

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draïa Adrar

Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire De Magister
Spécialité : Physique Energétique
Option : Modélisation et Simulation en Energétique

Présenté par : BENDARA Smail

Thème

**L'Apport de l'Indice de Compacité sur les Températures
Intérieures d'une Habitation Multizone**

Devant le jury d'examen

Président :

BENATIALLAH Ali

Professeur à l'Université Ahmed Draïa-Adrar

Directeur du mémoire :

**BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine maître de Recherche A à l'URAER
Ghardaïa**

Examineurs :

HAMOUDA Messaoud

Professeur à l'Université Ahmed Draïa-Adrar

BENOUAZ Tayeb

Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen

BENTOUBA Said

Maître de Conférences A à l'Université Ahmed Draïa-

Adrar

Co-encadreur :

OMARI Boumedien

Maître Assistant à l'Université Ahmed Draïa-Adrar

Année Universitaire 2014 ~ 2015

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mon père ;

Ma mère ;

Mes frères ;

Ma femme et mes enfants.

Tous mes amis et collègues ;

Tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Avant tout je remercie mon grand dieu qui m'a donné la volonté et le puissant pour parachèvement ce travail.

*Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa sous la direction de Monsieur **BEKKOUCHE Sidi Mohamed El Amine Maître de recherche A** à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa. Qu'il veuille trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude.*

*J'exprime aussi ma vive reconnaissance à Monsieur **OMARI Boumediene maitre assistant** à l'Université Ahmed Draïa Adrar pour avoir co-encadré ce travail.*

*Je remercie également Monsieur **BENATIALLAH Ali, Professeur** à l'Université Ahmed Draïa-Adrar pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.*

*Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur **HAMOUDA Messaoud, Professeur** et Directeur de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar, Monsieur **BENOUAZ Tayeb, Professeur** à l'Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, et Monsieur **BENTOUBA Said, Maître de conférence A** à l'Université Ahmed Draïa-Adrar, de m'avoir font l'honneur de participer à mon jury de mémoire.*

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de réaliser ce travail, en particuliers :

À toute l'équipe de l'Architecture Solaire et Bioclimatique à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa.

À toute les personnelles de l'inspection des impôts garantie assiette de la wilaya de Ghardaïa pour leurs collaboration.

Enfin, je ne saurais oublier ma mère et mon frère pour leurs encouragement combien efficaces et précieux.

Table des Matières

1. Introduction générale.....	01
2. Chapitre 1 : Physique du Bâtiment & Rappels et Généralités.....	04
2.1. Introduction.....	05
2.2. Concepts de bâtiments performants.....	06
2.2.1. Typologie des bâtiments performants.....	06
2.2.2. Critères d'évaluation propres aux bâtiments performants.....	07
2.3. Capacité thermique.....	08
2.4. Modes de transfert de chaleur.....	08
2.5. Déperditions à travers l'enveloppe ($U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât-réf}}$).....	09
2.6. Matériaux d'isolation.....	12
2.7. Application des isolants thermiques.....	13
2.7.1. Parois homogènes.....	13
2.7.2. Dalles toitures.....	13
2.7.3. Toitures inversées.....	14
2.7.4. Toitures et parois ventilées.....	14
2.7.5. Isolation entre deux parois.....	14
2.7.6. Dalles planchers.....	15
2.7.7. Éléments d'enveloppe légers.....	16
2.7.8. Isolation extérieure compacte.....	16
2.7.9. Isolation transparente.....	17
2.7.10. Comment éviter les ponts thermiques ?	17
2.8. Apports d'énergie solaire et gains internes.....	19
2.8.1. Principe du captage solaire passif.....	19
2.8.2. Calcul des gains solaires passifs.....	20
2.8.3. Gains internes.....	22
2.9. Références.....	24
3. Chapitre 2 : Rayonnement Solaire et Modélisation Mathématique Multizone.....	25
3.1. Introduction.....	26
3.2. Nature du rayonnement solaire.....	26
3.3. Grandeurs géo-astronomiques.....	27
3.4. Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre.....	27
3.5. Grandeurs pour le repérage du soleil.....	28
3.5.1. Repère équatorial.....	28
3.5.2. Repère horizontal.....	29

3.6.	Approches pour l'estimation du rayonnement solaire.....	29
3.6.1.	Modèles empiriques.....	29
3.6.2.	Méthodes physiques ou analytiques.....	30
3.6.3.	Méthodes statistiques.....	31
3.6.4.	Méthodes stochastiques.....	31
3.7.	Etude du trouble atmosphérique.....	33
3.7.1.	Modèle de Perrin de Brichambaut - Capderou.....	33
3.7.2.	Modèle de Kasten.....	34
3.8.	Modélisation du système thermique.....	35
3.8.1.	Analyse nodale & échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels	35
3.8.2.	Structure nodale et description de l'habitat.....	38
3.9.	Références.....	44

4. Chapitre 3 : Contribution de la Compacité à l'Amélioration des Températures Intérieures d'une Habitation Multizone 45

4.1.	Introduction.....	46
4.2.	Isolation thermique : solution technique pouvant être apportée à l'enveloppe du bâtiment	47
4.3.	Méthodes de modélisation énergétique.....	48
4.3.1.	Modèle de Givoni.....	48
4.3.2.	Modèle de plan d'expériences.....	49
4.3.3.	Modèles de connaissance.....	49
4.4.	Situation, climat et potentiel solaire de Ghardaïa.....	51
4.5.	Mise en œuvre numérique et discussion des résultats.....	52
4.5.1.	Estimation des éclairagements solaires incidents.....	53
4.5.2.	Température ambiante extérieure et vitesse du vent.....	55
4.5.3.	Simulation des températures multizones.....	56
4.5.4.	Variation de la compacité : agrandissement du plan.....	59
4.5.5.	Variation de la compacité par rapport au mode de contact à forme et volume constants	60
4.6.	Conclusion.....	62
4.7.	Références.....	63

5. Chapitre 4 : Etude de la Compacité et Simulation Numérique par TRNSYS 16 66

5.1.	Introduction.....	67
5.2.	Qu'est ce que TRNSYS.....	67

5.3.	Choix de TRNSYS.....	68
5.3.1.	Données introduites.....	70
5.3.2.	Résultats.....	71
5.3.3.	Avantage.....	71
5.3.4.	Inconvénients.....	71
5.4.	Transferts thermiques dans TRNSYS.....	71
5.5.	Simulation numérique par TRNSYS 16.....	73
5.5.1.	Température ambiante et vitesse du vent.....	74
5.5.2.	Energies solaires incidentes.....	75
5.5.3.	Cas de trois cellules en ligne orientées en plein sud.....	76
5.5.4.	Cas de six cellules groupées selon deux lignes orientées en plein sud...	77
5.5.5.	Vers quel mode de contact dois-je m'orienter ?.....	78
5.5.6.	Vers quelle forme simple dois-je m'orienter ?.....	80
5.6.	Conclusion.....	81
5.7.	Références.....	83
6.	Conclusion générale.....	85

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

A l'instar des autres pays du monde, les changements climatiques ont introduit des défis majeurs pour l'Algérie. Le secteur du bâtiment est, parmi les secteurs économiques, le plus gros consommateur en énergie. Les récentes statistiques de consommation d'énergie en Algérie indiquent que la demande d'énergie et la consommation annuelle d'énergie ont considérablement augmenté. Le bâtiment, notamment le secteur résidentiel, a le plus grand impact sur cette croissance. Dans l'avenir, il est prévu que la consommation d'énergie dans le secteur public est susceptible d'augmenter considérablement. Les bâtiments publics sont non seulement de gros consommateurs d'énergie, mais également contribuent énormément à l'émission de CO₂. Cependant, ces bâtiments offrent le plus grand potentiel pour la conservation d'énergie. Grâce à une conception informée du bâti [1].

Dans la conception de bâtiment performant (au sens énergétique), outre la nécessité de proposer des équipements plus efficaces et moins énergivores, il est primordial de maîtriser les échanges thermiques au travers de l'enveloppe. Le bilan énergétique résulte d'un équilibre entre les gains et les pertes thermiques, entre l'enveloppe et ses environnements (intérieur et extérieur). La conception d'enveloppes, capables de valoriser les gains énergétiques gratuits tout en limitant les pertes, doit contribuer à diminuer les besoins énergétiques sans nuire au confort intérieur. L'enveloppe devient alors un véritable échangeur thermique qu'il est possible de gérer et d'adapter aux environnements intérieur et extérieur. La diminution des besoins énergétiques, comme le confort thermique intérieur, passe par une adaptabilité de l'enveloppe aux contraintes climatiques. Le recours aux éléments actifs est alors réduit et les énergies disponibles localement sont mieux utilisées [2].

La compacité c'est l'une des principaux points à mettre en œuvre en vue d'une conception énergétiquement efficace. Elle est généralement une règle en architecture bioclimatique car elle permet de limiter les surfaces déperditives ou soumises à un éclairage solaire important [2]. Les études sur la compacité des bâtiments résultent non seulement de la recherche d'économie d'énergie à long terme mais également de la limitation simultanée des investissements grâce à la diminution des surfaces des parois d'échange extérieures. La compacité résulte de notions de géométrie utilisées pour maximiser le volume intérieur d'un contenant en fonction de sa forme. La notion de volume ou de masse du contenu correspond à des besoins alors que la forme du contenant ne résulte que de choix subjectifs, techniques ou économiques. Cette notion est fondamentale pour minimiser les coûts de packaging, de stockage ou de transport. La notion d'économie implique que pour un contenu de volume fixé, V , la surface du matériau constituant les parois du contenant, S_p , soit la plus petite possible [3].

L'objectif de ce travail est de contribuer au développement de bâtiments économes. Le but est la proposition d'un modèle mathématique de transfert de chaleur à l'intérieur d'un espace multizone. Ce modèle sera basé sur les approches multizones existantes, destinés pour la description du comportement des températures intérieures d'un habitat. Dans le deuxième objectif, nous cherchons à limiter la surface d'échange par rapport au volume intérieur de l'habitat. Rien de bien compliqué derrière ce concept de compacité. La performance thermique d'une maison passe donc par la connaissance de son coefficient de forme qui révèle la compacité du bâtiment. Cet indice est le rapport entre la surface de l'enveloppe en contact avec l'extérieur et le volume du bâtiment. La compacité est un critère d'évaluation thermique intéressant mais délicat à appliquer car il dépend de plusieurs facteurs. La forme de chaque construction est l'élément essentiel du calcul du facteur de compacité dont l'objectif doit uniquement rester l'orientation des concepteurs vers les solutions à privilégier. Ce mémoire s'adresse aussi aux scientifiques et architectes praticiens en souhaitant d'apporter des connaissances et des outils de travail simples et performants qui leur permettront d'intégrer dès la conception du projet les meilleures formes géométriques et modes de contact de la future construction.

Dans le premier chapitre, nous présentons un rappel sur quelques concepts des bâtiments performants et nous définissons aussi les apports d'énergie solaire et les gains internes.

Le second chapitre est consacré à une étude théorique détaillée en effectuant une modélisation mathématique d'un habitat multizone. A cet égard, il nous a paru indispensable d'estimer d'abord les éclaircissements incidents sur les différents murs de l'habitat.

Le troisième chapitre est une plateforme de simulation numérique des températures en période estivale et hivernale. Nous intéressons à la variation de la compacité par rapport au volume à forme constante et par rapport au mode de contact à forme et à volume constants.

Dans le dernier chapitre, sur la base de calcul des températures, on verra dans quelle mesure on pourra voir la variation de la compacité en utilisant cette fois-ci l'environnement de simulation TRNSYS 16.

Finalement, une conclusion générale terminera notre mémoire.

Références

[01] : Optimisation de la conception des bâtiments en Algérie en vue d'améliorer leur performance énergétique : Vers une approche énergétique positive, projet PNR Code: UN47/10/04.

[02] : Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, Energétique du Bâtiment, Section de Génie Civil, 4^{ème}/5^{ème} année, Ecole Polytechnique, Fédérale de Lausanne, Faculté d'Environnement Naturel, Septembre 2008

[03] : <http://passivact.com/Infos/InfosConcepts/files/CompaciteBatiment-Consequences.html>

Chapitre 1

Physique du Bâtiment & Rappels et Généralités

CHAPITRE 1

PHYSIQUE DU BATIMENT & RAPPELS ET GENERALITES

1.1. Introduction

Dans un contexte de raréfaction des ressources énergétiques et d'objectifs de diminution par des émissions de gaz à effet de serre, le problème posé aux acteurs de l'industrie du bâtiment est d'élaborer des concepts de bâtiments à forte efficacité énergétique et de disposer des outils d'ingénierie capables de les évaluer. De nombreuses études et retours d'expériences montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports d'énergie passifs [1].

Un bâtiment doit permettre une réduction des pertes énergétiques lorsque le chauffage ou la climatisation des locaux est nécessaire et une atténuation des variations de température extérieure. Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments, doivent donc posséder les qualités thermiques qui les feront réagir d'une façon satisfaisante à différentes sollicitations. Ces sollicitations varient constamment en intensité et en durée, elles entraînent des échanges d'énergie entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments [2]. Les échanges d'énergie à travers les matériaux peuvent prendre plusieurs formes :

- le rayonnement (énergie traversant une matière solide transparente à ce rayonnement ou traversant un gaz inerte),
- la convection (dissipation par un mouvement de gaz),
- la conduction (dissipation par la matière solide ou par un gaz inerte).

D'autres paramètres peuvent conditionner le comportement thermique d'un bâtiment :

- son implantation,
- son orientation,
- son inertie.

Aujourd'hui au niveau mondial, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie, il représente 40% de l'énergie totale en Europe. Généralement, les normes fixent des valeurs maximales pour les besoins annuels en énergie primaire par unité de surface chauffée et par unité de volume chauffé, et pour la quantité de chaleur perdue par unité de surface d'enveloppe du bâtiment. Toutes ces valeurs seuils dépendent de la compacité du bâtiment [3].

1.2. Concepts de bâtiments performants

Un concept de bâtiment performant est défini par un ensemble d'objectifs et de solutions techniques destinés à guider le concepteur. Ce dernier, en s'appuyant sur divers outils d'aide à la conception, associe des techniques, matériaux, structures et équipements de manière à atteindre au mieux les objectifs fixés. Enfin, après la mise en service du bâtiment, une phase d'évaluation permet au concepteur et au maître d'ouvrage de quantifier les performances réelles du bâtiment et de les comparer aux objectifs originaux. Dans cette partie, l'analyse de différentes définitions et dénominations rencontrées dans la littérature amène à proposer une typologie des principaux concepts de bâtiments performants et à en identifier les principales caractéristiques.

1.2.1. Typologie des bâtiments performants

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Ils sont alors associés à un cahier des charges décrivant leurs objectifs ou à une méthode d'évaluation de leur niveau de performance. Leurs dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment.

Les concepts purement énergétiques accompagnent des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments et incitent à l'intégration de sources d'énergies renouvelables au bâtiment. Pour ces approches, les critères évalués sont peu nombreux, bien définis et quantifiables ce qui facilite l'identification des concepts sous-jacents. Ceux qui ont été identifiés sont les suivants :

- **Le bâtiment à basse consommation ou " basse énergie "**

Ce bâtiment se caractérise par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standards. Ce premier niveau de performance peut être atteint par l'optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs. Ce concept ne comprend à priori aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure.

- **Le bâtiment " passif "**

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation.

▪ **Le bâtiment " producteur d'énergie "**

Il est doté de moyens de production d'énergie locaux. Cependant, cette dénomination ne spécifie ni le niveau de consommation ni la part de cette consommation couverte par la production ni même la nature de l'énergie produite. Il s'agit donc plus d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept de bâtiment à proprement parler. L'expression bâtiment producteur d'énergie est néanmoins parfois employée pour désigner un " bâtiment à énergie positive ".

▪ **Le bâtiment " zéro énergie " ou " zéro net "**

Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul.

▪ **Le bâtiment " à énergie positive "**

Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau " zéro énergie " : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique.

▪ **Le bâtiment autonome**

Un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux.

1.2.2. Critères d'évaluation propres aux bâtiments performants

Il apparaît une forte convergence des concepts autour de quelques caractéristiques principales telles que :

- **le besoin énergétique annuel de chauffage**, rapporté à une surface, généralement la surface chauffée
- **la consommation d'énergie**, également par unité de surface, pouvant inclure le chauffage, mais aussi l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, la ventilation, les auxiliaires, voire les autres usages de l'électricité, cet indicateur étant le plus souvent exprimé en énergie primaire
- **la production** d'énergie à partir de ressources renouvelables

Les concepts diffèrent surtout par les niveaux d'exigence de chacun d'eux vis-à-vis de ces caractéristiques. Ces niveaux d'exigence constituent des critères permettant de vérifier si les objectifs du concept sont atteints. Quelques caractéristiques secondaires peuvent s'ajouter aux précédentes, telles que :

- **l'étanchéité** du bâtiment à l'air
- les **performances** des équipements et des matériaux mis en œuvre
- des éléments non énergétiques, tels que la nature des matériaux (naturelle ou synthétique), le surcoût de la construction, les émissions de CO₂, le niveau de confort thermique etc.

Tous les concepts présentés dans cette partie convergent autour de quelques critères simples visant à l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment, à la valorisation des ressources énergétiques locales ou à l'intégration de préoccupations environnementales ou économiques [2].

1.3. Capacité thermique

La chaleur est l'énergie liée à l'agitation aléatoire des molécules constituant la matière. Cette agitation se mesure par la température, et la chaleur par l'augmentation de température obtenue dans un matériau donné. Pour chauffer une masse m [kg] d'un matériau de chaleur spécifique c [J/kg K], de la différence de température $\Delta\theta$ [K], il faut une quantité de chaleur Q [J] donnée par l'expression ci-dessous:

$$Q = m c \Delta\theta \quad (1)$$

1.4. Modes de transfert de chaleur

La chaleur passe naturellement de zones chaudes aux zones froides, en utilisant essentiellement trois modes de transport:

- La conduction, qui est la transmission de proche en proche de l'agitation moléculaire par chocs entre molécules;
- La convection, transport de chaleur par transport (naturel ou forcé) de matières chaudes vers une zone froide ou vice versa;
- Le rayonnement, ou transport de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique par les surfaces des corps;

Le transfert de chaleur implique un flux de chaleur (en Watt) qui exprime la quantité d'énergie passant chaque seconde au travers d'une surface quelconque, ou, localement, une densité de flux de chaleur (en W/m²) qui exprime la quantité d'énergie transmise chaque seconde au travers d'une surface unité.

Les modèles mathématiques utilisés pour décrire le transfert de chaleur dans le bâtiment sont décrits dans les chapitres où ils sont utilisés.

1.5. Déperditions à travers l'enveloppe ($U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât-réf}}$)

Un bâtiment résidentiel ou non résidentiel devra satisfaire aux trois exigences suivantes :

1- Sa consommation conventionnelle d'énergie devra être inférieure ou égale à une consommation d'énergie de référence calculée en fonction de caractéristiques thermiques de référence (isolation, chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation) et, pour les bâtiments tertiaires, à l'éclairage :

$$C \leq C_{\text{ref}} \quad (2)$$

2- En période estivale, sa température intérieure conventionnelle maximale devra être inférieure ou égale à une température intérieure de référence calculée à partir de caractéristiques thermiques de référence (protections solaires, possibilité d'ouvrir les fenêtres, ...):

$$T \leq T_{\text{ref}} \quad (3)$$

3 - Les caractéristiques de l'isolation thermique des parois, et des équipements de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de climatisation et les protections solaires doivent présenter des performances minimales.

La validation de ces trois exigences peut se faire soit par calcul à l'aide d'un logiciel dont le cœur de programme a été développé par le CSTB (méthode destinée aux professionnels avertis), soit sans calcul par le biais de solutions techniques validées par le ministère et réputées respecter la réglementation thermique (méthode destinée aux artisans et particuliers).

Le calcul de la consommation d'énergie passe par un calcul préalable :

- Des déperditions à travers l'enveloppe du bâtiment, calculées en fonction d'un coefficient de transmission surfacique moyen. Ce coefficient s'appelle $U_{\text{bât}}$ et sa valeur de référence nommée coefficient $U_{\text{bât-réf}}$ est calculée en fonction de caractéristiques thermiques de référence;
- Des apports solaires à travers les parois vitrées, transparentes ou translucides, calculés notamment en fonction du facteur solaire de ces parois.

Le calcul de la température intérieure s'effectue en fonction de l'inertie et des caractéristiques thermiques et énergétiques des parois opaques et transparentes. Le coefficient $U_{\text{bât}}$ est le coefficient moyen de déperdition par transmission à travers les parois et les baies du bâtiment, il s'exprime en $W/(m^2.K)$ et se calcule d'après la formule suivante :

$$U_{\text{bât}} = \frac{H_T}{A_T} \quad (4)$$

Où

A_T : est la surface intérieure totale des parois qui séparent l'espace chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés, en m^2 .

H_T : est le coefficient de déperdition par transmission entre l'espace chauffé d'une part et l'extérieur, le sol et les locaux non chauffés d'autre part. Il se calcule par la formule suivante :

$$H_T = H_D + H_S + H_U \quad (5)$$

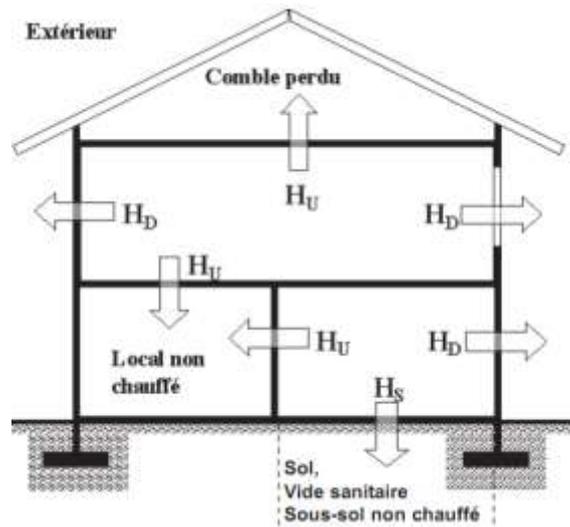


Figure 1: coefficient de déperdition par transmission à travers les parois

H_D : est le coefficient de déperdition par transmission à travers les parois donnant directement sur l'extérieur, en W/K .

H_S : est le coefficient de déperdition par transmission à travers les parois en contact direct avec le sol ou donnant sur un vide sanitaire ou sur un sous-sol non chauffé, en W/K .

H_U : est le coefficient de déperdition par transmission à travers les parois donnant sur des locaux non chauffés (à l'exception des sous-sols et des vides sanitaires), en W/K .

$U_{\text{bât-réf}}$ est un coefficient de référence pour $U_{\text{bât}}$, appelé "coefficient moyen de référence de déperdition par les parois et les baies du bâtiment".

Il permet de situer la déperdition par transmission à travers l'enveloppe par rapport à une valeur de référence calculée en fonction de caractéristiques thermiques de référence des composants d'enveloppe. Le mode de calcul de $U_{\text{bât-réf}}$ est similaire à celui de $U_{\text{bât}}$. Il s'effectue en fonction de coefficients de références, pondérés par les caractéristiques géométriques réelles du bâtiment.

$$U_{\text{bât - réf}} = \frac{a_1 A_1 + a_2 A_2 + a_3 A_3 + a_4 A_4 + a_5 A_5 + a_6 A_6 + a_7 A_7 + a_8 L_8 + a_9 L_9 + a_{10} L_{10}}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7} \quad (6)$$

On distingue dans cette formule les coefficients de référence a_i , les surfaces A_i et linéaires L_i . Les coefficients a_1 à a_{10} dépendent de la zone climatique du lieu de construction du bâtiment, on distingue entre la zone H₃ d'une part et les zones H₁ et H₂ d'autre part. Les coefficients a_i sont donnés dans le tableau ci-après et s'expriment en $W/(m^2.K)$:

Coefficient a_i	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
Zones H ₁ et H ₂	0,40	0,23	0,30	0,30	1,50	2,40	2,00	0,50	0,70 pour les maisons individuelles 0,9 pour les autres bâtiments	
Zone H ₃	0,47	0,30	0,30	0,43	1,50	2,60	2,35	0,50		

Tableau 1: valeurs des coefficients a_i selon la zone climatique

- A_1 : surface des parois verticales opaques, y compris les parois verticales des combles aménagés.
- A_2 : surface des planchers sous combles ou rampants, y compris les parois horizontales des combles aménagés.
- A_3 : surface des planchers hauts autres que ceux pris en compte dans A_2 .
- A_4 : surface des planchers bas.
- A_5 : surface des baies destinées à recevoir des portes, exception faite des portes entièrement vitrées.
- A_6 : surface des baies destinées à recevoir des fenêtres, des portes entièrement vitrées, des portes-fenêtres et des parois transparentes ou translucides non équipées de fermetures.
- A_7 : surface des baies destinées à recevoir des fenêtres, des portes-fenêtres ou des parois transparentes et translucides équipées de fermetures.
- L_8 : linéaire de la liaison périphérique des planchers bas avec un mur
- L_9 : linéaire de la liaison périphérique des planchers intermédiaires ou sous comble aménageable avec un mur.
- L_{10} : linéaire de la liaison périphérique avec un mur des planchers hauts pris en compte pour le calcul de A_3 .

Les surfaces A_1 à A_7 sont les surfaces intérieures des parois et les linéaires L_8 à L_{10} sont déterminés à partir des dimensions intérieures des locaux. Seules sont prises en compte, pour les déterminations de ces surfaces et de ces linéaires, les parois ou liaisons donnant sur un local chauffé, d'une part, et, d'autre part, sur l'extérieur, un local non chauffé, le sol ou un vide sanitaire.

Dans le cas où la liaison périphérique d'un plancher se situe à la jonction d'un plancher intermédiaire avec un plancher bas ou un plancher haut, le linéaire à prendre en compte est respectivement L_8 ou L_{10} .

La surface à prendre en compte pour les portes, les fenêtres et les portes-fenêtres est celle en tableau. Les surfaces des parois et des baies prises en compte pour le calcul de $U_{\text{bât-réf}}$ sont identiques à celles prises en compte pour le calcul de $U_{\text{bât}}$.

Toutefois, lorsque la somme des surfaces des baies, A_6 et A_7 , est supérieure au taux indiqué ci-après, la part de la surface qui dépasse cette limite est considérée, pour le calcul de $U_{\text{bât-réf}}$, comme une surface de paroi verticale opaque, A_1 , et est ajoutée à celle-ci. Cette limitation doit être effectuée de façon à conserver le rapport existant entre surfaces équipées ou non de fermetures [3].

