

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département d'architecture
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister

Option : Architecture, formes, ambiances et développement durable

**Intégration des systèmes solaires photovoltaïques dans
le bâtiment :
Approche architecturale**

Présenté par :

M. BENAMRA Mostefa Lamine

Soutenu publiquement le 02/05/2013

Devant le jury composé de :

Pr. MAZOUZ Said	Professeur	Président.	Université de BISKRA
Pr. ZEMMOURI Nour Eddine	Professeur.	Rapporteur	Université de BISKRA
Pr. Mme ABDOU Saliha	Professeur.	Examinatrice	Université de CONSTANTINE
Pr. MOUMMI AbdelHafid	Professeur.	Examinateur	Université de BISKRA

Remerciements

En soutenant cette modeste recherche je tiens à remercier et exprimer ma gratitude à :

M. **ZEMMOURI Nour Eddine** qui m'a assuré la direction de mon travail, son soutien et sa patience et sa générosité ;

M. **BELAKHAL Azzedine** chef du département d'architecture ;

Professeur Mme **ABDOU Saliha** du département d'architecture de Constantine qui m'a accueilli et m'a pris en charge au sein du labo pour terminer ma recherche ;

M. **SOTEHI Walid** pour son soutien, son aide, sa générosité et sa patience avec moi afin de finir ma 2^{ème} partie de ma recherche ;

Tous les membres du labo bioclimatique au sein du département d'architecture de Constantine ;

Mrs. Les professeurs nous assurant l'encadrement durant l'année théorique 2007/2008, Dr. Professeur **ZEMMOURI Nouredine**, Dr. Professeur **MAZOUZ Saïd**, Dr. Professeur **FARHI Abdallah**, Dr. Mme **SAFFIDINE Djamilia**, Dr. **MUDRI**, Dr. **MOUMI AbdelHafid**, sans oublier les autres professeurs ;

Mrs. Les professeurs de l'institut de gestion et techniques urbaines à l'Université de M'sila, notamment **KHALFALLAH Bou djemââ**, ma femme **MEZRAG Hadda** ainsi que **MILI Mohamed** et son épouse **BOUTABBA Hynda** ;

Toute personne m'ayant soutenue, encouragé et poussé pour clôturer cette recherche ;

A vous tous veuillez agréer mes remerciements les plus distingués

Merci.

ذكري

لذكراكم يا أعز أناس قد يجدهم المرء بجانبه أوقات جني ثمار المجهودات

أمي الغالية (نفيسة مقراني) 1968

أنت التي كنت تأملين رؤيتي ذات يوم أحمل محفظتي في أول يوم من المدرسة، لكن موعد الرحيل إلى الدار الأبدية كان الأقرب ذات 1968 و في عمر الزهور (19 سنة) وأنا في الثانية من العمر، ودون تحقيق حلمك

أبي العزيز (إبراهيم) 1992

أنت الذي كنت من المهممين و المتتبعين للشؤون والأبحاث العلمية من خلال أعداد « science & vie » « علوم و حياة » التي كانت لا تفارقك و متنفسك، لكن موعد الرحيل ذات شتاء 1992 كان اقرب من موعد جني ثمرة العلم بتخرجي من الجامعة

أمي الغالية الثانية (جدتي يامنة يلس) 2003

أنت التي خلف الله علي بك فكننت أمي و أبي فكننت نعم الخلف، ساهمت و عشت معي أحلى أيامي

أختي زهيرة 2010

أنت ثاني زهرة و في 31 من العمر شاء القدر أن تغادرينا

إلى أرواحكم الطاهرة التي لن تنسى هذه الثمرة

اللهم ارحمهم واغفر لهم ووسع مدخلهم واجعل الجنة مثواهم.

ابنكم "مصطفى الأمين"

Dédicace

A toutes personnes citées en remerciement ;

A ma petite famille, ma chère épouse **MEZRAG Hadda**, mes fils : **Brahim, Nabil**, et les poussins **Aymen** et **Mamoune** ;

A ma grande famille BENAMRA, MOKRANI, YELLES, MEZRAG, mes frères et sœurs adoptifs Naima, A/Hamid, Lakhdar, Zoubida, Fouzia,

A mes frères et sœurs A/Nacer, A/karim, Nafissa, Wahiba, Walid, Badreddine, Fayçal ;

A tous mes amis, notamment les familles amis : M. MILI Mohamed, M. KORICHI A/Rachid, M. BARKAT Nadir ;

A tous mes collègues de la promotion 2007, Djemoui, Yacine, Sara, Keltoume, selma, amina et warda ;

A toute l'équipe pédagogique ainsi que le personnel du département d'architecture de Biskra ;

A tous mes collègues du travail à l'agence de wilaya de gestion et régulation foncière et urbaine de la wilaya de M'sila, et notamment M. HAMRIT Boulanouar ;

A tous mes collègues de l'institut de gestion des techniques urbaines de M'sila, M. le directeur et tout le staff pédagogique et administratif ;

A tous mes étudiants qui m'ont aidé et soutenu ;

A tous ceux qui me connaissent et m'estiment ;

A vous tous :

Je dédie ce modeste travail.

Le votre Mostefa Lamine

Table des matières

Remerciement.....	I
Mémoire.....	II
Dédicace.....	III
Table des matières.....	IV
Résumé.....	X
PARTIE 1 : Approche théorique	
CHAPITRE INTRODUCTIF	
Introduction.....	03
Problématique.....	05
Objectifs.....	05
Hypothèses.....	06
Motivation du choix.....	06
Méthodes et techniques utilisées.....	06
Structure de la recherche.....	07
CHAPITRE I : Approche conceptuelle	
-INTRODUCTION.....	09
I-1-Le soleil dans les mythes.....	10
I-2-Cinq mille ans d'Architecture solaire.....	11
I-3-L'énergie au service de l'humanité.....	11
I-4-Le systèmes énergétiques.....	12
I-4-1- Les sources d'énergie.....	13
a- Les énergies renouvelables	13
b- Les énergies non renouvelables.....	15
I-5-Démographie et énergie.....	15
I-5-1-Les changements climatiques.....	15
I-5-2-Causes du phénomène du réchauffement climatique.....	15
I-5-3-Economie d'énergie.....	16
I-6-Le contexte énergétique mondial.....	16
I-6-1-La situation actuelle : inégalité et risques.....	16
I-6-2-Le solaire solution pour préserver les ressources et l'environnement.....	17
I-6-3-L'énergie solaire aujourd'hui.....	18
I-6-4-L'énergie solaire dans le monde de demain.....	19
I-6-5-L'énergie solaire : avenir énergétique durable.....	19
I-7-Le système Terre – Soleil.....	20
I-7-1-Système solaire.....	21
a- Mouvement terre-soleil	22

b- Usage non énergétique du rayonnement solaire.....	24
c- L'énergie solaire.....	25
d- La course solaire et ensoleillement.....	26
I-8-La constante solaire.....	29
I-8-1-Affaiblissement du rayon solaire à la traversée de l'atmosphère terrestre.....	29
a- Les causes d'affaiblissement.....	29
b- Influence de l'épaisseur d'atmosphère.....	30
c- Influence des activités humaines.....	30
d- Réaction des surfaces réceptrices.....	31
I-8-2-Rayonnement solaire terrestre, de l'atmosphère de grande longueur d'onde.....	31
a- Importance de l'énergie solaire reçue par la terre.....	32
b- Mesures du rayonnement solaire.....	33
c- Valeurs et variations de l'énergie des rayonnements solaires.....	34
I-9- Prédétermination du rayonnement solaire en un lieu d'utilisation.....	36
I-9-1- Les problèmes généraux de l'utilisation de l'énergie solaire.....	37
a- Caractères particuliers de l'énergie solaire.....	37
b- L'énergie solaire est-elle ou non polluante ?	38
c- Qu'est ce que l' « ALBEDO » ?	39
I-9-2- Différents modes du stockage.....	40
a- Stockage au moyen de batteries d'accumulateurs électriques.....	41
b- Stockage thermique.....	41
c- Stockage par voie photochimique.....	42
d- Régularisation de l'énergie solaire par conversion biologique.....	42
e- Régularisation de l'énergie solaire au moyen de l'hydrogène solaire.....	42
Conclusion.....	43
CHAPITRE II : Les apports solaires sous ses différentes formes	
II-Introduction.....	45
II-1-L'énergie solaire dans le quotidien.....	46
II-2-Bâtiment et énergie.....	47
II-3-Les solutions architecturales pour augmenter les apports solaires.....	47
II.3.1-Systèmes passifs.....	48
II.3.2-Systèmes hybrides.....	49
II.3.3-Systèmes actifs.....	50
II-4- Systèmes passifs d'apport solaire.....	50
II-4-1-La baie vitrée.....	50
a- Comportement thermique d'un local vitré.....	50
b- Orientation de la baie vitrée.....	51

II-4-2-Les murs capteurs.....	52
a- Fonctionnement thermique.....	52
b- Caractéristiques du mur capteur.....	52
II-4-3-Les serres.....	53
a- Les formes des serres.....	53
b- L'effet de serre.....	54
II-4-4-Facteur solaire d'un vitrage.....	54
II.5-Le thermique dans le bâtiment.....	55
II-5-1-Echange de chaleur.....	55
a- Le rayonnement.....	55
b- La convection.....	55
c- La conduction.....	55
II-5-2-Le confort thermique.....	56
a- Confort d'hiver.....	58
b- Confort d'été.....	58
II-5-3-Principes de thermo-physiologique humaine.....	59
a- La température opérative.....	60
b- Humidité de l'air.....	61
c- Vitesse de l'air.....	61
II-6-Les systèmes actifs.....	61
II-6-1-le solaire : source gigantesque et inépuisable négligée.....	61
II-6-2-Une négligence inadmissible.....	62
II-6-3-Divers procédés de conversion de l'énergie solaire.....	62
a- Conversion photo thermique.....	63
b- La conversion photoélectrique.....	63
c- La conversion thermo-ionique.....	64
d- Les transformations thermodynamique.....	64
II-6-4-La captation des rayonnements solaires.....	68
a- Les divers modes de captation.....	69
b- Caractéristiques Techniques des Capteurs Solaires Plans à air.....	70
c- Classification des capteurs solaires plans à air.....	81
II-6-5- Capteurs à absorbeur plan.....	83
a- Optimisation des échanges thermiques.....	84
II-6-6- Conditions d'installation des insolateurs.....	88
a- Condition de fonctionnement.....	88
b- Pertes thermiques des insolateurs.....	88
II-7- Autres capteurs solaires.....	89
II-7-1-Les lentilles solaires.....	89

II-7-2- Types de concentration réalisables avec des miroirs.....	90
II-7-3- Constitution des miroirs concentrateurs.....	90
II-7-4- Formes, dimensions et fonctionnement des miroirs concentrateurs.....	90
II-8-L'électricité solaire photovoltaïque.....	91
II-8-1-Phénomène physique nouveau	91
II-8-2-Composante d'une centrale PV.....	92
a- Les modules photovoltaïques.....	92
b- L'onduleur.....	94
c- Les organes de sécurité et de raccordement.....	94
d- Les batteries d'accumulation.....	94
II-8-3-La caractéristique courant-tension d'une photopile.....	95
II-8-4-L'unité de puissance des photopiles : le Watt crête.....	95
II-8-5-Privilégier le service rendu ou la production photovoltaïque.....	95
Conclusion.....	97
CHAPITRE III : Modes d'intégration des capteurs solaires	
III-Introduction.....	99
III-1-Intégration architecturale des capteurs solaires.....	100
III-2-Bâtiment et énergie.....	100
III-2-1-Besoins en capteurs.....	101
III-2-2-Orientation et inclinaison.....	101
III-2-3-Masques.....	102
III-3-Comment intégrer les capteurs ?	102
III-3-1-Démarche d'intégration.....	103
III-4-Intégration des panneaux solaires par typologie de toiture.....	104
III-4-1-Les capteurs en toiture inclinée.....	104
III-4-2-Les capteurs dans les façades.....	109
III-4-3-Les capteurs en toiture terrasse.....	111
III-4-4-Les capteurs sur paroi verticale.....	112
a- Capteurs en allèges, auvent, garde corps, brise soleil.....	112
b- Capteurs en couverture de décrochements de façades ou vérandas.....	113
III-4-5-Les capteurs hors bâtiments.....	113
a- Capteurs au sol.....	113
b- Capteurs sur une dépendance.....	114
Conclusion.....	116

PARTIE 2 : Partie pratique (application)

CHAPITRE I : Définition du cas d'étude

I-Introduction.....	119
I-1- Critères du choix du cas d'étude.....	120
I-2- Situation des prototypes d'étude du village solaire intégré.....	121
I-3- Description des prototypes d'étude.....	121
I-3-1- Données climatiques proposées et orientation.....	121
I-3-2-Principe de conception.....	123
a- Prototype N°1.....	124
b- Prototype N°2.....	129
c- Prototype N°3.....	131
I-4-Résultats.....	135
Conclusion.....	135

CHAPITRE II : Simulation numérique

II- Introduction.....	137
II-1- Présentation du logiciel TRNSYS.....	137
II-1-1- But du logiciel TRNSYS.....	137
II-1-2- Objectifs.....	139
II-1-3- Outils.....	139
II-1-4- Principaux avantages.....	141
II-2- Simulation.....	141
II-2-1- Données des prototypes.....	141
II-2-2- Résultats.....	143
a- Région de Biskra.....	143
b- Région de Batna.....	150
c- Région d'Annaba.....	153
II-2-3- Comparaison des besoins en trois régions.....	156
II-3- Production des capteurs photovoltaïques.....	158
II-4- Résultats.....	158
II-4-1- La production des modules PV en électricité.....	158
b- Région de Biskra.....	158
c- Région de Batna.....	161
d- Région d'Annaba.....	163
II-4-2- Comparaison de la production électrique du module PV entre les 3 régions.....	166

Table des matières

II-4-3- Réponses aux besoins en énergie pour la climatisation.....	168
a- Région de Biskra.....	168
b- Région de Batna.....	169
c- Région d'Annaba.....	170
II-5- Impact environnemental.....	172
Conclusion.....	174
Conclusion générale.....	177
Liste des : figures, tableaux, graphes et photos.....	181
Bibliographie	191
Annexe.....	197

Résumé

Bien que le solaire est, depuis la création de cet univers par le tout puissant, et reste pour l'homme une source inépuisable pour se procurer de l'énergie en chaleur en s'exposant à ses rayons, au moment du froid, pour son corps ou bien ouvrir son logis par des solutions passives pour y bénéficier. Toutes ces sources font part d'une exploitation indirecte de l'énergie solaire stockée par des différents modes de captages.

Et suite à l'utilisation excessive des sources fossiles durant le XXème siècle, par leur disponibilité et leur bas prix pour produire l'énergie, un danger de pollution apparaît par l'émission du gaz carbonique dans l'atmosphère produisant le phénomène d'effet de serre causant le réchauffement climatique ainsi que les déchets nucléaire.

Il faut reconnaître que la technologie photovoltaïque présente un certain nombre d'inconvénients. D'une part, le rendement des modules n'est pas tout à fait optimal et dépend de nombreux facteurs (orientation, inclinaison, conditions climatiques, etc.). D'autre part le photovoltaïque requiert de la haute technologie et demande donc des investissements importants, essentiellement en matière de production.

Pour répondre aux objectifs de notre recherche et pouvoir tester la validité de nos hypothèses, nous avons optés pour des visites et des observations successives des établissements utilisant les panneaux solaires et exploitant l'énergie photovoltaïque, des relevés et des photographies ont été soulevés aux niveaux des villages solaires (objet de notre étude) situés à Ain Haneche dans la région de Boussaâda au Sud de la wilaya de M'sila considérée comme zone semi-aride. Un entretien a été mené aussi auprès du centre de recherche en énergie renouvelable de « Bouzereah » à Alger afin de connaître les limites d'application de l'énergie solaire dans les bâtiments ainsi que les contraintes rencontrées.

Notre analyse de simulation traitée par le logiciel TNRSYS a abouti à des conclusions et des recommandations qui peuvent être des lignes directrices pour encourager l'exploitation de l'énergie solaire dans le bâtiment.

Mots clés: Energies, systèmes solaires, panneaux solaires, cellules photovoltaïque.

Abstrait

Although the sun is from the creation of this universe, it is for man an inexhaustible source to provide energy to heat by exposure to its rays when cold for his body or open his house through passives solutions. All these sources are part of an indirect use of solar energy stored by different modes of capture.

Due to the excessive of fossil fuels during the 20 th century, by their availability and low cost to produce energy, appears a danger of pollution by the emission of carbone dioxide in the atmosphère producing the phenomenon of green house and causing global warming and nuclear waste. The solar solution is needed to produce energy, mainly electric energy through the photovoltaic.

We must reconize that photovoltaic technology has a number of disavantage, one hand, the module efficiency is not quite optimal and depends of many factors (orientation, tilt, weather). On the other hand, photovoltaics requires high technology and therefore requires significant investments in production. After all, the benefits of solar are also many, the possibilities of realization and integration are multiple.

Sensors can be used as constructive elements (glass, glass façade, roof element), they replace standard components giving the final realization aesthetic quality. Sensors can be multifunctional to produce electicity (photovoltaic) and contribute to building heating through the heat recovery.

To meet the objectives of our research and to test the validity of our assumptions, we have opted for visits and successive observations of establishments using solar panels and photographs were raised in solar villages (object of our research) located in Ain Haneche, in the region of Boussaâda south of the province of M'sila considered semi-arid zone. An interview was also conducted with the Research Centre for Renewable Energy "Bouzereah" at Algiers in order to know the application of solar energy in buildings as well as the constraints. Our simulation processed by the software analysis leads to conclusions and recommendations that can be guidelines to encourage the use of solar energy in buildings.

Key words: energies, solar systems, solar panels, photovoltaic cells.

ملخص

منذ أن خلق الله هذا الكون، خلق له مجموعة من مصادر الطاقة لتنعم بها البشرية، وكانت الشمس ولا زالت مصدرا هاما لجميع الكائنات الحية، سواء للبشر، الحيوان، أم للنبات. فهي العنصر لكل التغيرات على سطح الأرض، خاصة فيما يتعلق بالجانب الحراري بغية استعمالها للتدفئة أثناء موسم البرد.

ومن تبعات الاستعمال المفرط لمصادر الطاقة الغير متجددة طيلة القرن XX، نظرا لوفرتها وكذا ثمنها الرخيص، ظهر خطر تلوث الهواء جراء انبعاث الغازات السامة خاصة ثاني أكسيد الكربون الذي نتج عنه ما يسمى الآن بالاحتباس الحراري، دون أن ننسى خطر فرز النفايات النووية المشعة.

وبالتالي فإن البحث عن مصادر الطاقة المتجددة كالرياح، المياه، والشمس، أصبح أكثر من ضروري، فمثلا استعمال تكنولوجيا الألواح الشمسية لتوليد الكهرباء مازال يسجل بعض السلبيات من ناحية عدم قدرتها على إنتاج ما يغطي احتياجاتنا نظرا للعوامل المؤثرة (التوجيه، الميل، المعطيات الجوية)، ومن ناحية أخرى كونها ذات تكنولوجيا عالية تتطلب استثمارات كبيرة.

ولتحقيق الأهداف المسطرة في البحث والتأكد من مدى صحة الفرضيات، قمنا بعدة زيارات و ملاحظات مستمرة للعديد من المنشآت التي تستعمل الألواح الشمسية و تستغل الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى الرفع المعماري والصور للقوى الشمسية (موضوع الدراسة) و التي تقع بعين الحنش بمنطقة بوسعادة جنوب ولاية المسيلة والتي تعتبر من المناطق الشبه جافة، و كذا مقابلة بعض الباحثين بمركز الأبحاث في الطاقات المتجددة الواقع ببوزريعة بضواحي الجزائر العاصمة وذلك لمعرفة مدى تطبيق تقنيات الطاقة الشمسية داخل البنايات والعراقل التي تواجهها.

إن عملية التحليل المعالجة بواسطة البرنامج TNRSYS أدت إلى الوصول إلى جملة من النتائج والمقترحات والتي تعتبر خطوط عريضة تعمل على تشجيع استغلال الطاقة الشمسية داخل العمارة.

الكلمات المفتاحية: الطاقات ، النظم الشمسية، الألواح الشمسية، الخلايا الضوئية .

Première partie: Partie théorique

« Le soleil a été dans de nombreuses civilisations anciennes comme un dieu, source de toute vie. De fait, la lumière du soleil, transformée par les plantes est l'énergie qui nous nourrit et qui circule dans l'ensemble de l'écosystème terrestre » (Michel Tissot, 2012, P.4)

Chapitre introductif

Introduction

« **Architecture, jeu sublime et magnifique des formes dans la lumière** » Le Corbusier. (1)

La croissance démographique ne cesse de s'accroître, et tout citoyen a droit à une vie meilleure, de bénéficier d'un confort avancé en chaque lieu et chaque espace dont il est l'utilisateur afin d'accomplir ses différentes activités et usages ;

En parlant de croissance de population c'est de faire référence aux besoins de se loger, de travailler et de se distraire, et pour chaque usage l'appel à l'énergie devient primordial, puisque l'être humain passe la majorité de son temps à l'intérieur d'un bâtiment qui devrait ainsi assurer un maximum de confort.

L'énergie ni se crée ni ne se perd, toute l'énergie qui entre dans un bâtiment, sous forme de combustible, de rayonnement solaire, de nourriture ou d'électricité finit par se dégager d'une manière ou d'une autre, souvent sous forme de chaleur, c'est la forme la plus dégradée de l'énergie.

En avril 1926 déjà, **ALFONSE BERGERET**, dans un numéro de **la science et la vie** déclarait : « ***Nos houillères s'épuisent peu à peu, nos gisements de pétrole plus rapidement encore, et l'on peut prévoir, surtout si les besoins de l'industrie suivent leur progression presque effrayante, que dans quelques siècles (!), peut être même 150 ou 200 ans, nous serons obligés de demander aux forces naturelles, l'énergie nécessaire à nos besoins. Nous avons la houille blanche, nous avons celles des marées ; celle des vagues est plus importante encore et en reste deux auxquelles il faudra finalement s'adresser : l'énergie des vents et l'énergie du rayonnement solaire. Leur utilisation sera la tâche des physiciens et ingénieurs de demain...*** » (2)

Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage, par contre, dans les climats arides et semi arides (chauds), il est nécessaire d'abaisser la température intérieure du bâtiment pour assurer son besoin en confort, c'est ainsi que l'action du refroidissement est aussi un consommateur d'énergie.

(1). (2) L'habitat solaire : comment ? Georges Alexdroff- Alain Liebard. L'Equerre Editeur – Edition Apogée Paris 1979.

Face à ces enjeux climatiques, l'énergie solaire représente une des solutions, économique, fiable et durable, dans l'objectif de minimiser l'utilisation de l'énergie à bases des sources non renouvelables (combustibles issus des gisements pétroliers), car sa production nécessite un grand investissement soit pour créer et augmenter le nombre des unités de production ou la capacité des unités existantes et par conséquent leur influence sur l'environnement.

En effet la pollution et particulièrement le dégagement des gaz à effet de serre ont provoqué un dérèglement climatique, d'où comme résultat le réchauffement de la planète qui ne cesse d'alarmer la communauté internationale et les différents accords, conférences et protocoles mondiaux en témoignent.

L'Algérie fait partie de cette planète, ne peut être épargné de ce phénomène environnementale et continue toujours à produire son énergie en se basant sur les sources disponibles à savoir le pétrole et le gaz naturel qui sont épuisables et non renouvelables, donc il faut que dès à présent accentuer la sensibilisation de l'ensemble des intervenants (population, concepteurs, collectivité, etc.) pour se préparer et encourager l'intégration des systèmes solaires thermiques, photovoltaïques dans nos bâtiment pour satisfaire une partie de son besoin en énergie.

En effet, notre objectif principal est d'arriver à comprendre comment intégrer les systèmes solaires dans le bâtiment tout en prenant en considération sa lecture architecturale et quel sera ses influences en apport énergétique, pour cela un choix significatif du bâtiment à étudier est fait sur terrain.

Cette recherche est répartie en deux parties :

- la première partie est théorique,
- la deuxième partie consiste à élaborer une application de simulation par outil informatique sur un bâtiment ou plus, qui subiront les conditions climatiques de quelques différentes régions en Algérie selon disponibilité des données, notamment un climat aride ou bien semi aride (Biskra), une région des hauts plateaux (Batna, Constantine, ou Sétif), et une du littoral (Annaba).

Problématique

Le bâtiment est le lieu le plus fréquenté par l'homme soit où habiter, travailler ou même se distraire, et sous les différentes conditions climatiques le recours à l'utilisation de l'énergie s'avère très nécessaire pour se chauffer, se refroidir, préparer son manger et d'éclairer, donc il est évident de trouver des solutions pour faire intégrer le système solaire pour combler une partie ou la totalité de ses besoins quotidiens en énergie pour produire son eau chaude et de se chauffer voire produire son électricité.

Sachant qu'il existe d'énormes solutions et plus particulièrement l'énergie provenant des sources renouvelables comme le solaire, permettant de minimiser l'utilisation d'énergie issues de sources fossiles, la protection et la préservation de l'environnement, on a droit à quelques interrogations :

- Pourquoi l'utilisation de l'énergie à base de sources renouvelables tel que le solaire reste timide, malgré les études et recherches qu'ont pu prouver son efficacité, et on reste basé sur l'énergie produite de sources non renouvelables (fossiles) ?
- Pourra-t-on arriver à concevoir un bâtiment qui répond aux aspirations des usagers, et aux appels à la préservation de notre environnement en lui intégrant les systèmes solaires, et Quel sera leurs impact sur sa lecture architecturale et son comportement énergétique ?
- Y-a-t-il des normes et des conditions que les systèmes solaires dépendent ?

Objectifs

La rentabilité et l'efficacité de l'utilisation des systèmes solaires (thermiques, photovoltaïque) font le premier souci des chercheurs dans leurs études qui ont prouvé et donné des résultats satisfaisants comme moyens énergétique durable, dans le but de convaincre les différents utilisateurs pour minimiser l'utilisation des énergies à base de sources non renouvelables, mais leurs influence sur le bâtiment et sa lecture esthétique reste en deuxième rang.

Pour cela deux objectifs sont fixés comme cibles :

- Arriver à comprendre comment intégrer les systèmes solaires dans un bâtiment existant tout en préservant sa lecture architecturale, et les considérant comme éléments architecturaux composants pendant sa conception, et leur impact sur son comportement énergétique ;

- Connaître les différents intervenants responsables à l'introduction des énergies à base des sources renouvelables.

Hypothèses

- L'équipement des bâtiments en systèmes solaires thermique et photovoltaïque sans prendre en compte les différents critères d'installation (orientation, formes, positions, etc.) a influencé négativement sur leurs aspects esthétiques ;
- La rareté des réalisations contemporaines équipés en systèmes solaires thermiques et photovoltaïques justifie la non prise en considération de ces derniers comme éléments de base à la conception ;
- L'utilisation des systèmes solaires thermiques et PV reste très limitée par négligence des pouvoirs publics et des différents intervenants, et même les particuliers, de leurs importances sur le comportement énergétique des bâtiments.

Motivation du choix

Ce choix n'était pas arbitraire, mais voulu car d'une part, la conception solaire s'inscrit naturellement dans cette tendance architecturale dite bioclimatique fondée sur le respect de l'environnement est qui est un thème d'actualité.

D'autre part, le soleil est l'énergie qui éclaire la plupart des intérieurs et entre le soleil et l'énergie renouvelable toute une cohésion et une piste de recherche qui nous a éclairé le chemin pour travailler sur ce thème, ce travail a été choisi aussi vue sa nouveauté, son originalité.

Méthodes et techniques utilisées

Pour répondre à notre question de base, à savoir ; « Pourra-t-on arriver à concevoir un bâtiment qui répond aux aspirations des usagers et aux appels à la préservation de notre environnement en lui intégrant les systèmes solaires ; et Quel sera leurs impact sur sa lecture architecturale et son comportement énergétique ?

Et pour valider les hypothèses évoquées au début de notre recherche, l'analyse des différentes situations s'est faite à l'aide des méthodes suivantes :

- La collecte des données :

Pour mieux comprendre les définitions et les concepts et une bonne familiarisation avec le thème, il était judicieux, voire nécessaire de consulter :

-Des documents bibliographiques (ouvrages, thèses, Revues, Internet, article divers... etc.) se rapportant au sujet.

-Des observations successives de tous établissements utilisant les panneaux solaires et exploitant l'énergie photo voltaïque.

-Des photographies ont été soulevées sur des villages solaires notamment ceux implantés à Boussaâda.

* Des entretiens avec des responsables et des visites à des centres spécialisés en énergie solaire ont eu lieu pour connaître le mode de fonctionnement du système solaire.

Pour ce qui est des techniques utilisées, nous avons adopté un logiciel considéré le plus crédible, et plus authentique pour la recherche scientifique (TRNSYS).

Structure de la recherche

Notre recherche est structurée en deux parties, une partie théorique descriptive qui met en lumière les différents concepts ayant relation avec les objectifs de notre recherche, elle est composée d'un chapitre introductif illustrant d'une manière précise notre problématique, problème d'étude, les objectifs, les hypothèses, les techniques et les méthodes utilisées, un premier chapitre est une approche conceptuelle définissant les notions clés de la recherche.

Dans le deuxième chapitre, nous allons traiter les apports solaires sous ses différentes formes et un troisième chapitre qui est destiné aux modes d'intégration des capteurs solaires.

Une deuxième partie est plus pratique utilisant un logiciel appelé TRNSYS, où une série de simulations définissant les besoins en énergie de 2/3 prototypes de maisons solaires expérimentées dans la région de Boussaâda wilaya de Msila, précisément à Ain Lehnèche, par le centre de recherche en architecture et urbanisme, et en ajoutant quelques panneaux solaires combien pourra-t-on bénéficier d'énergie, en subissant des conditions climatiques similaires à cette région comme par exemple Biskra, et d'autres régions à climats différents.

Chapitre I : Approche conceptuelle

-INTRODUCTION

La connaissance des différentes sources d'énergie et particulièrement celles renouvelables, notamment le solaire, est essentielle en remplacement des autres énergies de sources fossiles, non renouvelables, dans le but d'économiser ces dernières d'une part et d'autre part la protection de l'environnement.

C'est donc dans cette optique que ce chapitre est rédigé, il constituera le 1^{er} support théorique de cette recherche, la synthèse d'une lecture de plusieurs ouvrages.

Il s'attache en 1^{er} lieu à donner des définitions et des éclaircissements sur les différentes formes d'énergie, soit non renouvelables ou renouvelables. En 2^{ème}, il abordera la notion du solaire, en tant que système et gisement, et son importance.

I.1-Le soleil dans les mythes

Par la lumière et la chaleur qu'il apporte sur terre, le soleil participe à l'éclosion et le maintien de la vie sur notre planète. Plantes, bactéries, animaux, toutes les composantes du régime végétal et du régime animal profitent de ses bienfaits.

D'après les synthèses des chercheurs et scientifiques, l'atmosphère primitive de la terre contenait en majorité de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et un peu d'azote, après son refroidissement, l'eau s'est condensé et a formé des retenues qui sont les océans, et sous l'effet du rayonnement solaires les premières molécules organiques autoreproductrices (bactéries) seraient apparues dans une « soupe » d'eau et de gaz carbonique contenant de nombreuses substances minérales pré-organiques.

Les premiers micro-organismes ont lentement produit de l'oxygène à partir du gaz carbonique et du rayonnement solaire, l'oxygène devenu suffisamment abondant, l'azote atmosphérique s'est formé et a bloqué une grande partie du rayonnement ultraviolet, permettant alors l'explosion de la végétation et un accroissement de la production d'oxygène. Les grands mécanismes de régulation de la géosphère comme le cycle de l'eau, le cycle du carbone, l'effet de serres se sont mis en place.

Le soleil joue un rôle de premier plan dans les mythes des diverses cultures les plus antiques. D'après leur croyance, le soleil est considéré comme dieu, « aucun autre dieu ne peut leur donner la liberté d'être, si ce n'est sa majesté Amon, car rien ne peut se faire sans lui » (hymne au soleil du temps de rames II, papyrus de 1280 av. JC au musée de Leyde). Rê, Amon ou Aton des égyptiens, hélios des grecs, inti des incas, Beelen des celtes, Mithra des zoroastriens et bien d'autres noms.

Dans l'univers religieux de l'Égypte ancienne, le soleil représente l'élément central autour duquel tout s'organise. Les égyptiens se sont tout particulièrement attachés à décrire la navigation nocturne du disque solaire : chaque nuit, le soleil dans sa barque doit affronter les épreuves et vaincre des forces hostiles, notamment l'attaque de serpent géant apopis. L'aube équivaut, pour le soleil, à une renaissance, sa lumière dissipe les angoisses de la nuit.

I.2-Cinq mille ans d'Architecture solaire

L'Architecture et le soleil sont depuis toujours dans notre conscience ; **« Architecture, jeu sublime et magnifique des formes dans la lumière »** (Le Corbusier). (1)

Et c'est dans les écrits de l'architecte romain Vitruvius que sont inventoriés pour la première fois les rôles du soleil et du vent dans le choix des implantations et des tracés des villes neuves et des édifices, permettant une protection maximale contre les rigueurs des climats. La prise en compte énergétique des facteurs climatiques pourrait mener à de nouvelles conceptions de l'espace urbain et souvent même au retour d'une cohérence de conception. L'espace urbain clos, la place, la rue, la cour seraient d'entrée réhabilités et envisagés comme microclimats, par opposition aux esplanades et espaces morts résiduels balayés par les vents, de beaucoup de nos ensembles récents.

En avril 1926 déjà, Alphonse Bergeret, dans un numéro de **La science et la vie** déclarait : **« nos houillères s'épuisent peu à peu, nos gisements de pétrole plus rapidement encore, et l'on peut prévoir, surtout si les besoins de l'industrie suivent leur progression presque effrayante, que dans quelques siècles (!), peut être même 150 ou 200 ans, nous serons obligés de demander aux forces naturelles, l'énergie nécessaire à nos besoins. Nous avons la houille blanche, nous avons celles des marées ; celle des vagues est plus importante encore et il en reste deux auxquelles il faudra finalement s'adresser : l'énergie des vents et l'énergie du rayonnement solaire. Leur utilisation sera la tache des physiciens et ingénieurs de demain... »**. (2)

I.3-L'énergie au service de l'humanité

Avant 10000 ans la terre ne comptait que quelques 10 millions d'individus qui ne pourraient influencer sur son écosystème, mais récemment l'homme a profondément modifié son environnement en temps beaucoup plus court.

(1). (2) L'habitat solaire : comment ? Georges Alexdroff- Alain Liebard. L'Equerre Editeur – Edition Apogée, Paris, 1979.

Par exemple en Europe qu'on a connu une révolution démographique entre 1750 et 1950 et grâce aux grandes avancées scientifiques (agriculture, santé publique, médecine...), la population est passée de 150 à 500 millions d'habitants, soit 15,6 % de la population mondiale.

Selon l'ONU, la terre comptera 9,3 milliards d'habitants en 2050, où on prévoit une diminution de la population d'Europe occidentale qui ne sera occupée que par 6%, et une augmentation de celle l'Amérique du nord de 40%. La progression sera sensible en Asie qui sera de 46%, en Amérique latine sera de 53%, et surtout en Afrique qui sera 146%. Les pays du sud compteront alors environ 8 milliards d'habitants, soit 87%, contre 75% en 1990 (on était à 3,8 milliards d'habitants).

La consommation d'énergie ne correspond pas à la répartition de la population sur la terre. Les pays industrialisés ne représentent aujourd'hui que 25% mais ils consomment 75% de l'énergie utilisée sur terre, 60% du charbon, 73% du pétrole, et 70% du gaz naturel, tandis que la population des pays du sud ne consomme que le 1/10. Mais la situation commence à se renverser depuis 1986 où on assiste à une progression de 6,2% en consommation énergétique dans les pays du sud, contre seulement 0,5% de progression dans les pays industrialisés.

En 2000, 26% de la population des pays du sud vivaient en zone urbaine, en 2025 on devrait passer à 75% en Amérique latine, 42% en Afrique et 37% en Asie, et par conséquent 1/5 de cette population vivra dans des mégapoles de plus de 4 millions d'habitants.

L'influence de ces chiffres est énorme sur l'environnement : consommation d'eau, alimentation, production et évacuation des déchets, partage des sources, etc. on peut déjà envisager l'ampleur des ravages sur les forêts, les prairies, les cours d'eau et les terres arables, et qu'on commence déjà à subir les résultats : déforestation, érosions et épuisements des sols, abaissement du niveau des nappes phréatiques, etc.

I.4-Les systèmes énergétiques

Chaque activité humaine sur la terre dépend de l'existence d'énergies disponibles en abondance, elles se partagent en énergies renouvelables (E R) dites énergies flux, et en énergies non renouvelables, dites énergies fossiles ou « stock ».

La première catégorie englobe toutes les énergies inépuisables qui sont largement disponibles à la surface de la terre, et pour bien tirer profit il faut obtenir des installations à faible et moyenne puissance. Les énergies non renouvelables sont des sous-produits fossiles végétaux ou animaux de l'énergie solaire (charbon, gaz, pétrole...) ou des gisements naturels (uranium), ils sont disponibles en quantités limitées, mais les exploiter il nous faut des installations à haute puissance (centrale thermique ou nucléaire).

L'exploitation des énergies fossiles a poussé le développement économique occidental, le bois a la place du charbon, puis le pétrole, et suite à la crise du pétrole le nucléaire a pris de l'importance. En conséquence l'épuisement ou la raréfaction des réserves d'énergies se font distingués, ainsi que la pollution produite par leur combustion ou le stockage des déchets radioactifs.

Donc les réserves en énergies ne persisteront que quelques décennies face à l'exploitation actuelle, 230 ans pour le charbon, 70 ans pour le gaz, 50 ans pour l'uranium, et 40 ans pour le pétrole.

I.4.1- Les sources d'énergie

Les applications indirectes de l'énergie solaire commencent avec la découverte du feu. En brûlant du bois, l'homme libère à son profit une énergie d'origine solaire accumulée pendant la croissance de l'arbre. Le bois de feu, utilisé pour la cuisson ou pour le chauffage, reste la forme prédominante d'utilisation de l'énergie solaire dans le monde moderne. Avec un peu plus de 10% du bilan énergétique de la planète, il arrive en tête des énergies renouvelable, devant l'hydraulique (5%).

Certains auteurs font remarquer que les combustibles fossiles, charbon, pétrole, gaz naturel, ont une lointaine origine solaire, dans la mesure où les biomasses (matières végétales ou animales) dont ils sont issus ont utilisé l'énergie solaire pour leur croissance.

a- Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables englobent toutes les énergies inépuisables qui depuis toujours nous viennent du soleil, directement sous forme de lumière et de chaleur, ou indirectement par les cycles atmosphériques et la photosynthèse. Le soleil dispense un rayonnement électromagnétique qui constitue notre source lumineuse et thermique.

Les énergies renouvelables sont largement disponibles à la surface de la terre, et leur emploi permet actuellement d'obtenir des installations à faible et moyenne puissance, appropriée à l'échelle domestique.

- La chaleur peut être captée directement par les fenêtres ou les capteurs solaires et peut être également transformée en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques ;
- Le rayonnement solaire est également à l'origine des mouvements de la masse d'air, lesquels, par différence de température et de pression produisent l'énergie éolienne, c'est l'énergie cinétique des masses d'air atmosphérique mise en mouvement par des différences des pressions dues notamment à des différences d'insolation. Des moulins à vent aux modernes aérogénérateurs, une grande variété de machines ont été utilisées pour tirer de cette énergie. Les parcs éoliens installés dans le monde fin 2001 totalisent 24000 mW dont 17000 mW en Europe.
- L'énergie hydraulique est alimentée par l'eau, restituée au cycle naturel par les précipitations après l'évaporation à la surface des océans, elle tire partie du cycle de l'eau à la surface du globe ; l'énergie solaire joue le rôle d'une gigantesque pompe venant extraire de l'eau des océans pour la répartir sous forme de pluies sur les continents. L'énergie hydraulique a d'abord été utilisée pour l'irrigation (relevant l'eau d'un cours d'eau par une noria) ou pour actionner des moulins et de scieries. Actuellement elle sert principalement à produire de l'électricité (hydroélectricité).
- La biomasse végétale est le résultat de la transformation par photosynthèse du rayonnement solaire : elle peut être considérée comme énergie flux (exploitation avec replantation) ou comme énergie stock (exploitation sans replantation). Elle existe sous diverse formes naturelles (bois et composés ligneux, algues) ou résulte d'activités agricoles (cultures énergétiques et sous produits des cultures alimentaires) ou d'énergie (lisiers, fumiers). La biomasse peut être valorisée par combustion ou gazéification (voies sèches), ou par fermentation produisant du méthane ou des alcools (voies humides).
- L'énergie géothermique, chaleur stockée dans la masse terrestre, peut également être exploitée pour, entre autres, le chauffage des édifices.

b- Les énergies non renouvelables

Les énergies non renouvelables sont elles mêmes des sous produits fossiles végétaux ou animaux de l'énergie solaire (charbon, gaz, pétrole, etc.) ou des gisements naturels (uranium). Ces énergies sont disponibles en quantités limitées, mais leur exploitation permet d'obtenir des installations à hautes puissances (centrale thermique ou nucléaire) capable de faire face à des applications industrielles.

I.5-Démographie et énergie

I.5.1-Les changements climatiques

Les conséquences écologiques sont aujourd'hui manifestes, causées par l'exploitation des énergies fossiles, ce qui a poussé les nations unies à penser sur l'environnement et le développement, et organiser ainsi la conférence de Rio en 1992 où le principe du développement durable fut reconnu. Donc il permet de satisfaire les besoins exprimés aujourd'hui, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leur besoins.

I.5.2-Causes du phénomène du réchauffement climatique

La pollution est caractérisée par sa large propagation, elle ne connaît pas de frontière. Les dépôts acides attaquent les sols, cultures, et forêts à des centaines voire des milliers de kilomètres, la pollution de l'air (rejets de combustions, rejets industriels) se déplace sur de grandes distances et se diffuse sur de larges territoires.

L'émission de polluants et notamment le gaz carbonique (CO₂), produit par oxydation du carbone dans la combustion du gaz, du charbon, du bois, et du pétrole, est très élevée depuis quelques dizaines d'années (24 milliards de tonnes sur 30 milliards de tonnes émises), ce gaz favorise le phénomène d'effet de serre provoquant ainsi des modifications climatiques tel que le réchauffement de la planète, modification des précipitations (canicules dans des zones connues froides, comme en France 2003, des ouragans plus puissant Katerina 2005).

En concentrant ses activités en villes l'homme y modifie le microclimat, température moyenne plus élevée, nébulosité due à la pollution de l'air. Donc les problèmes sanitaires y deviennent aigus.

En milieu rural, en plus du réchauffement de la planète, la modification du paysage (disparition des haies, déforestation, stockage des déchets) et l'utilisation des techniques agricoles (engrais, irrigation) altèrent profondément la qualité de l'environnement.

On distingue quelques illustrations des causes et effets du réchauffement dû aux gaz à effet de serre :

- 1- Déforestation (foret amazonienne considérée comme poumon de la terre) ;
- 2- Assèchement des sols (quelques pays en Afrique) ;
- 3- Débâcle glaciaire (pôle sud)
- 4- Pollution atmosphérique dans les grands centres urbains (Cuba, Inde, Brésil, Mexique, etc.)

I.5.3-Economie d'énergie

Que ce soit en milieu urbain ou en milieu rural, les effets de la pollution se font de plus en plus sentir, des comportements plus économes en énergie s'avèrent nécessaires, afin de réduire tant la consommation en énergies marchandes voire les rejets de polluants.

Depuis 1974 on avait déjà pensé à l'économie d'énergie, dans les années 1990 le pétrole coûtait moins de 20 dollars alors on a peu oublié cette tendance, mais en 2005 le baril dépasse les 65 dollars donc le contrôle sur la consommation énergétique revient sur la devant de la scène.

I.6-Le contexte énergétique mondial

I.6.1-La situation actuelle : inégalité et risques

La surconsommation côtoyant la pénurie caractérise aujourd'hui la situation énergétique mondiale : - la consommation mondiale moyenne par habitant, toutes énergies confondues, est équivalente à 1600 litre de pétrole par an, un indien en consomme moins de 300 litre par an, un américain l'équivalent de 7900 litre par an, 26 fois plus.

Les 270 millions d'américains du nord consomment à eux seuls autant d'énergie que les 3,6 milliards d'africains, d'américains du sud, et d'asiatiques (hors japon). Pour l'électricité, symbole de modernité et de développement, le déséquilibre est encore bien pire puisque plus de 40% de la population mondiale, soit 2 milliards d'être humains sont privés. Dans certaines régions, comme l'Afrique subsaharienne, moins de 10% des habitants sont raccordés au réseau.

I.6.2-Le solaire solution pour préserver les ressources et l'environnement

La crise pétrolière en 1973, était une conséquence d'une décision politique, prise pour la bonne cause par les pays arabes principaux producteurs, qui a permis aux consommateurs (occidentaux) de prendre conscience de la fragilité du système énergétique fondé sur le recours aux énergies fossiles épuisables. Les années 80 ont été celle de la prise de conscience de l'importance des conséquences des choix énergétiques sur l'environnement : pollutions atmosphériques dues aux émissions de gaz de combustion des énergies fossiles, conséquences régionales dues aux accidents nucléaire comme celle de Tchernobyl, risques de réchauffement planétaire, la stérilisation de très vastes zones, la pollution radioactive transfrontière. Et pour meilleur exemple, on devra se rappeler la date du 11 mars 2011 le jour où un violent tremblement de terre suivi d'un Tsunami a frappé le japon, causant de très grands endommagements des centrales nucléaires et particulièrement la centrale de Fukushima dont son nuage radioactif a atteint l'Europe passant par l'Amérique du nord.

Donc compte tenu de ces risques, le solaire présente des atouts sérieux, son utilisation permet d'économiser des énergies fossiles, retarder leur épuisement, pas de pollutions atmosphériques locales ou globales, pas d'oxyde de soufre qui cause les pluies acides, pas d'oxyde d'azote et de carbone qui empoisonnent les villes, pas de gaz carbonique ou de méthane principaux accusés de l'augmentation de l'effet de serre, pas de dangers transfrontières dus aux accidents dans les centrales nucléaires, ou bien accidents locaux (explosion de chaudière, accident électrique) pouvant se produire dans toute installation industrielle.

Mais nombreux considèrent que cette énergie est plutôt nuisibles à l'environnement, nécessitant de vastes espaces naturels pour l'exploiter, des conséquences

donc tels que le bouleversement du paysage, l'atteinte à l'agriculture, la modification profonde de l'environnement et le cadre de vie. Ces arguments sont justifiables dans la mesure où l'application de l'énergie solaire est centralisée, comme pour les centrales thermodynamiques ou photovoltaïque, une centrale de 100 mW, qui peut produire annuellement une centaine de giga wattheures d'électricité, occupe une surface de 1,2 à 2,5 km² selon la technique retenue et les conditions d'ensoleillement, mais pour les autres applications décentralisées, soit pour la thermique ou la photovoltaïque, les capteurs font partie intégrante des bâtiments et n'occupent aucune place supplémentaire.

Une centrale solaire est 25 à 50 fois plus productive à l'hectare que la biomasse (cultures pour fabriquer des carburants ou bois de chauffage), mais elle occupe plus d'espace que les centrales à combustible fossile ou nucléaire (3 fois plus qu'une centrale au charbon, 10 fois plus qu'une centrale à gaz naturel).

I.6.3-L'énergie solaire aujourd'hui

Les technologies au point concernent la collecte des apports solaires par des dispositions de l'architecture bioclimatique, la production de chaleur à basse température pour l'habitat et le secteur tertiaire, la production d'électricité par photopiles et par centrales thermo solaires, surtout là où les autres énergies ne vont pas : sites isolés, monde rural, de pays en développement.

Malgré l'importance des applications, permettant l'amélioration considérable des conditions de vie de centaines de millions de personnes, de l'énergie solaire, élément d'approvisionnement énergétique, reste encore modeste.

L'énergie solaire présente deux avantages fondamentaux : c'est une énergie inépuisable, ne produisant aucune émission de polluants ni déchets, naturellement distribuée, disponible sur les lieux de consommation à proximité, elle peut participer à la diversification des sources et l'indépendance énergétique.

Comme toutes autres sources, de nombreux obstacles s'opposent à son développement. Les variations périodiques (jours, saisons) et aléatoires (nuages) de l'ensoleillement constituent la principale contrainte technique à prendre en compte dans

l'utilisation de cette énergie, d'autant que les systèmes de stockage se révèlent souvent difficiles à mettre en œuvre ou très coûteux.

I.6.4-L'énergie solaire dans le monde de demain

Avec la croissance démographique nécessitant plus d'énergie surtout pour les pays du sud, le développement de l'énergie solaire devient une obligation, à côté des autres formes d'énergies, par ses techniques et ses conditions de compétitivité économique. Chaque augmentation des prix des énergies fossiles rend en effet les techniques solaires actuellement proches de la compétitivité, et ses applications sont plus attractives par ses conséquences positives sur l'environnement. Particulièrement pour le photovoltaïque où les recherches se poursuivent sur les cellules et les systèmes notamment la progression des quantités produites industriellement pour une éventuelle baisse des prix unitaires, donc la mise au point de cellules à haut rendement, capable de convertir en électricité l'énergie contenue dans une plus large partie du spectre solaire.

Des nouvelles opportunités pourraient émerger à partir de recherches appliquées (thermochimie solaire) ou plus fondamentales (photochimie) pour de nouveaux vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène ou des carburants de synthèses.

I.6.5-L'énergie solaire : avenir énergétique durable

La montée des problèmes planétaires globaux, épuisement des ressources ou dégradation de l'environnement, n'appelle pas nécessairement une réponse globale. La complexité croissante du système énergétique mondial où chaque nouvelle forme d'énergie s'ajoute aux précédentes, des substitutions existaient et continuent à exister mais partiellement, en effet le charbon n'a pas éliminé le bois de feu, le pétrole a conquis la première place, le gaz puis le nucléaire sont venus s'ajouter et sera de même pour l'énergie solaire qui trouve peu à peu ses domaines d'application au côté des autres sources d'énergies. La maîtrise de consommations d'énergie devient indispensable pour un développement durable, avec le développement démographique et économique du monde, les ressources de toute nature s'épuiseraient rapidement et les émissions de polluants entraînent plus vite des bouleversements irréversibles de l'environnement. Une éventuelle généralisation, dans tous les secteurs d'activités, des techniques actuelles et futures les

moins gourmandes en énergie pourrait contribuer notablement à un développement mondial équilibré. Dans ce contexte, les progrès déjà réalisés et les nouvelles recherches à mener dans le domaine de l'énergie solaire participent à dessiner un avenir énergétique durable associant efficacité énergétique et énergie renouvelables.

I.7-Le système Terre – Soleil

Le soleil constitue notre source énergétique fondamentale, ses caractéristiques soumettent la terre à des variations saisonnières affectant l'évolution de l'ensoleillement et des températures.

Les mouvements de la terre à l'intérieur du système solaire sont très complexes. La rotation terrestre (1690 km/h au droit de l'équateur) correspond au cycle jour/nuit, tandis que son parcours autour du soleil, équivalent à 1710 km/h, provoque les variations saisonnières.

L'inclinaison de l'axe de rotation nord – sud de $23^{\circ}27'$ par rapport au plan écliptique explique les cycles saisonniers. Il existe ce qu'on appelle le phénomène de **nutacion** où la lune intervient par son mouvement et perturbe le champ de gravitationnel terre-soleil et oblige la terre, par le centre de gravité du système terre-lune, à décrire une orbite légèrement elliptique autour du soleil.

