits sur AUTOCAD pour faciliter la manipulation.

En général les étapes à suivre dans cette phase sont :

- Vérifier la faisabilité du projet ;
- S'assurer que les plans respectent les fonctions prévues pour la construction ;
- Respecter les normes et les règles qui régissent une telle construction ;
- Vérifier la conformité entre les niveaux de la structure;
- Superposer les niveaux pour s'assurer qu'aucun poteau ne plombe, c'est-à-dire : n'est pas interrompu dans un étage donné.
- Chaîner les poteaux ;
- S'assurer que les dalles et les poutres sont bien appuyées ;
- Pré dimensionner les éléments (dalles, poutres, poteaux et voiles) ;
- Renommer les niveaux ainsi que leur éléments ;
- Définir les dalles et indiquer leur sens de portée.
- Tracer les axes verticaux et horizontaux des poteaux et donner la cotation entre axes.
- Dessiner le plan de coffrage.

### III. Conception parasismique

Toute conception visant le contreventement d'un bâtiment vis-à-vis des efforts sismiques doit appartenir aux trois variantes ci-dessous :

#### 1) Système de portiques

Cette structure est utilisée pour des immeubles de faible et moyenne hauteur. Cependant elle devient onéreuse et de conception lourde pour des bâtiments de plus de 10 à 15 niveaux.

#### 2) Système de refends

Les portiques ont commencé à être remplacés par des refends disposés au droit des cages d'escalier et des ascenseurs. Les refends linéaires se sont avérés satisfaisants de point de vue économique pour des immeubles ne dépassant pas 20 à 25 niveaux.

#### 3) Système mixte refends-portiques :

Dans les projets de bâtiments, on combine souvent entre les deux systèmes de contreventements précédents, le besoin de locaux de grandes dimensions, le souci d'économie, exclut fréquemment l'emploi de voiles seuls. On peut dans ce cas associer avantageusement des voiles à des portiques.

L'interaction des deux types de structure produit un effet de raidissage favorable et un intérêt particulier en raison des déformations différentes qui interviennent dans ces éléments.

Les voiles constituent la structure primaire du bâtiment. Les éléments structuraux (poutres, poteaux) peuvent être choisis pour constituer une structure secondaire, ne faisant pas partie du système résistant aux actions sismiques ou alors marginalement.

## IV. Variantes de conceptions du projet

Vu la zone où se trouve le bâtiment (Meknès : zone sismique 2), ainsi que l'importance des charges supportées, on a opté pour un système de contreventement mixte ; ce qui suppose une bonne réflexion sur l'implantation des poteaux et surtout des voiles pour assurer un meilleur contreventement de la structure.

## V. Choix du type de plancher :

### 1) Différents types de plancher :

Le choix du type de plancher est une partie fondamentale dans la conception de la structure il agit sur les dimensions des autres éléments.

Il existe des différents types de plancher, citant ainsi :

- **Dalles pleines** : Coffrage simple et économique, Construction rapide, Relativement lourd, Convient bien aux mailles carrées, Armatures importantes au niveau des colonnes.
- **Plancher-dalle avec chapiteaux sur colonnes**: Coffrage complexe, Bonne résistance au cisaillement, Plus grande portée, Épaisseur de la dalle réduite
- **Planchers à nervure** : coffrage complexe, gain de poids, portée augmentée.
- **Dalles réticulées** : coffrage fort complexe, assez longue portée dans les 2 directions, gain de poids
- **Poutre et dalle** : coffrage complexe, longue portée, épaisseur réduite.
- **Plancher champignon** : Résistance au cisaillement, coffrage fort complexe, épaisseur de la dalle réduite, esthétisme
- **Dalles alvéolées** : Coffrage simple, gain de poids, longue portée, limitation des porte-à-faux.

## 2) Choix final :

Dans notre cas, la variante des dalles alvéolées, qui est vivement indiquée pour les immeubles de bureaux, satisfait bien les problèmes des grandes retombées, les longues portées des poutres et les larges surfaces que les locaux occupent. De plus, l'épaisseur de la dalle pour sa part est faible dans cette variante.

## VI. Pré-dimensionnement des éléments structuraux

### 1) Dalle :

Dans la plupart des planchers du bâtiment, on a opté pour les dalles alvéolées. Néanmoins les balcons, les escaliers et les portes à faux sont conçus en dalle pleine.

Les dalles alvéolées sont des dalles éléments rectangulaires en béton précontraint par armatures adhérentes munies d'alvéoles longitudinales d'allègement, dont la face supérieure est légèrement lisse ou rugueuse. Les dalles alvéoles se déclinent en différentes épaisseurs, qui varient entre 16, 20 et 25 cm, la largeur standard est de 120 cm.

#### Détermination de l'épaisseur :

Le tableau ci-dessous présente les différentes épaisseurs des dalles définies selon la portée et les charges supportées par la dalle :

SURCHARGE EXPLOITATION + PERMANENTE	Sans étai et sans dalle collaborante		
	DAS 160	DAS 200	DAS 250
250 + 0 (kg/m <sup>2</sup> )	8,90	10,00	12,10
250 + 100 (kg/m <sup>2</sup> )	8,10	9,30	11,20
400 + 100 (kg/m <sup>2</sup> )	7,30	8,40	10,20
500 + 100 (kg/m <sup>2</sup> )	6,80	7,90	9,60
800 + 0 (kg/m <sup>2</sup> )	6,00	7,00	8,70
1000 + 0 (kg/m <sup>2</sup> )	5,50	6,40	8,10

Tableau 1 : Epaisseurs des dalles alvéolées.

## 2) Voiles :

- Selon l'article 7.3.1.4.1 du RPS 2000 :

L'épaisseur minimale du voile est fonction de la hauteur  $h_e$  de l'étage :

$$e_{\min} = \max (15 \text{ cm}, h_e/20)$$

- Pour le RDC :  $h_e = 4 \text{ m}$  donc  $e = 20 \text{ cm}$
- Pour les niveaux supérieurs:  $h_e = 3.5 \text{ m}$ , donc  $e = 17.5 \text{ cm}$

On fixera alors l'épaisseur de l'ensemble des voiles à  **$e = 20 \text{ cm}$**  pour tous les niveaux.

## 3) Poutres :

Les poutres sont de forme rectangulaire. Selon les règles de pré-dimensionnement des poutres, on doit avoir :

- $h \geq L/12,5$ , pour une poutre hyperstatique porteuse.
- $h \geq L/10$ , pour une poutre isostatique porteuse.
- $h \geq L/16$ , pour une poutre non porteuse.

***La largeur minimale pour les poutres :  $b = 25 \text{ cm}$***

## 4) Plans de coffrage

Le plan de coffrage donne la forme extérieure brute des ouvrages en béton armé ; il a été élaboré suivant les règles de conception citées auparavant assurant la stabilité autant que la rigidité et cela en optant pour un système de contreventement mixte incluant voiles et portiques.

Dans ce cas de figure, la structure est contreventée principalement par des voiles pour assurer une bonne résistance vis-à-vis du séisme.

**Remarque : Les plans des étages présentent quelques légères différences dans la structure mais gardent toujours la même configuration géométrique pour les voiles.**

Les plans de coffrage élaborés à partir des plans architecturaux seront présentés en ANNEXE 2.

## VII. Modélisation par logiciel :

### 1) Paramètres de la modélisation

#### a) Charges appliquées :

Les tableaux ci-dessous présentent les charges appliquées sur chaque plancher :

##### ○ Charges permanentes :

Elément	Charge correspondante en Kg/m <sup>2</sup>
Terrasse accessible	520
PH RDC à PH étage courant	300
Terrasse non accessible	380

Tableau 2 : Charges permanentes

##### ○ Charges d'exploitation :

Type d'exploitation	Charge correspondante en Kg/m <sup>2</sup>
Terrasse accessible	150
Terrasse non accessible	600
Terrasse Technique	100
Escaliers	250
Plateaux bureaux	350

Tableau 3 : Charges d'exploitation.

### b) Caractéristiques des matériaux

Résistance caractéristique du béton	$f_{c28}=25$ MPA
Limite élastique des aciers	$f_e=500$ MPA
Contrainte de calcul du béton à l'ELU	$\sigma_{bc}=14,17$ MPA
Contrainte de calcul de l'acier à l'ELU	$\sigma_{su}= f_e*1.15=434,78$ MPA
Fissuration	préjudiciable
Enrobage des aciers	5 cm pour les fondations et 3cm pour les autres éléments

Tableau 4 : Caractéristiques des matériaux.

### c) Données géotechniques :

la reconnaissance in situ, et les essais au pressiomètre ont montré la présence d'une couche de remblai de 0.5 à 0.9 m d'épaisseur reposant sur le limon noir qui repose sur le tuf marneux reconnu jusqu'au 5.00 au niveau du sondage carotté où l'ensemble repose sur la marne tuffacée reconnue jusqu'au 10m/TN, nous proposons les modalités de fondation suivantes :

Mode de fondation	Semelles Isolées
Sol d'assise	Tuf Marneux
Fiche d'ancrage	A Partir De -2.00m/ Niveau Du Terrain Naturel (Sous Remblai De 0.90 M d'épaisseur)
Contrainte admissible	Limitée à 1.50 bars, sous cette contrainte les tassements seront faibles et admissibles.

Tableau 5 : Données géotechniques du site.

### d) Zonage sismique

D'après le règlement de construction parasismique RPS 2000 et la lithologie du sol en place, on peut retenir ce qui suit :

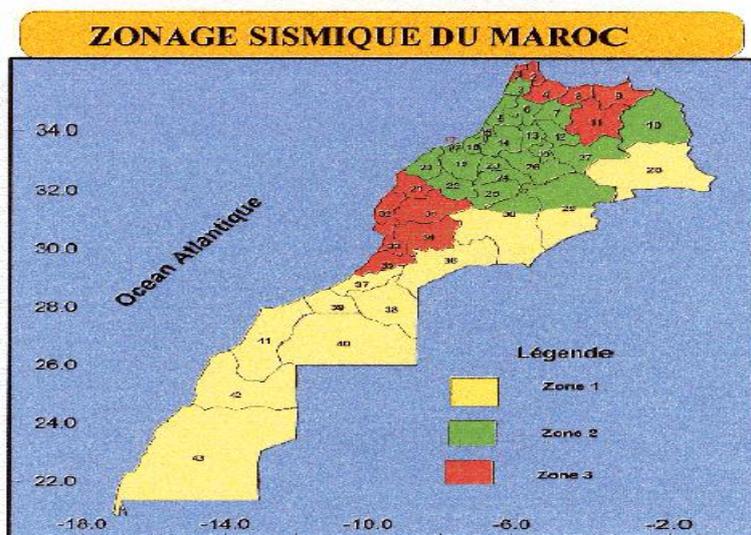


Figure 8 : Carte sismique du Maroc.

- Le site à l'étude est situé dans la zone sismique 2 selon le zonage sismique du Maroc
- le coefficient d'accélération  $A$  ( $A_{max}/g$ )=0.08 ;
- Le sol de fondation est constitué de tuf marneux, ce qui permet de classer le site S2
- le coefficient de comportement 1.4 (car contreventement par voile selon RPS 2000).
- Le coefficient d'amortissement 5%.

#### e) Modélisation informatique :

Le calcul est effectué moyennant le moteur CBS Pro et Robot Millenium.

La saisie de la structure est faite par planchers directement sur le logiciel. On définit les éléments de structure (poteaux, poutres, voiles et dalles) est facilitée par la définition d'une grille des axes.

Pour définir les dalles alvéolées, il n'y a pas un model spécifique pour ce type de dalle, donc on a recourt à la méthode de l'épaisseur équivalente à une dalle pleine qui sera détaillée ultérieurement.

On définit également la hauteur de chaque niveau et les planchers. On affecte par la suite les charges permanentes et celles d'exploitation pour chaque dalle.

Pour tenir compte des caractéristiques du sol, on introduit dans la rubrique caractéristiques du bâtiment la contrainte de rupture qui est égale 3 fois la contrainte admissible, soit 450 KPa.

Au lancement des calculs, le logiciel redimensionne les éléments de structure en fonction des blocages des dimensions imposées.

Les semelles seront dimensionnées après un lancement de calcul réussi (absence de messages d'erreur). On peut visualiser alors la vue en 3D de la totalité du bâtiment ainsi que les plans des semelles et de coffrages des différents planchers.

Pour introduire l'effet parasismique, on fait rentrer tous les paramètres définissant l'excitation correspondante à la zone sismique et ceci suivant le règlement parasismique RPS 2000.

## 2) Pré-dimensionnement par CBS-PRO :

### a) Dalle :

Pour modéliser les dalles BS-PRO, on calcule l'épaisseur d'une dalle pleine équivalente d'une dalle alvéolée en déterminant un seul sens de portée et cela se fait comme suit :

Epaisseur dalle pleine(m)\* masse volumique du béton (kg/m<sup>3</sup>)= poids propre de la dalle réticulée (kg/m<sup>2</sup>)

Le tableau ci-dessous donne le poids mort des dalles alvéolées selon l'épaisseur :

Type de la dalle alvéolée	16	20	25
Epaisseur totale en cm	16+4	20+5	25+5
Poids mort * en Kg/m <sup>2</sup>	282	367	436

\*poids mort = poids de la dalle + poids du béton.

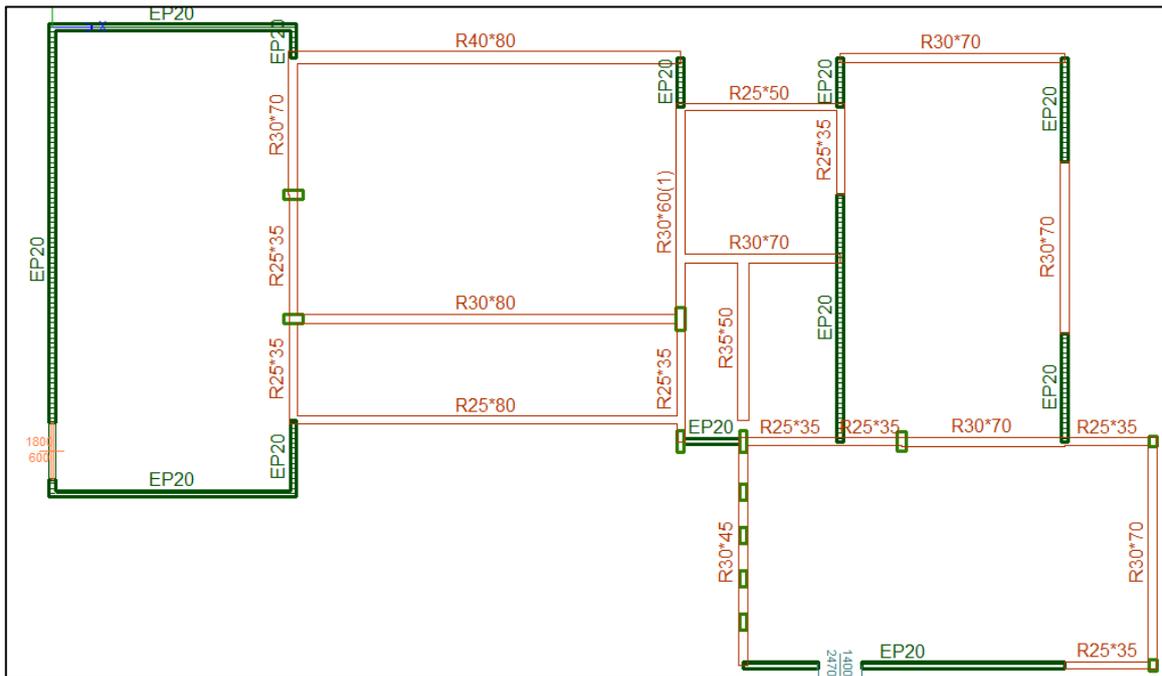
**Tableau 6 : Poids mort des différents types de dalles alvéolées.**

Ainsi pour la modélisation, on prend comme épaisseurs :

- Dalle de 25 +5 :  $(436/2500) * 100 = 17.44 \text{ cm}$
- Dalle de 20 +5 :  $(367/2500) * 100 = 14.68 \text{ cm}$
- Dalle de 16 +4 :  $(282/2500) * 100 = 11.28 \text{ cm}$

**b) Voiles et Poutres :**

Ce qui concerne les épaisseurs des voiles, nous les avons fixés à 20 cm pour toute la structure.



**Figure 9 : Pré-dimensionnement des voiles et poutres du RDC, Bloc 1, Tranche 1.**

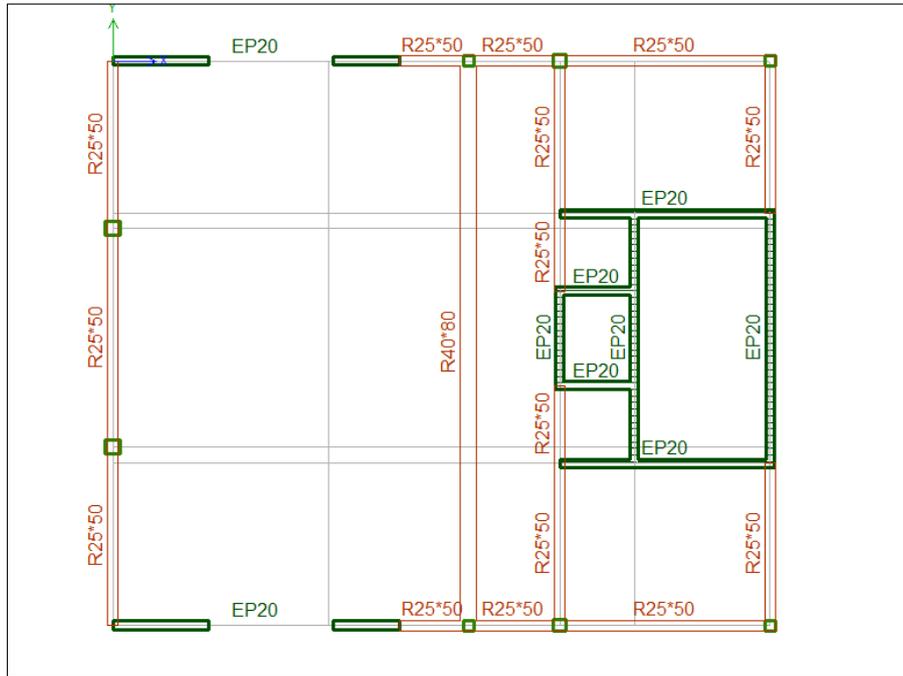


Figure 10 : Pré-dimensionnement des voiles et poutres du RDC, Bloc 2, Tranche 1.