1.6. Matériaux d'isolation

La Palice dirait qu'un matériau isolant thermique est un matériau à basse conductivité thermique apparente. Avec épaisseur relativement faible, il présente une résistance thermique suffisante pour les besoins envisagés. C'est donc un matériau qui transmet mal la chaleur, que ce soit par conduction, convection ou rayonnement.

- Pour éliminer la conduction, il faut éliminer la matière. Le vide ne conduit pas la chaleur.
- Pour éliminer la convection, il faut immobiliser ou supprimer les fluides. Il n'y a de convection possible ni dans le vide, ni dans un fluide immobilisé.
- Pour éliminer le rayonnement, il faut des écrans opaques au rayonnement, ou des surfaces non émissives (donc réfléchissantes) au rayonnement thermique.
- Pour éliminer l'évaporation - condensation, il faut utiliser des matériaux secs.

Ces conditions sont partiellement contradictoires, et ne peuvent être bien réalisées que dans l'espace intersidéral, en traitant les surfaces des corps à isoler pour les rendre réfléchissantes. Dans le bâtiment, l'aspect économique est primordial: c'est l'air immobilisé qui est l'isolant utilisé dans le bâtiment. L'air est immobilisé dans des mousses ou entre des fibres. Les parois des alvéoles des mousses, ainsi que les fibres, font aussi écran au rayonnement.

La conductivité thermique n'est pas la seule propriété à prendre en compte dans le choix d'un isolant. Les caractéristiques suivantes sont au moins aussi importantes, et peuvent être primordiales suivant les applications:

- Résistance au feu
- Résistance mécanique (traction et compression)
- Étanchéité à l'air
- Résistance à la diffusion de vapeur d'eau
- Faible absorption d'eau par immersion, par flottaison et par diffusion
- Stabilité dimensionnelle et comportement à la chaleur
- Qualités acoustiques

- Prix.

1.7. Application des isolants thermiques

Il n'y a pas de mauvais matériau isolant, il n'y a que de mauvaises applications. Le matériau isolant idéal dépend de son application. La mousse de verre ou le polyuréthane sont beaucoup trop chers pour être placée entre deux murs, où la laine minérale ou le polystyrène expansé conviennent parfaitement. Par contre, il serait insensé d'utiliser ces deux derniers matériaux dans une application où ils seraient exposés à l'eau, car ils seraient rapidement détrempés. Certains isolants sont destinés à des applications très spécifiques: le polystyrène

extrudé s'utilise en toiture inversée, car il supporte bien les intempéries. La mousse de verre convient aux applications où une résistance à la compression élevée ou une étanchéité à l'eau parfaite est essentielle.

1.7.1. Parois homogènes

Certains matériaux présentent une conductivité thermique apparente relativement faible tout en ayant une résistance mécanique suffisante pour en faire des parois. Ce sont la brique alvéolée, la brique en terre cuite porosifiée, et le béton cellulaire. La conductivité thermique apparente de ces matériaux n'est toutefois pas aussi basse que celle des isolants spécifiques, et l'épaisseur des parois doit être suffisante (40 cm et plus) pour garantir une isolation conforme aux normes actuelles.

Des bâtiments anciens ont été construits en parois homogènes de maçonnerie à la chaux, de torchis, voire de pierre de taille. Ces derniers matériaux n'assurent toutefois pas une isolation thermique suffisante selon les critères modernes.

Le bois massif présente de bonnes qualités tant statiques que thermiques, et a été largement utilisé pour les chalets. Cette solution est toutefois trop coûteuse actuellement.

1.7.2. Dalles toitures

L'isolant dans les dalles toitures plates classiques est placé entre une barrière à la diffusion de vapeur, elle-même posée sur la dalle, et la couche d'étanchéité. L'isolant doit résister à la compression, et aux températures élevées qui peuvent survenir, soit à cause du soleil, soit lors de la pose de l'étanchéité bitumineuse. On a beaucoup utilisé le liège pour cette application.

Maintenant, on utilise le polyuréthane, la mousse de verre, les fibres minérales et le polystyrène, ces derniers à hautes densités.



Figure 2: dalles toitures plates classiques, à gauche sans protection, à droite avec protection de l'étanchéité

1.7.3. Toitures inversées

Dans la toiture plate inversée, l'isolant est placé au-dessus de l'étanchéité, elle-même directement posée sur la dalle. Cette dalle souvent recouverte d'une chape de pente. Des dallettes de béton ou du gravier chargent les plaques d'isolant, les protégeant du soleil et les empêchant de s'envoler.

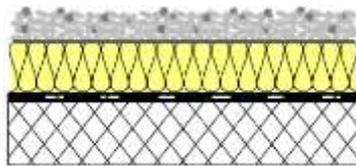


Figure 3: toiture inversée

Seul le polystyrène extrudé, ayant une pellicule étanche à l'eau sur ses deux faces, convient à cette application. Un feutre drainant est posé sous l'isolant, l'empêchant de se coller à l'étanchéité. Un autre feutre doit être placé sous le gravier, pour éviter que celui-ci ne se glisse entre les plaques.

1.7.4. Toitures et parois ventilées

L'isolant posé dans ces éléments de construction est bien protégé des intempéries par les tuiles et une sous toiture, ou par un bardage. Les charges mécaniques de la toiture ou du bardage sont supportées par le lattage et le contre-lattage, ou par des supports adhoc.

Tout isolant convient donc, notamment les moins chers. On utilise souvent des fibres minérales légères en rouleaux, facile à poser entre les chevrons. Le polystyrène expansé à faible densité convient aussi.

Pour ces parois, il faut particulièrement veiller à assurer l'étanchéité à l'air, en particulier dans les constructions en bois.

1.7.5. Isolation entre deux parois

Dans ces éléments, l'isolant est bien protégé, et pratiquement n'importe quel isolant convient. En principe, il est préférable de poser l'isolant à l'extérieur de la structure porteuse, car cette disposition évite de nombreux ponts thermiques, diminue les risques de condensation et augmente l'inertie thermique interne du bâtiment.

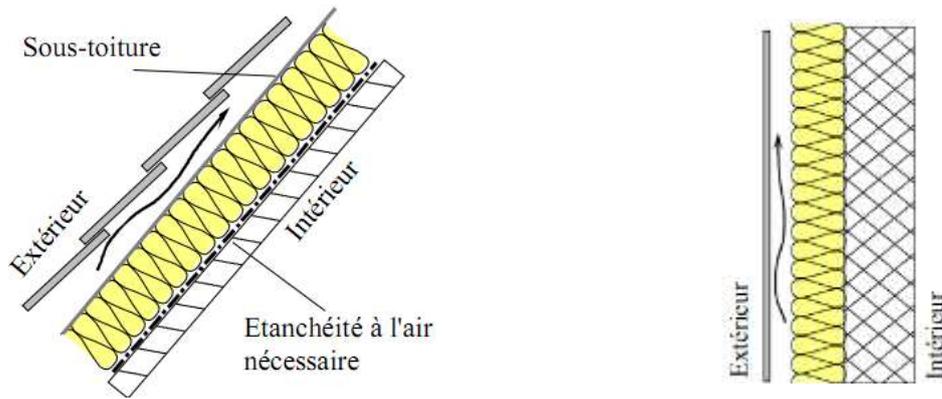


Figure 4: dalles toiture plates classiques, à gauche sans protection, à droite avec protection de l'étanchéité

L'ancienne méthode consistant à poser l'isolant à l'intérieur de la structure porteuse et à le protéger par un galandage (à gauche sur la figure 5), ne se justifie plus avec les épaisseurs d'isolant posées actuellement.



Figure 5: isolation entre murs

Certains matériaux se prêtent bien à l'injection après coup d'espace d'air inaccessibles autrement. Ainsi, d'anciens murs doubles et des toitures comportant des espaces vides peuvent être isolés après coup en injectant, suivant les cas, des flocons de fibres minérales ou des mousses organiques (polyuréthane, urée-formaldéhyde). Il est important, pour assurer le succès de ces opérations, de les faire effectuer par des spécialistes ayant de l'expérience.

1.7.6. Dalles planchers

L'isolation posée sous un plancher ou une chape doit résister à la compression. On utilise le polystyrène expansé et les laines minérales relativement denses. Une couche de fibres minérales de faible épaisseur est souvent utilisée sous la chape pour amortir la propagation des bruits d'impacts.

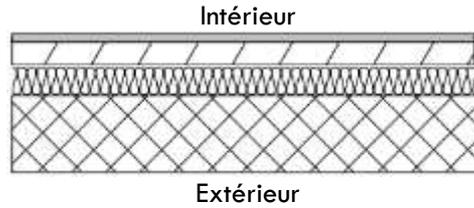


Figure 6: dalle plancher

1.7.7. Éléments d'enveloppe légers

Des éléments de façade légers sont préfabriqués en collant des feuilles ou des plaques de revêtement sur les faces intérieure et extérieure d'un matériau isolant. Pour cette application, le matériau isolant doit être rigide, donc présenter une résistance mécanique suffisante à la traction et à la compression. On utilise essentiellement les mousses organiques telles que le polyuréthane et le polystyrène expansés.

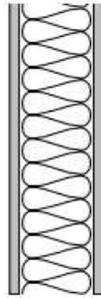


Figure 7: panneau léger

1.7.8. Isolation extérieure compacte

L'isolation extérieure compacte ou crépie est constituée de plusieurs couches: le matériau isolant est collé sur la face extérieure de la façade, à l'aide d'un ciment-colle. Des clous de matière plastique sont parfois utilisés pour fixer l'isolant. L'isolant est ensuite enduit d'un crépi synthétique armé d'un treillis de fibre de verre pour le protéger des intempéries et lui donner son aspect final.

Des systèmes d'isolation extérieure compacte existent pour tous les isolants principaux (fibres minérales, mousses organiques et inorganiques), mais les systèmes utilisant polystyrène expansé dominant actuellement. Il est essentiel, pour la durabilité du système, que toutes les couches, depuis le revêtement de façade jusqu'au crépi final soient posées par des spécialistes ayant de l'expérience dans le système. Tous les matériaux utilisés doivent faire partie du système proposé par le fabricant. Le bricolage dans ce domaine est pratiquement voué à l'échec. Ce mode de faire est relativement bon marché, mais certainement plus fragile et moins durable que l'isolation entre murs.

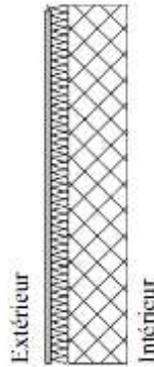


Figure 8: isolation extérieure compacte

1.7.9. Isolation transparente

En plaçant un isolant transparent ou un vitrage isolant devant une paroi foncée, on convertit celle-ci en capteur solaire. Le rayonnement solaire traverse, du moins en partie, la couche d'isolant et se transforme en chaleur à la surface de la paroi. Cette chaleur pouvant difficilement ressortir au travers de la couche isolante pénètre dans le bâtiment au travers de la paroi.

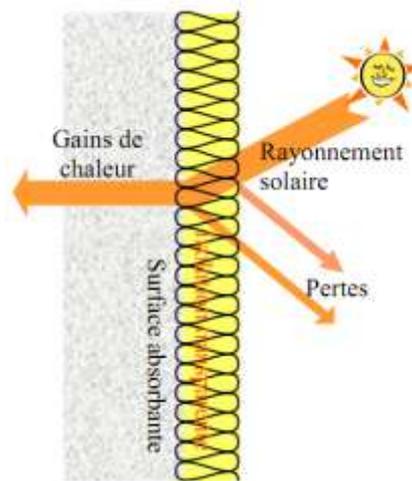


Figure 9: isolation transparente

Dans ce cas, une paroi non ombragée, exposée entre le sud-est et le sud-ouest présente un bilan positif pendant la saison de chauffage en climat tempéré. Le coût de cette technique est encore relativement élevé, partie parce qu'une protection solaire amovible est nécessaire pour contrôler l'apport de chaleur [4-9].

1.7.10. Comment éviter les ponts thermiques ?

Certains ponts thermiques, tels que les cadres de portes et fenêtres, les supports de balcons, les raccords entre éléments d'enveloppe sont inévitables. Il convient dès lors de les concevoir de manière à réduire leurs effets pour que ceux-ci soient acceptables. Voici quelques principes généraux qui peuvent être appliqués ensemble ou séparément.

En premier lieu, une conception prévoyant de poser l'isolation à l'extérieur de la structure porteuse permet très souvent d'éviter la plupart des ponts thermiques. Par isolation extérieure, on entend tout système dans lequel la couche d'isolant est posée à l'extérieur de la structure porteuse du bâtiment. Il s'agit aussi bien du double mur (le mur intérieur étant porteur) que de l'isolation extérieure crépie ou bardée. Les bâtiments à parois homogènes en matériaux légers (bois massif, béton cellulaire autoclavé ou briques porosifiées) peuvent aussi être considérés comme tels si les dalles sont faites en matériaux semblables ou, si elles sont plus conductrice (béton) elles ne traversent pas entièrement les murs, mais s'arrêtent au milieu.

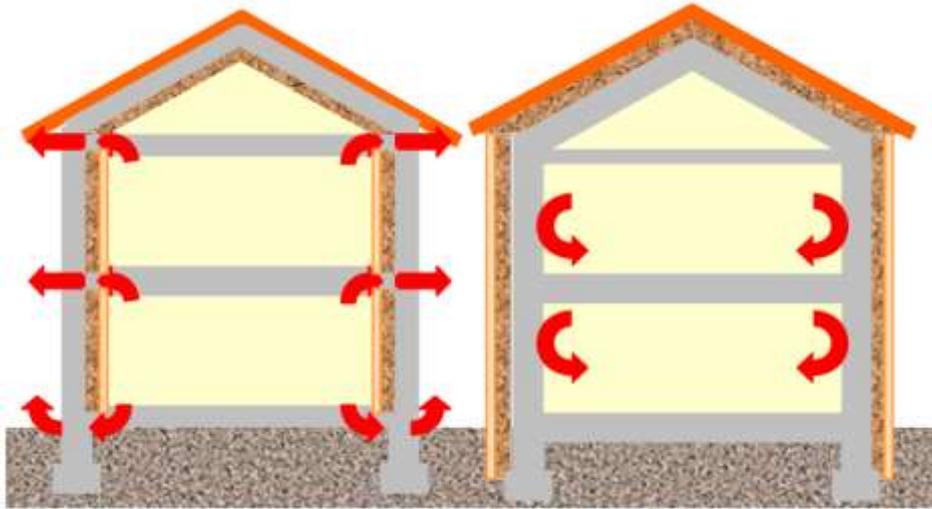


Figure 10: à gauche, isolation intérieure: de nombreux ponts thermiques sont inévitables à chaque étage, à droite, isolation extérieure, entourant complètement la structure.

L'isolation extérieure présente de nombreux autres avantages:

- Augmentation de l'inertie thermique intérieure, donc amélioration du confort d'été et meilleure utilisation de gains solaires passifs en hiver.
- Stabilisation de la température de la structure, donc vieillissement plus lent de celle-ci.
- Diminution, et dans la plupart des cas élimination totale des risques de condensation dans les éléments de construction.

En résumé, les ponts thermiques

- Perdent de la chaleur et refroidissent les surfaces intérieures.
- Augmentent le risque de moisissures.
- Sont donc à éviter autant que possible et à prendre en compte dans le cas contraire.
- Pour les éviter, placer l'isolation à l'extérieur, la structure porteuse étant à l'intérieur de la couche isolante.
- Si nécessaire, traiter les ponts thermiques de manière à augmenter leur température superficielle intérieure, quitte à perdre de l'énergie.

1.8. Apports d'énergie solaire et gains internes

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement normalement présent sur le site concerné, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption solaires des surfaces réceptrices. Les surfaces qui captent l'énergie solaire sont principalement les vitrages, mais aussi les parois et planchers intérieurs des surfaces ensoleillées, les parois situées derrière un revêtement transparent ou une isolation transparente, et même toute surface opaque exposée au soleil. Les gains solaires peuvent apporter une part importante des besoins en chauffage dans les bâtiments. En climat tempéré, ils avoisinent 10% des besoins d'un bâtiment ordinaire, mais ils peuvent atteindre 50 % dans les bâtiments bien conçus.

1.8.1. Principe du captage solaire passif

Le rayonnement solaire entrant par les fenêtres et le cas échéant par d'autres éléments de captage spéciaux est transformé en chaleur à l'intérieur du bâtiment, et contribue ainsi au chauffage des locaux. Ce mode de faire présente de nombreux avantages, et en particulier la source d'énergie est gratuite et non polluante. Par contre, il présente quelques inconvénients auxquels il est nécessaire de pallier. Pour cela, il convient de suivre les quelques directives simples énoncées ci-dessous (figure 11).

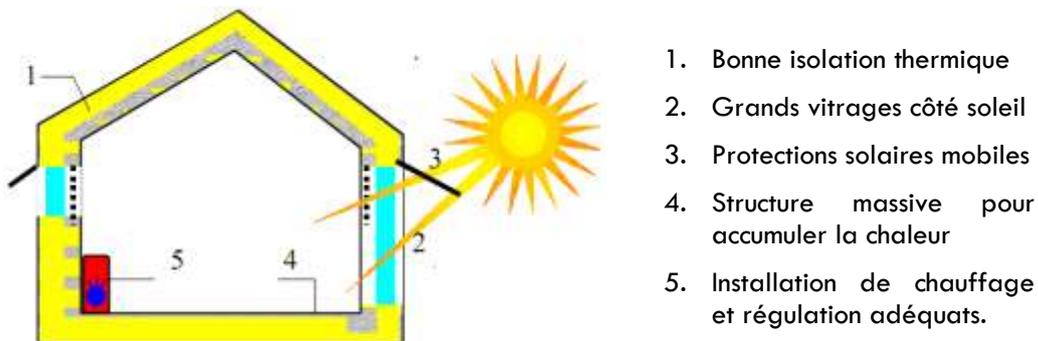


Figure 11: principes du chauffage solaire passif

1. Le rayonnement solaire est relativement diffus, en particulier en hiver, où il ne dépasse pas quelques centaines de watts par mètre carré. Pour capter une quantité de chaleur appréciable, il faut de grandes surfaces de captage, orientées vers les directions les plus ensoleillées (du sud-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord).
2. Pour que cette chaleur, toujours limitée, représente une part importante des besoins, il faut limiter ces besoins au minimum par une isolation thermique soignée: fortes épaisseurs d'isolation et vitrages à hautes performances.
3. Lorsque la température extérieure est clémente et qu'il fait beau, ces surfaces apportent trop de gains. Il est donc indispensable de munir les surfaces de captage de dispositifs de

contrôle. En particulier, il faut munir les fenêtres de protections solaires efficaces, donc extérieures. Des arbres à feuilles caduques sont souvent proposés, car ils apportent une ombre plus fraîche que des stores. Toutefois, ce type de protection n'est pas réglable, et ne peut pas être diminué pour améliorer l'éclairage naturel par mauvais temps en belle saison.

4. Pour augmenter l'efficacité du chauffage solaire passif, il faut répartir sur la journée les gains reçus pendant quelques heures seulement. L'inertie thermique du bâtiment doit donc être élevée, pour limiter les surchauffes en période ensoleillée, et restituer la chaleur accumulée pendant la nuit. Le bâtiment est donc massif et l'isolation est posée à l'extérieur de la structure.
5. Enfin, le chauffage d'appoint ne doit fonctionner que quand il est nécessaire. Il doit réagir rapidement aussi bien lorsque le soleil disparaît que lorsqu'il apparaît. Il faut donc une régulation thermique adéquate, qui tienne compte des gains solaires et des caractéristiques du système de chauffage. Des systèmes de contrôle prévisionnels peuvent pallier aux défauts des chauffages à grande inertie, comme le chauffage par le sol.

1.8.2. Calcul des gains solaires passifs

Ces gains représentent la chaleur obtenue à l'intérieur du volume chauffé par transformation du rayonnement solaire qui est entré par les fenêtres ou qui a été capté par des systèmes spécifiques passifs ne faisant pas partie de l'installation de chauffage. En principe, toutes les surfaces exposées au rayonnement solaire sont potentiellement des surfaces de captage, permettant de transformer le rayonnement en une forme d'énergie utile, le plus souvent en chaleur. Dans le bâtiment, les surfaces de captage utilisées pour le chauffage solaire passif sont:

- Les surfaces transparentes des fenêtres et portes
- Le sol et les murs des serres et vérandas
- Les parties opaques (façades, toiture), surtout si elles sont recouvertes d'une isolation transparente ou d'un vitrage (murs Trombe)

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption solaires des surfaces réceptrices. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires s'obtiennent en sommant les apports de chaque surface de captage:

$$Q_s = \sum_j Q_{sj} = \sum_j I_{sj} \sum_n A_{snj} \quad (7)$$

Où la première somme s'effectue sur toutes les orientations j , et la seconde sur toutes les surfaces n qui captent le rayonnement solaire, et où :

- I_{sj} : est l'irradiance solaire, à savoir l'énergie totale, sur la période de calcul, du rayonnement solaire global incident sur une surface unitaire ayant l'orientation j .
- A_{snj} : est l'aire réceptrice équivalente de la surface n ayant l'orientation j , c'est-à-dire l'aire d'un corps noir conduisant au même apport solaire que la surface considérée.

Pour les éléments d'enveloppe transparents, l'aire réceptrice équivalente A_s d'une paroi extérieure vitrée telle qu'une fenêtre, est calculée comme suit:

$$A_s = A F_S F_F g \quad (8)$$

Où:

- A : est l'aire de la surface réceptrice n (par exemple, aire de la fenêtre);
- F_S : est le facteur d'ombre de la surface n
- F_F : est le facteur de réduction pour les encadrements des vitrages, égal au rapport de l'aire de la surface transparente à l'aire totale A_n de la menuiserie vitrée
- g : est le coefficient de transmission énergétique de la surface n , le cas échéant muni de protections solaires ou avec les rideaux permanents

Le coefficient de transmission énergétique g est le rapport de la densité de flux thermique traversant un élément de construction transparente (y compris la transmission secondaire de chaleur) au rayonnement incident global.

Les facteurs de réflexion, ρ , de transmission, τ , d'absorption, α et solaire g dépendent de l'angle d'incidence i . Les valeurs standard sont calculées pour une incidence normale ($i = 0$).

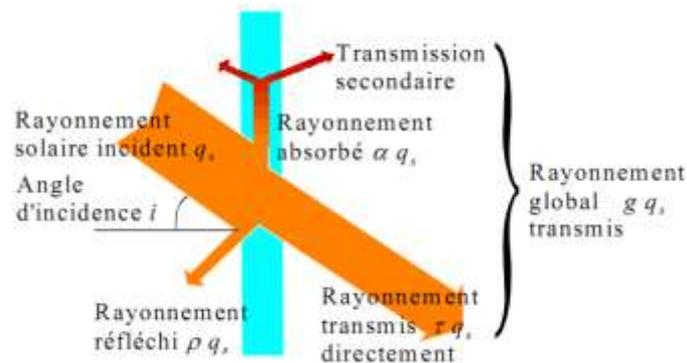


Figure 12: répartition du rayonnement solaire incident sur un vitrage

Le coefficient de transmission énergétique g utilisé pour le calcul des gains solaires est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage.

Ce coefficient est légèrement inférieur à la valeur sous incidence normale et un facteur de correction doit être utilisé. En l'absence de donnée plus précise, on prendra un facteur de correction de 0,85 pour un simple vitrage, et 0,75 pour un double vitrage clair.

Le facteur d'ombre, F_S , qui se situe entre 0 et 1, représente toute réduction du rayonnement solaire incident due à un ombrage permanent de la surface considérée du fait de l'un des facteurs suivants :

- ombre portée d'autres bâtiments
- ombre due à la topographie (collines, arbres, etc.) ;
- surplombs
- ombres portées par d'autres éléments du même bâtiment
- position d'une fenêtre par rapport à la surface externe du mur extérieur.

Le facteur d'ombre est défini par :

$$F_S = \frac{I_{s,ps}}{I_s} \quad (9)$$

Où :

$I_{s,ps}$: est l'irradiance, à savoir le rayonnement solaire total reçu par m^2 de surface réceptrice avec les ombrages permanents pendant la saison de chauffage

I_s : est le rayonnement solaire total qui aurait été reçu sur la surface réceptrice sans ombrages

Seuls les écrans permanents, qui ne sont pas manœuvrés en fonction des apports solaires ou de la température intérieure, sont pris en compte pour la définition du facteur d'ombre. Les protections solaires automatiques ou manœuvrables par l'utilisateur sont implicitement prises en compte dans le taux d'utilisation.

1.8.3. Gains internes

Ces gains de chaleur gratuits proviennent de la chaleur métabolique des habitants et de la chaleur provenant des appareils, éclairage, etc.; qui ne sont pas spécifiquement consacrés au chauffage, mais dont l'énergie consommée se transforme en chaleur générée à l'intérieur du volume chauffé.

La puissance thermique dégagée par les habitants présents pendant une part h du temps peut être calculée par:

$$\Phi_h = N \frac{P h}{24} = A \frac{P h}{24 D} \quad (10)$$

Où

N : est le nombre d'habitants présents dans la zone chauffée

P : est la puissance dégagée par habitant

h : est le temps de présence en heures par jour

A : est la surface brute de plancher chauffé occupée par les habitants

D : est la surface disponible par habitant

Le taux de présence dépend du type d'habitant, que l'on peut classer en deux catégories: logement et travail (ou école). La puissance dégagée dépend de l'activité et de la taille des habitants. On peut toutefois admettre une activité moyenne et classer les habitants en deux catégories: adultes et enfants. SIA 380/1 propose les chiffres de la Table 2.

Type de bâtiment	Occupation [m ² /pers]	Présence [h/j]	Puissance [W]
Logement collectif	40	12	70
Logement individuel	60	12	70
Bureau	20	6	80
Ecole	10	4	70
Restaurant	5	3	100

Tableau 2: Puissance thermique dégagée par les habitants, selon [SIA, 2001 #328]

La puissance fournie par les appareils est généralement calculée à partir de la puissance électrique P_{el} consommée par les appareils :

$$\Phi_a = P_{el} f_e \quad (11)$$

Où f_e est un facteur de correction tenant compte du fait que les appareils électriques ne se trouvent pas tous dans le volume chauffé (par ex. éclairage extérieur, congélateur dans la cave, etc.). [SIA, 2001 #328] propose les chiffres de la table 3 pour la puissance électrique consommée en moyenne par surface de plancher chauffé P_{el}/SPC et pour le facteur f_e .