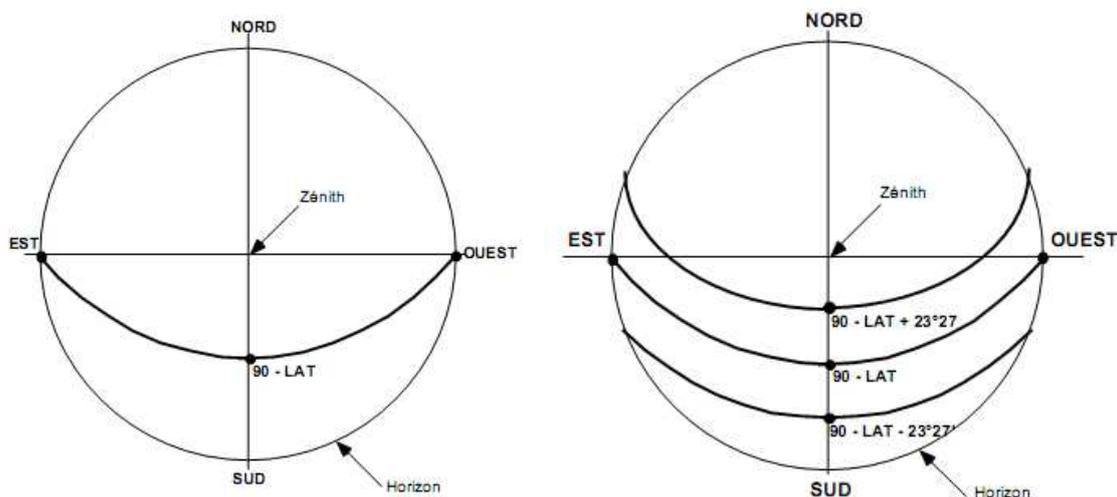


Fig. (I-I-1)- Diagramme solaire simplifié : course de l'équinoxe et des solstices d'une altitude LAT. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

I.7.1-Système solaire

Le Système solaire est composé du Soleil autour duquel gravitent 8 planètes et leurs lunes, ainsi qu'un ensemble de petits corps tels que les planètes naines (comme Pluton), les comètes et les astéroïdes.

Système solaire *locution nominale - masculin ((systèmes solaires)).* (1)

1. Astronomie ensemble constitué par le Soleil et tous les corps qui gravitent autour de lui tels que les planètes et leurs satellites.

Solaire. (2)

a- Relatif au soleil. Rayonnement solaire. Année solaire. Vent solaire : flux de particules chargés émis en permanence par le soleil.

**Astronomie. Système solaire : ensemble du soleil et des astres qui gravitent autour de lui.*

b) Relatif à l'énergie fournie par le soleil. Capteur solaire.

** Maison solaire, conçue de façon que son chauffage soit assuré, en tout ou en partie, par captage de l'énergie solaire.*

- Centrale solaire : centrale de production d'énergie solaire électrique à partir de l'énergie solaire.

** phys. Constante solaire : flux d'énergie solaire reçu par unité de surface, perpendiculairement au rayonnement incident, à l'entrée de l'atmosphère, à la distance moyenne de la terre au soleil.*

** Ensemble des techniques, industries qui mettent en œuvre l'énergie solaire.*

(1) Microsoft® Encarta® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation.

(2) Le Petit Larousse Illustré 1991, Imp. MAURY-MALSHERBES, N° série 15824, Septembre 1990.

a- Mouvement terre-soleil

Les mouvements de la terre à l'intérieur du système solaire sont très complexes, la rotation terrestre à 1699 km/h au droit de l'équateur correspond au cycle jour/nuit, tandis que son parcours autour du soleil équivalent à 1710 km/min, provoque les variations saisonnières.

L'axe de rotation de la terre est incliné de 23°27min par rapport à l'écliptique, cet angle définit les limites des tropiques du cancer et du capricorne :

En hémisphère nord au solstice d'hiver (22 décembre à 12h en GMT), les rayons solaires sont perpendiculaires au tropique du capricorne, et seront perpendiculaires au tropique du cancer au solstice d'été (21 juin à 12h GMT). Fig. (I-2)

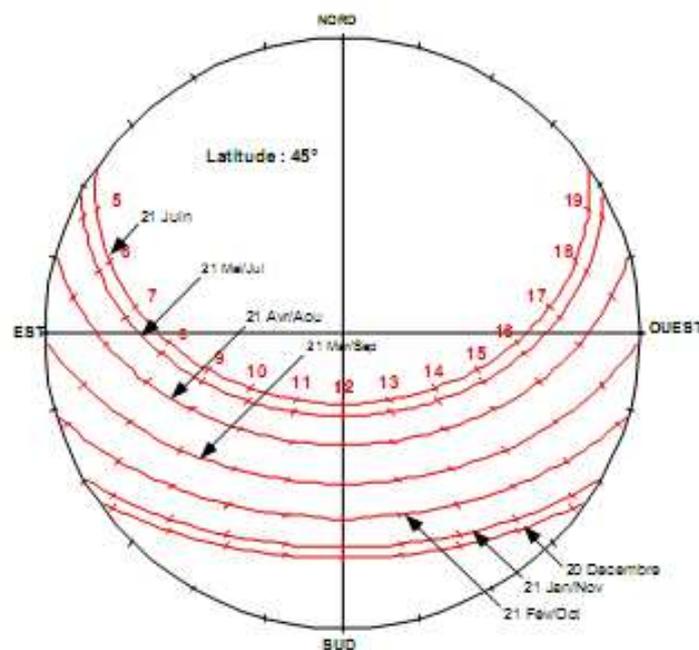


Fig. (I-I-2)- Diagramme solaire de la latitude 45° Nord: courses mensuelles avec indication des positions horaires. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

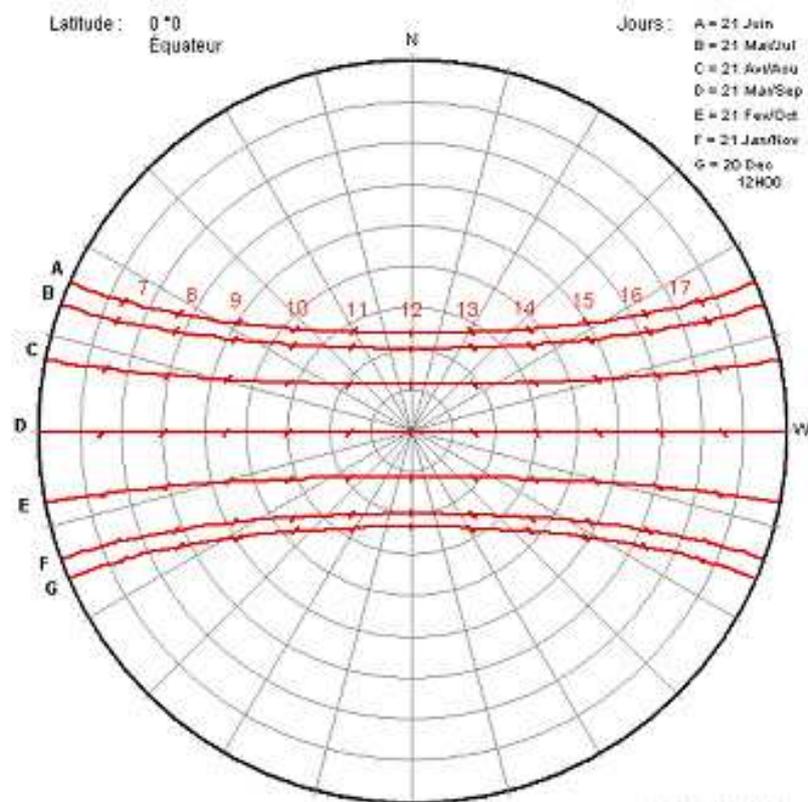


Fig. (I-1-3)- Diagramme solaire de la latitude 0 (équateur): la moitié de l'année, le soleil évolue dans le quart de sphère opposé à celui de l'autre moitié de l'année, la durée du jour est de 12h. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

La géométrie du système solaire définit également les cercles polaires, aux équinoxes, en mars et septembre, le soleil aura son zénith à l'équateur et, en tout point de la terre, la durée du jour sera égale à la durée de la nuit.

Au pôle nord c'est une autre géométrie qui s'illustre où pendant 6 mois, le soleil tourne sur l'horizon jour après jour sans se coucher. Il suit en réalité une spirale en s'élevant graduellement jusqu'à atteindre sa hauteur maximale en solstice d'été, pendant les 6 autres mois le pôle est plongé dans l'obscurité. Fig. (I-4)

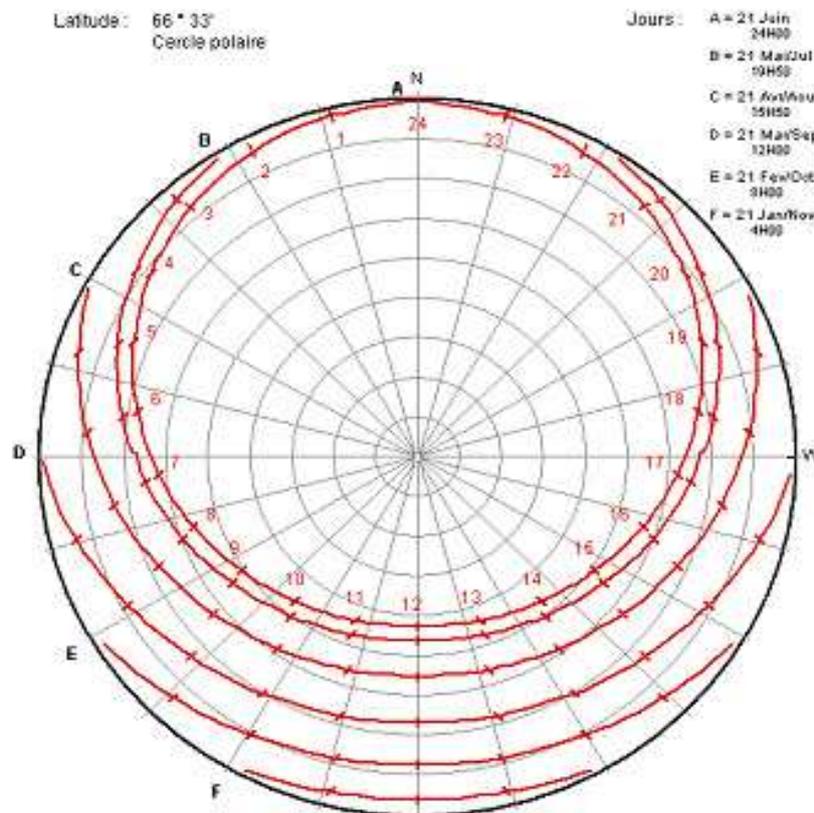


Fig. (I-I-4)- Diagramme solaire de la latitude 66°33 Nord (cercle polaire) : particularité au solstice d'été le soleil ne se couche pas. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

b- Usage non énergétique du rayonnement solaire

Source de vie sur terre et symbole pour l'esprit humain, le soleil est à l'origine de nombreuses applications pratiques implicites et non énergétiques, comme source de lumière naturelle, composante de l'agriculture par sa lumière qui agit sur le cycle photosynthétique des végétaux (conversion photochimique).

Il pourrait être moyen d'orientation, indicateur de l'heure solaire, voire responsable du bronzage estival comme procédés esthétique pour le corps humain, on utilise ces multiples possibilités du rayonnement solaire sans vraiment parler d'énergie solaire. La lumière solaire agit également sur la plupart des biorythmes des organismes vivants, homme compris.

L'alternance jour-nuit donne une première mesure du temps qui passe. Le cadran solaire en permet une lecture plus fine (inventés, dit-on au III^{ème} siècle av. JC par un prêtre égyptien), souvent dessiné sur un mur orienté sensiblement au sud.

c- L'énergie solaire

Le soleil est un astre incandescent (sa température superficielle est estimée à 5750°C) qui émet un rayonnement électromagnétique sous forme de lumière et de chaleur, ses rayons sont indispensables aux réactions biochimiques de la vie végétale et animale existantes à la surface de la terre.

L'énergie solaire est présente partout, ambiante, intermittente (cycle journalier et saisonnier), propre (sans déchets), gratuite (pas de tarif, pas d'intermédiaire, pas de réseau) mais elle nécessite des installations pour sa conversion en chaleur ou en électricité.

De l'énergie interceptée par la terre, 60% sont réfléchis par l'atmosphère, 16% intervient pour le cycle de l'eau et de l'énergie hydraulique (évaporation des océans), 11,50% réfléchis à la surface de la terre (coefficient d'albédo), 9,50% absorbés par la masse terrestre et les masses d'air, 3% environ pour la photosynthèse (terrestre et aquatique), et une infime partie 0,02% pour la formation de réserves d'énergies fossiles.

Donc l'homme tente de tirer parti de ces énergies ambiantes sous forme de lumière et de chaleur :

- _ Plus de lumière naturelle pour réduire le coût d'utilisation de l'éclairage artificiel ;
- _ Plus de chaleur gratuite pour freiner les consommations énergétiques marchande et limiter les atteintes à l'environnement.

L'énergie solaire est aujourd'hui utilisée dans le cadre de l'architecture solaire passive (conception architecturale intégrée comme les baies vitrées, serres, chauffe eau solaire , etc.) et active (technologie intégrée comme les capteurs solaires destinés au systèmes de chauffages, quand au solaire photovoltaïque il permet la conversion du rayonnement solaire en électricité (rendement de 10 à 12 %) pour certaines applications intéressantes pour les zones isolées ou non reliées au réseau (radiobalisage, phares, émetteurs de la radio et télévision et téléphone, éclairage, pompage de l'eau, réfrigération, etc.)) et solaire hybride au fonctionnement tantôt passif tantôt actif.

d- La course solaire et ensoleillement

L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et la durée d'ensoleillement. Les conditions géométriques du système terre-soleil déterminent la position relative du soleil, qui est repérée par son azimut (γ) et sa hauteur angulaire (α).

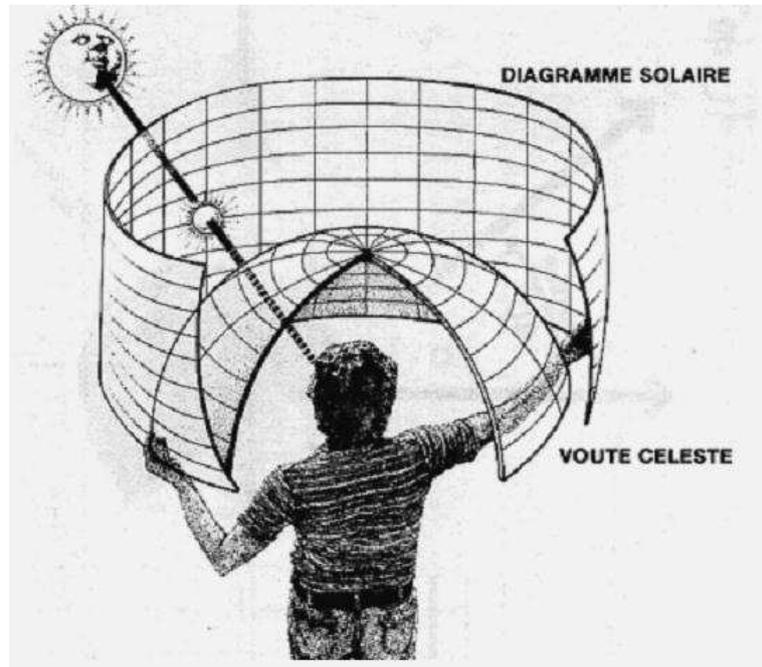


Fig. (I-I-5)- Projection angulaire de la course solaire. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

- Azimut

Est l'angle horizontal formé par un plan vertical passant par le soleil et le plan méridien du point d'observation. Par convention, on donne au Sud la valeur zéro (0) ;

- Hauteur angulaire du soleil

Est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan de l'horizon ;

Formule de la hauteur angulaire à midi :

- Solstice d'été : $\alpha = 90^\circ - \text{latitude} + 23^\circ 27 \text{min}$

- Solstice d'hiver : $\alpha = 90^\circ - \text{latitude} - 23^\circ 27 \text{min}$

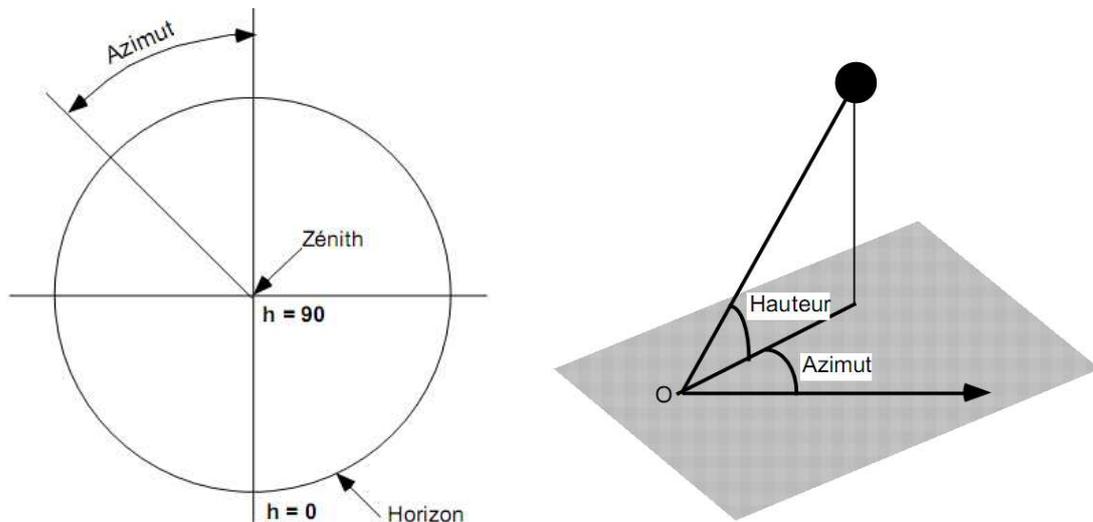


Fig. (I-I-6)- Projection sphérique : Position de l'horizon et du zénith. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

Compte tenu de l'influence de la nébulosité, la course solaire détermine l'exposition énergétique (durée d'ensoleillement) et l'angle d'incidence (intensité). Généralement le rayonnement solaire n'est utile que pour une hauteur $> 10^\circ$, en tenant compte des obstacles généralement présents dans l'environnement et du faible rayonnement énergétique du soleil au lever et au coucher.

Le rayonnement solaire reçu à la surface de la terre est un rayonnement électromagnétique comme les ondes de la radiotélévision ou les rayons x. Il est composé particulièrement de lumière visible, dans la gamme de longueur d'onde λ qui va entre $0,38$ et $0,78 \mu\text{m}$, de rayonnement infrarouge ($\lambda > 0,78 \mu\text{m}$) et d'un peu de rayonnement ultraviolet ($\lambda < 0,38 \mu\text{m}$).

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique qui varie peu en dehors de l'atmosphère (constante solaire : $\pm 1350 \text{w/m}^2$). Par contre le rayonnement disponible au sol dépend de la composition de l'atmosphère.

Selon les applications, on caractérise généralement l'ensoleillement par l'une des trois grandeurs suivantes :

- **L'énergie globale** reçue par une surface fixe d'orientation définie ;

A la traversée de l'atmosphère une partie du rayonnement solaire est absorbée, une autre partie est dispersée par les molécules de l'atmosphère ainsi que par les particules en

suspension, on engendre le *rayonnement solaire diffus* ; et le reste du rayonnement parvient directement à la surface de la terre c'est le *rayonnement solaire direct*.

- Rayonnement direct :

Le rayonnement solaire directe est celui qui atteint directement la terre ;

- Rayonnement diffus :

Le rayonnement absorbé et réfléchi partiellement par les poussières et les microgouttelettes d'eau en suspension composant l'atmosphère, une autre partie diffusée dans toutes les directions pour les molécules d'air et les particules existantes dans l'atmosphère. Ces rayons frappants le sol en un lieu constituent le rayonnement diffus.

Le rayonnement Global, est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre, comprenant la composante verticale du rayonnement solaire direct (s'il existe) et le rayonnement solaire diffus (provenant de la voûte céleste et des nuages), ils sont de courtes longueurs d'ondes.

$$G = D + I \sin h$$

- G : rayonnement global

- D : rayonnement diffus

- I : rayonnement direct

- h : hauteur du soleil

En ciel clair le diffus est à 10%, en ciel couvert il atteint 100% ;

Parfois on a une troisième composante « la réfléchie », en milieu rural grâce aux plans d'eau, en milieu urbain par la réflexion du soleil sur les bâtiments voisins.

La valeur du rayonnement solaire varie selon la saison, la latitude, l'altitude et les conditions locales de nébulosité.

• **L'intensité** du rayonnement direct incident sur une surface orientée en permanence vers le soleil, ou bien l'énergie qui en résulte en une période donnée ;

• **La durée** d'ensoleillement, durée journalière, mensuelle ou annuelle pendant laquelle le rayonnement direct est supérieur à un seuil arbitraire de 100 w/m^2 . La mesure instantanée est l'éclairement global horizontal et s'exprime physiquement en w/m^2 et usuellement

kW/m^2 . L'intégration de cette mesure donne l'irradiation globale sur une surface horizontale, exprimée physiquement en J/m^2 et usuellement en $\text{kWh/m}^2 = 3,6 \text{ MJ/m}^2$).

I.8-La constante solaire

L'orbite solaire étant elliptique, la distance de la terre au soleil varie au cours de l'année d'environ 32,4%, compte tenue de cette variation, on définit la **constante solaire** comme étant la quantité d'énergie rayonnante, supposée intégralement transformée en chaleur, que le soleil envoie par minute à travers une surface de cm^2 , normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère terrestre à une distance au soleil égale à la distance moyenne de la terre au soleil.

Après des milliers de mesures, on adoptait comme valeur de la constante solaire $1,94 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$, soit $0,135 \text{ W/cm}^2$. D'après Johnson, 1954, on admet $0,1395 \text{ W/cm}^2$ soit $1,395 \text{ KW/m}^2$, donc pratiquement 1400 W/m^2 , ou $1200 \text{ kcal/m}^2/\text{h}$.

Un faisceau cylindrique de rayon solaire d' 1 km^2 de section droite apporte donc à son entrée dans l'atmosphère terrestre une puissance de 1395 mégawatts.

I.8.1-Affaiblissement du rayon solaire à la traversée de l'atmosphère terrestre

a- Les causes d'affaiblissement

Les causes d'affaiblissement du rayonnement solaire dans la traversée de l'atmosphère sont en général :

- l'**absorption** proprement dite par les gaz et vapeurs de l'atmosphère ;
- la **diffusion** moléculaire par ces gaz et vapeurs ;
- les particules de toutes sortes en suspension dans l'atmosphère ;
- **Absorption**

Les gaz et la vapeur d'eau ont, dans le spectre solaire, des raies ou bandes d'absorption bien déterminées, dite « absorption sélective ».

L'absorption par l'azote, l'oxygène et les gaz rares de l'air est très faible. Une légère quantité d'ozone absorbe l'ultraviolet en dessous de la longueur d'onde de 0,3 micron.

Il y'a une absorption par le gaz carbonique et la vapeur d'eau dans certaines régions de l'infrarouge de la longueur d'onde vers 2,6 et 4,3 microns.

- Diffusion

Les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau devient par diffusion moléculaire, dans toutes les directions, une partie du rayonnement solaire direct, qui est ainsi affaibli. Cette diffusion affecte surtout les petites longueurs d'ondes. C'est elle qui produit la couleur bleue d'un ciel sans nuages, c'est le rayonnement solaire diffus.

- Affaiblissement par les particules

L'atmosphère peut contenir toutes sortes de particules : gouttelettes d'eau (brumes, brouillards, nuages), particules de glace (nuages congelés, grésil près de la surface du sol), poussières, fumées, particules organiques (pollen, spores, etc.), particules radioactives, agglomération de molécules (petites ions, gros ions), particules de sel au dessus des mers et sur les littoraux par suite de l'évaporation des gouttelettes d'eau de mer projetées par les vagues.

L'influence de ces particules est très marquée dans les villes et les agglomérations industrielles. L'absorption par les poussières n'est pas sélective, elle se manifeste surtout dans l'ultraviolet.

b- Influence de l'épaisseur d'atmosphère

L'absorption et la diffusion dépendent de la masse d'air traversée, de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et de la hauteur du point d'observation au-dessus du niveau de la mer ; au cours de la journée le rayonnement est très fort a midi, il est plus fort en été qu'en hiver, le soleil étant plus haut. En régions tropicales le rayonnement est plus fort qu'aux régions éloignées situées en hémisphère nord ou sud. En haute montagne, il est plus fort qu'au niveau de la mer.

c- Influence des activités humaines

On peut détecter dans l'air, sous forme de particules, les traces de polluants produits par les activités humaines, et même dans des régions les plus reculées du monde. La croissance du teneur de l'atmosphère en gaz carbonique ne cesse de croitre en raison de l'utilisation des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel).

Dans beaucoup de villes des pays industrialisés, les automobilistes produisent environ la moitié des polluants de l'air. N'oublions pas que les avions dégagent aussi des produits

d'échappement, en haut dans la troposphère, et par l'augmentation des cirrus dans les zones de trafic aérien intense le risque d'accumulation de ces produits qui mettent en moyenne 1 à 2 ans à se dissiper.

Si on considère que l'industrialisation et l'urbanisation avec ses modes de transport actuels et ses foyers domestiques réduisent 20% l'énergie solaire globale reçue par une région, supposée recevoir antérieurement 1700 kWh/m²/an du rayonnement solaire, la perte annuelle au sol d'énergie incidente est de 340 kWh/m², soit 340 000 000 kWh/km², cette perte peut être très élevée si la réduction est de 50% qui peut être produite en hiver dans les pays industrialisés.

d- Réaction des surfaces réceptrices

Les corps solides opaques au rayonnement solaire font deux parts du rayonnement incident : l'une est absorbée et l'autre est réfléchie ou diffusée, ces surfaces recevant le rayonnement lumineux se comportent différemment les unes aux autres, elles l'absorbent et le réfléchissent ou le diffusent dans un rapport très variable selon leur couleur et leur rugosité.

Recevant le rayonnement obscur, de grandes longueurs d'ondes, émanant de sources à températures modérées, les surfaces réceptrices opaques se comportent au contraire de façons très semblables : elles absorbent ce rayonnement presque intégralement, quelque soit leur couleur et même leur rugosité.

I.8.2-Rayonnement solaire terrestre, de l'atmosphère de grande longueur d'onde

Le rayonnement solaire reçu à la surface du globe est renvoyé par réflexion et diffusion, le reste est absorbé. La surface du globe émet un rayonnement propre de grandes longueurs d'onde (infrarouge lointain) comprises entre 5 et 80 microns, où la plus grande partie est absorbée dans l'atmosphère par la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone, le reste s'échappe vers l'espace.

L'atmosphère émet, dans toutes les directions, un rayonnement de grande longueur d'onde et subissent une absorption ; une partie parvient à la surface du globe, une autre s'échappe vers l'espace.

Les nuages absorbent et réémettent le rayonnement de grande longueur d'onde. Donc la proportion de rayonnement de grande longueur d'onde renvoyée sur la surface du globe dépend principalement de la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau et gaz carbonique, ainsi que la nébulosité.

« Rayonnement terrestre descendant » le rayonnement de grande longueur d'onde de la planète terre qui, dirigé vers le bas, provient de l'atmosphère et est reçu par un plan horizontal.

« Rayonnement terrestre effectif », ou *bilan radioactif*, est la résultante du rayonnement qu'une surface donnée émet et du rayonnement qu'elle reçoit. Pendant la nuit, ce rayonnement effectif est constitué par la différence entre le rayonnement propre de la surface et le rayonnement propre de l'atmosphère. Pendant le jour, la surface terrestre continue d'émettre un rayonnement propre de grande longueur d'onde ; d'une part, elle reçoit, avec le rayonnement solaire direct (s'il existe), le rayonnement de l'atmosphère, constitué non seulement par son rayonnement propre, mais aussi par le rayonnement solaire diffus ; il en résulte que, de jour, le rayonnement terrestre effectif est très complexe. Des rayonnements de grandes longueur d'onde, de plus de 5 microns, et avec un maximum aux environs de 10 microns représentent les rayonnements propres, au voisinage de la surface terrestre, émis d'une part par le sol vers l'extérieur et, d'autre part, par l'atmosphère vers le sol.

a- Importance de l'énergie solaire reçue par la terre

La terre reçoit au niveau du sol ou des eaux une énergie rayonnante aux environs de midi vrai et par bonne insolation, environ 1 kW/m^2 , la puissance moyenne reçu à la surface de la terre est de 107000 milliards de kW (107 milliards mégawatts), c'est gigantesque sachant qu'une centrale de 1000 mégawatts est une grande centrale. Donc l'énergie solaire parvenant en une année aux terres émergées représente plusieurs milliers de fois la consommation annuelle de l'humanité en énergie. Toute cette énergie contribue à maintenir

la surface de la terre à une température moyenne de 290 degrés absolus (17 degrés centigrades), elle crée les courants marins, les vents et les pluies, les orages, les tempêtes et les cyclones. Elle est aussi la source énergétique de la photosynthèse chlorophyllienne.

b- Mesures du rayonnement solaire

Les appareils utilisés, appelés autres fois « *actinomètres* », actuellement « *radiomètres* », ceux qui mesurent directement la chaleur reçue sur une surface donnée sont des « *calorimètres* », celui qui mesure le rayonnement solaire direct seul est appelé « *pyrhéliomètre* », associé avec un enregistreur ou un intégrateur ou les deux.

Le rayonnement global est mesuré par un radiomètre à surface réceptrice horizontale qu'on appelle « pyranomètre », il existe aussi des pyranomètres qui mesurent le seul rayonnement diffus.

Pour déterminer les durées d'ensoleillement, on utilise l'effet thermique ou bien l'effet actinique du rayonnement, en enregistrant les traces laissées sur un papier par les rayons solaires focalisées. Les appareils sont alors appelés « héliographes ». L'héliographe « Campbell-stokes » comporte un dioptré sphérique, qui forme l'image du soleil sur une bande de carton spécial, sur lequel la longueur de la trace obtenue par carbonisation correspond à la durée d'ensoleillement, ce type d'héliographe est couramment utilisé dans le bassin méditerranéen, on trouve aussi l'héliographe « Jordan » utilisé en France et Afrique du nord, avec ce dernier l'image latente d'une fente de l'appareil se forme sur un papier sensible du genre « ozalid » et est révélée par développement de l'ammoniac.

La connaissance des durées d'ensoleillement en un lieu permet de calculer le « facteur d'ensoleillement » (facteur d'insolation), ou « taux d'ensoleillement », et certains l'appellent « fraction d'ensoleillement », et qui est le rapport entre la durée réelle d'ensoleillement en un lieu et la durée maximale possible d'ensoleillement au même lieu et à la même date.

c- Valeurs et variations de l'énergie des rayonnements solaires

c-1- Puissance maximale du rayonnement solaire

Sachant que la constante solaire est de $1,395 \text{ kW/m}^2$ à la surface de la terre, une surface de 1m^2 exposée au rayonnement solaire direct et normale aux rayons solaires reçoit au maximum, à midi vrai, environ 860 kcal/h , soit 1 kWh en 1 heure qui correspond à une puissance maximale de 1 kW/m^2 , mais l'énergie globale reçue à la surface de la terre dans un temps donné dépend de la latitude, de l'altitude, de la saison, de l'heure de la journée, de la nébulosité, des poussières atmosphériques, de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique.

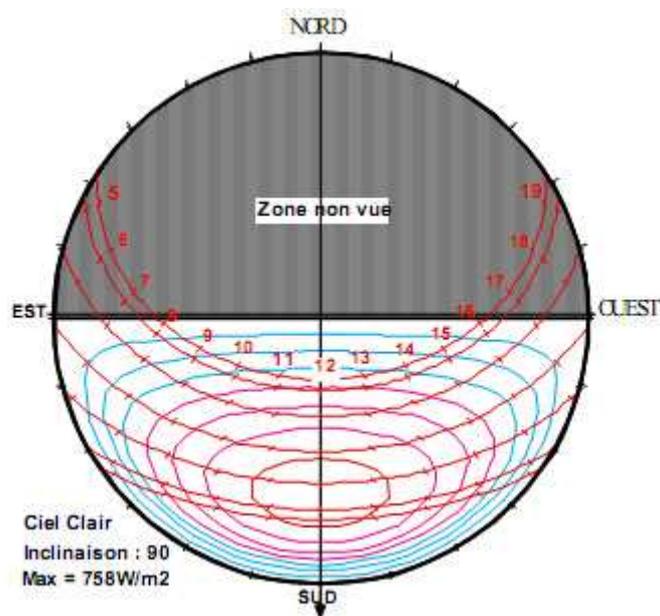


Fig. (I-I-7)- Eclairage énergétique du plan vertical orienté au Sud sous la latitude 45°N . (Source Contrôle de l'ensevelissement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)

c-2-Durée quotidienne, mensuelle et annuelle d'ensoleillement

Un grand nombre de pays du globe, jouissent d'un bon ensoleillement pendant au moins 275 jours par an et cela est très favorable au développement de l'utilisation de l'énergie solaire dans ces pays.

Cependant, la simple indication du nombre annuel de jours d'ensoleillement est un renseignement imprécis, car au cours d'une journée plus au moins ensoleillée, le nombre d'heures au cours desquelles le rayonnement solaire direct parvient au sol a une grande importance.

Dans une région donnée, en un lieu donné, il est utile de connaître le nombre moyen d'heures d'ensoleillement au cours des divers mois de l'année et pour l'année entière. D'une façon générale, la durée annuelle d'ensoleillement direct varie selon les régions du globe, elle est comprise entre moins de 1000 heures et plus de 4000 heures par an (8760 h/an), soit entre 11,42% et 45,66% sachant que 50% (4380 h) d'heure journalière, donc on peut arriver à 91,32% d'heures d'ensoleillement, l'Algérie reçoit une moyenne de 3000 heures/an d'ensoleillement, soit 68,49% des 4380 heures diurnes.

c-3-Energie du rayonnement solaire global reçu par une surface horizontale

Une surface horizontale reçoit un rayonnement global comprenant la composante verticale au rayonnement solaire direct (s'il existe) et le rayonnement diffus.

- **Energie globale horaire reçue par une surface horizontale**

- En moyenne journalière

En régions tempérées l'énergie globale parvenant à la surface du sol, en été, est en moyenne journalière d'environ 2000 à 2600 kJ/m²/h, correspondant à une puissance moyenne de 0,55 à 0,70 kW/m². Donc, dans l'ensemble du globe et au niveau de la mer, la puissance reçue est en moyenne journalière de 0,40 à 0,50 kW/m².

- Aux heures les plus chaudes de la journée.

En zones tempérées au cours de l'été, ou en zones tropicales, le rayonnement global parvenant sur une surface horizontale aux heures les plus chaudes de la journée apporte une énergie moyenne d'environ 3300 à 3600 kJ/m²/h, soit 360 j/cm²/h, représentant une puissance maximale voisine de 1 kW/m², soit 1000 mW/cm².

En quelques heures du milieu de la journée, une surface de quelques km² reçoit donc une quantité d'énergie équivalente à l'énergie libérée par une bombe atomique de 20 kT (25 000 000 kWh).

- Energie globale journalière reçu par une surface horizontale

Des relevés effectués à Niamey avec un pyranomètre kipp ont indiqué, comme énergie globale journalière en moyenne mensuelle, un minimum de 5,42 kWh/m²/j en janvier, et un maximum de 6,36 kWh/m²/j en mars, au Sahara (Ouargla) en été on a reçu 6000 kcal/m²/j soit 7 kWh/m²/j.

- **Energie globale annuelle reçu par une surface horizontale.**

En raison de l'alternance des jours et des nuits, des saisons, de la hauteur variable du soleil, des nébulosités, sous les latitudes des régions tempérées telles que la région méditerranéenne, on ne peut compter que sur une moyenne de l'ordre de 1500 kWh/m², et étant donné qu'il y a 8760 heures dans l'année, cela correspond à une puissance de 0,17 kW/m² en moyenne annuelle.

Les régions du globe, situées de part et d'autre de l'équateur et comprises entre le 40ème parallèle, reçoivent du soleil une énergie annuelle atteignant de 1400 à 2400 kWh/m². Au Sahara, cette énergie est de plus de 2300 kWh/m².

I.9- Prédétermination du rayonnement solaire en un lieu d'utilisation

Si on envisage l'installation en un lieu donné 1 ou plusieurs capteurs solaires, on a besoin de connaître le mieux possible le rayonnement solaire au lieu même d'utilisation, donc procéder à des mesures qui doivent s'étendre sur de très grandes périodes de nombreuses années, ce qui nous laisse se trouver devant un problème insurmontable à moins qu'il existe une station météorologique voisine disposant des relevés nécessaires. Et on peut rencontrer des difficultés étant donné que, d'une part, l'installation est projetée hors d'une station météorologique, ou très loin, et d'autre part la majorité des stations météo ne procèdent pas aux relevés de rayonnement solaire sur des longues périodes. Donc les mesures prises sont épisodiques, et concernent le rayonnement global arrivant sur plan horizontal, qui est la somme de la composante verticale du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffusé par l'atmosphère. Ces mesures étaient prises pour obtenir des moyennes, or ce qui nous intéresse c'est les valeurs instantanées ou plus exactement les diagrammes des diverses composantes du rayonnement global, car les pertes thermiques d'un convertisseur du rayonnement solaire en chaleur dépendent de la puissance incidente.

On a besoin de connaître les valeurs maximales journalières et saisonnières, qui peuvent avoir des conséquences sur la conversion du matériel, et sa dégradation éventuelle.

Il existe de nombreuses méthodes de prédétermination du rayonnement solaire et on peut faire appel à l'une de ces méthodes afin de pouvoir installer et utiliser des appareillages solaires.

Généralement la méthode de prédétermination rapide, tient compte autant que possible des connaissances météorologiques existantes, susceptible de fournir des renseignements tels que les suivantes : humidité relative de l'air, facteur d'ensoleillement, etc.

On peut prendre en compte les paramètres géographiques du lieu et de certains paramètres climatologiques, soit la tension de la vapeur d'eau atmosphérique et du facteur d'ensoleillement.

I-9-1- Les problèmes généraux de l'utilisation de l'énergie solaire

a- Caractères particuliers de l'énergie solaire

La terre reçoit du soleil en permanence environ $1,8 \times 10^{11}$ mégawatts d'énergie comme source « inépuisable » qui pourrait couvrir très largement tous les besoins énergétiques de l'humanité, si on peut convertir en très grandes quantités cette énergie solaire en énergie mécanique ou électrique directement utilisable.

Pourquoi cette énergie a-t-elle été et reste négligeable jusqu'à nos jours ? Cela tient peut être à ses caractères particuliers :

- Sa distribution est irrégulière et intermittente, on peut dire que l'énergie solaire est une énergie sauvage, car il faut la convertir en énergie utilisable et la régulariser.

L'alternance du jour et de la nuit, les variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement, l'influence de la nébulosité, font que l'énergie solaire n'est disponible efficacement que durant une fraction de la durée de l'année. Or les besoins de la civilisation moderne sont permanentes 24/24 h, et pour arriver à satisfaire ces besoins en utilisant l'énergie solaire il faut parvenir à la stocker.

- L'énergie solaire n'est pas concentrée naturellement, sa faible densité superficielle à la surface du sol ou des eaux fait dire qu'il s'agit d'une énergie dispersée.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité, car il y a toujours des pertes par conduction ainsi que par convection dans l'air, ou par rayonnement.
- Le stockage de l'énergie solaire captée est jusqu'à présent considérée comme difficile ou très coûteux (stockage de chaleur au moyen de masses énormes de pierres ou de

maçonnerie échauffées, ou bien stockage par le biais des batteries d'accumulateurs électriques).

- Avec la disponibilité d'énergie des sources fossiles, le coût de la calorie ou du kilowattheure obtenu à partir d'énergie solaire était rarement compétitif, bien que l'énergie solaire incidente fût gratuite, car le prix de revient dépend de l'amortissement des appareils et de leur entretien.
- Jusqu'à présent, ceux qui croyaient à l'intérêt de l'énergie solaire étaient rares. On trouvait plus simple de manœuvrer un interrupteur électrique, d'allumer un appareil de chauffage domestique, de brancher un réfrigérateur électrique. Mais, désormais, avec le prix des sources fossiles qui trouve le sens croissant, la situation peut être modifiée en ce qui concerne l'intérêt économique de l'utilisation de l'énergie solaire.

b- L'énergie solaire est-elle ou non polluante ?

Les uns admiraient l'énergie solaire le fait qu'elle n'est pas polluante, les autres font observer qu'il est inexact que cette énergie soit libre de toute pollution car, disent-ils, si l'on capte l'énergie solaire sur une grande étendue pour faire fonctionner une « unité électro-solaire » convertissant une partie de l'énergie incidente en énergie électrique, on altérera l'albédo (la fraction d'énergie incidente renvoyée vers l'atmosphère par réflexion et diffusion par le sol (ou la couverture du sol)), ou plus exactement on le réduira. Ont-ils raison ?

Il est exact que le rayonnement solaire parvenant à la surface du globe n'est pas polluant ; mais, on admettant l'expression de « pollution thermique » de diverses natures des eaux, certains auteurs se demandent s'ils ne font pas craindre des effets thermiques en installant des « centrales solaires » de très grandes superficies.

M. Peychès, membre de l'académie des sciences, a pertinemment fait remarquer : **« le rayonnement solaire sur un désert se partage en 40% réfléchi (albédo) et 60% absorbé par la basse atmosphère et le sol pour être finalement utilisé par l'environnement. La présence d'une surface absorbante réduit la partie réfléchie à 20% et, si les 80% absorbés sont transformés dans une usine nécessairement voisine avec un rendement d'un quart, 60% se trouvent restitués à l'environnement et 20% utilisés. L'énergie utile est uniquement**

prélevée sur la partie réfléchie »- *L'énergie en l'an 2000*, par R. GIBRAT – communication à l'académie des sciences morales et politiques, 12 mars 1974 (*Sciences et Techniques*, n°- 14 nouvelle série, Paris, 15 mai 1974 p. 7-15). (1)

Donc la captation de l'énergie solaire parvenant sur une certaine étendue réduit son albédo et que l'énergie utile est soustraite purement et simplement à l'albédo.

Si l'on vient à construire des « centrales solaires » convertissant en électricité une partie de l'énergie solaire parvenant sur de vastes espaces, la réduction d'albédo aboutira à un transfert important de chaleur de certains secteurs du globe à d'autres secteurs, et l'on peut alors se demander s'il n'y aura pas de conséquences climatologiques, éventuellement néfastes.

c- Qu'est ce que l' « ALBEDO » ?

Du latin albus, blanc

L'*albédo* nom donné à la fraction de l'énergie du rayonnement solaire incident qui est renvoyé par réflexion et diffusion. Un revêtement donné du sol renvoie par réflexion et diffusion vers l'atmosphère une partie du rayonnement qu'il reçoit, et la fraction renvoyée constitue l'albédo du revêtement, bien que ce terme concerne plus particulièrement l'intensité lumineuse.

C'est l'albédo de la surface lunaire que nous percevons quand nous regardons la partie de la lune réfléchissante la lumière solaire.

L'albédo terrestre moyen est égal à 0,284 (nimbus 3).

Il s'agit de la réflexion proprement dite et de la réflexion diffuse en ondes courtes. Le coefficient de réflexion ou pouvoir réfléchissant pour le rayonnement visible, appelé albédo, a les valeurs suivantes, selon la nature de la surface ou de son revêtement :

- Terre végétale sèche 10 à 15 %
- Terre végétale humide 8 à 9 %
- Sable sec 18 à 40 %

(1)-Utilisation et promesses de l'énergie solaire, J.R. VAILLANT, Eyrolles 2ème édition, page 71.

- Sable humide 9 à 18 %
- Herbe verte 15 à 26 %
- Herbe sèche 19 à 32 %
- Rocher 12 à 15 %
- Bitume 15 à 18 %
- Neige fraîche 80 à 90 %
- Plan d'eau (hauteur du soleil 47°) 2 %
- Plan d'eau (hauteur du soleil 5,5 °) 71 %

I.9.2- Différents modes du stockage.

- Cas où la question du stockage ne se pose pas.

Le problème de stockage ne se pose pas toujours, sachant que l'énergie solaire est périodique, quelques utilisations sont plus simples et satisfont des besoins périodiques, ne nécessitant pas des moyens de stockage : cas du pompage de l'eau d'un puits, production du froid.

Un autre cas, également, le problème de stockage ne se posera pas au lieu même d'extraction de l'énergie solaire. On peut concevoir l'utilisation d'unités électro-solaires à conversion thermodynamique ou à conversion photovoltaïque qui seraient interconnectées avec un réseau électrique comportant pour une part notable une production d'électricité d'origine hydraulique, ou autres centrales à sources d'énergie fossiles, une façon judicieuse de stocker de l'énergie consistera à minimiser la production des centrales aux heures où l'énergie solaire fournira de l'électricité, et ce stockage équivaldra à stockage indirect d'énergie solaire.

On prétend souvent, à tort, que le stockage de l'énergie solaire est difficile, jusqu'à impossible, en très grandes quantité. On pense aux réservoirs d'eau chaude de trop grandes dimensions qu'il faudrait installer, aux très grands accumulateurs de pierres qu'il est difficile à réaliser pratiquement, aux volumes énormes de béton à prévoir.

Les solutions de stockage indirectes de l'énergie solaire existent au milieu naturel à des échelles gigantesque, ce stockage se poursuivant et se renouvelant sous nos yeux :

On cite la conversion biologique de l'énergie solaire par photosynthèse, d'une part, et d'autre part de la vapeur d'eau atmosphérique. Sous l'action du rayonnement solaire sur les eaux marines ou continentales, il se produit de la vapeur d'eau, dont la chaleur latente est voisine de 600 cal/gr, qui sera restituée quand la vapeur d'eau se condense, cette condensation est à l'origine des nuages et des pluies, des orages, provoquant le remplissage des barrages-réservoirs par ces pluies sur leurs bassins versants, cette action est un maillon de la chaîne va de l'énergie solaire à l'énergie hydraulique utilisée pour actionner des turbines, donc un barrage-réservoir est un véritable accumulateur d'énergie ex-solaire.

Des possibilités très diverses de stockage, on note quelques procédés tels que :

a- Stockage au moyen de batteries d'accumulateurs électriques

Pour stocker de l'énergie électrique obtenue à partir d'énergie solaire, on peut utiliser des batteries d'accumulateurs, mais ce mode de stockage est coûteux et a un faible rendement, ce procédé de stockage est encore loin d'être pratique avec ces moyens et notamment ces batteries au plomb, si on arrive à développer des batteries plus légères avec un prix abordable, on pourrait ouvrir un grand espoir pour l'énergie solaire.

b- Stockage thermique

C'est le moyen le plus pratique, la chaleur peut être transportée par un fluide et accumulée dans des empilements de matériaux réfractaires, aux quels on demandera de restituer la chaleur emmagasinée durant les périodes sans ensoleillement ; ou bien utiliser des tubes enterrés dans lesquels circule le fluide, la chaleur étant ainsi transmise au sol, où elle est emmagasinée, pour être ensuite récupérée par circulation du fluide arrivant à basse température.

Des systèmes d'accumulation de la chaleur dans des murs en béton, ou autre matériaux (tel que la pierre), ou dans des réservoirs d'eau chaude.

Un système très original de stockage de chaleur pour le chauffage solaire qu'a inventé l'ingénieur M. Jean Guimbal, pour assurer le chauffage solaire d'un lotissement à Saint-Etienne, où une masse de 800m³ de rocher, souterraine, portée à une température d'environ 60°C au bout d'un intervalle de temps nécessairement assez long, grâce à de l'eau chauffée par des insolateurs, qui doit être conduite dans la roche par tubage en plastique au

fond d'une multitude de forages à 15m de profondeur, les parois de ces forages étant échauffées au cours de la remontée de l'eau.

Un autre procédé pour le stockage de chaleur à très haute température ; c'est la conversion thermique de l'énergie solaire à très haute température (1000 à 1200°C) et en utilisant l'air comme caloporteur, grâce au stockage de la chaleur, il est possible de réaliser des complexes thermique et électrique permettant diverses utilisations à divers palier de température (production d'énergie électrique, alimentation de circuits de conditionnement d'air ou de production de froid, dessalement de mer ou d'eau saumâtre, etc.).

c- Stockage par voie photochimique.

La photochimie, science physico-chimique, a été définie par le professeur Jaques Lemaire comme étant « une physique et une chimie des états excités produits par voie optique ». L'état excité est représenté par une molécule qui contient un excédent d'énergie, pouvant être considérable ; par exemple, l'absorption d'un photon de longueur d'onde égale à 2537 angströms fournit à la molécule 112 kcal. Le schéma énergétique utilisé par les photochimistes peut être très complexe si l'on envisage toutes les réactions ou de dissipation d'énergie à partir des états excités, donc une conclusion de quelques chercheurs était fixée : la photochimie a suffisamment progressé durant ces dernières années pour qu'on puisse sérieusement envisager des applications dans le domaine du stockage de l'énergie solaire.

d- Régularisation de l'énergie solaire par conversion biologique.

C'est le stockage de l'énergie solaire grâce à la conversion biologique : il s'agit de la culture intensive des algues, avec lesquelles on peut produire du méthane par digestion anaérobie.

e- Régularisation de l'énergie solaire au moyen de l'hydrogène solaire.

On utilise comme matière première de l'eau qui, par concentration de l'énergie solaire, sera portée aux environs de 1000°C et dissociée en hydrogène et oxygène. L'hydrogène sera comprimé et distribué par des conduites pour servir de source d'énergie.

Conclusion

L'homme cherche depuis toujours à mettre le rayonnement solaire à son service.

Les applications pour le thermique ont été les plus anciennes, soit pour se chauffer ou bien se rafraichir l'homme a adopté des multitudes de solutions et les a intégré pour avoir un bâtiment passif, basant sur les énergies issues des sources naturelles, le soleil pour avoir la chaleur en saison de froid et le vent pour diminuer la chaleur en saison chaude.

A la fin du XXème siècle les exploitations des rayonnements solaires arrivant à la surface de la terre restaient timides voire négligées, soit par faute d'incitation ou absence de la volonté politique pour décider à qui devront-nous donner la priorité, aux énergie issues de sources fossiles ou bien des sources renouvelables, malgré sa forte intensité et sa durée d'ensoleillement en Algérie qui arrive à 68,49% des heures diurnes/an (évaluée a 3000h des 4380 sachant que l'année compte 8760 heures) et dépasse même 90% sur d'autres sites, et qui finalement les sources fossiles l'emportent en 1^{er} par leur disponibilité et leur bas prix sur le marché mondial puis le nucléaire en 2^{ème} rang pour être les sources de production d'énergie, et particulièrement l'électrice.

Le solaire avec ses caractéristiques (durée, intensité, nébulosité, etc.) pourrait se placer dans les 1^{er} rangs et devenir ainsi une des principales sources d'énergie qu'on compter dans notre prochain futur.

L'apparition du phénomène du réchauffement climatique, a poussé les organisations internationales, notamment l'ONU, a tracer des directives et élaborer des chartes pour l'unique objectif de limiter les dégagements des gaz à effet de serre, et exploiter plus les sources d'énergie renouvelables tel que le vent, l'hydraulique et le soleil.

Chapitre II : Les apports solaires sous ses différentes formes

II-Introduction

L'énergie solaire est aujourd'hui un sujet d'actualité, à la mode !

Dans ce 2^{ème} chapitre, on veut juste mettre la lumière et découvrir ce qui se cache derrière ce que l'on veut seulement présenter comme un moyen d'économiser les énergies.