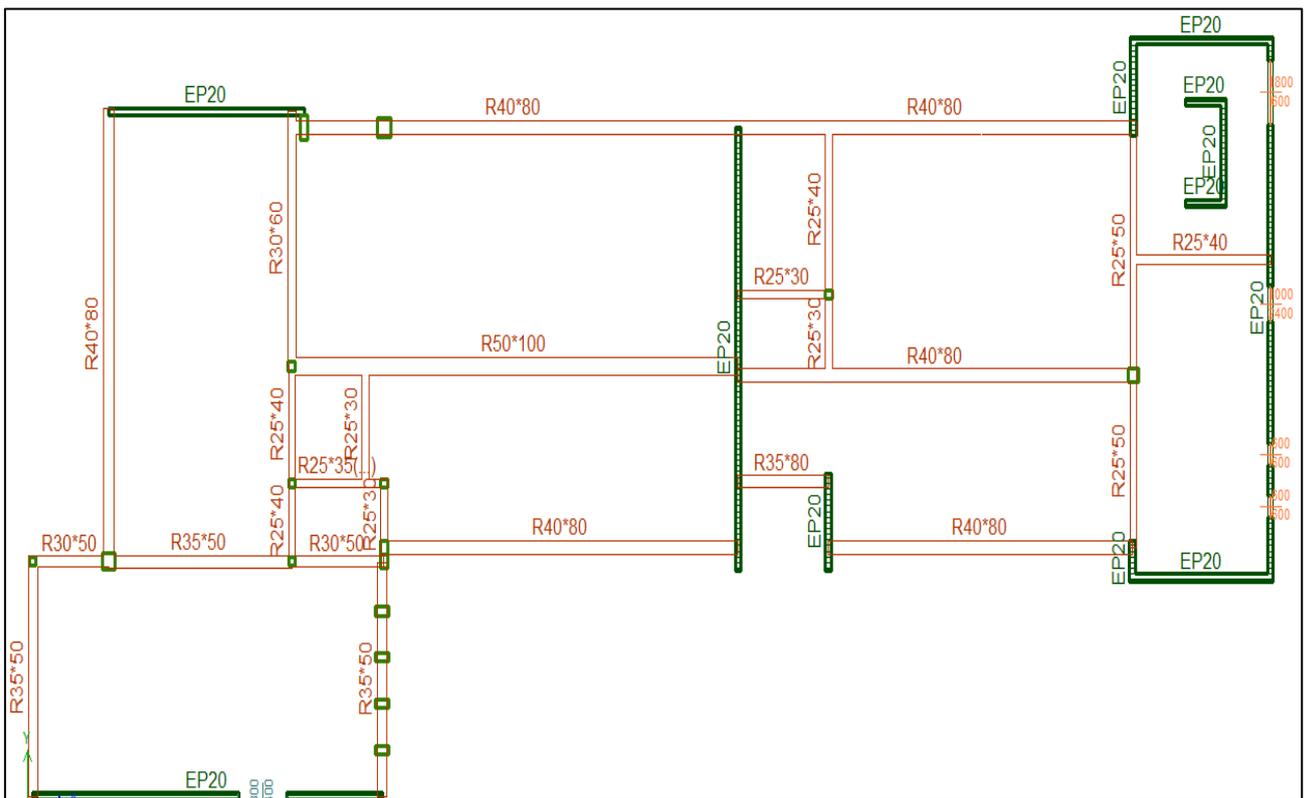


Figure 11 : Pré-dimensionnement des voiles et poutres RDC, Tranche 2

c) Poteaux :

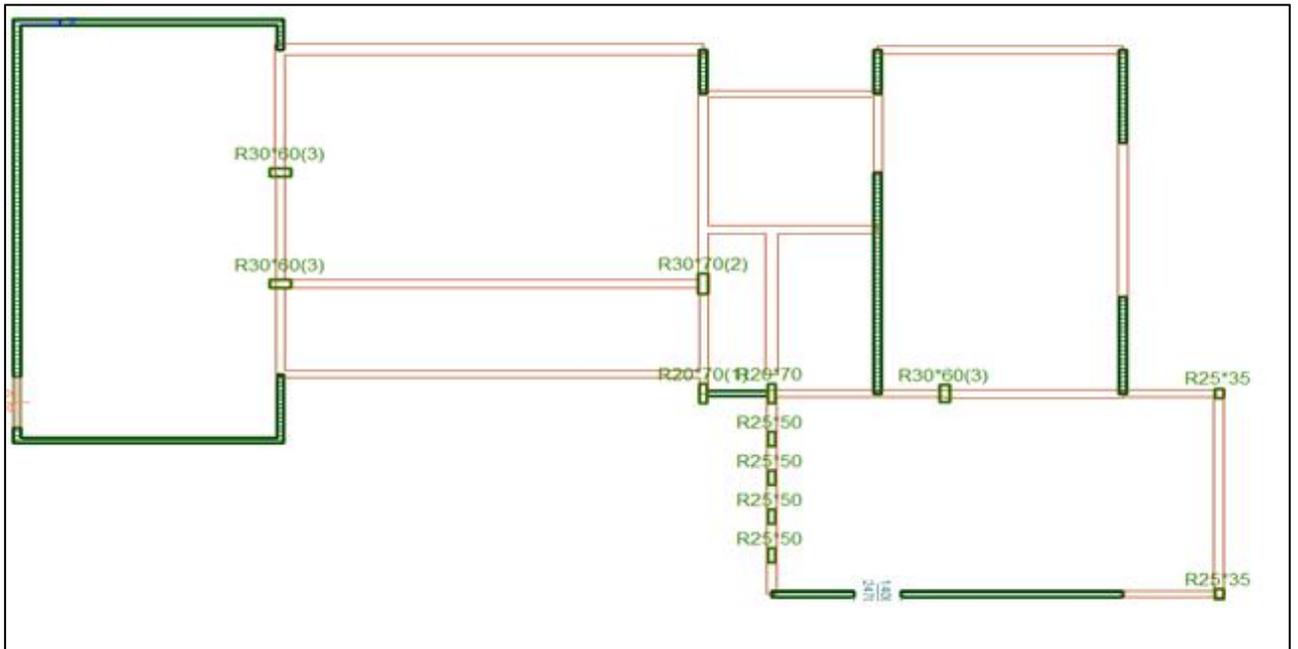


Figure 12 : Pré-dimensionnement des poteaux du RDC, Bloc 1, Tranche 1.

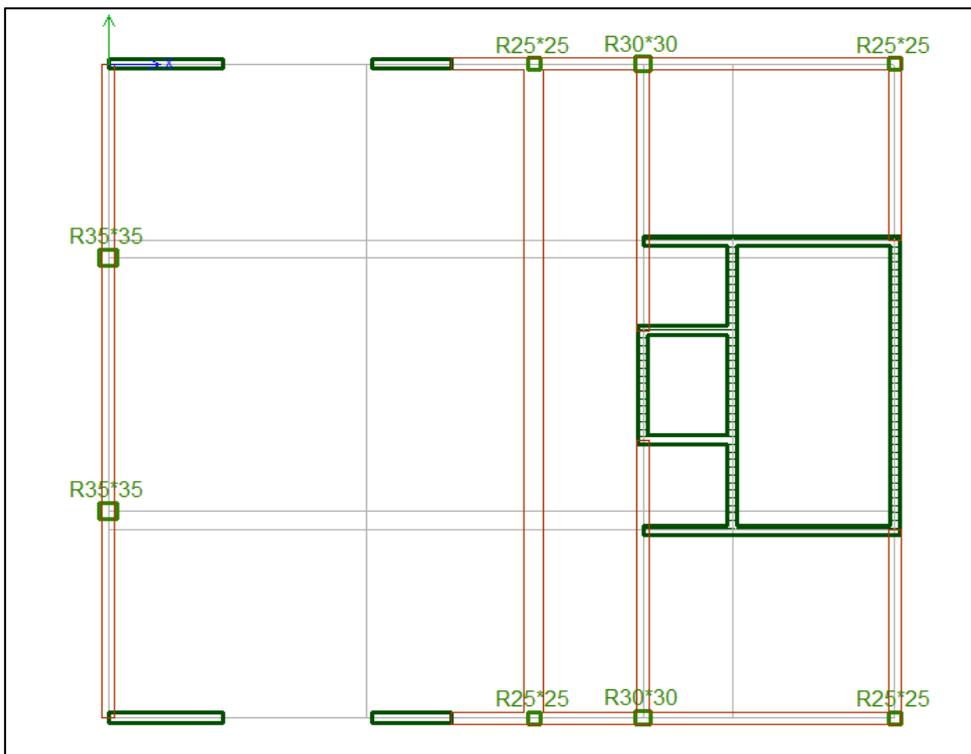


Figure 13 : Pré-dimensionnement des poteaux du RDC, Bloc 2, Tranche 1.

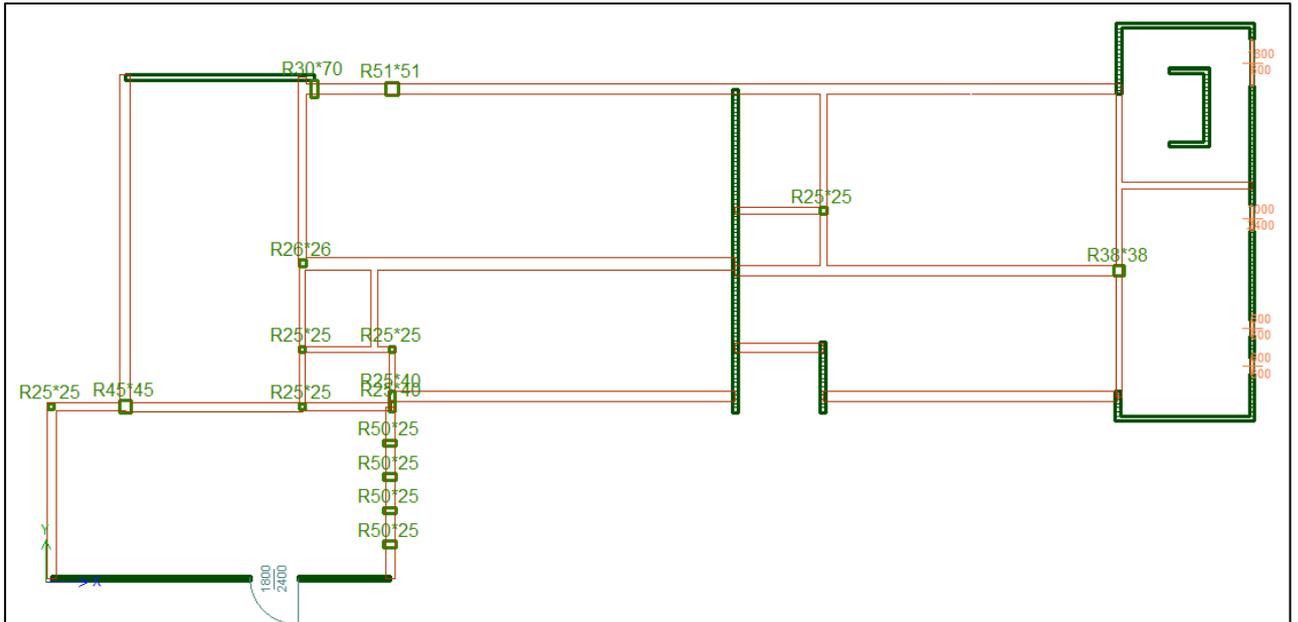


Figure 14 : Pré-dimensionnement des poteaux du RDC, Tranche 2.

d) Semelles :

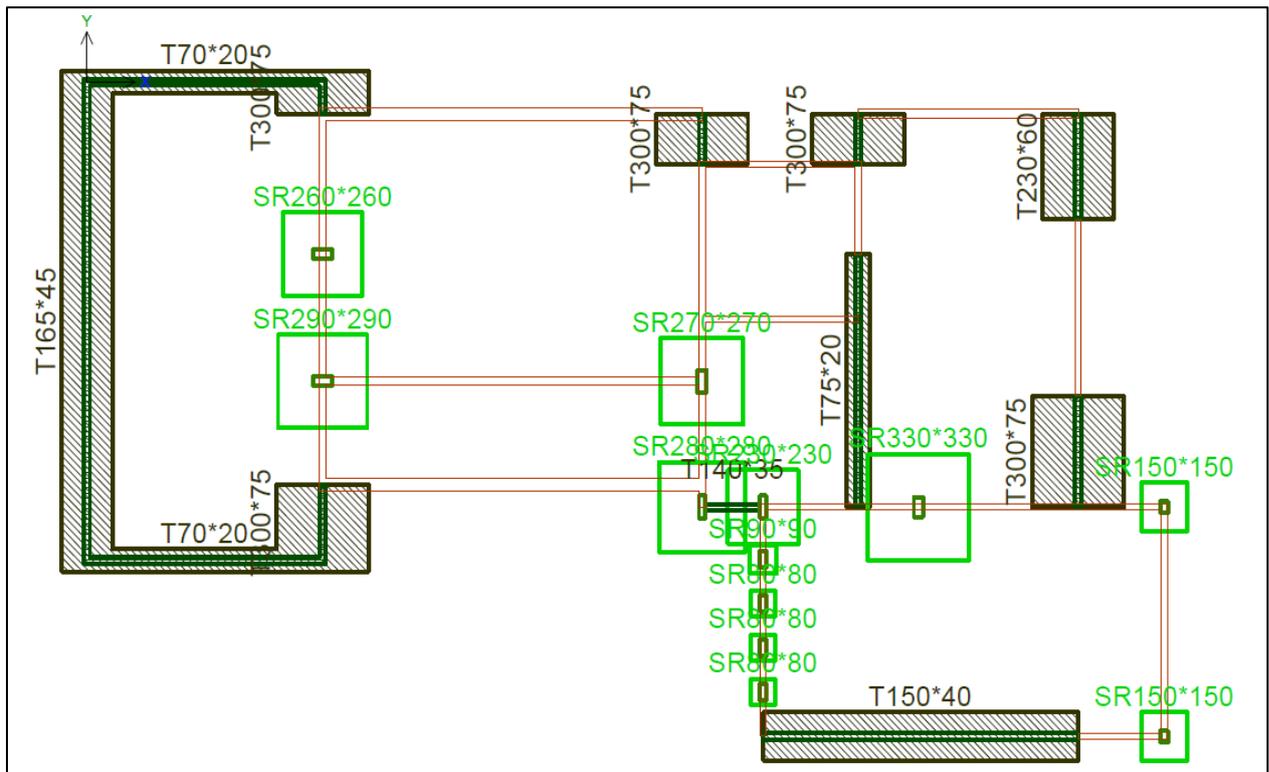


Figure 15 : Pré-dimensionnement des semelles du RDC, Bloc 1, Tranche 1.



**Remarque :** Le pré-dimensionnement des éléments structuraux de chaque bloc calculé par CBS Pro seront présentés en ANNEXE 3, 4,5.

En gardant les dimensions calculées moyennant le logiciel, on lance le calcul réel des éléments structuraux par Robot Millenium afin de déterminer le ferrailage de chaque élément ainsi que son plan d'exécution.

### VIII. Calcul du ferrailage des éléments en BA par CBS pro et Robot Millenium : Statique et Dynamique

Pour le calcul du ferrailage, on vous présente des exemples de quelques éléments du RDC du bloc 1, Tranche 1, de la structure comme le montre la figure suivante :

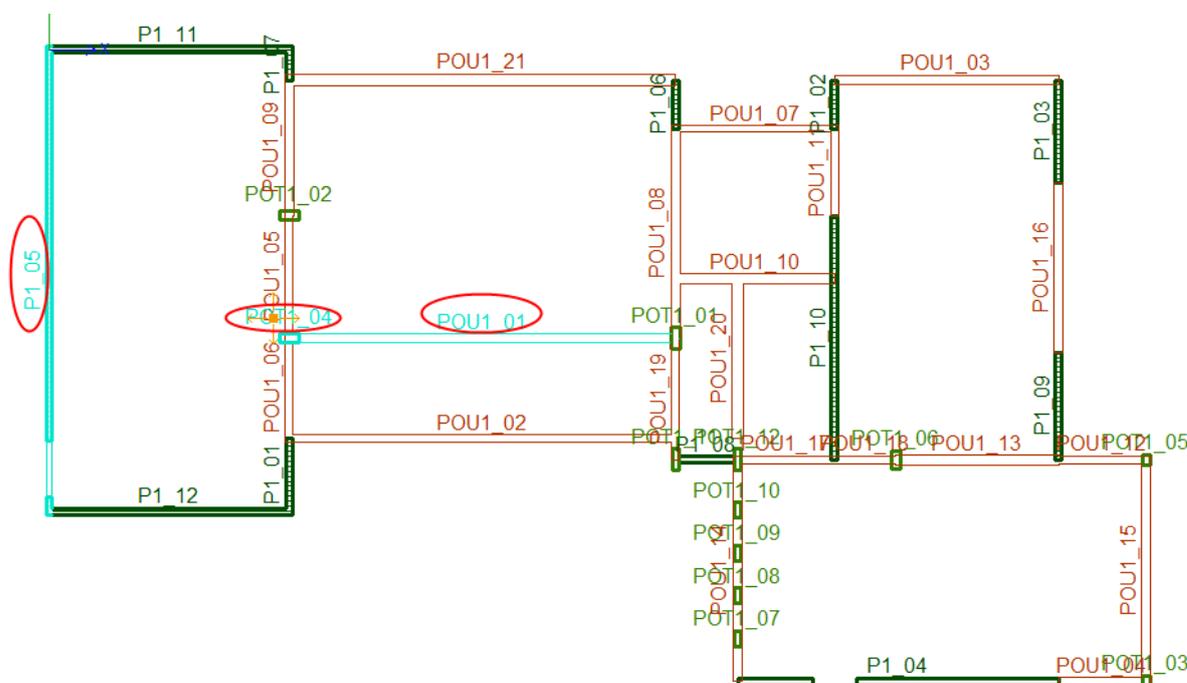


Figure 18 : Model du RDC du Bloc 1, Tranche 1.

#### 1) Calcul statique :

a) Poutres :

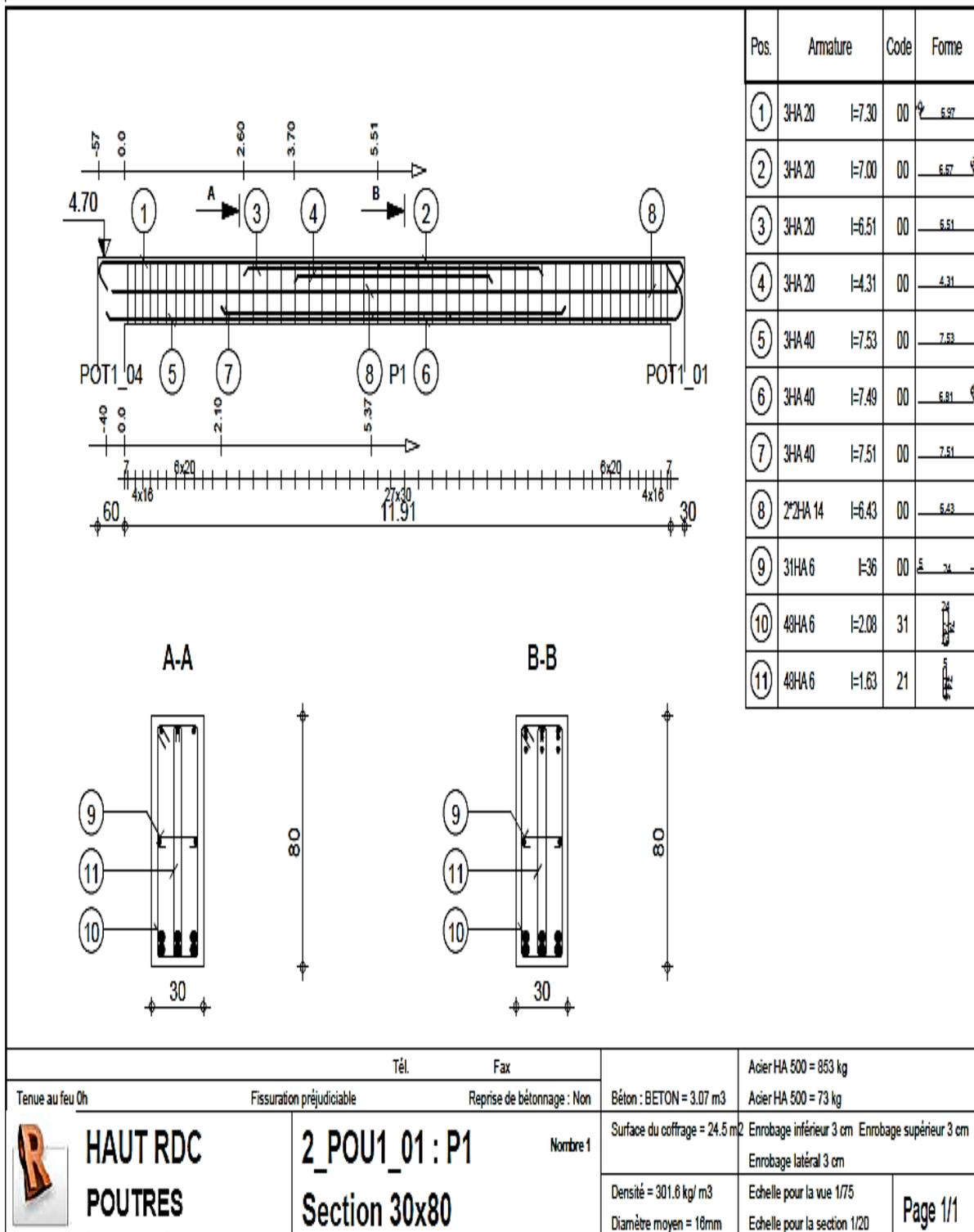
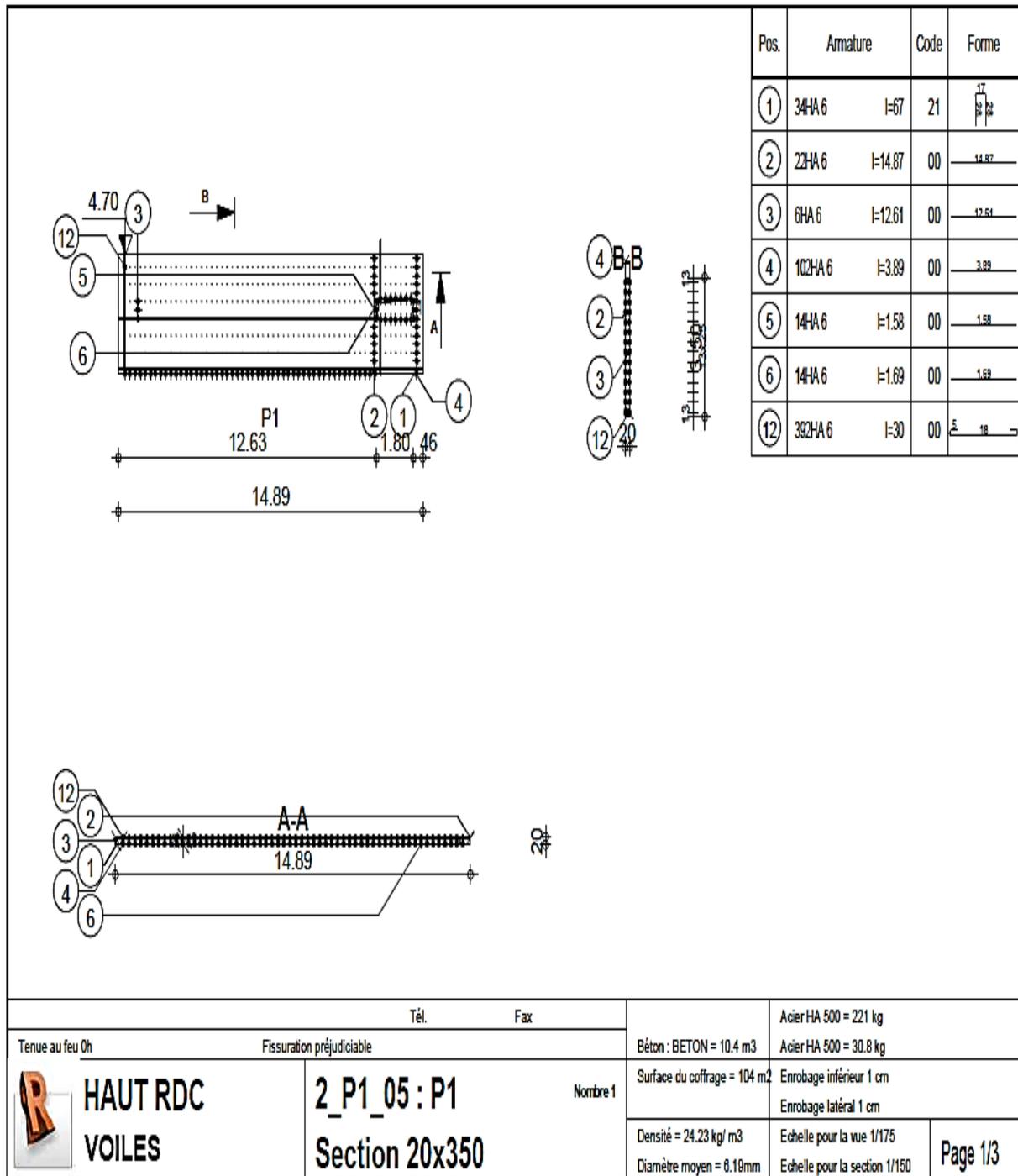