Type de bâtiment	Consommation annuelle MJ/m ²	Facteur de correction f_e
Logement collectif	100	0,7
Logement individuel	80	0,7
Bureau	80	0,9
Ecole	40	0,9
Restaurant	120	0,7

Tableau 3: Puissance thermique dégagée par les appareils, rapportée à la surface brute de plancher chauffé, selon [SIA, 2001 #328]

Ainsi, l'énergie interne est donnée pendant la période t par:

$$Q_i = t(\Phi_h + \Phi_a) \quad (12)$$

En première approximation, les gains internes totaux pour une famille sont de l'ordre de 1'300 MJ pour un mois, soit une puissance moyenne de 500 W. Une autre méthode consiste à compter une puissance moyenne de 5 W/m² de plancher dans les habitations [10-14].

Références

- [01] : M. Trocmé, Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école nationale supérieure des mines de paris, Spécialité énergétique, Novembre 2009.
- [02] : S. Thiers, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 252 p, 2008.
- [03] : C. A. Roulet, Énergétique du bâtiment I et II. Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes, Lausanne, 1987.
- [04] : E. Bozonnet, Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments, cas de la rue canyon, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, 2005.
- [05] : S. Filfi, D. Marchio, E. Fleury, J.R. Millet, La perméabilité des enveloppes dans les calculs de consommation d'énergie des bâtiments, conférence IBPSA France 2006.
- [06] : F. Haghigat, Y. Lin, A.C. Megri, Development and validation of a zonal model POMA, Building and Environment, 36 (9), pp.1039-1047, 2001.
- [07] : G. Lefebvre, Analyse et réduction modale d'un modèle de comportement thermique de bâtiment, Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, France, 1987.
- [08] : L. Mora, Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différent niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, 2003.
- [09] : S. Thiers, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école nationale supérieure des mines de paris, Spécialité énergétique, Novembre 2008.
- [10] : N. Morel et E. Gnansounou, Energétique du bâtiment, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Faculté d'environnement naturel, Architectural et construit, Septembre 2008.
- [11] : P.O. Fanger, Thermal Comfort. R. E. Krieger, Florida, USA, 1982.
- [12] : P. O. Fanger, A. K. Melikov, H. Hansawa and J. Ring: Air turbulence and the sensation of draught. Energy and Buildings, 12 (1988) 21-39.
- [13] : P. O. Fanger: Introduction of the olf and decipol units to quantify air pollution perceived by human indoors and outdoors. Energy and Buildings, 12 (1988) 1-6.
- [14] : EN ISO 7730, Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. ISO, Genève, et CEN, Bruxelles 1994.

Chapitre 2

Rayonnement Solaire et Modélisation Mathématique Multizone

CHAPITRE 2

RAYONNEMENT SOLAIRE ET MODELISATION MATHÉMATIQUE MULTIZONE

2.1. Introduction

Le soleil est l'origine principale de l'énergie disponible sur terre. Ceci inclut l'énergie thermique directe, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et même l'énergie générée par les hydrocarbures puisque ces derniers sont la conséquence de la photosynthèse. Avant d'aborder l'étude du rayonnement solaire reçu au sol, il serait très utile de donner quelques notions de base. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer des grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation hors atmosphère...

Dans cette partie, nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- ✚ Les grandeurs astronomiques,
- ✚ Le rayonnement hors atmosphère,
- ✚ Les effets de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.

2.2. Nature du rayonnement solaire

Le soleil est une boule sphérique gazeuse de diamètre moyen égal à $1,39 \cdot 10^9$ mètres, sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{30}$ kg. Il est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments. Il est généralement admis que la source d'énergie du soleil est une réaction thermonucléaire de fusion transformant des noyaux d'hydrogène (protons) en noyau d'hélium (particules) avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique centré sur la gamme du visible. Mais l'analyse du rayonnement qui nous parvient nous montre que le soleil rayonne à peu de chose près comme s'il s'agissait d'un corps noir ayant un diamètre de $1,39 \cdot 10^6$ km et porté à une température de 5762 K.

La puissance rayonnée à la surface du soleil est à peu près égale à $3,79 \cdot 10^{26}$ Watts. Seule une puissance de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{17}$ Watts est interceptée par la terre; 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie au cycle d'évaporation - précipitation de l'atmosphère.

2.3. Grandeurs géo-astronomiques

Le mouvement de la terre sur son axe et autour du soleil est schématisé par la figure 1 suivante :

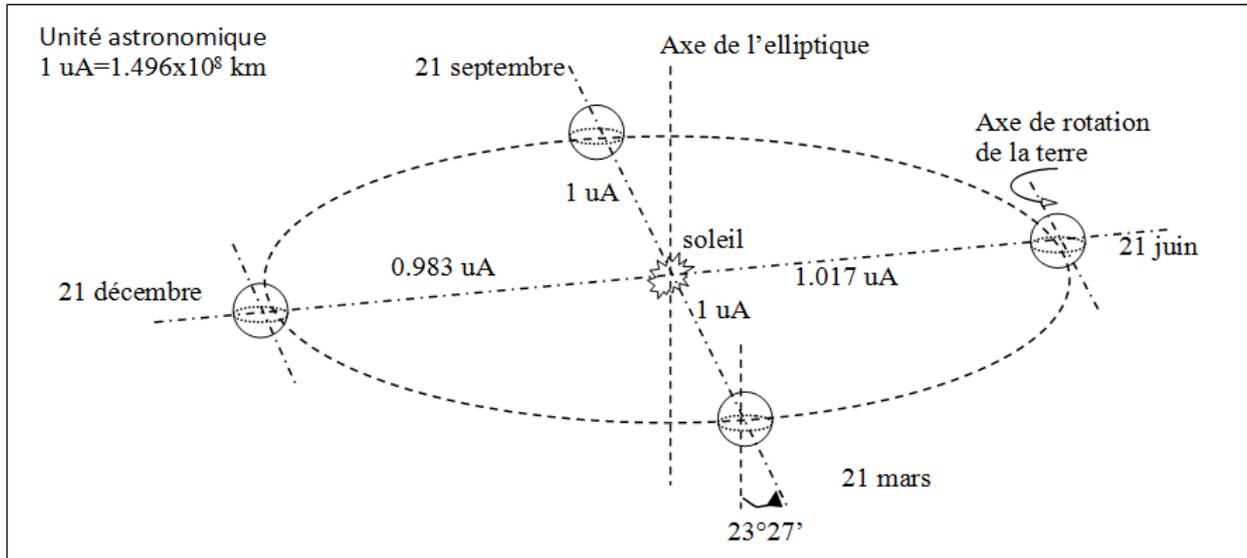


Figure 1 : Mouvement de la terre autour du soleil

Les quatre positions de la terre représentées sur cette figure correspondent aux solstices (hiver et été) et équinoxes (automne et printemps). On notera en particulier que l'axe de rotation de la terre est incliné par rapport à la normale du plan de l'ellipse d'un angle de $23,27^\circ$.

2.4. Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre

Pour repérer un site donné S sur la surface terrestre on définit deux grandeurs: la latitude \varnothing et la longitude L. \varnothing est la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur. L est l'angle du plan méridien du site S et du plan du méridien origine de Greenwich (figure 2).

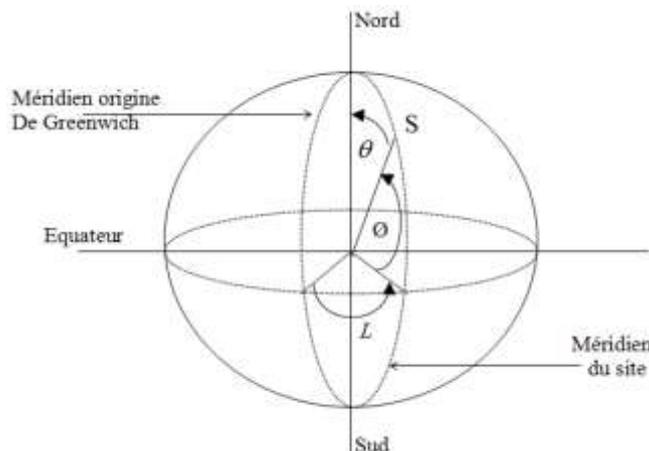


Figure 2 : Repérage d'un site sur la surface terrestre

2.5. Grandeurs pour le repérage du soleil

La position du soleil peut se déterminer d'après deux repères : le repère équatorial et le repère horizontal.

2.5.1. Repère équatorial

Dans ce repère la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs (figure 3):

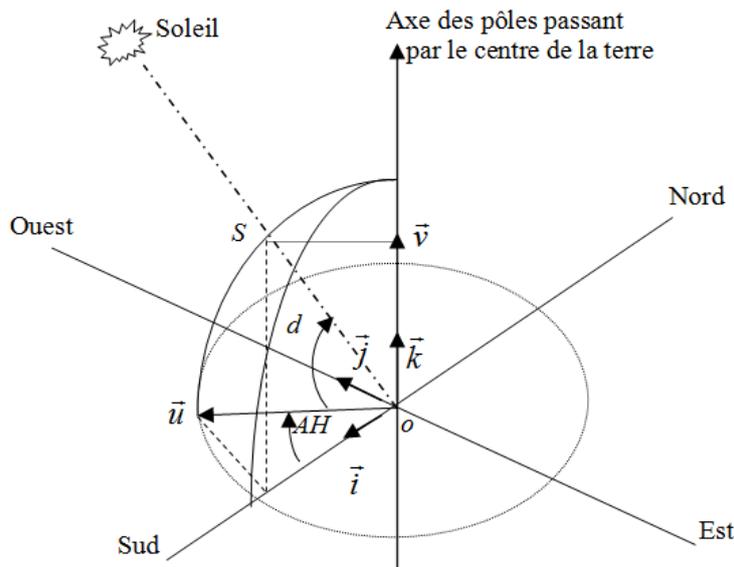


Figure 3 : Repérage d'un site sur la surface terrestre

1. La déclinaison d : c'est l'angle entre la direction du soleil et le plan de l'équateur terrestre. Elle vaut 0° aux équinoxes et est maximale aux solstices $\pm 23,45^\circ$. Elle peut être évaluée en première approximation par la relation :

$$d = 23.45 \sin \left(360 / 365 (j + 284) \right) \quad (1)$$

d : est exprimée en degrés

j : est le numéro du jour de l'année à partir du 1^{er} janvier

2. Angle horaire AH : c'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le Sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par :

$$AH = 15 (TSV - 12) \quad (2)$$

TSV : temps solaire vrai

L'angle AH vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vraie.

Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence. Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable.

$$TSV = TL + \Delta L/15 + Et \quad (3)$$

2.5.2. Repère horizontal

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a (figure 4).

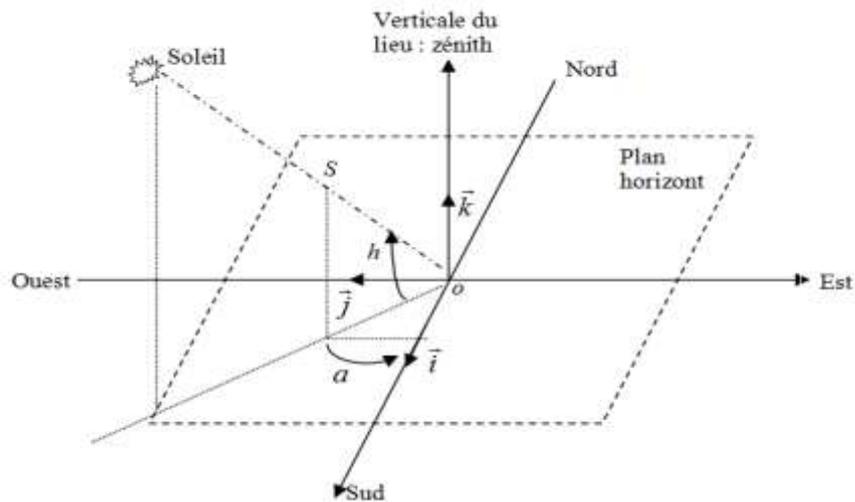


Figure 4 : Repère horizontal

1. Hauteur du soleil (h) : c'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et coucher astronomiques du soleil et 90° à midi temps solaire vrai.
2. Azimut du soleil (a) : c'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud.

[01]

2.6. Approches pour l'estimation du rayonnement solaire

En examinant les différentes études relatives à l'évaluation du gisement solaire, on peut classer les principaux modèles rencontrés, en fonction du type d'approche utilisée, en quatre classes essentielles :

2.6.1. Modèles empiriques

Ces modèles permettent d'évaluer, grâce à des formules empiriques, le rayonnement au sol à partir d'un nombre plus ou moins réduit de paramètres astronomiques et/ou météo-rogiques

tels que les heures d'ensoleillement, l'humidité relative, la déclinaison solaire, la latitude, l'altitude, la pluviométrie, la température, etc...

Parmi les modèles empiriques, on peut citer à titre d'exemples les modèles suivants :

✚ Modèle d'Angström

C'est un modèle prévisionnel de base établi en 1924, il permet d'estimer la moyenne mensuelle de l'irradiation globale journalière à partir de la moyenne mensuelle de fraction d'insolation journalière par l'expression :

$$H = H_0 (A + B S/S_0) \quad (4)$$

H_0 : irradiation globale hors atmosphère

S/S_0 : fraction d'insolation

A et B sont les coefficients d'Angström. Ils dépendent des conditions géographiques et des saisons. Différents chercheurs et auteurs proposent diverses expressions pour ces coefficients et ont validé, généralement avec une bonne précision, leurs modèles mais ces derniers restent valables seulement pour les sites où ils ont été vérifiés.

✚ Modèle de Coppolino

C'est un modèle très simple qui permet de prédire la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière d'un site quelconque. L'irradiation globale est liée seulement à la durée théorique de l'ensoleillement et à la hauteur du soleil à midi au 15^{ème} jour du mois, h_0 en degrés.

$$H = k s^{0.5} (\sin(h_0))^{1.15} \quad \text{avec} \quad h_0 = a \sin(\omega\phi - \delta) \quad (5)$$

✚ Modèle de Collarès-Pereira

C'est un modèle qui permet d'évaluer le rapport entre l'irradiation horaire et la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière. Pour l'irradiation globale, la formule est la suivante :

$$r_g = \frac{\pi}{24} (a + b \cdot \cos(\omega)) \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \omega_s \cos(\omega_s)} \quad (6)$$

Où ω_s est l'angle horaire et ω temps solaire vrai en degrés.

a et b sont données par plusieurs auteurs.

2.6.2. Méthodes physiques ou analytiques

Ce sont des modèles théoriques plus complexes. Ils sont élaborés à partir de la connaissance exacte des phénomènes physiques et permettent de calculer la transmission du

rayonnement solaire à travers les différentes couches de l'atmosphère le plus exactement possible. Une description précise des constituants de l'atmosphère est nécessaire pour aboutir à ces modèles.

Dave et ses collaborateurs décomposent l'atmosphère en couches horizontales et étudient successivement les phénomènes d'absorption et de diffusion auxquels est soumis le rayonnement solaire. D'autres modèles donnent le rayonnement solaire en fonction de paramètres atmosphériques et astronomiques. Citons un exemple de ces modèles :

Modèle de Cole-Barbaro et al.

Ce modèle donne la puissance moyenne reçue sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires au niveau du sol par l'expression :

$$\bar{l}_{bc} = l_0 \exp(a'+b'w - d_1(np - 400) - m(d_2 + b_2w + b_3(np - 400))) \quad (7)$$

\bar{l}_{bc} : le flux direct

np : la concentration de poussière dans l'atmosphère [particules/cm³]

m : la masse atmosphérique

w : l'épaisseur d'eau condensable

l_0 : constante solaire

$$\begin{array}{lll} a' = 0.1391 & d_2 = 0.13708 & d_3 = 0.368 \cdot 10^{-4} \\ b' = 0.00428 & b_2 = 0.00261 & b_3 = 1.131 \cdot 10^{-4} \end{array}$$

L'irradiation directe journalière sur plan horizontal

$$\bar{H}_{dc} = \int_{t_s^{\text{lever}}}^{t_s^{\text{coucher}}} I_{dc} \cdot \sin(h) \cdot d(t_s) \quad (8)$$

2.6.3. Méthodes statistiques

Les méthodes statistiques concernent l'étude des propriétés statistiques telles que la moyenne, la variance, le coefficient d'asymétrie, le coefficient d'aplatissement des données solaires. L'étude de l'évolution de ces propriétés à l'échelle horaires pendant la journée et à l'échelle journalière pendant l'année sert à extraire des informations importantes sur la quantité et la qualité du gisement solaire d'un site étudié. On peut compter également parmi ce type de méthodes les modèles de distribution de probabilité des mesures solaires.

2.6.4. Méthodes stochastiques

Les modèles stochastiques sont des modèles mathématiques utilisés pour décrire un phénomène physique aléatoire en considérant les observations z_1, \dots, z_n de ce phénomène comme une série temporelle.

De façon générale, les modèles stochastiques appartiennent à la classe des modèles ARMA (Auto-Regressive Moving-Average) dont les principes sont basés sur la théorie fondée par Box et Jenkins. L'idée de base est de générer séquentiellement la série temporelle z_t à partir d'un bruit blanc a_t par un filtre linéaire.

Plusieurs études ont montré que les processus ARMA (ou plutôt des variantes plus simples de ce modèle) sont de très bons modèles pour le rayonnement solaire journalier et horaire mesuré sur plusieurs sites.

Modèles autorégressifs

Par définition, un processus autorégressif d'ordre p , noté $AR(p)$, est un processus vérifiant la relation du type :

$$\tilde{z}_t = \varphi_1 \tilde{z}_{t-1} + \dots + \varphi_p \tilde{z}_{t-p} + a_t \quad (8)$$

Où

$$\tilde{z}_t = z_t - \bar{z} \quad (9)$$

Les φ_i sont les paramètres du modèle et a_t est un bruit blanc de moyenne nulle et de variance σ_a^2 .

L'observation z_t dépend des p observations précédentes plus une valeur aléatoire qui évolue en bruit blanc.

L'exemple le plus simple pour un processus autorégressif et l'un des plus utilisés dans la pratique est le processus autorégressif du premier ordre qui est appelé aussi processus de Markov :

$$\tilde{z}_t = \varphi_1 \tilde{z}_{t-1} + a_t \quad (10)$$

Modèles à moyenne mobile

Un processus à moyenne mobile d'ordre q , noté $MA(q)$, s'écrit :

$$\tilde{z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (11)$$

Avec

$$\tilde{z}_t = z_t - \bar{z} \quad (12)$$

Les θ_i sont les paramètres du modèle et a_t est un bruit blanc de moyenne nulle et de variance σ_a^2 .

Le processus MA du premier ordre, noté $MA(1)$, s'écrit comme suit :

$$\tilde{z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (13)$$

✚ Modèles mixtes

Une extension naturelle des modèles AR(p) et MA(q) sera une classe de modèles ayant à la fois les termes d'autorégression et de moyenne mobile, c'est un processus ARMA(p,q) défini par la relation :

$$\tilde{z}_t = \varphi_1 \tilde{z}_{t-1} + \dots + \varphi_p \tilde{z}_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (14)$$

Les processus ARMA sont largement utilisés dans différents domaines, cependant celui le plus rencontré en pratique est le modèle ARMA(1,1) défini par la relation :

$$\tilde{z}_t = \varphi_1 \tilde{z}_{t-1} + a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (15)$$

[2-4]

2.7. Etude du trouble atmosphérique

Le trouble atmosphérique est le rapport entre l'extinction du rayonnement solaire direct traversant l'atmosphère sous une incidence donnée et celle du rayonnement solaire traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Il est utilisé pour la modélisation de l'irradiation solaire reçue par ciel. Plusieurs formulations mathématiques du trouble atmosphérique sont proposées par la littérature.

2.7.1. Modèle de Perrin de Brichambaut - Capderou

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L par ciel clair est donné par :

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (16)$$

Où

T₀ : est le trouble dû à l'absorption gazeuse, tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et, surtout, par la vapeur d'eau de quantité variable.

T₁ : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O₂, CO₂,...) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh,

T₂ : est un terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépendent à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols.

L'éclairement dû au rayonnement direct obtenu sur plan horizontal dépend uniquement du facteur de trouble de Linke. Il est donnée par :

$$I_{\perp} = I_0 \sin(h) e^{-T_L \left[0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \sin(h)\right]^{-1}} \quad (17)$$

L'éclairement dû au rayonnement diffus obtenu sur plan horizontal dépend également du facteur de trouble diffusif

$$T_{LD} = T_1 + T_2 = T_L - T_0 \quad (18)$$

Il est donné par :

$$D_{-} = I_0 \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(h)) + \alpha - \sqrt{b^2 + \alpha^2})$$

$$b = \log(T_L - T_0) - 2.80 + 1.02 (1 - \sin(h))^2 \quad (19)$$

$$\alpha = 1.1$$

Avec :

T_0 est donné par la relation suivante :

$$T_0 = \frac{9.4 + 0.9 \cdot m_a}{m_a} \alpha_{aw} \quad (20)$$

α_{aw} représente le coefficient d'extinction après absorption par la vapeur d'eau.

La modélisation de ce paramètre en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 (2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.2z - (1.22 + 0.14 A_{he}) (1 - \sin(h)) \quad (21)$$

T_1 est normalement égale à 1 mais si on prend en compte l'effet de l'altitude du site, il est approché par la formule :

$$T_1 = (0.89)^Z \quad (22)$$

Le trouble partiel T_2 est donné en fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β par l'expression suivante :

$$T_2 = 16 \beta \quad (23)$$

A défaut de mesures du coefficient de trouble d'Angström, Capderou a adopté la formulation suivante :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 - A_{he}) (0.63)^Z \quad (24)$$

Le calcul des éclairements solaires (global, diffus et direct) est donné en détail dans [1,5-8].

2.7.2. Modèle de Kasten

Le modèle d'estimation du trouble atmosphérique le plus récent est celui présenté par Kasten en 1996. Il exprime le trouble de Linke T_L à partir de l'irradiation directe reçue sur plan normal par journée de ciel clair de la façon suivante :

$$T_L = \frac{1}{\delta_R \cdot m_a} \log \frac{\ln_0}{\ln} \quad (25)$$

Avec

$$\delta_R = \left(6.6296 + 1.7513 \cdot m_a - 0.1202 \cdot m_a^2 + 0.0065 \cdot m_a^3 - 0.00013 \cdot m_a^4 \right)^{-1} \quad (26)$$

[09]

2.8. Modélisation du système thermique

Quelle que soit la méthode, l'objectif est d'enlever un maximum de termes ou fonctions tout en préservant une précision acceptable du modèle, c'est-à-dire en conservant la représentation des modes impliqués dans l'analyse.

2.8.1. Analyse nodale & échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels

Nous supposons que nous avons deux températures qui sont des conditions aux limites de surface. Le cadre de l'étude est ensuite divisé en un nombre déterminé d'éléments supposés à chaque instant à température uniforme. La transposition du problème thermique de conduction dans un problème électrique est appelée analogie thermoélectrique. En effectuant cette analogie, la méthode nodale conduit à la mise en place d'un réseau électrique comme indiqué dans la figure 1. Les nœuds qui se trouvent dans les sens électriques équipotentiels symbolisent des lignes isothermes. Ces derniers sont reliés les uns aux autres par la résistance analogique de la couche physique de la paroi qui les sépare. Par conséquent, chacun de ces nœuds permet d'obtenir un condensateur électrique traduisant le stockage thermique de la partie de la paroi correspondante et permettant la traduction des effets d'inertie thermique.

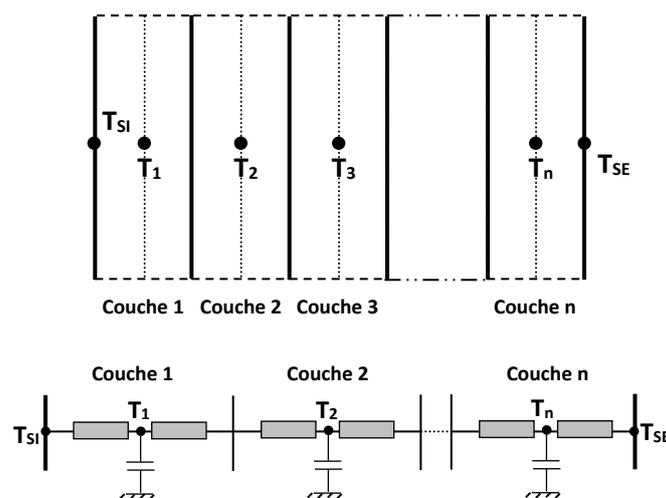


Figure 5: Discretisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé

Le nombre 0 est attaché au nœud de la surface intérieure et $n + 1$ à la surface extérieure, le système peut s'écrire sous forme matricielle, cette matrice d'équations différentielles forme l'équation d'état de l'évolution du système en tenant compte de sa discrétisation.

$$C_w \frac{dT_w}{dt} = A_w T_w + B_w \quad (27)$$

L'indice n est utilisé pour les murs et les fenêtres.