Afin de découvrir le véritable impact de cette énergie, une connaissance de principes fondamentaux de l'architecture solaire et les modes de captage, des techniques actuelles, leurs ambitions et leur crédibilité pour le présent et le futur.

Le « solaire » est une énergie parmi d'autres, qui devrait être associée à une problématique globale, et l'appliquer dans un esprit de technique de substitution sur des espaces qui physiquement et socialement restent tels quels.

En effet, réintroduire le soleil, le vent, l'eau, etc. dans la technologie et la création des objets sociaux peut réactiver de façon révolutionnaire les liens de l'homme avec la nature et la société, il s'agit de réintroduire cette symbiose étroite entre l'enveloppe et l'environnement. En effet, le passé nous fournit des exemples d'une intégration consciencieuse du bâtiment vis-à-vis de son environnement, l'architecture vernaculaire est devenue une des premières sources d'information dans l'adaptation des techniques passives.

La plupart de ces solutions sont familières et évidentes, mais elles n'ont pas été considérées comme prioritaires dans l'enseignement et la pratique architecturale de nos jours.

Les événements de ces dernières années, par l'apparition du phénomène du réchauffement climatique, ont posés le problème de la disponibilité des ressources énergétiques.

De ce fait, les actions de recherches ont été développées, elles seront tournées vers la première source naturelle énergétique disponible pour le bâtiment et notamment l'habitat, qui n'est autre que le soleil.

II.1-L'énergie solaire dans le quotidien

Aujourd'hui l'énergie solaire s'avère indispensable dans notre quotidien, elle est exploitée en solutions architecturales pour régler quelques problèmes de la thermique, dites architecture solaire passive (les baies vitrées, les serres, les chauffe-eau solaires, etc.) et active (capteurs solaires pour les systèmes de chauffage). La production de l'énergie électrique à base du solaire trouve aussi sa place dans notre quotidien, c'est le photovoltaïque qui permet la conversion de cette énergie (rayonnement) en électricité (rendement 10 à 12%) et surtout dans les zones isolées ou non reliées au réseau (radiobalises, phares, télévision ou téléphone, éclairage, pompage de l'eau, réfrigération, etc.)

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à Horace-Benedict de Saussure, physicien genevois de XVIII^{ème} siècle. Il met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage multiple placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé, et vers 1910-1920 on a commercialisé des chauffe-eau solaire en Arizona et en Californie.

Et après 50 années que de nouvelles recherches sur le concept de maison solaire font face, et qu'on a commencé un réel développement des chauffe-eaux solaires dans certains pays comme la Turquie et la Grèce.

L'histoire de la conversion photovoltaïque est beaucoup plus récente. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre-Edouard Becquerel, jusqu'au début du XX^{ème} siècle ses applications restent limitées. En 1954 que les laboratoires de la Bell téléphone mettent au point une cellule au silicium capable de convertir directement en électricité l'énergie solaire avec un rendement de 6%. Les progrès réalisés depuis, pour des applications spatiales puis terrestres, sont jugés rentables et sans concurrence dans certains cas comme l'alimentation des sites isolés ou l'électrification rurale de régions de faible densité de population.

La plus ancienne et riche histoire de l'énergie solaire est celle des hautes températures. Plutarque (écrivain grec vers 50 apr. J.C., vers 125 - Larousse 1991-) raconte que les vestales utilisaient des miroirs coniques pour rallumer au soleil le feu sacré des temples de Vesta quand il venait de s'éteindre. Archimède aurait incendié la flotte romaine venue mettre le siège devant Syracuse en 220 av. JC à l'aide de plusieurs miroirs ardents, il aurait concentré le rayonnement solaire à distance sur les navires.

En XVII^{ème} siècle époque de la floraison des miroirs ardents qui atteindront 2,7 m de diamètre, de nombreux astronomes et opticiens d'Europe s'illustreront dans la progression des connaissances et l'élaboration des concepts physiques, comme Magini, Velate, Mariotte, Cassini, permettront d'installer les bases des lois de transport de l'énergie rayonnante.

Au XVIII^{ème} siècle, Du Faye, Buffon et Lavoisier développent l'approche expérimentale de l'énergie solaire, en réalisant la concentration du rayonnement solaire au foyer d'un dispositif concentrateur à lentilles et miroirs concaves.

Vers la fin du XIX^{ème} siècle, on assiste au couplage énergie solaire-machine à vapeur par le développement de prototypes industriels par Ericsson aux USA, et Auguste Mouchet en France qui, en 1878, lors d'exposition universelle à paris, présente un réflecteur de 5 m de diamètre qui focalise sur une chaudière à vapeur. La machine à vapeur actionne une presse qui lui permet d'imprimer le journal « le soleil » à raison de 500 exemplaires à l'heure.

II.2-Bâtiment et énergie

Les importants utilisateurs des bâtiments soit en habitat ou lieux de travail (bureaux, industries) sont sensibles aux économies directes. L'éclairage, le chauffage, parfois la climatisation ou encore les consommations d'eau sont les composants les plus complexes dans un bâtiment. Si un bâtiment est mal isolé, les déperditions thermiques sont importantes, impliquant des consommations d'énergie considérables pour le chauffage des pièces, même l'éclairage est une source importante de consommation. Aujourd'hui on construit et on rénove des bâtiments pour les rendre économe en énergie.

II.3-Les solutions architecturales pour augmenter les apports solaires

La prise en compte des conditions climatiques locales dans la disposition de l'architecture traditionnelle de nombreuses régions du monde (baies vitrées, murs capteurs, serres, auvents, vérandas, patios) et son expression moderne, l'architecture bioclimatique, sont des exemples d'usages « passifs » de l'énergie solaire. Ces solutions architecturales permettent d'accroître les apports solaires gratuits. Les utilisations actives mettant en œuvre des capteurs qui convertissent le rayonnement solaire en chaleur (procédé thermique) ou en électricité (conversion photovoltaïque).

L'utilisation de l'énergie solaire est possible à différents niveaux d'intégration : système actif (technologie intégrée), solaire passif (conception architecturale intégrée) et solaire hybride au fonctionnement tantôt passif, tantôt actif.

II.3.1-Systèmes passifs

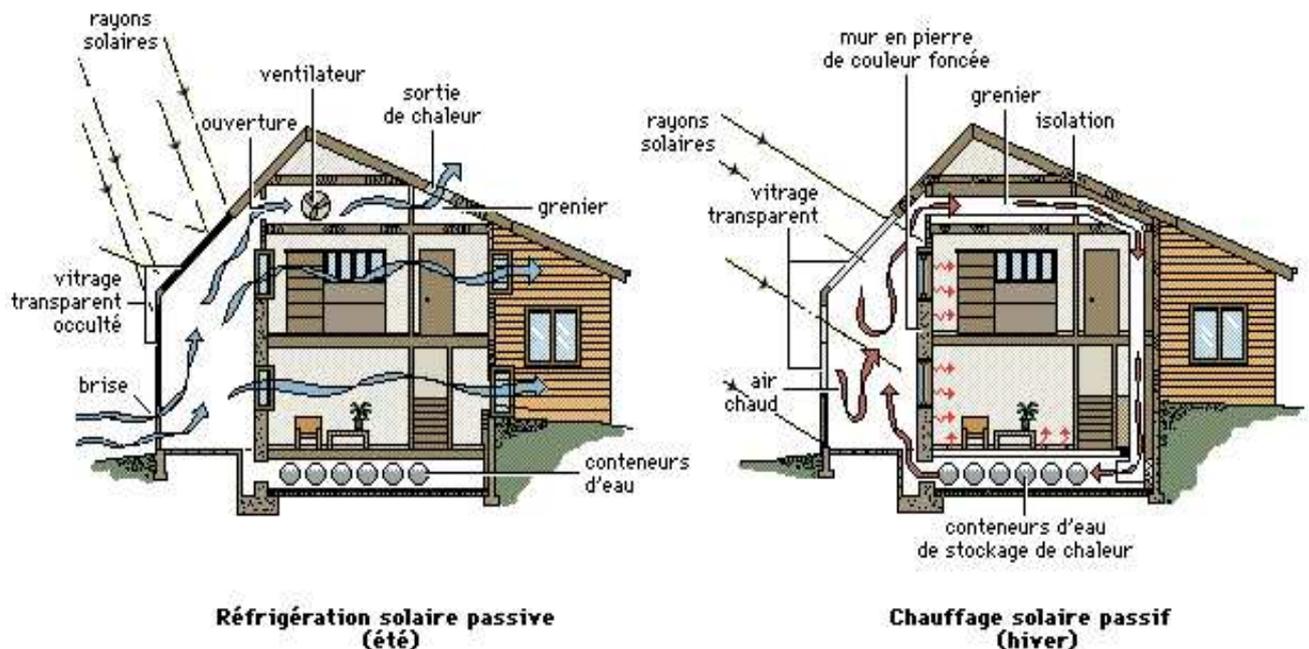


Fig. (I-II-1)- Système passif (source, (1)- Microsoft® Encarta® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation).

A la différence du chauffage solaire actif, qui requiert un équipement spécifique (système de stockage, fluide caloporteur, etc.), le chauffage passif utilise les éléments structuraux d'une habitation pour capter l'énergie solaire. Ainsi, cette maison est pourvue d'une véranda convenablement orientée. L'hiver, l'énergie solaire chauffe le mur en pierre. La chaleur dégagée par le mur est piégée par le vitrage transparent de la véranda. L'été, des stores ou des volets occultent le vitrage. (1)

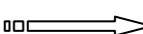
Les systèmes passifs les plus répandus sont : la fenêtre, la véranda vitrée, la serre, etc.

(1)- Microsoft® Encarta® 2008. Encyclopédie © 1993-2007 Microsoft Corporation.

Ces systèmes sont présents dans toute construction munie de fenêtre : elle consiste à laisser pénétrer le rayonnement solaire par les ouvertures transparentes, ce qui apporte à la fois la lumière et la chaleur. L'énergie solaire est captée et stockée dans les composants massifs internes du bâtiment (dalles, plafonds, parois intérieurs). La fenêtre, grâce à ses apports de chaleur, peut réduire d'environ 10% la consommation d'énergie de chauffage.

Système « passif », capte et distribue lui-même l'énergie solaire, sans utilisation des composants « actifs » : ventilation, pompes, ..., nécessitant un apport d'énergie extérieur.

On distingue deux systèmes de captage solaire passif :

a/ Soleil  **Espace** : baie vitrée, skylid, serre ;

Le soleil pénètre directement dans l'espace, sa quantité d'énergie influe sur l'évolution de sa température.

b/ Soleil  **masse**  **Espace** : murs capteurs, serres.

Le rayonnement solaire absorbé par une masse intermédiaire qui restitue une part de l'énergie captée, avec un décalage dans le temps (déphasage).

Donc tous les dispositifs de chauffage solaire passif comportent deux éléments :

- _ Vitrages (verres – plastique) exposé directement au soleil d'hiver.
- _ Une inertie thermique (masse de matériau) permet de stocker la chaleur captée et régularise sa restitution.

II.3.2-Systèmes hybrides

Ces systèmes ont un fonctionnement tantôt passif, tantôt actif, comme le collecteur-fenêtre (ou capteur-fenêtre) avec circuit d'air chaud ou le capteur à air, il fonctionne de deux manières : lorsque le rayonnement est faible, il se comporte comme une fenêtre ordinaire (gains directs) ; lorsque le rayonnement est plus intense ($> 300 \text{ w/m}^2$), un store vénitien est abaissé dans la coulisse entre la fenêtre intérieur et la fenêtre extérieur et un ventilateur pulse l'air en circuit fermé de collecteur vers le stock (et retour). Ces systèmes sont relativement complexes, encombrants et coûteux.

II.3.3-Systèmes actifs

L'énergie solaire captée en façade ou en toiture par un panneau solaire chauffe un fluide caloporteur (air, eau) qui transfère cette énergie à un stock, sa circulation nécessite une dépense d'énergie (généralement électrique) qui représente une fraction de l'énergie captée. Le chauffe-eau solaire avec pompe de circulation est un système actif très répandu, de même que le plancher solaire directe et les capteurs solaires en général.

La chaleur ainsi collectée peut être utilisée dans des applications domestiques comme le chauffage des maisons, la production d'eau chaude à usage sanitaire, la cuisson des aliments, ou dans des applications industrielles comme le dessalement de l'eau de mer, le séchage de denrées agricoles, ou d'autre, la production de l'eau chaude ou de vapeur de procédé, la fusion ou l'élaboration de matériaux, la thermochimie, etc. Cette chaleur peut aussi être transformée en énergie mécanique en vue d'applications diverses notamment le pompage de l'eau, la mise en mouvement des machines artisanales ou industrielles, l'entraînement d'un alternateur pour la production d'électricité, c'est la conversion thermodynamique de l'énergie solaire.

II.4- Systèmes passifs d'apport solaire

II.4.1-La baie vitrée

a- Comportement thermique d'un local vitré

Tout local percé d'une ouverture vitrée se comporte comme un capteur. Le flux solaire qui y pénètre est presque totalement absorbé.

Le rayonnement solaire une fois pénétré à travers le vitrage, et arrive sur les différents composants du local (mur, plancher, meubles, etc.) il se transforme comme suit :

- Une part du rayonnement est absorbée ;

Elle est proportionnelle à l'absorptivité de la paroi, pour les matériaux utilisés souvent dans le bâtiment, ce facteur varie de 0,1 à 0,95. Le plâtre, les peintures et papier blanc ont un facteur 0,2 environ, pour le béton nu et les peintures sombres, il varie entre 0,8-0,9. Alors pour les briques, le carreau de terre cuite environ 0,6. L'absorption se fait progressivement et presque totalement, puisque ce qui est réfléchi rencontre ensuite les autres parois ou meubles.

- Transformation du rayonnement en chaleur ;

Ce phénomène se fait après l'absorption, cette chaleur circule en 02 possibilités ;

- Le revêtement de la paroi est isolant :

Papiers peints, teintures, revêtements en bois, tapis ou moquette, etc., jouent le rôle d'isolants sur une paroi, qui n'aura pas la possibilité d'absorber la chaleur, on a une élévation de la température de sa peau, qui rayonne et chauffe ainsi l'air du local à son contact.

Toute l'énergie solaire captée est transmise à l'air du local, et provoque une surchauffe qu'on ressentira en période chaude.

- Le revêtement et la paroi sont conducteurs :

Béton nu, briques, carreaux de terre cuite, grès, crépis, ..., absorbent et stockent la chaleur dans leurs masses sans que leurs peaux ne s'échauffent. On a le phénomène d'inertie, la paroi légère s'échauffe rapidement et restitue de même les calories absorbés, contrairement à une paroi lourde qui s'échauffent lentement et dégage cette chaleur en déphasage de temps, elle se comporte en un régulateur thermique.

b- Orientation de la baie vitrée

- **Orientation Sud :**

C'est l'orientation où la baie reçoit le maximum de rayonnement solaire en hiver, et une protection en été s'avère nécessaire. Captage solaire passif.

- **Orientation Est et Ouest :**

Ces 2 orientations ne sont pas souhaitables, surtout en hiver, pour le captage d'énergie nécessitant de grandes dimensions. Et si on opte cette solution, on aura en été de gros problèmes à cause du surchauffe qu'ils peuvent provoquer et difficile à éliminer, avec la température de l'air extérieur qui s'élève l'après midi, s'ajoutant à l'exposition directe au rayonnement solaire, qu'on devrait chercher des solutions pour faire face, donc ces 2 orientations ne seront optées dans un bâtiment que pour l'éclairage naturel et la vue (relation interne-externe).

- **Orientation Nord :**

C'est l'orientation d'où soufflent les vents les plus froids en hiver, ces baies reçoivent de petites quantités d'énergie solaire, elles ne sont indispensables que pour la vue et l'éclairage.

II.4.2-Les murs capteurs



Sachant que l'orientation Sud favorise le captage du maximum du rayonnement solaire. Donc toute façade orientée au Sud peut être utile pour réguler la température d'un bâtiment. Le mur seul même épais ne peut atteindre l'objectif s'il n'est pas renforcé par un vitrage servant à piéger l'énergie solaire, qui devrait être absorbée par la masse (mur) puis restituée en chaleur vers l'espace intérieur avec un décalage de temps (déphasage thermique), plus la masse est lourde plus le déphasage est grand, la restitution se fait en longue durée.

Une protection nocturne en hiver et estivale contre le soleil s'avère nécessaire pour limiter les déperditions, et éviter la surchauffe.

a- Fonctionnement thermique

Le rayonnement solaire traverse le vitrage, piégé, puis absorbé en chaleur par la masse de béton, cette chaleur est transmise par conduction, puis restituée en partie à l'intérieur du local avec un déphasage de quelques heures, et sera plus long quand le mur est plus épais.

Après le coucher du soleil, le mur perd de la chaleur vers l'extérieur, donc l'énergie captée n'est pas totalement récupérée, une isolation thermique nocturne devient une obligation pour un meilleur rendement.

En été, une protection est nécessaire pour empêcher les rayons solaires directes d'arriver sur le mur, selon la situation du capteur, s'il est vertical et orienté vers le sud, une protection fixe suffit (avancée de toiture par exemple), si le capteur est incliné on prévoit une protection du vitrage.

b- Caractéristiques du mur capteur

Un mur est caractérisé par son épaisseur et le matériau dont il est exécuté ;

Pour l'épaisseur du mur, et pour un mur en béton banché ou en parpaing plein, il capte le rayonnement solaire, stocke la chaleur, et la restitue à l'intérieur avec un déphasage de 5h si le mur est de 20 cm, de 8h s'il est de 30 cm, et de 11h s'il est de 40 cm, le béton souvent utilisé en maçonnerie a les caractéristiques moyennes suivantes :

Chaleur spécifique C_p : 0,24 Wh/kg. °C

Masse volumique ρ : 2300 kg/m³

Conductivité thermique : 1,75 w/m. °C

II-4-3- Les serres

Basée sur le vitrage, avant on la nommait **Vérandas d'Hiver**, actuellement loggias vitrées, elle joue le rôle d'espace-tampon entre l'intérieur et l'extérieur.

_ En hiver la température est supérieure à celle de l'extérieur.

_ L'air est toujours calme, absence du vent.

_ C'est un espace supplémentaire au bâtiment.

La serre accolée au bâtiment améliore son bilan thermique quelque soit son orientation.

Elle constitue un capteur solaire, dans l'impossibilité de vitrer toute une façade Sud (surchauffe, déperdition thermique), son intégration nous permet d'avoir une surface de captage maximum.

En hiver et en jours de faible ensoleillement, elle devient espace habitable le plus privilégié.

On distingue 02 catégories

- **Serres passives**

Elles sont de même que le mur capteur mais la différence réside dans l'augmentation de l'espace entre le vitrage et la masse (maçonnerie) qui devient fonctionnel.

- **Les serres avec préchauffe de l'air neuf**

Identiques aux 1ères, mais dans ce cas elles sont associées à un circuit de ventilation mécanique contrôlé « VMC » où la prise d'air neuf se fait par l'intermédiaire de la serre.

a- Les formes des serres

- **Serre baie vitrée :**

Intégrée au mur de façade avec une surface de vitrage importante.

- **Serre accolée :**

Espace rajouté au bâtiment avec un volume indépendant, peut être considéré comme espace tampon, ou véranda d'hiver.

- **Serre intégrée au bâtiment :**

Espace du bâtiment, qui pourrait être au milieu, dans un coté, ou en étage, son volume est simple et peut être marié au volume du bâtiment, mais réalisé en matériau différent et léger (verre).

- **Serre enveloppe :**

Mur capteur associé d'une isolation mobile qu'on manipule quotidiennement, le jour du coté intérieur, la nuit du coté extérieur pour éliminer les déperditions thermiques.

b- L'effet de serre

C'est un phénomène qui résulte d'une propriété du verre.

Le rayonnement solaire (longueur d'onde $< 2,50 \mu$) traverse le vitrage d'une fenêtre (verre blanc) intégralement et contribue à l'échauffement de la pièce, le rayonnement émis par les corps réchauffés est de plus grandes longueurs d'onde ne pourra retraverser le vitrage, il est ainsi piégé et renvoyé en chaleur dans la pièce, c'est ce qu'on appelle le phénomène d'effet de serre, qui a permis de penser à l'utiliser pour créer de nouvelles solutions.

II-4-4-Facteur solaire d'un vitrage

La qualité d'énergie transmise par un vitrage dépend :

_ De sa qualité (clair, teinté, réfléchissant, imprimé etc.)

_ De son type (simple ou double).

_ De l'angle d'incidence du rayonnement sur le vitrage, il ne faut pas qu'il soit rasant.

Chaque type de vitrage a un coefficient de transmission thermique « K », qui ne doit pas dépasser $5,80 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$, avec une vitesse d'air à 2 m/s , le verre n'est pas isolant, en hiver devient une source de déperditions calorifiques importantes.

Donc si on a un vent de 15 m/s , le coefficient augmente à $7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$, de ce fait les fenêtres devraient être placées sur les façades peu ventées ou protégées.

II.5-Le thermique dans le bâtiment

II.5.1-Echange de chaleur

En tout moment la chaleur se déplace entre les différents corps, des plus chauds aux plus froids jusqu'à aboutissement à son équilibre de température.

Il y'a 03 modes de transmission de chaleur :

a- Le rayonnement

Tous les corps, solides liquides et gazeux émettent de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, elle est plus importante si le corps est chaud, elle se transforme en chaleur à la rencontre d'un autre corps.

Lorsque deux corps sont présents, le plus froid absorbe une part de l'énergie rayonné par le corps chaud, une autre part est réfléchi, une troisième peut passer a travers le corps s'il est transparent, ce transfert se fait sans aucun transport de matière, il se produit même dans le vide : c'est ainsi que le soleil chauffe la terre par rayonnement.

b- La convection

Lorsqu'un fluide (liquide ou gaz) en mouvement rencontre un corps solide, un échange de chaleur entre eux est présent.

Les molécules du fluide s'échauffent ou se refroidissent en contact de la surface du solide selon que celle-ci est plus chaude ou plus froide, c'est un phénomène spontané, les parties du fluides les plus chaudes sont moins denses, elles tendent à monter. Il s'ensuit des mouvements de convection dans le fluide on l'appelle « convection naturelle ».

« La convection forcée », quand le fluide est poussé mécaniquement contre le solide, l'échange de chaleur est accéléré. Dans les circuits à eau c'est la pompe qui le met en mouvement, dans ceux à air c'est un ventilateur qui souffle l'air de la pièce contre les surfaces chauffantes. La convection ne peut se faire dans le vide.

c- La conduction

La chaleur se transmet par contact entre les molécules d'un corps ou de plusieurs corps contigus, sans déplacement de matière.

Souvent ces trois formes d'échanges se produisent simultanément.

- **La conductivité thermique : λ**

C'est la propriété qu'ont les corps de transmettre la chaleur par conduction, caractérisée pour chaque corps par un coefficient λ , plus λ est grand plus le matériau est conducteur, et plus λ est petit le matériau est isolant.

Par principe : la conductivité thermique d'un matériau est le « flux de chaleur » qui traverse 1 mètre carré d'une paroi de 1 mètre d'épaisseur de ce matériau, lorsque la différence (t_1-t_2) des températures entre les deux faces de cette paroi est de 01 degré.

II.5.2-Le confort thermique

confort (1)

1. *ensemble des éléments qui contribuent à la commodité matérielle et au bien-être*
 - *le confort d'un vêtement*
2. *sentiment de bien-être et de satisfaction*
 - *un grand confort d'esprit • le confort intellectuel*

Commode (2)

4. *d'un caractère conciliant et agréable*
[Remarque d'usage: surtout en tournure négative ou interrogative]
 - *il n'est pas commode*

Bien-être n.m (3)

- 1- *Fait d'être bien, satisfait dans ses besoins, ou exempt de besoins, d'inquiétudes ; sentiment agréable qui en résulte.*
- 2- *Aisance matérielle ou financière.*
 - Economie de bien être, dans laquelle l'objectif visé est la répartition optimale du revenu national, selon certaines théories économiques.

(1). (2) Microsoft® Encarta® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation.

(3) Petit Larousse Illustré 1991, Imp. MAURY-MALSHERBES, N° série 15824, Septembre 1990.

On constate que la sensation de confort est subjective, toute personne ressent à sa façon les données et contraintes de son environnement.

Il n'y a jamais un confort absolu.

Un individu peut s'adapter à un climat et finir par le trouver « confortable », mais il y'a des bornes à cette souplesse d'adaptation. Les différents paramètres du confort thermique varient entre les limites relativement définies, qui peuvent différer d'une situation à une autre en fonction notamment du climat, des saisons, du mode de vie, de l'état de santé.

La sensation du confort ne dépend pas seulement des paramètres attachés au thermiques, mais beaucoup d'autres, citons quelques uns :

- L'éclairage intérieur et la vue sur l'extérieur.
- Le maintien de la qualité d'air dans le bâtiment (élimination du CO2 et des mauvaises odeurs).
- Le niveau sonore.
- Les matériaux intérieurs (couleurs, décorations, mobiliers, etc.).

Mais en réalité quotidienne, il existe d'autres critères de confort qui nous échappent, nul ne peut agir sur le temps qu'il fait, notre travail et nos ressources financières influent sur le choix de nos lieux et modes de vies.

La sensation de confort provient du maintien de notre équilibre thermique à un niveau d'effort (conscient ou inconscient) minimum, sans mettre en jeu de manière perceptible nos mécanismes de lutter contre le chaud et le froid, le confort thermique n'est pas seulement déterminé par la température de l'air, plusieurs paramètres interviennent, citons :

- La température de l'air ambiant ;
- Le bilan de rayonnement avec l'environnement (cloison, plafonds) ;
- L'humidité de l'air ambiant ;
- La vitesse de l'air au voisinage de la peau ;

En plus les paramètres relatifs au sujet lui-même :

- L'activité exercée par le sujet ;
- Sa tenue vestimentaire ;

a- Confort d'hiver

Au confort d'hiver répond la stratégie du chaud : capter la chaleur du rayonnement solaire, la stocker dans la masse, la conserver par l'isolation et la distribuer dans le bâtiment ;

- **Capter** : capter la chaleur consiste à recueillir l'énergie solaire et à la transformer en chaleur. Le rayonnement solaire reçu par un bâtiment dépend du climat et de ses variations journalières et saisonnières, mais aussi de l'orientation du bâtiment, de la nature de ses surfaces et de ses matériaux, de la topographie du lieu, de l'ombrage, etc., le rayonnement solaire n'est pratiquement utilisable qu'au droit des surfaces vitrées, où il est partiellement transmis à l'ambiance intérieur et fournit un gain direct de chaleur.
- **Stocker** : le rayonnement solaire produit souvent de la chaleur au moment où elle n'est pas nécessaire. Il est alors intéressant de pouvoir stocker cette énergie jusqu'au moment où on sent ce besoin. Ce stockage se fait au sein des matériaux suivant sa capacité d'accumulation et permet ainsi d'absorber la chaleur et d'atténuer les fluctuations de températures dans le bâtiment en tirant parti de son inertie.
- **Conserver** : en zones à climat froid ou frais, on s'efforcera de conserver toute chaleur, qu'elle découle de l'ensoleillement, d'apports internes ou du système de chauffage. Donc la forme, l'étanchéité de l'enveloppe ainsi que les vertus isolantes des parois qui limiteront les déperditions thermiques du bâtiment. Créer des espaces clos, c'est créer des ambiances thermiques différenciées (température de consignes différentes ou zones tampons), orientées suivant leur utilisation, et permet de répartir au mieux la charge de chauffage.
- **Distribuer** : distribuer la chaleur dans le bâtiment tout en la régulant, consiste à la conduire dans les différents lieux de vie où elle est souhaitable.

b-Confort d'été

Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement.

- **Protéger** : protéger le bâtiment, et particulièrement ses ouvertures, de l'ensoleillement direct afin de limiter les gains directs, revient à ériger des écrans extérieurs si possible, qui

le mettent à l'ombre. Ces écrans peuvent être permanents, amovible ou saisonniers (végétation). Très bien isoler et accroître l'inertie des parois opaques et des toitures évite l'échauffement du bâtiment et suffisent d'empêcher la chaleur de s'accumuler dans la masse en offrant des surfaces réfléchissantes au soleil, et limiter les infiltrations d'air chaud dans le bâtiment.

- Minimiser les apports internes : vise à éviter une surchauffe des locaux due aux occupants et aux équipements : tel que l'éclairage artificiel, l'équipement électrique, la densité d'occupation des locaux, etc., certains apports peuvent être facilement minimisés en favorisant par exemple l'éclairage naturel.
- Dissiper les surchauffes : est possible grâce à la ventilation naturelle, en exploitant les gradients de températures par le biais d'exutoires produisant un « effet de cheminée ». La pression du vent et la canalisation des flux d'air peuvent également être mises au profit pour évacuer l'air surchauffé du bâtiment.
- Refroidir les locaux : est facilement assuré par des moyens naturels. Une première solution consiste à favoriser la ventilation (surtout nocturne, afin de déstocker la chaleur emmagasinée pendant la journée) ou à augmenter la vitesse de l'air (effet venturi, tour à vent, etc.), ainsi que d'autres dispositifs naturels tels que les plans d'eau, des fontaines, de la végétation, des conduites enterrées, etc.

II.5.3-Principes de thermo-physiologie humaine

- la physiologie humaine a pour objet l'étude du corps humain, et ses fonctions (nutrition, motricité, sensibilité, régulation,...).
- La thermo-physiologie humaine a pour objet l'étude du corps humain sous le jeu de la production de chaleur interne et des échanges avec l'extérieur.
- Le métabolisme est l'ensemble de transformations chimiques et biologiques qui s'accomplissent dans l'organisme, s'accompagnent toujours d'un dégagement de chaleur et d'eau, où la quantité de chaleur produite est d'autant plus importante que l'activité est intense.

Notre organisme a besoin d'énergie. On la trouve dans les aliments, l'air qu'on respire, certaines radiations solaires, etc. Elle lui permet d'entretenir ses fonctions vitales et réaliser

des activités, en gardant la température intérieure de 37°C environ quelque soit la température extérieure.

Si on a trop chaud, le corps évacue de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et convection de la peau aux vêtements et à l'air et cela par évapotranspiration. Une ambiance trop sèche devient irritante, les muqueuses se dessèchent. Une ambiance plus humide devient étouffante, la sueur ne pouvant plus se vaporiser.

Aux basses températures, et à cause du froid, les pertes thermiques augmentent (rayonnement et conduction vers l'extérieur), le corps doit lutter par accroissement du travail musculaire involontaire (le frisson, contraction musculaire transformant l'énergie en chaleur) et du métabolisme. Pour limiter les pertes on devrait augmenter l'isolation thermique (vêtement, habitat).

Les quantités de chaleur mises en jeu dépendent du poids et de la taille de la personne, ainsi que de son état de santé et de son âge, etc.

a- La température opérative

Elle correspond à la température effectivement ressentie, c'est une grandeur fictive dépendant de la température de l'air, de celle des parois du local et de la vitesse de l'air.

C'est une donnée physiologique qui reste délicate à utiliser, donc généralement on utilise dans la pratique une grandeur physique qui peut être calculée : la température résultante sèche (trs), qui est la moyenne entre la température de l'air (t_a) et celle des parois (t_p), dans un local où l'air est calme.

Donc : $Trs = (t_a + t_p)/2$

Deux phénomènes illustrant l'importance du rayonnement par rapport à la température et à la vitesse de l'air :

- Quand on allume un feu de cheminée dans un local froid, on sent rapidement la chaleur du cote des flammes, tandis que de l'autre cote la sensation du froid persiste malgré que la température est la même dans tout le local.
- On peut résister et rester exposé au soleil en maillot de bain, en plein hiver dans un pays de neige, avec une température négative: si le soleil luit, son rayonnement voire celui

réfléchi par la neige peuvent réchauffer suffisamment. Si le vent se réveille il faut se couvrir.

b- Humidité de l'air

L'évaporation de la sueur est régulatrice importante des échanges thermiques entre le corps et son environnement immédiat.

Sa vitesse dépend de trois facteurs :

- La température extérieure : plus elle est élevée, plus la sueur s'évapore facilement ;
- L'humidité de l'air : plus l'air est humide, il ne pourra pas absorber d'autres quantités d'eaux ;
- La vitesse de l'air : plus l'air circule vite, l'évaporation est plus facile.

c- Vitesse de l'air

La vitesse de l'air au voisinage de la peau influe à la fois sur l'évaporation de la sueur et sur les échanges par convection.

Plus la vitesse d'un air sec est élevée, plus la température ressentie est basse. Dans un bâtiment chauffé au moyen d'air pulsé créant un courant d'air, on ne peut donc ressentir une température de 20°C que si celle de l'air est supérieure. Les pertes thermiques sont plus remarquables.

II.6-Les systèmes actifs

II.6.1-le solaire : source gigantesque et inépuisable négligée

On dit parfois, que l'utilisation beaucoup trop faible de l'énergie solaire constitue un « gaspillage universel », mais le terme « gaspillage » est impropre, car on ne peut dire qu'on gaspille de l'énergie qu'on néglige d'utiliser.

Pour les latitudes comprises entre 20° et 45°, par exemple, l'énergie globale arrivant du soleil à la surface du sol est en moyenne de 1500 à 2000 kWh/m²/an. Dans ces conditions, une toiture de 100 m² reçoit une quantité d'énergie solaire d'environ 150000 à 200000 kWh/m²/an, et si l'on dispose d'un appareillage permettant d'extraire 10 % de cette énergie, il est possible de disposer au cours d'une année de 15000 à 20000 kWh, correspondant à

l'énergie libérée par la combustion de 2 à 2,5 tonnes de charbon, ou 1500 à 2000 litres d'essence.

II.6.2-Une négligence inadmissible.

Dans les régions arides ou tropicales, où l'énergie est répandue plus abondamment encore que dans les régions tempérées, et où les combustibles fossiles sont plus coûteux (sauf dans les pays qui en exploitent dans leur sous-sol), l'énergie solaire représente un potentiel énergétique dépassant à plusieurs milliers de fois celui des combustibles fossiles qu'on y consomme actuellement.

Cela suffit pour démontrer que la très faible utilisation actuelle de l'énergie solaire par l'humanité est le plus bel exemple, à l'échelle mondiale, de négligence devenue inadmissible de nos jours, à l'époque de plus grande révolution technologique.

Mais actuellement dans quelques pays d'Europe, aux USA, en Russie, au Japon, la recherche et développement est en plein essor. Au Japon, le problème d'énergie est devenu plus crucial qu'ailleurs, alors ses chercheurs font des efforts considérables dans le domaine solaire, tout en sachant bien que l'énergie solaire ne pourra jamais subvenir à tous ses besoins car, pour satisfaire ses besoins en énergie, on devrait capter l'énergie solaire sur plus de 20 % de sa surface ce qui est impossible. (En 1985 l'institut of Energie Economics déclare qu'on doit capter l'énergie solaire sur 73500 km² soit 20 % de sa surface pour satisfaire tous ses besoins en énergie).

II.6.3-Divers procédés de conversion de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être convertie en chaleur, en électricité, en énergie chimique, en énergie mécanique, on peut distinguer les procédés directs et les procédés indirectes.

- Les conversions directes, c'est la photo thermique, photoélectrique, phytobiologique, photochimique.

- Les conversions indirectes par voie thermique, par des opérations purement thermiques par échanges de chaleur, ou par opérations thermodynamiques pour lesquelles on fait intervenir une source chaude et une source froide qui joue un rôle capital, donc l'énergie apparaît dans ce cas sous forme thermique ou mécanique (par le biais d'un fluide), ou bien sous forme électrique (thermoélectricité, thermo-ionique).

a- Conversion photo thermique

C'est le processus le plus simple, consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur.

Quand le rayonnement atteint la surface d'un corps, une partie du rayonnement se réfléchit ou se diffuse, une autre partie traverse la matière si celle-ci n'est pas opaque et une troisième est absorbée. Quand le corps est opaque, l'absorption du rayonnement qui n'a pas été réfléchi ou diffusé est totale dans une couche d'épaisseur plus au moins grande du corps considéré, si le corps est en métal la couche est extrêmement mince. L'énergie ainsi reçue se dissipe à l'intérieur du corps soit par conduction, soit par convection en surface, soit par émission d'un rayonnement propre au corps en question et dépendant de la nature et de la température de sa surface.

La température du corps à un instant donné correspond au bilan thermique résultant de l'énergie incidente, de l'énergie dissipée à la température considérée et éventuellement de l'énergie extraite.

La température d'un corps recevant le rayonnement solaire est d'autant plus élevée que le rayonnement solaire est plus intense, moins réfléchi ou diffusé, et que ce corps est plus absorbant, rayonne moins et est mieux isolé thermiquement, il y a une limite plus ou moins élevée de la température alors il est impossible d'assurer l'isolation thermique parfaite d'un corps. Ce sont les corps noirs qui s'échauffent le plus par exposition au soleil. Une plaque noircie exposée normalement au rayonnement solaire direct prendrait, s'il n'y avait pas des pertes par conduction ou convection, une température un peu supérieure à 100°C.

Quand on convertit le rayonnement solaire en chaleur à l'intérieur d'une enceinte, on a un foyer thermique. Si ce foyer contient des substances à traiter ou à cuire, il s'agit d'un four solaire, sinon le foyer est échangeur thermique (chaudière solaire).

Dans ce cas de conversion on peut obtenir des rendements de conversion de 50 à 60%, ou 70% dans des cas exceptionnels.

b- La conversion photoélectrique.

La conversion photoélectrique est très intéressante, les recherches ne cessent guerre pour trouver le meilleur matériau à utiliser.

On utilise surtout le silicium, mais on cherche de nouveaux matériaux donnant des rendements de conversion acceptables. Avec le sélénure de cadmium on a atteint 6% et avec l'arséniure de gallium on a dépassé ce taux. Des résultats encourageants sont obtenus avec l'antimoniure d'aluminium, le tellure de cadmium.

Pour récupérer suffisamment l'énergie, on doit procéder à l'assemblage sur de très grandes surfaces de nombreuses photopiles taillées dans un matériau monocristallin, mais cette énergie obtenue serait d'un coût prohibitif.

Il existe d'autres procédés de réaliser des photopiles en sulfure de cadmium, en tellure de cadmium ou en arséniure de gallium obtenus en couches très minces (quelques microns d'épaisseur) par vaporisation thermique sous vide, le matériau ainsi obtenu est polycristallin, et de grandes surfaces de photopiles pourraient ainsi être réalisées rendant acceptable le coût de l'énergie obtenue.

c- La conversion thermo-ionique.

Tout gaz porté à une température très élevée, supérieure à 2000°C, s'ionise spontanément en formant un plasma. Cette ionisation peut être obtenue grâce au rayonnement solaire, qui permet d'atteindre les hautes températures requises. Et à partir d'un plasma une différence de potentiel pouvant être utilisée pour produire la circulation d'un courant électrique dans un circuit.

d- Les transformations thermodynamiques.

Il existe 2 types de transformation thermodynamiques :

- les transformations thermo élastiques.
- les transformations thermoélectriques.

d-1- Les transformations thermo élastiques.

- **Cycles thermodynamiques.**

Le type de cycle et la nature du fluide sont étroitement liés au domaine de température de fonctionnement du moteur thermique. Une microcentrale solaire a besoin d'une source chaude d'une température de l'ordre de 90°C fournie par des insolateurs plans mettant en jeu des fluides du type fréon.

Si la température dépasse 200°C on obtient des rendements plus élevés avec des cycles à vapeur (cycle Carnot, cycle de Rankine, ou cycle de Hirn).

La limite supérieure pour la température de surchauffe doit tenir compte de la résistance mécanique et chimique des aciers, dans la pratique, on peut difficilement dépasser 550°C.

Les températures adoptées sont généralement :

- les faibles températures vers 60° - 80°C.
- les moyennes températures à partir de 90°C et en dessus de 300°C.
- les hautes températures entre 300° et 600°C.

- **Source froide.**

La source froide est un élément important, pour les centrales solaires de moyenne ou grande puissance, le refroidissement de l'eau est le même que pour les centrales thermiques classiques.

Les centrales à système ouvert de refroidissement, l'eau est prise dans un cours d'eau ou en mer, puis y est rejetée après passage dans les condenseurs. Dans le cas où l'eau se fait rare, on utilise des « tours de refroidissement » dites aussi « réfrigérants atmosphériques ».

L'eau chaude venant des condenseurs est pulvérisée dans un courant d'air ascendant, une partie de l'eau étant transformée en vapeur sera entraînée dans le courant d'air ascendant, l'autre partie étant refroidie et récupérée à la base de la tour.

- **Le moteur thermique.**

Pour une unité électro-solaire on prévoira généralement une turbine. Cependant un moteur à piston, a un domaine de fonctionnement plus large, paraît mieux convenir pour une unité électro-solaire autonome à charge variable.

- **Structure générale d'un système de conversion thermodynamique**

Un système de conversion thermodynamique doit être composé de :

- un système captant le rayonnement solaire incident ;
- un système récepteur transformant le rayonnement en chaleur, qui sera transmise à un fluide caloporteur ;
- un système assurant le transfert du fluide caloporteur depuis le récepteur jusqu'à un accumulateur de chaleur, ou à un ou plusieurs échangeurs de chaleur permettant de chauffer le fluide moteur ;

- l'accumulateur de chaleur ;
- un ou plusieurs échangeurs constituant la source chaude d'une machine thermique (associé à une source froide).

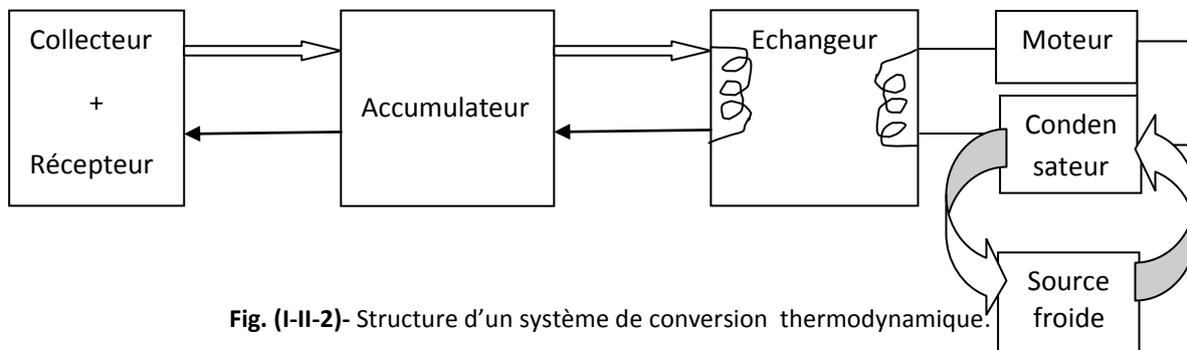


Fig. (I-II-2)- Structure d'un système de conversion thermodynamique.

d-2- Transformations thermoélectriques.

La thermoélectricité est comme depuis longtemps, un circuit fermé, constitué de deux conducteurs faits de métaux différents et raccordés par des soudures, devient le siège d'un courant électrique continu quand il existe entre les deux soudures de raccordement une différence de température.

Un générateur thermoélectrique est constitué d'un certain nombre de couples, chacun d'eux étant formé de deux thermo éléments :

L'un de type **P** et l'autre de type **N**, reliés par un pont métallique qui est en contact avec la source chaude, les autres extrémités étant reliées à une résistance et maintenues à la température de la source froide.

La source de chaleur utilisée peut être une flamme, ou l'énergie thermique d'un fluide et l'on a pensé à l'énergie solaire en utilisant un insolateur plan ou un miroir concentrateur.

Les matériaux utilisés pour améliorer le rendement d'un thermocouple, doivent être de pouvoir thermoélectrique élevé, avec une faible conductibilité calorifique, et une faible résistivité.

On peut convertir l'énergie solaire en énergie mécanique pour actionner un générateur électrique classique.

d-3- Le solaire thermodynamique aujourd'hui

En Californie, on compte neuf centrales mixtes solaire-gaz de 15 à 80 mW construites de 1984 à 1990 et couplées aux réseaux, ces centrales à collecteur cylindra-parabolique

produisant régulièrement chaque année environ 760 000mwh, et en 2011 l'Algérie a inauguré sa première centrale solaire-gaz, réalisée à Hassi r'mel avec une coopération allemande.

Des centrales thermo-solaires sont réalisées dans plusieurs pays (Egypte, Espagne, Inde, Maroc, et Mexique etc.), D'autres centrales à tour de 0,5 à 10 mW ont été expérimentées dans les années 80, en Italie, au Japon, aux USA, en France, en Espagne, et en Crimée. Des dizaines de capteurs paraboliques ont été développés, principalement par des industriels américains et allemands, avec des réalisations expérimentales ou commerciales significatives (depuis des unités de 25 kW à des ensembles de 5 mW) aux USA, en Espagne, en Arabie saoudite et en Australie. Quelques installations de production de chaleur industrielle ont été construites, en particulier aux USA, ainsi que deux grands fours solaire de 1mwh à Odeillo au Sud de France (France, 1970) et Tachkent (Ouzbékistan, 1987) ont été construits, jouant ainsi un rôle pionnier dans le développement du solaire de haute température.

Ces systèmes continuent toujours à être sujet de développements expérimentaux (collecteurs, récepteurs, procédés) dans les principaux centres d'essais notamment celui d'Albuquerque aux USA, Almeria en Espagne, Odeillo en France, ainsi que dans d'autres centres de recherches en Allemagne et en Suisse.

d-4- Conversion de l'énergie solaire en électricité.

- **Par conversion phytobiologique.**

On peut réaliser une conversion bioénergétique, même à grande échelle, au moyen de cultures contrôlées et accélérées d'algues énergétiques, dont le séchage par voie solaire permettra de stocker l'énergie ex-solaire sous forme chimique, les algues sèches seront utilisées comme combustible solide, ou bien les soumettre à la fermentation par digestion anaérobie produisant du méthane (désigné sous le nom de méthane solaire), avec quoi on pourra obtenir, comme l'hydrogène solaire, de la force motrice pour produire l'électricité.

Il suffit d'associer les deux techniques : celles des cultures contrôlées d'algues et celle de la digestion méthanique des végétaux, à travers les diverses régions du globe où les conditions sont propices, pour produire le méthane en très grandes quantités.

• Par conversion thermochimique.

Notons que la production de matières énergétiques, dont la production absorbe de l'énergie susceptible d'être restituée, ces matières représentent des réserves d'énergie ex-solaire, on peut l'obtenir soit par décomposition de la vapeur d'eau, à une température de l'ordre de 1000°C et avec l'aide d'un catalyseur, soit par électrolyse de l'eau. On utilise l'énergie solaire pour produire des températures voisines de 1000°C, voire pour produire l'électricité, on pourra même obtenir de l'hydrogène solaire.

L'hydrogène intéresse plus les milieux industriels en raison de son pouvoir calorifique très élevé, de ses propriétés réductrices et de sa qualité de combustible non polluant, il est facile à transporter et stocker. On peut facilement obtenir à partir d'hydrogène de la force motrice pour produire l'électricité.

II.6.4-La captation des rayonnements solaires

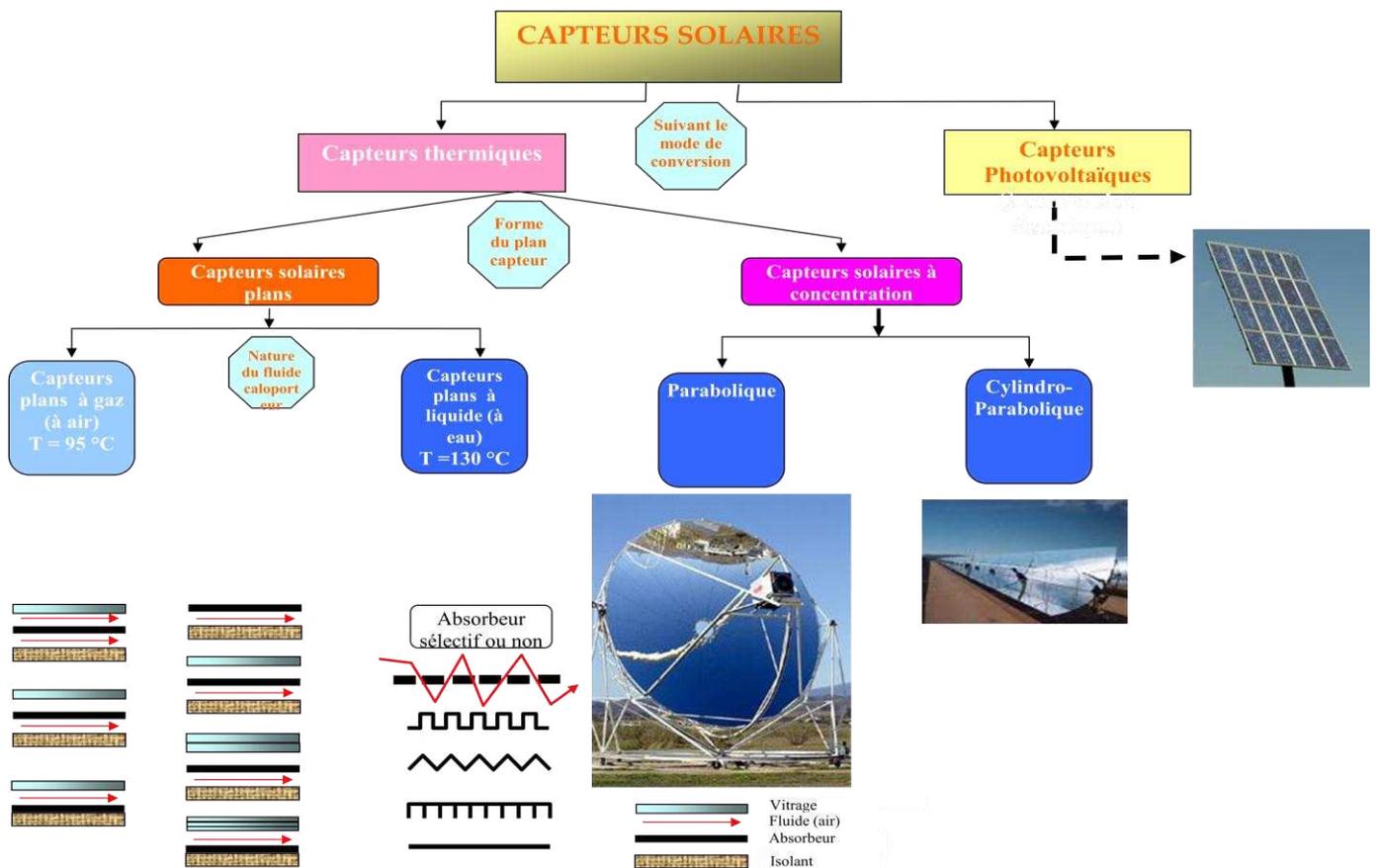


Fig. (I-II-3)- différentes formes de captation des rayonnements solaires (source : cours de M. MOUMI

Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

On distingue deux catégories de système de conversion de l'énergie solaire, à conversion thermique, où l'énergie solaire reçue par le plan du collecteur est entièrement transformée en énergie calorifique, et à conversion électrique dit aussi système photovoltaïque, où l'énergie solaire collectée sur le plan du récepteur est transformée sous forme d'électricité. Fig. (I-II-3).

a- Les divers modes de captation

On peut capter directement le rayonnement solaire au moyen de panneaux plans réceptifs, convenablement équipés et dénommés Insolateurs.

Selon les cas, les insolateurs permettent de produire de l'air chaud ou d'échauffer un liquide, la circulation se fait par thermosiphon, pompe ou ventilateur. Comme on peut faire la captation indirecte au moyen de miroirs ou lentilles, qui modifient la direction des rayons solaires et les concentrent avant la conversion en énergie utilisable.