Figure 19 : Plan d'exécution de la poutre POU1\_01 du RDC, Bloc 1, Tranche 1.

b) Voiles :



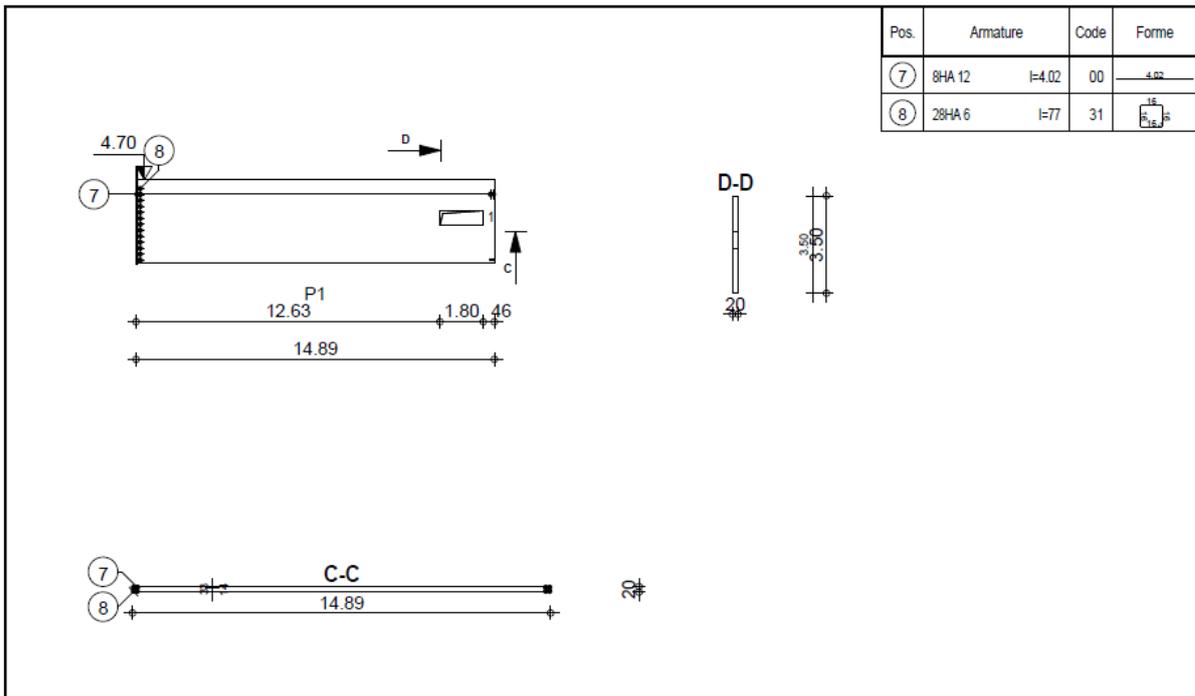
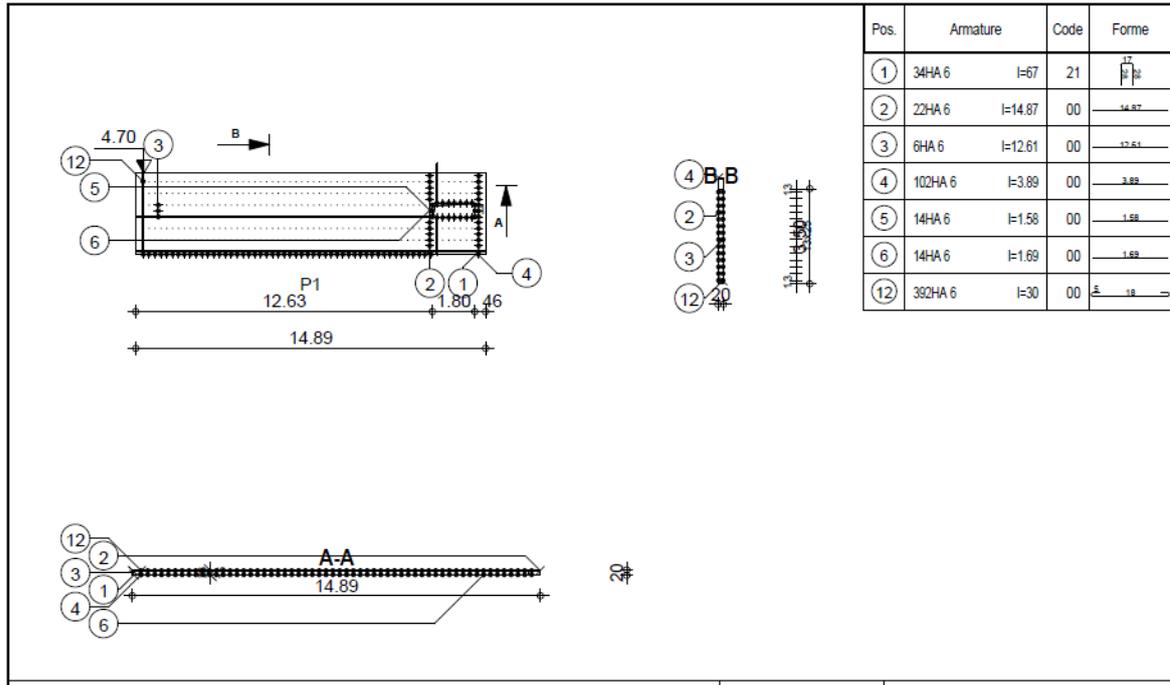


Figure 20 : Plan d'exécution de la voile P1\_05 du RDC, Bloc 1, Tranche 1.

c) Poteaux :

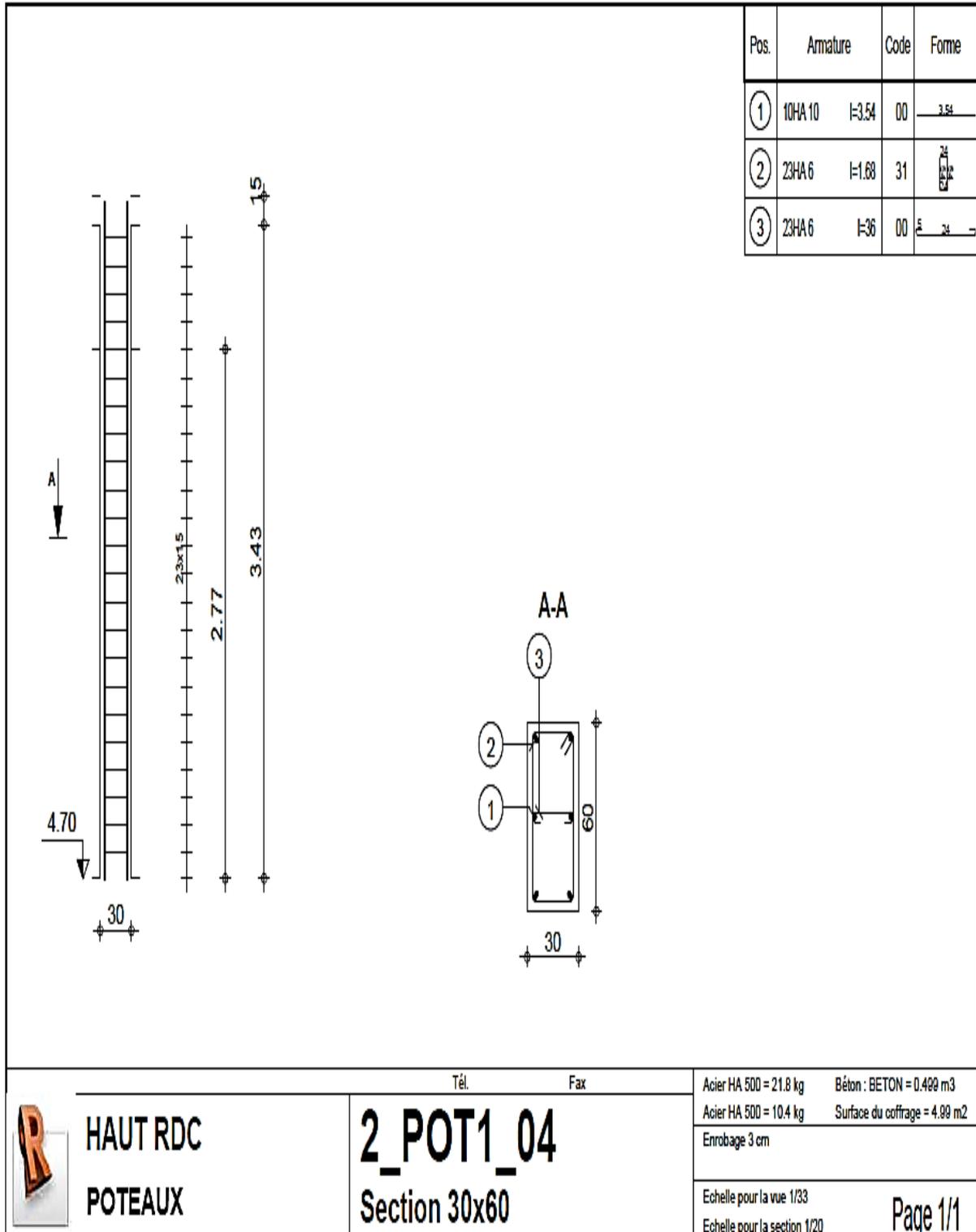


Figure 21 : Plan d'exécution du poteau POT1\_04 du RDC, Bloc 1, Tranche 1.

d) Semelles :

o *Semelles isolées :*

On a choisi la semelle au-dessous du poteau POT1\_04 défini auparavant :

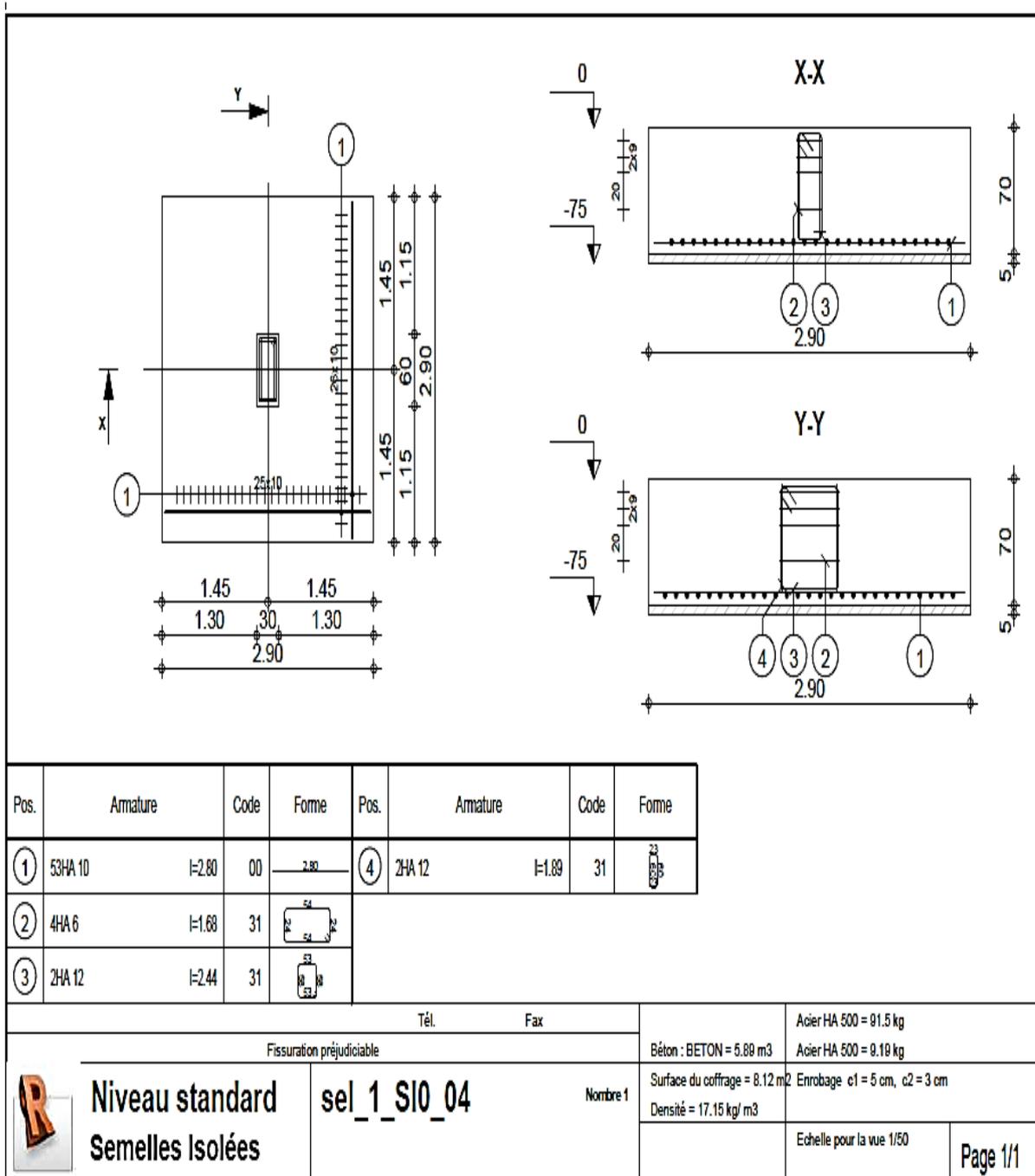


Figure 22 : Plan d'exécution de la semelle isolée SIO\_04 , Bloc 1, Tranche 1.

○ *Semelles filantes :*

On a choisi la semelle au-dessous de la voile P1\_05 définie auparavant :

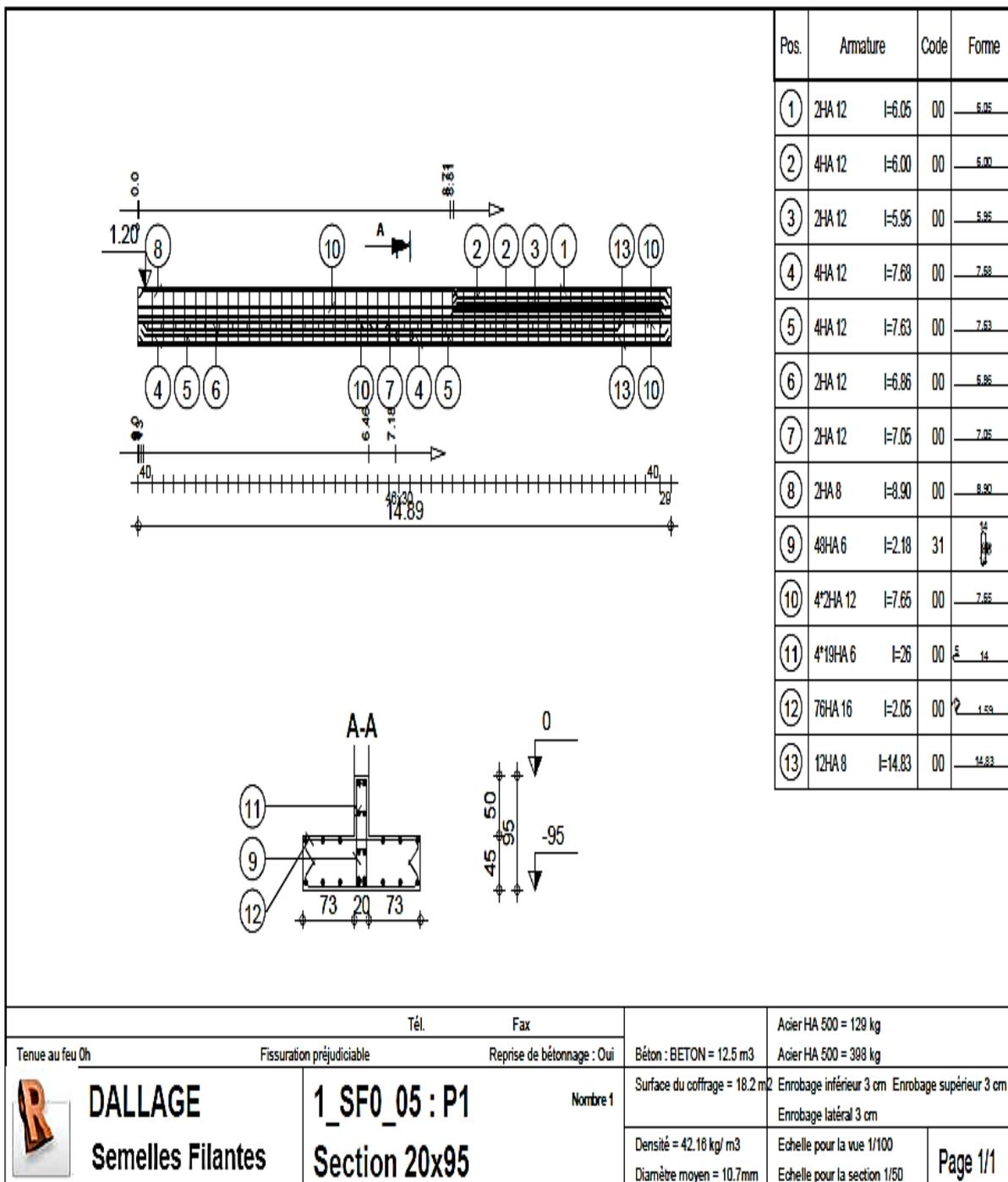


Figure 23 : Plan d'exécution de la semelles filante SF0\_05 , Bloc 1, Tranche 1.

## 2) Calcul dynamique : méthode simplifiée

### Spectre pour la direction X

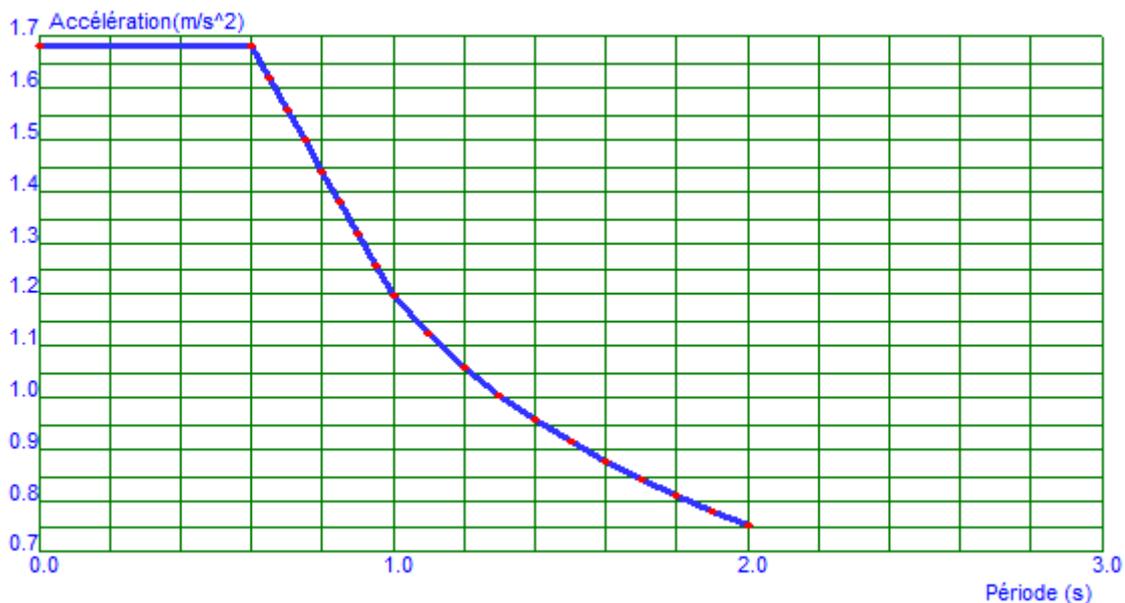


Figure 24 : Spectre pour la direction X, Bloc 1, Tranche 1.