On se base sur une autre approche simplifiée qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al [9] en 1989 et repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La figure suivante est une illustration du principe de décomposition. Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes:

$$n = n_A + n_B \quad (28)$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (29)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^{n_B} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (30)$$

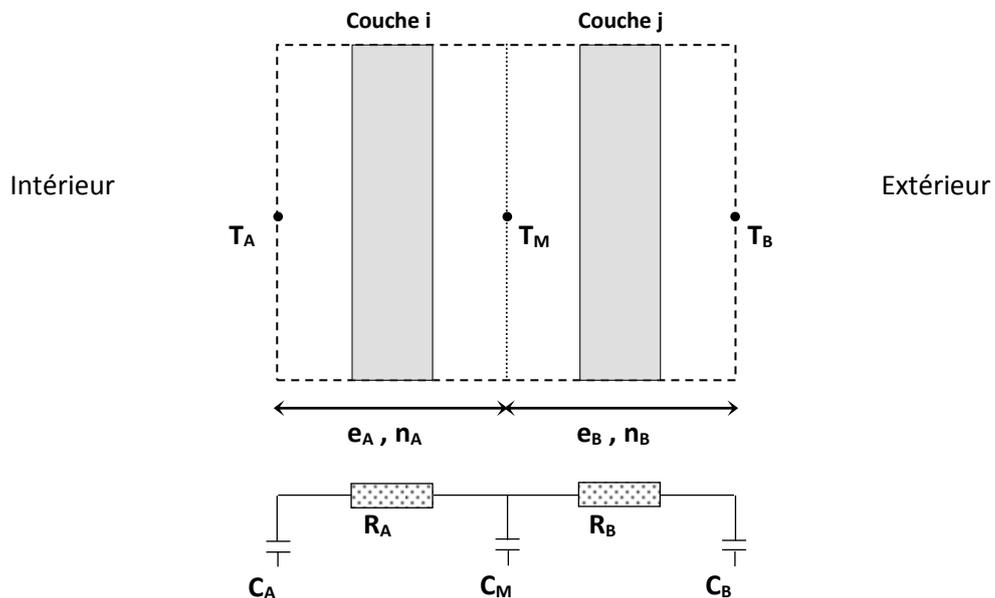


Figure 6: Discrétisation spatiale d'un mur et modèle de conduction

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (31)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^{n_B} \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j \quad (32)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^{n_B} \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (33)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad (34)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (35)$$

Le bilan énergétique du bâtiment pour les surfaces est représenté par les équations:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{\text{Surf } -i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{\text{conv}} (T_{\text{air}} - T_A) \quad (36)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{\text{Terre } -\text{ext}}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{\text{Ciel}}^4 - T_B^4) + S h_{\text{conv amb}} (T_{\text{amb}} - T_B) \quad (37)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (38)$$

$$h_{\text{conv amb}} = 2.8 + 3.3 V_{\text{Vent}} \quad (39)$$

$$T_{\text{Ciel}} = 0.0552 T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (40)$$

Le bilan énergétique d'une zone de l'habitat représenté par un nœud est un modèle de bilan de l'air de la zone, ce qui représente la capacité thermique du volume d'air de la zone. Le bilan de puissance de la construction d'une zone est représenté par l'équation ci-dessous qui constitue la variation de l'énergie de l'air de la zone dans l'intervalle de temps dt:

$$\rho_{\text{air}} C_{\text{air}} V_{\text{air}} \frac{dT_{\text{air}}}{dt} = Q_{\text{Gain}} + Q_{\text{Surf}} + Q_{\text{Chauffage}} + Q_{\text{Rafraichissement}} + Q_{\text{Inf}} + Q_{\text{Vent}} \quad (41)$$

Les conditions aux limites du système comprennent les nœuds de la surface intérieure, y compris les flux d'énergie radiative. Nous notons également que l'énergie d'une couche active et l'énergie

stockée dans les murs ne font pas partie de ce bilan énergétique, mais ils font partie du bilan détaillé de surfaces.

Les taux de transfert d'énergie thermique de l'infiltration et de l'écoulement de l'air de ventilation sont respectivement calculés par les équations suivantes :

$$\dot{Q}_{\text{Inf}} = \dot{m}_{\text{Inf}} C_{\text{air}} (T_{\text{air}} - T_{\text{ext}}) \quad (42)$$

$$\dot{Q}_{\text{Vent}} = \dot{m}_{\text{Vent}} C_p (T_{\text{Vent, ext}} - T_{\text{Vent, int}}) \quad (43)$$

L'énergie thermique due à l'échange entre l'air et les surfaces intérieures des murs est calculées par l'équation suivante:

$$Q_{\text{Surf}} = \sum S h_{\text{Conv}} (T_{\text{Surf}} - T_{\text{air}}) \quad (44)$$

La convection naturelle se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide (l'air). De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Le transfert thermique dans une couche de fluide s'effectue par la conduction thermique et le mouvement du fluide. Quand on commence à imposer un gradient thermique entre les surfaces de la couche, un gradient de la masse volumique s'installe. Expérimentalement, on observe qu'au bout d'un certain temps, le fluide se met en mouvement spontanément : c'est le démarrage de la convection. Celui-ci est déterminé par un nombre sans dimension appelé nombre de Rayleigh R_a sans dimension.

Description de la surface	Régime d'écoulement	Domaine de validité $R_a = Gr Pr$	Expression
Mur vertical	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{\text{Conv}} = 1,42 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{\text{Conv}} = 1,31 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface supérieure d'une plaque chaude horizontale ou surface inférieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{\text{Conv}} = 1,32 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{\text{Conv}} = 1,52 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface inférieure d'une plaque chaude ou surface supérieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{\text{Conv}} = 0,59 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	

Tableau 1: Expression des coefficients de transfert convectifs

2.8.2. Structure nodale et description de l'habitat

La construction proposée est composée d'un certain nombre de pièces, de parois, de portes et de fenêtres en verre. La scission de l'habitat en zones thermiques induit la création de nœuds de température par zone. Un certain nombre de champs d'information sont connectés à un nœud, traduisant par exemple l'affectation d'un nœud dans une zone ou encore de la topologie du réseau électrique global associé à la maison. Nous avons attribué un type à chaque nœud. En

effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Par exemple, un nœud qui représente un mur va concerner les termes de conduction de la chaleur. Ce même nœud, en fonction de sa situation, peut également concerner des processus de convection. Sur la face externe de la paroi de l'enveloppe, le nœud de surface est affecté par les radiations extérieures et les échanges convectifs. Nous devons noter que la taille de cette structure peut rapidement devenir importante dans la mesure où ce bâtiment est divisé en plusieurs zones et chaque zone possède plusieurs murs et fenêtres de verre. La taille de cette structure étant liée aux dimensions des systèmes à résoudre, la notion de temps de calcul ne doit pas être négligée.

Notre étude a été réalisée sur un habitat à Ghardaïa où l'enveloppe extérieure, en plus de contribuer aux économies d'énergie pendant toute la durée de vie du bâtiment, en contrôlant l'échange d'énergie entre l'espace intérieur et l'environnement, favorise également le développement d'un environnement intérieur confortable. La maison a une surface habitable de 71,3 m² et la hauteur des murs égale à 2,8 m, tandis que les autres dimensions sont représentées en détail dans sur la figure 3. Les fenêtres et les portes contribuent de manière significative à l'équilibre énergétique. Leurs contributions dépendent de plusieurs paramètres comme: le climat, l'orientation, le cadre et la surface relative locale (fenêtre-sol). L'appartement est d'une superficie de 95,74 m² avec un espace de vie de 71,3 m².

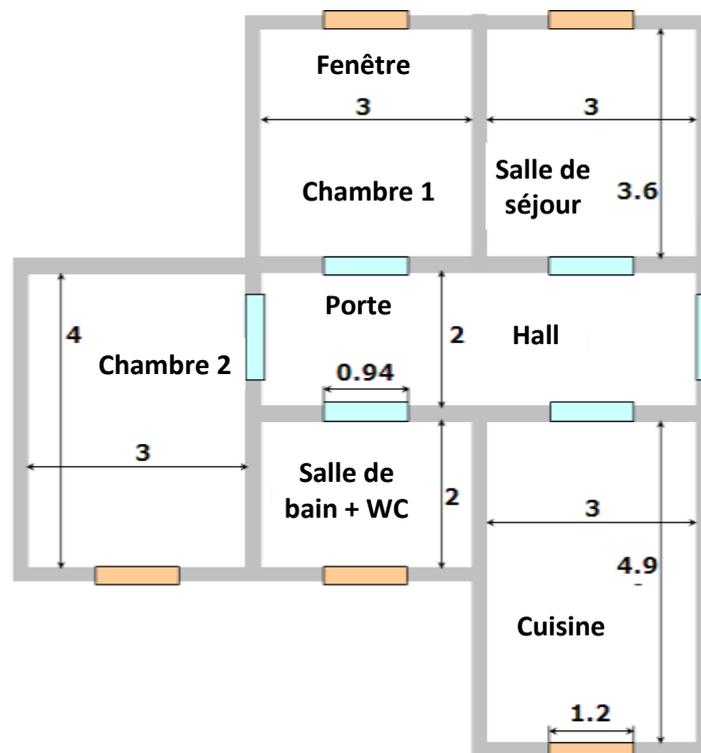


Figure 7: plan descriptif de la maison

Un certain nombre d'information sont connectés à un nœud type, traduisant par exemple l'affectation de ce nœud dans une zone ou encore de la topologie du réseau électrique global

associé. En effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Ensuite, il apparaît nécessaire d'attribuer un type à chaque nœud. Le tableau 2 indique les types de nœuds rencontrés.

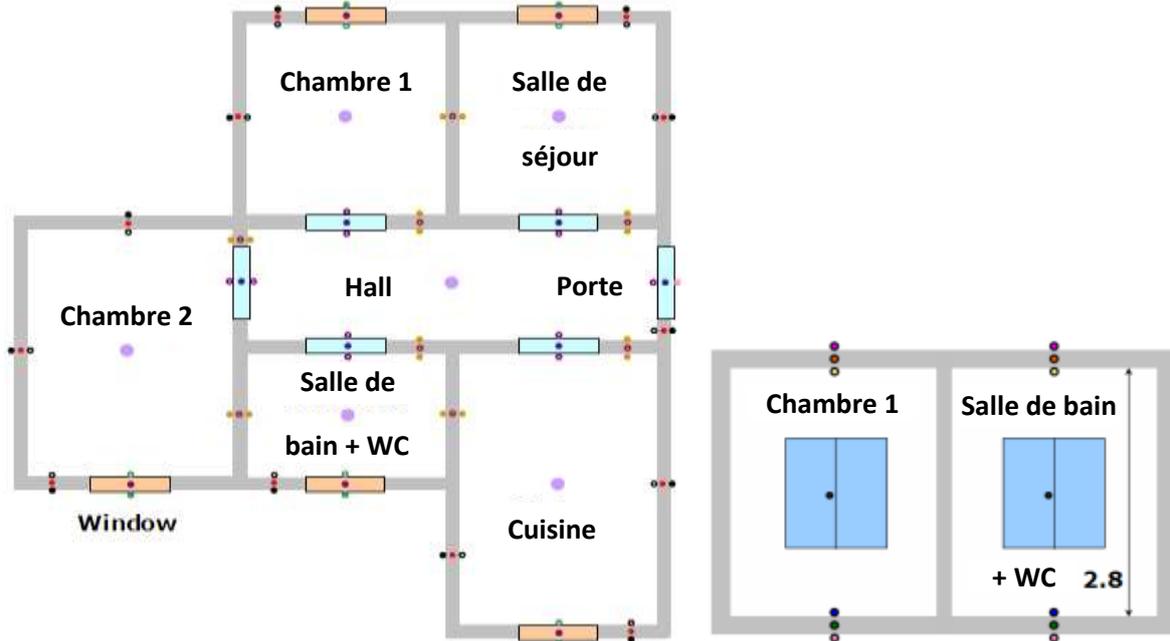


Figure 8: types de nœuds et structure zonale

Noeud	Type
●	surface extérieure du mur extérieur
●	interne de la paroi du mur extérieur
○	surface intérieure de la paroi du mur extérieur
●	surface extérieure de la fenêtre
●	interne de la fenêtre
○	surface intérieure de la fenêtre
○	surface intérieure de la porte à l'intérieur et à l'extérieur
○	surface extérieure de la porte de l'intérieur
○	surface extérieure de la porte de l'extérieur
●	interne à l'intérieur et à l'extérieur de la porte
●	surface extérieure de la porte extérieure
●	air sec intérieur
●	surface extérieure et intérieure du mur intérieur
○	interne du mur intérieur
●	surface de terrain (sol intérieur)
●	interne de terrain (sol intérieur)
○	relatif à une profondeur imposée au dessous du nœud interne
●	surface extérieure du toit exposé
●	interne du toit exposé
○	surface intérieure du toit exposé

Tableau 2: couleurs et type de nœuds

Pour un bâtiment donné, lorsque la structure de nœud est établie, il est facile de remplir chaque élément du modèle mathématique. En effet, il suffit de balayer la structure de nœuds et d'attribuer les termes pertinents.

Pour cette habitation, l'enveloppe de la paroi extérieure est constituée d'une structure lourde en pierre (40 cm d'épaisseur) entourée de deux couches ayant une épaisseur de 1,5 cm de ciment de mortier. La face interne est revêtue d'une couche de plâtre de 1 cm d'épaisseur. Les parois internes (ou murs de séparation) sont considérées comme structures lourdes en pierre de 15 cm de largeur, entourées de deux couches de mortier de ciment de 1,5 cm d'épaisseur et deux couches d'1 cm d'épaisseur de plâtre.

Les fenêtres doivent être conçues de façon à supprimer les fuites d'air. Les caractéristiques utilisées sont indiquées dans le tableau 3.

Si l'on considère que l'habitat est mal isolé, nous utilisons la valeur U dans le premier cas et si l'isolation thermique est renforcée, nous utilisons les valeurs du deuxième cas. Pour notre étude, nous considérons que la composition de fenêtre comprend en plus de la configuration donnée dans le tableau 4, les stores en bois habituellement séparés de la configuration précédente par un espace d'air de 2 cm. Nous supposons que les transferts de chaleur à travers les murs, les portes et les fenêtres sont unidirectionnels et perpendiculaires à ces parois.

		Matériel et composition des murs	L m	λ Wm ⁻¹ K ⁻¹	ρ kg m ⁻³	Cp J kg ⁻¹ K ⁻¹
Murs extérieurs	mur type 1	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
		Pierre	0,4	2,3	2000	1000
		Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
	mur type 2	Plâtre	0,01	0,56	1400	1000
		Plâtre	0,015	0,56	1400	1000
		Brique	0,3	0,81	1800	835
		Plâtre argile	0,005	0,45	1200	840
Murs intérieurs	mur type 1	Mortier de ciment	0,015	1,41	1800	1000
		Plâtre argile	0,01	0,45	1200	840
		Pierre	0,15	2,3	2000	1000
		Plâtre argile	0,01	0,45	1800	1000
	mur type 2	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
		Plâtre argile	0,01	0,45	1200	840
		Brique	0,2	0,81	1800	835
		Plâtre argile	0,01	0,45	1200	840
Rez-de-chaussée (sol)		Carrelages	0,025	6,14	2300	875
		Ciment	0,02	1,4	1800	1000
		Béton dense	0,2	2,4	2400	800
Toiture (plafond)		Plâtre	0,015	0,56	1400	1000
		Béton léger	0,12	0,33	800	719
		Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000

Tableau 3: Propriétés thermiques, épaisseurs des murs et caractéristiques de l'enveloppe

Type de Verre		U-Valeur
Verre plat Cas 1: sans isolation thermique	Vitrage simple, clair Pour toutes les fenêtres	5.91
Verre double Cas 2: avec isolation thermique	Double vitrage, claire, 12,5 mm d'espace entre vitres Pour WC et salle de bain	3.18
	Double vitrage, avec revêtement à faible émissivité de $e = 0,20$ pour les salles 1 et 2, cuisine et salon	2.21

Tableau 4: Propriétés thermiques, épaisseurs et caractéristiques du verre pour fenêtres

Cependant, les portes sont en bois d'une épaisseur de 2 cm: $\lambda = 0,14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho = 500 \text{ kg m}^{-3}$ et $C_p = 2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. (λ , ρ et C_p étant respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique).

[10-13]

Nomenclature

- C_w : matrice diagonale de capacité thermique (J K^{-1})
- T_w : température (K)
- A_w : matrice carrée de conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- B_w : vecteur
- e : épaisseur (m)
- n : nombre de nœud
- α : coefficient d'absorption
- ε : émissivité thermique
- G : Eclairage solaire incident sur les surfaces (w m^{-2})
- S : surface (m^2)
- λ : conductivité thermique ($\text{W k}^{-1} \text{m}^{-1}$)
- C_p : Chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- ρ : densité (kg m^{-3})
- F : facteur de forme entre les surfaces d'échange
- σ : Constante de Stéphane-Boltzmann ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)
- V_{vent} : vitesse du vent (m s^{-1})
- h_{Conv} : coefficient de flux de chaleur échangé par convection ($\text{w m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- T : température (K)
- ρ_{air} : densité de l'air (kg m^{-3})

C_{air}	: la chaleur spécifique de l'air est supposée constante et estimée à $1008 \text{ (m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}, \text{ j kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$
V_{air}	: volume d'air (m^3)
$Q_{\text{Chauffage}}$: la puissance thermique fournie par un appareil de chauffage (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source d'énergie.
$Q_{\text{Rafraichissement}}$: puissance thermique fournie par l'équipement de refroidissement (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source de refroidissement.
Q_{inf}	: gain de puissance thermique due à l'infiltration de l'air (p).
Q_{Vent}	: gain de puissance thermique due à la ventilation de l'air (p).
Q_{Surf}	: puissance thermique due à l'échange entre l'air et les murs surfaces intérieures (i), les fenêtres (ii) et les portes (w).
Q_{Gain}	: gain d'énergie solaire directe grâce à des ouvertures (w), il est supposé que les ouvertures sont fermées, par conséquent, elle est égale à 0.
\dot{m}_{inf}	: débit d'air due à l'infiltration (kg / s)
\dot{m}_{Vent}	: circulation de l'air due à la ventilation (kg / s)
T_i	: température de l'air à l'intérieur du bâtiment (K)
T_{out}	: température de l'air à l'extérieur du bâtiment (K)
$T_{\text{Vent,ext}}$: température de l'air à la sortie de ventilation (K)
$T_{\text{Vent,int}}$: température de l'air à la ventilation d'entrée (K)
T_{Surf}	: température air- surfaces intérieures des murs (K)
h_{Conv}	: coefficient de transfert convectif ($w \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
Gr	: nombre de Grashof
Pr	: nombre de Prandtl
L	: longueur de la plaque (m)
ΔT	: différence de température entre les surfaces et l'échange de volumes (K)

Références

- [01] : S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique, Université de Tlemcen, Juin 2009.
- [02] : Louche, Iqbal et al, Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct total solar irradiance measurements, *Solar Energy*, 38, 2, 1987.
- [03] : Gueymard, Mathematically integrable parametrization of clear sky beam and global irradiances and its use, *Solar Energy*, 50, 5, 1993.
- [04] : Adeyefa, Holmgren, Adedoku, Spectral solar radiation measurements and turbidity: comparative studies, *Solar Energy*, 60, 1, 1997.
- [05] : Gaymard & Vignola, Determination of atm. turbidity from the diffuse-beam broadband irradiance ratio, *Solar Energy*, 63, 3, 1998.
- [06] : Grenier, Casinière et Cabot, A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications, *Solar Energy*, 52, 4, 1994.
- [07] : Louche et al, An analysis of Linke turbidity factor, *Solar Energy*, 37, 6, 1986.
- [08] : Kasten, The linke turbidity factor based on improved values of the integral rayleigh optical thickness, *Solar Energy*, 56, 3, 1996.
- [09] : P. Rumianowski, J. Brau, et J.J Roux, An Adapted Model for Simulation of the Interaction Between a Wall and the Building Heating System. In Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference Orlando, USA, p. 224-233, 1989.
- [10] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N Benamrane, Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, *Energy and Buildings* vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [11] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, R. M Yaiche, R. Khanniche (2013), Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), *International Scientific Journal, Thermal Science*, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349-364.
- [12] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. R. Yaiche, M. K. Cherier, M. Hamdani, F. Chellali, Introduction to Control of Solar Gain and Internal Temperatures by Thermal Insulation, Proper Orientation and Eaves, Elsevier, *Energy and Buildings* vol.43 (2011) pp. 2414–2421.
- [13] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz and A. Cheknane (2009), A Modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building, *Thermal Science: Vol. 13 (2009), No. 4*, pp. 233-244.

Chapitre 3

Contribution de la Compacité à l'Amélioration des Températures Intérieures d'une Habitation Multizone

CHAPITRE 3

CONTRIBUTION DE LA COMPACITE A L'AMELIORATION DES TEMPERATURES INTERIEURES D'UNE HABITATION MULTIZONE

3.1. Introduction

À l'heure actuelle, la prise en compte du développement durable apparaît comme une donnée incontournable dans le secteur du bâtiment, qui compte parmi les secteurs économiques les plus gros consommateurs en énergie. Il représente plus de 40 % des consommations énergétiques nationales. Les conditions climatiques ne correspondent pas souvent aux zones de confort. On utilise alors différents moyens afin que le climat intérieur se différencie du climat extérieur et assure le confort. Avant de recourir au chauffage ou à la climatisation, de nombreuses possibilités sont utilisables: utiliser les gains internes, favoriser les apports solaires passifs, augmenter la masse thermique du bâtiment, ventiler la nuit [01]. Pour limiter donc la consommation d'énergie à des valeurs raisonnables, il est nécessaire de savoir où agir. La connaissance des flux d'énergie donc au travers d'un bâtiment est nécessaire à la prise de décisions ou à la planification de travaux. Si nous nous contentons des performances basées sur la réglementation thermique en vigueur pour viser la maison de demain, il est recommandé d'appliquer le concept de maison à basse énergie qui accorde une grande importance à la compacité.

Sauf exceptions, chaque bâtiment est un prototype unique pour lequel l'étude expérimentale de sa conception est irréalisable en pratique. Par conséquent, la conception des bâtiments, et plus précisément l'évaluation de ses performances thermiques doit être assistée par la modélisation des phénomènes physiques [02]. La compacité du bâtiment est primordiale dans la conception climatique. Il faut comprendre que les murs ou enveloppe ne sont rien d'autre que des radiateurs en été et des radiateurs inversés en hiver. Ils constituent la surface d'échange avec l'extérieur. L'objectif est de limiter la surface d'échange par rapport au volume intérieur. Rien de bien compliqué derrière ce concept de compacité. La performance thermique d'une maison passe donc par la connaissance de son coefficient de forme qui révèle la compacité du bâtiment. Cet indice est le rapport entre la surface de l'enveloppe en contact avec l'extérieur et le volume du bâtiment.

La compacité est un critère d'évaluation thermique intéressant mais délicat à appliquer car il dépend de plusieurs facteurs. La forme de chaque construction est l'élément essentiel du calcul du facteur de compacité dont l'objectif doit uniquement rester l'orientation des concepteurs vers les solutions à privilégier. Ce mémoire s'adresse aussi aux scientifiques et architectes praticiens en

souhaitant d'apporter des connaissances et des outils de travail simples et performants qui leur permettront d'intégrer dès la conception du projet les meilleures formes géométriques de la future construction. Le but donc est de chercher vers quelle forme d'enveloppe dois-je m'orienter pour faire ma maison passive ?

3.2. Isolation thermique : solution technique pouvant être apportée à l'enveloppe du bâtiment

De nos jours, l'enveloppe du bâtiment est l'un des postes les plus concernés par la réglementation. Plusieurs études sur l'isolation, l'inertie thermique et les enveloppes passives ont été menées afin de créer des perspectives d'application sur les bâtiments.

Al-Houmoud [03] et Okba [04] ont mené deux études portant sur l'intérêt de l'isolation de l'enveloppe. Il a été montré que dans les régions caractérisées par des climats chauds, l'isolation de la toiture est plus recommandée que celle des murs et planchers, car elle est la plus exposée au rayonnement solaire direct en été pendant toute la journée. Les auteurs ont souligné la préférence de certains matériaux d'isolation par rapport à d'autres et la manière dont sont disposées les couches d'isolant. Certes, ces investigations ont été conduites pour des constructions n'étant pas dans un climat froid. Néanmoins, ces travaux ont apporté une valeur ajoutée quant à l'efficacité énergétique d'une enveloppe isolée et son impact sur la performance énergétique du bâtiment. Ceci est valable quelles que soient les conditions extérieures. Il a été conclu que la toiture doit être soigneusement isolée et ce pour les climats chauds et froids.

Par conséquent, nous pouvons conclure que l'isolation thermique et la compacité vont de pair, le couplage de ces deux solutions technique permet de se rapprocher plus du confort et apporter des améliorations efficaces de l'ambiance intérieure de l'habitat.

Nous devons étudier le développement de la façade du bâtiment de manière :

- à limiter les déperditions de chaleur durant la saison de chauffe (limiter les surfaces déperditives),
- à profiter des apports solaires en hiver (limiter l'ombrage des fenêtres),
- à limiter les apports solaires en été (favoriser l'ombrage des fenêtres).

Tout au long de son projet, l'auteur de projet sera attentif à l'évolution du ratio " surface des parois extérieures / volume habitable " pour éviter toute dérive.

Par exemple, des cages d'escalier ouvertes mais insérées dans le volume du bâtiment peuvent démultiplier la surface déperditive du bâtiment de plus de 15% et entraîner une surconsommation de l'ordre de 5 à 10 %. Les balcons, parapets doivent être étudiés pour ombrer les fenêtres en été et permettre un apport solaire maximal en hiver.

3.3. Méthodes de modélisation énergétique

Même si un modèle est une représentation simplifiée de la physique du système réel, sa construction reste une tâche délicate. Dans ce sens, de nombreux auteurs Karnopp [05] par exemple, se sont penchés sur la question de modélisation globale de l'énergétique du bâtiment, l'enjeu étant de choisir la méthode la mieux adaptée. En fonction de la finalité des modèles et de la complexité du calcul, différentes méthodes de modélisation ont été employées. Ces méthodes ont des degrés variables de finesse, de flexibilité et de réutilisabilité. Dans ce qui suit, nous menons une étude bibliographique comparative des méthodes de modélisation applicables dans l'étude de l'énergétique du bâtiment.

3.3.1. Modèle de Givoni

La méthode de modélisation de Krüger et Givoni consiste à prédire la température intérieure du bâtiment à partir des données météorologiques sans tenir compte des propriétés thermo-physiques de l'enveloppe [06]. Des corrélations ont donc été développées afin de prédire le niveau du confort thermique. En 1993, Givoni [07] a proposé un modèle pouvant estimer la température intérieure maximale journalière des maisons individuelles inoccupées. La température intérieure journalière est fonction seulement de la température moyenne extérieure dépendant de la saison. Un bon accord entre les résultats de calcul et les mesures a été constaté [08].

Afin d'étendre cette méthode de modélisation pour des maisons occupées, Krüger et Givoni [06] ont conduit une étude expérimentale et numérique sur trois maisons individuelles occupées situées à Curitiba (Brésil). Les essais expérimentaux ont été effectués pendant une période estivale (septembre) et une période hivernale (décembre). Les corrélations, donnant les températures intérieures minimale, maximale et moyenne, ont montré une bonne approximation avec les résultats de simulation issus de l'outil de simulation de la thermique du bâtiment COMFIE Pleiade [08].

La méthode de Givoni a été suivie par plusieurs auteurs : Freire et al. [09], Fernández-González et al. [10] et Singh et al. [11]. Il a été démontré que lorsque les mesures expérimentales sont disponibles, la méthode de Givoni est la plus adaptée pour prédire la performance thermique d'un bâtiment spécifique. Bien que la méthode de Givoni soit simple et précise, elle n'est applicable que lorsqu'une étude expérimentale est réalisée, et qui fera l'objet d'une analyse de régression. Cette démarche nécessite du temps, des moyens de mesure importants et de la précision. De plus, elle n'est valable qu'aux bâtiments sur lesquels les mesures ont été effectuées. Différentes questions se posent : sur quelle base les corrélations ont été obtenues ? Est-ce à partir d'un raisonnement physique, ou la concordance des résultats suffit pour juger l'adaptation de la méthode ?