Les appareils de captation sont fixes (insolateurs plans), ou orientables (miroirs, lentilles solaires), l'orientation étant généralement assurée par un dispositif automatique, ou par des appareils semi-fixes, qu'on oriente de façon discontinue selon la direction du rayonnement incident.

Les systèmes à conversion thermiques sont diversifiés, on distingue :

- Les capteurs solaires à basses et à moyennes températures, désignés souvent par capteurs ou insolateurs plans, la température du fluide à la sortie ne dépasse que très rarement la valeur de 140°C.
 - Les capteurs à haute température, dit concentrateurs solaires, la surface réceptrice du rayonnement solaire est sous forme parabolique ou cylindro-parabolique, la température du fluide peut dépasser dans certain dispositif à effet de concentration la valeur de 2000°C.
- Parmi les capteurs solaires plans, et suivant la nature du fluide caloporteur en circulation utilisé pour véhiculer l'énergie calorifique récupérée, on cite les capteurs solaires plans à gaz (à air) et à liquide (à eau).

b- Caractéristiques Techniques des Capteurs Solaires Plans à air

b.1- Les principaux composants d'un capteur solaire plan à air

Les capteurs solaires plans à air, ont presque tous le même principe de fonctionnement ; mais leurs différences résident dans le choix des éléments qui les constituent.

En peignant en noir mat une surface devant être exposée au soleil, on augmente son pouvoir absorbant, les pertes thermiques par réflexion et diffusion sont très réduites et la température de cette surface peut atteindre 60° à 70°C.

Une surface noircie rayonne beaucoup plus au soleil que si elle n'était pas noire et, quand l'équilibre thermique est atteint, elle perd par rayonnement obscur de grande longueur d'onde (en même temps que par conduction et convection) la chaleur reçue. Pour capter l'énergie solaire, il suffit d'utiliser l'« effet de serre ». Grâce à une couverture en verre placée sur un châssis, on réalise un « piège à calories ». On peut augmenter l'intensité de l'effet de serre en plaçant sur le châssis 2 à 3 lames de verre séparées par des couches d'air, pour chauffer de l'eau on peut atteindre 80°C avec 2 lames de verres, avec 3 vitres on peut porter la température de l'eau à 90° ou 100°C.

On a pensé à remplacer les couvertures de verre par des matières plastiques transparentes, mais on n'a pu trouver aucune matière plastique aussi bonne que le verre, aucune ne transmettant le rayonnement de courte longueur d'onde aussi bien que le verre, et toutes comme le verre permettent de piéger le rayonnement de grande longueur d'onde, mais ces couvertures en matière plastiques ne restent pas longtemps en bon état et vieillissent trop vite.

D'une façon générale, un insolateur comporte essentiellement une surface absorbante l'énergie solaire, une couverture transparente et une isolation thermique.

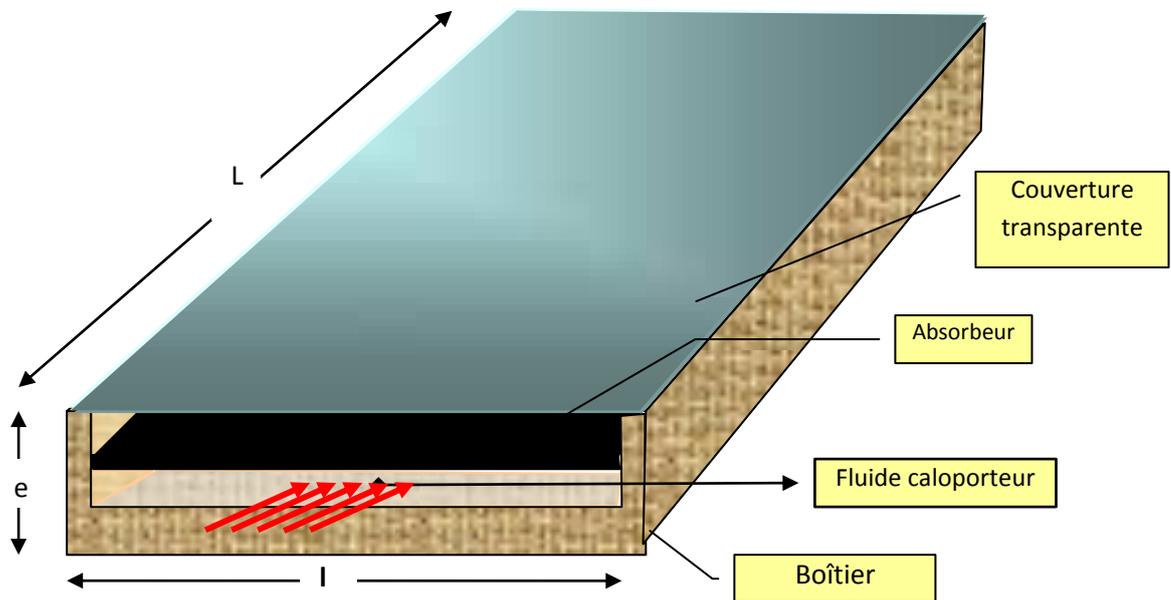


Fig. (I-II-4)- Schéma simplifié d'un capteur solaire plan à air (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)



Photo. (I-II-1)- Capteur solaire plan à air exposé au soleil (dgm.Univ de Biskra) (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

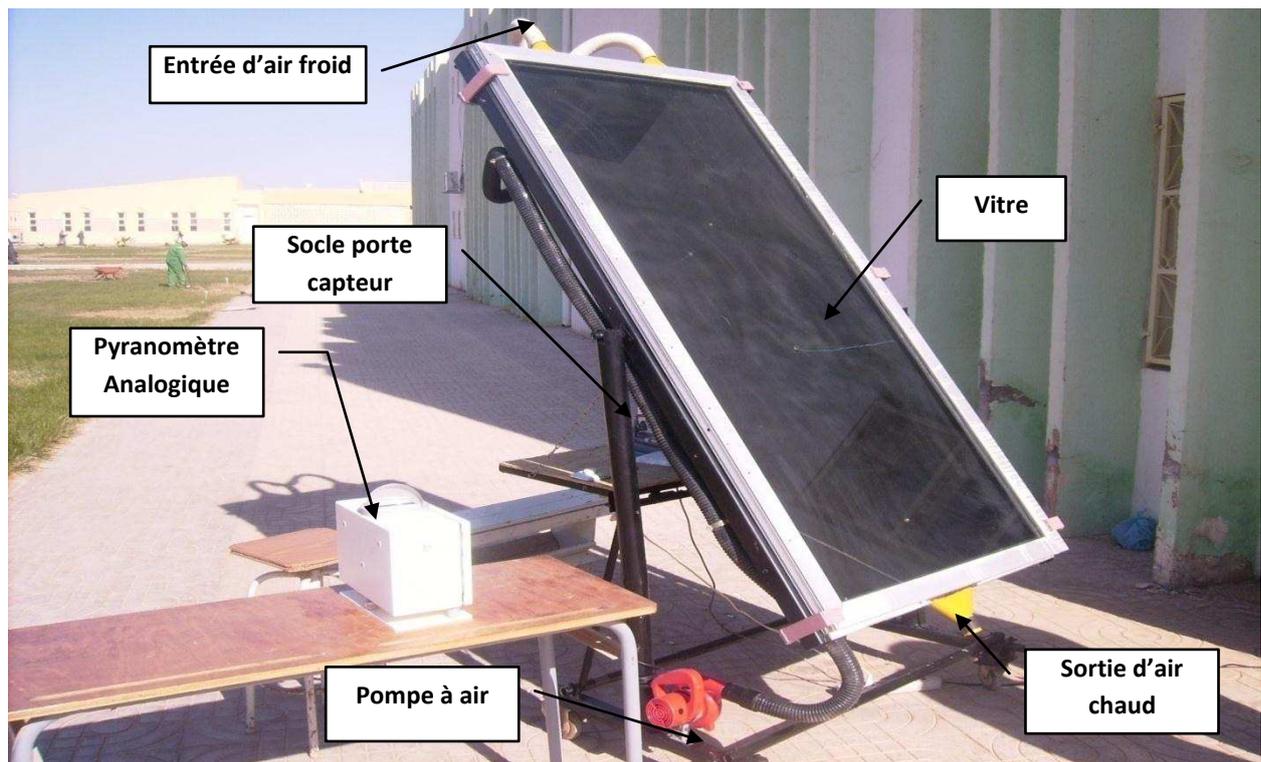


Photo. (I-II-2)- Capteur solaire plan à air en expérimentation (Dgm. Univ de Biskra) (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

b.2- L'absorbeur

« Absorbeur », est une surface d'une couleur sombre, souvent noire, c'est le siège de la conversion thermique et sert au transfert de la chaleur au fluide à chauffer, par conduction et convection quand le liquide circule à l'arrière de la surface absorbante (cas des insolateurs à lame d'eau et de certains insolateurs à tubes d'eau) ou juste un transfert par convection si le fluide à chauffer se trouve du côté où arrive le rayonnement (cas des insolateurs japonais du type « bassin », très répandu au Japon pour produire l'eau chaude).

Il transforme le rayonnement solaire reçu en chaleur et échange celle-ci avec le fluide caloporteur. L'absorbeur est l'élément principal dans le fonctionnement d'un capteur plan. De nombreuses recherches sont en cours, en vue d'améliorer le pouvoir d'absorption vis-à-vis du rayonnement solaire, par le traitement des surfaces absorbantes, en effet l'absorbeur idéal serait celui qui absorberait toute l'énergie correspondante au spectre solaire de longueur d'onde inférieure à 3 micromètre, et qui émettrait faiblement dans le domaine de l'infrarouge lointain ($\lambda > 3 \mu\text{m}$).

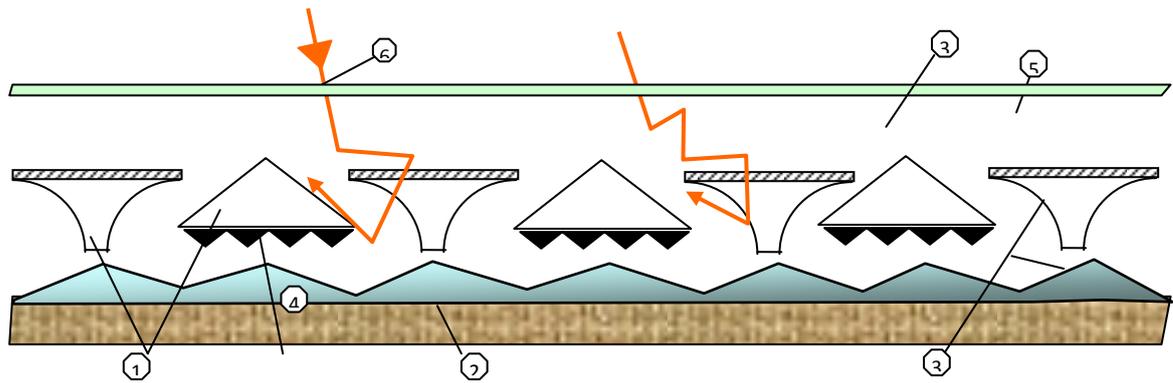
Le choix d'un absorbeur revient à l'analyse de son facteur d'absorption α_λ , qui devrait être proche de l'unité.

En général, les absorbeurs sont fabriqués de plaques planes (absorbeurs à air) ou de tubes (absorbeurs à liquide) en Plastique, de Cuivre, d'Acier ou d'Aluminium, on utilise aussi des surfaces avec du Zinc sur Aluminium, ainsi que celle traités chimiquement. L'absorbeur est en général distant de 25 à 30 mm de l'isolant.

- **Absorbeur en Cuivre** : Considéré comme étant la meilleure matière pour absorber le rayonnement d'une part et pour transmettre la chaleur convertis au fluide caloporteur en raison de ces bonnes propriétés thermo-physiques.
- **Absorbeur en Aluminium** : très appréciable pour sa légèreté et sa bonne conductivité thermique, il est parmi les métaux qui résistent à la corrosion grâce à la couche d'Alumine (Al_2O_3), en effet la formation de cette couche freine toute oxydation, ce qui éviterait une éventuelle attaque corrosive par la suite. D'autre part il faut éviter l'association des différents métaux dans le même conduit de circulation qui favorise la naissance des réactions d'électrolyses destructives.

La surface avant, qui reçoit le rayonnement, est en général recouverte d'une très mince couche de peinture noire mate (non brillante) en vue d'augmenter le pouvoir d'absorption de la plaque.

- **Absorbeur en matière plastiques** : ont l'avantage d'être plus légères et insensibles à la corrosion par rapport aux métaux, on distingue le polypropylène et le polyphénolxyde (P.O.P) qui résistent jusqu'à 150 °C, malgré leur conductivité thermique qui est 1500 fois plus faible que celle du cuivre, sont utilisés comme absorbeur, dont les performances sont comparables à celle des capteurs à absorbeurs métalliques.
- **Absorbeur à corps noir invisible** : Dont la surface absorbante peinte en noir est cachée de la vue de l'observateur par un dispositif convenable. Les pertes par réémission sont très limitées. Les surfaces noires ou sombre ont fait l'objet de certaines critiques quand il s'agit d'équiper, avec des insolateurs, des bâtiments on recherche l'esthétique. Ces insolateurs à corps noir invisible fig. (I-II-5), dit aussi « Sun a Rio » peuvent atteindre 130° à 140 °C l'été et 70° à 80°C pendant l'hiver.



- 1 Corps creux parcourus par le fluide 3 réflecteur 5 Vitrage opaque devant l'infrarouge
 2 Isolation thermique 4 Corps noir absorbant 6 Rayonnement solaire

Fig. (I-II-5)- coupe d'un absorbeur à corps noir invisible (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Quelques valeurs des coefficients d'absorption et d'émission sont données :

Support matériel et traitement	α_λ	ε_λ
Acier et Nickel noir sur Nickel	0,95	0,07
Acier et Chrome noir sur Nickel	0,95	0,09
Acier et Chrome Noire	0,91	0,07
Cuivre et Chrome noir	0,95	0,14
Acier Galvanisé et Chrome noir	0,95	0,16
Cuivre et Cuivre Noir	0,88	0,15
Acier et oxyde de Fer	0,85	0,08
Aluminium et Oxyde de manganèse	0,70	0,08
Acier et couche organique sur Chrome noir	0,94	0,20
Peinture noir époxy	0,95	0,18
Peinture blanche époxy	0,25	0,91

Tab (I-II-1). Coefficient d'absorption α et d'émission ε pour les supports les plus utilisées comme absorbeur.

(Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Un bon absorbeur doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Il doit avoir un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Un facteur d'émission d'ondes thermiques faible.
- Une bonne conductivité et diffusivité thermique.
- une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide qui le baigne.
- Une faible inertie thermique.

Matériau	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Matériau	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Coton	0,059
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	14,9	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Brique terre cuite	1,1	Polystyrène extrudé	0,027
Verre	0,78	Air	0,026

Tab (I-II-2)- Conductivité thermique des matériaux les plus courants. (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

b-3- Les couvertures

L'utilisation des couvertures transparentes permet de réduire les pertes thermiques par convection et par rayonnement vers l'extérieur.

Elles doivent d'une part être transparentes au rayonnement solaire (dans le domaine du visible) et laisser passer toute ou le maximum de l'énergie rayonnée par le soleil, et d'autre part, piéger la partie émise par l'absorbeur une fois que l'équilibre thermique est atteint. En effet, le verre est transparent pour les rayonnements de longueurs d'ondes inférieures à 3 μm , et il est presque opaque aux rayonnements de longueurs d'ondes supérieures à 3 μm , qui correspondent au domaine de l'infrarouge, cela forme un véritable piège aux différents échanges dans l'espace compris entre l'absorbeur et les couvertures, par le phénomène d'effet de serre.

Le principe d'échange est le suivant :

- Le rayonnement solaire traverse la vitre.

- La plaque absorbe la partie de rayonnement transmise.
- Il y'a réémission du rayonnement par cette plaque dans le domaine de l'infrarouge.
- la plaque de verre réémet à son tour dans le domaine de grande longueur d'onde ($\lambda > 3\mu\text{m}$), moitié vers l'extérieur, moitié vers l'intérieur et ainsi de suite.

Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire, qui peut être amélioré en munissant le capteur d'une double couverture.

L'interposition d'un matelas d'air entre la partie chaude et le milieu ambiant permet de réaliser une meilleure isolation thermique vers l'avant, et favorise de plus l'effet de serre.

Il faut noter qu'il est peu rentable d'utiliser plus de deux feuilles de verre, car ceci se répercute sur le rendement optique, en faisant accroître les pertes par réflexion et absorption du rayonnement solaire incident. La schématisation de l'effet de serre pour des couvertures en double vitrage est représentée sur la fig. (I-II-6).

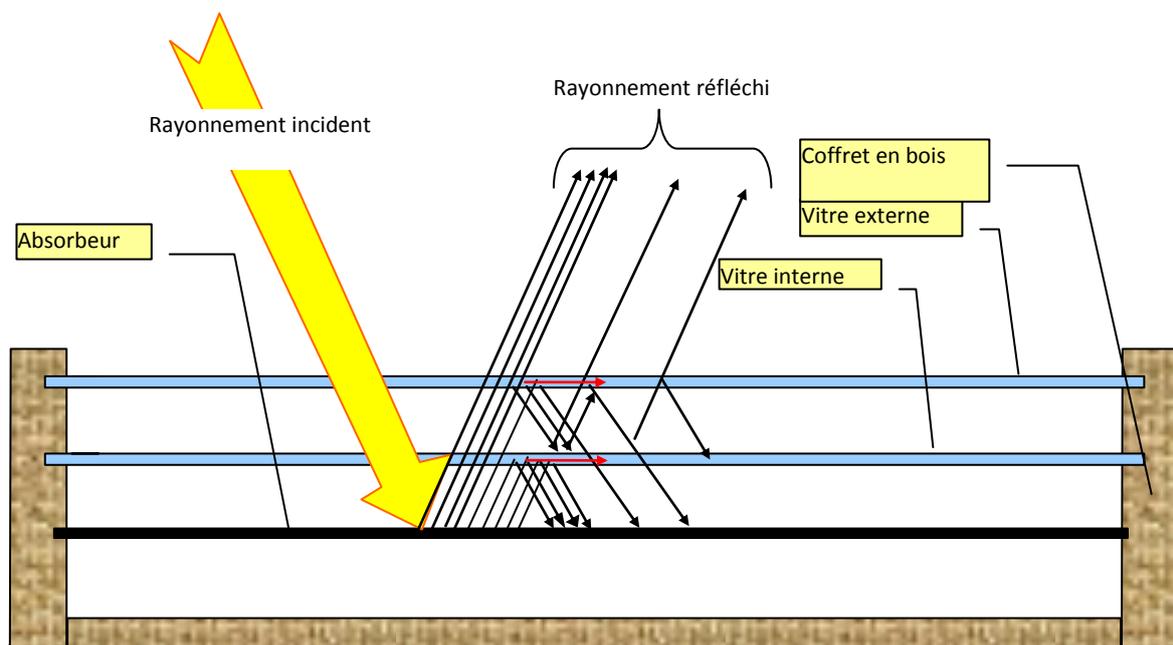


Fig. (I-II-6)- schématisation de l'effet de serre avec deux vitrages. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Comme couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaires plans, on distingue :

- **Le verre** : ce type de couvertures laisse passer entre 84 et 92% du rayonnement solaire sous une incidence normale, pour une lame de verre de 3mm d'épaisseur. La transmission

du verre au rayonnement solaire dépend de la contenance de ce matériau en oxyde de fer (Fe_2O_3), qui absorbe éventuellement les rayonnements de grandes longueurs d'onde de la lumière solaire, et colore en vert la tranche des vitres, les expériences montrent que c'est pour des faibles quantités en Fe_2O_3 qu'on espère obtenir de bonnes valeurs de transmission de l'ordre de 92%.

Les couvertures vitrées ou en verre présentent quelques inconvénients;

- Fragiles aux chocs mécaniques et thermiques.
- Forte inertie thermique en comparaison avec le polycarbonate, en raison de leur masse volumique qui plus au moins importante.

- **Les polycarbonates** : sont des dérivés de matières plastiques à double et à triple lame très fine fig. (I-II-7), reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant, sont les plus utilisés en raison des avantages qu'ils présentent. Leur coefficient de transmission au rayonnement solaire, est de l'ordre de 83% sous une incidence normale à l'état neuf, qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans), il faut noter que l'effet de serre est nettement meilleur avec des couvertures transparentes en verre et en particulier avec des plaques alvéolaires à double parois. Les polycarbonates, en comparaison avec des couvertures en verre, présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs thermomécanique et une faible densité, qui leurs permettent d'avoir une faible inertie thermique.



Polycarbonate à double paroi



Polycarbonate à Triple paroi



polycarbonate à paroi multiple

Fig. (I-II-7)- Plaque de polycarbonate alvéolaire à double à triple et à multiple paroi transparente. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

b.4- Les isolants

L'isolation joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, pour limiter les pertes par conduction et convection vers le milieu environnant, sur les côtés latéraux et en bas du capteur.

L'isolant doit être opaque aux rayonnements de grande longueur d'ondes, dans le domaine de l'infrarouge émis par la plaque rayonnante (absorbeur).

- Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :
- Une faible conductivité thermique
- Une faible densité, (pour une faible inertie thermique)
- Une chaleur massique qui doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

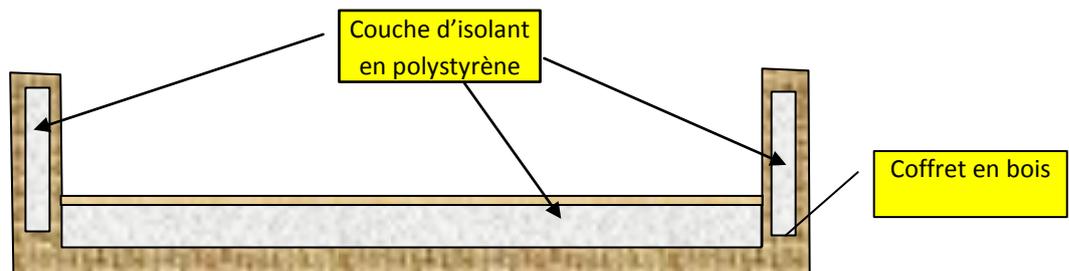


Fig. (I-II-8)- Isolation thermique du boîtier (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

On distingue trois types d'isolants :

• Isolant minéraux :

- **La pierre ponce**, est une roche volcanique (feldspath) qui s'est solidifiée en enfermant de nombreuses bulles d'air.
- **La laine de verre** constituée de fibres de verre très fines, commercialisée sous de nombreuses formes: en plaques, en rouleaux et enrobée dans du plâtre. Sa conductivité varie entre 0,034 W/m °K à 0 °C et 0,053 W/m.°K à 200 °C. La laine de verre est un matériau efficace, mais désagréable à manipuler en raison des fibres qui s'échappent. Elle doit être gardée au sec sous peine de perdre ses propriétés isolantes.

- **La vermiculite** connue aussi sous le nom de mica, dont la conductivité thermique varie de 0,12 à 0,60 W/m^{°K} et qui se présente sous forme de granulés très légers.

Ces trois isolants minéraux sont de nature incombustible et non dégradables par la chaleur.

• **Isolants d'origine végétale :**

- **Le bois bien sec**, sa conductivité thermique, varie entre 0,13 et 0,40 W/m^{°K}, ses qualités isolantes peuvent être améliorées, s'il est utilisé sous forme de fibres agglomérées, dont la conductivité thermique λ varie de 0,05 W/m^{°K} à 0,10 W/m^{°K}.

- **La sciure de bois** : ($\lambda = 0,11$ W/m^{°K}), a deux inconvénients: son inflammabilité, et sa conductivité, qui augmentent avec la température, ce qui la rend inadéquate pour la calorifugation.

• **Isolants organiques :**

Ils ont la propriété d'être insensibles à l'humidité, cependant ils dégagent des gaz toxiques en cas d'incendie, on distingue :

- **Les matières plastiques**, sont de mauvaises conductrices de la chaleur. Leurs propriétés isolantes peuvent être améliorées en insufflant un gaz durant l'étape de solidification, ce qui leur donne la consistance d'une mousse, telle que les mousses phénoliques ($\lambda = 0,44$ W/m^{°K}) et la mousse de chlorure de polyvinyle ($\lambda = 0,033$ W/m^{°K}), on distingue :

- **La mousse de polyuréthane** : existe sous deux aspects:

- Haute densité ($d = 0,6$) suffisamment rigide pour servir à la fabrication des caissons de capteurs, tout en constituant un bon isolant ($\lambda = 0,08$ W/m^{°K}).

- Basse densité ($d = 0,03$) qui la rend plus fragile, mais meilleure, pour l'isolation ($\lambda = 0,025$ W/m^{°K}). Il convient de recouvrir ce type de matériau d'un isolant plus résistant à la chaleur si la température dépasse la valeur de 90°C.

- **Le polystyrène est très léger**, fragile, de couleur blanche, utilisé généralement pour l'emballage. Ses propriétés isolantes sont légèrement moins bonnes que le polyuréthane, sa conductivité thermique est de l'ordre de 0,04 W/m^{°K}, mais il est nettement moins cher, il se sublime à partir de 90°C, c'est le type d'isolant utilisé dans la majorité des capteurs solaires plans à air.

La meilleure solution pour réduire de façon efficace les pertes thermiques, consiste à créer le vide, mais cette technique délicate est très coûteuse, est utilisée surtout dans certains capteurs solaires à haute performance, tels que les capteurs à concentration.

b.5-Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur a pour rôle de véhiculer la chaleur cédée par l'absorbeur, pour l'utiliser directement ou pour la stocker. Le fluide caloporteur doit satisfaire à certaines conditions essentielles:

- Une faible viscosité.
- Un haut point d'ébullition et un bas point de congélation.
- Un coefficient de transfert thermique élevé.
- Une stabilité physique et chimique dans les conditions d'emploi et de stockage.
- Une grande capacité calorifique (Cp).
- Une agressivité faible devant les matériaux constituants (le capteur) avec lesquelles il est en contact.

On utilise trois principaux fluides caloporteurs:

- **L'air**, son abondance et sa gratuité, lui donnent un avantage évident, son principal handicap réside en sa faible capacité calorifique, en effet il faut environ 3000 litres d'air pour véhiculer autant d'énergie qu'un litre d'eau. Pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut donc utiliser des volumes d'air très importants, ce qui implique l'utilisation des tuyaux et des échangeurs de grandes dimensions. L'air comme agent de transport de calories a un avantage par rapport à l'eau ; absence total des problèmes de gel et de corrosion, ce qui donne aux capteurs une durée de vie importante, et un coût d'entretien faible.
- **L'eau**, possède des propriétés physiques qui en font, un excellent fluide caloporteur : en raison de sa chaleur massique, sa densité, et sa faible viscosité. Cependant l'eau pose des problèmes de fonctionnement aux températures extrêmes : le risque de gel dans les conditions de travail à ciel dégagé pendant les nuits d'hiver, et le risque d'ébullition en cas de hautes températures. On note aussi, que l'eau calcaire se manifeste pour les températures de fonctionnement au-delà de 60° C par la naissance des couches de tartre dans les canalisations, qui impute une résistance thermique supplémentaire, ce qui

diminuerait la qualité du transfert thermique, de plus les problèmes de fuites d'eau exigent un contrôle régulier, ce qui rend important le coût d'entretien.

• **Les gilothermes**, ce sont des liquides organiques, à base de poly phényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires, dont trois d'entre eux sont utilisés dans les applications de l'énergie solaire.

- **MVS 13**, dont l'intervalle de température de fonctionnement est compris entre - 25 et + 180°C

- **ADX 10**, pour la gamme de température allant de - 50 à +260°C

- **TH**, utilisé dans l'intervalle de température allant de 0 à + 340°C.

Ces liquides sont traités pour ne pas présenter les mêmes défauts que l'eau, qui se distinguent par l'absence du gel, de corrosion et d'entartrage, par contre ces hydrocarbures se détériorent en présence de fines traces d'eau ou d'air.

Leur chaleur massique vaut environ 0,5 kcal/Kg. ° K, ils sont aussi de faible viscosité, très mouillants (risque de fuite), et combustibles à haute température.

c- Classification des capteurs solaires plans à air

La classification des capteurs solaire plans à air repose sur plusieurs critères, on cite à titre d'exemple :

- Selon la forme de l'absorbeur

- Le nombre de couverture transparente.

- Le nombre de veine d'air en écoulement et sa disposition vis-à-vis de l'absorbeur.

En fonction de la forme de l'absorbeur on distingue trois grandes catégories de capteurs à air :

- capteurs à absorbeur perméable.

- capteurs à absorbeur à géométrie variable

- capteurs à absorbeur plan.

c.1-Capteurs à absorbeur perméable :

Il s'agit d'un capteur, dont l'absorbeur est une matrice perméable ou poreuse, l'air pénètre et se déplace dans l'espace vitre-absorbeur, dans ces conditions l'échange thermique par convection aura lieu sous le vitrage, ainsi qu'avec l'isolant durant son mouvement à travers

l'absorbeur. On note que pour ce genre de capteurs la surface d'échange est assez importante.

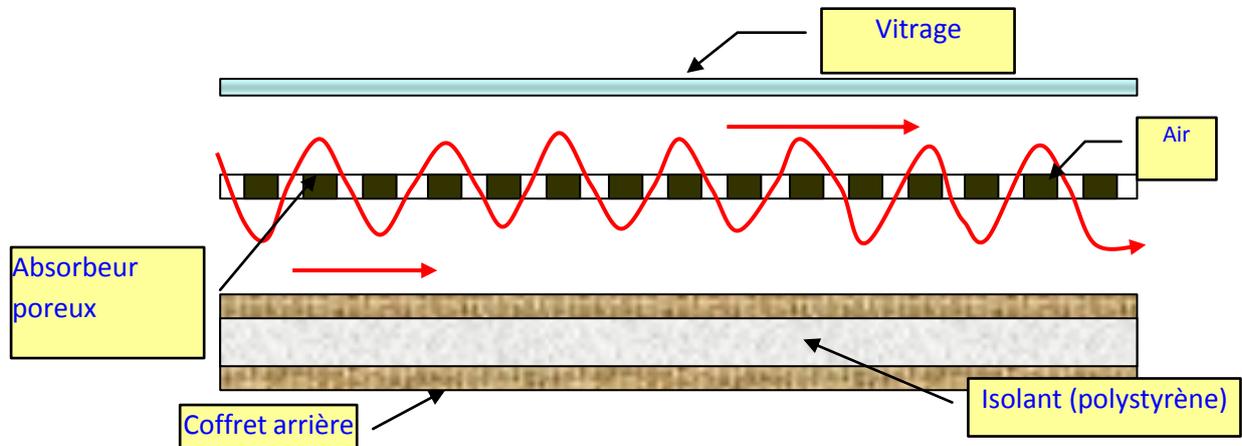


Fig. (I-II-9)- schéma simplifié d'un capteur à absorbeur poreux (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

c.2- Capteurs à absorbeur à géométrie variable :

Dont le principe consiste à modifier la forme et la géométrie de l'absorbeur, en vue d'obtenir une surface d'échange considérable. Les formes les plus utilisées sont les suivantes:

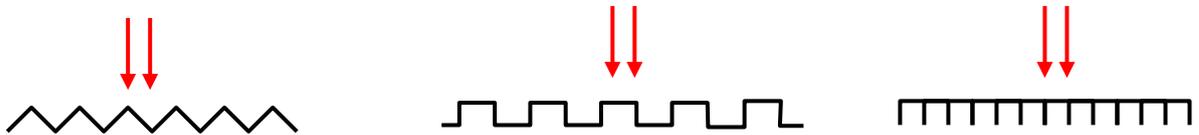


Fig. (I-II-10)- Différents types d'absorbeurs à géométrie variable (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

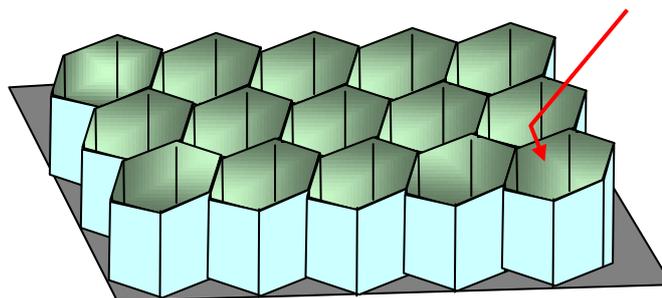


Fig. (I-II-11)- Absorbeurs en forme de nid d'abeille (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

II-6-5- Capteurs à absorbeur plan:

Pour ce type de capteurs, l'absorbeur est une plaque en tôle plane, leur variété réside dans le nombre de vitres qui les composent et dans le nombre de veines d'air en écoulement.

On cite plusieurs sortes de capteurs selon leurs modes d'écoulement :

- Capteurs où l'écoulement est au-dessus de l'absorbeur
- Capteurs où l'écoulement est en dessous de l'absorbeur
- Capteurs où l'écoulement est des deux côtés, en bas et en haut de l'absorbeur, dit aussi capteur à deux veines d'air mobile.

Pour cette catégorie de capteurs, on distingue plusieurs types, qui se différencient les uns des autres par leurs performances thermiques, qui est basé sur le calcul du rendement, qui exprime la quantité de chaleur extraite par le collecteur pour une quantité d'énergie solaire reçue par la surface captatrice du capteur considéré. Cette énergie thermique est ensuite véhiculée par le fluide caloporteur et qui devrait être acheminé aux points d'utilisation.

Une étude comparative (fig. (I-II-12)), a permis de mettre en évidence, les performances de plusieurs types de capteur, dont le principe et le concept sont schématisés sur les figures suivantes :

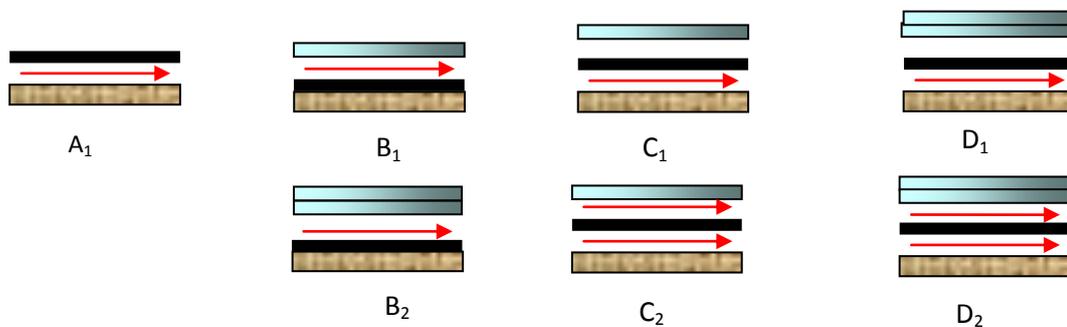


Fig. (I-II-12)- différents types d'écoulement. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Le capteur D₂, est celui qui a le meilleur rendement. Le capteur A1 sans couverture transparente, présente un rendement, plus faible, en raison des pertes thermiques vers l'avant.

Le capteur de type B₁, muni d'une seule couverture transparente, et dont l'air circule entre le vitrage et l'absorbeur a un rendement inférieur à celui du capteur D₂.

Le capteur de type B_2 , qui n'est en fait que le capteur B_1 amélioré par adjonction d'une seconde couverture transparente, montre un accroissement sensible du rendement, ceci étant obtenu grâce au système à double couverture transparente, qui minimise les pertes thermiques vers l'avant de l'insolateur.

Le capteur de type C_1 muni d'un seul vitrage et dont l'air circule entre l'absorbeur et l'isolant, est plus performant que les deux types vues précédemment, cette amélioration est obtenue grâce à la présence d'une veine d'air immobile entre l'absorbeur et les couvertures qui joue le rôle d'isolation thermique et qui permet par conséquent de minimiser les pertes vers l'avant du capteur.

Une modification portée sur le capteur de type C_1 , par utilisation d'une double couverture transparente qui réduit les pertes thermiques par convection vers l'avant entre le capteur et l'ambiance permet en effet d'obtenir des améliorations des performances, mais qui se répercute sur le rendement optique des couvertures transparentes, par les pertes par absorption aux niveaux des couvertures et par réflexion vers l'extérieur.

a- Optimisation des échanges thermiques :

Les capteurs solaires plans à air, présentent des faibles performances thermiques comparativement aux capteurs à liquides. Cet inconvénient est dû aux faibles propriétés thermo physiques de l'air (capacité calorifique, coefficient de conductivité thermique ...etc.).

En vue de réduire les zones mortes notamment au niveau des coins de la veine d'air mobile, et pour accroître les performances thermiques des capteurs solaires à air, on devrait créer des écoulements turbulents très développés, qui permettent d'intensifier les échanges thermiques et par conséquent les performances thermiques de ces capteurs. Ces écoulements turbulents sont obtenus en garnissant le conduit de l'insolateur par des obstacles en métal dites chicanes de formes diverses et variées, qui sont réalisées de tôles métalliques d'acier galvanisé ou d'aluminium d'épaisseur 0,4 à 0,5 mm.

Partant d'un constat, que vu les faibles propriétés thermo physiques de l'air, les capteurs solaires à air ne donnent que des rendements médiocres. Il a été jugé et les résultats le confirment, de disposer des chicanes de formes diverses et variées dans le conduit des capteurs solaires. Ces chicanes sont découpées de tôles métalliques (aluminium, cuivre, acier galvanisé) permettent de perturber l'écoulement de l'air qui devient plus agité que

dans le capteur sans chicane. Les chicanes permettent également à l'air de parcourir de longues trajectoires et par conséquent un temps de séjour important près de l'absorbeur. Les paramètres qui influent sur le développement de la turbulence sont ; la forme, la disposition, le nombre de rangées et l'inclinaison de ces obstacles.

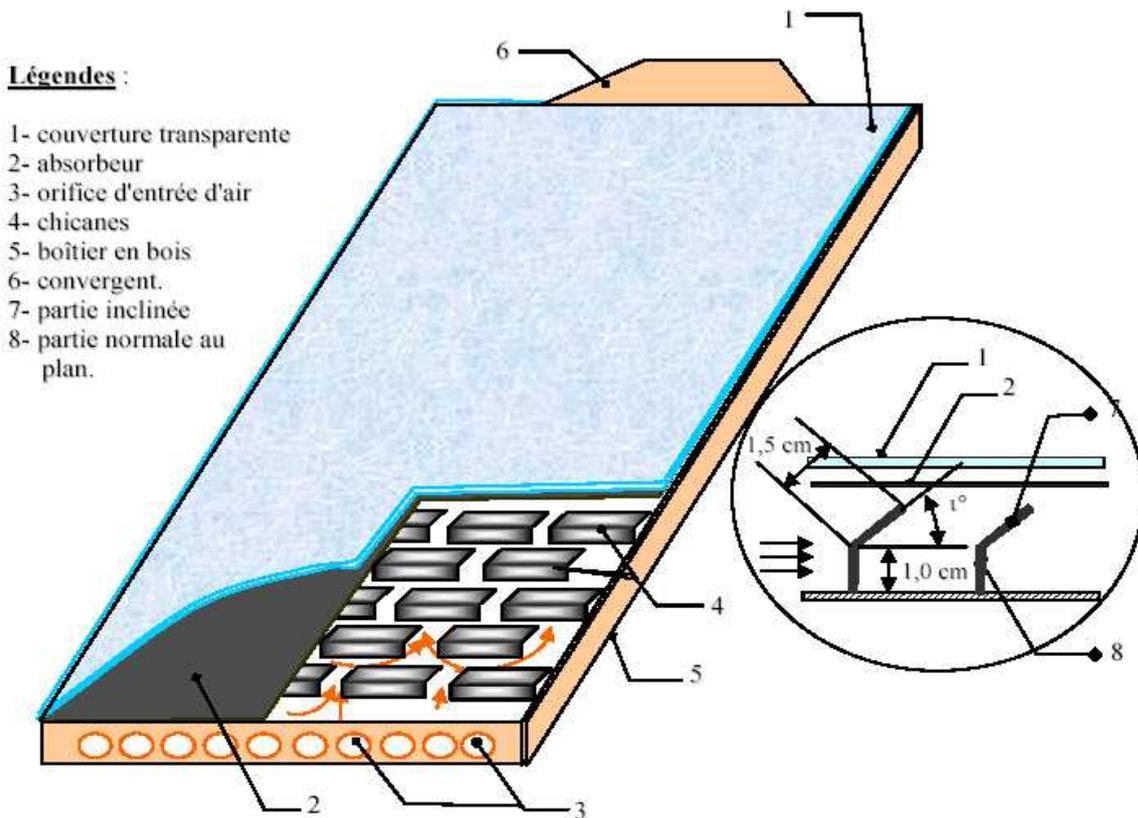


Fig. (I-II-13)- capteur solaire plan à air muni de chicanes. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

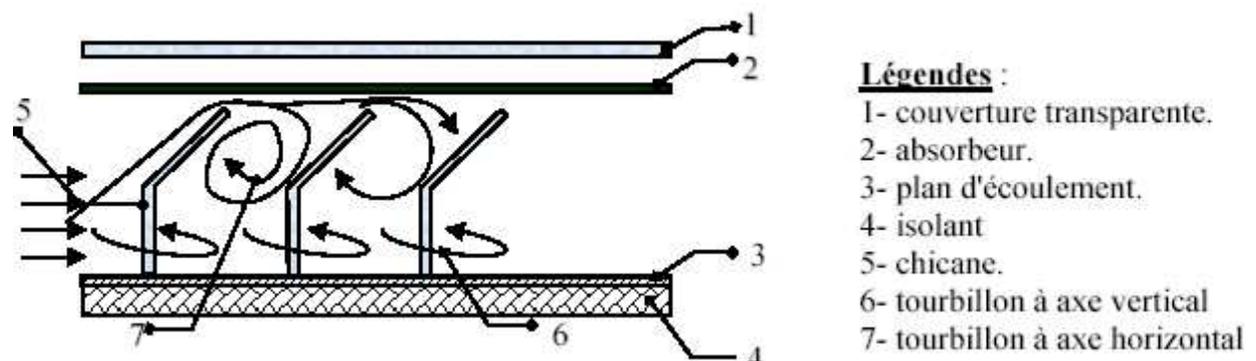


Fig. (I-II-14)- impact de l'air en présence des chicanes (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

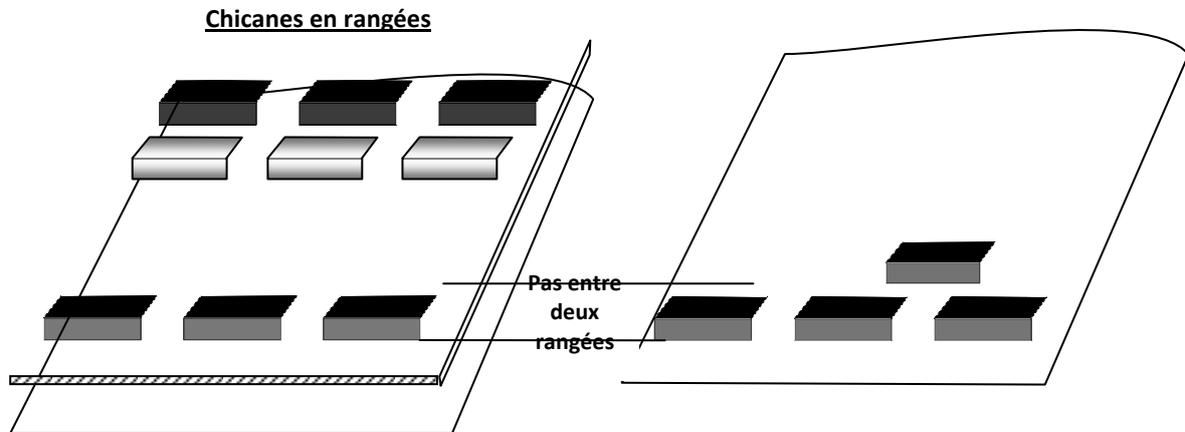
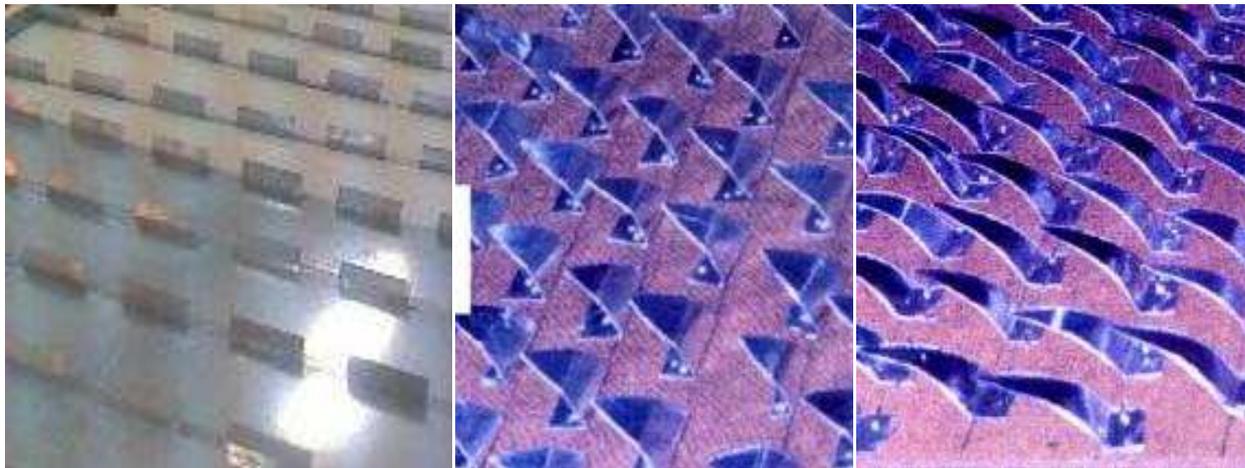


Fig. (I-II-15)- Disposition en rangée et en quinconces des chicanes dans la veine d'air mobile (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)



Chicanes rectangulaires avec partie supérieure inclinée

Chicanes triangulaires avec partie supérieure inclinée

Chicanes en forme d'Ogive avec partie supérieure inclinée

Fig. (I-II-16)- Chicanes rectangulaires, triangulaire et en forme d'ogive (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Partant des essais de visualisation, qui ont été effectués à la soufflerie, par jet de fumée sur une maquette à échelle réduite de chicanes de formes rectangulaires avec une partie supérieure inclinée, mais qui sont de dimensions réelles qui présentent un certain angle

d'attaque, disposées en quinconce. L'alternance conjuguée des élargissements et des rétrécissements brusques crée un écoulement turbulent. On remarque deux tourbillons d'axes verticaux, qui correspondent aux arrêtes verticales des chicanes, et un autre tourbillon d'axe horizontal fig. (I-II-18), obtenu particulièrement avec les fortes incidences, où il ne reste qu'un passage minimal entre l'arrête supérieure et l'absorbeur, avec formation d'un élargissement brusque à l'aval de cette arrête.



Fig. (I-II-17)- Visualisation de l'écoulement d'un jet de fumée dans un capteur sans chicanes (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)



Fig. (I-II-18)- Visualisation de l'écoulement d'un jet de fumée dans un capteur en présence de chicanes triangulaires (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

II-6-6- Conditions d'installation des insolateurs

Les insolateurs peuvent être fixes ou mobiles (montés sur support orientable pour la poursuite du soleil), et dans la plupart des cas ils sont fixes, on peut les installer sur le toit d'une maison, sur une terrasse, ou bien sur un panneau séparé installé sur le sol, ou sur un sol en pente. Il existe des insolateurs « autoportants » bien adaptés pour la construction des toitures.

Les insolateurs se présentent généralement sous la forme de panneaux pouvant être assemblés. Il suffit d'orienter ces panneaux vers le sud ou le sud-sud-ouest, avec une inclinaison sur l'horizontale ou même en position verticale (insolateurs fixés contre des murs) ; quand on les incline sur l'horizontale, l'angle d'inclinaison dépend de la latitude du lieu. Pour les latitudes comprises entre 40° et 50°, certains installateurs conseillent d'adopter pour l'été une inclinaison sur l'horizontale de 35°, et pour l'hiver une inclinaison de 60°. Si l'on veut adopter une inclinaison fixe, en toute saisons, les uns conseillent de choisir une inclinaison égale à la latitude du lieu, d'autres recommandent d'adopter une inclinaison égale à la latitude plus 10° (latitude + 10°).

a- Condition de fonctionnement

Les insolateurs fonctionnent parfaitement durant les périodes de rayonnement solaire direct, mais d'une façon satisfaisante quand le ciel est légèrement couvert, le rayonnement diffusé par l'atmosphère et les nuages suffisent pour obtenir des températures intéressantes.

L'énergie instantanée reçue en zones tempérées par temps couvert correspond en moyenne à une puissance de l'ordre de 0,25 kW/m² ce qui est très loin d'être négligeable.

On peut utiliser des miroirs renforçateurs, miroirs plans dirigeant sur les insolateurs des faisceaux solaires.

b- Pertes thermiques des insolateurs

Malgré les précautions prises pour assurer une bonne isolation thermique, des pertes sont inévitables, et qui dépendent de la nature des matériaux utilisés, de l'orientation de l'insolateur, de son inclinaison par rapport au plan horizontal, des conditions

météorologiques (température ambiante), de l'état hygrométrique de l'air, de la limpidité plus au moins grande de l'atmosphère, de la vitesse du vent au sol.

Les pertes dépendent également de la température de la surface absorbante, variable d'un point à un autre et allant en augmentant dans le sens de circulation du fluide.

Augmenter la performance des insolateurs, consiste principalement en une limitation aussi grande que possible des pertes thermiques par conduction et par réémission de la face absorbante.

On cite comme exemple les insolateurs brevetés « SUN-A-RIO », dits « à corps noir invisible » qui ont vu un progrès au niveau des surfaces sélectives, où on est arrivé à porter la température à 130° et même 140°C l'été, et 70° à 80°C et même d'avantage l'hiver selon les régions. Dans ce type d'insolateur, les surface noires sont masquées par un dispositif spécial afin de limiter les pertes par réémission, et les éliminer de la vue des observateurs, ce qui permet de trouver des solutions d'esthétique en équipant des bâtiments, ou d'installer des ensembles d'insolateurs dans des sites dont il est important de protéger l'harmonie avec le paysage environnant.

II.7- Autres capteurs solaires

La concentration du rayonnement solaire direct est assurée par l'utilisation des lentilles ou de miroirs concaves, ces derniers sont généralement préférés en héliotechnique pour la concentration. Il est à noter que le rayonnement diffus, non utilisé par les capteurs à concentration, représente souvent 10 à 20% de l'énergie solaire directe.

II.7.1-Les lentilles solaires

Les lentilles en verre sont peu employées, à cause de leur cout très élevé dans les grandes dimensions. On peut faire des lentilles liquides, mais surtout avec des matières plastiques qu'on peut fabriquer des lentilles moins couteuses, présentant également l'avantage d'être incassables voire leur possibilité d'être en grandes dimensions, permettant ainsi obtenir à leur foyer des températures de l'ordre de 1100°C et même supérieures.

II.7.2- Types de concentration réalisables avec des miroirs.

On peut distinguer trois types de concentration :

- semi-concentration, coefficient de concentration de l'ordre de 100, au moyen de miroirs assurant une concentration approximative quelle que soit l'incidence des rayons, c'est le cas de miroirs cylindro-paraboliques.
- concentration approchée, de l'ordre de 1000, au moyen d'un grand nombre de miroirs, focalisant ou non, assurant la poursuite du soleil et dénommée « héliostats » ; asservis avec deux degrés de liberté angulaire, et les plages solaires produites par les divers miroirs sont superposées.
- concentration exacte, obtenue grâce à un système optique stigmatique comportant des héliostats plans et un miroir parabolique, ce système appliqué pour le four solaire d'odeillo, permet d'obtenir des températures très élevées.

II.7.3- Constitution des miroirs concentrateurs.