### Spectre pour la direction Y

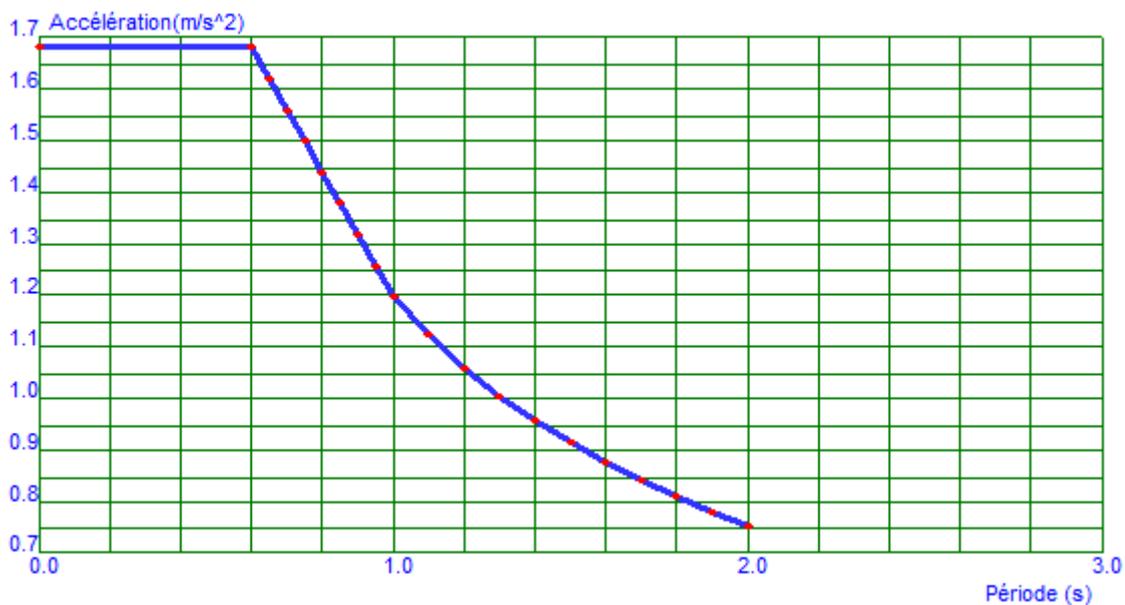


Figure 25 : Spectre pour la direction Y, Bloc 1, Tranche 1.

$T_C = 0.60$     $D_M = 2.50$

**Direction X**

- $T = 0.25[s]$
- $R = 1.68[m/s^2]$

Etage	Poids	Charge	Déplacement	Déplacement relatif
	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)
0	1472.31	30.62	0.03	0.03
1	5043.17	410.83	0.43	0.40
2	5240.82	744.86	1.16	0.73
3	5297.17	1120.11	2.24	1.08
4	5642.42	1584.31	3.42	1.18
<b>Total</b>	<b>22695.90</b>	<b>3890.73</b>		

**Tableau 7 : Déplacements selon X du Bloc 1, Tranche 1.**

Effort tranchant de base: 3890.73 (KN)

**Direction Y**

- $T = 0.32[s]$
- $R = 1.68[m/s^2]$

Etage	Poids	Charge	Déplacement	Déplacement relatif
	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)
0	1472.31	30.62	0.02	0.02
1	5043.17	410.83	0.22	0.20
2	5240.82	744.86	0.61	0.39
3	5297.17	1120.11	1.19	0.58
4	5642.42	1584.31	1.83	0.65
<b>Total</b>	<b>22695.90</b>	<b>3890.73</b>		

**Tableau 8 : Déplacements selon Y du Bloc 1, Tranche 1.**

Effort tranchant de base: 3890.73 (KN)

**Analyse :**

Le tableau ci-dessous résume les déplacements admissibles pour chaque niveau :

hi	$\Delta_{max}(mm)$	$\Delta_{cumul}(mm)$
0 (1.2m)	6.00	6.00
1 (3.5m)	18.00	24.00
2 (3.5m)	18.00	42.00
3 (4m)	20.00	62.00
4 (4m)	20.00	82.00

**Tableau 9 : Déplacements admissibles pour chaque niveau du Bloc 1, Tranche 1.**

On constate que le déplacement maximal au sommet de la structure est de 3.42 mm selon X et de 1.83 mm selon Y, ce qui est largement inférieur aux déplacements admissibles par les règles en vigueur ( $h/200$ ).

***Remarque :*** les plans de ferrailage de quelques éléments structuraux de chaque bloc calculé par ROBOT Millenium seront présentés en ANNEXE 6.7.

Les notes du calcul simplifié du bloc 1 de la tranche 1 et de la tranche 2 seront présentées en ANNEXE 8.

## VI. Traitement thermique de la structure

### I. Zonage climatique :

L'élaboration d'un seul zonage final destiné à la réglementation thermique du bâtiment est primordiale afin de prendre en considération les spécificités climatologiques de la région. En effet, les considérations climatologiques sont prises en compte d'une manière détaillée. Le zonage climatique va permettre de discerner les régions climatiquement homogènes en termes de paramètres climatologiques étudiés.

Deux zonages sont réalisés : un zonage pour l'hiver et un zonage pour l'été, sur une période de 10 ans (1999-2008) en utilisant un réseau de 37 stations synoptiques.

Les paramètres étudiés sont :

➤ pour l'hiver :

- la somme des degrés jours du chauffage à base de 18°C (DJCH)
- la température minimale du mois le plus froid

➤ pour l'été :

- la somme des degrés jours de climatisation à base de 21°C (DJCL)
- la température maximale du mois le plus chaud

Les stations synoptiques utilisées sont : Laâyoune, Sidi Ifni, Dakhla, Tanger, Larache, Chefchaouen, Al-Houceima, Oujda, Kénitra, Taza, Rabat-Salé, Sidi Slimane, Fès, Meknès, Casablanca, Nouaceur, Ifrane, El Jadida, Settat, Khouribga, Safi, Kasba-Tadla, Béni Mellal, Midelt, Bouarfa, Rachidia, Essaouira, Marrakech, Agadir Inzegane, Agadir Massira, Taroudant, Ouarzazate, Tiznit, Guelmim, Tan-Tan, Tétouan, Nador.

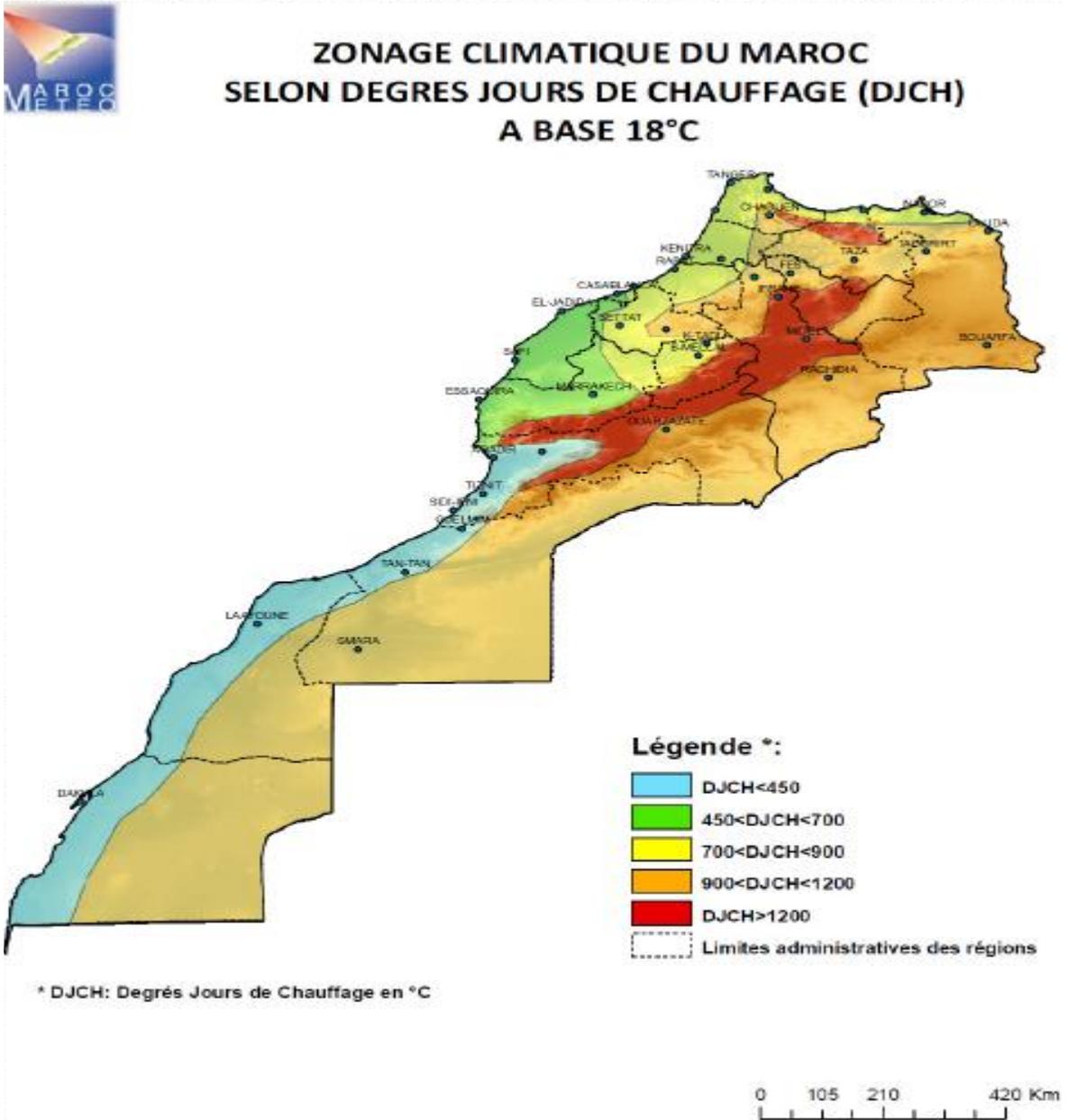
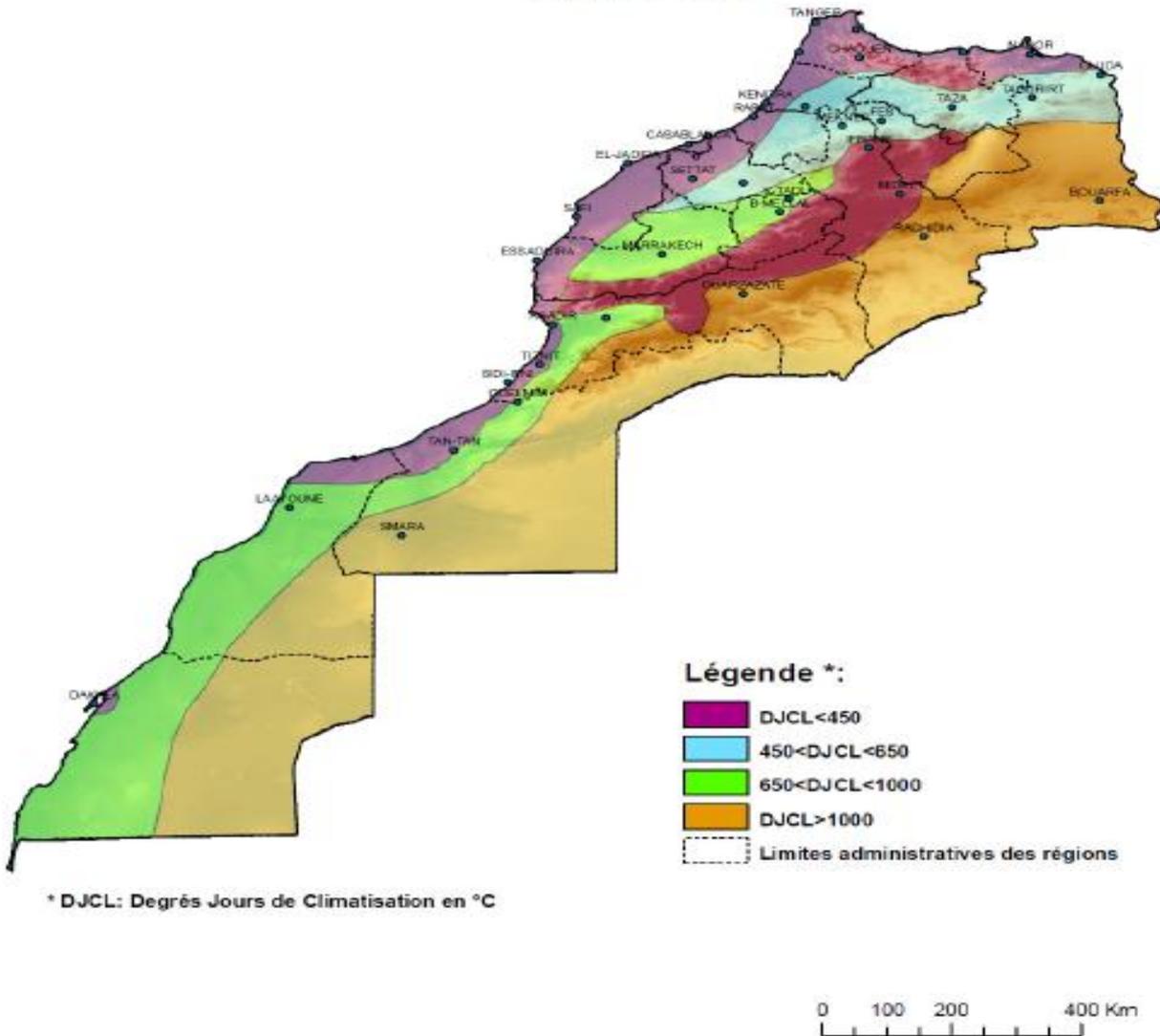


Figure 26 : Carte du zonage climatique du Maroc selon degrés jours de chauffage (DJCH) à base de 18 °C.



**ZONAGE CLIMATIQUE DU MAROC  
SELON DEGRES JOURS DE CLIMATISATION (DJCL)  
A BASE 21°C**



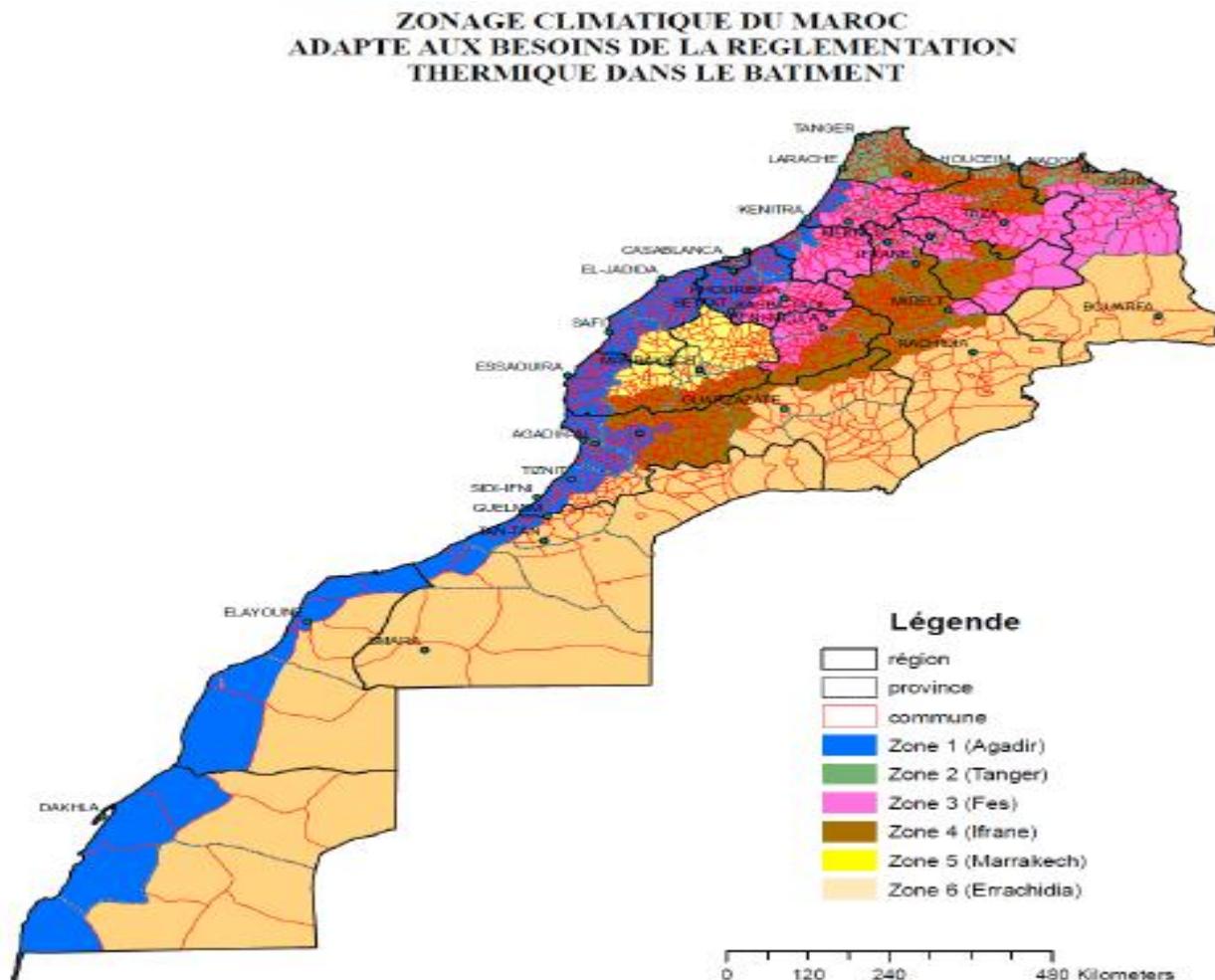
**Figure 27 : Carte du zonage climatique du Maroc selon degrés jours de climatisation (DJCL) à Base de 21 °C.**

Le zonage final qui répond au mieux aux besoins de la réglementation thermique du bâtiment, est réalisé en se basant sur les zonages suivants:

- \_ Les degrés jours de chauffage à base 18°C (réalisé par la DMN)
- \_ Les degrés jours de climatisation à base 21°C (réalisé par la DMN)
- \_ Résultats de simulations énergétiques et thermiques sur plusieurs villes marocaines

types zonage réalisé par les experts désignés par l'ADEREE.

La carte suivante représente le zonage final qui se constitue de sept zones géographiques. Les régions obtenues sont délimitées en respectant les limites administratives, pour une application facile et efficace de la nouvelle réglementation.



**Figure 28 : Zonage climatique du Maroc adapté aux besoins de la réglementation thermique dans le bâtiment.**

Afin de déterminer la limitation de chauffage et climatisation, la figure suivante montre les besoins énergétiques de 12 localités du Maroc :

Besoins énergétiques spécifiques de chauffage et climatisation : 12 localités du Maroc

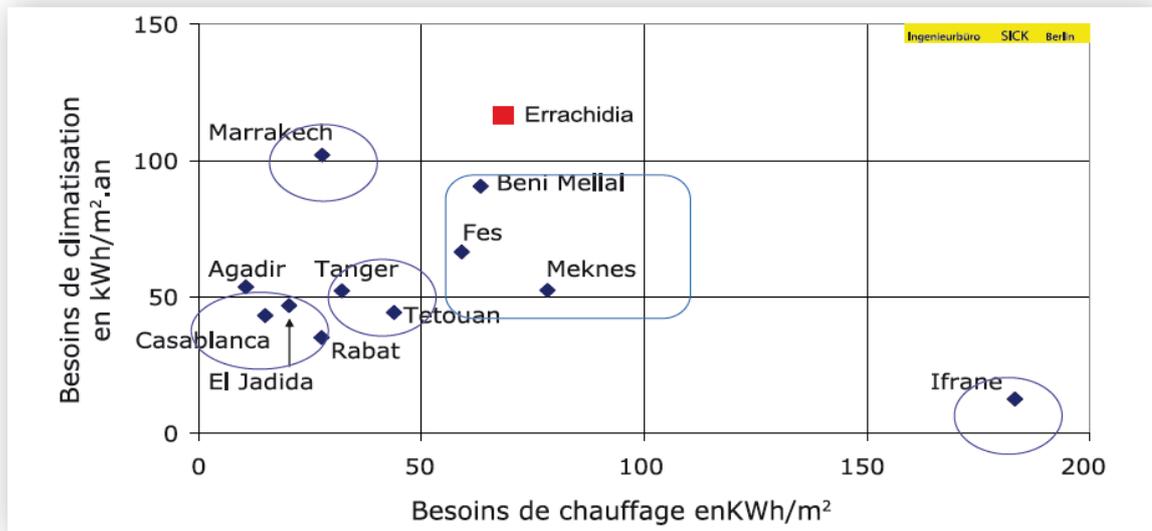


Figure 29 : besoins énergétiques spécifiques de chauffage et climatisation : 12 localités du Maroc.