L'inconvénient principal est que ce type de modèles est assez limité du fait qu'il ne fournit que peu d'informations sur le comportement thermique du bâtiment (température intérieure journalière uniquement). Alors que le profil horaire de la température et la puissance nécessaire du chauffage sont des données importantes pour évaluer la consommation énergétique du bâtiment.

3.3.2. Modèle de plan d'expériences

Cette méthode de modélisation présente un grand intérêt pour des études paramétriques en énergétique du bâtiment et plus précisément pour des études d'optimisation. Un plan d'expériences est une suite de simulations numériques organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses. Ceci conduit à un modèle mathématique comportant les variables les plus influentes du système. Cette méthode est applicable à partir du moment où l'on recherche le lien entre une réponse Y , et des variables X_i , qui peuvent influencer la valeur de Y .

Ce lien se traduit en général par un polynôme de la forme $Y = f(X_i)$ [12-13].

Les plans d'expériences ont leur propre terminologie [12-13]. Plusieurs études d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments, utilisant les plans d'expériences comme outil de modélisation, ont été réalisées. Flifli [14] a mené une étude d'optimisation énergétique du bâtiment. Un modèle polynomial, basé sur les plans d'expériences, a été développé. L'objectif est de déterminer les meilleures combinaisons de solutions techniques existantes ou émergentes permettant une réduction de la facture énergétique. L'étude a été menée sur deux secteurs principaux des bâtiments tertiaires : bâtiments de bureaux et bâtiments de santé. Flifli a mis en évidence l'efficacité de cette méthode à travers la détermination de la répercussion de chaque paramètre (isolation de l'enveloppe, équipements énergétiques, etc.) sur la consommation énergétique. Une étude d'optimisation a été également conduite. Ses constatations ont été rapportées par Jaffal et al. [15].

3.3.3 Modèles de connaissance

Ces modèles sont généralement basés sur une discrétisation zonale du volume d'air et une résolution des équations du bilan d'énergie, de masse et des espèces au sein des zones et à la surface des parois du bâtiment.

Suivant le niveau de discrétisation, on peut en distinguer quatre catégories:

- modèles monozones ;
- modèles multizones ;
- modèles zonaux ;
- modèles de codes de champs (CFD) ;

a. Modèles monozones

Les modèles monozones sont des modèles simples. On considère le bâtiment comme une seule zone ayant des propriétés physiques uniformes. Ils nécessitent très peu d'informations liées à l'enveloppe ou aux systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de ventilation. Par conséquent, ils permettent d'avoir un ordre de grandeur sur les consommations énergétiques. Néanmoins, ils ne sont pas adaptés aux évaluations du confort. De plus, ils s'avèrent très insuffisants si des écarts importants de température existent entre les différentes parties du bâtiment (cas des atriums) ou si une information plus locale est demandée [02-08].

b. Modèles multizones

Particulièrement adaptés pour simuler le mouvement de l'air et la distribution des espèces (polluants divers, vapeur d'eau...), les modèles multizones traitent le bâtiment comme un ensemble de zones parfaitement et instantanément mélangées [02-08]. Ils prédisent le comportement thermique et aéraulique du bâtiment grâce à une application des équations de conservation de la masse, de l'énergie et des espèces. Ces modèles ont été utilisés pour le dimensionnement des systèmes de ventilation, l'étude et l'analyse des mouvements de l'air intérieur et la simulation aéraulique des fumées en cas d'incendie.

Cependant, à l'instar des modèles monozones, de fortes hypothèses, relatives à l'homogénéisation de l'air intérieur, ont été adoptées. En effet, ces modèles rencontrent des limites dans le cas d'une forte hétérogénéité de l'air à l'intérieur de la zone notamment pour les bâtiments ayant des espaces internes volumineux [16].

c. Modèles zonaux

L'hypothèse d'homogénéisation des propriétés physiques utilisée par les modèles monozones et multizones n'est pas valide pour les bâtiments ayant des grands espaces intérieurs où une stratification de l'air est engendrée. Pour pallier à ce problème, la méthode zonale est utilisée. Cette méthode consiste à décomposer la zone elle-même en un petit nombre de volumes (généralement inférieure à 1000 cellules) sous forme cubique ou parallélépipédique. Ainsi, elle permet de décrire le comportement énergétique au sein du bâtiment d'un niveau plus détaillé que celui des deux catégories précédentes. Une résolution des équations de conservation de la masse et de l'énergie, appliquées sur chaque cellule, est réalisée pour déterminer les propriétés de l'air intérieur [16].

La prédiction du comportement thermique et aéraulique des bâtiments par la méthode zonale a été étudiée par plusieurs auteurs. Song et al. [17] a conduit une étude numérique de prédiction de la température intérieure, l'humidité relative et la concentration des polluants d'une chambre ventilée. La chambre étudiée a été décomposée en 18 cellules. La température

adimensionnelle calculée par la méthode zonale et par un code de calcul CFD a été comparée pour chaque cellule. Cette comparaison a montré la performance de cette méthode de modélisation à prédire le comportement thermique du bâtiment avec un bon niveau de précision. Ces constatations ont été rapportées par la suite par Chen [18]. Parallèlement, des investigations numériques pour évaluer les débits d'air au niveau du bâtiment ont été aussi réalisées (voir [19] et [02]). Plus tard, Jiru et al. [20] a utilisé un modèle zonal pour évaluer le débit de l'air et la différence de température entre l'entrée et la sortie de la façade double peau. Le modèle a été validé par les mesures. Il a été démontré que la différence de température de l'air à l'entrée et à la sortie de la façade est proportionnelle à la hauteur.

d. Modèles de code de champ (CFD)

Parmi les modèles de connaissance déjà cités, aucun n'offre la possibilité de détailler la physique du bâtiment avec un niveau de précision aussi élevé que celui des modèles de code de champs (CFD). Les modèles CFD se basent sur une résolution numérique des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces, permettant de suivre en détail l'évolution des mouvements d'air, de température intérieure, de la pression et de l'humidité relative. Les modèles CFD ont été largement utilisés pour étudier le comportement thermique et aérodynamique des bâtiments (tertiaires et résidentiels).

Chen [18] a recensé le nombre de travaux de recherche publiés utilisant l'approche CFD pour les phénomènes énergétiques au sein du bâtiment. Environ 70 % des investigations utilisent l'approche CFD. Norton et al. [21-22] a répertorié les différentes applications des modèles CFD dans le cas de la ventilation des locaux. Actuellement, la majeure partie des études, portant sur la prédiction du confort thermique et aérodynamique dans les bâtiments, utilisent l'approche CFD. L'inconvénient principal de cette catégorie de modèles de connaissance est le temps de calcul important et la nécessité de machines de calcul puissantes.

3.4. Situation, climat et potentiel solaire de Ghardaïa

La Wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie Nord du Sahara à 32° 30 de l'altitude Nord et à 3° 45 de longitude. Elle est issue du découpage administratif du territoire de 1984. Ghardaïa, oasis sahariennes situées au Sud de la capitale (600 Km). Elle est limitée : au Nord par la Wilaya de Laghouat (200 Km); au Nord Est par la Wilaya de Djelfa (300 Km); à l'Est par la Wilaya d'Ouargla (200 Km); au Sud par la Wilaya de Tamanrasset (1.470 Km); au Sud- Ouest par la Wilaya d'Adrar (400 Km); à l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayadh (350 Km).

La Wilaya couvre une superficie de 86.560 Km², constitue de régions connues par un climat aride caractérisé par le manque des précipitations (160 mm/an) et la raréfaction des terres

agricoles, des températures diurnes très élevées en été, et des températures basses en hiver (gelées durant les mois de décembre à mi-février) [23].

Ghardaïa est parmi l'une des régions qui disposent d'un gisement solaire très important dans le territoire Algérien. Sa situation géographique lui donne une importante richesse énergétique, telle que sa fraction d'insolation atteint fréquemment des valeurs qui dépassent les 75 %, tandis que l'irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal est de l'ordre de 6000 Wh/m² en moyenne annuelle [23-26].

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'architecture solaire et bioclimatique à titre indicatif. L'énergie globale incidente sur un plan incliné est la plus appropriée que celle incidente sur un plan horizontal. Le modèle de Perrin Brichambaut est généralement le plus favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal, même s'il ne présente qu'un peu d'avantage par rapport à celui de R.sun [27].

3.5. Mise en œuvre numérique et discussion des résultats

La réalité physique se manifeste par des phénomènes simples en apparence, mais elle reste cependant complexe. Ainsi, pour mieux la comprendre, nous sommes contraints de la remplacer par de "l'invisible compliqué" qui décrit le comportement thermique des bâtiments multizones. L'énergie ne peut ni se créer ni se détruire mais uniquement se transformer d'une forme à une autre (principe de Mayer) ou être échangée d'un système à un autre (principe de Carnot). La théorie ou le modèle proposé dans ce cas est un ensemble conceptuel formalisé mathématiquement, dans lequel ces relations permettent de prédire de façon quantitative le résultat en utilisant un bilan des températures.

Le modèle proposé repose sur les hypothèses suivantes:

- Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels, perpendiculairement à ces parois.
- La convection est naturelle.
- Le régime est établi.
- La distribution de la température sur les parois est uniforme (méthode nodale).
- Les caractéristiques des matériaux sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques.
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les radiations de grandes longueurs d'ondes.

La première étape importante dans ces travaux, consiste à utiliser un modèle efficace pour l'estimation des énergies reçues sur les différentes surfaces des murs. Dans ce sens, on a choisi le de Perrin Brichambaut parce qu'il nous apparaît acceptable et adéquat au niveau de notre site.

3.5.1. Estimation des éclairements solaires incidents

Les figures 1-10 ci-dessous donnent un aperçu général sur l'évolution instantanée de l'éclairément solaire reçue par les murs opaques en contact avec l'air ambiant extérieur de la maison et ceci sous un ciel clair. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel MatLab qui est un puissant outil de calcul numérique, de programmation et de visualisation graphique. Nous construisons ensuite des fonctions d'interpolation qui nous permettent d'avoir l'expression relative de l'éclairément solaire incident et qui va être intégrée dans le programme de calcul conçu. Cette démarche s'explique par le temps d'exécution du programme de calcul qui peut devenir important: le fait d'utiliser une base de données volumineuse, on peut générer par la suite un temps de calcul très important. En mathématiques, en analyse numérique, l'interpolation polynomiale est une technique d'interpolation d'un ensemble de données ou d'une fonction par un polynôme. En d'autres termes, étant donné un ensemble de points, on cherche un polynôme qui passe par tous ces points. Le résultat est toujours à la hauteur des espérances pour notre problématique.

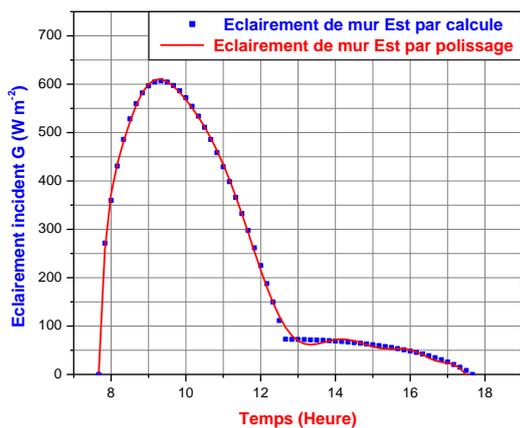


Figure 1 : Eclairément incident sur le mur Est, le 14 Décembre.

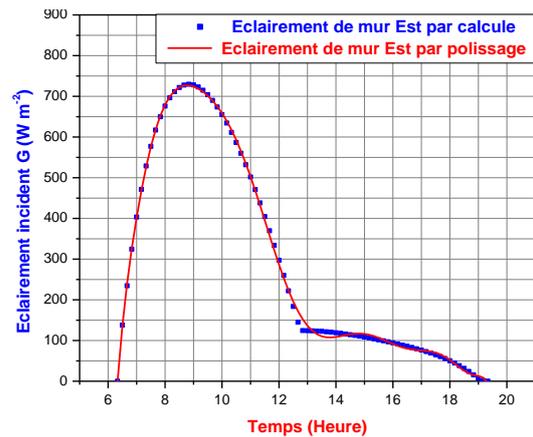


Figure 2 : Eclairément incident sur le mur Est, le 29 Août.

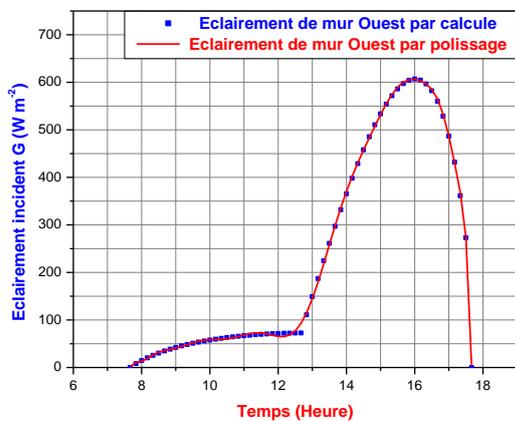


Figure 3 : Eclairément incident sur le mur Ouest, le 14 Décembre.

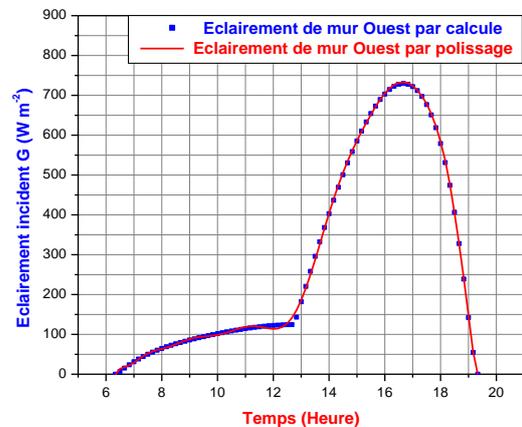


Figure 4 : Eclairément incident sur le mur Ouest, le 29 Août.

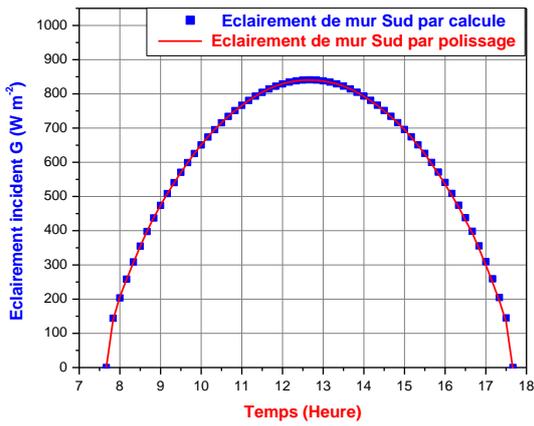


Figure 5 : Eclairement incident sur le mur Sud, le 14 Décembre.

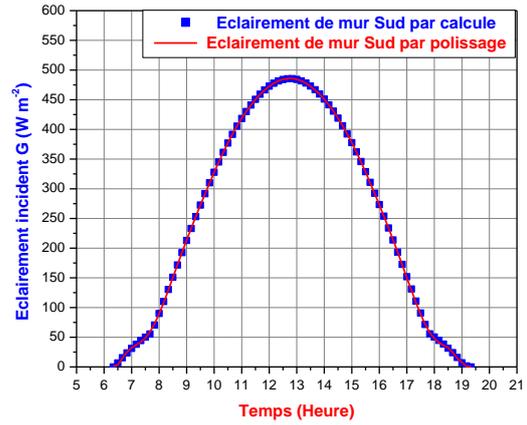


Figure 6 : Eclairement incident sur le mur Sud, le 29 Août.

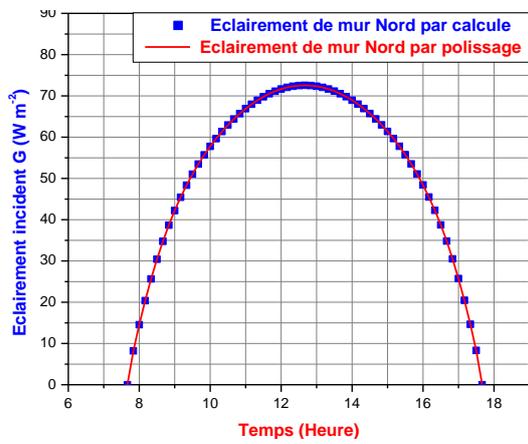


Figure 7 : Eclairement incident sur le mur Sud, le 14 Décembre.

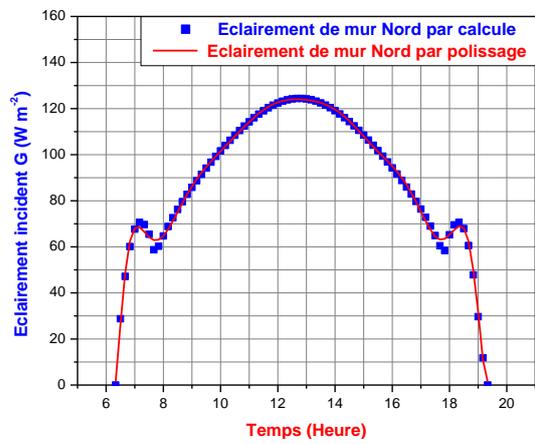


Figure 8 : Eclairement incident sur le mur Sud, le 29 Août.

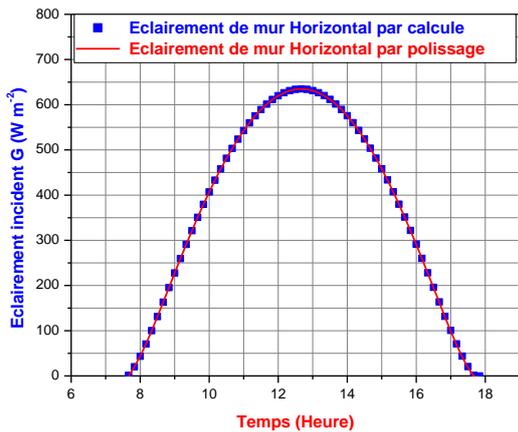


Figure 9 : Eclairement incident sur le mur Sud, le 14 Décembre.

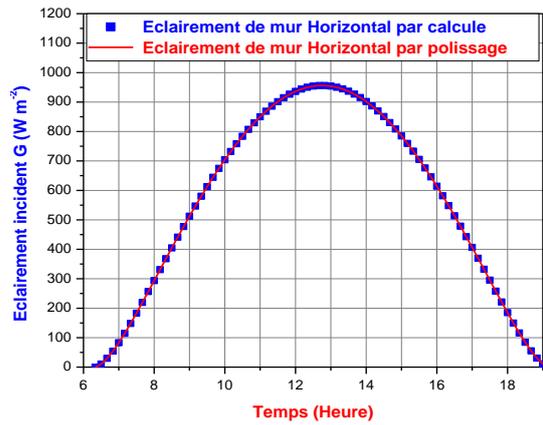


Figure 10 : Eclairement incident sur le mur Sud, le 29 Août.

L'évolution horaire du rayonnement donne des indications précieuses. Elle permet de connaître à quelle heure, et avec quelle intensité, le soleil apparaîtra sur une façade donnée.

En hiver, on remarquera qu'une façade nord ne reçoit que du rayonnement diffus et que, vu la faible hauteur du soleil, la façade sud reçoit le plus de puissance par rapport à une toiture horizontale.

En été, c'est l'inverse, on remarque qu'une façade nord reçoit quelques rayonnements directs et que, vu la grande hauteur du soleil, une toiture horizontale reçoit le plus du soleil par rapport à une façade sud.

3.5.2. Température ambiante extérieure et vitesse du vent

La température extérieure qui se décline en température d'environnement est parmi les principaux paramètres extérieurs qui varient et qui influent tant sur les températures des parois que sur les relevés des températures de l'air intérieur. Nous utilisons toujours les fonctions d'interpolation qui vont être intégrées dans le programme de simulation.

A cet égard, nous avons choisi quatre jours correspondant au site de Ghardaïa; deux appartiennent à la période estivale de l'année 2013 et les deux autres font partie de la période hivernale de la même année. Les figures 11-12 décrivent explicitement le comportement de ces courbes.

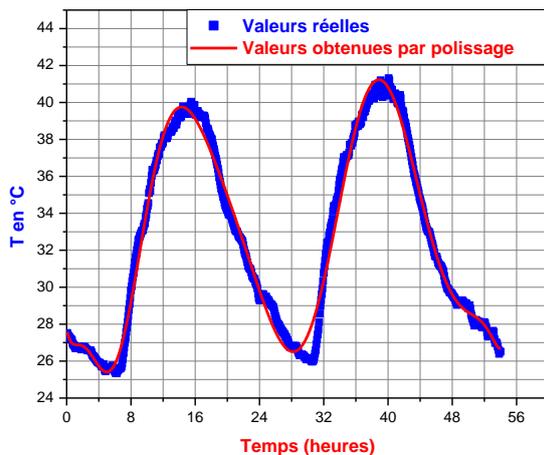


Figure 11 : Température ambiante, Ghardaïa, les 29-30 Août 2013.

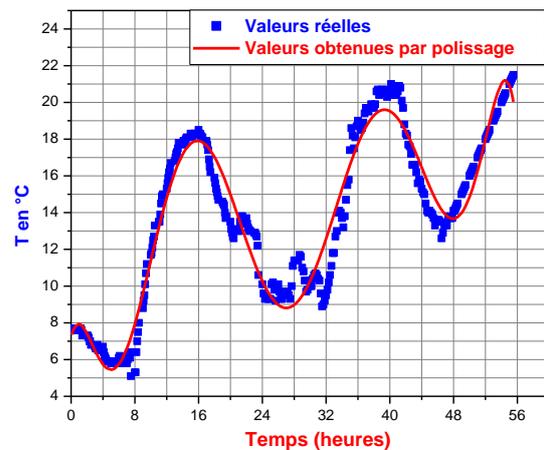


Figure 12 : Température ambiante, Ghardaïa, les 14-15 Décembre 2013.

On s'intéresse aussi à la vitesse du vent qui fait partie du bilan global de l'habitat. Le vent est par définition le mouvement au sein d'une atmosphère, masse de gaz située à la surface d'une planète, d'une partie de ce gaz. Les vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire), et par la rotation de la planète. Sur Terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologiques. Le vent fait le plus souvent référence aux mouvements de l'air dans l'atmosphère terrestre. Les figures 13-14 donnent une idée sur ce paramètre déterminant.

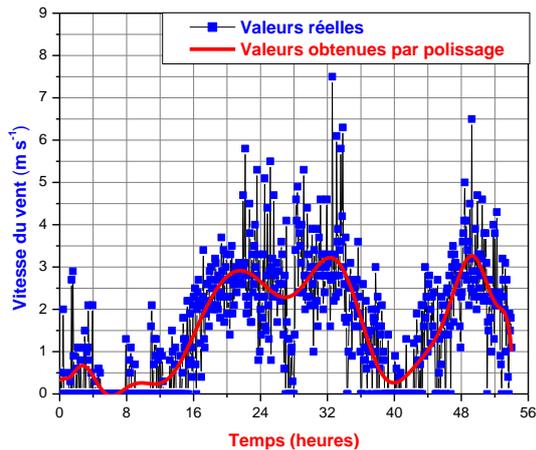


Figure 13 : Vitesse du vent, Ghardaïa, les 29-30 Août 2013.

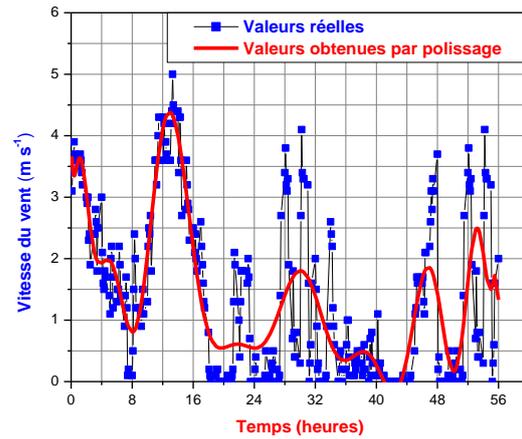


Figure 14 : Température ambiante, Ghardaïa, les 14-15 Décembre 2013.

Le vent accélère l'échange thermique puisqu'il naît sous l'effet des différences de températures et de pression. C'est un flux d'air: l'air chaud et léger monte, l'air froid et lourd descend. Le mouvement de l'air, comme de la grande roue, est circulaire. C'est un mouvement perpétuel: l'air monte et descend, il se réchauffe et se refroidit.

3.5.3. Simulation des températures multizones

La modélisation d'un bâtiment dans sa globalité est en général constituée d'un réseau complexe de résistances et de capacités thermiques entre les différentes zones internes du bâtiment et entre ces zones et l'environnement proche du bâtiment. Différents types d'outils sont utilisés en physique du bâtiment. Leur utilisation dépend principalement des étapes de la conception du projet.

En raison du coût et des durées expérimentales, la modélisation-simulation est un moyen efficace pour mettre au point et étudier le comportement thermique des bâtiments en régime variable. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB car il présente l'avantage de posséder une bibliothèque intéressante. Olgay, malgré sa démarche clairement déterministe, reconnaissait ainsi que la modélisation dans l'architecture, dans toute sa diversité, constitue un mode d'expression privilégié du développement durable [23].

Cette modélisation nous permet de décrire l'évolution des températures intérieures de cette maison en été en en hiver. Les conditions initiales de toutes les surfaces et de l'air ont été choisies par hypothèse. En conséquence, il est légitime de disposer des méthodes numériques permettant de calculer très rapidement ces températures. La simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant. Les progrès des méthodes numériques, permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes. Conçu pour répondre à ces besoins, Runge-Kutta d'ordre 4 est une méthode numérique qui permet d'appréhender le comportement thermique des murs et de l'air soumis à

des sollicitations variées. Les courbes tracées (figures 15-16), représentent l'évolution de la température de l'air pour différentes zones.

On remarque que la température de l'air intérieur du salon est plus grande le soir et elle est par contre inférieure le matin par rapport aux températures de l'air des autres zones (à l'exception du hall de la figure 15). Ceci s'explique par le fait que les murs Sud et Est sont ceux qui ont été exposés au soleil pour la chambre 1. Par contre, pour le salon ce sont les murs Sud et le mur Ouest qui ont été exposés au rayonnement solaire. Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs de la chambre 1 est supérieure par rapport à celle absorbée par les murs exposés du salon et vice-versa.