Avant étaient en cuivre ou autre métal facilement altérable, puis on a utilisé des alliages doués d'une grande dureté, pour éviter les rayures ou être dépolis par la poussière ou les grains de sable projetés par le vent. Par la suite, on a utilisé divers matériaux tels que le verre argenté ou aluminé, aluminium poli, tôle d'aluminium polie par laminage puis par procédé électrolytique protégé par un film d'alumine déposé par procédé anodique, et même des matières plastiques.

II.7.4- Formes, dimensions et fonctionnement des miroirs concentrateurs.

Les insolateurs plans captent à la fois le rayonnement solaire directe ainsi que le diffus, les miroirs concentrateurs ne fonctionnent qu'avec le rayonnement direct reçu sans intermédiaire, ou bien par l'intermédiaire de miroirs plans utilisés comme « miroirs orienteurs ».

Les miroirs de concentration linéaire ont la forme de surface réglée développables, ils sont soit cylindriques, cylindro-paraboliques, ou coniques.

- Les miroirs cylindro-paraboliques, destinés pour diverses installations, leur surface réfléchissante peut être faite d'une matière plastique, moins chère que le verre (polyester, polystyrène, acito-butyrates de cellulose), qu'on applique sur un moule cylindro-parabolique.

- Les miroirs cylindriques, réalisés à partir de tubes de mylar partiellement aluminés et permettant de fonctionner à 150°C, l'installation a permis d'actionner des turbines à vapeur de faibles puissances (1kw). Avec des miroirs cylindro-parabolique ou coniques on peut obtenir 400° à 500°C permettant de chauffer des chaudières solaires.

- Miroirs tronconiques de révolutions (recherche de Marseille III), permettent d'obtenir des températures entre 150° et 400°C, pour des réactions de thermochimie industrielle.

Notons que les recherches ont abouti à d'autres capteurs à concentration avec plusieurs formes, en entonnoir à miroir sphérique, mais la forme la plus courante est le paraboloïde de révolutions, si à l'ordre de 1m de diamètre il est moulé en une seule pièce en métal, en verre ou en matière plastique, la couche réfléchissante étant obtenue grâce à un dépôt d'aluminium ou d'argent.

Avec les miroirs paraboliques on peut avoir un coefficient de concentration de l'énergie solaire variant entre 10000 et 20000, et les températures peuvent être considérables. (déjà en 1954 Maurice Touchais a mis en service, à Bouzeréah à Alger, pour le compte du conseil supérieur de la recherche scientifique appliquée en Algérie, un grand miroir concave de 50m² de surface nette de captation, d'une puissance maximale de 50 kW et produisant une température de 4000°C).

II.8-L'électricité solaire photovoltaïque

II.8.1-Phénomène physique nouveau

Avec son image de haute technologie, de simplicité, de robustesse, de solidité, le photovoltaïque a bien de quoi séduire. Quoi de plus efficace et de plus pratique que ces cellules qu'on peut transporter avec soi et qu'il suffit de placer à la lumière pour obtenir du courant électrique, sans avoir besoin de machine tournante, ni bruit, ni pollutions. Grâce à elle la calculette marche toute seule, sans avoir peur d'une décharge de la pile, la bergerie isolée est devenue éclairée, l'émetteur radio fonctionne sans peur d'une panne d'électricité, et le dispensaire équipé d'un réfrigérateur à vaccins.

Le phénomène photoélectrique restait encore une curiosité de laboratoire, par les initiatives de recherche d'Alexandre-Edmond Becquerel, et W. G. Adams et R. E. Day ont mis en

évidence, en 1877, de l'effet photovoltaïque de sélénium pour la réalisation de posemètres pour la photographie.

Et tout commence en 1954 par trois chercheurs américains, Chopin, Fuller, et Pearson, qui mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (6%) permettant de transformer directement l'énergie solaire en électricité, pour servir l'industrie spatiale naissante comme solution pour alimenter les satellites.

La technologie du silicium monocristallin s'impose, permettant d'obtenir, à coût très élevé, des cellules photovoltaïques ou photopiles, extrêmement fiables. Ce sont des galettes de moins de 1mm d'épaisseur et de 5 à 10 cm de diamètre qui transforment directement la lumière en courant électrique continu sous une tension faible (inférieure à 1V). Une telle cellule est capable de produire de l'ordre d'1 (un) W électrique en recevant 10 W lumineux du soleil, son rendement de conversion dans ces conditions est de 10%.

II.8.2-Composante d'une centrale PV

a- Les modules photovoltaïques

Le « module photovoltaïque » est composé de « cellules photovoltaïques » qui sont montées en série ou en parallèle. Il fournit un courant électrique continu, le montage en série est le plus adopté, il augmente la tension (volts) à la sortie du champ des modules avec moins de pertes en ligne.

Une norme garantit la qualité de la technologie multi cristalline, où certains fabricants garantissent à 20ans, avec un rendement estimé à 95% de sa valeur de départ.

Actuellement on estime une durée de vie des modules à 20 ans.

L'énergie produite peut être utilisée directement, pomper de l'eau par exemple, ou bien le déverser sur un réseau électrique.

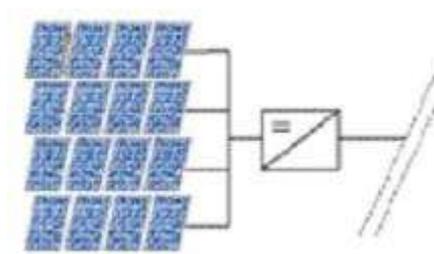


Fig. (I-II-19)- Installations non-évolutives sauf changement d'onduleur.

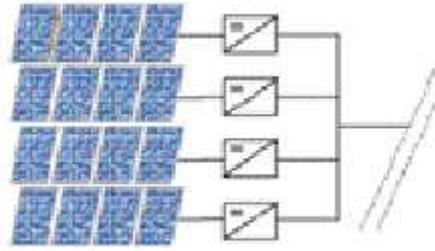


Fig. (I-II-20)- Installations évolutives

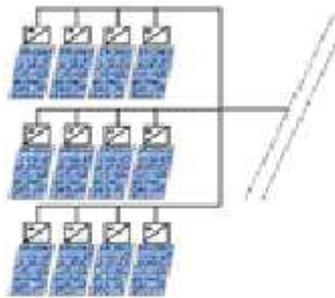


Fig. (I-II-21)- Grandes installations

- **La cellule photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs. Ces matériaux ont des propriétés de conduction électrique intermédiaire entre celles des métaux et des isolants, et ils ont la propriété de convertir la lumière qu'ils reçoivent en charges électriques, comme des diodes plates sensibles à la lumière. Une photopile au silicium par exemple, est constituée par une jonction d'une couche de silicium de type négatif « n » (avec de électrons en excès) et d'une couche de silicium de type positif « p », quand un photon de lumière solaire d'énergie suffisante ($\lambda < 1,1 \mu m$) interagit avec un atome, il excite un électron et l'arrache de sa structure électronique. Cet électron, entraîné dans le champ électrique de la jonction, produit une photo courant que l'on peut mesurer en mettant la cellule en court-circuit. Lorsque la cellule débite sur une charge résistive, une différence de potentiel apparait à ses bornes : la région « n » est polarisée négativement par rapport à la base « p ».

Pour qu'elles soient pratiquement utilisables, les photopiles sont assemblées mécaniquement et électriquement dans des « modules » les protégeant des intempéries pendant plusieurs dizaines d'années. Le couplage entre une production électrique discontinue (qui suit le cycle solaire et les fluctuations de la météo) et les besoins en énergie de l'utilisateur devrait être assurée, donc interposer un stockage et le gérer au mieux, s'adapter aux caractéristiques électriques des appareils utilisés couramment et fonctionnant en courant alternatif.

L'énergie quand elle est pleine, enfin un onduleur pour changer le courant du continu à l'alternatif.

b- L'onduleur

L'onduleur transforme le courant électrique continu produit par les cellules PV en courant électrique alternatif (semblable à celui du réseau), il est équipé d'une « protection de découplage » pour sa déconnection automatique en cas d'absence ou de défaillance du réseau, et supprime tout risque d'électrocution pendant les opérations de maintenances.

Les onduleurs fonctionnent un peu plus de 9 ans sans panne, mais actuellement ils ont plus de 20 ans de durée de vie.

c- Les organes de sécurité et de raccordement

Ils assurent des fonctions de protection vis-à-vis de l'utilisateur et du réseau, et peuvent être intégrés dans l'onduleur.

Les câbles électriques extérieurs (entre modules, des modules vers l'onduleur) devront être à double isolation et résistants aux UV, avec de bon dimensionnement des sections pour que les pertes ne dépassent pas les 2%.

d- Les batteries d'accumulation

Elles assurent une sauvegarde de l'alimentation électrique de certains équipements en cas de défaut du réseau.

Les batteries sont chargées pour les utiliser au moment voulu, qui doivent être dotées d'une diode anti-retour pour éviter un éventuel déchargement pendant la nuit, un régulateur de charge qui évite à la fois les décharges excessives des batteries et coupes.

II.8.3-La caractéristique courant-tension d'une photopile

La caractéristique courant-tension du générateur photovoltaïque est obtenue en faisant varier la résistance de charge. Le courant de court-circuit est proportionnel au flux, mais la tension en circuit ouvert en dépend peu. La cellule est assimilée à un générateur de puissance à tension quasi constante, lui assurant un couplage efficace avec les batteries électrochimiques.

II.8.4-L'unité de puissance des photopiles : le Watt crête

La performance d'une photopile se mesure à sa capacité de transformer l'énergie solaire en électricité, son rendement est le rapport de la puissance électrique qu'elle fournit à la puissance lumineuse qu'elle reçoit du soleil, un éclairement élevé chauffe la photopile et influe négativement sur son rendement. Le Watt crête est l'unité de la puissance d'une photopile, définie par une convention internationale, c'est la puissance optimale que peut fournir la photopile sous un ensoleillement de 1000 W/m^2 à température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Une cellule circulaire en silicium monocristallin de 10 cm de diamètre produit environ 1,3 WC (2,5 A sous 0,5 V), pour augmenter la tension, les cellules doivent être montées en séries, reliées entre elles et encapsulées dans un verre ou un plastique transparent, on obtient un module photovoltaïque. Un module de 1 m^2 , contenant une centaine de ces cellules de silicium monocristallins atteindra une puissance crête d'une centaine de watt, sous un rayonnement solaire de $5 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{jour}$, ce module produira au maximum 0,5 kWh d'électricité par jour.

II.8.5-Privilégier le service rendu ou la production photovoltaïque

Un système de production photovoltaïque peut être considéré similaire à un système existant, par des centrales importantes jusqu'à des centaines de mégawatts raccordés au réseau électrique, la centrale photovoltaïque joue alors le même rôle que n'importe quel autre ouvrage de production d'électricité : barrage, centrale thermique, etc.

En 1995 on comptait quelques pilotes de ces futures grandes centrales, en Californie, en Italie, en Espagne, implantées dans des zones arides très ensoleillées, dans certains cas les panneaux de photopiles sont montés sur des héliostats qui suivent la course solaire afin de profiter plus du flux solaire.

Ce système répond fortement aux besoins d'électricité domestiques, sanitaires agricoles ou artisanaux, de zones éloignées du réseau électrique. Plus que l'offre d'énergie, c'est alors le service rendu qui compte, le froid, l'éclairage, le pompage de l'eau, les transmissions, etc. Le progrès est senti plus rapide dans le domaine de la consommation unitaire des principaux services élémentaires. Les lampes d'éclairage, par exemple, appelées fluo compactes de rendement quatre fois supérieur aux lampes à incandescence classiques, les télévisions des années 90 absorbaient une puissance de 50 W de moyenne, il y a dix ans elles en consommaient 200 W, avec le développement technologique, on est arrivé aux télévisions à écrans plats à cristaux liquides ou électroluminescent qui consomment moins de 20 W.

• Pour les régions d'Afrique subsaharienne, dont plus de 90% des habitants ne sont pas reliés au réseau électrique et habitent des zones où l'ensoleillement annuel est important (entre 1600kWh/m² par an et 2200 kWh/m² par an), les besoins minimaux d'électricité, pour l'éclairage, l'audiovisuel, la ventilation et le froid domestique et les surfaces des capteurs photovoltaïques dépendent de la taille des familles. Pour une famille moyenne de 05 à 06 personnes on a envisagé les services suivants :

- 03 lumineux (lampes fluo compactes) 18 W. 4 h/j ... 80 kWh (consommation annuelle) ;
- 01 ventilateur 50 W. 6 h/j 110 kWh ;
- 01 téléviseur 50 W. 3 h/j 55 kWh ;
- 01 réfrigérateur (150 l) 220 kWh ;

Total : 465 kWh

Pour obtenir cette quantité d'énergie, il faut, tenu compte de l'ensoleillement moyen de la région, installer 3 m² de photopile (150 kWh par m²) par famille.

Conclusion

Alors que le captage solaire pour la thermique est de moindre importance sauf pour des applications et expérimentations de grandes envergures, et plus particulièrement dans les pays présentant un rayonnement solaire important tel que l'Algérie qui dispose de vaste étendues en zones arides et semi-arides, donc il suffit juste d'améliorer son isolation thermique pour minimiser les déperditions de son abri pour se chauffer durant les quelques mois (4 mois de froid en moyenne), et l'utilisation d'une minime quantité de gaz, disponible en Algérie, devrait suffire pour satisfaire son besoin.

Le développement du photovoltaïque est beaucoup plus poussé par les besoins des différentes applications surtout le besoin en énergie électrique pour procurer le froid durant les mois de chaud, les besoins en sites isolés, en les télécommunications, pour l'aide à la navigation (balises terrestres ou maritimes), la sécurité routière, pour lesquelles la fiabilité des technologies est primordiale, alors l'adoption des solutions photovoltaïques est imminente.

Les besoins sont immenses, puisque plus de 02 milliards d'habitants du tiers monde sont aujourd'hui, et pour longtemps privés d'électricité. Il suffirait que quelques pourcent des financements consacrés, actuellement, à l'électrification rurale traditionnelle soient affectés à l'électrification des sites ruraux isolés, pour espérer un éventuel renversement de situation.

Pour un meilleur rendement on doit répondre à quelques critères :

- Une orientation Sud, ou Sud-Sud-ouest est la plus recommandée ;
- Une inclinaison optimale est toujours égale à : Latitude du site qu'on ajoute 10°, mais dépend du besoin dans la saison ;
- La haute température provoque la surchauffe des panneaux photovoltaïques et ainsi son efficacité en production d'électricité.

Chapitre III : Modes d'intégration des capteurs solaires

III-Introduction

Pour lutter contre le changement climatique, divers pays commencent à mener des politiques en engageant des moyens financiers pour la recherche de l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables, et multiplient les actions pour encourager les particuliers et les collectivités à recourir aux énergies de demain, dont **l'énergie solaire** pour réduire la consommation d'énergie à base de ressources non renouvelables tel que le pétrole, le gaz naturel, et beaucoup plus le nucléaire qui prouve de jour en jour sa gravité sur l'environnement naturel voire sur les êtres humains vue sa fragilité et son exposition aux différentes catastrophes soit naturel comme les tremblement des terres, ou bien les accidents causés par l'homme lui-même.

C'est dans ce contexte, par le biais de ce chapitre III, qu'on a essayé de donner quelques modèles d'intégration des capteurs solaires voire leurs critères d'installation.

III.1-Intégration architecturale des capteurs solaires

En bâtiment, en Europe du nord, on a commencé, depuis le début des années 90, à développer de nouvelles idées pour intégrer des panneaux photovoltaïques comme éléments de construction des maisons ou des immeubles, on a eu un double avantage, les modules photovoltaïques ont un rôle supplémentaire (comme le rôle de la tuile pour la toiture ou de pare-soleil. En intégrant les modules dans le bâtiment, on répond aux interrogations des quelques uns sur leur occupation de la place, ainsi que leur influence sur le côté esthétique.

Le capteur solaire a une fonction précise, celle de transformer le rayonnement solaire en énergie :

- Sous forme de **chaleur** pour produire de l'eau chaude sanitaire ou chauffer des locaux.
- Sous forme de **d'électricité** pour l'autoconsommation ou la vente sur le réseau.

La présence d'un capteur solaire sur un bâtiment se justifie par une nécessité fonctionnelle, répondant à certaines contraintes techniques, et devra nécessairement faire l'objet d'un **traitement esthétique**, tout comme la fenêtre ou la porte du bâtiment, il doit être considéré comme un élément de composition architecturale.

Pour cela, l'architecte ou le concepteur doit l'intégrer dans l'ordonnancement d'une façade, d'une toiture ou d'un volume, tout en lui conservant ses spécificités formelles ou

fonctionnelles : éléments vitrés de couleur sombre, orienté vers le Sud dans une zone dégagée de toute ombre.

Mais la question se pose toujours sur l'intégration du capteur aux bâtiments, du point de vue esthétique et technique, de forte sensibilité patrimoniale ou dans les secteurs sauvegardés.

III.2-Bâtiment et énergie

Avant d'opter aux systèmes de production d'énergie d'origine renouvelable, il faut faire plus d'efforts pour réduire ses besoins énergétiques car l'énergie la moins chère est celle que l'on se consomme pas.

Des petits gestes citoyens apportent une économie certaine, et cumulés à l'échelle d'un pays représente un potentiel important de réduction des consommations d'énergie ;

- Privilégier une douche rapide à un bain
- Eteindre les lumières dans les pièces inoccupées

Pour le bâtiment, choisir avec soin les matériels, les procédés constructifs et les équipements les plus économes en énergie est imminent, Il devrait être compact, bien orienté et bien isolé, surtout en phase de conception qui est la plus importante vue son impact sur toute sa durée de vie. Il devrait répondre aux principes bioclimatiques de base afin d'optimiser le confort d'hiver et d'été, on opte pour les matériaux isolants denses retardant la pénétration de chaleur (augmenter le déphasage thermique), des vitrages à isolation renforcée pour limiter les déperditions, prendre plus de soin à la mise en œuvre pour les ponts thermiques (fuites de chaleur aux points singuliers) et parfaire l'étanchéité à l'air.

Pour l'équipement, on devrait choisir les performants, permettant de gérer au mieux les flux d'énergie à la faveur des occupants pour plus de confort, un chauffage bien réglé et programmé, pose d'économiseurs d'eau (réduction de pression et douchette économique) pour réduire les dépenses en eau sanitaire, chaude et froide.

Pour l'électricité choisir les appareils électroménagers plus performants, pour l'éclairage utiliser les lampes à basse consommation vue leur efficacité évaluée à quatre fois plus que celles à incandescence.

Si on arrive à réaliser en amont toutes ces démarches de sobriété et d'efficacité énergétique, le recours aux énergies renouvelable et particulièrement **le solaire** prend tout son sens.

III-2-1-Besoins en capteurs

Pour le solaire thermique :

- Pour l'eau chaude sanitaire on aura besoin de 2 à 8 m² par habitation, lui assurant entre 60 à 80 % de ses besoins.
- Pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage, 10 à 20 m² de capteurs peuvent couvrir 25 à 50 % des besoins domestiques de chauffage, en utilisant un plancher chauffant ou des radiateurs à basse température. Ce sont les systèmes solaires combinés (SSC).
- Pour le solaire photovoltaïque :
- Si on est raccordé au réseau : on injecte sur le réseau de distribution via un onduleur, la totalité ou le surplus de la production photovoltaïque. Une surface de capteurs comprise entre 25 et 30 m² fournit jusqu'à 3000 WC.
- En site isolé : pour les bâtiments non raccordés au réseau, la production d'électricité est stockée dans des batteries garantissant localement les besoins de l'occupant.
- Donc de 8 à 10 m² de capteurs en conditions optimales d'orientation et inclinaison, fournit jusqu'à 1200 kWh/an. Une famille de quatre personnes consomme entre 2000 et 3000 kWh d'électricité spécifique (hors chauffage et eau chaude sanitaire), donc cette surface pourra leur couvrir entre 40 à 60% de leur consommation.

III-2-2-Orientation et inclinaison

Les capteurs doivent impérativement avoir le compromis entre l'inclinaison et l'orientation.

- Pour juste le besoin en eau chaude sanitaire (CESI), l'inclinaison optimale étant de 45° (quelques chercheurs conseillent la valeur de la latitude de la région qu'on ajoute 10°), par exemple si on est dans une région de 35°, l'inclinaison optimale du capteur sera proche de 45°, il est possible d'orienter entre 17° et 90°. L'orientation optimale étant en plein Sud, comme il est possible d'orienter vers l'Est ou l'Ouest.
- Pour le système solaire combiné (eau chaude sanitaire et chauffage), l'inclinaison optimale est de 60°, puisqu'il est essentiel de favoriser l'ensoleillement d'hiver, bas dans le ciel, les capteurs doivent impérativement être fortement inclinés, comme il est possible de les orienter entre 45° et 90°. L'orientation optimale est au plein Sud, avec possibilité au Sud $\pm 30^\circ$.
- Pour le photovoltaïque, une inclinaison optimale de 30°, avec possibilité d'aller entre 0° et 60°, c'est l'ensoleillement d'été qui sera prioritaire (saison de haute consommation de

l'énergie électrique) pour maximiser la production surtout dans le cas où notre installation est raccordée au réseau. Une orientation optimale est toujours vers le Sud, et possible d'aller en Est et en Ouest.

III-2-3-Masques

Avant une éventuelle installation des capteurs, on devrait prendre en compte les ombres portées présentes, et même à venir.

Ces ombres peuvent être produites par des arbres, d'autres bâtiments mitoyens ou proches, un relief environnant, etc.

Au moindre doute, l'installateur devra avoir recours à une étude de masques.



Fig. (I-III-1)- installation du capteur PV dans un endroit masqué.

III-3-Comment intégrer les capteurs ?

Pour intégrer des capteurs solaires, il existe des approches différentes dans la construction neuve et dans l'existant.

- Pour la construction neuve :

Elle offre la possibilité très étendues, la forme et les contraintes techniques des capteurs peuvent être mariées au bâtiment pour créer des volumes architecturaux originaux homogènes et innovants d'une part, d'autre part permet de limiter le cout de réalisation par un concepteur en amont de l'installation.

- La rénovation d'un bâtiment existant :

L'intégration dans ce cas est plus limitée, cette possibilité est parfois plus couteuse (perçement, fixation sur le bâti, etc.), mais ces contraintes peuvent être atténuées et on peut utiliser le capteur pour l'amélioration ou la réhabilitation du bâti existant (auvent, vérandas, réfection de toiture, etc.).

III.3.1-Démarche d'intégration

a- La réussite d'une intégration solaire dépend de la conjugaison optimale des critères suivants qu'on considère primordiaux :

- Minimiser l'impact visuel des capteurs dans leur environnement proche et lointain, on doit apprendre à regarder le bâtiment dans son intégralité, et depuis plusieurs points de vue, de près ou de loin, nous permettant d'envisager les différents positionnements possibles pour le capteur et arrêter enfin notre choix.
- Adapter la forme, proportion et position du champ de capteur à la physionomie générale du bâtiment ;

Veiller à respecter une certaine symétrie dans l'implantation des capteurs en alignant ce champ sur les différentes composantes du bâtiment (arches, ouvertures, etc.). Une autre alternative est envisageable, c'est de couvrir l'intégralité d'un pan de toiture.

- Privilégier le capteur double fonction :

La meilleure possibilité d'intégration est celle où le capteur devient un composant du bâti et non un simple élément technique rapporté. On distingue de nombreuses possibilités : fonction couverture, brise soleil, allège, garde-corps, fenêtre, verrière, bardage, mur-rideau, etc.

- Marier performance et intégration :

Une bonne intégration architecturale ne nuit pas aux performances globales du système, donc il faut veiller à bien optimiser l'inclinaison, l'orientation, éviter les ombres portées, etc. Pour maximiser la production d'électricité d'un générateur photovoltaïque, le capteur doit avoir une pente faible pour recevoir le rayonnement solaire plus important en été, bien au contraire pour le chauffage solaire les capteurs devront avoir une pente plus importante, donc une éventuelle installation des 2 types, seul un compromis permet une intégration esthétique et rendement.

- Choisir le matériel adapté :

Le marché du solaire s'est développé ces dernières années notamment en Europe, après la standardisation du matériel, on commence à proposer des types et accessoires facilitant l'intégration du solaire dans le bâtiment, et offrant ainsi de diverses solutions pour l'usage recherché.

- Intégration visuelle optimale :

Les capteurs plans sont disponibles avec des coffres plus ou moins compatibles avec celle de la toiture. Une vitre antireflet minimise l'impact visuel lointain. L'utilisation de raccords isolés colorés permet de passer les tubes plus discrètement.

- Intégration physique dans la toiture :

Certains capteurs sont dotés d'un double avis technique pour la fonction solaire et étanchéité, ils prennent leur rôle pour remplacer la couverture et se fondent dans la pente du toit, ils devraient être compatibles avec la pente de la toiture envisagée.

- Intégration architecturale jugée réussie :

Si la forme du champ de capteur et sa position dans la toiture ou la façade s'harmonise avec les proportions du bâtiment. Des capteurs verticaux ou horizontaux de formats variables permettent de trouver le meilleur compromis esthétique.

Actuellement des capteurs spécifiques innovants permettent d'ajouter au solaire une autre fonction dans le bâtiment, dont :

Pour la production d'électricité, capteurs à membranes souples, semi transparentes pour vérandas ou fenêtres, avec du silicium coloré.

Des systèmes de fenêtres de toit couplés à un capteur thermique, des capteurs mixtes thermiques/photovoltaïques.

III.4-Intégration des panneaux solaires par typologie de toiture

III.4.1-Les capteurs en toiture inclinée

Capteur suivant la pente de la toiture :

- Pente faible favorise les gains entre Mars et Octobre. Solution idéale pour le photovoltaïque.

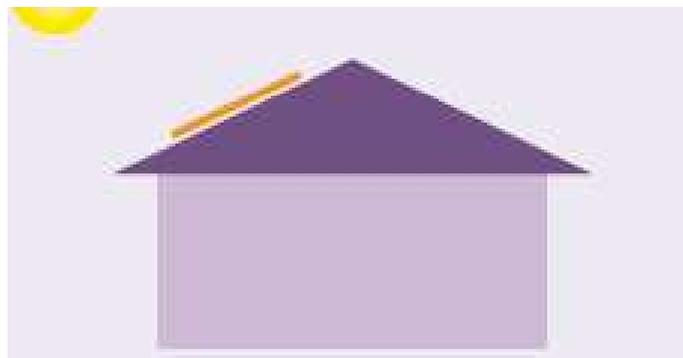


Fig. (I-III-2)- installation du capteur sur une toiture de faible inclinaison.

- Pente forte, optimise les gains énergétiques durant toute l'année. Solution idéale pour le chauffage.

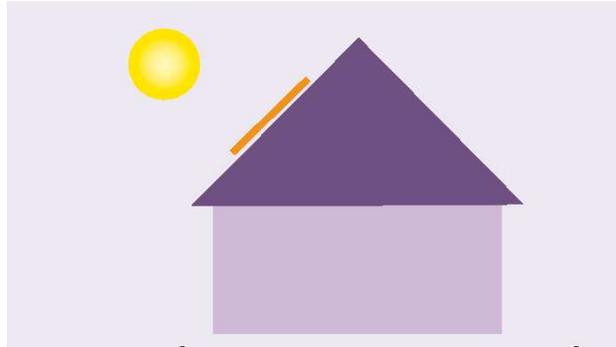


Fig. (I-III-3)- installation du capteur sur une toiture à forte inclinaison.

- Capteurs en couverture de porche ou véranda. Une intégration naturelle dans le volume d'un élément architectural.

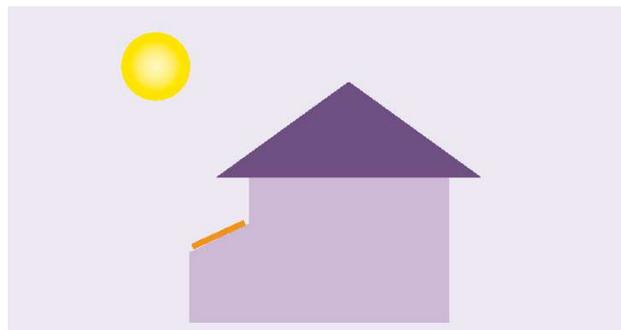


Fig. (I-III-4)- installation du capteur sur un volume du bâtiment.

Afin de réussir une intégration, on veille à respecter quelques bases :

- Aligner le champ de capteurs avec les éléments constitutifs du bâtiment (baies vitrées, arches, etc.).



Fig. (I-III-5)- installation du capteur sur une toiture inclinée respectant l'axe de la fenêtre.



Fig. (I-III-6)- intégration du capteur sur une toiture inclinée respectant l'axe de l'ouverture.



Fig. (I-III-7)- intégration du capteur sur une toiture en pente d'un volume du bâtiment.

- Privilégier une incorporation des capteurs dans la toiture.



Fig. (I-III-8)- intégration du capteur sur une partie de la toiture en pente d'un bâtiment.



Fig. (I-III-9)- intégration du capteur sur une partie de la toiture en pente du bâtiment.



Fig. (I-III-10)- intégration du capteur sur une toiture en pente d'un volume du bâtiment.

- Intégrer soigneusement les passages des câbles ou tuyauteries.



Fig. (I-III-11)- intégration des systèmes et accessoires du capteur sur une toiture en pente.

Pour une construction neuve, si on a besoin de grandes surfaces de capteurs pour chauffage, eau chaude collective ou photovoltaïque, il est possible d'adapter le plus possible la taille du champ de capteurs pour couvrir l'intégralité d'un pan de toiture. Si la surface de la toiture dépasse celle des capteurs, on pourrait compléter la différence restante par l'ajout d'un bac acier, d'un complexe d'étanchéité, d'un vitrage sans absorbeur, dans l'objectif d'éviter un contraste trop marqué entre une grande surface vitrée foncée et une petite surface de tuiles.



Fig. (I-III-12)- modes d'intégration du capteur sur une partie d'une toiture en pente.

Pour une construction existante, on suggère de ne pas surélever le capteur par rapport à la pente de la toiture, ou sur la terrasse, mais essayer de trouver une alternative (intégration en façade, au sol, etc.) sur le corps du bâtiment où l'impact visuel sera moindre.



Fig. (I-III-12)- exploitation de la totalité de la toiture en pente pour des capteurs solaires.

III.4.2-Les capteurs dans les façades

- En gardes corps

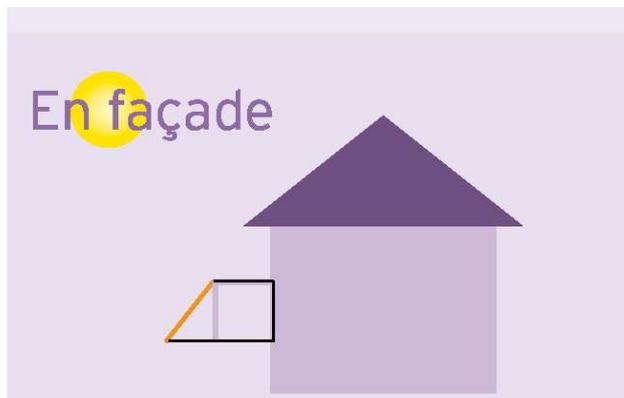


Fig. (I-III-13)- intégration des capteurs solaires sur les gardes corps.

- En allège

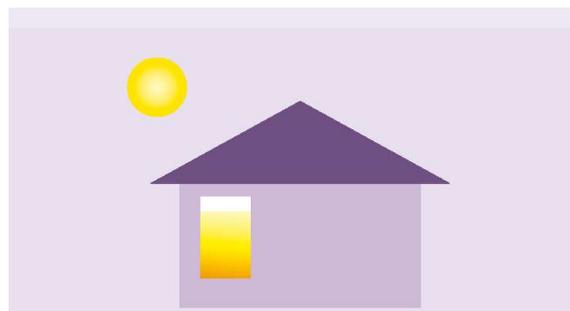


Fig. (I-III-14)- intégration des capteurs solaires sur les allèges.



Fig. (I-III-15)- intégration des capteurs solaires sur les allèges.

- En auvent ou brise soleil

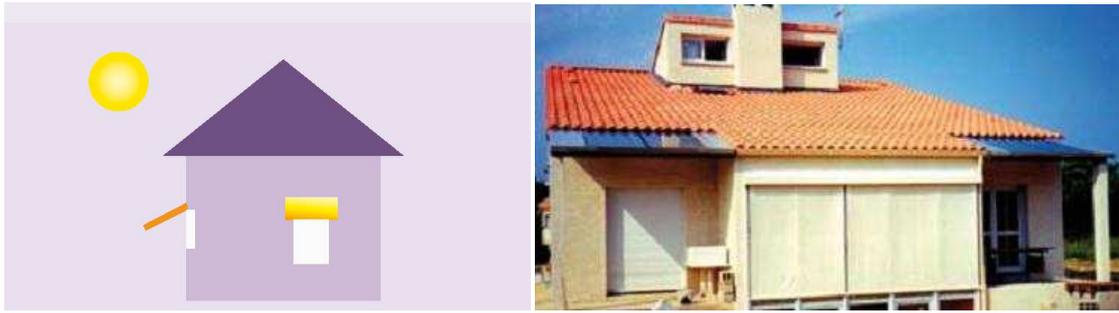


Fig. (I-III-16)- intégration des capteurs solaires en auvent et brise soleil sur les ouvertures.

- Capteurs comme éléments de la paroi verticale, structurant l'organisation architecturale de la façade.

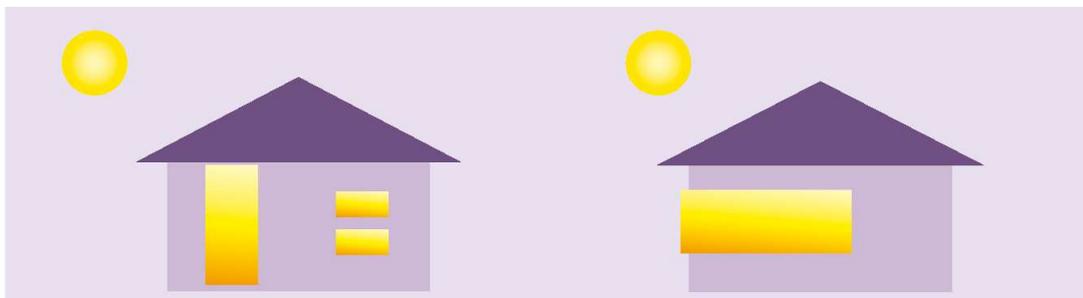


Fig. (I-III-17)- intégration des capteurs solaires sur la façade en homogénéité avec les ouvertures.

- Constituant un auvent sur la façade, comme en couverture d'une porche ou véranda

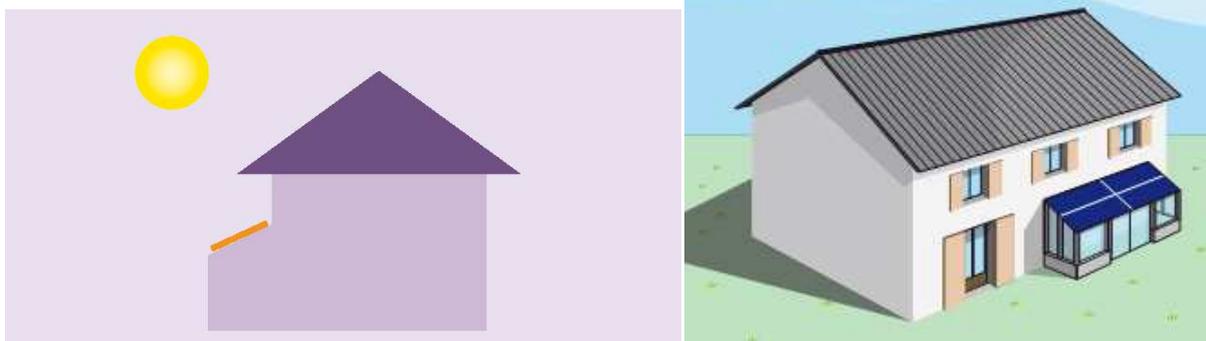


Fig. (I-III-18)- intégration des capteurs solaires la toiture d'une véranda ou de la serre.

En façade, on profite des décrochements pour que les capteurs prennent place naturellement, les allèges, gardes corps et vérandas, nous offrant ainsi plus d'alternatives d'intégration. Le capteur impose sa présence comme élément structurant de la façade et devient une partie de l'architecture.

III.4.3-Les capteurs en toiture terrasse

Généralement on utilise cette solution dans le collectif, mais peu de réussite en intégration. Les capteurs sont disposés sur un châssis dont l'orientation et l'inclinaison auront été optimisées en fonction de l'usage :

- A reculer suffisamment les capteurs de l'acrotère afin de limiter l'impact visuel pour les passants.
- Si on n'a pas d'acrotère, on doit les implanter de telle façon à respecter la symétrie avec les composantes du bâtiment.
- L'accrochage doit être conforme avec les directives techniques, pour résister aux intempéries (neige et vent), et préserver l'étanchéité.
- Prévoir un habillage latéral pour masquer la structure métallique.



Fig. (I-III-18)- installation des capteurs solaires sur une toiture terrasse.



Fig. (I-III-19)- exemple d'installation des capteurs solaires sur une toiture terrasse.

III-4-4-Les capteurs sur paroi verticale

Il est possible d'intégrer des capteurs en façades (à 90°) pour nos besoins en eau chaude, le chauffage, et la production d'électricité, avec une orientation en plein sud, si on s'éloigne la perte de rendement devient importante.



Fig. (I-III-20)- exemple d'installation des capteurs solaires sur la façade comme composant architectural.

Cette solution est préconisée dans le cas d'une toiture orientée Est-Ouest, et comme il est peu esthétique, il est préférable que les capteurs aient une double fonction.

a- Capteurs en allèges, auvent, garde corps, brise soleil

En allège, on peut intégrer le capteur sous une fenêtre, en auvent pour protéger le porche de la maison, ou en garde-corps pour un balcon, comme il peut avoir le rôle de brise soleil pour améliorer le confort d'été.



Fig. (I-III-21)- exemple d'installation des capteurs solaires en auvent d'une entrée ou brise soleil.

b- Capteurs en couverture de décrochements de façades ou vérandas

Une intégration recommandée est celle de la couverture d'un décrochement de façade. L'inclinaison est préservée, l'orientation bien choisie permet un ensoleillement maximum, donc il est naturellement intégré dans le volume architectural.



Fig. (I-III-22)- exemple d'installation des capteurs solaires sur un volume du bâtiment.

III.4.6-Les capteurs hors bâtiments

a- Capteurs au sol

Les capteurs peuvent être implantés sur talus, il est nécessaire de les protéger des salissures pouvant diminuer leur rendement. C'est une pose très simple permettant d'obtenir l'angle d'inclinaison optimal du capteur, qui peut aussi prendre place sur terrasse au pied du bâtiment. Le paysage environnant peut influencer sur le rendement des capteurs après d'éventuelles poussées de la végétation lui causant des masques.

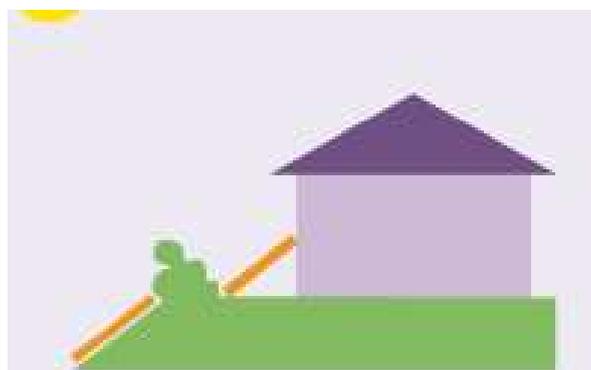


Fig. (I-III-23)- installation des capteurs solaires sur le sol.



Fig. (I-III-24)- exemple d'installation des capteurs solaires sur le sol.



Fig. (I-III-25)- installation des capteurs solaires sur le sol.

b- Capteurs sur une dépendance

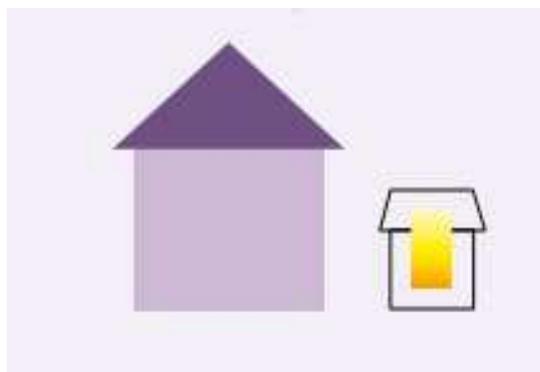


Fig. (I-III-26)- installation des capteurs solaires sur une dépendance.

Les capteurs solaires peuvent trouver leur place naturellement comme éléments de composition des annexes de l'habitation, et qui devront être proches du bâtiment principal (serres, garages, abris, etc.).



Fig. (I-III-27)- exemple d'installation des capteurs solaires sur une dépendance.



Fig. (I-III-28)- exemple d'installation des capteurs solaires sur une dépendance.

Conclusion

Tout bâtiment est apte pour recevoir des capteurs solaires qui ont plus un rôle fonctionnel, soit pour le bâtiment existant ou bien nouveau en phase de conception, les solutions sont favorables pour une liberté d'intégration mais néant moins on doit :

- Dépasser les contraintes techniques pour qu'ils aient un traitement esthétique soigné ;
- Tout comme autre composant d'architecture passive, ils doivent être considéré comme un élément de composition architectural ;
- Le concepteur, architecte, doit les intégrer dans le bâtiment tout en conservant ses spécificité formelles ou fonctionnelles ;
- L'orientation la plus optimale et recommandée par les chercheurs est celle du plein Sud, même au Sud-est et Sud-ouest sont favorables et peuvent donner des résultats satisfaisants ;
- Les inclinaisons dépendent de l'utilisation et le besoin saisonnier, une inclinaison à angle réduit est recommandée pendant l'été pour produire l'électricité par le photovoltaïque, c'est la période où le soleil atteint son hauteur maximal avec un angle de 70° ;

Donc quelle que soit la position envisagée des capteurs sur le bâtiment, un temps de réflexion en coordination avec l'installateur est nécessaire pour une intégration optimale.

Deuxième partie: Partie pratique (Application)

Chapitre I : Définition du cas d'étude

I-Introduction

L'application consciente du soleil dans l'architecture ajoute une nouvelle dimension, celle du « temps ».

Elle a toujours été définie par des caractéristiques telles que matériaux, forme, espace, et avec des dimensions telle que hauteur, longueur, largeur, etc. Avec le temps comme nouvel élément, elle n'est plus une création statique mais devient vivante.

La conception des bâtiments destinés à capter l'énergie solaire doivent être dessinés de telle façon qu'ils puissent s'adapter aux changements journaliers, saisonniers, de leur environnement, et que chaque bâtiment se trouve dans des conditions climatiques différentes d'une région à une autre. Dès la conception du bâtiment solaire, le concepteur doit apprendre à travailler avec le temps dans la définition des matériaux, des formes, et de l'espace, les notions d'appréciation climatiques doivent être prises en considération.

Dans cette optique que cette 2^{ème} partie devra être élaborée, où des séries de simulations numériques seront faites sur un type de bâtiment qui sera défini prochainement, en utilisant un logiciel informatique.

I-1- Critères du choix du cas d'étude

L'homme adopte un grand nombre de bâtiments à son profit, il les conçoit selon ses objectifs d'utilisation, habiter, travailler, et se distraire. Les matériaux sont utilisés pour répondre à certains nombres de critères et conditions techniques afin de faire face à l'utilisation de l'énergie au moment où il fallait pas, comme par exemple l'éclairage artificiel pendant le jour, se chauffer ou se rafraichir au moment où la température du local est ambiante, la forme des espaces et leurs dimensions sont définis judicieusement et d'une façon rationnelle pour éviter l'utilisation excessive de l'énergie pour les rendre confortable.

Et parmi ces bâtiments où l'homme passe tout son temps, c'est le bâtiment où habiter qu'est le plus souvent mis à l'usage durant les 24 heures de jour comme de nuit, donc l'énergie est indispensable pour les différentes activités qui se déroulent, et qu'on aura besoin pour rendre l'espace plus au confort.

Durant toutes ces dernières années, et suite au développement démographique, une demande flagrante en logement est apparue, ce qui laisse penser à trouver des solutions urgentes par l'ensemble des décideurs.

Compte tenue cette situation dramatique, la réalisation de logements quantité s'accélère, et des quartiers commencent à pousser comme des champignons soit en habitat collectif ou bien individuel, mais la qualité est loin d'être respectée ou bien adoptée. Tous ces modèles sont réalisés sans prendre en considération l'endroit où on devrait les implanter, ses données climatiques, et même les normes techniques de réalisation (isolation, orientations, ouvertures, etc.) afin d'avoir à un modèle répondant aux exigences d'un habitat passif, donc l'appel à l'énergie disponible, issue des sources fossiles s'avère imminent pour garantir un niveau avancé de confort (se chauffer, se refroidir, s'éclairer, etc.), toutes ces anomalies nous ont amené à un habitat dit « énergivore ».

De ce fait un ensemble de chercheurs algériens en collaboration avec d'autres étrangers, au niveau du centre de recherche en architecture et urbanisme d'El-Harrach, se sont mis en équipe composée d'architectes et thermiciens et commencent à réfléchir tout en remettant en question le problème de la surconsommation en énergie des modèles d'habitat existant, et essayer ainsi de trouver des alternatives pour proposer des types d'habitat dits « solaire »,

d'où 3 prototypes d'habitation sont conçus dans le but de créer des « villages solaires intégrés ».

I-2- Situation des prototypes d'étude du village solaire intégré

Le village solaire est situé à Ain haneche dans la région de Boussaâda à la wilaya de M'sila (voir fig. (II-I-1 et 2)), où l'étude thermique élaborée par l'équipe du centre de recherche sur 3 prototypes avec des données climatiques de la zone semi aride. Pour notre application on va opter des simulations sur le prototype 1 et 3, et dans des différentes contraintes climatiques, un site à données similaires à celui choisi par les chercheurs soit Biskra (semi-aride), un 2^{ème} à climat tempéré avec 2 choix possibles entre Batna et Sétif, et le 3^{ème} site est méditerranéen à Annaba. On a obtenu des résultats sur l'apport en chaleur de ces 3 prototype, particulièrement en saison de surchauffe en été.

I-3- Description des prototypes d'étude

(Source en résumé : étude thermique des trois prototypes du village solaire intégré, Mostefa BOUDIAF, Michel CAPDEROU, Maciej JANOWSKI – CRAU - Mars 1983)

La conception des trois prototypes est élaborée différemment :

- 2 prototypes (N°1, et N°3) à un seul niveau, l'un de 3 pièces cuisine, l'autre de 4 pièces cuisine.
- 1 prototype (N°2) à 2 niveaux (RDC+1) ;

Leur favorisant une architecture passive.

I-3-1- Données climatiques proposées et orientation

La situation du village est choisie dans une zone semi-aride, avec un climat intermédiaire entre celui des hauts plateaux et celui du Sahara, très contrasté.

La période du chauffage s'étale de novembre à avril, de mai à octobre des surchauffes à craindre. Donc les 2 grandeurs climatiques les plus importants à savoir la Température et l'ensoleillement.

La région subi un ensoleillement intense, même en hiver.

La région est située sur la latitude 35,4° N, le soleil est très haut en été, son angle dépasse 70°, du début d'avril à mi-septembre, en exposant la maison en plein sud, la protection de la façade en été est aisée avec une courte avancée ou brise soleil, et n'apporte pas d'ombre en hiver.



Fig. (II-I-1)- situation du village solaire (source. Google earth, 2012)

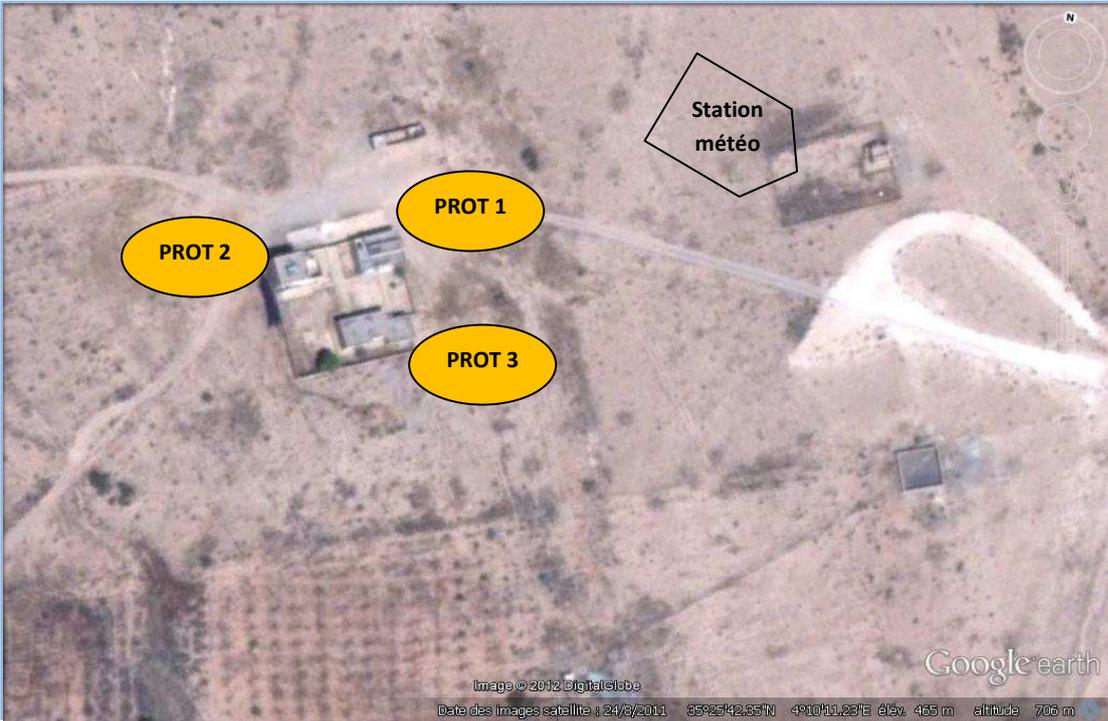


Fig. (II-I-2)- situation des prototypes du village solaire (source. Google earth, 2012)

En mi-saison on opte pour une protection avec des arbres à feuilles caducs ou bien des protections mobiles.

I-3-2-Principe de conception

Une conception à plan compact, faible surface d'enveloppe, surtout celle exposée au soleil d'été, et celles sujettes aux déperditions en hiver.



Photo (II-I-1)- forme très simple, compacte.

En hiver des surfaces captatrices supplémentaires sont à conseiller : serres amovibles, intégrées à l'habitat, offrant une solution élégante.

Les espaces tampons augmentent l'isolation et réduisent les espaces à chauffer en hiver ou à rafraichir en été.

Les parois intérieures doivent présenter une grande inertie, pour l'hiver doivent restituer pendant la nuit la chaleur du jour et l'été, garder pendant le jour la fraîcheur de la nuit.

Les murs extérieurs dépendent de leur orientation.

Les murs en façade Sud sont construits de manière à procurer un déphasage adéquat.

L'isolation est obligatoire pour les murs Nord, et pas pour ceux exposés à l'Est et à l'Ouest.