Pour la ville de Meknès : les besoins de chauffage sont limités aux environs de 70 kWh/m<sup>2</sup>.an, tandis que pour les besoins de climatisation sont limités à un peu près de 60 kWh/m<sup>2</sup>.an

## II. Evaluation énergétique :

### 1) Les Déperditions dans le bâtiment :

Les déperditions à travers l'enveloppe d'un bâtiment se situent à tous les niveaux. Il sera donc important d'en tenir compte à chaque instant de la conception.

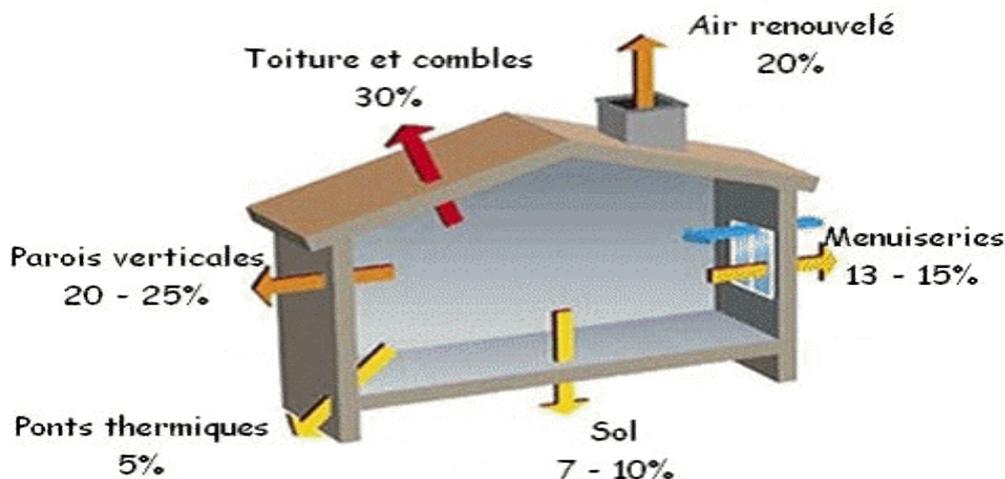


Figure 30 : Quantification des principales déperditions énergétiques.

## 2) Les apports d'énergie dans le bâtiment

**Apports intérieurs** : le chauffage est une source importante des apports intérieurs, La respiration et le rayonnement humains, l'électroménager et le multimédia sont aussi des sources potentielles d'apport énergétique.

**Apports extérieurs** : le rayonnement solaire est une source importante d'apport énergétique. Les choix de l'orientation et des menuiseries deviennent primordiaux dans la dynamique énergétique.

## 3) Performance énergétique d'un bâtiment

### a) La toiture-terrasse :

Les toitures constituent la 1ère zone de perte de chaleur ( $\approx 30\%$ ) et doivent être isolés en priorité, l'air chaud monte et si la toiture-terrasse est mal isolée, les pertes énergétiques sont importantes.

### b) Les parois verticales :

Pour éviter au maximum les déperditions de chaleur, il est important que les murs soient bien isolés car jusqu'à 25% des pertes de chaleur peuvent s'échapper par les murs.

### c) Les fenêtres :

Environ 13 à 15 % de la chaleur s'échappe d'une fenêtre peu ou mal isolée. Isoler les fenêtres est une priorité économique et écologique où la qualité de la structure de la menuiserie est très importante.

### d) Les ponts thermiques

Il s'agit d'une discontinuité dans l'isolation qui est due à la structure et qui peut représenter jusqu'à 5 à 7% des déperditions. Ils sont des points faibles dans l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. A ces endroits, en hiver, la température superficielle de l'enveloppe est plus basse que celle des surfaces environnantes.

Les ponts thermiques découlent, en général de contraintes constructives et géométriques, ils vont provoquer des dépenses énergétiques, un inconfort sur le plan de l'hygiène et une détérioration progressive des matériaux.

#### ○ *Contraintes constructives*

Il s'agit par exemple d'ancrages ou d'appuis entre éléments situés de part et d'autre de la couche isolante de la paroi. L'isolant étant localement absent, le flux de chaleur est sensiblement plus dense dans ces parties de la paroi.

#### ○ *Contraintes géométriques*

Ce type de pont thermique est dû à la forme de l'enveloppe. A cet endroit, la surface de la face extérieure est beaucoup plus grande que la surface de la face intérieure. La surface chauffée (intérieure) est plus petite que la surface de refroidissement (extérieure).

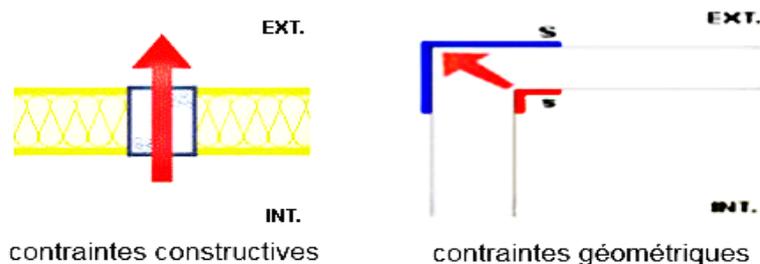


Figure 31 : Contraintes constructives et géométriques dans un pont thermique.

### e) Le sol

Environ 7 à 10% des pertes de chaleur peuvent s'effectuer par le sol. Un revêtement (plancher, moquette) est déjà un isolant, mais il ne suffit pas.

### f) Le renouvellement de l'air :

Le renouvellement de l'air doit être suffisant du point de vue de l'hygiène, mais il doit être le plus réduit possible pour éviter les déperditions énergétiques dues à l'air chaud.

### g) Besoin de chauffage

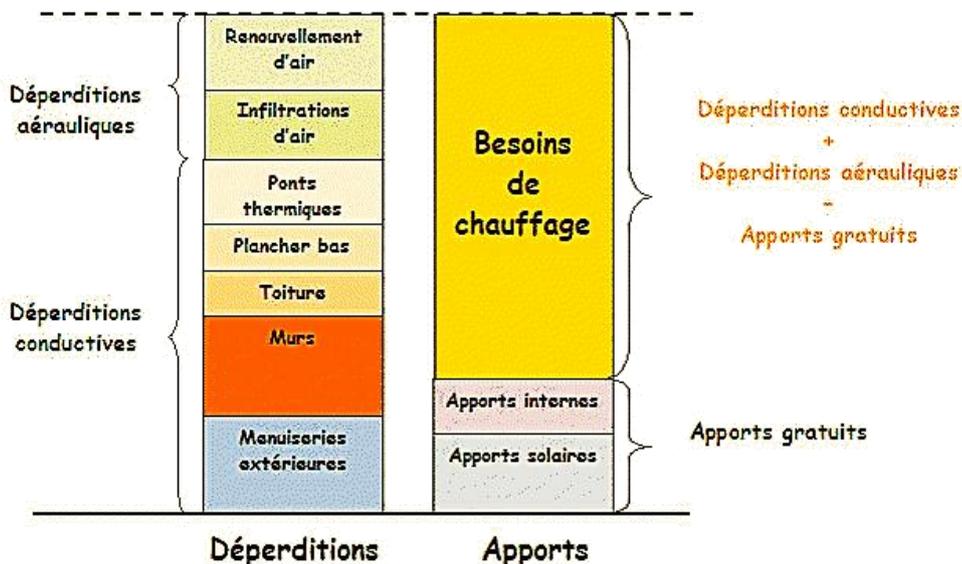


Figure 32 : Inventaire des déperditions & apports dans un bâtiment.

### III. Dispositions d'isolation :

#### 1) Spécifications thermique de la zone de Meknès

Après le choix des matériaux d'isolation, nous serons amenés à définir les épaisseurs qui vérifient une résistance respectant les exigences limites réglementaires pour bâtiments à usage bureaux définies par le tableau ci-dessous selon le zonage thermique au Maroc :

**Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments à usage de bureaux**

	Taux des baies vitrées TGBV	U des toitures exposées (W/m <sup>2</sup> .K)	U des murs extérieurs (W/m <sup>2</sup> .k)	U des vitrages (W/m <sup>2</sup> .k)	R minimale des planchers sur sol (m <sup>2</sup> .k/W)	Facteur Solaire FS* des vitrages
Zone climatique réglementaire Z1 (Réf. Agadir)	≤ 15%	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	NE
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,65	≤ 1,20	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45 %	≤ 0,55	≤ 1,20	≤ 3,30	NE	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire Z2 (Réf. Tanger)	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 5,80	NE	NE
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	NE	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire Z3 (Réf. Fès)	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 0,75	NE
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 0,75	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,55	≤ 0,70	≤ 2,60	≥ 0,75	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45 %	≤ 0,49	≤ 0,60	≤ 1,90	≥ 0,75	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,5
Zone climatique réglementaire Z4 (Réf. Ifrane)	≤ 15%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	NR
	16-25 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,49	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,25	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,6
	36-45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,25	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,5
Zone climatique réglementaire Z5 (Réf. Marrakech)	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NR
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,4
	36-45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,5 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire Z6 (Réf. Errachidia)	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NE
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,4
	36-45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,5 Autres : ≤ 0,3

**Tableau 10 : Exigences limites règlementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments à usage bureaux**

Pour le cas de notre projet, puisqu'il se situe à Meknès, nous allons travailler sur la zone 3 avec une proportion des baies vitrées entre 26% et 35% donc on aura comme valeurs limites du coefficient de transmission thermique U(W/m<sup>2</sup>.k) :

- $U \leq 0.55$  pour la terrasse exposée ;
- $U \leq 0.7$  pour les murs extérieurs ;
- $U \leq 2.60$  pour les vitrages ;
- $U \leq 1.33$  pour les planchers sur sol ;
- Facteur solaire FS\* des vitrages : Nord (NE) ; Autres  $\leq 0.7$  ;

### Définitions de quelques paramètres :

Coefficient de transmission thermique  $U$  ( $W/m^2.K$ ) : caractérise la quantité de chaleur traversant une 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 ladite paroi.

Résistance thermique  $R$  ( $m^2.K/W$ ) : inverse du coefficient de transmission thermique.

Conductivité thermique  $\lambda$  ( $W/m.K$ ) : la quantité de chaleur transférée par unité de surface d'un matériau et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 K.

Relation entre  $U$ ,  $R$ , et  $\lambda$  :  $R = \frac{1}{U}$  ;  $R = \frac{e}{\lambda}$  avec  $e$  : épaisseur du matériau

## 2) Isolation des parois verticales :

Pour l'isolation des parois verticales, nous avons opté pour la laine de verre pour des raisons multiples qu'on va citer par la suite.

### a) Définition générale :

La laine de verre est un matériau isolant fabriqué à partir de produit naturel (sable) qui se présente généralement sous la forme d'un matelas de fibres enchevêtrées emprisonnant de l'air immobile. On l'utilise dans le bâtiment pour l'isolation thermique et l'isolation phonique ou encore comme absorbant pour la correction acoustique ou dans la protection contre les incendies.

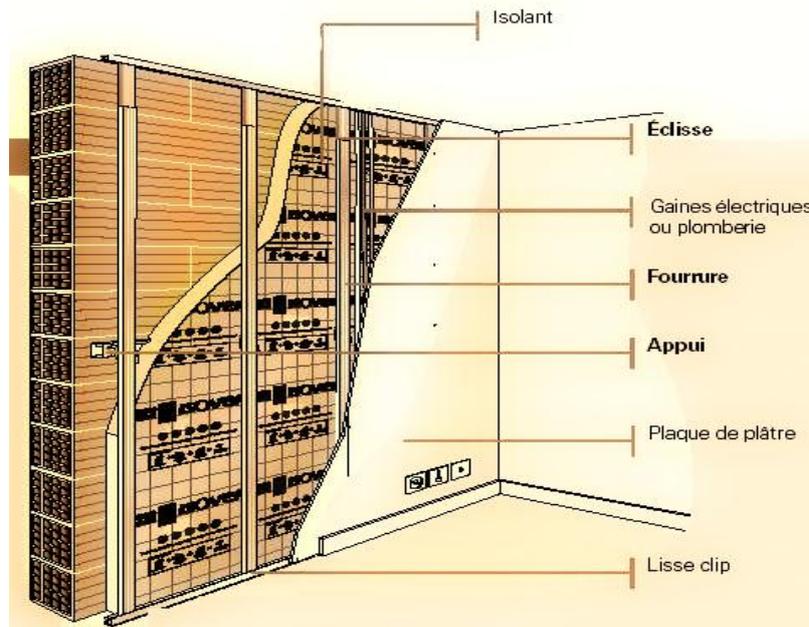


Figure 33 : Mode d'isolation des façades par la laine de verre.

### b) Performances :

En termes de performance thermique, le lambda (ou conductivité thermique) des laines de verre varie de  $\lambda = 0.030 \text{ W}/(\text{m.k.})$  à  $\lambda = 0.040 \text{ W}/(\text{m.k.})$ .

Les résistances thermiques courantes peuvent donc, pour une même épaisseur de produit, varier de :

- $R = 2,50 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  à  $R = 3,30 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  en 100 mm
- $R = 6.85 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  en 240mm pour une laine en lambda de  $0.035 \text{ W}/(\text{m.K})$  en monocouche.
- $R = 7,50 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  en 300 mm pour une laine en lambda de  $0.040 \text{ W}/(\text{m.K})$ .

Ces produits d'isolation thermique sont reconnus comme des matériaux d'isolation les plus utilisés dans le monde. Ils permettent d'isoler contre le froid de l'hiver, la chaleur de l'été.

- Épaisseur : nous allons placer une épaisseur de 100 mm ( $R = 2.5$  à  $3.3 [\text{m}^2 \text{K}/\text{W}]$ )
- Vérification : D'après le tableau des caractéristiques thermiques de Meknès,

On a  $U \leq 0.7$  donc  $R \geq \frac{1}{0.7}$  donc :

$R$  (totale) =  $R$  (mur) +  $R$  (isolant) +  $R_{sj}$  +  $R_{se} = (0.2/1.75) + R$  (isolant) + 0.17 ; (paroi verticale)

→  $R$  (isolant) = 1.144 =  $e/\lambda$  ; Donc  $e_{\min} = 1.144 * \lambda$  (laine de verre) qui nous donne :

3.43 cm  $\leq e_{\min} \leq$  4.57cm donc la condition est vérifiée ;

○ *Caractéristiques de la laine de verre :*

<b>Caractéristiques</b>	<p><b>Elaboration</b> : à partir de sable et de verre recyclé ou calcin, par fusion et fibrage.</p> <p><b>Conditionnement</b> : sous forme de rouleaux, panneaux et flocons selon l'accessibilité des parties à isoler et de la configuration de l'habitation</p> <p><b>Résistance au feu</b> : passive et performante puisque les laines minérales sont incombustibles par nature.</p> <p><b>Durabilité</b> : Durée de vie de plusieurs dizaines d'années et conventionnellement identique à celle du bâtiment.</p>
<b>Avantages</b>	<p><b>Classe de réaction au feu</b> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A1 (produit incombustible) ,si la laine de verre non surfacée (nue, sans pare vapeur)</li> <li>• Classée A2s1d0 (produit non combustible) si elle a certains surfaçages de type voile de verre ou aluminium</li> <li>• Classé F, si elle est revêtue d'un papier kraft</li> </ul> <p><b>Stabilité</b> : répond, par sa nature et ses constituants, aux caractéristiques de stabilité dimensionnelle à température et en présence d'humidité.</p> <p><b>Réaction à l'eau/ l'humidité</b> : Classée non hydrophile ; naturellement non hygroscopique, elle n'absorbe pas l'humidité de l'air.</p> <p><b>Cas d'accident</b> : au cas de mouillage (pluie, neige...), il suffit de la laisser sécher naturellement sans la manipuler ni la comprimer ; elle retrouve sa performance d'isolation thermique.</p>

### 3) Isolation des terrasses :

L'isolation des terrasse est primordial afin d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment du fait que sans une bonne isolation des terrasses, l'air chaud accumulé en hauteur s'échappe directement hors du bâtiment,

#### a) Définition générale :

La laine de roche est un matériau isolant fabriqué à partir d'un matériau naturel issu de l'activité volcanique (le basalte). C'est un isolant certifié pour un usage dans le bâtiment tant pour l'isolation thermique que l'isolation phonique ou pour la protection des ouvrages contre les incendies.

#### b) Performances :

**En termes de performance thermique**, le lambda (ou conductivité thermique) des laines de roche varie de  $\lambda = 0.042 \text{ W}/(\text{m.k})$  à  $\lambda = 0.033 \text{ W}/(\text{m.k.})$ .

Les résistances thermiques courantes peuvent donc varier :

- $R = 2,38 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$  pour la plus classique à  $R = 3.033 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  pour la plus performante, pour une épaisseur de produit de 100 mm
- $R = 7.2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  en monocouche, épaisseurs jusqu'à 260 mm sont disponibles (résistance thermique maximale en monocouche).
  - Epaisseur : nous allons placer une épaisseur de 10 cm ( $R=2.38$  à  $3.033$ )
  - Vérification : calcul de l'épaisseur minimale

On a  $U \leq 0.55$  donc  $R \geq \frac{1}{0.55}$  donc :

**R( totale) = 1.818** =  $R(\text{dalle}) + R(\text{isolant}) + R(\text{forme de pente}) + R(\text{enduit en mortier de ciment}) + R(\text{pare-vapeur}) + R(\text{étanchéité en SBS}) + R(\text{protection d'étanchéité}) + R_{si} + R_{se}$ ; (paroi horizontale avec flux ascendant)

→ **R (isolant) = 1.818 – 0.239 – 0.14 = 1.469** =  $e/\lambda$  ; donc  $e_{\min} = 1.439 * \lambda$  (laine de roche)

qui nous donne :  $4.9 \text{ cm} \leq e_{\min} \leq 6.1 \text{ cm}$  donc la condition est vérifiée ;

- *Caractéristiques de la laine de roche :*

**Elaboration** : à partir de roche volcanique (matières premières naturelles et abondantes) par fusion et fibrage.

**Conditionnement** : sous formes : rouleaux, panneaux rigides pour répondre aux exigences de certaines applications.

**Résistance au feu** : incombustible, elle ne s'enflamme ni propage la flamme ; elle participe à la performance de résistance au feu des éléments de construction des bâtiments.

**Classe de réaction au feu** : Classe A1 ; si la laine de roche non surfacée (sans pare vapeur) ou avec surfaçage voile de verre ou aluminium.

**Stabilité** : répond, par sa nature et ses constituants, aux caractéristiques de stabilité dimensionnelle à température et humidité.

**Réaction à l'eau/ l'humidité** : la laine de roche est un isolant non hydrophile.

- c) **Emplacement de pare-vapeur :**

- *Définition générale :*

Elle est sous forme de feuille ou membrane étanche à la vapeur d'eau. Les pare-vapeur ont pour rôle d'empêcher le cheminement et la stagnation de la vapeur d'eau à travers les parois. Ils sont donc disposés vers l'intérieur, coté chauffé, devant l'isolant.

En effet, la température et l'humidité intérieures diffèrent fortement de l'extérieur, d'où il est impératif que l'humidité ne puisse pas abîmer la structure.

○ *Dispositions constructives :*

Le pare-vapeur doit être placé de manière continue et avec des joints étanches.

L'emplacement d'un écran de pare-vapeur devant la laine de roche remplit les fonctions suivantes :

- Éviter une condensation excessive.
- Empêcher, dans l'isolant thermique, l'absorption d'eau par capillarité en provenance des éléments de construction contigus.
- Renforcer l'étanchéité destinée à faire face à l'eau de pluie.
- Assurer l'étanchéité à l'air.

Les films seront posés autant que possible sans joint. Les joints inévitables et les jonctions avec d'autres éléments de construction sont à réaliser par collage ou soudage avec recouvrement, de manière à assurer la continuité du pare-vapeur.

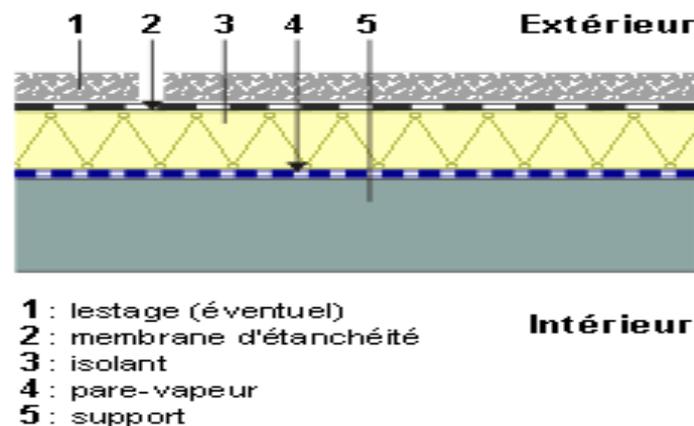


Figure 34 : Mode d'isolation de la terrasse.