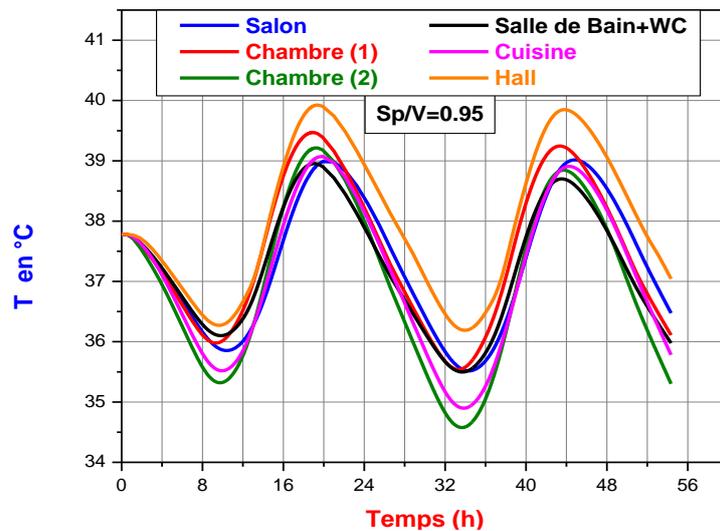


Figure 15 : Température de l'air dans différentes zones, Ghardaïa les 29-30 Août 2013.

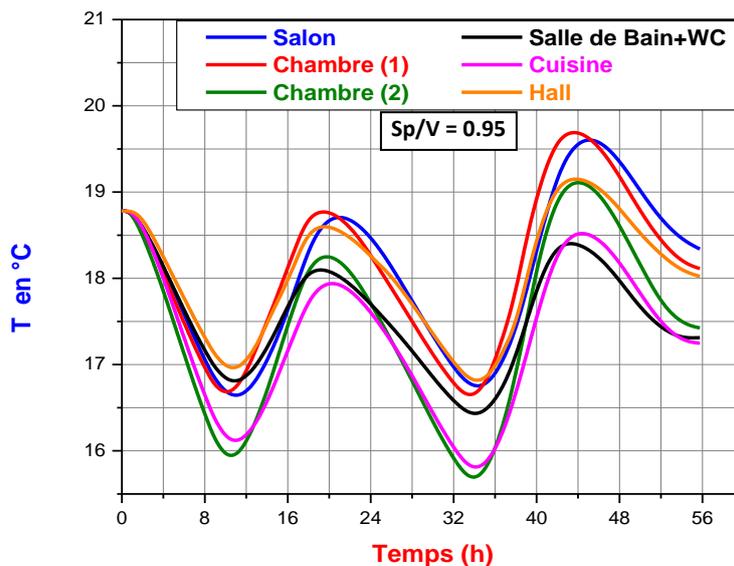


Figure 16 : Température de l'air dans différentes zones, Ghardaïa, les 14-15 Décembre 2013.

Toutefois, plusieurs travaux récents [24-30], dont certains ont été effectués par l'Equipe Architecture Solaire et Bioclimatique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, ont permis de prouver que l'enveloppe de ces types de construction est la cause principale de la grande part des déperditions incontrôlées.

Les travaux de recherche et de développement [29-35] ont permis une évolution technologique en vue de répondre aux exigences des différents programmes. Cependant, l'enveloppe joue un rôle clé dans la réduction des besoins énergétiques du bâtiment. Faisant suite à notre supposition, c'est-à-dire en considérant que la maison est inhabitée et étanche, nous pouvons conclure que : pour cet exemple, un mur en pierre, même plus de 40 cm d'épaisseur, n'empêche nullement la chaleur de traverser à l'intérieur d'un habitat. Les températures obtenues sont très élevées lors d'une période très chaude, l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe peut être obtenue par l'isolation, le traitement des ponts thermiques, la maîtrise des transferts d'air, l'amélioration des vitrages..., ce qui permet de mieux maîtriser la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage ou la climatisation.

Le tableau 1 suivant est un précieux indicateur. A travers ce dernier, nous avons apporté une analyse sur les relevées des températures.

Zone	Volume habitable en m ³	Surface exposée m ²	Indice de compacité S/V	Ecart de température entre les valeurs minimales et maximales en °C			
				Période froide		Période chaude	
				1 ^{ere} jour	2 ^{eme} jour	1 ^{ere} jour	2 ^{eme} jour
Salon	30,24	29,28	0,97	1,9	2,55	3,2	3,5
Chambre 1	30,24	29,28	0,97	1,9	2,7	3,5	3,75
Chambre 2	33,6	40	1,19	2	3,15	3,85	4,2

Tableau 1: Aspects géométriques et niveaux des fluctuations des températures intérieures

A travers les figures 15-16 et le tableau 1, on prouve qu'un mur épais en pierre lourde ralentit par son inertie, l'entrée de la chaleur. Ces murs épais possèdent un déphasage permettant de faire entrer les fluctuations des températures la nuit dans le mur puis les restituer la journée. Pour cette raison, la pierre peut devenir le matériau idéal: dense, apte à stocker et conductible pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuit fraîches. L'inertie thermique (ou la masse thermique) est le potentiel de stockage thermique d'un local ou d'une maison. En été, le bâtiment accumule la chaleur puis la restitue de manière diffuse à l'intérieur avec un décalage plus ou moins important dans le temps suivant son inertie thermique. Le déphasage représente le décalage de temps entre le pic de température extérieure et le pic de température à l'intérieur du bâtiment. Il est considéré comme un atout pour le confort d'été car il retarde le transfert de chaleur à travers les murs dans la journée. Plus un matériau est isolant plus il déphase. C'est

logique la chaleur se déplace lentement dans celui-ci. L'utilisation de la pierre contribue à donner au bâtiment une inertie. Elle favorise une plus stabilité des températures. Donc, elle offre aux maîtres d'oeuvre une réponse constructive pour réaliser des habitations bien conçues en matière de confort thermique d'été. Faisant suite à cette analyse, il faut dire qu'il est nécessaire donc d'assurer un bon couplage entre ces avantageux aspects (inertie) et une forme géométrique optimale de la construction. A travers ce tableau, on peut remarquer que

- L'augmentation de l'indice de compacité minimise la stabilité des températures intérieures de la zone.
- L'emplacement et la disposition des zones n'influent pas beaucoup sur le niveau de l'inertie de la zone.

En vue de faire des économies d'énergie, l'optimisation de la forme et la structure fonctionnelle d'un habitat en pierre à Ghardaïa doivent constituer un autre travail pertinent. La compacité d'un bâtiment est calculée comme le rapport entre le volume protégé et la surface de déperdition, l'enveloppe extérieure du bâtiment. Une bonne solution pour analyser l'effet de la géométrie de la construction sur la consommation d'énergie est d'utiliser par exemple cet indicateur.

3.5.4. Variation de la compacité : agrandissement du plan

L'objectif est de comparer la variation de la compacité par rapport à la taille à forme constante: pour une forme définie, une augmentation de la taille entraîne une augmentation de la compacité (une diminution d'indice de compacité). Dans les figures 17-18, on désigne par S la surface des cloisons et des murs opaques pour n'importe quelle zone.

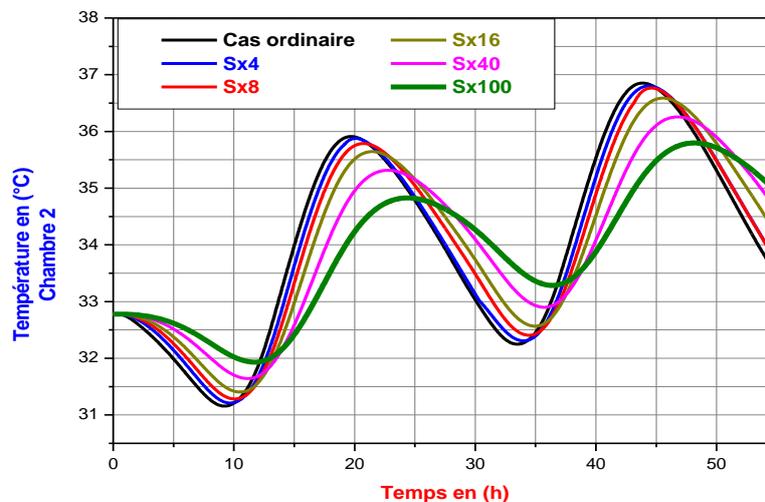


Figure 17 : Température de l'air de la salle du séjour, Ghardaïa, les 29-30 Août 2013.

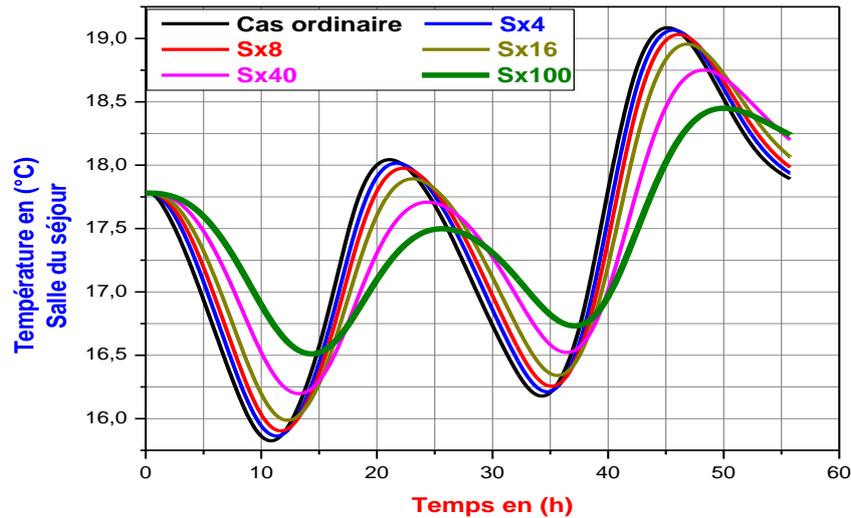


Figure 18 : Température de l'air de la salle du séjour, Ghardaïa, les 14-15 Décembre 2013.

L'écriture S x 4 par exemple spécifie le niveau d'agrandissement de chaque surface, c'est-à-dire, on multiplie chaque surface par 4. Automatiquement la hauteur, la largeur et la longueur des murs vont être multipliées par $4^{1/2}$. Ce principe reste valable pour tous les autres cas: S x 8, S x 16, S x 40 et S x 100. Les conditions initiales des températures multizones ont été radicalement changées par rapport à la figure 15 précédente. Ce changement provoque une augmentation progressive des températures intérieures.

Ces résultats ont montré que l'agrandissement est proportionnel par rapport à l'inertie thermique, l'habitation bénéficie d'une importante inertie thermique. Elle joue à la fois un rôle de stockage et de régulation. En effet, plus l'inertie d'un bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit lentement. Cette maison ne profite pas pleinement de l'inertie thermique que pourrait apporter la masse de la pierre des parois d'enveloppe à cause de sa mauvaise compacité. Les propriétés d'inertie thermique permettent donc de réduire les écarts de températures grâce à des solutions architecturales.

3.5.4. Variation de la compacité par rapport au mode de contact à forme et volume constants

Pour une même composition de paroi et pour à la fois une forme constante et un volume constant, une variation de la compacité modifie considérablement la demande d'énergie. Par exemple, passer d'une compacité de 1 à 1.5 signifie que pour un même volume, l'enveloppe de déperdition a été diminuée de $1/3$. Les pertes de chaleur par l'enveloppe auront diminué d'autant. Les figures tracées ci-dessous montrent et donnent une idée générale sur les profils des températures obtenues pour les cas suivants :

1. Cas ordinaire dont l'enveloppe est exposée au niveau du toit et au niveau de ses quatre façades : $Sp/V=0.95$.
2. Cas où l'enveloppe est exposée à tous niveaux à l'exception du toit $Sp/V = 0.58$.
3. Cas où les murs extérieurs sud, nord et ouest sont exposés aux conditions extérieures $Sp/V=0.47$.
4. Cas où uniquement les murs extérieurs sud et nord sont exposés aux conditions extérieures $Sp/V=0.34$.

A ce propos, il faut signaler que deux types de conditions initiales apparaissent :

1. des températures correspondent à des conditions initiales environnantes chaudes (comme les exemples des figures 15 et 17) dont on peut observer les aspects qui caractérisent l'inertie thermique de l'enveloppe.
2. des températures correspondent à des conditions initiales environnantes plus fraîches (comme l'exemple de la figure 19) dont on peut observer les aspects qui caractérisent à la fois l'inertie thermique de l'enveloppe et l'ordre des valeurs vis-à-vis les températures obtenues.

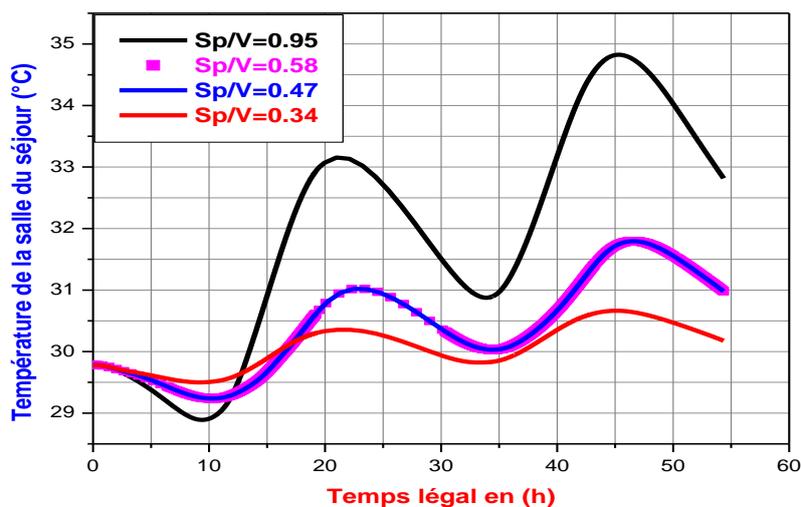


Figure 19 : Température de l'air de la salle du séjour, Ghardaïa, les 29-30 Août 2013.

Les températures obtenues montrent que l'enveloppe caractérisée par un indice de compacité correspondant à une valeur de 0.34 est la plus favorable en terme de confort thermique en période estivale et/ou hivernale.

Cependant, en se situant dans le deuxième et le troisième cas, on remarque une très grande similitude des températures obtenues. Ceci est dû certainement à l'indice de compacité de la salle de séjour qui reste constant malgré la différence enregistrée concernant l'indice de compacité global de la maison pour ces deux cas.

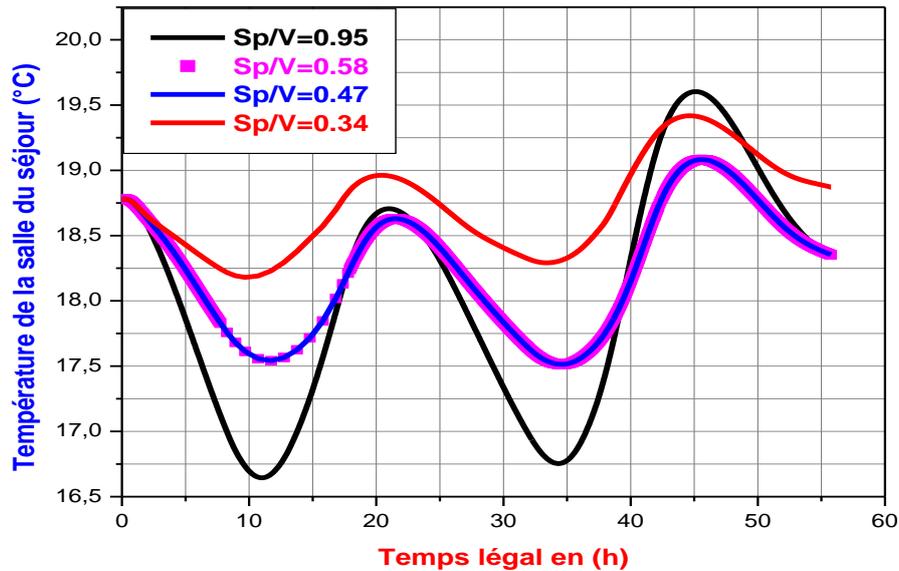


Figure 20 : Température de l'air de la salle du séjour, Ghardaïa, les 14-15 Décembre 2013.

La similitude reste maintenue, ce qui peut être justifiée par le fait que le phénomène de transfert de chaleur est plus long. La durée du transfert vers les murs et l'air de la zone est relativement supérieure à 54 heures. Le niveau maximum du stockage thermique des cloisons et des murs opaques n'est pas encore atteint.

3.4. Conclusion

Depuis quelques dizaines d'année, la maison a pris dans l'imaginaire collectif la forme de la villa 4 façades. Or, cette dernière propose un mode d'aménagement du territoire extrêmement consommateur d'espace. Par la faible compacité de ce type de logement et la grande dispersion de l'habitat, les consommations d'énergie sont aussi plus importantes, tant en chauffage que par les déplacements automobiles induit. Une architecture durable privilégiera donc la mitoyenneté et une relative densité de l'habitat. Celle-ci est tout à fait compatible avec la qualité architecturale et les résultats obtenus dans ce chapitre qui s'accordent aussi avec la législation de nombreuses régions de différents pays.

1. Il faut donc encourager certaines typologies urbaines à savoir: les rangées de maisons mitoyennes, les immeubles collectifs...etc.
2. Par l'intermédiaire de ces techniques et résultats, on peut abaisser les niveaux d'isolation globale requis si la compacité du bâtiment est inférieure à un niveau de référence.
3. Il faut aussi privilégier les bâtiments de grande taille.

Références

- [01] : J.P.Eggimann, J.-L. Badoux, D. Chuard, J.-P. Eggimann, C. Scaler, Architecture climatique équilibrée, conception, démarche et dimensionnement, Programme d'action PACER, Energies renouvelables, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-51-0, Copyright, Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, 1996
- [02] : Laurent MORA, Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, Thèse de doctorat en génie civil, université de la Rochelle UFR sciences fondamentales et sciences pour l'ingénieur, Septembre 2003
- [03] : Al-Homoud M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*; 40(2005) 353-366.
- [04] : Okba E.M. Building envelope design as a passive cooling technique, ICPLECEB, Mai 2005, Grèce.
- [05] : Karnopp D.C., Margolis D.L., Rosenberg R.C. *System Dynamics: Modeling and simulation of mechatronic systems*. 4e édition, Wiley, 2005.
- [06] : Krüger E., Givoni B. Predicting thermal performance in occupied dwellings, *Energy and Buildings*; 36 (2004) 301- 307.
- [07] : Givoni B. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures, Part I: 1993 experimental periods, *Energy and Buildings*; 28(1998) 25–32.
- [08] : Abdelatif MERABTINE, Modélisation Bond Graphs en vue de l'Efficacité Énergétique du Bâtiment, Thèse pour obtenir le grade de Doctorat d'Université Discipline : Génie des Procédés et des Produits, Université de Lorraine Faculté des sciences et Technologies, École Doctorale (sciences et ingénierie) Ressources, Procédés, Produits et Environnements (RP2E), Soutenue à Nancy le 19 Novembre 2012.
- [09] : Freire R.Z., Oliviera G.H.C., Mendes N. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings, *Energy and Buildings*; 40(2008) 810-820.
- [10] : Fernández-González A. Kako I.K. Empirically derived formulas to predict indoor maximum, average and minimum temperatures in roof pond buildings using minimum climatic information. *The Solar 2010 conference proceedings*.
- [11] : Singh M.K., Muhapatra S., Atreya S.K., Givoni B. Thermal monitoring and indoor temperature modelling in vernacular buildings of North-East India. *Energy and Buildings* 42 (2010) 1610-1618.
- [12] : Chlela F. Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Thèse de Doctorat : Université de La Rochelle 2008.
- [13] : Goupy J. Les plans d'expériences. *Revue MODULAD* 2006.
- [14] : Filfli S. Optimisation Bâtiment : Système pour minimiser les consommations dues à la climatisation. Thèse de Doctorat : École des mines de Paris, 2006.
- [15] : Jaffal I., Inard C., Ghiaus C. Fast method to predict building heating demand based on

- the design of experiments. *Energy and Buildings* ; 41(2009) 669-677.
- [16] : Wang L., Chen Q. Theoretical and numerical studies of coupling multizone and CFD models for building air distribution simulations. *Indoor Air* 17(5) (2007) 348–61.
- [17] : Song F., Zhao B., Yang X., Jiang Y., Gopal V., Dobbs G., Sahm M. A new approach on zonal modeling of indoor environment with mechanical ventilation. *Building and Environment*; 43(3) (2008) 278–86.
- [18] : Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*; 44(4) (2009) 848–58.
- [19] : Wurtz E., Mora L., Inard C. An equation based simulation to investigate fast building simulation. *Building and Environment*; 41 (2006) 1571-1583.
- [20] : Jiru T.E., Haghghat F. Modeling ventilated double skin façade - a zonal approach. *Energy and Buildings*; 40 (8) (2008) 1567-1576.
- [21] : Norton T., Sun D-W. Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science and Technology*; 17(2006) 600–20.
- [22] : Norton T, Sun D-W, Grant J, Fallon R, Dodd V. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bio-resource Technology*; 98 (12) (2007) 2386-2414.
- [23] : A. Potvin, March PhD Arch, Claude MH Demers, MArch, PhD Arch, Marie-Claude Dubois, MArch, PhD Ing, GRAP, Groupe de Recherche en Ambiances Physiques, École d'Architecture, Le Chauffage Solaire Passif Comme Stratégie Bioclimatique, Université Laval, Esquisses, Le Bulletin d'Information de l'Ordre des Architectes du Québec 2004, Volume 15, Numéro 1.
- [24] : S.M.A. Bekkouche, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique et Modélisation, Université de Tlemcen, Mai 2009.
- [25] : S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N Benamrane, Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, *Energy and Buildings* Vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [26] : S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, *Construction and Building Materials* 52 (2014) 59–70.
- [27] : S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, R. M Yaiche, R. Khanniche (2013), Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), *International Scientific Journal, Thermal Science*, 2013, Vol. 17, N°. 2, pp. 349-364.
- [28] : M. Hamdani, S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz et M. K. Cherier, Etude et Modélisation du Potentiel Solaire Adéquat pour l'Estimation des Eclairements Incidents à Ghardaïa, *Revue Internationale d'Héliotechnique* N° 43 (2011) 8-13.

- [29] : S.M.A Bekkouche, T Benouaz and A Cheknane, Simulation and Experimental Studies of an Internal Thermal Insulation of Two Pieces of Rooms Located in Ghardaïa (Algeria). IJACE International Journal of Advanced Computer Engineering, June 2009, Volume 2 Issue 1.
- [30] : S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz and A. Cheknane, A modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building. Thermal Science, Vol 13 (2009), No. 4, pp. 233-244.
- [31] : J. A. Orosa and T. Carpena, Thermal Inertia Effect in Old Buildings, European Journal of Scientific Research, Vol.27 No.2 (2009), pp.228-233
- [32] : S. V. G. Goulart, Thermal Inertia and Natural Ventilation - Optimisation of Thermal Storage as a Cooling Technique for Residential Buildings in Southern Brazil, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements of the Open University for the Degree of Doctor of Philosophy, October 2004.
- [33] : K.A. Dornelles and M. Roriz, Thermal Inertia, Comfort and Energy Consumption in Buildings: A Case Study in Sao Paulo State-Brasil, International Journal for Housing Science and its Applications, 2004, 28, part 2, pp. 153-162.
- [34] : A. Noren, J. Akander, E. Isfät and O. Söderström, The Effect of Thermal Inertia on Energy Requirements in a Swedish Building-Results Obtained With Three Calculation Models, International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, 1999, 1.1999.
- [35] : N. Aste, A. Angelotti and M. Buzzetti, The Influence of the External Walls Thermal Inertia on the Energy Performance of Well Insulated Buildings, Energy and Buildings 41 (2009) 1181-1187.

Chapitre 4

Etude de la Compacité et Simulation Numérique par TRNSYS 16

CHAPITRE 4

ETUDE DE LA COMPACITE ET SIMULATION NUMERIQUE PAR TRNSYS 16

4.1. Introduction

En science et en ingénierie, la simulation thermique dynamique (STD) désigne un type de simulation thermique où le système modélisé n'est pas à l'équilibre : à tout instant de la simulation la température des éléments du composant peut varier selon les différentes lois régissant les échanges thermiques (convection, conduction, rayonnement, changement d'état). La simulation thermique dynamique peut-être appliquée à différents types de systèmes, par exemple, un four, un moteur, un bâtiment. Plus spécifiquement dans le bâtiment, la simulation thermique dynamique permet d'estimer les consommations réelles d'énergie, en tenant compte de l'enveloppe du bâtiment et de son inertie, des systèmes énergétiques (y compris les appareils électriques non thermiques), du comportement des occupants, et du climat local.

Avec l'accroissement des exigences de performance énergétique et environnementale sur les nouveaux bâtiments, la STD est de plus en plus intégrée au processus de conception des bâtiments. Elle peut aussi être mise en œuvre dans le cas de rénovation. D'autre part, les bailleurs sociaux, les collectivités territoriales et d'autres organisations peuvent exiger qu'une simulation thermique dynamique soit intégrée à la conception de bâtiments pour lesquels un appel à concours est lancé. Par exemple, les simulations thermiques dynamiques sont très utilisées en climat méditerranéen, où le confort d'été doit être aussi bien pris en compte que le confort d'hiver [1].

Le comportement thermique du bâtiment met en jeu de nombreux phénomènes physiques dynamiques dont certains effets, négligeables dans un bâtiment traditionnel, deviennent déterminants dans un bâtiment très isolé. C'est pourquoi, la simulation thermique dynamique est aujourd'hui un outil incontournable pour la recherche, le développement et la conception de bâtiments peu consommateurs d'énergie [2]. TRNSYS figure parmi les outils de recherches les plus puissants permettant l'étude du comportement thermique du bâtiment. Ses très nombreuses fonctionnalités permettent de réaliser un travail en profondeur sur le comportement thermique des bâtiments et de leurs différents constituants.

4.2. Qu'est ce que TRNSYS

TRNSYS " TRaNsient SYstem Simulation " veut dire programme de simulation de systèmes transitoires. C'est un est un environnement complet et extensible pour la simulation transitoire des systèmes, y compris les bâtiments multizones. Il est devenu le logiciel de référence pour les

chercheurs et ingénieurs du monde entier afin de valider de nouveaux concepts d'énergie, des systèmes simples d'eau chaude sanitaire pour la conception et la simulation des bâtiments et de leurs équipements pour une année météorologique. TRNSYS est un logiciel commercial développé à l'Université du Wisconsin. L'une de ses applications était pour effectuer une simulation thermique du comportement d'un bâtiment pour une année météorologique.