La ventilation : grâce à des ouvertures appropriées, les phénomènes convectifs naturels sont utilisés pour diffuser la chaleur de la journée durant l'hiver, la fraîcheur de la nuit durant l'été.

a- Prototype N°1 :

• Description conceptuelle :

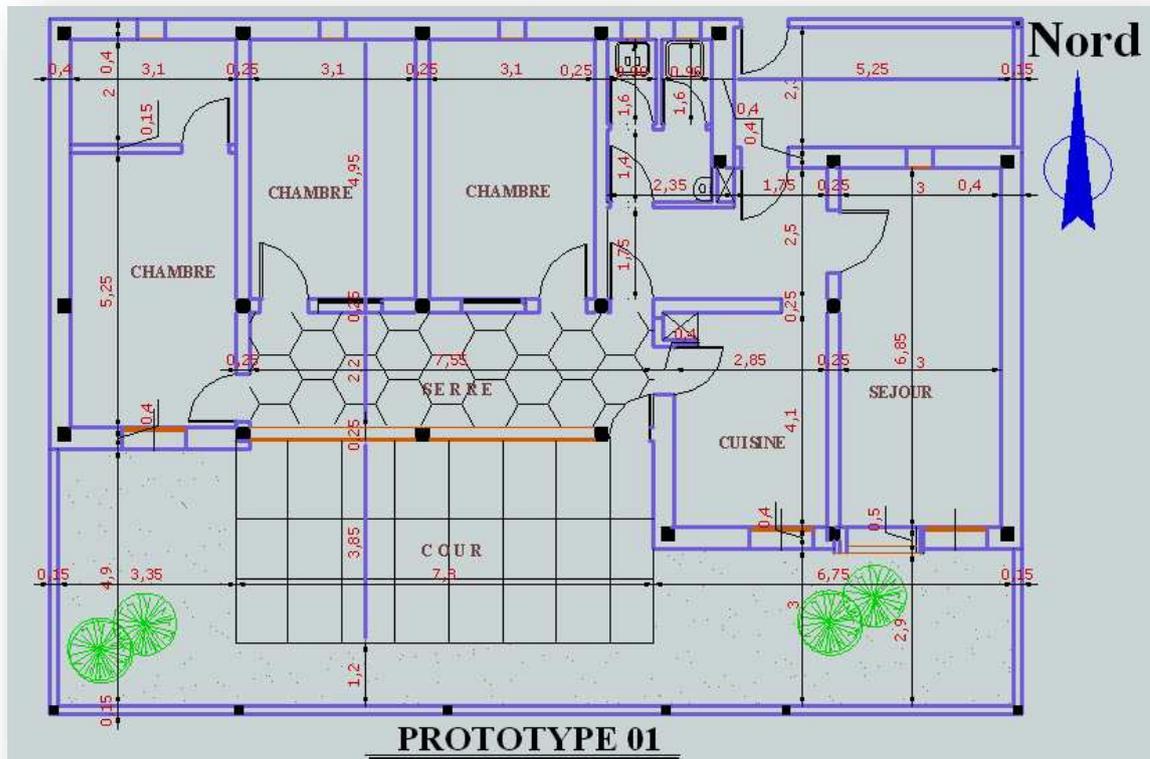


Fig. (II-I-3)- vue en plan du prototype 1.

- Conçu à R+0 ;
- Composé de 4 pièces + cuisine + bloc sanitaire ;

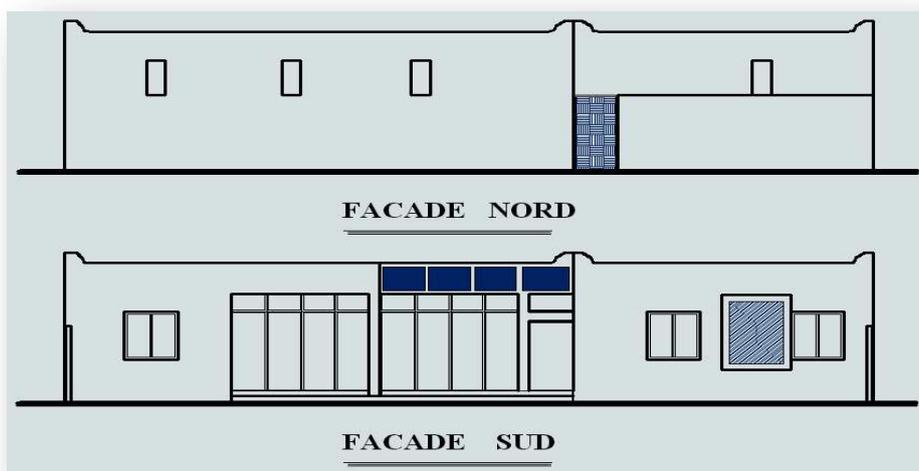


Fig. (II-I-4)- Façades Nord et Sud du prototype 1.

- Les 2 façades principales sont orientées au sud et au Nord, celle de l'Est et l'Ouest sont complètement aveugles, aucune ouverture ;



Photo (II-I-2)- façade Sud, ouvertures de dimensions importantes.



Photo (II-I-3)- façade Nord, ouvertures très réduites assurant juste la ventilation.

- Toutes les pièces donnent vers la cour ;
- Le système solaire adopté est passif, l'agencement des pièces, leur orientation, et l'utilisation des matériaux locaux permettent d'assurer un confort thermique appréciable ;

- On 2 type de fonctionnement :
- La partie habitée par la famille est du type, soleil-espace-masse- espace, où la chaleur est captée et emprisonnée dans un espace dit « serre », puis emmagasinée dans les murs porteurs en pierre ainsi que dans les planchers.



Photo (II-I-4)- serre avec mur intérieur en pierre pour stocker la chaleur.

- La chaleur sera transmise avec un déphasage horaire vers les chambres coïncidant avec la tombée de la nuit.



Photo (II-I-5)- la serre avec les orifices de ventilation pour les chambres.

- La partie réservée aux invités est du type soleil-masse-espace, la chaleur est directement emmagasinée dans un mur porteur en pierre, peint en noir sur lequel est appliquée une vitre qui permettra de piéger la chaleur. Des fentes basses et hautes assurent une ventilation et un échauffement de l'air de la pièce, ce mur dit « trombe » emmagasine la chaleur le jour pour la diffuser, avec un décalage horaire, la nuit.

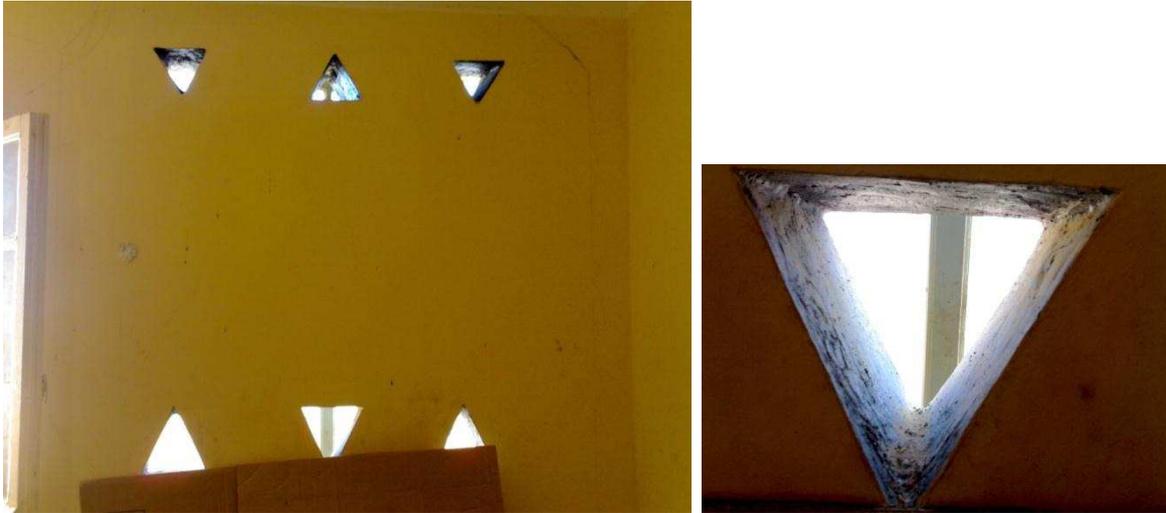


Photo (II-I-6)- fentes du mur Trombe permettant la circulation de l'air chaud en hiver.



Photo (II-I-7)- vue d'extérieur du mur trombe

- Les ouvertures larges s'ouvrent vers le sud, contrairement à celles du Nord qui assurent juste la ventilation.



Photo (II-I-8)- système ventilation naturelle des espaces.

- **Description technique**

- Façade Sud :**

- Murs extérieurs - 40 cm - en pierre – $S= 20,15 \text{ m}^2$;
 - Murs extérieurs – 40 cm – en pierre – $S= 11,60 \text{ m}^2$;
 - Fenêtres - vitrage simple – $S= 3,6 \text{ m}^2$;
 - Fenêtres non ensoleillées – vitrage simple – $S= 4,2 \text{ m}^2$;
 - Portes extérieures – $S= 11,0$

- Façade Est :**

- Murs extérieur – 40 cm – en parpaing- $S= 14,70 \text{ m}^2$;
 - Murs extérieur – 40 cm – en parpaing avec isolation 5cm en liège- $S= 4,75 \text{ m}^2$;

- Façade ouest :**

- Murs extérieur – 40 cm – en parpaing- $S= 21,30 \text{ m}^2$;

- Façade Nord**

- Murs extérieur – 40 cm – en parpaing avec isolation 5cm en liège- $S= 28,20 \text{ m}^2$;
 - Fenêtres non ensoleillées – vitrage simple – $S= 4,2 \text{ m}^2$;
 - Porte extérieure – $S= 2,25 \text{ m}^2$

- Terrasse ensoleillée**

- $S= 112,2 \text{ m}^2$;

b- Prototype N°2

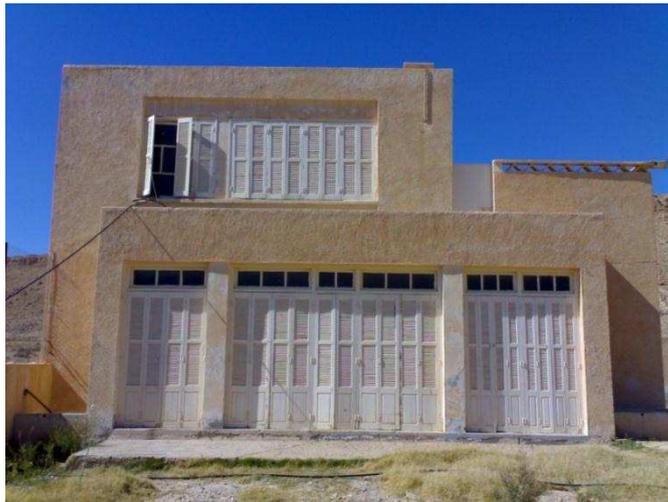


Photo (II-I-9)- façade Sud avec des grandes ouvertures pour la serre.

• Description conceptuelle :

La conception de ce prototype est basée sur le mode d'utilisation du logement familial, la cuisine étant l'espace le plus fréquenté chez les familles rurales, c'est un lieu de cuisson, de travail, de manger et même un séjour familial. Ce rôle polyvalent la désigne comme noyau central du logement. Le séjour se trouve juste à l'entrée qu'on lui accède d'une skiffa, qui chemine vers les autres espaces habitables, soit les salles d'eau, la cuisine et une chambre. Les chambres à coucher sont situées à l'étage, avec une réduction de l'espace de circulation et même pour l'espace des salles d'eau (WC, douche) qui sont loges sous les escaliers. Une terrasse accessible est prévue à l'étage, favorisant l'utilisation polyvalente saisonnière.

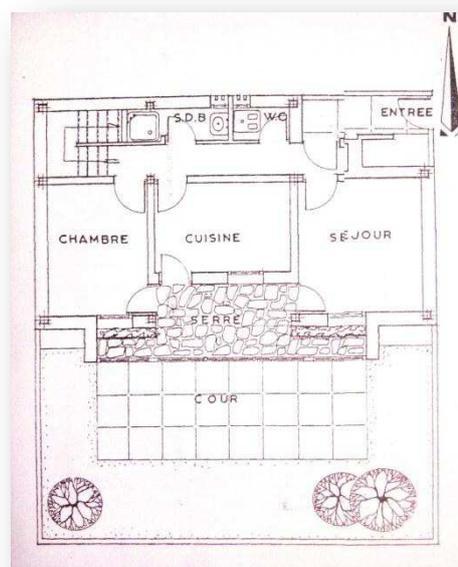


Fig. (II-I-5)- Plan du rez de chaussé du prototype 2.

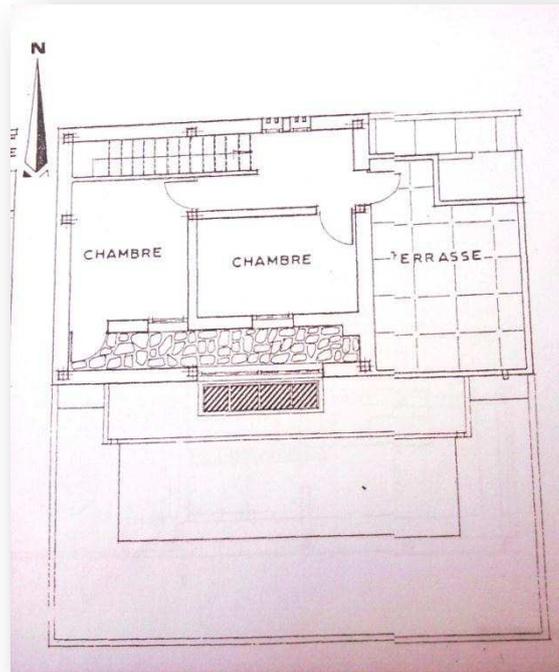


Fig. (II-I-6)- Plan 1^{er} étage du prototype 2.

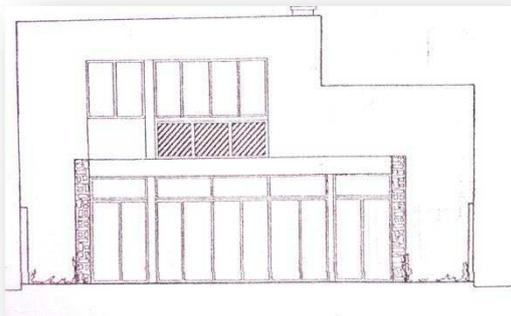


Fig. (II-I-7)- Façade Sud du prototype 2.

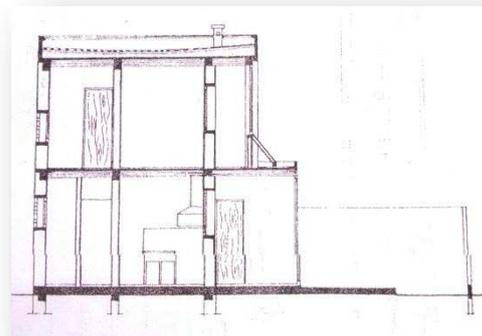


Fig. (II-I-8)- Coupe du prototype 2.

• **Aspect bioclimatique et technique :**

Des éléments constructifs assurent l'aspect bioclimatique :

- Espaces tampons : deux espaces tampons encastrent l'espace habitable, l'un est froid du côté nord, et l'autre chaud du côté Sud, donc des conditions agréables sont garanties dans l'espace habitable quelque soit les saisons.
- Les serres : ont pour objectif de capter et piéger l'énergie solaire puis la transmettre et la stocker dans les parois, puis la diffuser dans l'espace habitable avec un certain

déphasage, la serre est l'espace le plus chaud en hiver, en été elle est entièrement ouverte vers la cour.

- Des petites ouvertures prévues du côté nord permettant la ventilation des espaces habitables et les rafraichir.
- Les matériaux de construction sont de bonne qualité thermique, notamment la pierre et le béton de terre stabilisée qui ont une bonne inertie thermique.
- Les parois exposées aux grosses pertes d'énergies ont été isolées avec des plaques de liège, surtout celle du nord, ainsi que la terrasse qui est couverte d'une couche de terre et dotée d'une plaque de liège pour atténuer les variations de température.
- Des capteurs plans pour produire l'eau chaude sanitaire sont prévus, ils sont situés sur l'allège de la baie vitrée de la serre à l'étage, et inclinés de 45°.

c- Prototype N°3 :

- **Description conceptuelle :**

Cette maison est conçue avec une compacité, articulée sur un espace central orienté vers le Sud avec une grande baie vitrée, il constitue le foyer de la vie familiale, son vitrage est amovible, considéré comme une serre chauffant une grande partie de l'habitation, assurant une continuité visuelle avec le jardin.



Photo (II-I-10)- vue du côté Sud, définition de 3 espaces : le séjour familial avec la serre au centre et les chambres de part et d'autre avec leurs ouvertures et mur trombe.

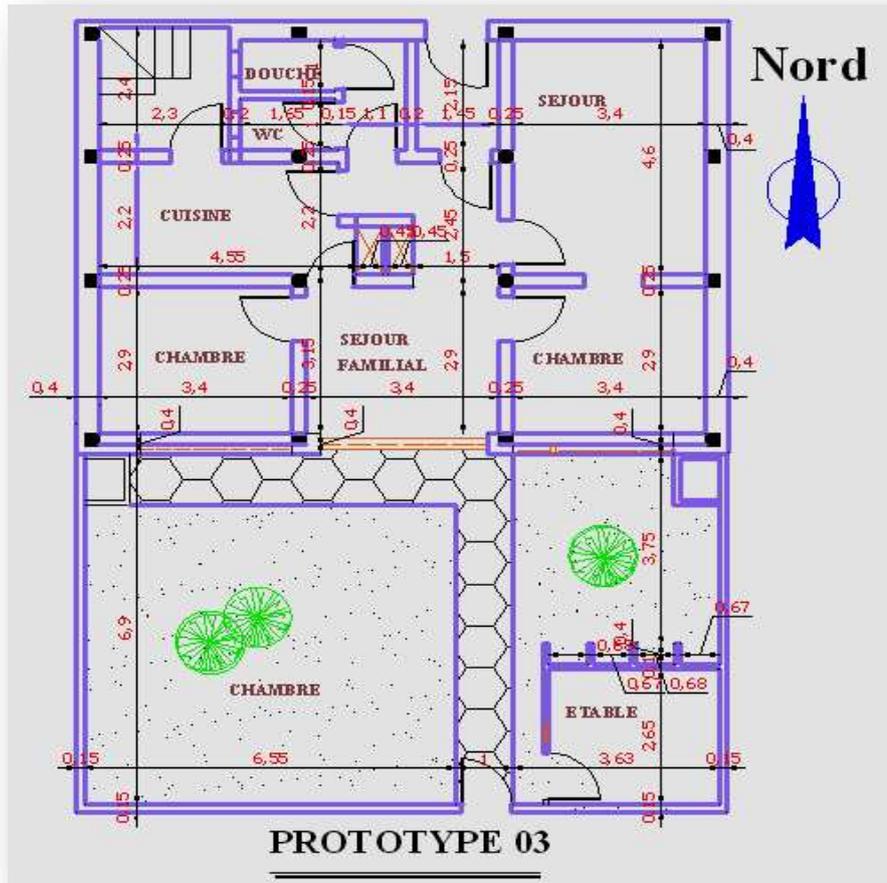


Fig. (II-I-9)- vue en plan du prototype 3.

Au côté Nord on y trouve la chambre des hôtes (séjour) considéré comme la partie la plus fraîche de l'habitation en été, ses ouvertures sont situées en hauteur en surélévation de la paroi Sud, optant cette orientation, elle permet une meilleur captation du soleil d'hiver, tandis qu'en été, elle permet une plus grande ventilation.



Fig. (II-I-10)- façade Sud du prototype 3.



Photo (II-I-11)- ouvertures en hauteur, pour captage solaire au séjour.

L'espace central est muni d'une cheminée d'aération, fonctionnant lorsque le vitrage est fermé lors des vents de sable.

Du séjour familial on accède aux chambres, l'une à l'Est et l'autre à l'Ouest, orientées vers le Sud avec des fenêtres d'éclairément et d'un mur Trombe pour optimiser leurs apports calorifiques. Ainsi chaque espace assure sa propre source de chaleur et sa propre ventilation. Un jardin est proposé au Sud pour obtenir assez de recul par rapport aux autres habitations, assurant un ensoleillement permanent de cette façade, pouvant accueillir une aire de travail extérieure ou bien des végétations, ou encore des activités d'élevage.



Photo (II-I-12)- vue du mur d'Ouest totalement aveugle.

La toiture terrasse est accessible à partir du séchoir, reste non praticable, pour permettre l'entretien du capteur solaire, le réservoir d'eau chaude, et la lucarne du séjour Nord. Les façades Est et Ouest sont entièrement aveugles, très ensoleillées en été, servant plus de murs mitoyens.



Photo (II-I-13)- mur trombe, et réservation pour capteurs solaires.

- **Description technique**

- Façade Sud :**

- Murs extérieurs - 40 cm - en pierre- $S= 22,10 \text{ m}^2$;
 - Fenêtres ensoleillées - vitrage simple – $S= 10,00 \text{ m}^2$;
 - Fenêtres non ensoleillées – vitrage simple – $S= 4,2 \text{ m}^2$;
 - Portes extérieures – $S= 11,0$

- Façade Est :**

- Murs extérieur – 40 cm – en parpaing plein- $S= 23,80 \text{ m}^2$;

- Façade ouest :**

- Murs extérieur – 40 cm – en parpaing- $S= 23,80 \text{ m}^2$;

- Façade Nord**

- Murs extérieur – 40 cm – en parpaing avec isolation 5cm en liège- $S= 29,40 \text{ m}^2$;
 - Fenêtres non ensoleillées – vitrage simple – $S= 4,2 \text{ m}^2$;
 - Porte extérieure – $S= 2,25 \text{ m}^2$

- Terrasse ensoleillée**

- $S= 87,75 \text{ m}^2$;

I-4- Résultats

Après des calculs effectués pour définir le bilan thermique et connaître ainsi les gains de chaleur, en utilisant la méthode de « Binder – Schmidt » et du « manuel carrier », dans des conditions climatiques de Boussaâda faisant partie des régions semi-arides, c'est une étude statique avec des conditions de base suivantes :

- Mois de juillet ;
- Températures moyennes mensuelles :
Température moyenne maximale $t_{\max} = 37^{\circ}$
Température moyenne minimale $t_{\min} = 21^{\circ}$
Ecart moyen diurne $E = 16^{\circ}$
Température moyenne manuelle $t_m = 29^{\circ}$
Gains maxima par ensoleillement à travers un vitrage simple $R_{\max} = 516 \text{ W/m}^2$
Température intérieure de base $t_i = 27^{\circ}$
Latitude : 40° Nord ;

On est arrivé aux résultats suivants :

- L'apport total de chaleur pour le 1^{er} prototype est : 2537 W.
- L'apport total de chaleur pour le 2^{ème} prototype est : 2627
- L'apport total de chaleur pour le 3^{ème} prototype est : 2907 W.

Conclusion

D'après les résultats obtenus de l'étude effectuée par le groupe des chercheurs du centre de recherche en architecture et urbanisme (CRAU d'El-Harrach), avec les données suscitées, on constate que :

Le prototype N°1 présente plus de confort en été par son faible apport de chaleur que le N°2 et le N°3, ce dernier aura besoin de plus d'énergie pour rafraîchir son intérieur afin de disposer d'un certain degré de confort. Pour la simulation on va prendre en considération seulement les deux prototypes N°1 (reste prototype N°1 en simulation) et N°3 (portera le N°2 en simulation), qui présentent le minimum et le maximum d'apport de chaleur.

Chapitre II : Simulation numérique

II- Introduction

Ce chapitre consiste à évaluer le bilan énergétique des deux prototypes, en utilisant une méthode numérique, soit le logiciel TRNSYS, et déterminer ainsi les besoins en énergie pour le chauffage voire la climatisation.

II-1- Présentation du logiciel TRNSYS

L'atelier de simulation Trnsys Simulation Studio est une structure d'accueil permettant à la fois le développement de nouveaux modèles numériques et l'exécution d'études de simulations dynamiques.

La simulation dynamique permet, par exemple, de simuler le comportement énergétique d'un bâtiment et de son équipement (chauffage, climatisation), en fonction de l'emplacement, des matériaux de construction utilisés, de l'architecture, du concept énergétique choisi, etc.

La conception modulaire ouverte de TRNSYS, basée sur une définition d'une interface logicielle rigoureuse (un API, sorte de 'protocole' entre le noyau et les modèles numériques) a encouragé un grand nombre d'équipes à intégrer des composants dans cette structure d'accueil. Ces composants sont ensuite directement utilisables et connectables avec tous les composants existants. De nombreuses collaborations multidisciplinaires ont été réalisées grâce à cette infrastructure.

Quelques 50 familles de composants, disponibles en standard dans une bibliothèque, permettent de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multi zonaux), les systèmes de chauffage et de climatisation, les plus simples comme les plus complexes, y compris les systèmes solaires innovants.

Des composants utilitaires permettent de coupler la simulation avec les conditions météorologiques, des plans d'occupation, d'utilisation de différentes formes d'énergie, et de générer les fichiers de résultats souhaités.

II-1-1- But du logiciel TRNSYS

Dans l'optique d'une réduction des consommations d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments et de la pollution engendrée par les matériaux, l'éco-conception et l'approche bioclimatique sont des préalables nécessaires. Ainsi, le recours aux énergies est limité et la construction retrouve une cohérence par rapport à son environnement.

La simulation thermique consiste à évaluer le comportement d'un bâtiment et de ses équipements en fonction des variations horaires de ses modes d'occupation et de la météo du site.

Le champ d'application est vaste et plusieurs acteurs sont concernés : la simulation est utile à la maîtrise d'œuvre pour l'aider à concevoir un habitat confortable et économique, elle apporte des réponses au maître d'ouvrage soucieux du coût global du projet et de la satisfaction des futurs occupants, elle permet enfin au gestionnaire de patrimoine d'identifier des modes d'exploitation plus performants.

Le confort thermique été ne passe pas obligatoirement par un traitement actif de l'air par climatisation. Il faut tout d'abord dans le cadre de la maîtrise de l'énergie réduire au maximum les apports énergétiques responsables d'inconforts thermiques et éviter ainsi le recours à un système de traitement de l'air augmentant largement les consommations énergétiques.

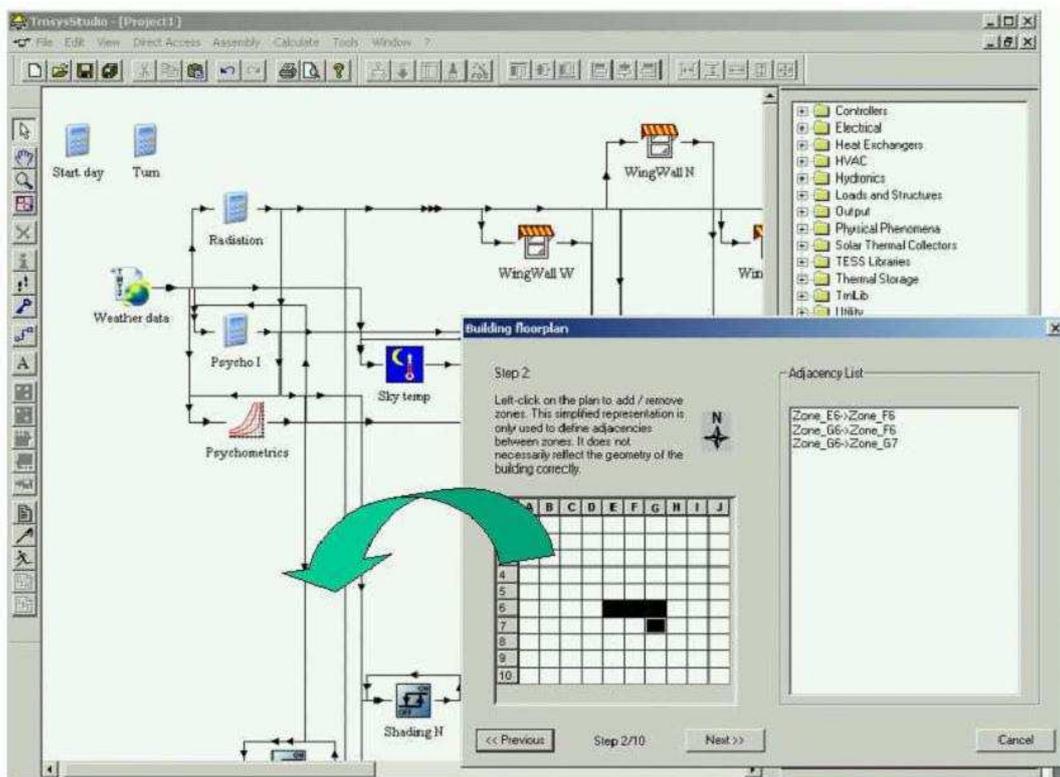


Fig. (II-II-1)- Interface du TRNSYS studio simulation.

- Pourquoi utiliser TRNSYS pour étudier le comportement dynamique d'un bâtiment ?

TRNSYS permet d'effectuer les mêmes calculs que les logiciels dédiés :

- Entrées : données climatiques, géométrie du bâtiment, charges internes, ventilation ;
- Sorties : température, humidité relative, quantités d'énergie nécessaires au chauffage, à la climatisation, PMV-PDD ;

Les outils de simulation thermique dynamique permettent aujourd'hui d'optimiser à la fois :

- l'enveloppe du bâtiment (isolation, inertie, protection solaire, ...),
- les systèmes énergétiques (chauffage, ventilation, climatisation, éclairage,...),
- le confort hygrothermique des occupants (température et humidité de l'air),
- la maîtrise des transferts d'air entre zones,

De façon à obtenir des projets de bâtiments globalement performants. Dans cet esprit, l'utilisation des énergies renouvelables est envisagée et en tous cas systématiquement étudiée lors d'une étude énergétique comparative.

II-1-2- Objectifs

- Minimiser les besoins énergétiques prévisionnels des bâtiments, sur la base de simulations thermiques dynamiques, tout en maintenant un bon confort des occupants.
- Valider le concept énergétique et orienter vers une architecture bioclimatique des bâtiments.
- Limiter ou annuler totalement les besoins en rafraîchissement des locaux.
- Recourir à l'utilisation d'énergies renouvelables, pour assurer une partie ou la totalité de ces besoins énergétiques.
- Expérimenter par simulation des procédés alternatifs aux technologies énergivores.

Il s'agit de mettre en œuvre des outils de calcul de conception permettant de simuler de façon réaliste le comportement des bâtiments et des systèmes (typiquement il s'agira d'un calcul dynamique heure par heure sur toute l'année).

II-1-3- Outils

- TRNSYS n'est pas un logiciel dédié à l'étude du comportement thermique du bâtiment mais TRNSYS :
- Un solveur pour la résolution de systèmes d'équation ;
- Un programme réalisant des simulations dynamiques ;
- Un programme basé sur une approche modulaire ;

- Une méthode pour créer de nouveaux modèles en plus de ceux de la bibliothèque de modèles de systèmes thermiques et de composants auxiliaires (données météo, histogrammes, etc.).

Le logiciel TRNSYS, L'atelier de simulation Trnsys Simulation Studio est un environnement de simulation complet et extensible, dédié à la simulation dynamique des systèmes, y compris les bâtiments multizones.

Développé par le CSTB dans le cadre de collaborations internationales, TRNSYS est aujourd'hui la référence au niveau mondiale dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes. La simulation dynamique permet, par exemple, de simuler le comportement énergétique d'un bâtiment et de son équipement (chauffage, climatisation), en fonction de l'emplacement, des matériaux de construction utilisés, de l'architecture, du concept énergétique choisi, etc.

L'ajout d'un nouveau composant à un outil comme TRNSYS revient à ajouter une fonction (dans le sens sous-programme) à l'ensemble des fonctions existantes. Un des avantages décisifs de TRNSYS vient du fait qu'à la fois les conventions et la méthode pour ce faire sont clairement définies et documentées. Grâce à cette rigueur, les modèles numériques développés à travers le monde deviennent interopérables.

Cependant, l'ajout de composants TRNSYS a longtemps été limité à des programmes écrits en FORTRAN, langage d'origine de TRNSYS. L'ajout d'un nouveau modèle nécessitait la recompilation de TRNSYS avec un compilateur.

Quelques centaines de familles de composants, disponibles dans une bibliothèque, permettent de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono, ou multizone), les systèmes de chauffage et de climatisation, les plus simples comme les plus complexes, y compris les systèmes solaires innovants. Des composants utilitaires permettent de coupler la simulation avec les conditions météorologiques, des plans d'occupation, d'utilisation de différentes formes d'énergie, et de générer les fichiers de résultats souhaités.

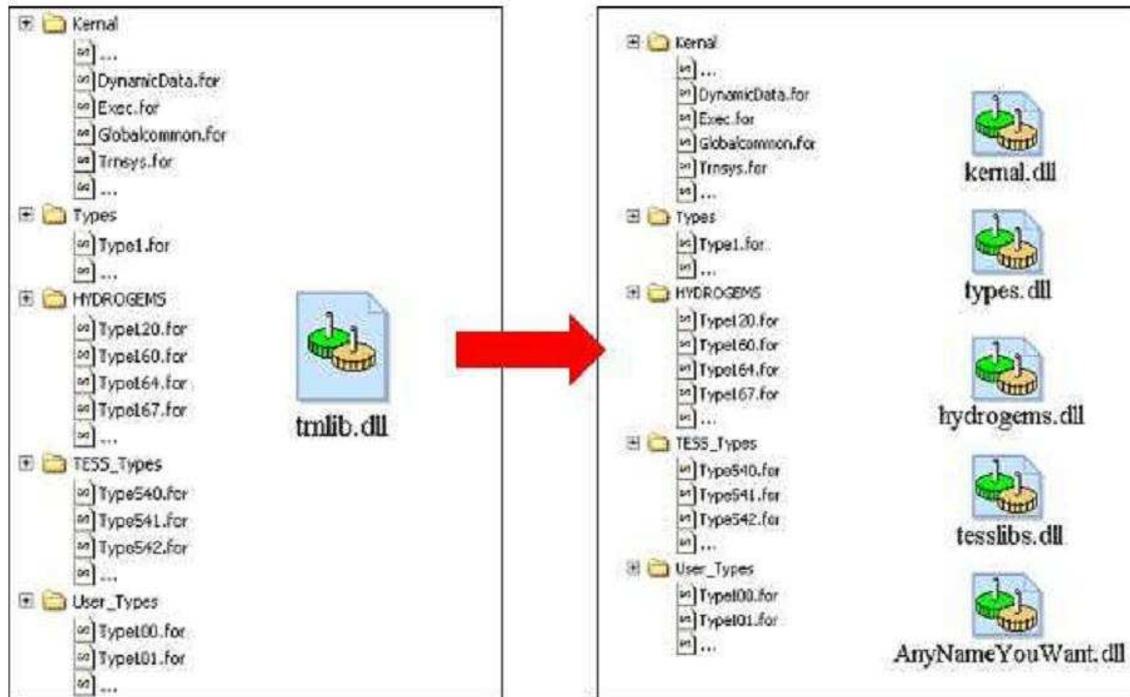


Fig. (II-II-2)- ajout des composants fortran.

II-1-4- Principaux avantages

Véritable multizone : échanges aérauliques entre zones,

Couplage avec systèmes : CTA, systèmes solaires, mur trombe, serre, production d'électricité, etc.,

Sorties : plus de 80 sorties possibles (énergie sensible et latente, échanges radiatifs des fenêtres, stores, etc.,

Modèle d'humidité pour la prise en compte des phénomènes de sorption aux parois.

II-2- Simulation

II-2-1- Données des prototypes

- Les données des prototypes sont identiques à celles prises à l'étude thermique précédente élaborée par le centre de recherche en architecture et urbanisme (CRAU) d'El-Harrach, soit le prototype N°1 et le prototype N°3 qui sera le N°2 pour cette étude. On a gardé les mêmes surfaces des planchers, ainsi que les surfaces des enveloppes dont celles des ouvertures, l'orientation des façades, et les matériaux de construction sont similaires.

- Les régions choisies sont :

- La région de Biskra similaire à celle de la région de Boussaâda lieu des prototypes étudiés, elle appartient à la zone semi-aride ;

- La région de Batna, appartenant au climat tempéré des hauts plateaux ;
- La région d'Annaba, appartenant au climat méditerranéen (littoral) ; (voir Fig. (II-II-3))

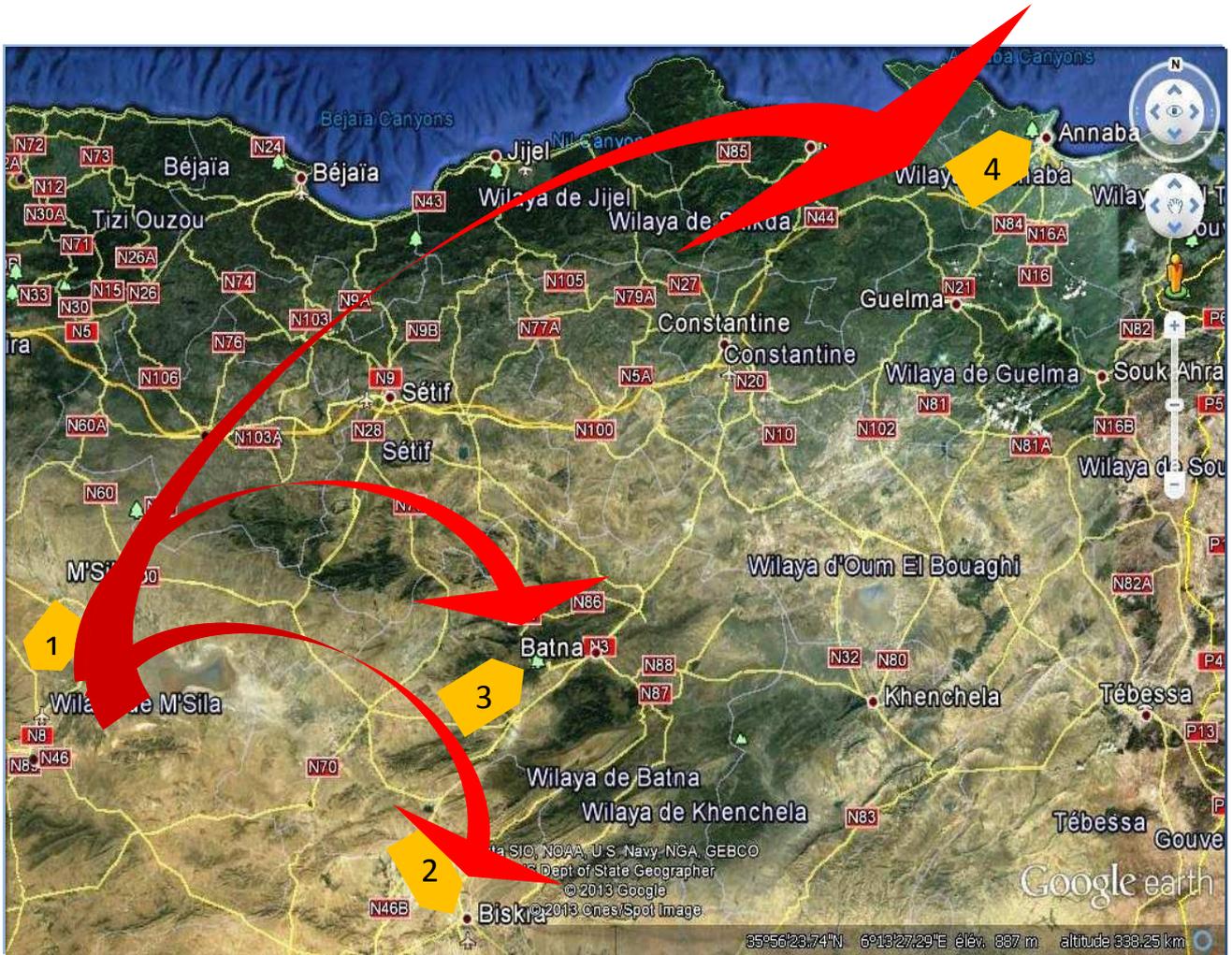


Fig. (II-II-3)- situation des régions choisies pour simulation (source google earth 2013).

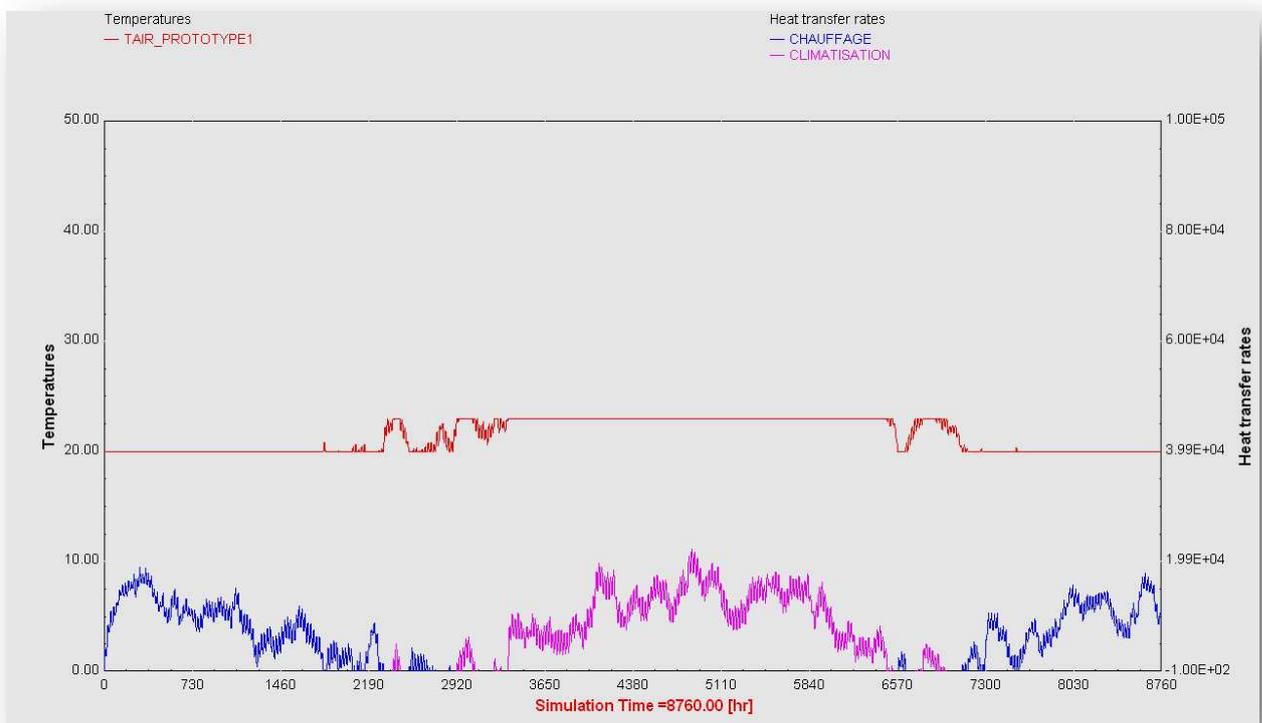
- Les données climatiques seront obtenues directement par couplage avec TRNsys du logiciel météoNorm ;
- Les températures intérieures sont fixées à :
 - pour le chauffage à 20°C c'est la minimale pour le confort d'hiver;
 - pour la climatisation à 23°C c'est la maximale pour le confort d'été.
- Deux modèles de simulations sont à effectuer, l'un sans apports internes (les utilisateurs et leurs activités, les équipements, l'éclairage artificiel), le 2^{ème} modèle on intègre les différents influents à apports internes pour avoir des résultats proches de la réalité, à savoir :
 - 5 personnes ;
 - Un ensemble d'équipements électronique de 230W/m² ;
 - Un ensemble d'éclairage de 19W/m² ;

II-2-2- Résultats

a- Région de Biskra

• Prototype 1

- Sans apports internes :

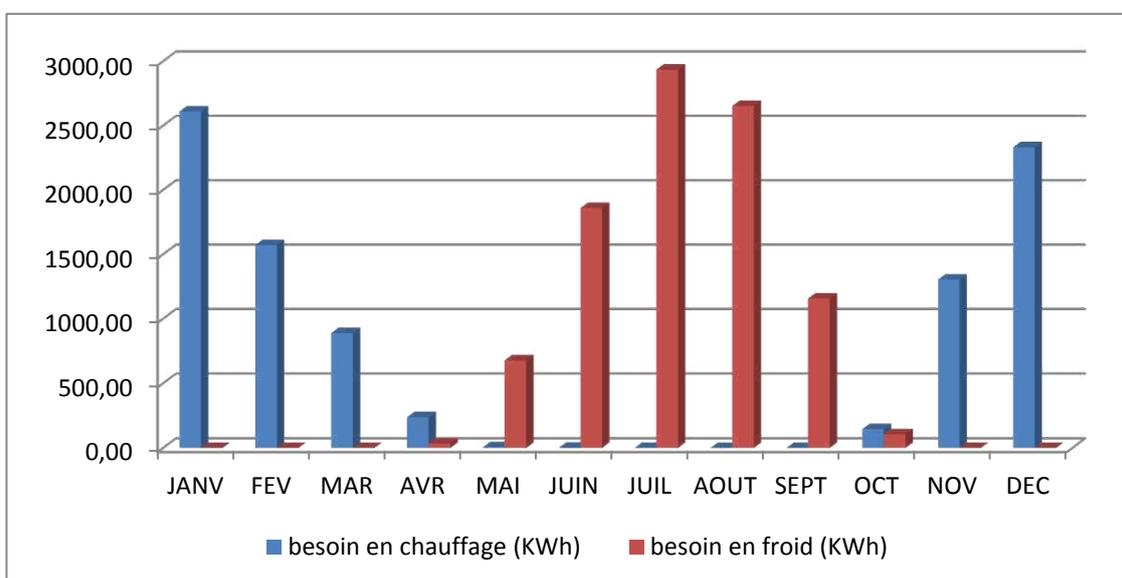


Graph (II-II-1)- Bilan énergétique annuel du P1 sans apports internes à Biskra (KJ/h)

Le résultat obtenu détermine le besoin en chauffage et climatisation du bâtiment avec ses composants sans prendre en considération les apports internes, soit les personnes utilisateurs, les équipements, et l'éclairage artificiel (lampes), les besoins sont équilibrés soit pour le chauffage qui s'étend sur 5 mois (de Nov. à mars) et pour la climatisation qui s'étend aussi sur 5 mois (de Mai à Sept), le confort est persistant sur 2 mois (Avril et Octobre).

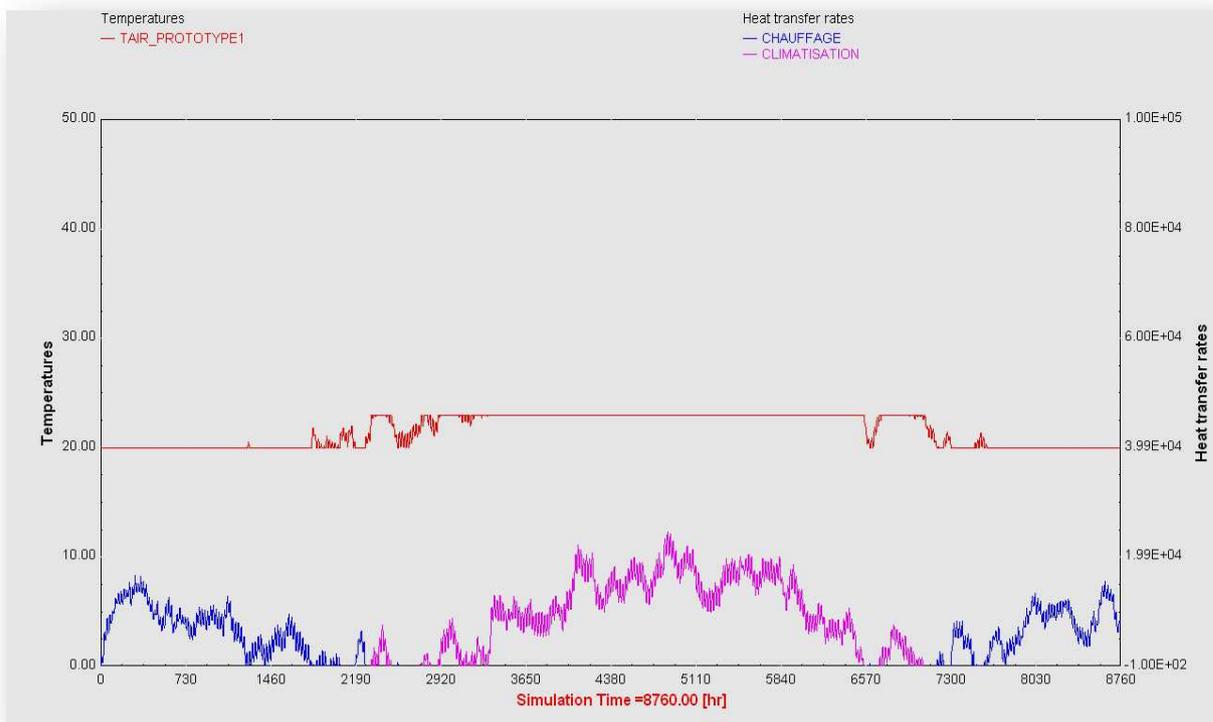
MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	2608,75	0,00
FEV	1571,70	0,00
MAR	887,92	0,00
AVR	237,46	32,55
MAI	4,94	676,50
JUIN	0,49	1858,97
JUIL	0,00	2933,85
AOUT	0,00	2651,74
SEPT	0,00	1156,13
OCT	145,41	105,05
NOV	1303,83	0,00
DEC	2331,03	0,00

Tableau (II-II-1)- besoins en chauffage et climatisation du P1 à Biskra (S. AP. Int.).



Graph (II-II-2)- Bilan mensuel à Biskra : P1 sans apports internes (KWh).

- Avec apports internes :

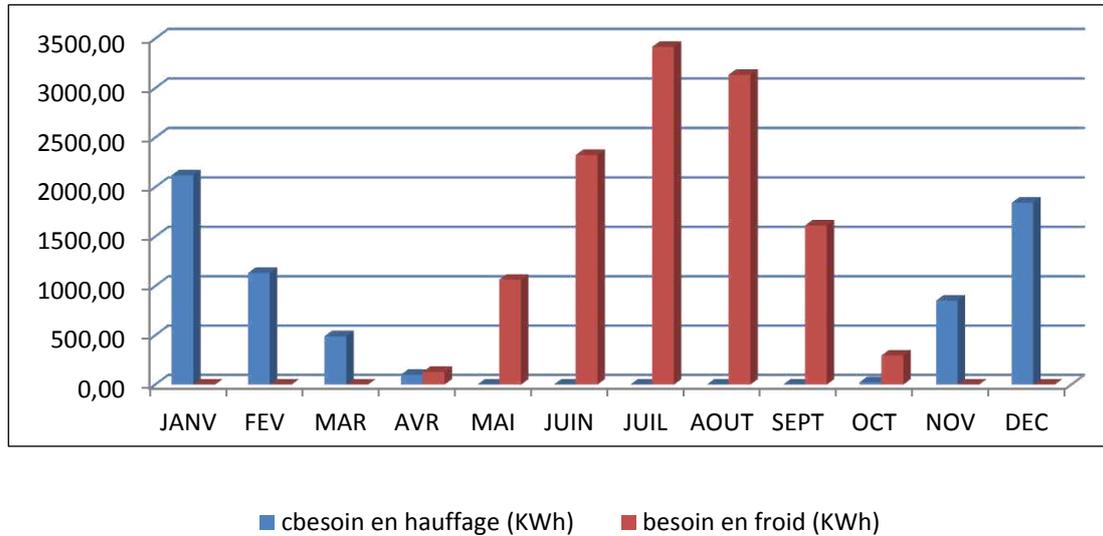


Graph (II-II-3)- Bilan énergétique annuel du P1 avec apports internes à Biskra (KJ/h)

On remarque que le besoin en chauffage a diminué de 500KWh et s'étend sur 5 mois, par contre le besoin en climatisation a augmenté de la même valeur mais reste sur la même durée, et une durée de 2 mois de confort.

MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	2120,73	0,00
FEV	1133,11	0,00
MAR	490,77	0,00
AVR	99,92	128,10
MAI	0,09	1064,51
JUIN	0,02	2324,35
JUIL	0,00	3416,87
AOUT	0,00	3134,94
SEPT	0,00	1612,70
OCT	24,36	295,27
NOV	852,45	0,00
DEC	1842,86	0,00

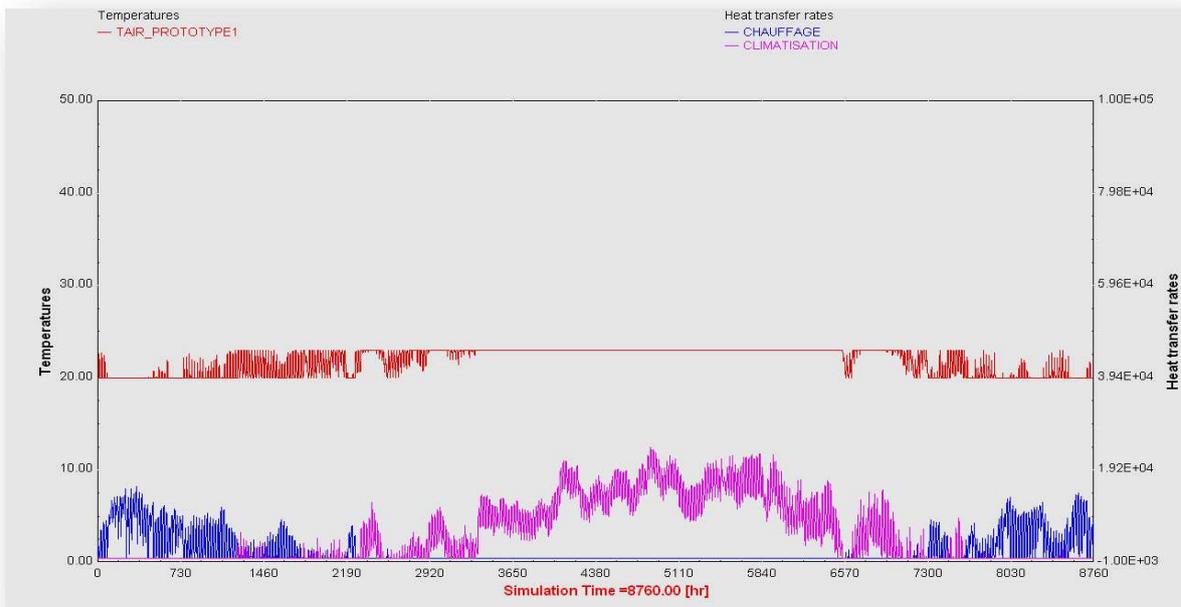
Tableau (II-II-2)- besoins en chauffage et climatisation du P1 à Biskra (A. AP. Int.)



Graph (II-II-4)- Bilan mensuel à Biskra : P1 avec apports internes (KWh).

• **Prototype 2**

Sans apports internes

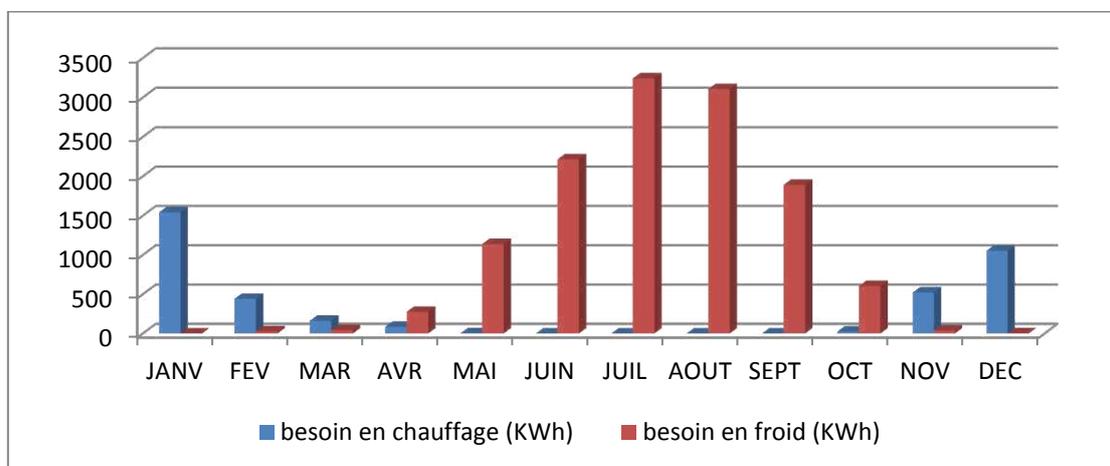


Graph (II-II-5)- Bilan énergétique annuel du P2 sans apports internes à Biskra (KJ/h)

Le résultat confirme celui qu'a obtenu l'équipe des chercheurs du centre de recherche, donc il a un apport de chaleur élevé en saison chaude par rapport au 1^{er}, donc il a besoin plus d'énergie pour la climatisation (dépassant les 3000 KWh dans les cas les plus défavorables) et d'une durée de 6 mois (de Mai à Oct.), son besoin en chaleur est acceptable ne dépasse pas les 1500 KWh dans le cas le plus défavorable (en Déc. et Janv.). 4 mois présentent un besoin, en chaleur ou en froid, minime donc c'est une période de confort.

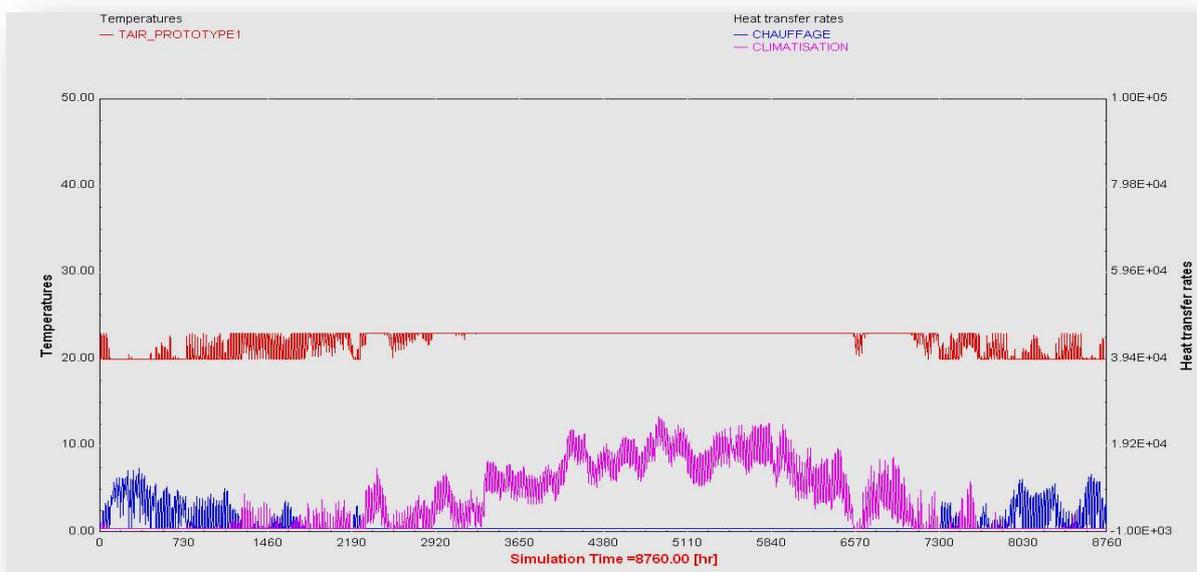
MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	1541,93	0,12
FEV	440,05	26,88
MAR	161,87	41,53
AVR	83,59	275,12
MAI	3,06	1137,39
JUIN	0,29	2214,09
JUIL	0,00	3241,16
AOUT	0,00	3104,22
SEPT	0,00	1890,76
OCT	24,25	603,17
NOV	521,71	36,74
DEC	1053,79	1,67

Tableau (II-II-3)- besoins en chauffage et climatisation du P2 à Biskra (S. AP. Int.).



Graph (II-II-6)- Bilan mensuel à Biskra : P2 sans apports internes (KWh).

Avec apports internes :

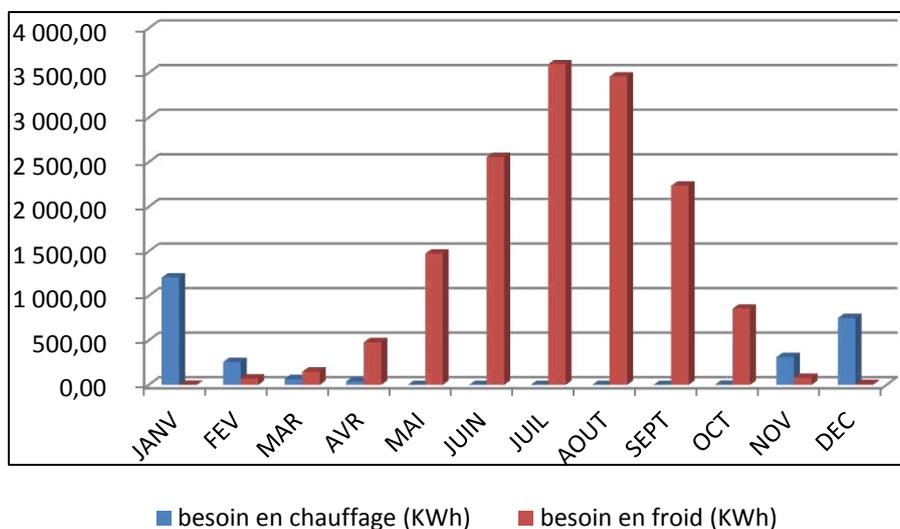


Graph (II-II-7)- Bilan énergétique annuel du P2 avec apport internes à Biskra (KJ/h).

Pour avoir des résultats proches de la réalité, on a intégré les mêmes influents internes, donc le besoin en climatisation a été légèrement prolongé à 7 mois de l'année (d'Avril à Oct.) et qui a augmenté de presque 500KWh, par contre le besoin en chauffage a diminué de la même quantité et persiste pendant 2 mois (de Déc. A Janv.), 3 mois (Fév., Mars, et Nov.) sont considérés comme périodes de confort.

MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	1 205,70	2,23
FEV	257,88	72,13
MAR	65,91	148,90
AVR	39,93	479,62
MAI	0,22	1 474,80
JUIN	0,05	2 558,13
JUIL	0,00	3 597,66
AOUT	0,00	3 460,66
SEPT	0,00	2 235,13
OCT	2,99	856,11
NOV	312,71	80,15
DEC	752,80	10,04

Tableau (II-II-4)- besoin en chauffage et climatisation du P2 à Biskra (A. AP. Int.).



Graph (II-II-8)- Bilan mensuel à Biskra : P2 avec apports internes (KWh).

Commentaire :

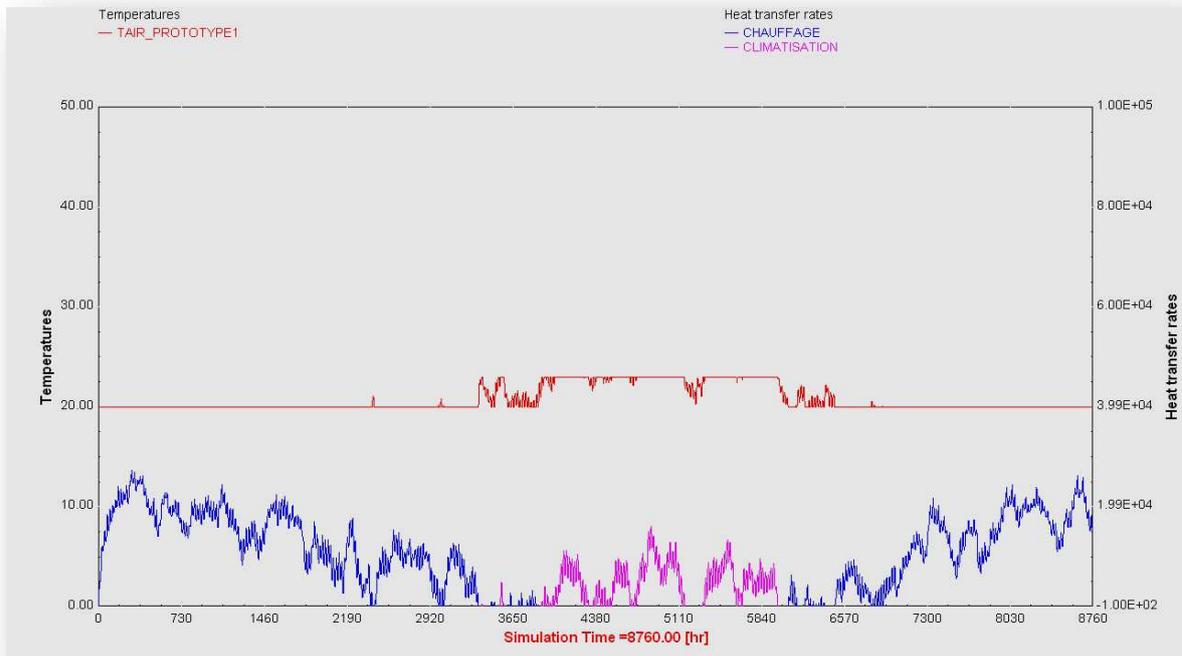
Les apports internes intégrés ont influés sur le besoin d'énergie en augmentant les apports en chaleur :

- Ont diminué le besoin en chaleur dans la saison du froid pour se chauffer;
- Ont augmenté le besoin en énergie pour la climatisation pour se rafraichir ;

Donc on a choisi de prendre en considération les prototypes avec les apports internes qu'on a choisi selon le nombre moyen des ménages en Algérie et quelques équipements utilisés pour plus de crédibilité, et avoir des résultats proches de la réalité, et notamment concernant les besoins en énergie pour la climatisation. Puis on change la situation des prototypes aux autres sites choisis où les données climatiques sont différentes, à savoir le site de Batna et celui d'Annaba.

b- Région de Batna

• **Prototype 1**

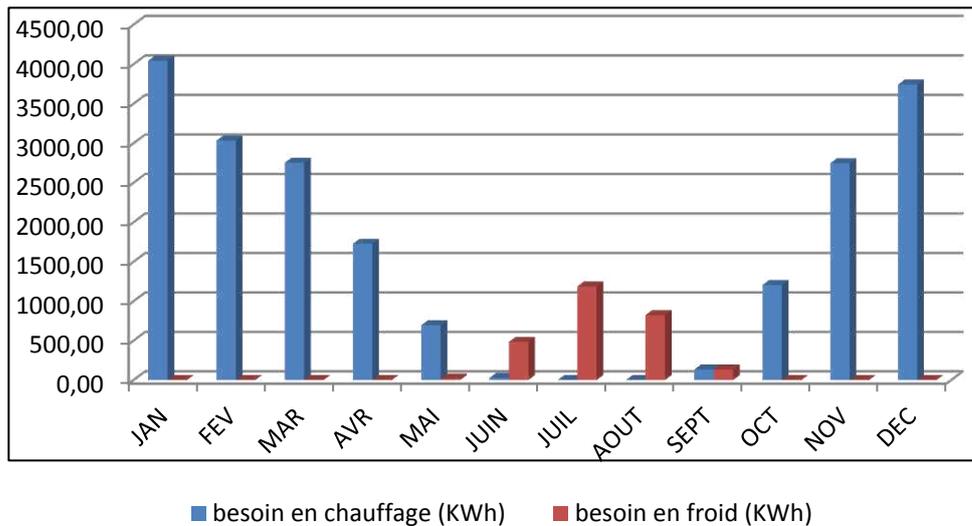


Grphe (II-II-9)- Bilan énergétique annuel du P1 à Batna (KJ/h).

Pour la région de Batna, située dans une zone considérée comme tempérée et à froid, on note que le besoin en chauffage est le plus dominant durant l’année avec une durée de 7 mois avec un besoin atteignant les 4000 KWh dans le cas le plus défavorable (en Janv.), par contre le besoin en climatisation est très faible dépassant légèrement les 1000 KWh dans le cas le plus défavorable (Juil., et Aout), 3 mois de confort (Mai, Juin et Sept).

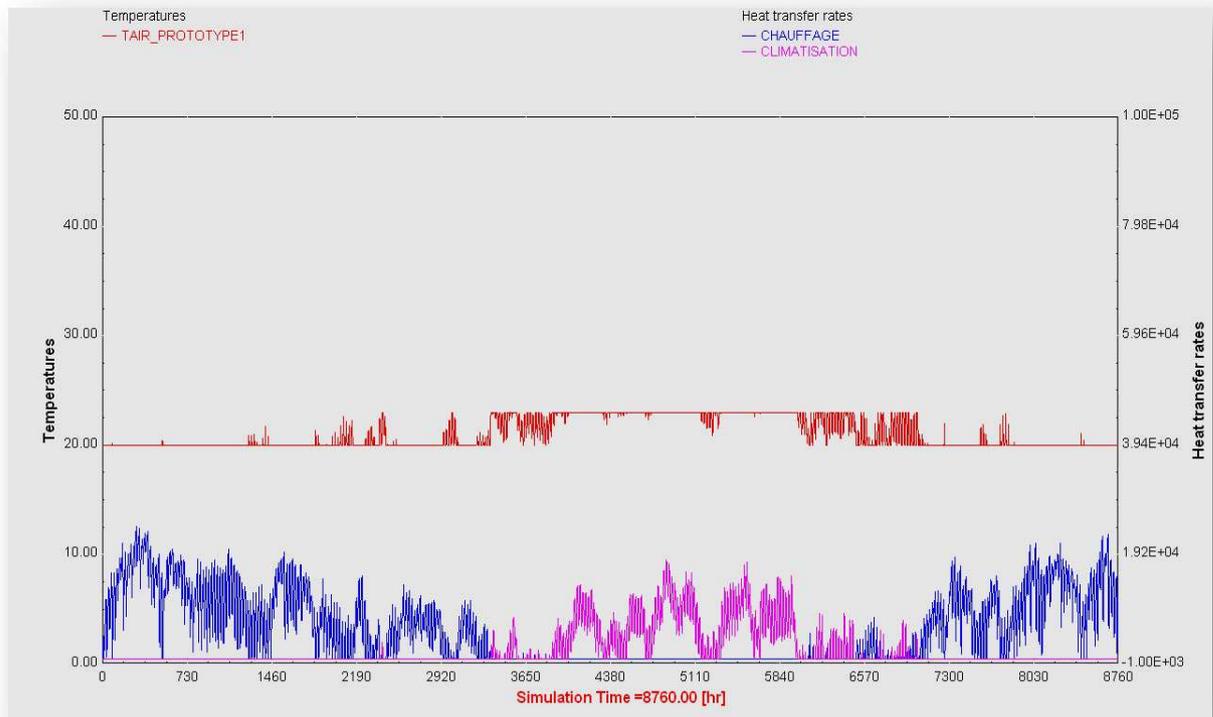
MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JAN	4043,03	0,00
FEV	3032,53	0,00
MAR	2752,62	0,00
AVR	1727,56	0,00
MAI	693,95	18,51
JUIN	27,16	483,92
JUIL	0,50	1186,62
AOUT	0,31	823,21
SEPT	132,37	132,85
OCT	1205,56	0,00
NOV	2748,20	0,00
DEC	3742,19	0,00

Tableau (II-II-5)- besoin en chauffage et climatisation du P1 à Batna.



Graph (II-II-10)- Bilan mensuel du P1 à Batna (KWh).

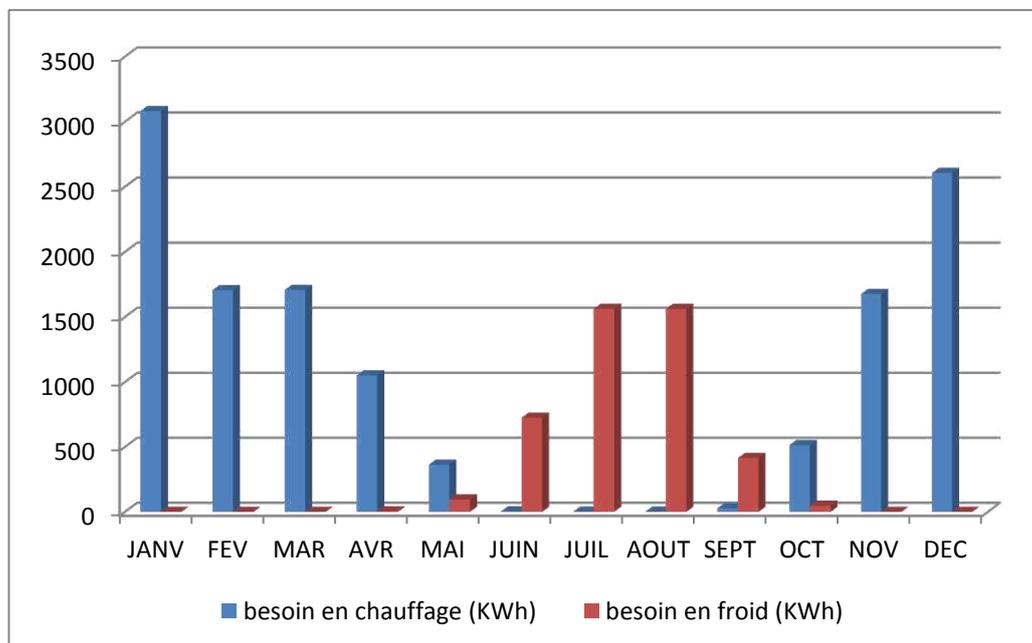
• Prototype 2



Graph (II-II-11)- Bilan énergétique annuel du P2 à Batna (KJ/h)

MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	3082,17	0,00
FEV	1705,77	0,00
MAR	1706,87	0,00
AVR	1049,96	4,00
MAI	363,40	96,33
JUIN	3,45	724,17
JUIL	0,68	1561,40
AOUT	0,68	1561,40
SEPT	27,84	414,20
OCT	514,33	48,52
NOV	1675,90	0,14
DEC	2606,08	0,00

Tableau (II-II-6)- besoin en chauffage et climatisation du P2 à Batna.

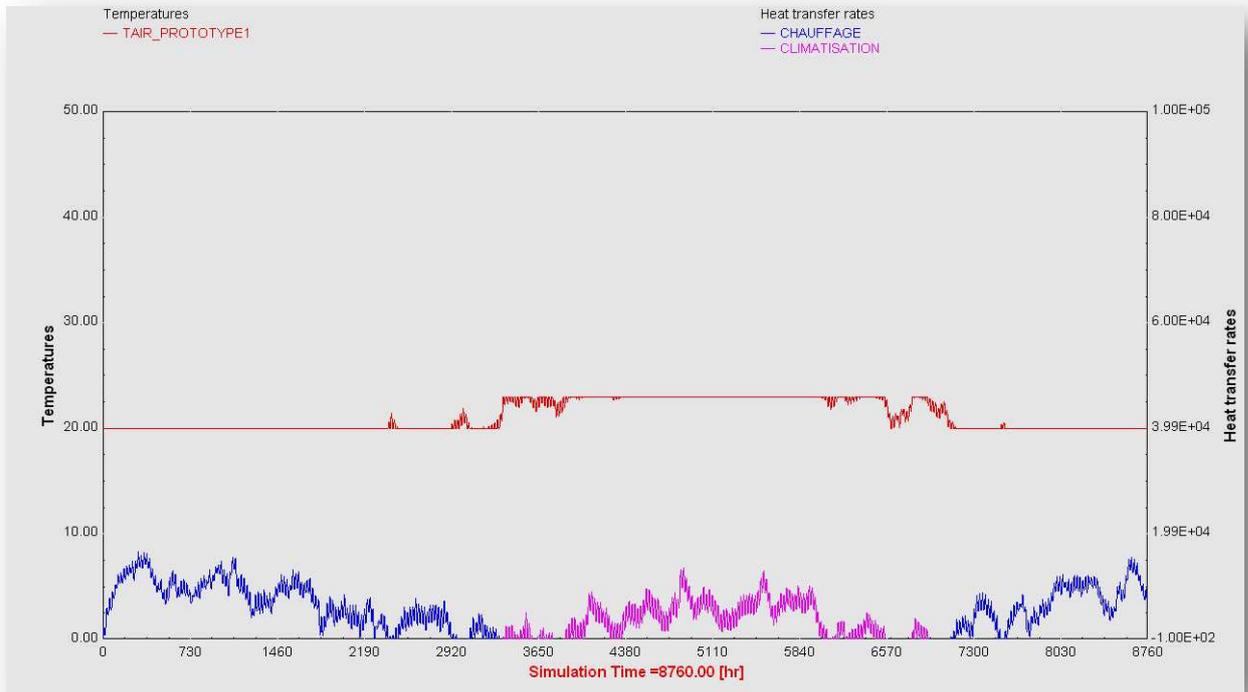


Graphe (II-II-12)- Bilan mensuel du P2 à Batna (KWh).

Pour ce cas, le besoin en chauffage a légèrement diminué, il est à moins de 3000 KWh dans le cas le plus défavorable (Janv.) avec une durée rétrécie à 6 mois (de Nov. à Avril), le besoin en climatisation a augmenté au limites des 1500 KWh (Juil. et Aout), le période du confort est prolongée à 4 mois (Mai, Juin, Sept, et Oct.).

c- Région d'Annaba

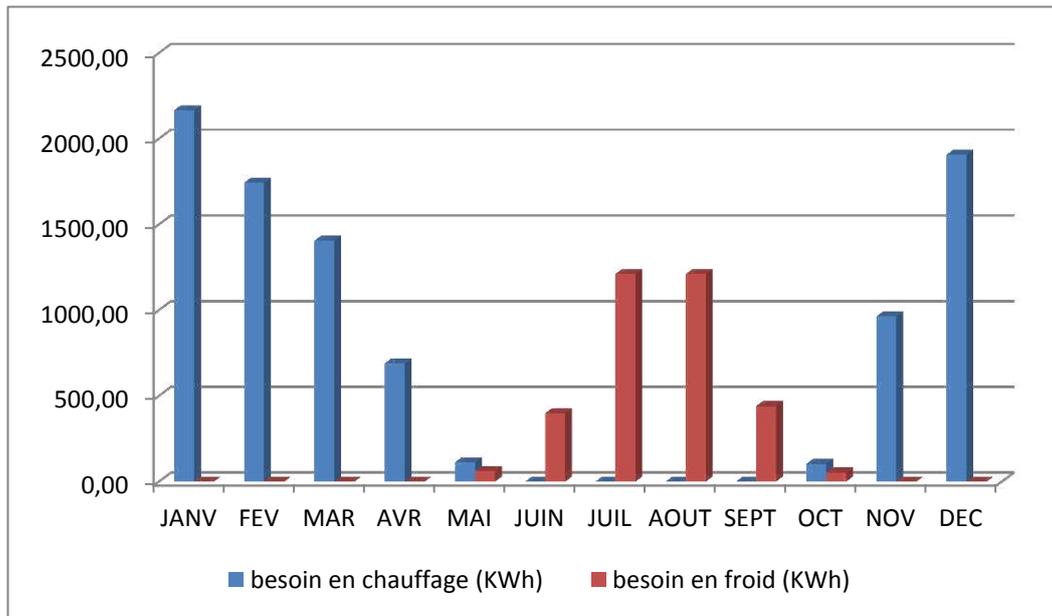
- Prototype 1



Graph (II-II-13)- Bilan énergétique annuel du P1 à Annaba (KJ/h).

MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	2165,56	0,00
FEV	1743,83	0,00
MAR	1405,47	0,00
AVR	689,70	0,00
MAI	112,01	60,58
JUIN	0,27	398,68
JUIL	0,05	1211,46
AOUT	0,05	1210,54
SEPT	0,04	439,87
OCT	102,32	52,52
NOV	963,72	0,00
DEC	1907,35	0,00

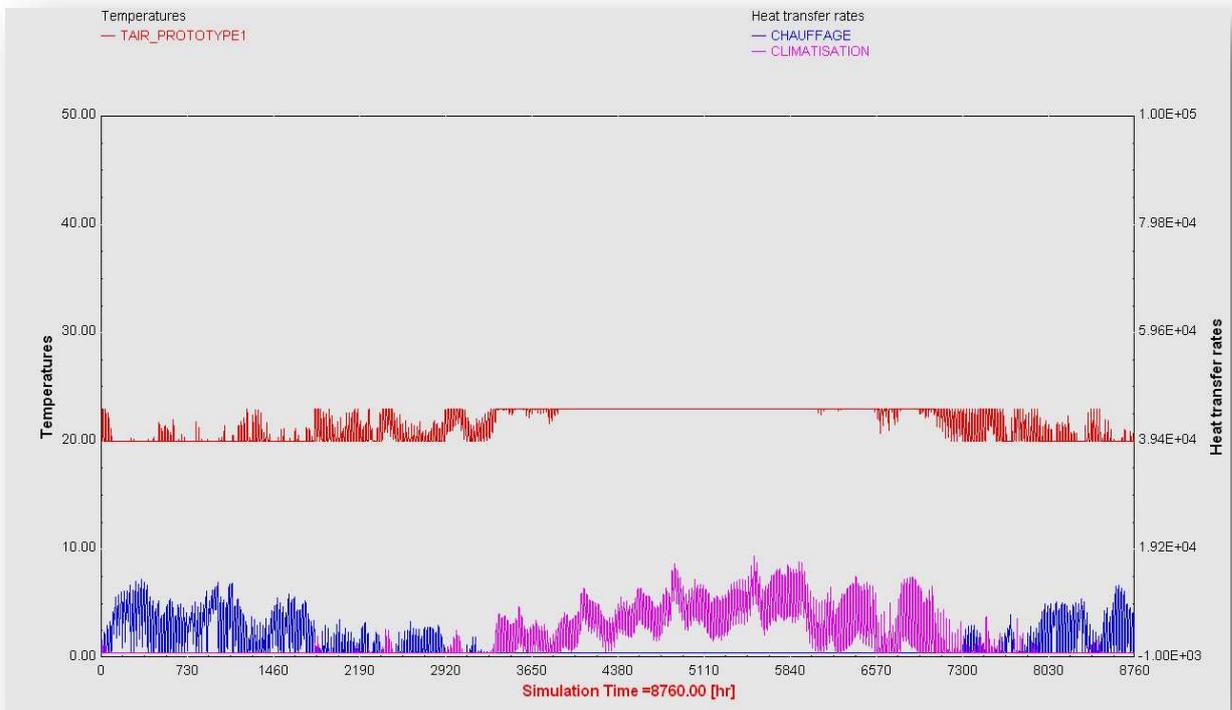
Tableau (II-II-7)- besoin en chauffage et climatisation du P1 à Annaba.



Graph (II-II-14)- Bilan mensuel du P1 à Annaba (KWh).

Pour la région d'Annaba, considérée à climat méditerranéen, les besoins en chauffage sont dans la limite des 2000 KWh dans le cas le plus défavorable et s'étend sur 5 mois (de Nov. à Mars), alors que le besoin en climatisation franchi légèrement les 1000 KWh et s'étend sur 2 mois (Juil. et Aout), alors que le reste de l'année est dans la limite du confort.

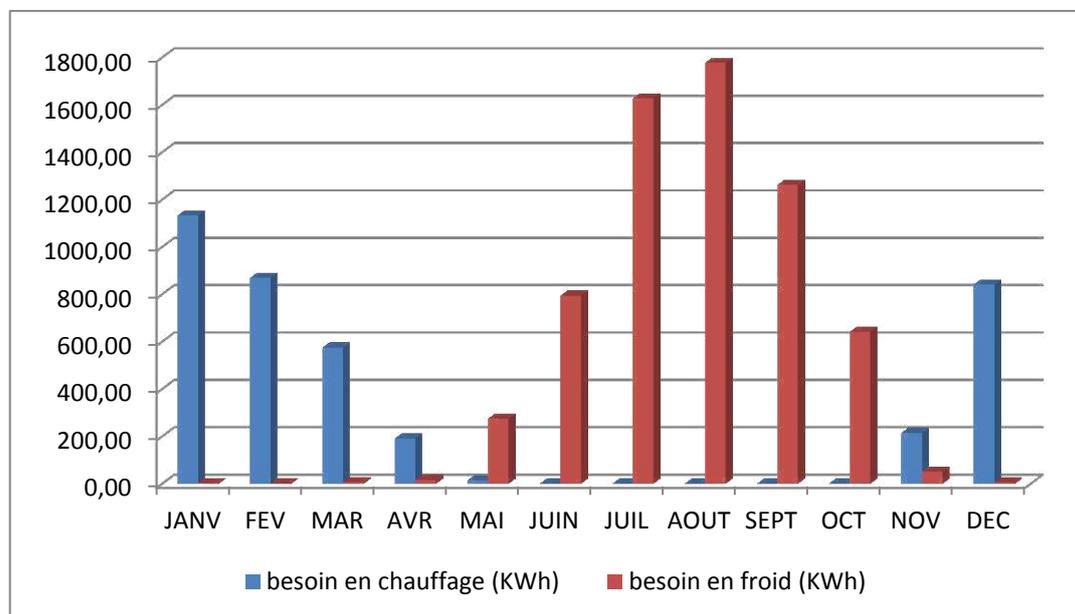
- **Prototype 2**



Graph (II-II-15)- Bilan énergétique annuel du P2 à Annaba (KJ/h).

MOIS	CHAUFFAGE	CLIMATISATION
JANV	1133,01	3,03
FEV	869,98	0,53
MAR	575,65	6,46
AVR	191,75	16,88
MAI	14,23	274,59
JUIN	0,40	794,53
JUIL	0,06	1627,05
AOUT	0,05	1777,55
SEPT	0,03	1262,39
OCT	1,60	641,82
NOV	215,40	51,44
DEC	841,67	6,09

Tableau (II-II-8)- besoin en chauffage et climatisation du P2 à Annaba.



Graph (II-II-16)- Bilan mensuel du P2 à Annaba (KWh).

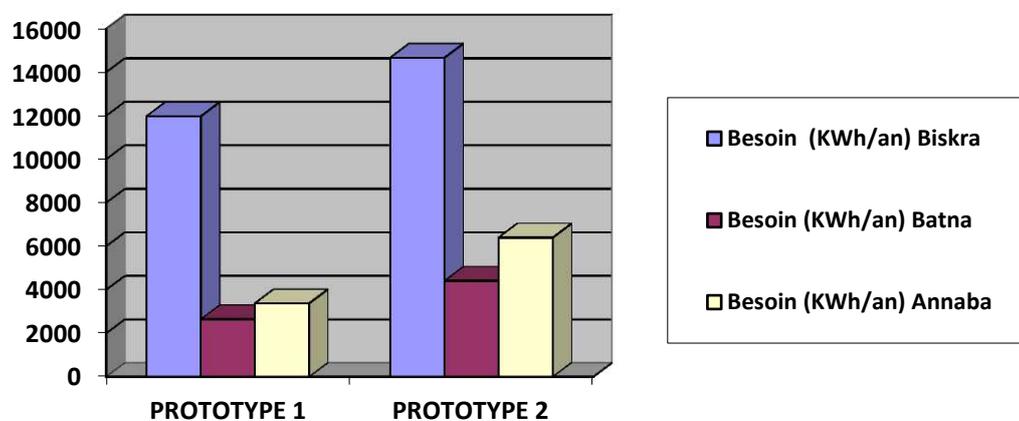
Pour ce cas la situation se renverse toujours avec une augmentation du besoin en climatisation arrivant à la limite des 1800 KWh, avec une durée de 3 mois (de Juin à Sept), le besoin en chauffage ne franchi pas le seuil des 1200 KWh et s'étend sur 3 mois (de Déc. à Fév.), les 6 mois restant considérés comme période de confort avec un besoin ne dépasse pas les 600 KWh soit pour le chauffage ou le froid.

II-2-3- Comparaison des besoins en trois régions

La comparaison est faite pour les besoins en froid (climatisation) des trois régions climatiques de Biskra, Batna et Annaba, pour la saison la plus chaude estimée d'une durée de 7 mois (besoin annuel) selon le cas le plus défavorable soit celui de Biskra :

	PROTOTYPE 1	PROTOTYPE 2
Besoin (KWh/an) Biskra	11976,76	14661,76
Besoin (KWh/an) Batna	2645,11	4410,02
Besoin (KWh/an) Annaba	3373,66	6394,82

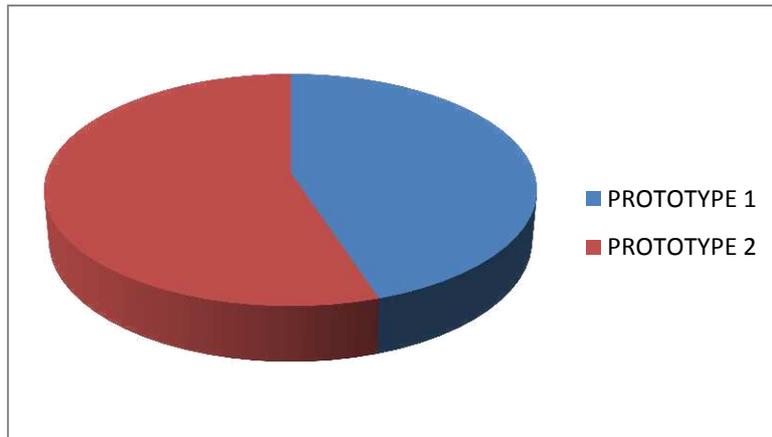
Tableau (II-II-9)- besoins annuels en froid (climatisation) dans les trois régions (Kwh).



Graphe (II-II-17)- Besoin annuel en froid dans les régions (KWh).

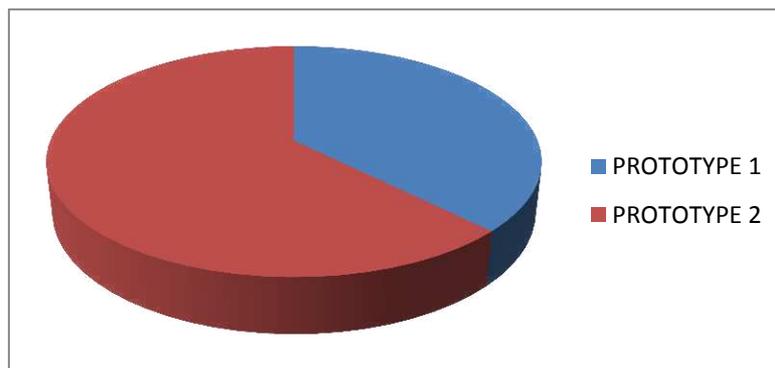
La différence entre les besoins des trois régions est considérable, selon le cas le plus défavorable, soit celui de Biskra. On constate que :

- Les besoins en énergie dans la région de Biskra dépassent d'une façon colossale les besoins dans les 2 autres régions, et entre les deux prototypes c'est le N°2 qui présente un besoin supérieur au N°1 :
- **A Biskra** : le prototype N°2 franchi la limite des 14600 KWh par an et le N°1 à la limite des 11900 KWh par an ;



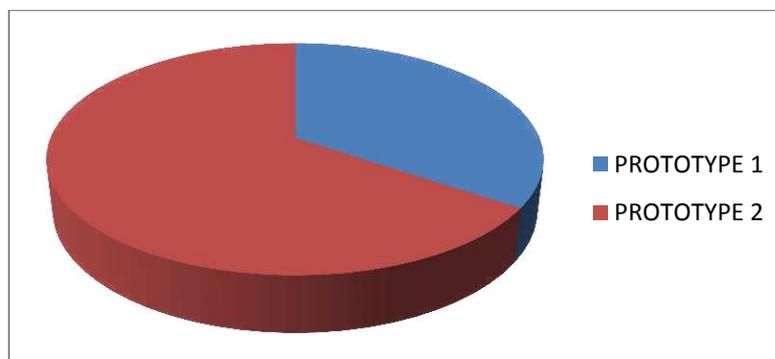
Graph (II-II-18)- Besoin en froid par an à la région de Biskra (KWh).

- **A Batna** : le prototype N°2 présente un besoin de plus de 4400 KWh par an et le N°1 à plus de 2600 KWh par an ;



Graph (II-II-19)- Besoin en froid par an à la région de Batna (KWh).

- **A Annaba** : le prototype N°2 présente un besoin de 4000 KWh par an et le N°1 à 2000 KWh par an ;



Graph (II-II-20)- Besoin en froid par an de la région d'Annaba (KWh).

Commentaire

- Entre les trois régions on constate que celle de Biskra avec ses données climatiques appartenant aux zones semi-arides, a plus besoin en énergie pour la climatisation compte tenue des apports de chaleur que présentent les deux prototypes, et que le prototype N° 2 nécessite plus d'énergie pour le rafraichissement que le 1^{er} prototype, et ce dans les trois régions.

II-3- Production des capteurs photovoltaïques

La simulation des capteurs photovoltaïques est réalisée par TRNSYS, avec des données constantes pour les trois régions climatiques, soit Biskra, Batna, et Annaba. On a essayé d'évaluer la production de trois assemblages des modules de PV, soit une surface de 1m², un assemblage de 10m² et enfin un assemblage de 20m² de modules PV.

L'orientation est en plein Sud en 1^{er}, avec 2 inclinaisons des PV de 30° et 45°.

Une 2^{ème} orientation vers le Sud-ouest à 30° du Sud, avec 2 inclinaisons des PV de 30° et 45°.

Une 3^{ème} orientation vers le Sud-est à 30° du Sud, avec 2 inclinaisons des PV de 30° et 45°.

Sachant que le coefficient de performance (COP) des installations frigorifiques est estimé à 5 pour la production d'énergie pour le froid, donc si un capteur nous fourni 1W en électricité, cela représente une production de 5W de froid.

$$COP = \frac{\text{Production en froid}}{\text{Puissance électrique consommé}}$$

II-4- résultats

II-4-1- La production des modules PV en électricité

a- Région de Biskra :

Latitude : 34,48 N ; altitude : 86 m

Irradiation du rayonnement global horizontal = 1784 KWh/m²

Irradiation du rayonnement global diffus horizontal = 733 KWh/m²

Irradiation du rayonnement direct normal = 1698 KWh/m²

Température moyenne de l'air (maximale) = 33,2 °C

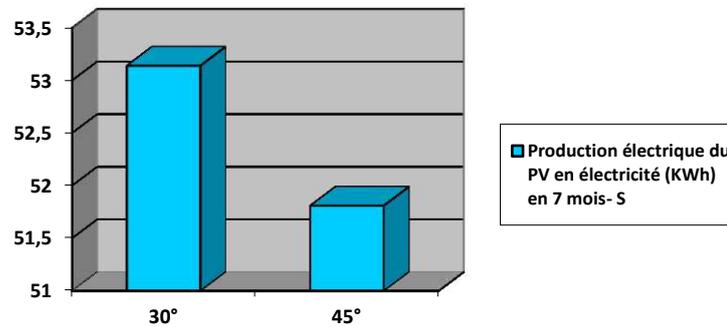
(Sources des données climatiques, fichiers météonorm-Vers. 5.1x)

• Orientation Sud :

Pour une orientation en plein Sud de 1m² de PV, avec 2 inclinaisons des capteurs PV à 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	53,14	51,81

Tableau (II-II-10)- production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra, orientation Sud.



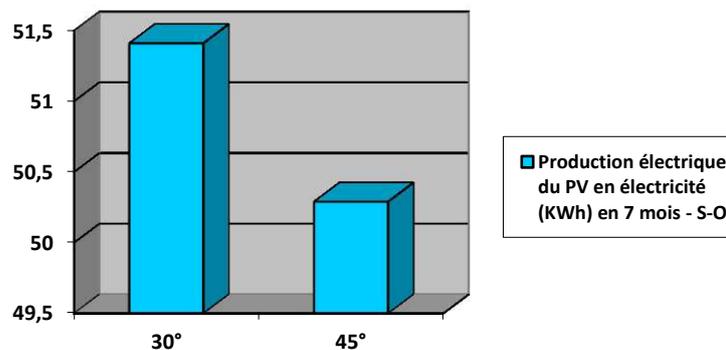
Graphe (II-II-21)- Production du capteur PV dans la région de Biskra orienté au Sud (KWh).

- **Orientation Sud-ouest :**

Pour une orientation Sud-ouest d'un angle de 30° du Sud et 2 inclinaisons du PV à 30° et 45°, on a obtenu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	51,41	50,29

Tableau (II-II-11)- production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra, orientation Sud-ouest.



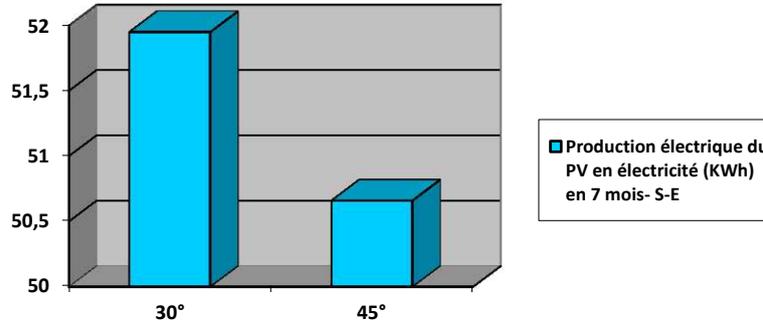
Graphe (II-II-22)- Production du capteur PV dans la région de Biskra orienté au Sud-ouest (KWh).

- **Orientation Sud-est :**

Pour une orientation Sud-est d'un angle de 30° du Sud et 2 inclinaisons du PV à 30° et 45°, on a obtenu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	51,95	50,66

Tableau (II-II-12)- production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra, orientation Sud-est.

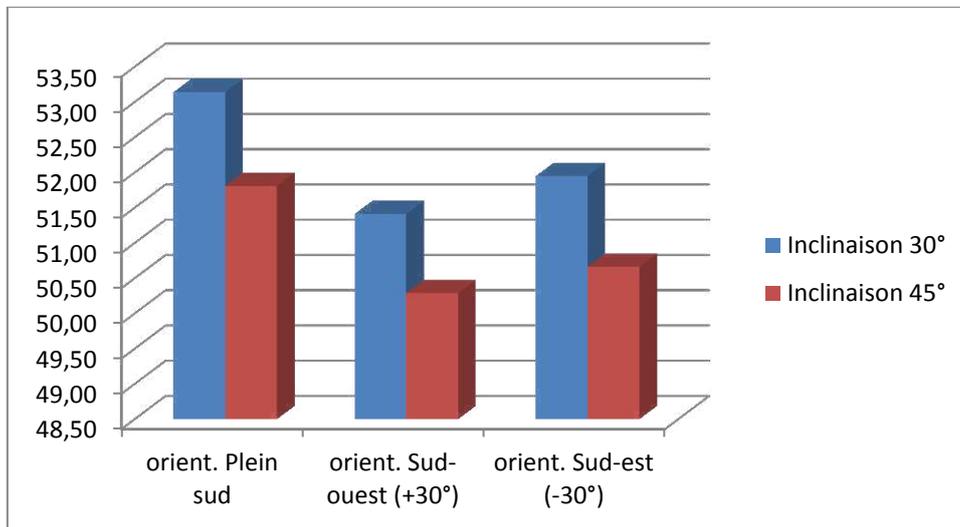


Graphe (II-II-23)- Production du capteur PV dans la région de Biskra orienté au Sud-est (KWh).

Nous comparons la production électrique de 1 m² de PV à Biskra (KWh) incliné à 30° et 45° et orienté en 3 directions soit au Sud, Sud-ouest, et Sud-est :

	Inclinaison 30°	Inclinaison 45°
orient. Plein sud	53,14	51,81
orient. Sud-ouest (+30°)	51,41	50,29
orient. Sud-est (-30°)	51,95	50,66

Tableau (II-II-13)- production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra.



Graphe (II-II-24)- comparaison de la production de 1 m² de PV à Biskra (KWh).

- L'orientation plein Sud est la plus optimale dans les 2 cas d'inclinaison à 30° et 45°, donc les apports dans de telles conditions avec l'inclinaison de 30° sont au maximum.

b- Région de Batna :

Latitude : 35,34 N ; altitude : 1148 m

Irradiation du rayonnement global horizontal = 1664 KWh/m².

Irradiation du rayonnement global diffus horizontal = 727 KWh/m².

Irradiation du rayonnement direct normal = 1545 KWh/m².

Température moyenne de l'air (maximale) = 24,4 °C.

(Sources des données climatiques, fichiers météonorm-Vers. 5.1x)

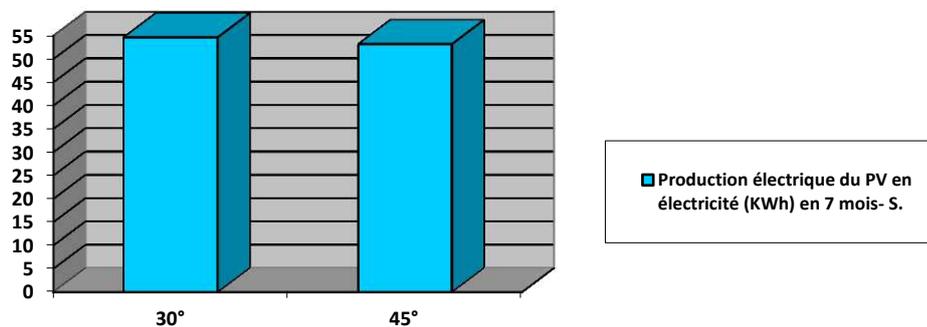
- Résultats

• Orientation Sud :

Pour une orientation en plein Sud et toujours avec 2 inclinaisons des capteurs PV à 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	54,68	53,23

Tableau (II-II-14)- production en électricité d'un PV de 1m² à Batna, orientation Sud.



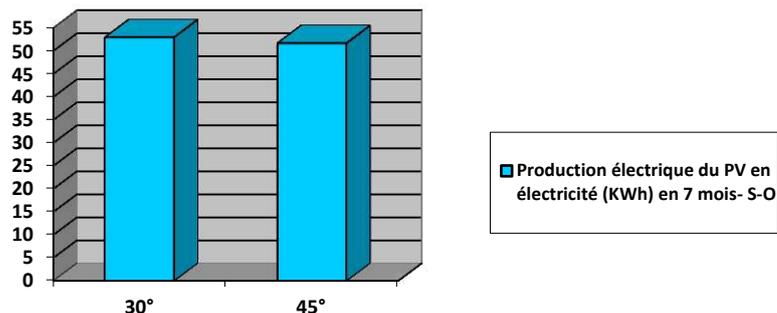
Graph (II-II-25)- Production du capteur PV dans la région de Batna orienté au Sud (KWh).

• Orientation Sud-ouest :

Pour une orientation Sud-ouest d'un angle de 30° du Sud et avec 2 inclinaisons des capteurs PV à 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	52,96	51,69

Tableau (II-II-15)- production en électricité d'un PV de 1m² à Batna, orientation Sud-ouest.



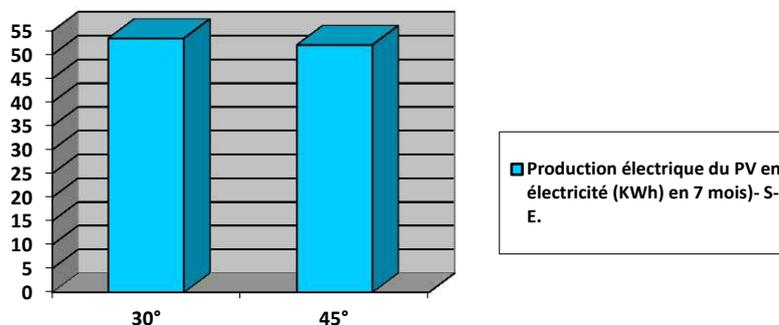
Graph (II-II-26)- Production du capteur PV dans la région de Batna orienté au Sud-ouest (KWh).

• **Orientation Sud-est :**

Pour une orientation Sud-est d'un angle de 30° du Sud et toujours 2 inclinaisons 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	53,52	52,13

Tableau (II-II-16)- production en électricité d'un PV de 1m² à Batna, orientation Sud-est.