4) Isolation du plancher bas :

a) **Définition :**

L'isolation thermique des sols joue un rôle essentiel dans la sensation de bien-être émanant d'une pièce et exerce une influence sur la consommation d'énergie.

Une température au sol trop basse se compense en effet, en pratique, par une élévation

de la température ambiante et donc par une surconsommation d'énergie.

Quand le dessous de la dalle (la sous-face) n'est pas accessible, on opte pour une isolation sous chape.

### b) Procédure :

Ce procédé consiste à disposer l'isolant qui est sous forme de laine de roche d'épaisseur 5 cm sur une dalle porteuse, puis à couler dessus une chape, destinée à répartir la pression des charges. Les panneaux d'isolation formeront la couche de séparation entre le sol porteur et la chape d'égalisation.

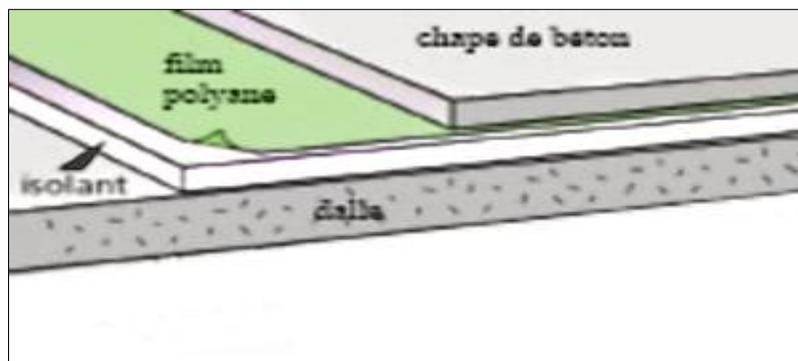


Figure 35 : Mode d'isolation du plancher bas.

Pour éviter toute descente de « laitance » (mélange d'eau/ciment/poussières fines qui tend à remonter à la surface du béton, formant une pellicule blanchâtre), on pose sur toute la surface de l'isolant un film étanche à l'eau (polyane).

Vérification :  $\lambda = (0.042 \text{ W}/(\text{m.k}))$  à  $\lambda = 0.033 \text{ W}/(\text{m.k.})$  avec une valeur limite de coefficient de transmission thermique U du plancher bas de  $1.33 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$  exigé par la réglementation thermique donc :

On a  $U \leq 1.33$  donc  $R \geq 1/1.33$  donc :

**R (totale)** = R (dalle en béton) + R (isolant) + R (chape de béton) +  $R_{si}$  +  $R_{se}$  =  $(0.15/1.75)$   
 $(0.02/1.75) + R$  (isolant) + 0.34 ; (paroi horizontale avec flux descendant) qui nous donne :

→  $R(\text{isolant})=0.315=e/\lambda$  ; donc  $e_{\min}=0.315 * \lambda(\text{laine de roche})$  qui nous donne :

$1.0 \text{ cm} \leq e_{\min} \leq 1.32\text{cm}$  donc la condition est vérifiée ;

## 5) Traitement des ouvertures (fenêtres, portes) :

### a) Définition :

Les fenêtres sont des éléments importants, elles contribuent notamment à faire pénétrer la lumière du jour à l'intérieur et elles sont indispensables à l'isolation thermique et au confort. Leur choix ne doit donc pas être fait au hasard. En choisissant une fenêtre, il faut considérer différents critères comme :

- Le type de vitrage
- Le matériau avec lequel on la réalise

L'efficacité du double vitrage repose sur la faible conductivité thermique de l'air sec. En effet, le verre est très conducteur de chaleur, et est donc un mauvais isolant, quelle que soit son épaisseur. Le double vitrage enferme donc un volume de gaz dans un espace étanche entre les deux vitres, et c'est cette lame d'air qui va réduire fortement le transfert de chaleur, d'abord entre les deux vitres, puis bien sûr entre l'intérieur et l'extérieur.

Jouant le rôle d'espaceur entre les deux parois vitrées, un intercalaire de métal, ou de matériau de synthèse, est collé au verre avec un produit élastomère (par exemple le butyl). Un dessiccateur est intégré à cet espaceur pour maintenir sec le gaz d'isolation et éviter la formation de buée sur les faces intérieures. L'étanchéité entre l'espaceur et les feuilles de verre sera assurée par un joint en mousse.

### b) Performance thermique :

La performance thermique d'un double vitrage est indiquée par un coefficient de transmission thermique  $U$  qui doit être le plus petit possible pour une meilleure efficacité isolante.

➤ Nous étions face à 3 types :

-un double vitrage standard 4/16/4 en lame d'air ayant un coefficient de transmission thermique  $U=2.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

- un double vitrage 4/16/4 en lame d'air et à isolation thermique renforcée par un verre à faible émissivité ayant un coefficient de transmission thermique  $U=1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

- un double vitrage 4/16/4 à isolation renforcée par un verre à faible émissivité où la lame d'air est remplacée par le gaz d'argon ayant un coefficient de transmission thermique  $U=1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### Analyse :

Donc on remarque que si on améliore la performance thermique du double vitrage par la considération d'un verre faiblement émissif on gagne  $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  sur le coefficient de transmission thermique, une différence qui est importante vis-à-vis l'amélioration envisagée. Alors que si on prévoit de remplacer la lame d'air en argon on ne gagne que  $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ , une marge qui est minime face à un investissement plus grand vu que l'insertion de lame en argon est très chère si on prend en considération l'amélioration que ce type procure.

⇒ **Donc on choisit le 2ème type :** La pose de **doubles vitrage 4/16/4 faiblement émissif à lames d'air** pour les fenêtres des façades sud, est et ouest.

### c) **Caractéristiques:**

Il s'agit d'utiliser des vitrages peu émissifs qui permettent de réduire les pertes de chaleur par rayonnement. Ils comportent un revêtement spécial déposé sur la face intérieure (argent ou oxyde métallique à base de titane ou nickel). Ce revêtement joue le rôle de barrière thermique à l'intérieur du vitrage qui permet de réduire les pertes de chaleur de l'ordre de 30%.

Principe de fonctionnement d'un vitrage à faible émissivité : Le rayonnement solaire traverse le vitrage et réchauffe les parois de la pièce. Ces parois émettent des rayons infra

rouges (chaleur) qui sont renvoyés en majorité par la couche peu émissive vers l'intérieur de la pièce.

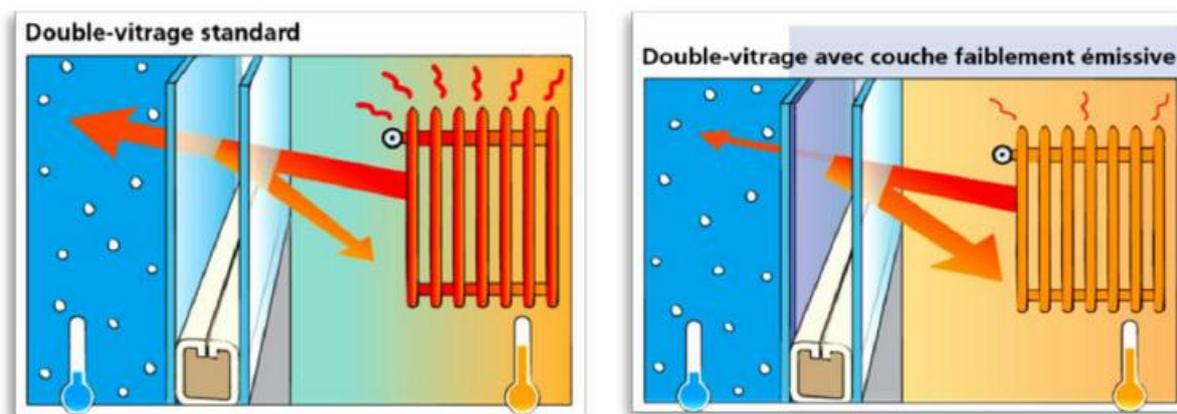


Figure 36 : Principe de fonctionnement d'un vitrage à faible émissivité.

Un double vitrage 4/16/4 avec lame d'air et à isolation thermique renforcée par un verre à faible émissivité a un coefficient thermique  $U_g = 1.4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .

- Vérification : on a  $U=1.4 \leq 2.6 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$  donc la condition limite des vitrages est vérifiée.

#### d) Aluminium à rupture pont thermique :

##### o Définition :

Ces fenêtres allient l'esthétique avec la fonctionnalité. Elles permettent d'économiser l'énergie et d'améliorer l'isolation thermique. Elles sont construites à base des systèmes aluminium qui assurent la stabilité et la résistance mécanique. Cette technique d'isolation est employée afin d'éviter la condensation et le ruissellement d'eau.

Le principe est simple : un matériau non conducteur est serti entre les profilés aluminium intérieurs et extérieurs de l'ouvrant et du dormant pour réduire les échanges réciproques de température.

○ *Avantages :*

- Il ne nécessite aucun entretien.
- il est très résistant : ne rouille pas.
- Les montants très fins laissent plus de place au vitrage et à la lumière.
- Multitude de coloris : tout est possible
- L'aluminium est très rigide, c'est le matériau le plus adapté à la construction de baies vitrées coulissantes et de fenêtres grand format.

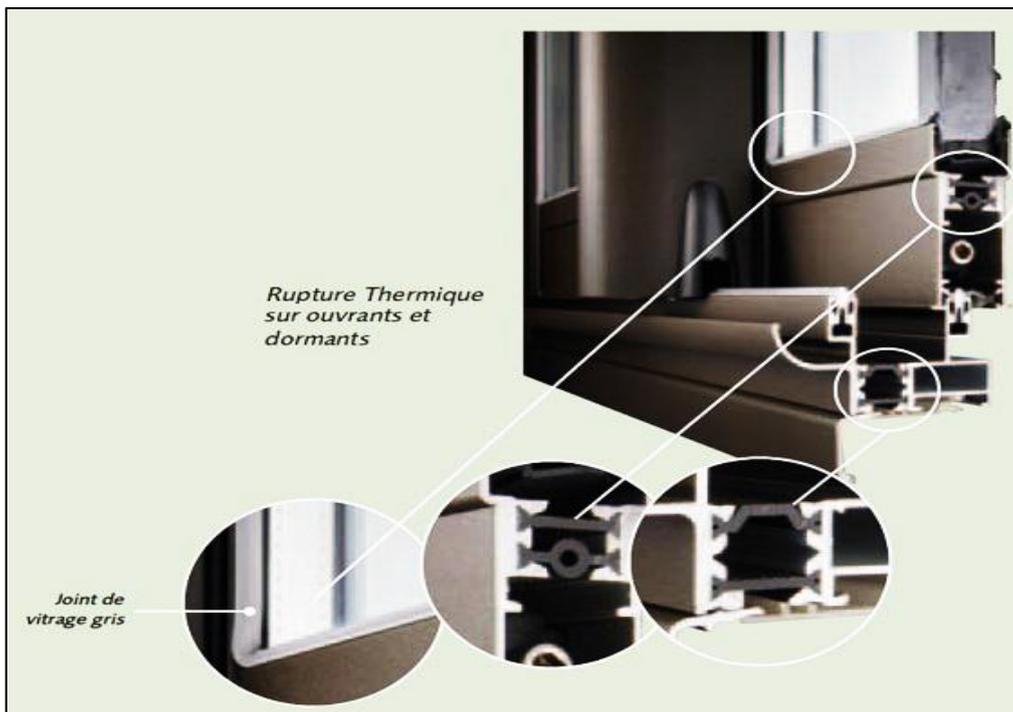


Figure 37 : Fenêtres en Aluminium à rupture pont thermique.

e) **Minimiser les surchauffes :**

○ *Définition :*

Pendant la phase de conception, il est important de préserver un bâtiment du rayonnement solaire direct. Il faut donc trouver un juste équilibre entre d'une part la capacité de protection solaire et d'autre part la transmission maximale de la lumière naturelle. En effet, celle-ci accroît sensiblement le confort visuel dans un espace de bureaux. Donc, afin de contrôler l'impact du soleil sur le bâtiment, nous avons mis en œuvre des brise-soleil en aluminium au niveau des façades SUD, EST et OUEST.

Le brise-soleil est un ensemble de lames, fixes ou orientables, montées sur châssis, pour une installation horizontale ou verticale en façade. Le brise-soleil est apparu comme une solution idéale pour réduire la charge climatique d'été sans négliger l'apport solaire d'hiver. De plus, les brise-soleil autorisent tout à fait la ventilation naturelle des locaux grâce à l'ouverture des fenêtres.

- *Barrière contre les excès thermiques en été :*

Plus qu'un élément architectural, le brise-soleil extérieur est devenu un atout majeur pour le confort d'été. En effet, contrairement aux stores intérieurs, les brise-soleil extérieurs réfléchissent le rayonnement solaire direct.

Le rayonnement infrarouge n'est alors plus piégé à l'intérieur des locaux (effet de serre) et l'élévation en température qui en résulte est annulée.

C'est en apportant de l'ombre de manière originale à la construction que les charges climatiques sont significativement réduites.

## **f) OPTIMISER L'ORIENTATION DU BÂTIMENT :**

L'orientation des façades a de l'importance. De ce fait, le bâtiment est orienté sud-est afin d'optimiser en hiver les apports énergétiques issus des rayons du soleil et favoriser l'usage de l'éclairage naturel. Afin d'éviter l'inconfort occasionné par les surchauffes en été, l'ensoleillement direct des façades est maîtrisé grâce à des protections solaires : les brise-soleil.

- *Sud-est :*

L'emplacement au sud permet de capter en hiver plus d'énergie du soleil, et par conséquent participe dans le chauffage du bâtiment avec une facilité de protection contre le soleil d'été(les brise-soleil): le bâtiment reste frais en été.

Les vitrages laissent passer les rayons solaires d'autant mieux qu'ils frappent le verre avec un faible angle d'incidence. En hiver, le soleil même à midi est bas dans le ciel, les rayons

frappent la vitre avec un faible angle d'incidence et traversent facilement la vitre. Un vitrage placé côté sud récupérera facilement cette énergie solaire où l'apport de chaleur est désirable. En été, le soleil à midi est très haut dans le ciel. Les rayons qui frappent une vitre côté sud auront un fort angle d'incidence et seront presque intégralement renvoyés vers l'extérieur. Relativement peu de chaleur pénètre dans le logement. De plus, l'emplacement Est permet de profiter du lever du soleil.

## 6) Confort d'été :

### a) Définition :

Le confort d'été, à savoir conserver un air relativement frais à l'intérieur d'un bâtiment en plein été, est l'un des points clés d'un bâtiment à faible consommation d'énergie.

Une erreur répandue consiste à croire qu'un bâtiment bien isolé va forcément surchauffer en été à cause d'un effet « cocotte-minute ». Bien au contraire, une bonne isolation va justement permettre de se protéger de la chaleur de l'air extérieur. Le tout consiste alors à minimiser les apports de chaleur à l'intérieur même de l'habitat. Donc on peut procéder par :

### b) Solutions possibles :

#### ○ *Stopper les apports solaires*

- Durant la saison froide, le soleil est bas dans le ciel et les rayons pénètrent dans l'habitat, alors que durant la saison chaude, le soleil est haut dans le ciel et les brise-soleil empêchent les rayons solaires d'entrer dans le bâtiment. Cette solution est très prisée pour son esthétique et sa durabilité.

- La plantation d'arbres apparaît la solution la plus adaptée. En hiver les feuilles tombent et le soleil peut entrer dans le logement, alors qu'en été les feuilles ont repoussé et stoppent les rayons solaires.

#### ○ *Sur-ventilation nocturne*

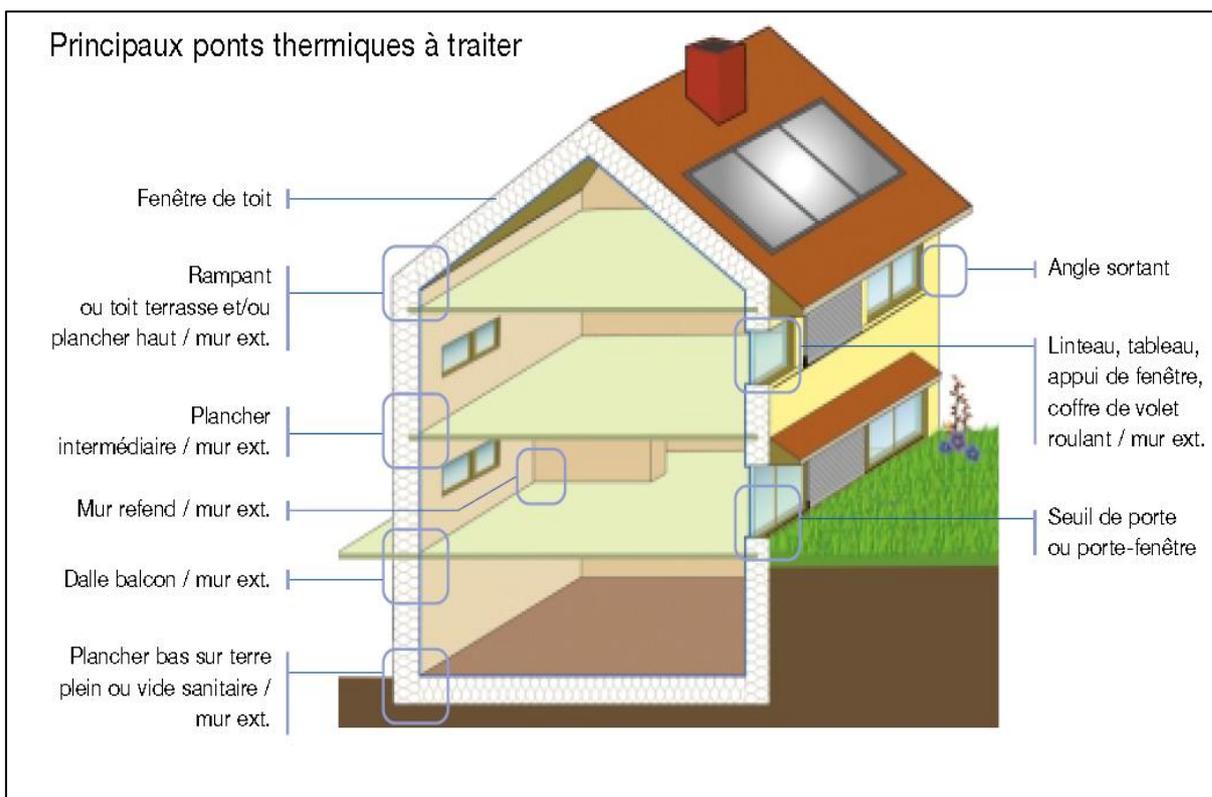
La sur-ventilation nocturne consiste à ventiler fortement un bâtiment la nuit quand il fait plus frais afin de stocker la fraîcheur qui sera bien utile en journée.

L'air extérieur est introduit dans le bâtiment durant la nuit par ouverture des fenêtres ou de volets. En circulant, l'air est mis en contact avec la structure du bâtiment et la refroidit. Le froid ainsi accumulé durant la nuit permettra d'absorber les apports thermiques de la journée suivante.

Cette solution paraît la mieux adaptée puisque notre bâtiment est formé de bureaux, donc il n'y a pas de problèmes de présence des gens, ou d'habitants pendant la nuit.

## 7) Ponts thermiques :

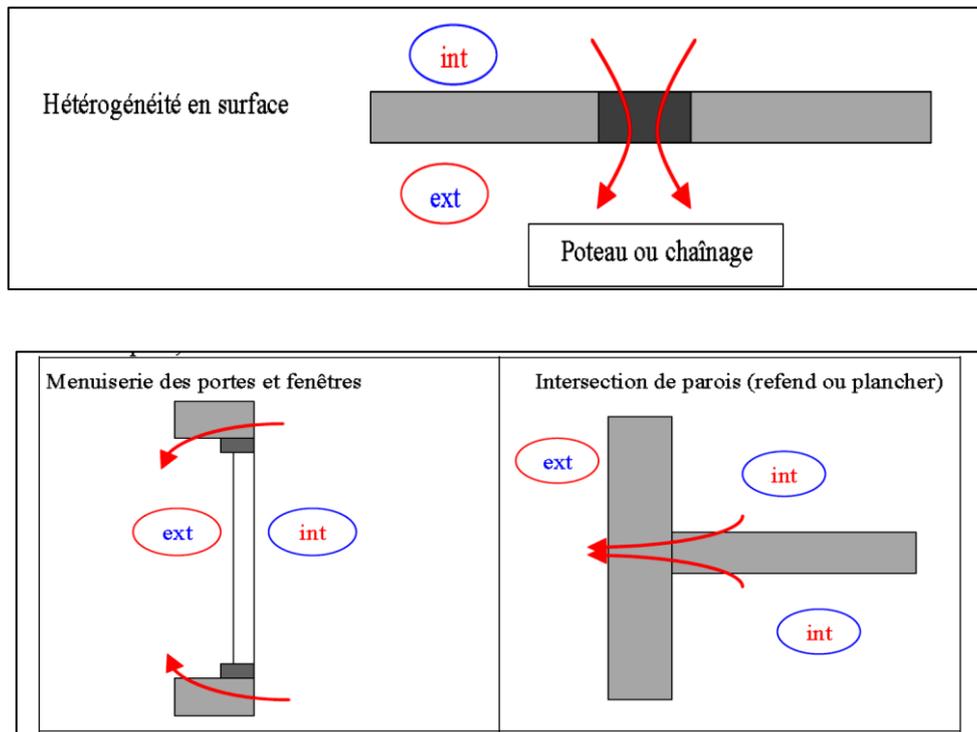
### a) Définition :



**Figure 38 : Principaux ponts thermiques présents dans un bâtiment.**

Les ponts thermiques sont des lieux préférentiels de passage du flux thermique où les lignes de flux ne sont plus parallèles entre elles.