L'un des facteurs clés de la réussite TRNSYS au cours des 35 dernières années c'est la bibliothèque TRNSYS qui comprend un grand nombre des composants couramment dans les systèmes d'énergie thermique et électrique, ainsi que des routines de composant pour gérer l'entrée de données météorologiques ou d'autres fonctions de forçage dépendant du temps et de sortie des résultats de simulation. La nature modulaire de TRNSYS donne le programme grande flexibilité, et facilite l'ajout au programme de modèles mathématiques ne figurent pas dans la bibliothèque TRNSYS standard. TRNSYS est bien adapté à des analyses détaillées de tout système dont le comportement dépend de l'écoulement du temps [3].

TRNSYS peut être facilement connecté à de nombreuses autres applications, pour la pré- ou post-traitement ou par des appels interactifs au cours de la simulation (par exemple Microsoft Excel, Matlab, COMIS, etc.). Principales applications: systèmes solaires (systèmes solaires thermiques et photovoltaïques), les bâtiments bas énergie et les systèmes de CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation), les systèmes d'énergies renouvelables, les systèmes d'hydrogène, la cogénération, les piles à combustible, etc.

TRNSYS évalue le niveau de confort thermique d'un bâtiment par rapport à son environnement climatique et le choix opéré sur son système thermique (type de chauffage, niveau d'isolation, orientation des pièces...), puis il est évalué des systèmes de chauffage et de climatisation des plus simples au plus complexes, comme les systèmes solaires innovants, grâce à une bibliothèque de 50 familles de composants.

4.3. Choix de TRNSYS

Les comparatifs de logiciels " ouverts " disponibles, concernant essentiellement les capacités à simuler facilement les performances énergétiques d'un bâtiment (c'est-à-dire en bénéficiant au maximum de la disponibilité de modèles existants) et des solutions climatiques retenues (fenêtre, serre, mur capteur accumulateur, matériaux d'isolation transparents, protections solaires, matériaux à changement de phase, échangeur air/sol, ventilation nocturne) montrent que deux environnements semblent répondre prioritairement à la problématique posée : TRNSYS et Énergie Plus. Si Energy Plus présente plus de dispositifs climatiques que TRNSYS, notamment l'éclairage et la ventilation naturels, TRNSYS a l'avantage de disposer d'une interface plus agréable, d'une plus grande rapidité de prise en main, d'avoir été valide dans de nombreuses tâches de l'Agence

Internationale de l'Énergie et enfin d'être communément répandu dans la communauté scientifique (européenne notamment).

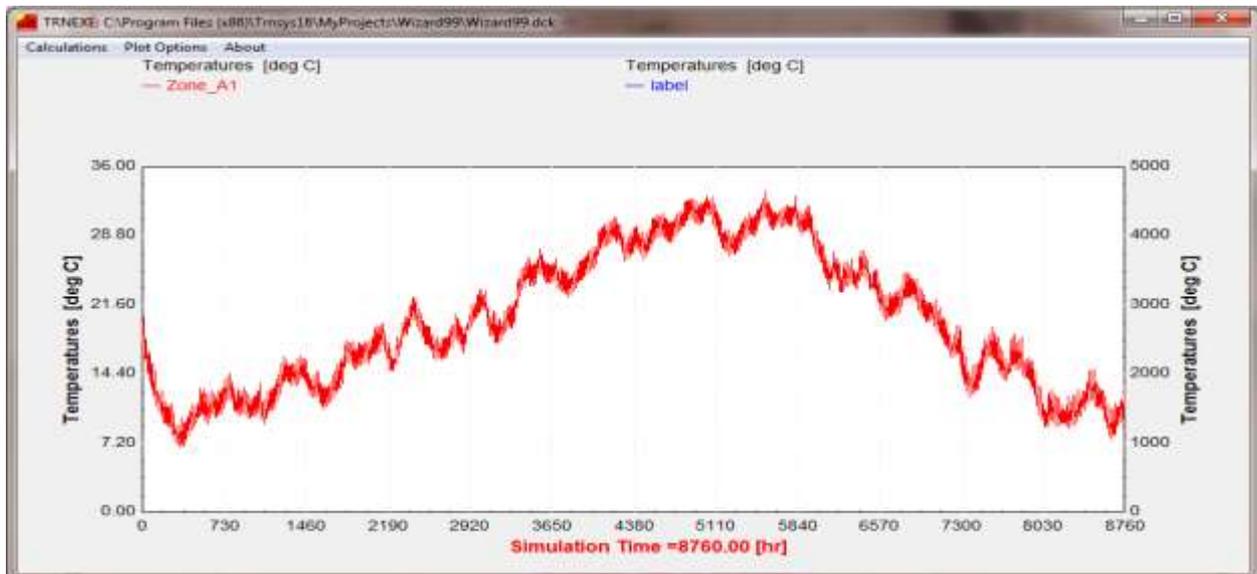
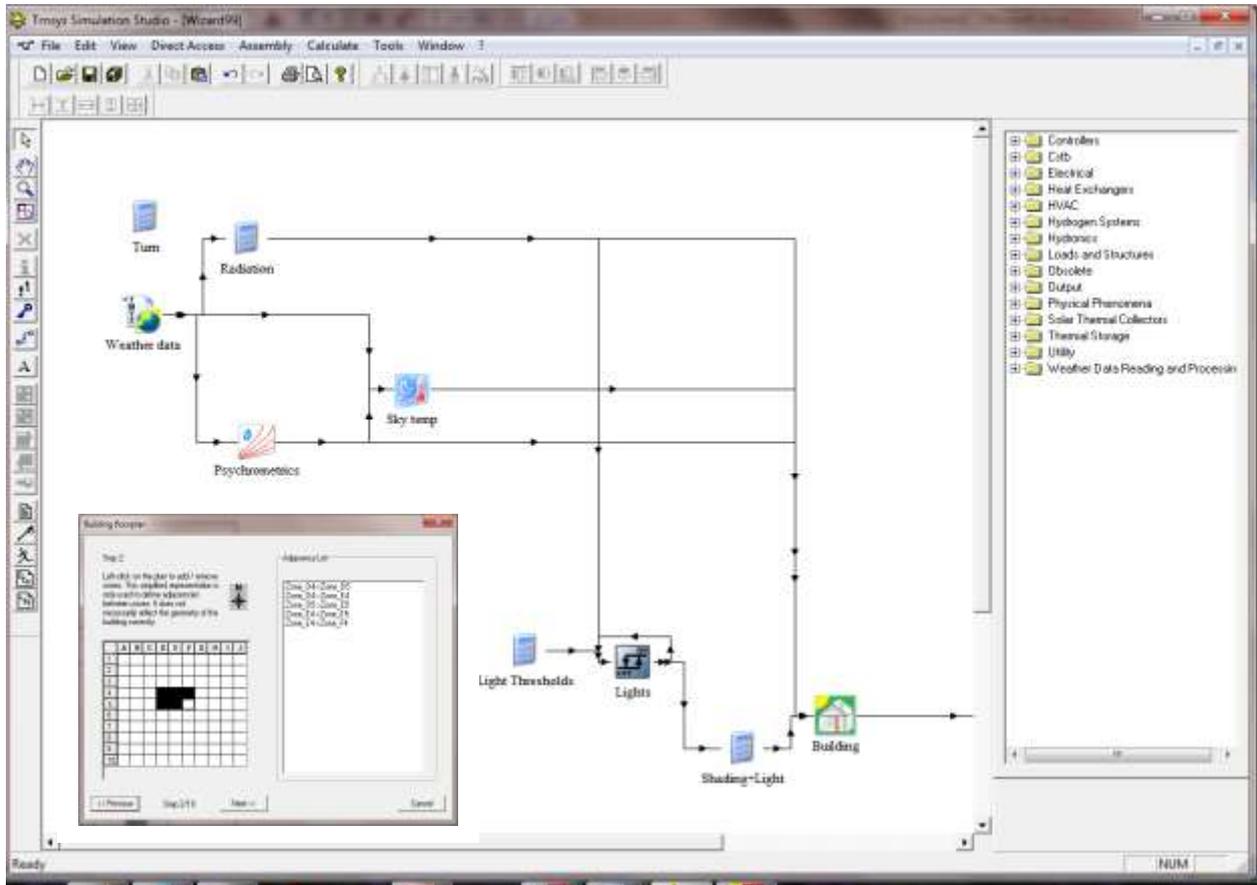


Figure 1 : Interface du logiciel TRNSYS

TRNSYS est un logiciel dédié à la simulation dynamique des systèmes, développé par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) de l'Université de Madison aux Etats-Unis. Il permet de faire

des simulations dynamiques du comportement thermique d'un bâtiment mono ou multizones. Il permet également de suivre heure par heure les consommations (chauffage, climatisation) ou les productions (panneaux solaires) énergétiques annuelles des équipements d'un bâtiment. Ces simulations peuvent être réalisées en fonction de l'emplacement des matériaux de construction utilisés, de l'architecture, du concept énergétique choisi entre autre. A travers son interface graphique, l'utilisation du logiciel TRNSYS est simple. La force de TRNSYS réside dans la bibliothèque du logiciel ou quelques 50 familles de composants sont disponibles, ces derniers représentant le bâtiment (mono ou multizones), les équipements (chauffage, climatisation, ...), les données météorologiques, les régulateurs, ... il suffit de choisir les bons composants et de les relier entre eux pour réaliser une simulation permettant de modéliser l'environnement complet d'un bâtiment. Si l'utilisateur ne trouve pas de composant adéquat dans la bibliothèque, il peut également y ajouter ses propres composants.

Le comportement thermique du bâtiment est très complexe du fait des transferts thermiques se produisant simultanément et de la variation des conditions le sollicitant (conditions climatiques). TRNSYS intègre ces phénomènes dans la modélisation thermique en régime transitoire du bâtiment de la façon suivante: les transferts thermiques au sein de l'enveloppe sont traités en utilisant le module " Type56 " de TRNSYS. Sachant qu'une paroi de bâtiment peut donner lieu à trois transferts thermiques différents : la conduction au sein de la paroi, la convection entre les faces de la paroi et les ambiances fluides qu'elle sépare, le rayonnement courtes longueurs d'ondes (CLO) et grandes longueurs d'ondes (GLO) échangé avec les autres parois ou le ciel.

La modélisation des écoulements aérauliques est effectuée par le biais de TRNFlow. Ainsi, le critère de sélection retenu pour modéliser les transferts aérauliques dans le bâtiment est la fiabilité des résultats en un minimum de temps. L'approche nodale ou zonale permet de simplifier des modèles à des fins de rapidité de calcul. Le bâtiment est ainsi représenté par un ensemble de nœuds représentant des pièces ou un groupement de pièces qui communiquent par des liens avec l'extérieur et avec l'intérieur (échanges entre pièces).

La modélisation se caractérise par la définition d'un nœud par zone. Les lois régissant les transferts aérauliques entre zones sont généralement des lois de puissance qui donnent le débit d'air en fonction de la différence de pression.

4.3.1. Données introduites

- ✚ Description du bâtiment et données météo (fournies avec le programme pour certaines villes).
- ✚ Description des éléments du système thermique et de leur fonctionnement.
- ✚ Des liens existent avec certains programmes de dessin pour faciliter la saisie des données décrivant le bâtiment (notamment IISiBat).

4.3.2. Résultats

- + Consommations mensuelles et annuelles.
- + Visualisation sous forme d'histogrammes.
- + Impression des différentes valeurs variables (par pas de temps).
- + Visualisation en temps réel de certaines valeurs de la simulation.

4.3.3. Avantage

- + Grâce à son approche modulaire, TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).
- + L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- + Une vaste documentation sur les sous-programmes y compris des explications, les usages usuels et les équations de base.
- + Une définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

4.3.4. Inconvénients

- + Pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire l'ensemble exhaustif des données définissant le bâtiment et le système.

4.4. Transferts thermiques dans TRNSYS

Pour les parois opaques, on distingue les transferts conductifs et convectifs. Dans TRNSYS, les transferts par conduction sont traités par une méthode convolutive, celle de la transformée en Z comme précise ci-dessus. Concernant le vitrage, les parois vitrées sont considérées sans inertie. De ce fait, on utilise généralement l'équation du régime permanent pour modéliser les transferts conductifs. Les échanges convectifs sont pris en compte comme suit [4]:

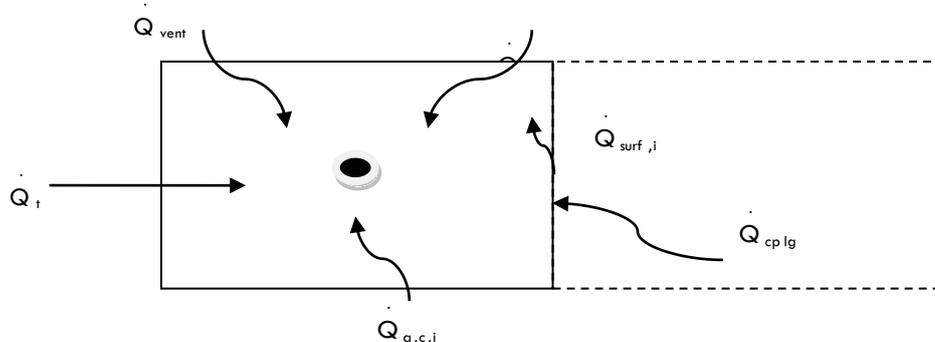


Figure 2 : Bilan convectif d'un nœud d'air

$$Q_{conv.e} = h_{c,e} (T_{se} - T_e) \quad (1)$$

$$Q_{conv.i} = Q_{surf.i} + Q_{inf.i} + Q_{vent.i} + Q_{g,c,i} + Q_{gp.lg.i} \quad (2)$$

Avec :

$Q_{surf.i}$: Gains provenant des surfaces internes [W]

$$Q_{surf.i} = U_{mur,i} A_{mur,i} (T_{mur,i} - T_{air}) \quad (3)$$

U : Le coefficient de transmission thermique d'une paroi [W/m²]

A : La surface [m²]

T : Température en Kelvin

$Q_{inf.i}$: Gains provenant des infiltrations [W]

$$Q_{inf.i} = v \rho C_p (T_{ext} - T_{air}) \quad (4)$$

$Q_{vent.i}$: Gains provenant de la ventilation [W]

$$Q_{vent.i} = v \rho C_p (T_{vent,i} - T_{air}) \quad (5)$$

v : Le volume (m³)

ρ : La masse volumique (Kg/m³)

C_p : La chaleur spécifique (J/kg K)

$Q_{g,c,i}$: Gains convectifs intérieurs [W]

Ils peuvent être dus : aux occupants, aux équipements, à l'éclairage, aux radiateurs, etc.

$Q_{gp.lg.i}$: Gains convectifs dues aux écoulements d'air provenant de zones adjacentes [W]

$$Q_{gp.lg.i} = v \rho C_p (T_{zone,i} - T_{air}) \quad (6)$$

En ce qui concerne les échanges radiatifs, TRNSYS distingue les échanges de courtes longueurs d'onde CLO correspondant à des longueurs d'onde inférieures à 2,5 μm et les grandes longueurs d'onde GLO supérieures à 2,5 μm . A l'intérieur d'une zone, on a :

$$Q_{rd,i} = Q_{CLO,i} + Q_{GLO,i} = Q_{g,r,i} + Q_{sol,i} + Q_{long,i} + Q_{gains\ internes,i} \quad (7)$$

Pour une paroi extérieure, l'équation des échanges radiatifs s'écrit comme suit :

$$Q_{GLO.e} = \sigma \varepsilon_{S,O} (T_{S,O}^4 - T_{f,ciel}^4) + S_{S,O} \quad (8)$$

Avec

$Q_{rd,i}$: Gains radiatifs du noeud de température de surface du mur,

$Q_{g,r,i}$: Gains radiatifs internes de la zone reçues par le mur,

$Q_{sol,i}$: Gains solaires a travers les fenêtres reçus par le mur,

$Q_{long,i}$: Flux grande longueur d'ondes échange entre le mur et les autres murs et fenêtres, gains internes,

$Q_{gains\ internes,i}$: Si l'utilisateur spécifie un flux de chaleur a la surface du mur ou de la fenêtre et

$S_{s,o}$: Le rayonnement solaire absorbe par la surface.

4.5. Simulation numérique par TRNSYS 16

L'environnement de simulation TRNSYS a été utilisé pour déterminer les températures des différentes zones en vue de prédire la variation de la compacité par rapport au mode de contact à forme et à volume constants. Lors de cette étude, nous avons utilisé les données météorologiques de la région de Bechar. A cet effet, nous avons choisi deux périodes pour la simulation; un intervalle de temps compris entre 330 et 430 heures, correspondant à une période froide du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier, l'autre période (chaude) est située entre 5040 et 5140 heures ce qui correspond aux jours allant du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h.

Par la suite, il est nécessaire de caractériser les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe du bâtiment considérée en parois opaques. Il convient de souligner que le gain de puissance thermique due à l'infiltration d'air et les gains d'énergie solaire sont supposés nulles. Le tableau ci-dessous donne un état récapitulatif de ces caractéristiques.

Elément	Matériau (ext → int)	e (m)	λ (KJ/h m k)	Cp (Kj/kg k)	ρ (Kg/m ³)	U (W/m ² K)
Mur extérieur	INSUL	0.100	0.144	0.800	40.00	0.329
	PIERRE	0.500	5.000	1.000	2000	
	PLÂTRE	0.050	5.00	1.000	2000	
Plafond	BÉTON	0.240	7.56	0.800	2400	0.233
	INSUL	0.160	0.144	0.800	40.00	
Plancher bas	FLOOR	0.005	0.252	1.000	800.0	0.834
	PIERRE	0.060	5.000	1.000	2000	
	SILENCE	0.040	0.180	1.440	80.00	
	BÉTON	0.240	7.560	0.800	2400	
Mur intérieur	GYPSE	0.012	0.756	1.000	1200	1.552
	PIERRE	0.500	5.000	1.000	2000	
	GYPSE	0.012	0.756	1.000	1200	
Plancher haut	FLOOR	0.005	0.252	1.000	800.0	0.313
	PIERRE	0.060	5.000	1.000	2000	
	SILENCE	0.040	0.180	1.440	80.00	
	BÉTON	0.240	7.560	0.800	2400	
	INSUL	0.080	0.144	0.800	40.00	

Tableau 1: Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques

La construction étudiée est une structure multizones, le modèle TRNBuild permet de construire un fichier type 56 qui est utilisé dans l'interface TRNSYS.

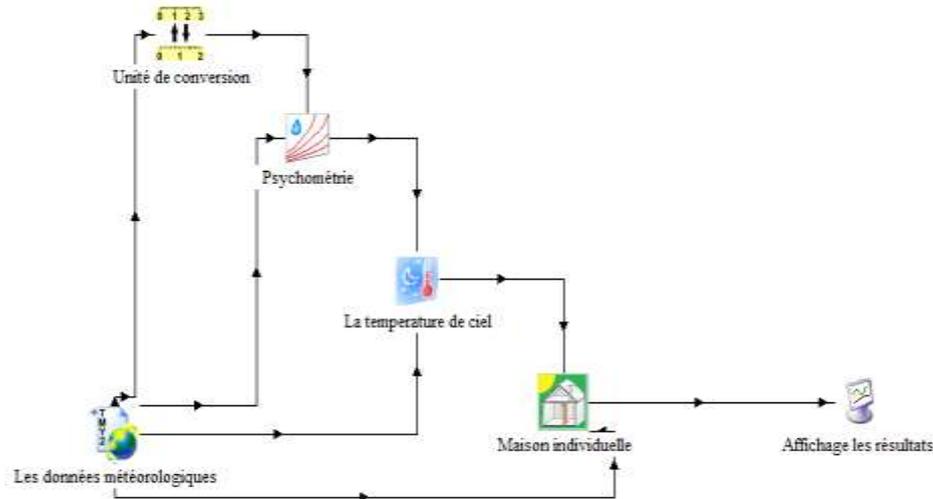


Figure 3 : Modèle de simulation sous TRNSYS

Symbole	Type	Mode réel
	Type 109-TMY2 (Météonorme)	Données climatiques
	Type 57	Convertisseur
	Type 33 e	Psychométrie
	Type 69 b	Température du ciel
	Type 56 a TRNBuild	L'enveloppe bâtie Dimensions et matériaux
	Type 56 d (Online Plotter)	Visualisation et affichage

Tableau 2 : Relation entre TRNSYS et le mode réel

4.5.1. Température ambiante et vitesse du vent

Les courbes des figures 4-5 représentent la variation de la température ambiante, tandis que celles des figures 6-7 représentent la variation de la vitesse du vent. Les figures 4 et 6 sont relatives à une période hivernale du 13 au 17 Janvier alors que les figures 5 et 7 correspondent à une période estivale située entre le 29 Juillet et le 02 Août. L'évolution des allures se rapproche un petit peu à une forme périodique ou sinusoïdale.

De même pour la vitesse du vent, on remarque que ce paramètre subit un comportement plus compliqué, il est parfois considérable et parfois faible.

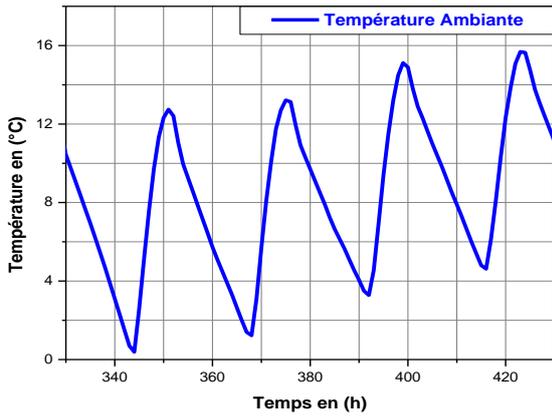


Figure 4 : Température ambiante, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

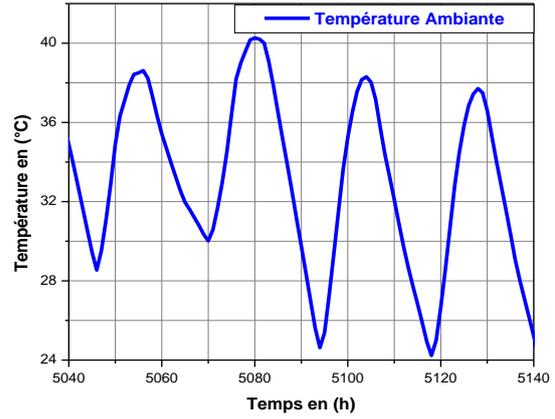


Figure 5 : Température ambiante, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

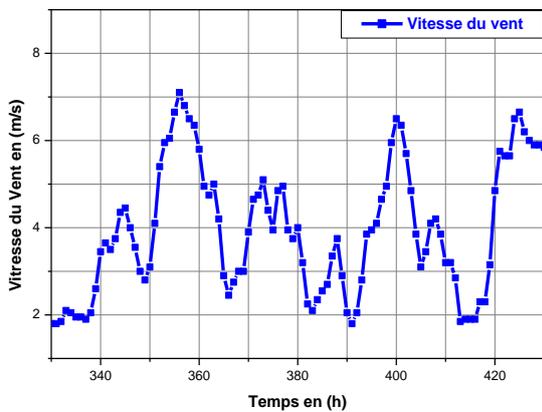


Figure 6 : Vitesse du vent, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

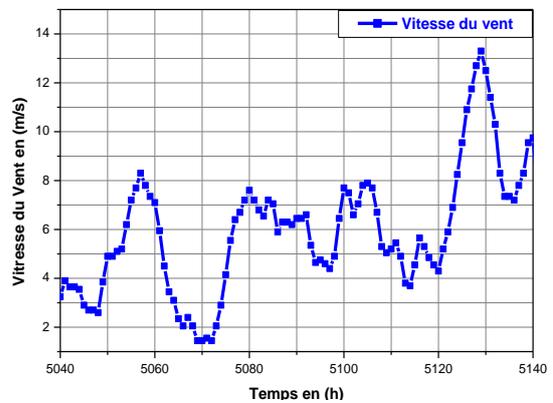


Figure 7 : Vitesse du vent, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

4.5.2. Energies solaires incidentes

Les courbes tracées dans les figures 8-11 donnent une idée générale sur le comportement de l'énergie solaire incidente par heure par mètre au carré sur chaque façade.

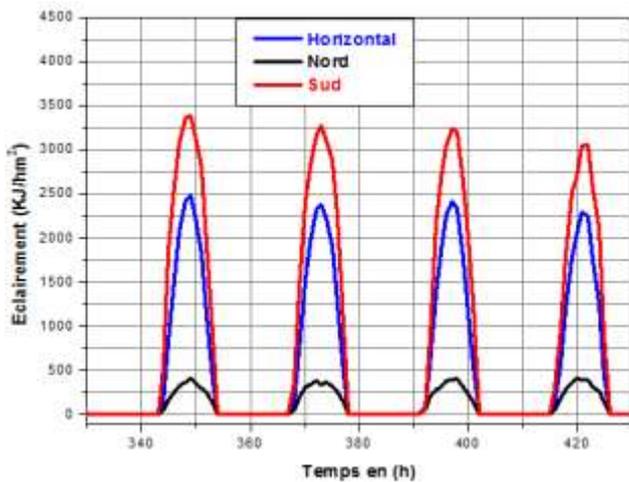


Figure 8 : Energie solaire incidente sur l'horizontal, le nord et le sud par heure par mètre au carré, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

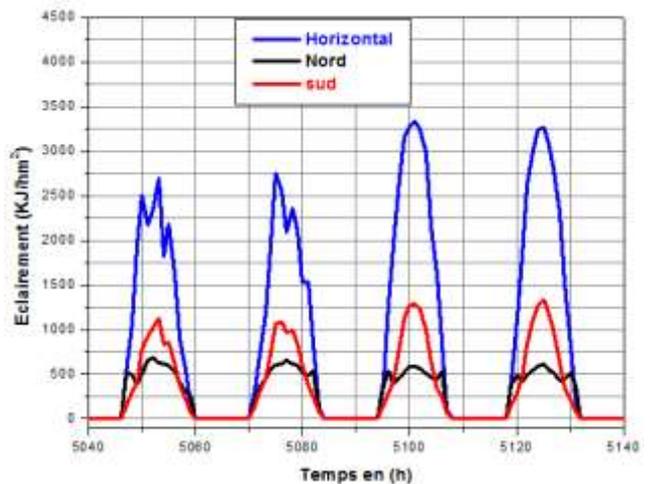


Figure 9 : Energie solaire incidente sur l'horizontal, le nord et le sud par heure par mètre au carré, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

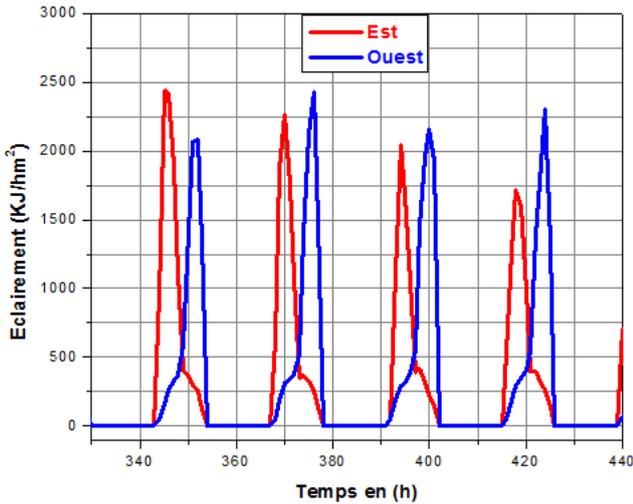


Figure 10 : Energie solaire incidente sur l'est et l'ouest par heure par mètre au carré, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

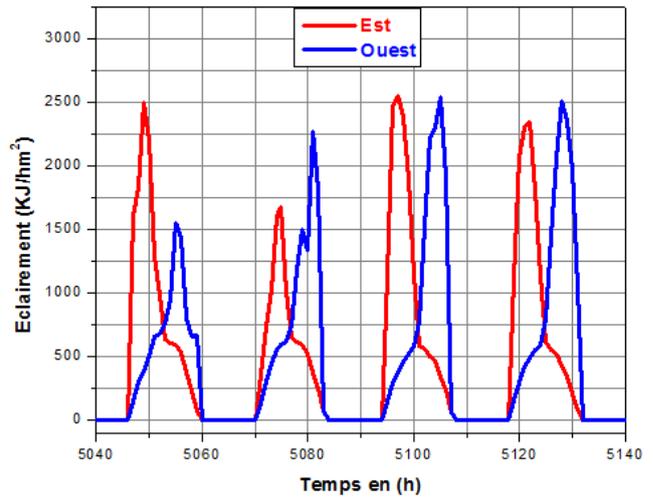


Figure 11 : Energie solaire incidente sur l'est et l'ouest par heure par mètre au carré, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

On constate d'après ces allures que le ciel subit quelques passages nuageux lors de ces deux premières journées, ce qui va influencer positivement sur les températures intérieures puisqu'on cherche à se protéger des surchauffes durant cette période.