Rappelons que les lignes de flux sont les lignes de passage du flux thermique, perpendiculaires aux isothermes.



**Figure 39 : Lignes de flux de différents ponts thermiques.**

Ces ponts thermiques créent donc des déperditions qui sont à ajouter à celles que l'on calcule pour des surfaces homogènes de paroi.

On notera que l'absence de correction des ponts thermiques entraîne des zones plus froides sur les parties intérieures au droit des ponts thermiques.

**b) Poteaux porteurs ou chaînages intégrés dans une paroi courante isolée:**

- *Définition :*

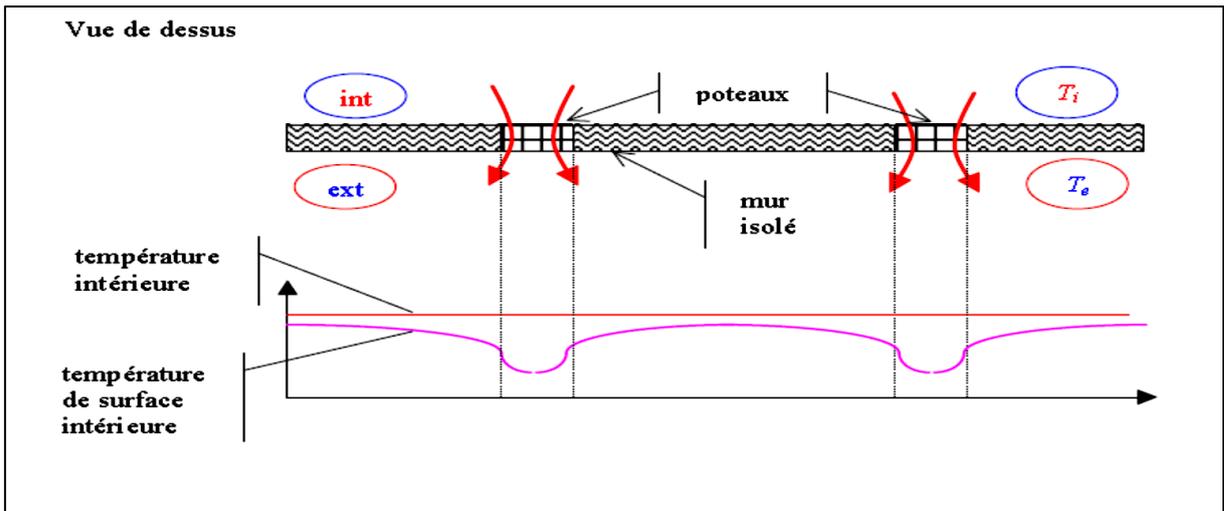


Figure 40 : Différence de température dans les poteaux porteurs/chainages avant isolation.

o *Correction :*

- l'ajout de l'isolation coté intérieur (laine de verre) sert de même à traiter ce type de ponts thermiques

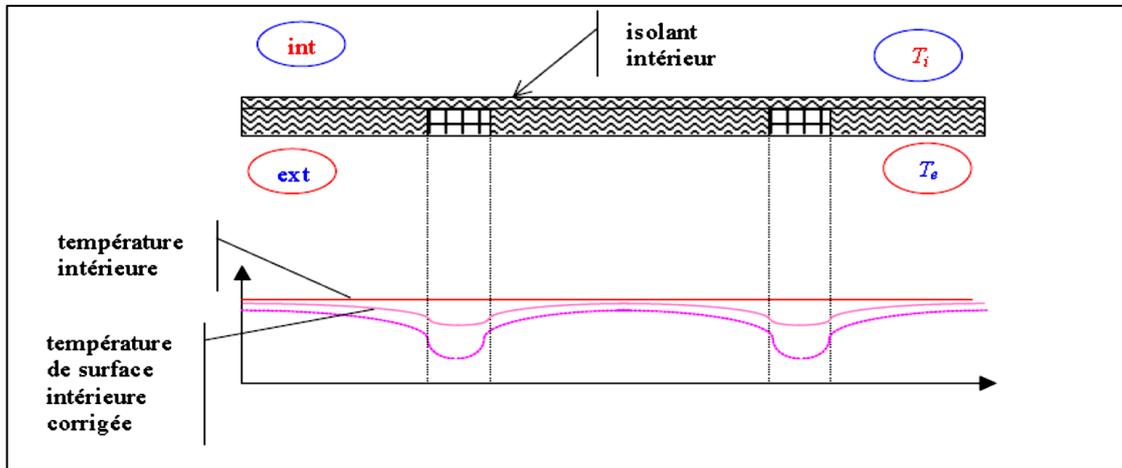


Figure 41 : Différence de température dans poteaux porteurs/ chainages après isolation.

**c) Intersection paroi intérieure / mur extérieur isolé par l'intérieur.**

○ *Définition :*

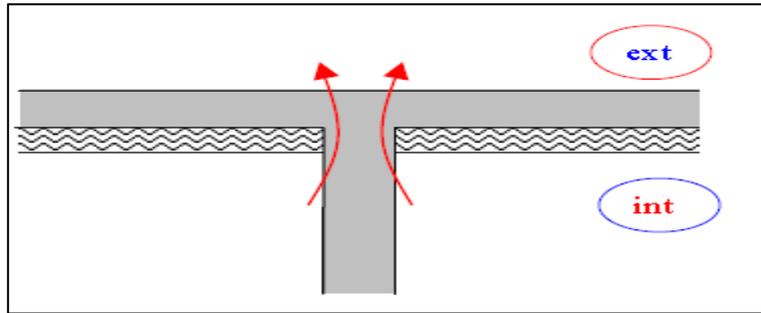


Figure 42 : Lignes de flux dans l'intersection d'une paroi intérieure/ mur extérieur.

○ *Correction :*

Prolongement de l'isolant intérieur sur une partie de la paroi intérieure.

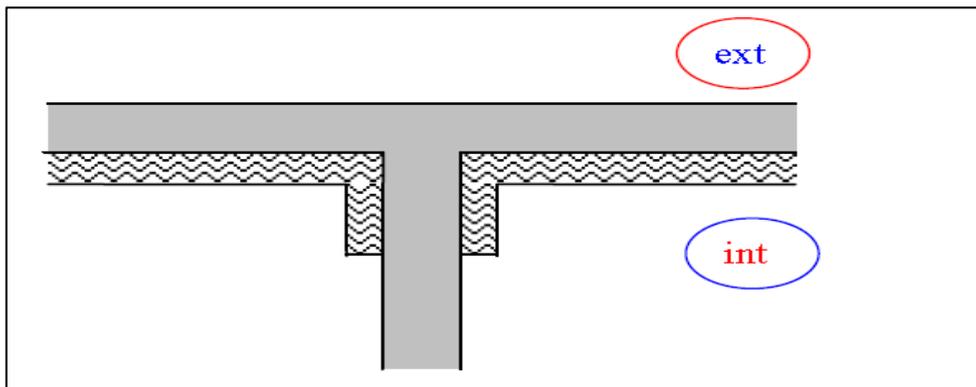


Figure 43 : Isolation intérieure de l'intersection d'une paroi intérieure /mur extérieur.

**d) Au point de raccordement entre la façade et la dalle :**

La limitation de ces déperditions nécessite la mise en place, au moment de la construction, de rupteurs thermiques entre le voile et le plancher : un rupteur de ponts thermiques à base de BFUP et de laine de roche.

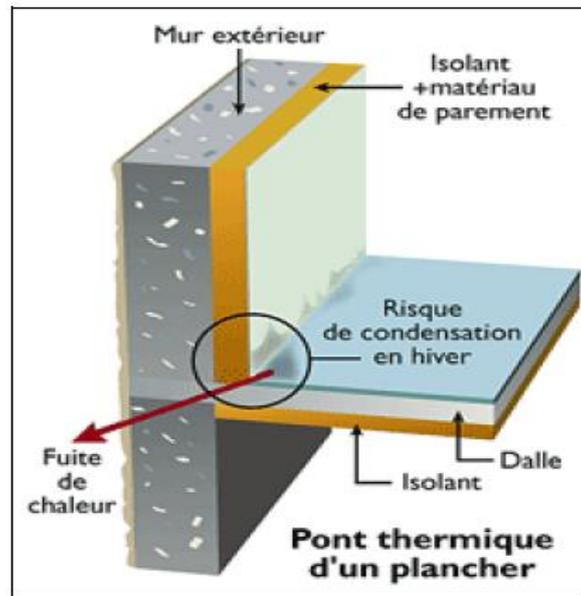


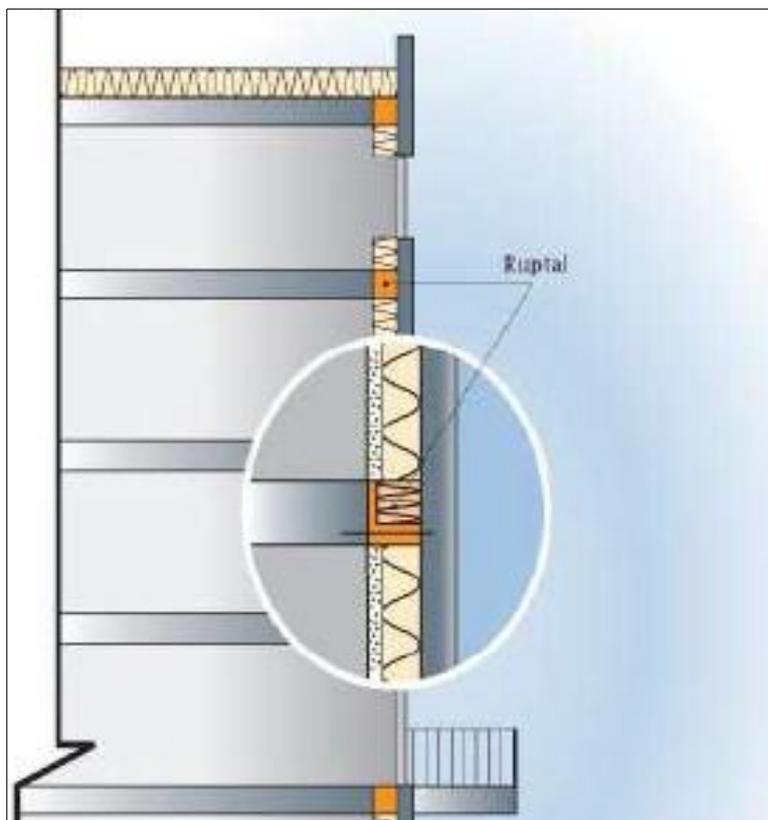
Figure 44 : Pont thermique d'un plancher.

**Définition du BFUP :** Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances

Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique présentant un fort dosage en ciment et en adjuvants, des granulats de faible dimension et une porosité réduite. Ils présentent une durabilité et une résistance exceptionnelles (de 130 à 250 MPa en compression/de 20 à 50 MPa en traction par flexion) qui permet de se passer d'armatures passives dans les éléments structurels. En raison de la résistance au feu demandée, une laine de roche à haute densité a été choisie pour le corps du composant.

Les BFUP se caractérisent également par :

- une très grande ouvrabilité leur conférant souvent un caractère auto-plaçant
- une résistance très importante aux agressions
- des aspects de parements esthétiques et une texture de parement très fine



**Figure 45 : l'emplacement des rupteurs thermiques continus dans un bâtiment isolé par l'intérieur.**

Par ailleurs, il faut impérativement assurer une liaison mécanique suffisante entre le voile de la façade et la dalle pour garantir la stabilité de cette dernière.

La liaison mécanique voile – dalle est assurée, pour ce nouveau rupteur par des fers à béton de diamètre 10 mm, espacés, les uns des autres, de 60 cm. Ces fers traversent 8 cm d'isolant et sont protégés, dans l'isolant, par des nervures en BFUP de 4 cm de large et de 12 cm de haut

Après installation, ces nervures de taille réduite doivent être capables de reprendre tous les efforts de compression et de traction générés par la dalle.

Les nervures permettent également de protéger le fer contre la corrosion. Les épaisseurs d'enrobage peuvent être réduites à 10 mm. En effet, comme l'ont montré de nombreux tests de durabilité, la très faible porosité et la nature même des pores, interdisent la pénétration des chlorures et empêchent la carbonatation, assurant ainsi une protection à

long terme du métal.

Pour schématiser, la conception du rupteur a consisté à remplacer une « tranche » de béton de 8 cm d'épaisseur, traversée par des fers, en bordure de dalle, par une « tranche » d'isolant traversée par un fer avec un peu de BFUP autour.

Un chaînage particulier est prévu dans le voile et dans la dalle pour améliorer la répartition des efforts.

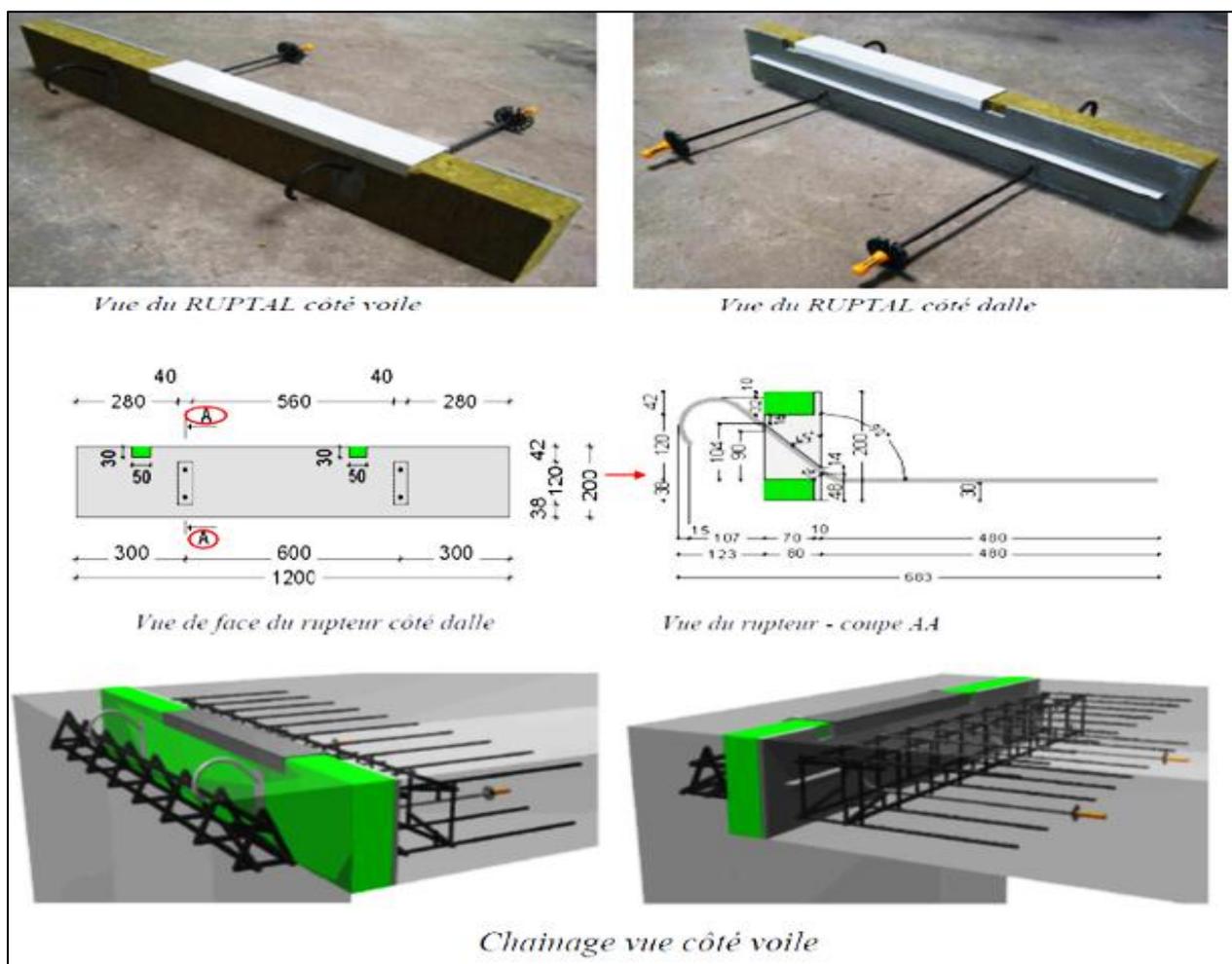


Figure 46 : Différentes vues d'un rupteur.

## VII. Evaluation de surcout

### I. Comparaison entre structure isolée et non isolée

#### 1) Données d'entrée :

Le calcul du bilan thermique du projet se base sur des paramètres climatiques spécifiques à l'emplacement du projet, qui sont des données d'entrée afin d'évaluer les consommations énergétiques du bâtiment :

<b>Région</b>	Meknès (Maroc)
<b>latitude</b>	34.9 °
<b>altitude</b>	560 m
<b>coefficient de clarté atmosphérique</b>	1
<b>bulbe sèche en été</b>	33 °C
<b>bulbe humide en été</b>	17 °C
<b>bulbe sèche en hiver</b>	19 °C
<b>bulbe humide en hiver</b>	5 °C
<b>coefficient de déperdition de la paroi extérieure</b>	0.45 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>coefficient de déperdition de la paroi intérieure</b>	2 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>coefficient de déperdition du double vitrage</b>	1.9 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>coefficient de déperdition du simple vitrage</b>	5 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>facteur solaire</b>	35%

**Tableau 11 : Données d'entrée de la zone climatique de Meknès.**

Afin de calculer le bilan thermique de la structure, nous avons eu recours au bureau de fluides au sein de NOVEC, qui suivant ses propres méthodes et ses propres programmes de calcul et avec les recommandations de notre encadrant dans le cadre de notre PFE, s'est chargé de faire le calcul de bilan thermique et déterminer des besoins du bâtiment en termes de :

- Equipements de chauffage, de ventilation, de climatisation,

- Consommation électrique des différents matériels de la structure (éclairage, ascenseurs, vidéos de surveillances...)

Donc notre mission était de faire le comparatif entre la consommation énergétique du bâtiment sans et avec isolation qui va nous permettre par la suite d'extraire l'apport de l'efficacité énergétique et voir minutieusement son influence sur les paramètres énergétiques du bâtiment.

Cette comparaison va être portée essentiellement sur 2 volets :

- 1) Analyser l'impact de l'isolation du bâtiment sur le nombre des équipements du chauffage, de climatisation et de la ventilation ainsi que la durée de leur fonction qui est calculée en mois selon les besoins du bâtiment pour en déduire la consommation de puissance électrique annuelle dans chaque état.
- 2) Analyser le rendement du traitement thermique de la structure sur sa consommation électrique annuelle.

✚ **Remarque : On entend par un bâtiment suivant :**

- **Isolation normale :** la structure en béton armé nue sans traitement thermique.
- **Isolation renforcée :** la structure traitée thermiquement selon les solutions proposées précédemment dans la partie Traitement Thermique.

## 2) Bilan thermique :

### a) Définition :

Le calcul d'un bilan thermique permet de connaître avec précision la quantité d'énergie qu'il faudra pour chauffer et refroidir un local, la justesse de ce calcul est primordiale non seulement pour le coût de l'installation, mais aussi pour son exploitation.

Les éléments entrant en compte dans le calcul sont nombreux, il faudra connaître la nature, l'exposition, la surface des murs, des parois vitrées, des plafonds, des sols, ces éléments étant multipliés par des coefficients variables selon l'altitude, le rayonnement solaire, la localisation géographique.

D'autres éléments doivent être pris en compte comme le renouvellement d'air naturel ou mécanique, les divers ponts thermiques ainsi que les apports qui pondéreront le calcul par exemple l'éclairage, l'occupation humaine, les appareils ménagers...etc.

Donc le calcul commence par quantifier les déperditions globales du bâtiment par une spécification des coefficients de déperditions des parois intérieures et extérieures, des vitrages qui sont pondérés selon le taux de l'isolation du bâtiment et en tenant en compte de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Donc ce bilan thermique permet d'évaluer les besoins énergétiques du bâtiment et par conséquence la détermination des équipements nécessaires afin de satisfaire le confort.

### **b) Bilan Thermique du Bâtiment :**

Les locaux visés pour la climatisation et le chauffage dans le Bâtiment AGROPOLIS à Meknès sont :

- L'Accueil au Rez-de-chaussée ;
- Les Espaces Plateaux Bureaux dans tous les étages du Rez-de-chaussée jusqu'au 2<sup>ème</sup> étage (sauf les circulations qui seront déterminées par l'architecte après l'agencement) ;
- Les Salles de Réunion dans les étages ;
- Le Food-Court (Rez-de-Chaussée et Mezzanine) ;
- Le Bureau tabac ;
- Le Guichet Unique ;
- Les locaux de Banque.

Les tableaux ci-dessous présentent les calculs de bilan thermique du bâtiment avec isolation normale et renforcée :

Bilan Thermique			
Etage	Local	Puissance Frigorifique (KWf)	Puissance Frigorifique (KWf)
		Isolation normale	Isolation Renforcée
RDC	B-Tabac	13	11
	FC	40	30
	GU	28	19
	Accueil	45	30
	PBs	60	43
MEZZANINE	FC	45	38
	BC	26	13
	PBs	34	31
ETAGE 1	PBs	170	96
	SR	14	21
ETAGE 2	PBs	170	102
	SR	14	21
ETAGE 3	SR	15	21
	<b>PF totale</b>	<b>674</b>	<b>476</b>

**Tableau 12 : Bilan thermique du bâtiment suivant l'isolation normale et isolation renforcée**

### c) Choix des installations de climatisation/chauffage :

Pour un bâtiment, il est indispensable de définir les équipements utilisés qui permettent d'assurer un confort thermique à l'intérieur du bâtiment, en prévoyant des installations efficaces, conçues en respectant le style architectural et en harmonisant à tout moment la facilité d'usage et d'entretien.

D'après le calcul du bilan thermique du bâtiment, et suite aux recommandations du bureau de fluides à NOVEC, les installations choisies pour répondre aux besoins de chauffage, climatisation et ventilation, en termes de puissance, sont comme suit :

**-Pompe à chaleur air/eau réversible :** Le système "Air / Eau " capte l'énergie de l'air extérieur pour la diffuser à l'intérieur de l'habitation par l'intermédiaire d'un compresseur

avec fluide réfrigérant. Elle est en mode réversible pour produire du chaud l'hiver et du froid l'été, donc elle remplit le rôle du chauffage et climatisation de même.

**-pompe à chaleur air/air réversible** : la pompe à chaleur air-air utilise les calories qu'elle puise dans l'air ambiant et les rejette dans l'habitation. Celle-ci est tout aussi capable de produire de la chaleur pour réchauffer l'intérieur que du froid pour climatiser.

La pompe à chaleur air-air fonctionne avec un fluide frigorigène qui, au contact de l'air ambiant produit du gaz, ce gaz sera ensuite mis sous pression avec un compresseur qui augmentera sa température.

C'est enfin le circuit de chauffage qui transmettra ce gaz chaud pour réchauffer l'intérieur.

**-Ventilo-convecteurs** : Un ventilo-convecteur est un appareil de traitement d'air destiné au refroidissement ou au chauffage de l'air qui le traverse.

L'énergie thermique est apportée au ventilo-convecteur par un fluide (eau ou fluide frigorigène) ou par effet Joule (électricité). L'air porté à la température voulue est soit soufflé directement dans le local à climatiser soit par l'intermédiaire d'un conduit ou d'un réseau de distribution d'air.

**-caisson air neuf** : sont des caissons destinés à l'apport d'air neuf.

**-caisson d'extraction**: sont des caissons destinés à évacuer l'air vicié.

**-bassin** : Le Bassin d'Eau situé à l'entrée extérieure principale du bâtiment est caractérisé par 5 jets d'eau. Il nécessite un local technique enterré proche de son emplacement. Un piquage du regard du compteur général est prévu pour l'alimentation de ce bassin. Son évacuation sera raccordée avec le réseau des eaux usées à travers une sortie vers le réseau d'assainissement extérieur.

Donc chaque appareil a une puissance électrique qui sera multipliée par le nombre des appareils pour avoir une puissance totale qui est après multiplié par la durée de fonctionnement pour avoir l'énergie consommée annuelle.

Choix final des appareils pour le bâtiment isolé:

La Puissance Frigorifique Totale est égale à 476kWf. Dans ce cas on opte pour l'installation de 3 Pompes à Chaleur Réversibles Air/Eau de 155 kWf et de 1 Pompe à Chaleur Réversibles Air/Air de 43 kWf afin d'assurer un bon rapport d'efficacité énergétique et assurer le confort thermique à l'intérieur des locaux.

**3) Comparaison de consommation :**

**a) Consommation électrique des appareils :**

○ *Isolation normale :*

- PAC air/eau Rév :  $3 \times 100(\text{KW}) \times 7(\text{h}) \times 30(\text{jour}) \times 9(\text{mois}) = 567000 \text{ kWh}$
- PAC air/air Rév :  $2 \times 22 \times 7 \times 30 \times 9 = 83160 \text{ kWh}$
- ventilo-convecteur :  $150 \times 0.5 \times 7 \times 30 \times 9 = 141750 \text{ kWh}$
- caisson air neuf :  $4 \times 1 \times 7 \times 30 \times 9 = 7560 \text{ kWh}$
- caisson d'extraction :  $4 \times 1 \times 7 \times 30 \times 12 = 10080 \text{ kWh}$
- bassin :  $1 \times 5 \times 7 \times 30 \times 12 = 12600 \text{ kWh}$

➤ Donc qui donne un total de **822150 KWh/année** ; Donc on trouve un ratio égal à :  $822150/5600 = 146.81 \text{ (KWh/m}^2\text{/an)}$

Equipements	Nombre	Puissance Electrique	
		KW	
PAC Air/Eau Rév	3	100	300
PAC Air/Air Rév	2	22	44
ventilo-Convecteur	150	0,5	75
Caisson Air neuf	4	1	4
Caisson d'Extraction	4	1	4
Bassin	1	5	5
<b>Puissance électrique totale (KW)</b>		<b>432</b>	

Durée De Fonctionnement	Consommation E. Annuelle
Mois	KWh
9	567000
9	83160
9	141750
9	7560
12	10080
12	12600
	<b>822150</b>
<b>Ratio OPT (KWh/m<sup>2</sup>/an)</b>	<b>146,81</b>

**Tableau 13 : Bilan de consommation des appareils du bâtiment suivant l'isolation normale.**

○ *Isolation renforcée :*

En tenant compte de l'isolation thermique du Bâtiment (l'introduction des dispositions d'isolation), le bureau de fluides a intégré ses éléments pour recalculer la puissance électrique produite par les appareils de climatisation/chauffage. Les calculs sont présentés comme suit :

Equipements	Nombre	Puissance Electrique		Durée De Fonctionnement	Consommation E. Annuelle
		KW		mois	KWh
PAC Air/Eau Rév	3	55	165	8	213840
PAC Air/Air Rév	1	22	22	7	12936
ventilo-Convecteur	105	0,5	52,5	8	68040
Caisson Air neuf	4	1	4	8	5184
Caisson d'Extraction	4	1	4	12	8064
Bassin	1	5	5	12	10080
<b>Puissance électrique totale (KW)</b>			<b>252,5</b>		<b>318144</b>
<b>Ratio OPT (KWh/m<sup>2</sup>/an)</b>					<b>56,81</b>

**Tableau 14 : bilan de consommation des appareils du bâtiment suivant l'isolation renforcée.**

Comme la montre le tableau ci-dessus, on constate qu'après l'isolation du bâtiment

- le nombre de quelques équipements a diminué à savoir : au lieu de 2 PAC air/air Rév on a juste besoin de 1 et le nombre des ventilo-convecteurs a passé de 150 à 105.
- la durée de fonction a diminué : on a gagné un mois de fonction pour le PAC air/eau Rév, 2 mois pour le PAC air/air Rév, et 1 mois pour les ventilo-convecteurs et les caissons air neuf.
- De même pour la durée de fonctionnement par jour qui est devenue inférieure à 7 h pour tous les équipements :
  - ✓ 5.4 h pour le PAC air/eau Rév
  - ✓ 2.8 h pour le PAC air/air Rév
  - ✓ 5.4 h pour le ventilo-convecteur

- ✓ 5.4 h pour le caisson air neuf
- ✓ 5.6 h pour le caisson extraction
- ✓ 5.6 h pour bassin

Donc on a une consommation en énergie annuelle de : **318144 KWh/an**

On trouve un ratio égal à  $318144/5600 = 56.81 \text{ KWh/m}^2/\text{an}$

Donc l'isolation du bâtiment nous a économisé un pourcentage d'énergie par rapport à l'énergie consommée sans isolation égal à :

$$\pm (822150 - 318144)/822150 = 61.3\% \text{ sur l'année.}$$

**b) Bilans de puissances électriques:**

○ *Isolation normale :*

Pour le bâtiment non isolé, on représente l'inventaire de tous les équipements électriques avec chacun sa consommation en énergie ainsi que la puissance consommée par les locaux du bâtiment, selon leur utilisation, pour tous les étages. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	RDC	MEZZ	NIV 01	NIV 02	NIV 03	Total	Puissance Electrique (Kva)	Eclairage	ASC	SSI, Vidéo,GT B
<b>Sanitaires</b>	49.00	39.00	68.00	68.00	37.00	261.00	3.92	3053.70		
<b>Bureaux</b>	688.00	491.50	1062.50	1062.50	155.00	3459.50	121.08	14711.52		
<b>Restaurant</b>	295.00	263.00				558.00	19.53	1757.70		
<b>Poste</b>	20.00					20.00	0.70	7.20		
<b>Locaux Techniques</b>	28.50	22.00	12.50	12.50	3.50	79.00	2.77	56.88		
<b>Hall / Escalier/ Circulation</b>	200.50	88.00	110.50	110.50	174.00	683.50	10.25	5167.26	25200.00	61320.00
<b>Sous-Total</b>	<b>1281.00</b>	<b>903.50</b>	<b>1253.50</b>	<b>1253.50</b>	<b>369.50</b>	<b>5061.00</b>	<b>158.25</b>	<b>24754.26</b>	<b>25200.00</b>	<b>61320.00</b>
								<b>5.70</b>	<b>5.81</b>	<b>14.13</b>
								<b>5.13</b>	<b>4.18</b>	<b>10.17</b>

Puissance Eclairage & PC (KVA)	158.25
Equipements De Climatisation & Plomberie(KVA)	540
Sèche Main	16
SSI (KVA)	2
Vidéo Surveillance (KVA)	3
GTB (KVA)	2
Ascenseur (KVA)	25
Porte Automatique (KVA)	1
Total Puissance N/S (KVA)	747.25
Transformateur Choisi	1 Poste De 800 KVA

Tableau 15 : Bilan de puissance totale en KVA du bâtiment sans isolation.

Donc en résumé, concernant le volet qui nous intéresse, on trouve que :

- La puissance électrique des équipements de climatisation et plomberie sans isolation de la structure est égale à 540 KVA.
- **Le total des puissances** si on y ajout celles des autres équipements à savoir : l'éclairage et les PC, sèche main, système de sécurité incendie, vidéos de surveillance, gestion technique du bâtiment, ascenseur et finalement les portes automatiques : **747.25 KVA**

○ *Isolation renforcée :*

Après l'isolation du bâtiment, on va voir cela a eu un impact sur la puissance électrique consommée par les équipements de climatisation et plomberie et cela figure comme suit :

	RDC	MEZZ	NIV 01	NIV 02	NIV 03	Total	Puissance Electrique (Kva)	Eclairage	ASC	SSI, Vidéo,GT B
Sanitaires	49.00	39.00	68.00	68.00	37.00	261.00	3.92	3053.70		
Bureaux	688.00	491.50	1062.50	1062.50	155.00	3459.50	121.08	14711.52		
Restaurant	295.00	263.00				558.00	19.53	1757.70		
Poste	20.00					20.00	0.70	7.20		
Locaux Techniques	28.50	22.00	12.50	12.50	3.50	79.00	2.77	56.88		
Hall / Escalier/ Circulation	200.50	88.00	110.50	110.50	174.00	683.50	10.25	5167.26	25200.00	61320.00
Sous-Total	<b>1281.00</b>	<b>903.50</b>	<b>1253.50</b>	<b>1253.50</b>	<b>369.50</b>	<b>5061.00</b>	<b>158.25</b>	<b>24754.26</b>	<b>25200.00</b>	<b>61320.00</b>
								<b>5.70</b>	<b>5.81</b>	<b>14.13</b>
								<b>5.13</b>	<b>4.18</b>	<b>10.17</b>

Puissance Eclairage & PC (KVA)	<b>158.25</b>
Equipements De Climatisation & Plomberie (KVA)	<b>315.625</b>
Sèche Main	<b>16</b>
SSI (KVA)	<b>2</b>
Vidéo Surveillance (KVA)	<b>3</b>
GTB (KVA)	<b>2</b>
Ascenseur (KVA)	<b>25</b>
Porte Automatique (KVA)	<b>1</b>
Total Puissance N/S (KVA)	<b>522.875</b>
Transformateur Choisi	<b>1 Poste de 630 KVA</b>

Tableau 16 : Bilan de puissance totale en KVA du bâtiment avec isolation.

La puissance des appareils est passée de 540 KVA à 315.625 KVA, ce qui donne un **total de puissance N/S** suivant l'isolation renforcée de **522.875 KVA**.

D'une manière plus concrète, nous avons pu gagner un pourcentage de la consommation initiale (sans traitement thermique) qui est égal à :

○  $(747.25-522.875)/747.25=30.02\%$

**c) Comparatif de consommation totale du bâtiment :**

Consommation	Bâtiment Isolation Normale	Bâtiment Isolation Renforcée
Chauffage, climatisation et ventilation	146.81	56.84
Eclairage	5.13	5.13
Ascenseurs	4.18	4.18
SSI, Vidéo surveillances, GTB	10.17	10.17
<b>Total en KWh/m<sup>2</sup>/an</b>	<b>166.29</b>	<b>76.32</b>

**Tableau 17 : Comparatif de consommation totale du bâtiment.**

- Le pourcentage d'économie sur la consommation totale annuelle est de :
  - $(166.29-76.32)/166.29=54.10\%$  (plus que la moitié de la puissance consommée).
- En termes de prix, si on prend que 1KWh fait en moyenne 1DH (prix moyen estimatif) donc on économise sur une seule année :
  - $(166.29-76.32)*1=89.97 *1(dh)=89.97 \text{ DH/m}^2$

Ce qui fait un total de :  $89.97*5600= 503832 \text{ DH/an}$

**4) Estimatif du cout :**

**a) Surcoût de la structure :**

Le tableau ci-dessous présente le coût des différents lots qui sont concernés par le traitement thermique du bâtiment afin de mettre en évidence la différence de prix engendrée par l'isolation renforcée du bâtiment :

		Récapitulatif Isolation Normale		Récapitulatif Isolation Renforcée	
N°	LOT	MONTANT HT (DH)	RATIO/ m <sup>2</sup>	MONTANT HT (DH)	RATIO/ m <sup>2</sup>
1	Gros-Œuvre	6049450	1080,26	6182050	1103,94
2	Étanchéité	399231	71,29	522891	93,37
3	Menuiserie / Aluminium	5575903	995,70	7323750	1307,81
<b>Total Général HT</b>		12024584	2147,25	14028691	2505,12
<b>TVA 20%</b>		2404916,8	429,45	2805738,2	501,02
<b>Total Général</b>		<b>14429500,8</b>	<b>2576,70</b>	<b>16834429,2</b>	<b>3006,15</b>
<b>Surface Hors Œuvres</b>		5600 m <sup>2</sup>		5600 m <sup>2</sup>	

**Tableau 18 : Récapitulatif des prix du bâtiment suivant l'isolation normale et renforcée.**

En comparant les prix ci-dessus on peut en sortir le surcoût consommé par le traitement thermique :

Le traitement thermique de la structure va coûter un montant estimé à :

$$\text{Surcoût} = 14429500,8 - 16834429 = \mathbf{2404928,4 \text{ DH}}$$

En résumé, on investit au terme de l'efficacité énergétique un montant moyen de :

$$2404928,4 / 5600 = \mathbf{429.45 \text{ DH/m}^2} ;$$

Face à un gain sur le plan de la facture électrique annuelle égal à 503832 DH (*calculé précédemment*).

### **b) Taux de retour sur investissement :**

Afin de mesurer la rentabilité de cet investissement, on calcule le taux de retour sur investissement comme indiqué par la suite :

➤ On a  $2404928,4 / 503832 = \mathbf{4.77 \text{ ans (5 ans)}}$ .

Donc le montant investi va être récupéré dans une durée de 5 ans approximativement où le profit va commencer avec un gain annuel de 503832 DH qui donne un taux de retour sur

investissement égal à 20.94% sur l'année réalisant une marge égale à 5 038 320 DH sur les 10 ans qui suivent les 5 ans de remboursement du surcoût du bâtiment.

Donc la rentabilité de l'efficacité énergétique a autant d'impact économique que sur l'environnement où les ressources d'énergie s'épuisent de plus en plus et où l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre ne cesse de menacer les changements climatiques. D'où un engagement sérieux dans l'optimisation des besoins énergétiques se montre urgent.

Finalement, nous incitons tous les intervenants dans la promotion immobilière à l'utilisation de cette approche de conception thermique qui ne peut qu'améliorer la performance énergétique du bâtiment.

## VIII. Conclusion :

L'objectif de notre travail consiste à évaluer l'intérêt de l'optimisation de la consommation énergétique d'un bâtiment tertiaire et aussi de montrer l'impact de cette optimisation sur la nette amélioration de la rentabilité financière du projet. Cette étude rentre dans le cadre d'une politique d'efficacité énergétique menée par l'organisme NOVEC pour mettre en œuvre des ouvrages respectant l'environnement. La politique d'efficacité énergétique n'est plus une simple exigence technique mais une priorité nationale qui vise la mise en place d'une stratégie de mobilisation et de sensibilisation de tous les acteurs du domaine du BTP aux mesures de développement durable et d'efficacité énergétique dans les bâtiments pour alléger la consommation énergétique de ce secteur de 1,2 Mtep/an à l'horizon 2020 et pour réduire les émissions des gaz à effet de serre d'environ 4,5 MTECO<sub>2</sub>.

Donc notre projet est une illustration de cette démarche sur un cas de plateaux de bureau afin d'évaluer l'apport de l'efficacité énergétique sur la réduction de la consommation du bâtiment tout en mettant en évidence le rapport de l'investissement prévisionnel sur le bénéfice accumulé sur une durée de 15 ans. Le rapport a démontré qu'après une période de moins de 5 ans de couverture du surcoût dû au traitement thermique, l'économie réalisée sur 10 ans atteint un montant de 5 038 320 DH.

C'est ainsi que notre projet de fin d'études nous a permis d'approfondir nos connaissances académiques surtout pour les logiciels de calcul de structure et de plus les étendre vers un autre aspect qui dépasse la conception et le dimensionnement classique pour le combiner à la dimension énergétique du projet.

Donc le métier d'ingénieur ne se limite pas dans le calcul, c'est un esprit qui doit chercher chaque jour les nouveautés qui régissent son domaine et d'essayer d'adapter ses produits aux changements de son environnement en prenant en considération le coté économique.

En résumé, nous avons commencé par la conception et le dimensionnement de la structure par un calcul statique et dynamique, suivi de spécification des dispositions thermiques qui visent la réduction des déperditions et la favorisation des apports naturels tout en assurant le confort intérieur. Et cela nous a permis de :

Réduire les besoins de chauffage et de climatisations du bâtiment ;

- Améliorer le confort ;
- Réduire la puissance des équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation à installer ;
- Réduire la facture électrique du bâtiment ;
- Participer à la préservation de l'énergie ;
- Réduire les émissions des gaz à effet de serre

Cette expérience nous a permis de même de mûrir notre esprit innovateur en tant que débutantes sur le domaine de l'ingénierie qui nous incite à trouver toujours des compromis qui améliorent le rendement de nos réalisations dans les constructions et s'ouvrir vers l'étranger en essayant d'aller vers ce qui est mieux et moins cher.

Une fois de plus, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à l'élaboration de ce projet.

## IX. Bibliographie & Webographie :

- Designing and Building with UHPFRC : State of the Art and Development:

Apport des BFUP dans le traitement des ponts thermiques:

Burckel\_Jacques\_Heintz\_Daliphard\_Behloul\_Blrault ( Engineers)

- Les éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc par ADEREE & Zonage Climatique Du Maroc Destiné à La Règlementation De Thermique Du Bâtiment : Equipe d'ADEREE et Experts Internationaux.

- La thermique du bâtiment : Marc Delorme ;
- Manuel de bâtiment : efficacité énergétique et énergies renouvelables ;
- RPS 2000 Et Règles de BAEL (Pré-dimensionnement de la structure) ;

- **Sites internet :**

- [www.toutsurlisolation.com](http://www.toutsurlisolation.com)

- [www.construire-durable.com](http://www.construire-durable.com)

- [isolation.comprendrechoisir.com](http://isolation.comprendrechoisir.com)

- [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com)

- <http://www.voseconomiesdenergie.fr>

- [www.pompeachaleur.org](http://www.pompeachaleur.org)

- Manuel : conception BBC bâtiment passif

- <http://www.maison.com/architecture/maison-basse->

[consommation/bibliotheque-materiaux-construction-4818/](http://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation/bibliotheque-materiaux-construction-4818/)

- Anciens P.F.E ;

# ANNEXES