4.5.3. Cas de trois cellules en ligne orientées en plein sud

Dans cette partie, on verra dans quelle mesure l'emplacement d'une cellule cubique simple de 3 m de dimension peut contribuer à améliorer la température intérieure. Les figures 12 et 13 sont des exemples illustratifs qui décrivent l'évaluation des températures à l'intérieur des cellules en hiver et en été.

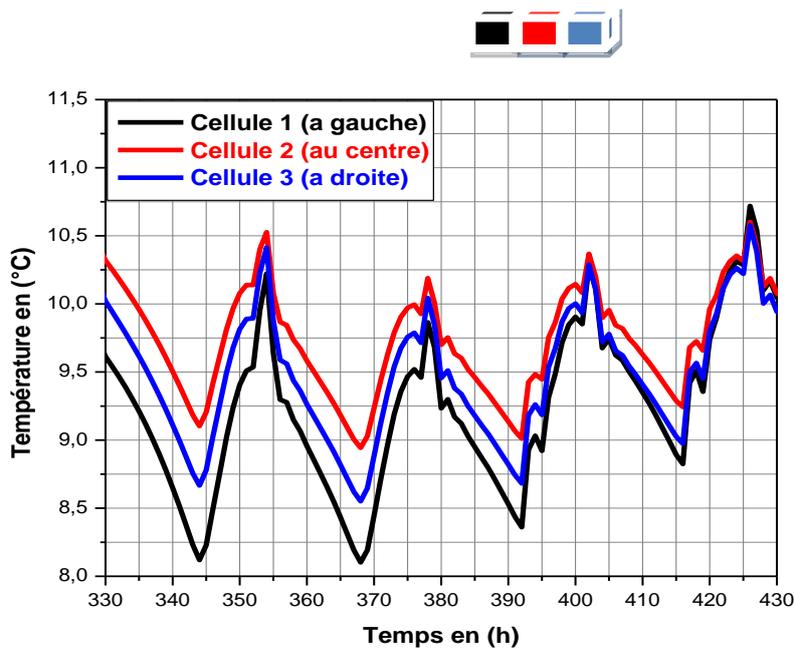


Figure 12 : Températures intérieures des trois cellules, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

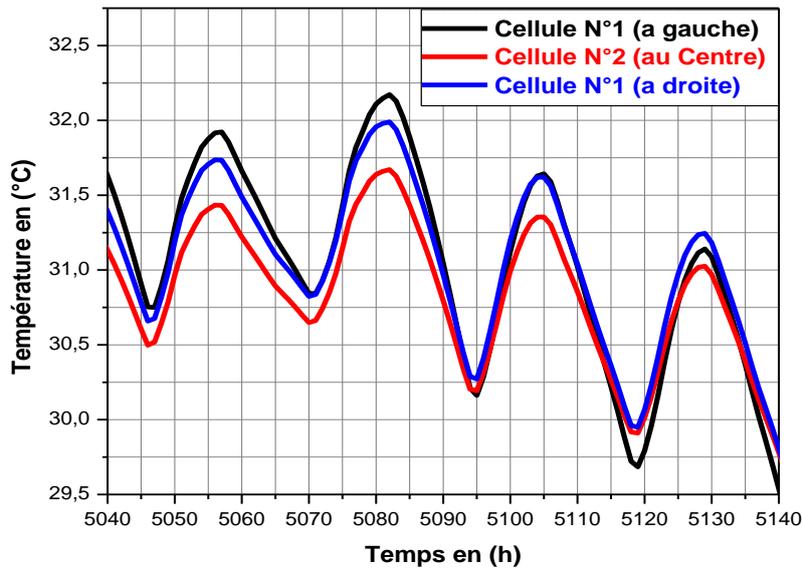


Figure 13 : Températures intérieures des trois cellules, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

Selon les résultats obtenus, la cellule du centre apporte le meilleur compromis du confort thermique. Ceci est dû à l'indice de compacité ($Sp/V=1$) qui est plus faible par rapport aux autres cellules dont le rapport Sp/V est égale à 1.33. En effet, les murs mitoyens entre les pavillons ne sont plus en contact avec l'extérieur ce qui limite les déperditions par ces parois.

4.5.4. Cas de six cellules groupées selon deux lignes orientées en plein sud

La disposition de ces six cellules est considérée selon deux rangés cette fois-ci. Le premier rangé (cellules noir, orange et violet) est orienté en plein sud, le deuxième (cellules verte, rouge et bleu) est adjacent par rapport au premier. Les figures 14 et 15 définissent les profils des températures à l'intérieur des cellules en périodes estivale et hivernale.

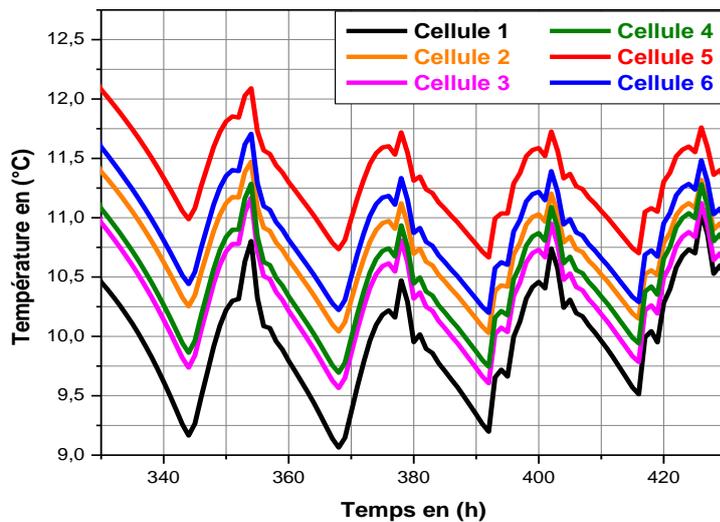


Figure 14 : Températures intérieures des cellules, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

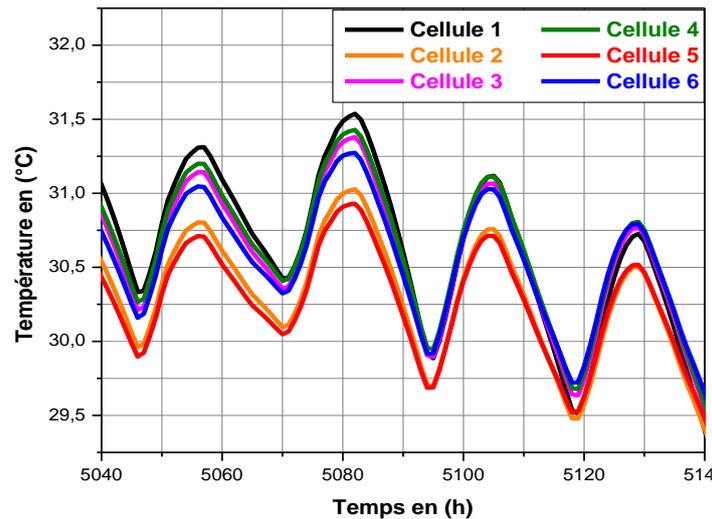


Figure 15 : Températures intérieures des cellules, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

En fonction de ces résultats, nous pouvons déduire que la cellule 5 orientée vers le sud est la plus favorable en terme de confort thermique, que se soit en été ou en hiver. Ceci est justifié par leur faible indice de compacité ($Sp/V = 0.66$) en le comparant avec les autres cellules, à l'exception de la cellule 2 qui possède le même indice.

La figure 15 indique que la cellule 2 est classée en deuxième position par contre elle est classée en troisième position lors de la période hivernale (figure 14). Cette situation s'explique certainement par la quantité d'énergie absorbée par les différentes parois opaques en contact avec l'extérieur. En d'autres termes, la cellule 6 est bien placée par rapport à la cellule 2 vue l'importante quantité d'énergie global absorbée par l'enveloppe malgré sa faible compacité par rapport à la cellule 2. (Voir les figures 8-11). Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée par les murs de la cellule n°6 est suffisamment supérieure.

4.5.5. Vers quel mode de contact dois-je m'orienter ?

Nous procéderons dans cette section à une comparaison entre plusieurs cas possibles pour avoir au moins une piste qui nous conduit à des décisions justes et constructives. Le but est de confronter les températures intérieures des cellules de dimension de 3 m en supposant les situations suivantes :

- Une cellule isolée cubique de 3 m de dimension et d'indice de compacité de 1.66 en contact avec l'extérieur à tout niveau sauf au sol



- Deux cellules cubiques adjacentes de 3 m de dimension, orientées en plein sud et d'indice de compacité de 1.33. Nous choisissons la cellule rouge pour achever notre comparaison.



- Une cellule rouge d'indice de compacité de 1 qui appartient à un groupe de trois cellules disposées dans une même ligne et orientée en plein sud. L'indice de compacité de la cellule noir et bleu est de 1.33.



- Une cellule rouge d'indice de compacité 0.66 qui appartient à un groupe de six cellules adjacentes et groupées selon deux ligne orientées en plein sud.



Les courbes tracées représentent les valeurs des températures intérieures des cellules mises en considération.

Il convient de souligner que situation la plus convenable est celle d'une cellule rouge de la plus faible indice de compacité 0.66 qui appartient à un groupe de six cellules adjacentes et groupées selon deux ligne orientées en plein sud.

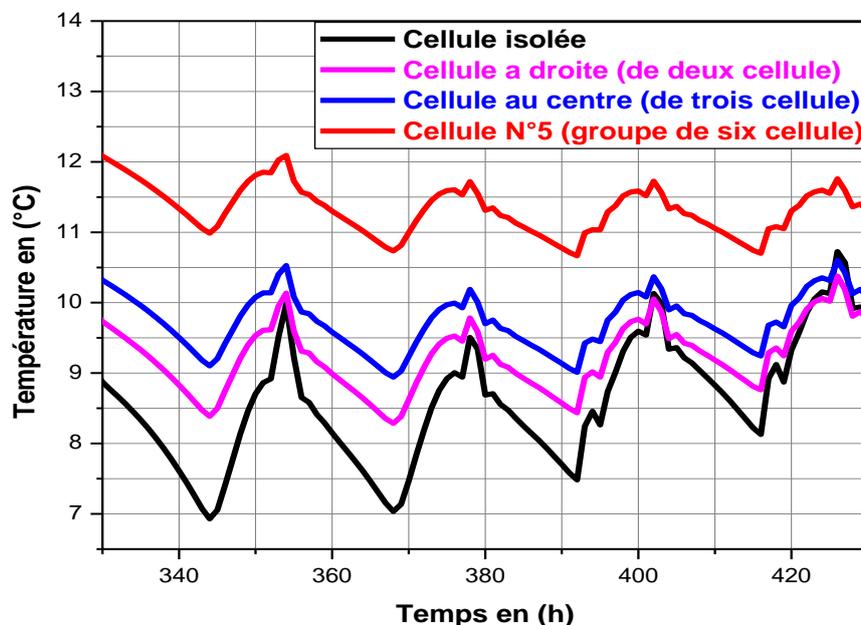


Figure 16 : Températures intérieures des cellules, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

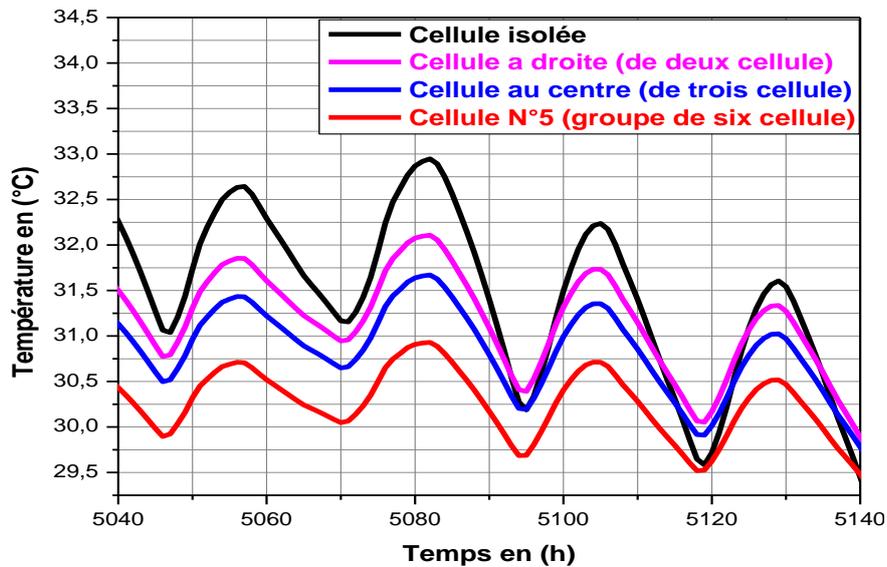


Figure 17 : Températures intérieures des cellules, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

Le confort est automatiquement inversement proportionnel par rapport à l'indice de compacité et proportionnel par rapport à la compacité. Le mode de contact le plus favorable est celui du quatrième cas.

4.5.6. Vers quelle forme simple dois-je m'orienter ?

Plusieurs configurations (une de forme cubique et certaines correspondent à une forme parallélépipède) sont proposées tout en gardant un volume constant. Les dimensions seront données en détail selon le tableau suivant :

Forme géométrique	Profondeur	Largeur	Longueur	Volume	Surface exposée	Indice de compacité S_p/V
Parallélépipède	2	3	4.5	27	43.5	1.61
Cube	3	3	3	27	45	1.66
Parallélépipède	3	4.5	2	27	48	1.77
Parallélépipède	4.5	2	3	27	51	1.88

Tableau 2: Dimensions des différentes configurations proposées

Les figures 18-19 sont des exemples qui permettent de montrer la variation des températures selon les différents cas proposés.

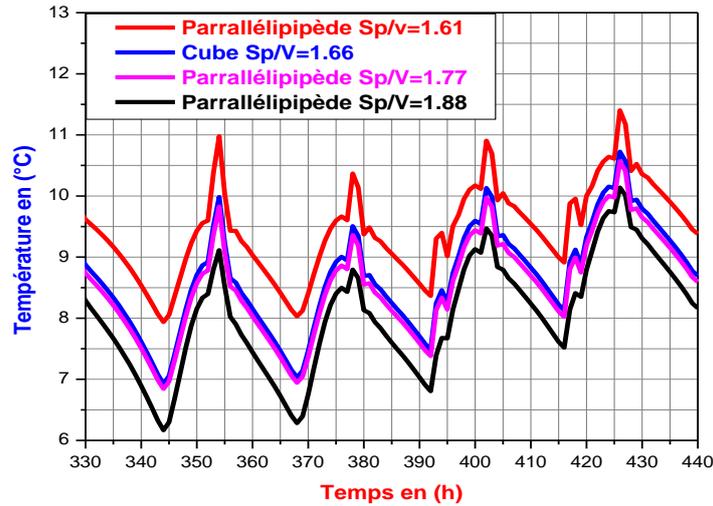


Figure 18 : Températures intérieures des cellules, du 18 h 13 Janvier jusqu'au 22 h du 17 Janvier

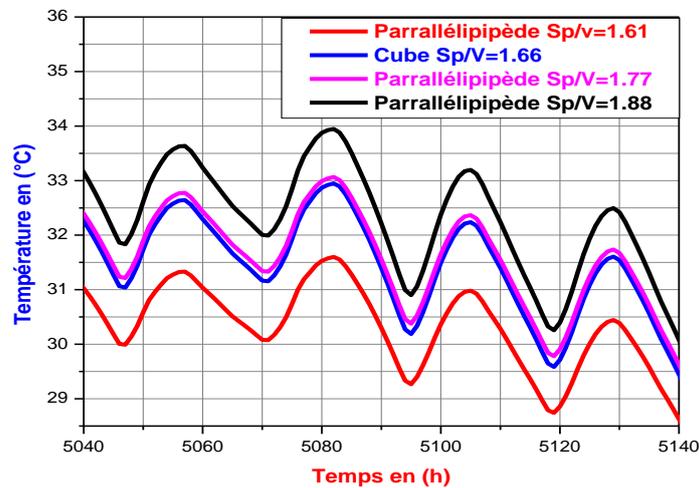


Figure 19 : Températures intérieures des cellules, du 29 Juillet à 00 h jusqu'au 02 Août à 04 h

Selon les résultats obtenus, nous confirmons encore une fois que la géométrie la plus favorable en terme du confort thermique est celle qui correspond au plus faible indice. Nous sommes toujours dans la mesure de dire que le confort est inversement proportionnel par rapport à l'indice de compacité.

4.6. Conclusion

La conception d'une maison à faible consommation énergétique s'inscrit pleinement dans le contexte actuel de maîtrise de l'énergie et de développement durable. Le secteur du bâtiment peut réaliser de nombreux progrès en matière d'économie d'énergie, il est en pleine évolution vers la création d'un marché pour ce type de maisons. Donc, il faut que le gouvernement mette

des programmes dans ce sens, c'est-à-dire construire des bâtiments compacts en vue d'économiser la consommation énergétique.

Les résultats de ce chapitre s'accordent totalement avec les conclusions tirées du chapitre précédent :

- Il faut encourager certaines typologies urbaines comme les rangées de maisons mitoyennes, les immeubles collectifs...etc.
- Assurer une bonne compacité en choisissant des formes géométriques optimales tout en diminuant le maximum l'indice de compacité.

Références

[01] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_Thermique_Dynamique

[02] : A. Khecharem, Modélisation thermique des bâtiments : Evaluation des principaux critères architecturaux sur la qualité thermique des bâtiments, Mémoire pour obtenir le grade de Master à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, Université Henri Poincaré, Nancy Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, Master Design Global 2008-2009.

[03] : <http://telechargerlelogiciel.blogspot.com/2013/09/telecharger-trnsys-17-gratuit.html>

[04] : TRNSYS, 2004, A transient Simulation Program - Manual, Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin – Madison, 2004.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Ces travaux permettent de montrer l'intérêt de l'utilisation d'une plateforme de simulation numérique dans l'étude d'un habitat multi-zone. Vu l'intérêt évident de ce secteur à l'échelle nationale, on peut dire que nous avons acquis à la mise au point des modèles mathématiques qui peuvent prédire les températures intérieures. Ces modèles intègrent à la fois les propriétés géométriques et physiques d'une maison individuelle. Le traitement de ce sujet nécessite une simulation qui permet des calculs parfaitement ciblés en rapport avec des compétences précises qu'il s'agit de les mettre en jeu. Les approches adaptatives proposées ont été basées sur des constatations et des lois connues en thermique. Elles prouvent que l'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit, alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment, et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs.

Le développement des villes du sud Algérien a été fait à l'instar des villes du nord, marginalisant ainsi les caractéristiques climatiques très rudes de ces régions. Depuis de nombreuses années, suite à une crise due à une forte demande de logements, l'état se trouve victime de cette démarche qui ne reflète pas les aspirations socioculturelles du citoyen algérien et ne répond pas aux exigences climatiques et économiques de ces régions, la majorité des gens construisent leur propres maisons à leur manière. Comme élément acteur dans le confort des bâtiments, il faut réorganiser la relation entre l'architecture et son milieu, le confort thermique dans un bâtiment dépend principalement du comportement thermique de son enveloppe soumise aux contraintes climatiques. L'enveloppe échange perpétuellement des flux avec l'environnement extérieur et les ambiances intérieures.

L'architecture bioclimatique est un concept de construction qui conjugue l'architecture de la maison ou d'un habitat, les conditions climatiques, le site de construction et les matériaux utilisés. Une harmonie est recherchée afin d'obtenir un habitat conçu pour être autant agréable l'été que l'hiver. La compacité du bâtiment est primordiale dans la conception climatique. Il faut comprendre que les murs ou enveloppe ne sont rien d'autre que des radiateurs en été et des radiateurs inversés en hiver. Ils constituent la surface d'échange avec l'extérieur. La performance thermique d'une maison passe donc par la connaissance de son coefficient de forme qui révèle la compacité du bâtiment. Cet indice est le rapport entre la surface de l'enveloppe en contact avec l'extérieur et le volume du bâtiment. Privilégier une forte compacité revient, pour un volume habitable fixé, à limiter la surface de déperdition du bâtiment. La compacité dépendant

directement de l'architecture du bâtiment, il est difficile de lui donner des limites chiffrées. Nous devons privilégier:

1. Une forme simple qui s'approche le maximum de la forme sphérique
2. Les mitoyennetés car les murs mitoyens sont disposés entre deux espaces et ne seront pas comptés comme déperditifs.
3. Les bâtiments de grande taille

Dans un contexte urbain, la liberté en termes de volumes est souvent fortement limitée. Des gabarits et alignements doivent être respectés, qui contraignent parfois l'architecture. C'est pourquoi une compacité performante et une bonne inertie sont préconisées pour que la maison soit réellement économe.

Nous espérons dans un prochain avenir développer le présent travail par une étude plus avancée, surtout le couplage entre les isolations (inertie) et la forme géométrique optimale de la construction, engendrer aussi l'orientation de l'habitat et l'influence de quelques paramètres comme l'humidité, l'infiltration, la stratification de l'air.....etc. Nous souhaitons enfin, que ce travail puisse contribuer à sensibiliser davantage les étudiants sur l'intérêt de ce thème, et que notre modeste mémoire trouvera sa place dans les laboratoires de notre université.

Résumé

Cette contribution présente des travaux portant sur la simulation et la modélisation des températures d'un habitat multizone. Deux modèles développés sous **MATLAB** et sous **TRNSYS 16** ont été mis en œuvre afin d'évaluer aussi finement que possible les réponses en température des différentes zones de l'habitat. Le modèle proposé par nous même prend en compte les éclairagements solaires incidents sur l'enveloppe, la vitesse du vent, la température ambiante, et l'ensemble des transferts de chaleur inhérents au milieu de l'habitat. Les résultats de la simulation obtenus lors de la conception du modèle ont été visionnés avec des valeurs obtenues dans l'environnement de simulation TRNSYS 16. Nous avons essayé par la suite d'apporter l'apport de l'indice de compacité sur les températures intérieures durant deux journées différentes (en été et en l'hiver).

Selon les résultats, Nous devons privilégier:

- Une forme simple qui s'approche le maximum de la forme sphérique
- Les mitoyennetés car les murs mitoyens sont disposés entre deux espaces et ne seront pas comptés comme déperditifs.
- Les bâtiments de grande taille

Mots clés : Compacité, Bilan Energétique, Température, Eclairage Solaire, Modèle Mathématique, Simulation Numérique

Abstract

This contribution present some reflections on the simulation time of a multizone building model. Two developed models, in **MATLAB** and **TRNSYS** software's, were implemented to evaluate as finely as possible the response in the temperature of a multizone building. The proposed approach takes into account the incident solar radiation, wind speed, ambient temperature and heat transfer properties. In the modeling process, the obtained simulation results were viewed with the predicted value in TRNSYS 16 simulation environment.

We subsequently tried to determine the contribution of compactness index on indoor temperatures during two different days (summer and winter season).

According to the results, we must privilege:

- A simple form that approaches the maximum possible to the spherical shape.
- Building with two facades because walls are placed between two spaces and will not be counted as a source of loss.
- High-dimensional buildings.

Keywords: compactness, Energy Balance, Temperature, Solar irradiance, Mathematical Model, Numerical Simulation.

ملخص

هذا الإسهام يعرض العمل على نمذجة و محاكاة لدرجة حرارة منزل متعدد المناطق. وفي هذا الصدد خصص نموذجين متطورين وفق البرمجيات التالية: **MATLAB** و **TRNSYS 16** لتقييم وبدقة أكبر ممكنة درجة الحرارة لمختلف مناطق المنزل. النموذج المقترح أخذ بعين الاعتبار السطوح الشمسية على المنزل، سرعة الرياح، درجة حرارة المحيط الخارجي و مختلف التحولات الملازمة لتقل الحرارة في وسط المنزل. كانت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من النموذج المشكل مشابهة للقيم المحصل عليها وفقا للبرنامج **TRNSYS 16**. وبناء على ذلك قمنا بإشراك مؤشر الاكتناز لملاحظة تغيرات درجات الحرارة الداخلية للمنزل خلال يومين في فترتين مختلفتين (الصيف والشتاء).

وفقا للنتائج، يجب أن نؤكد على اختيار:

- ✓ أن يكون شكل التصميم بسيط و أن يقترب أقصى ما يمكن للشكل الكروي.
- ✓ أن تكون المنازل متلاصقة لان الجدران الفاصلة و التي تفصل بين مبنيين لا تؤثر كثيرا في درجة حرارة المنزل.
- ✓ أن يكون حجم المبني كبير.

الكلمات الرئيسية : الاكتناز، موازنة الطاقة، درجة الحرارة، السطوح الشمسية، النمذجة الرياضية، المحاكاة العددية