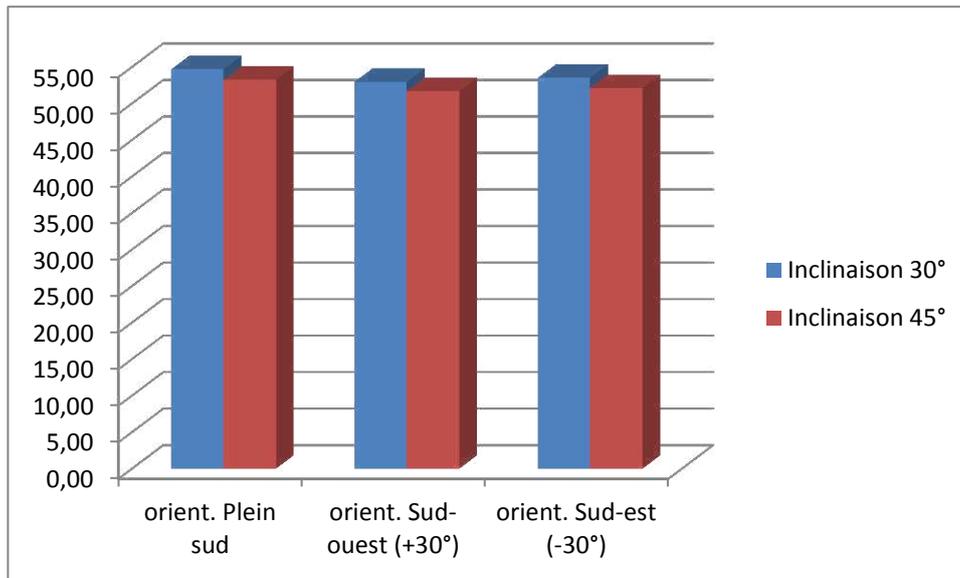


Graph (II-II-27)- Production du capteur PV dans la région de Batna orienté au Sud-est (KWh).

Nous comparons la production électrique de 1 m² de PV à Batna (KWh) incliné à 30° et 45° et orienté en 3 directions soit au Sud, Sud-ouest, et Sud-est :

	Inclinaison 30°	Inclinaison 45°
orient. Plein sud	54,68	53,23
orient. Sud-ouest (+30°)	52,96	51,69
orient. Sud-est (-30°)	53,52	52,13

Tableau (II-II-17)- productions en électricité d'un PV de 1m² à Batna.



Graph (II-II-28)- comparaison de la production électrique de 1 m² de PV à Batna (KWh).

Même dans la région de Batna, avec des conditions d'orientation et d'inclinaison pareil qu'à Biskra, les apports des capteurs orientés vers le plein Sud sont les plus importants, pour ce cas encore c'est l'orientation considérée la plus optimale.

c- Région d'Annaba :

Latitude : 36,55 N ; altitude : 0 m

Irradiation du rayonnement global horizontal = 1792 KWh/m²

Irradiation du rayonnement global diffus horizontal = 710 KWh/m²

Irradiation du rayonnement direct normal = 1768 KWh/m²

Température moyenne de l'air (maximale) = 25,0 °C

(Sources des données climatiques, fichiers météonorm-Vers. 5.1x)

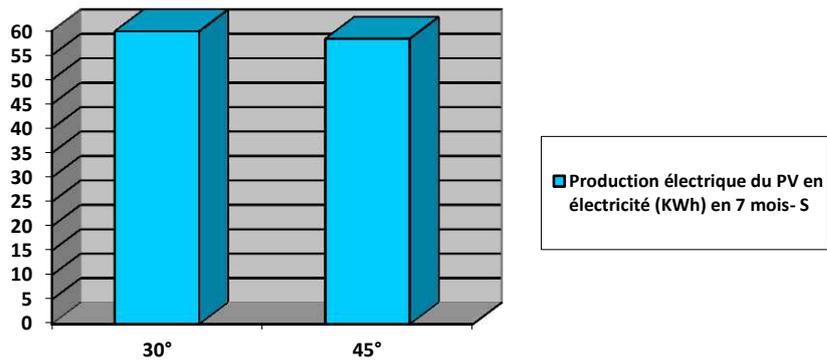
- Résultat

• Orientation Sud :

Pour une orientation en plein Sud et toujours avec 2 inclinaisons des capteurs à 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	59,94	58,43

Tableau (II-II-18)- production en électricité d'un PV de 1m² à Annaba, orientation Sud.



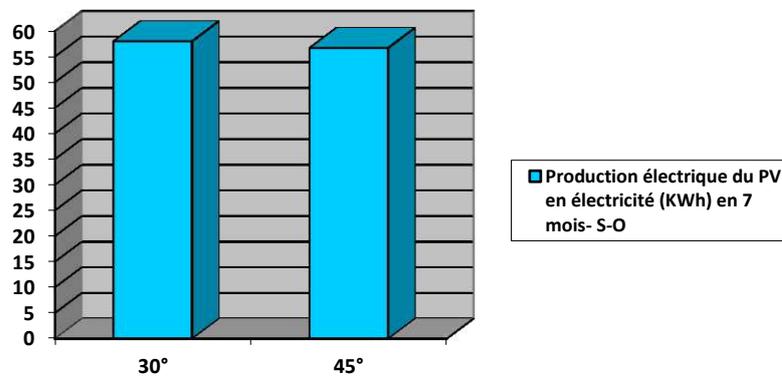
Graph (II-II-29)- Production du capteur PV dans la région d'Annaba orienté au Sud (KWh).

• **Orientation Sud-ouest :**

Pour une orientation Sud-ouest d'un angle de 30° du Sud et toujours 2 inclinaisons des capteurs à 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	58,01	56,71

Tableau (II-II-19)- production en électricité d'un PV de 1m² à Annaba, orientation Sud-ouest.



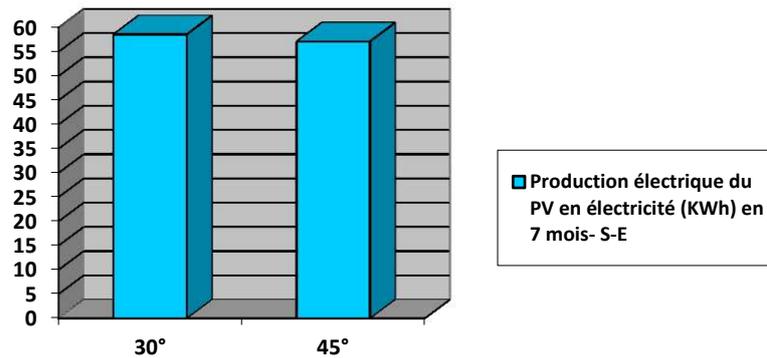
Graph (II-II-30)- Production du capteur PV dans la région d'Annaba orienté au Sud-ouest (KWh).

• **Orientation Sud-est :**

Pour une orientation Sud-est d'un angle de 30° du Sud avec 2 inclinaisons des PV 30° et 45°, on a eu les résultats suivants :

	30°	45°
Production électrique du PV en électricité (KWh) en 7 mois	58,61	57,15

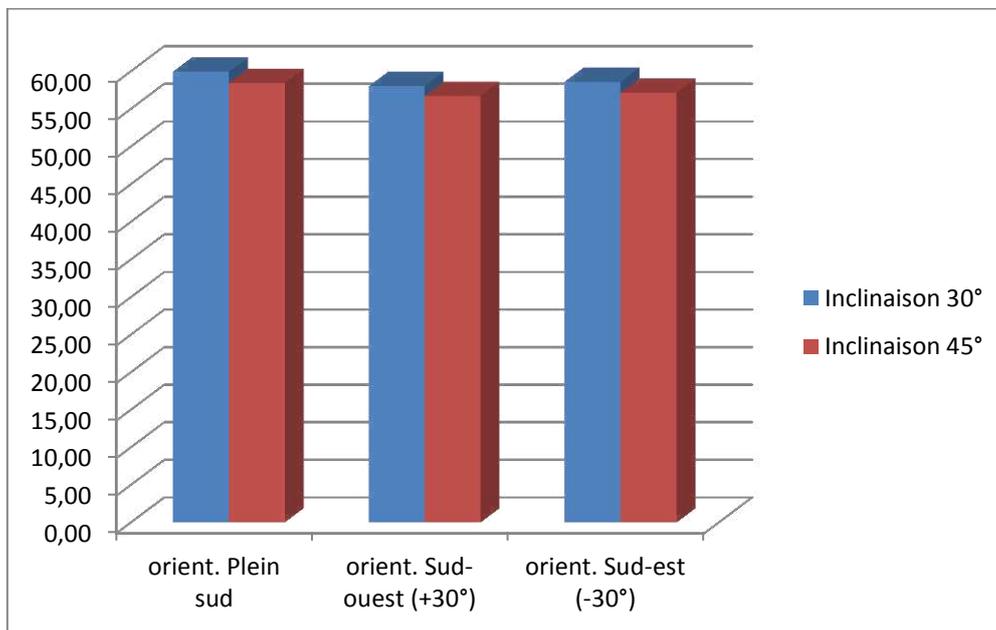
Tableau (II-II-20)- production en électricité d'un PV de 1m² à Annaba, orientation Sud-est.



Graphe (II-II-31)- Production du capteur PV dans la région d’Annaba orienté au Sud-est (KWh).
 Nous comparons la production électrique de 1 m² de PV à Annaba (KWh) incliné à 30° et 45° et orienté en 3 directions soit au Sud, Sud-ouest, et Sud-est :

	Inclinaison 30°	Inclinaison 45°
orient. Plein sud	59,94	58,43
orient. Sud-ouest (+30°)	58,01	56,71
orient. Sud-est (-30°)	58,61	57,15

Tableau (II-II-21)- productions en électricité d’un PV de 1m² à Annaba.



Graphe (II-II-32)- comparaison de la production de 1 m² de PV à Annaba (KWh).

- Même pour la région d’Annaba, la production des capteurs PV sont plus importants en les orientant en plein Sud et une inclinaison de 30° ;

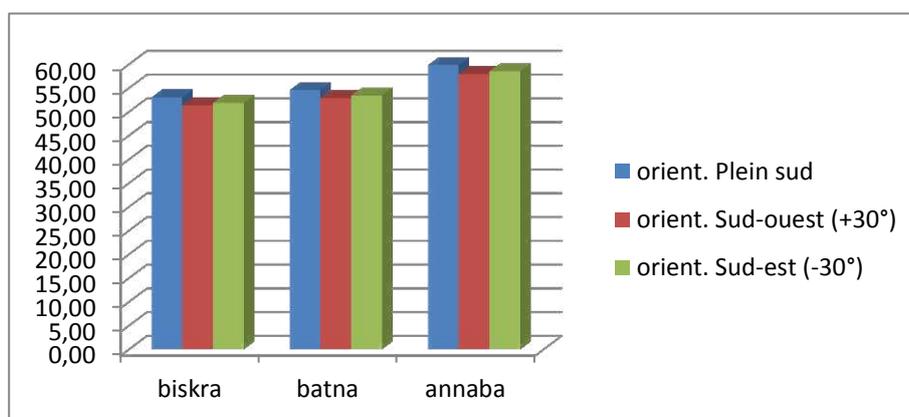
II-4-2- Comparaison de la production électrique du module PV entre les 3 régions

Nous allons maintenant comparer la production de 1 m² de capteur solaire PV entre les trois régions climatiques, Biskra, Batna, et Annaba, dans les 3 orientations vers le Sud, le Sud-ouest, et le Sud-est.

- **Production électrique de 1 m² de PV incliné à 30°:**

	Biskra	Batna	Annaba
orient. Plein sud	53,14	54,68	59,94
orient. Sud-ouest (+30°)	51,41	52,96	58,01
orient. Sud-est (-30°)	51,95	53,52	58,61

Tableau (II-II-22)- Comparaison des productions en électricité d'un PV de 1m² dans les trois régions à 30°.

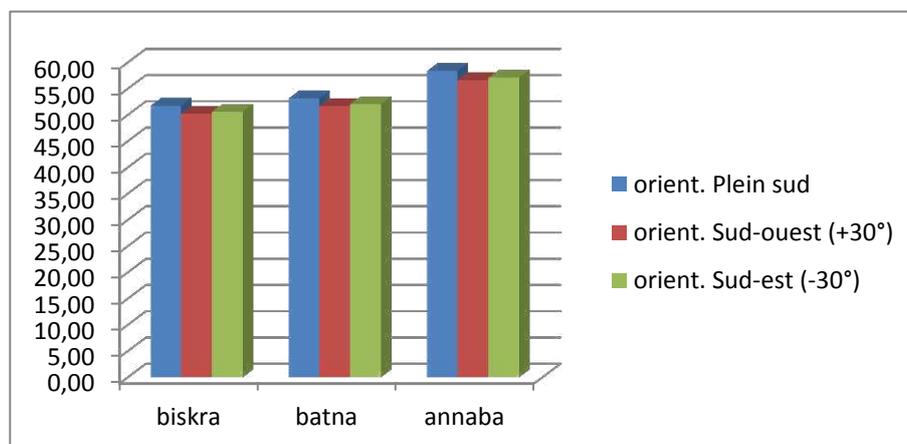


Graphique (II-II-33)- Production en électricité de 1 m² de PV incliné à 30° (KWh).

- **Production électricité de 1 m² de PV incliné à 45°:**

	Biskra	Batna	Annaba
orient. Plein sud	51,81	53,23	58,43
orient. Sud-ouest (+30°)	50,29	51,69	56,71
orient. Sud-est (-30°)	50,66	52,13	57,15

Tableau (II-II-23)- Comparaison des productions en électricité d'un PV de 1m² dans les trois régions à 45°.



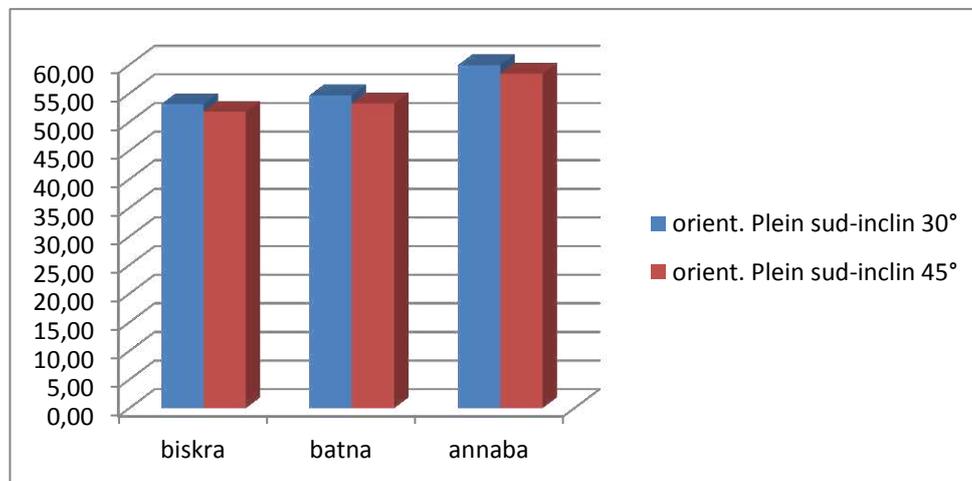
Graphique (II-II-34)- Production en électricité de 1 m² de PV incliné à 45° (KWh).

- Quelque soit l'orientation du capteur PV, les apports en électricité dans une région côtière comme d'Annaba sont considérés les plus importants, par rapport aux deux autres régions qui sont caractérisées par une intensité d'insolation très élevée ;
- L'orientation Sud est la plus optimale pour les 3 régions choisies ;

Donc compte tenue des résultats affirmant l'orientation Sud est la plus optimale, on compare entre les 2 inclinaisons, soit 30° et 45° :

	Biskra	Batna	Annaba
orient. Plein sud-incliné 30°	53,14	54,68	59,94
orient. Plein sud-incliné 45°	51,81	53,23	58,43

Tableau (II-II-24)- Comparaison des productions en électricité d'un PV de 1m², orientation plein Sud.



Graphique (II-II-35)- Production en électricité de 1 m² de PV dans les 3 régions (KWh).

D'après ces résultats, l'inclinaison de 30° s'avère la plus adéquate pour plus de performance des capteurs solaires PV, et ce compte tenue du période choisi s'étalant sur toute la saison estivale, où le soleil parcourt sa trajectoire la plus haute dans le ciel, inscrivant un angle d'environ 70°. C'est la saison où on aura besoin d'électricité pour couvrir une partie de nos besoins pour rafraîchir l'espace.

La production des modules photovoltaïques se diffère d'une région à une autre où à la région de Biskra qui appartient aux zones semi-arides, où son rayonnement solaire est intense et proche de celui des autres régions, il est légèrement supérieur que celui de Batna et peu inférieur que celui d'Annaba, la performance des capteurs PV est faible par rapport aux deux autres régions, situées respectivement sur les altitudes et au littoral, donc la température de l'air est l'un des facteurs influant sur l'efficacité des capteurs solaires et

notamment les modules photovoltaïques qui perd légèrement leur performance sous l'effet des grandes chaleurs. Pour l'orientation, les capteurs sont plus performants en les orientant en plein Sud avec une inclinaison de 30°, donc les résultats obtenus seront pris en compte pour chercher combien va-t-on couvrir nos besoins en énergie pour la climatisation.

II-4-3- Réponses aux besoins en énergie pour la climatisation

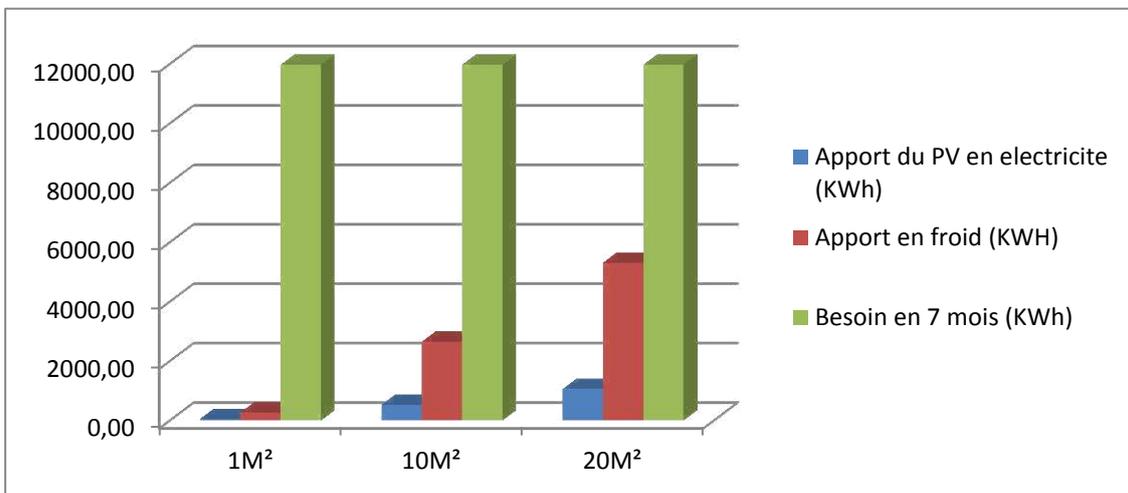
Les apports en électricité seront convertis en apports d'énergies pour la climatisation par le COP (coefficient de performance) à raison de 5. Soit 1 KWh d'électricité nous fourni 5 KWh d'énergie, et de même pour le chauffage par le biais d'une pompe à chaleur (pas prise en compte).

a- Région de Biskra

- Prototype N°1 :

	1 m ² de PV	10 m ² de PV	20 m ² de PV
Production d'électricité du PV pour 7 mois (KWh)	53,14	531,39	1062,78
Production en froid du PV pour 7 mois (KWH)	265,70	2656,95	5313,90
Besoin en froid pour 7 mois (KWh)	11976,76	11976,76	11976,76

Tableau (II-II-25)- besoins en froid du P1 à Biskra et production en énergie des PV.



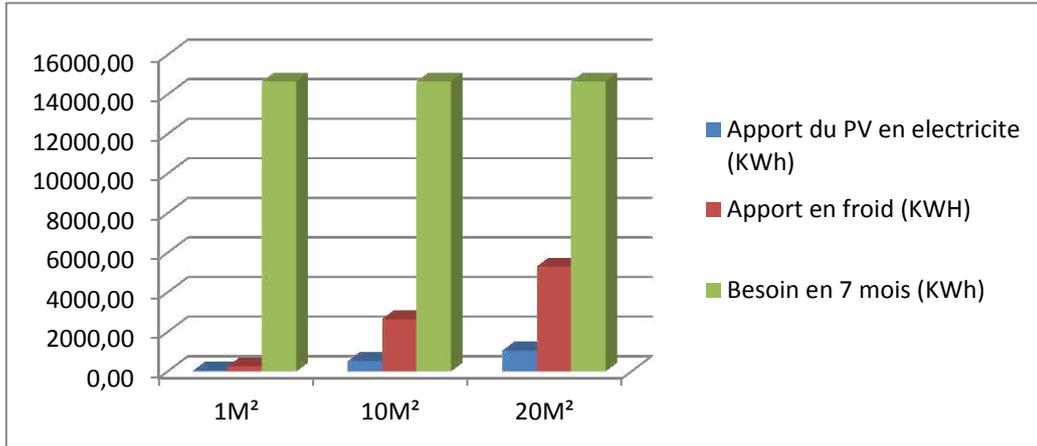
Graphique (II-II-36)- Balances énergétiques du Prototype 1 à Biskra (KWh).

- Pour ce cas et avec les conditions climatiques de Biskra, on aura besoin de 20m² de capteurs pour arriver à nous produire 44,37% des besoins en froid pour le prot1, alors qu'avec 10m² ils nous produisent 22,18%.

- **Prototype N°2 :**

	1 m ² de PV	10 m ² de PV	20 m ² de PV
Production d'électricité du PV pour 7 mois (KWh)	53,14	531,39	1062,78
Production en froid du PV pour 7 mois (KWH)	265,70	2656,95	5313,90
Besoin en froid pour 7 mois (KWh)	14661,76	14661,76	14661,76

Tableau (II-II-26)- besoins en froid du P2 Biskra et production en énergie des PV.



Graph (II-II-37)- Balances énergétiques du Prototype 2 à Biskra (KWh).

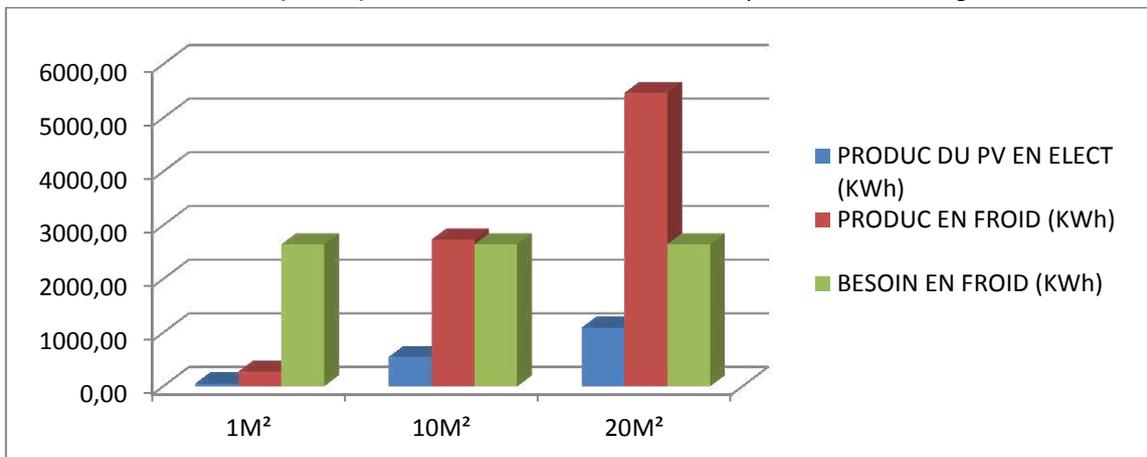
- Pour ce cas, on aura besoin de 20 m² de capteurs pour arriver à nous produire 36,24% des besoins en froid pour le prot2, alors qu'avec 10 m² ils nous produisent 18,12%.

b- Région de Batna

- **Prototype N°1 :**

	1 m ² de PV	10 m ² de PV	20 m ² de PV
Production d'électricité du PV pour 7 mois (KWh)	54,68	546,80	1093,60
Production en froid du PV pour 7 mois (KWH)	273,4	2734	5468
Besoin en froid pour 7 mois (KWh)	2645,11	2645,11	2645,11

Tableau (II-II-26)- besoins en froid du P1 à Batna et production en énergie des PV.



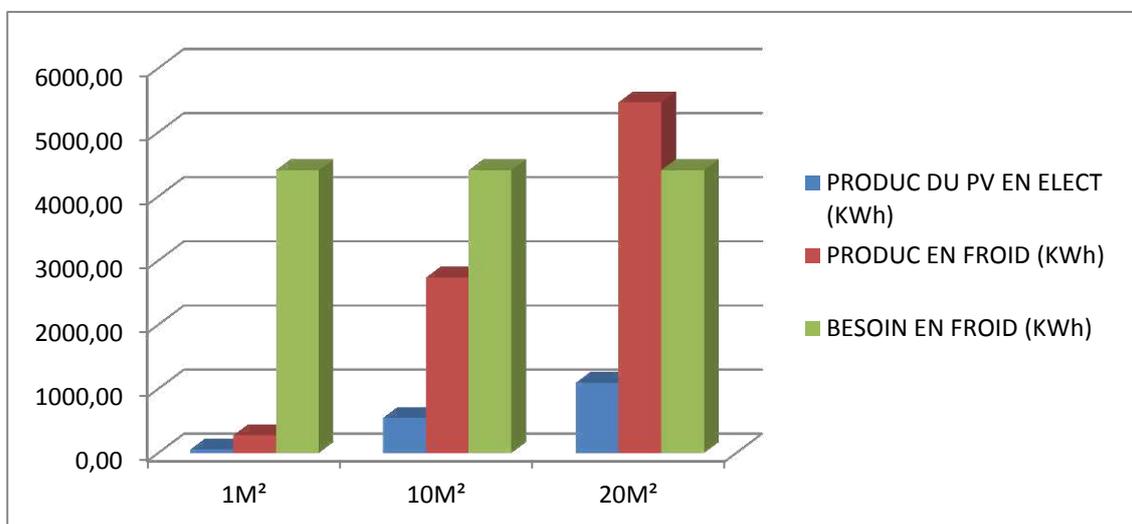
Graph (II-II-38)- Balances énergétiques du Prototype 1 à Batna (KWh).

- Pour la région de Batna la production en froid avec 20m² de capteurs est considérablement supérieure à nos besoins pour le prototype 1, on a un surplus de 100%, avec 10m² la couverture des besoins est à 100%, et un module de 1m² nous fourni déjà 10,34%.

- **Prototype N°2 :**

	1 m ² de PV	10 m ² de PV	20 m ² de PV
Production d'électricité du PV pour 7 mois (KWh)	54,68	546,80	1093,60
Production en froid du PV pour 7 mois (KWH)	273,4	2734	5468
Besoin en froid pour 7 mois (KWh)	4410,02	4410,02	4410,02

Tableau (II-II-27)- besoins en froid du P2 à Batna et production en énergie des PV.



Graphe (II-II-39)- Balances énergétiques du Prototype 2 à Batna (KWh).

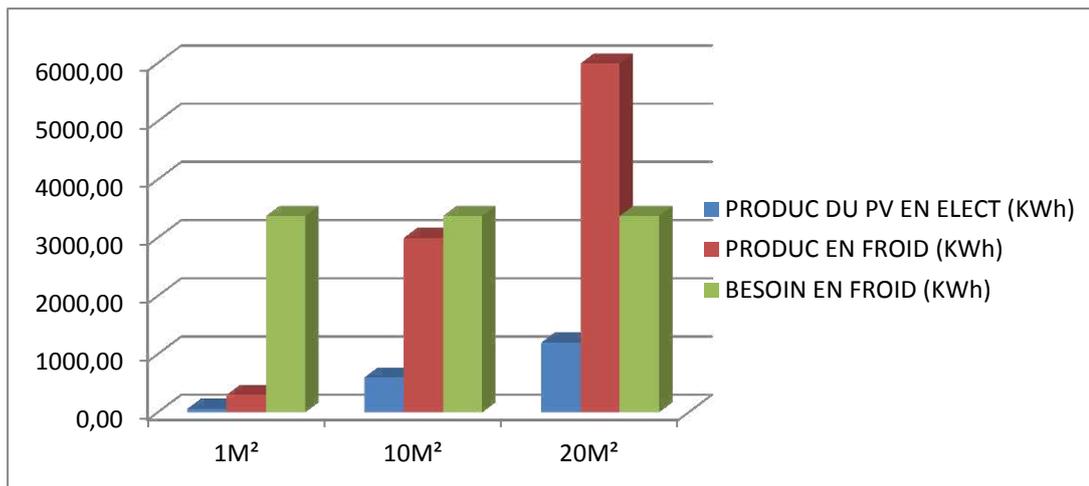
- Pour ce cas la production en froid avec 20 m² de capteurs est légèrement supérieure à nos besoins pour le prototype n°2, on a un surplus de 19,35%, avec 10 m² la couverture des besoins est à 62%.

c- Région d'Annaba

- **Prototype N°1 :**

	1 m ² de PV	10 m ² de PV	20 m ² de PV
Production d'électricité du PV pour 7 mois (KWh)	59,94	599,44	1198,89
Production en froid du PV pour 7 mois (KWH)	299,7	2997,2	5994,45
Besoin en froid pour 7 mois (KWh)	3373,66	3373,66	3373,66

Tableau (II-II-28)- besoins en froid du P1 à Annaba et production en énergie des PV.



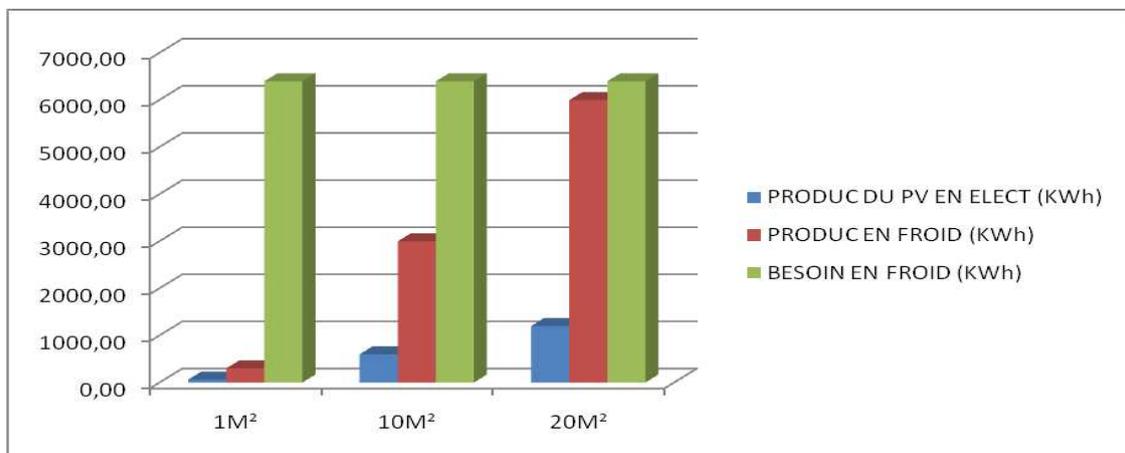
Graph (II-II-40)- Balances énergétiques du Prototype 1 à Annaba(KWh).

- Et enfin dans la région d'Annaba, la production en froid avec 20 m² est aussi considérablement supérieure a nos besoins pour le prototype n°1, soit un surplus de 77,70%, et avec 10m² la production des modules en froid nous couvre 88,84%.

- **Prototype N°2 :**

	1 m² de PV	10 m² de PV	20 m² de PV
Production d'électricité du PV pour 7 mois (KWh)	59,94	599,44	1198,89
Production en froid du PV pour 7 mois (KWH)	299,7	2997,2	5994,45
Besoin en froid pour 7 mois (KWh)	6394,82	6394,82	6394,82

Tableau (II-II-29)- besoins en froid du P2 à Annaba et production en énergie des PV.



Graph (II-II-41)- Apports énergétiques pour la climatisation du P2 à Annaba (KWh).

- Pour le prototype N°2 la production en froid avec 20 m² de modules PV nous couvre 93,74%, et avec 10m² la production des modules en froid nous couvre 46,87%.

D'après les résultats obtenus par simulation TRNSYS, on constate que :

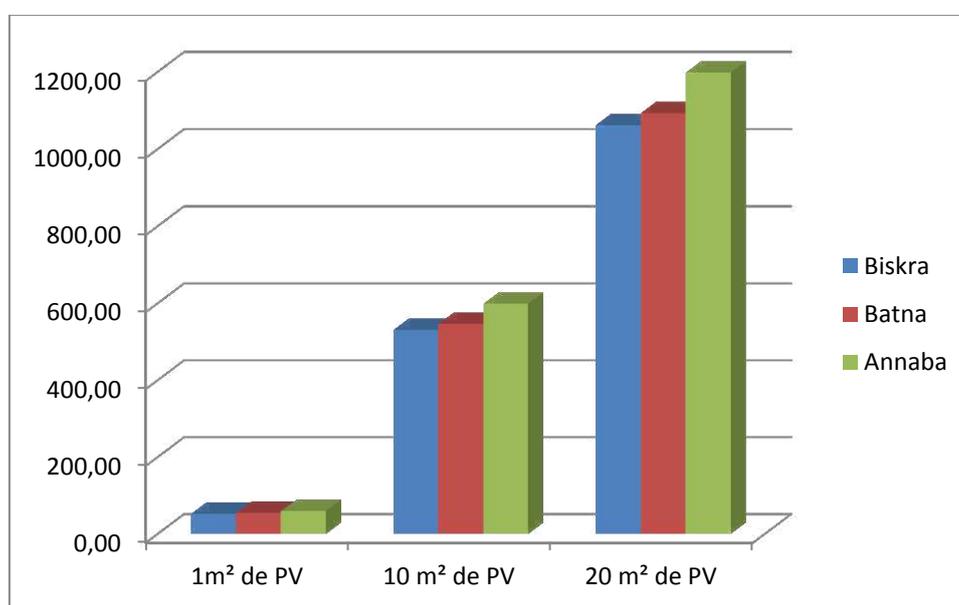
- La performance des capteurs solaires change d'une région à une autre, ils sont plus performants dans les régions à température tempérée comme Batna et Annaba, alors que à Biskra, caractérisée par les grandes chaleurs, ils sont un peu moins performants ;
- La performance des capteurs solaires photovoltaïques change d'une orientation à une autre, et l'orientation plein Sud est la plus optimale, c'est celle qui permet au capteur d'avoir un apport supérieur dans des conditions bien définies ;
- La production électrique est plus importante, avec l'augmentation de la surface des insolateurs (capteurs solaires) ;

II-5- Impact environnemental

Pour produire 1Kwh d'électricité en diminue le dégagement de 76g de CO2, donc sur les trois sites on enregistre les chiffres suivants :

	1 m ² de capteurs PV	10m ² de capteurs PV	20m ² de capteurs PV
Biskra	53.14 KWh	531.39 KWh	1062.78 KWh
Batna	54.68 KWh	546.80 KWh	1093.60 KWh
Annaba	59.94 KWh	599.44 KWh	1198.89 KWh

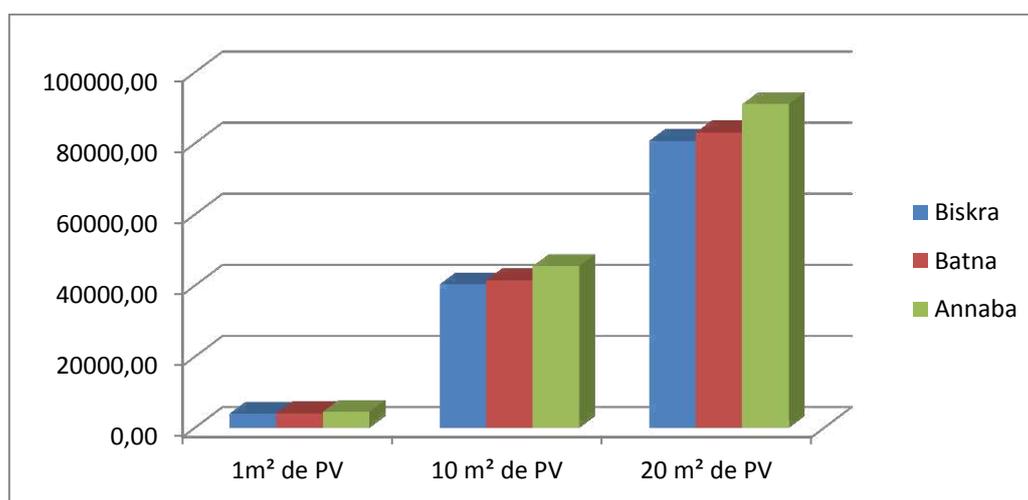
Tableau (II-II-30)- Production des capteurs PV en KWh.



Graphe (II-II-42)- Production des capteurs PV (KWh).

	1 m ² de capteurs PV	10m ² de capteurs PV	20m ² de capteurs PV
Biskra	4038.64	40385.64	80771.28
Batna	4155.68	41556.80	83113.60
Annaba	4555.44	45557.44	91115.64

Tableau (II-II-31)- Quantité de CO2 (en gr) évitée d'être dégagée.



Graph (II-II-43)- Quantité de CO2 en gramme évitée d'être dégagée.

On remarque qu'en augmentant la surface des capteurs PV dans chaque région, la production électrique augmente afin de combler une partie des besoins, de ce fait chaque fois la production est considérable l'évitement du dégagement du CO2 dans l'environnement est aussi considérable. Avec 20 m² de capteurs photovoltaïques dans la région d'Annaba on a pu estimer un évitement de 91115,64 gr de CO2. Imaginons si la surface est augmentée à 1000 fois pour arriver à 20000 m², on pourra arriver à 91115640 gr, c'est donc 91115,64 kg de CO2. Donc chaque quantité produite par capteur PV participe à la diminution du dégagement du CO2 si elle produite avec une énergie fossile.

Conclusion

Les résultats obtenus déterminent le comportement énergétique et plus précisément les besoins en énergie pour le chauffage et la climatisation des 2 prototypes dans 3 régions différentes, la 1^{ère} à Biskra considérée comme zone semi-aride, la 2^{ème} à Batna considérée comme zone tempérée et la 3^{ème} à Annaba considérée comme zone méditerranéenne, où nous avons constaté que :

- Le prototype N°1 présente moins de besoin en énergie, soit l'énergie pour le chauffage ou bien pour la climatisation, que le prototype N°2 (N°3 en étude thermique effectuée par les chercheurs du centre de recherche en architecture et urbanisme d'El-Harrach). Les résultats obtenus confirment juste leurs comportements énergétiques à savoir leurs apports de chaleur en été dans des conditions statiques choisie par le CRAU et dans le cas le plus défavorable soit le mois de juillet. Par contre avec la méthode numérique, TRNSYS, utilisée on a pu avoir des résultats dynamiques durant toute l'année et heure par heure avec des données climatiques horaires ;
- Deux prototypes avec des données de conceptions sont différentes (enveloppe, composants des murs, surfaces, etc.) ne seront jamais objet de comparaison, mais la comparaison se fait en changeant les données du site et ses conditions (climat, altitude et latitude) ;
- La production des capteurs est plus importante avec une orientation plein Sud ;
- La production des capteurs est plus importante en les inclinant à 30°, pour une période s'étalant sur toute la saison estivale où le soleil parcourt une trajectoire dans l'intervalle des angles les plus hauts et arrivant à 70° maximum, ce qui permet au rayons solaire de faire un angle droit sur les capteurs ;
- Les modules PV sont plus performants dans les régions du Nord que celles du Sud, cela est dû à l'influence des températures très élevées, qu'enregistrent les zones chaudes, sur la performance des modules photovoltaïques (l'augmentation de la température de la cellule réduit le rendement de 0,5 % par degré Celsius) (1) ;

(1) SOTEHI Oualid, Comportement Energétique des capteurs hybrides PV/T à eau intégrés dans les bâtiments algériens, séminaire sur l'énergie, Alger, 25-27 mars 2012.

- Le comportement énergétique en besoins de climatisation des prototypes est différent d'une région climatique à une autre, où la région des zones semi-arides est la plus défavorable, où les besoins sont colossaux. Pour les régions tempérées les apports des capteurs PV en électricité, avec le même COP (1W d'électricité nous produit 5W de froid), cet apport sera valable pour une pompe à chaleur produisant de la chaleur ;
- Puisque la performance des modules PV est intéressante dans les zones tempérées, soit à Batna ou bien Annaba, et puisqu'elle est considérablement supérieure qu'aux régions semi-arides, sous l'influence de la température très élevée, un capteur dit hybride (thermique et photovoltaïque) sera certainement avantageux pour les 2 régions tempérées pour produire de l'eau chaude sanitaire et pourquoi pas pour le système de chauffage.
- Pour **l'impact environnemental** quelque soit la production de l'électricité par l'utilisation des capteurs solaires photovoltaïques, on pourra éviter un certain poids de CO₂ dégagé dans l'environnement car pour produire 1 kWh d'électricité on diminue le dégagement de 76g de CO₂, donc pour les cas le plus favorable, soit à Annaba, en installant 20 m² de capteurs solaires photovoltaïques pour produire 1198,89 kWh on évite 91115,64g de CO₂. Donc chaque quantité produite par capteur PV participe à la diminution du dégagement du CO₂ si elle est produite avec une énergie fossile.

Conclusion générale

Conclusion générale

Bien que le solaire est, depuis la création de cet univers par le tout puissant, et reste pour l'homme une source inépuisable pour se procurer de l'énergie en chaleur en s'exposant à ses rayons, au moment du froid, pour son corps ou bien ouvrir son logis par des solutions passives pour y bénéficier.

Le soleil participe à tous les mouvements naturels qui se déroulent autour de la terre, soit pour la poussée des différentes végétations et leur séchage pour être une source d'énergie en bois et charbon. Soit pour l'évaporation des mers et océans afin d'assurer le cycle pluviométrique coulant les rivières et fleuves pour ravitailler les barrages produisant l'énergie hydroélectrique. Soit pour une lente dégradation bactériologique d'organismes aquatiques végétaux et animaux et s'accumuler pour des millions d'année au cœur de la terre qui vont se convertir en pétrole et gaz dits sources fossiles, non renouvelables.

Toutes ces sources font part d'une exploitation indirecte de l'énergie solaire stockée par des différents modes de captages.

Et suite à l'utilisation des sources d'énergie fossiles et leur effet nuisible sur l'environnement, la recherche d'autres alternatives énergétiques de remplacement est imminente. De ce fait l'éolien et le solaire s'avèrent les plus pratiques, et en particulier le solaire pour produire l'électricité par la technologie photovoltaïque. Il faut reconnaître que cette dernière présente un certain nombre d'inconvénients, d'une part, le rendement des modules n'est pas tout à fait optimal et dépend de nombreux facteurs (orientation, inclinaison, conditions climatiques, etc.), et d'autre part le photovoltaïque requiert de la haute technologie et demande donc des investissements importants, essentiellement en matière de production.

- D'après les informations recueillies de la recherche théorique, la plupart des chercheurs et installateurs considèrent que :
- Les conditions climatiques influent sur le rendement des capteurs soit thermiques ou photovoltaïque ;
- La haute température influe sur l'efficacité des capteurs photovoltaïques en abaissant sa production ;

Conclusion générale

- L'orientation optimale est toujours en plein Sud, avec possibilité d'orienter en Sud-est et Sud-ouest de 30° ;
- L'inclinaison des capteurs dépend du besoin du quotidien, elle est considérée comme optimale avec : latitude + 10° ;
- L'intégration des capteurs au bâtiment démontre une grande liberté, nécessitant juste une réflexion pour assurer son homogénéité et son esthétique à travers ses éléments constructifs (verrière, façade vitrées, élément de toiture, etc.) ils remplacent ainsi des éléments de construction standard en conférant à la réalisation finale une qualité esthétique certaine. Des capteurs peuvent être de caractère multifonctionnel pour produire l'électricité (photovoltaïque) et contribuer au chauffage du bâtiment par récupération de la chaleur.
- D'après les résultats obtenus par la simulation en utilisant le logiciel TRNsys, on a pu confirmer les critères qui influent sur l'efficacité des capteurs photovoltaïques :
 - Les panneaux photovoltaïques proposés dans les régions de Batna et Annaba, considérées comme zones à climat tempéré, sont plus efficaces et productifs que ceux proposés dans la région de Biskra considérée comme zone semi-aride à climat chaud à haute insolation;
 - L'orientation en plein Sud est la plus optimale que celle Sud-est et Sud-ouest à 30° ;
 - L'inclinaison à 30° pour produire l'électricité pendant la saison de grande chaleur est la plus optimale que celle à 45° ;
- D'après l'entretien tenu au centre de recherche en énergie renouvelable de Bouzeréah avec le directeur de recherche, une décision a été fixée par les responsables pour produire 40% de la consommation nationale en énergie électrique par des sources renouvelables et ce d'ici l'an 2030, ce programme sera financé par 1% du revenu de pétrole, ce qui démontre une volonté de la part des hauts responsables pour diversifier l'exploitation des sources énergétiques, moins de sources fossiles et plus de sources renouvelables.

Des expériences ont été appliquées :

- dans le grand désert (Illizi et Tamanrasset) en équipant 20 villages en photovoltaïques ;
- l'équipement en capteurs thermiques et panneaux photovoltaïques des stations de services le long de l'autoroute Est-Ouest ;
- Une centrale a été programmée à Rouïba ;

Conclusion générale

Dans ce contexte, il semble nécessaire que plus de mesures devraient être prises au niveau politique pour favoriser les recherches dans ce domaine, et inciter les consommateurs à y investir.

Des démarches financières et des campagnes d'information et de sensibilisation afin de faire connaître au public les différentes possibilités de réalisation que représente la conversion directe du rayonnement solaire en énergie soit en chaleur ou en électricité.

En effet le solaire représente une solution parmi d'autres pour répondre à la fois à la consommation énergétique importante de nos bâtiments et au danger que peut représenter une telle consommation sur notre environnement (émission de CO₂, déchets nucléaires, etc.). Sera-t-il, à long terme, une réelle solution écologique et économique ? Certains paramètres nous le font espérer. Cependant, il reste beaucoup de choses à accomplir au niveau technique et des interrogations sont toujours présentes pour affirmer que le solaire possède un réel avenir.

Listes des :

Figures, tableaux, graphes, photos

Liste des figures (partie-chapitre-numéro)

- Fig. (I-I-1)-** Diagramme solaire simplifié : course de l'équinoxe et des solstices d'une altitude LAT. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-I-2)-** Diagramme solaire de la latitude 45° Nord: courses mensuelles avec indication des positions horaires. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-I-3)-** Diagramme solaire de la latitude 0 (équateur): la moitié de l'année, le soleil évolue dans le quart de sphère opposé à celui de l'autre moitié de l'année, la durée du jour est de 12h. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-I-4)-** Diagramme solaire de la latitude 66°33 Nord (cercle polaire) : particularité au solstice d'été le soleil ne se couche pas. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-I-5)-** Projection angulaire de la course solaire. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-I-6)-** Projection sphérique : Position de l'horizon et du zénith. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-I-7)-** Eclairage énergétique du plan vertical orienté au Sud sous la latitude 45°N. (Source Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture, Marc-André VELAY-DABAT, Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, édition 2004)
- Fig. (I-II-1)-** Système passif (source, (1)- Microsoft® Encarta® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation).
- Fig. (I-II-2)-** Structure d'un système de conversion thermodynamique.
- Fig. (I-II-3)-** différentes formes de captation des rayonnements solaires (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-4)-** Schéma simplifié d'un capteur solaire plan à air (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-5)-** coupe d'un absorbeur à corps noir invisible (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

- Fig. (I-II-6)-** schématisation de l'effet de serre avec deux vitrages. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-7)-** Plaque de polycarbonate alvéolaire à double à triple et à multiple paroi transparente. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-8)-** Isolation thermique du boîtier (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-9)-** schéma simplifié d'un capteur à absorbeur poreux (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-10)-** Différents types d'absorbeurs à géométrie variable (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-11)-** Absorbeurs en forme de nid d'abeille (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-12)-** différents types d'écoulement. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-13)-** capteur solaire plan à air muni de chicane. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-14)-** impact de l'air en présence des chicanes (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-15)-** Disposition en rangée et en quinconces des chicanes dans la veine d'air mobile (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-16)-** Chicanes rectangulaires, triangulaire et en forme d'ogive (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-17)-** Visualisation de l'écoulement d'un jet de fumée dans un capteur sans chicanes (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-18)-** Visualisation de l'écoulement d'un jet de fumée dans un capteur en présence de chicanes triangulaires (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Fig. (I-II-19)-** Installations non-évolutives sauf changement d'onduleur.
- Fig. (I-II-20)-** Installations évolutives
- Fig. (I-II-21)-** Grandes installations

- Fig. (I-III-1)-** installation du capteur PV dans un endroit masqué.
- Fig. (I-III-2)-** installation du capteur sur une toiture de faible inclinaison.
- Fig. (I-III-3)-** installation du capteur sur une toiture à forte inclinaison.
- Fig. (I-III-4)-** installation du capteur sur un volume du bâtiment.
- Fig. (I-III-5)-** installation du capteur sur une toiture inclinée respectant l'axe de la fenêtre.
- Fig. (I-III-6)-** intégration du capteur sur une toiture inclinée respectant l'axe de l'ouverture.
- Fig. (I-III-7)-** intégration du capteur sur une toiture en pente d'un volume du bâtiment.
- Fig. (I-III-8)-** intégration du capteur sur une partie de la toiture en pente d'un bâtiment.
- Fig. (I-III-9)-** intégration du capteur sur une partie de la toiture en pente du bâtiment.
- Fig. (I-III-10)-** intégration du capteur sur une toiture en pente d'un volume du bâtiment.
- Fig. (I-III-11)-** intégration des systèmes et accessoires du capteur sur une toiture en pente.
- Fig. (I-III-12)-** modes d'intégration du capteur sur une partie d'une toiture en pente.
- Fig. (I-III-12)-** exploitation de la totalité de la toiture en pente pour des capteurs solaires.
- Fig. (I-III-13)-** intégration des capteurs solaires sur les gardes corps.
- Fig. (I-III-14)-** intégration des capteurs solaires sur les allèges.
- Fig. (I-III-15)-** intégration des capteurs solaires sur les allèges.
- Fig. (I-III-16)-** intégration des capteurs solaires en auvent et brise soleil sur les ouvertures.
- Fig. (I-III-17)-** intégration des capteurs solaires sur la façade en homogénéité avec les ouvertures.
- Fig. (I-III-18)-** intégration des capteurs solaires la toiture d'une véranda ou de la serre.
- Fig. (I-III-18)-** installation des capteurs solaires sur une toiture terrasse.
- Fig. (I-III-19)-** exemple d'installation des capteurs solaires sur une toiture terrasse.
- Fig. (I-III-20)-** exemple d'installation des capteurs solaires sur la façade comme composant architectural.
- Fig. (I-III-21)-** exemple d'installation des capteurs solaires en auvent d'une entrée ou brise soleil.
- Fig. (I-III-22)-** exemple d'installation des capteurs solaires sur un volume du bâtiment.

Fig. (I-III-23)- installation des capteurs solaires sur le sol.

Fig. (I-III-24)- exemple d'installation des capteurs solaires sur le sol.

Fig. (I-III-25)- installation des capteurs solaires sur le sol.

Fig. (I-III-26)- installation des capteurs solaires sur une dépendance.

Fig. (I-III-27)- exemple d'installation des capteurs solaires sur une dépendance.

Fig. (I-III-28)- exemple d'installation des capteurs solaires sur une dépendance.

Fig. (II-I-1)- situation du village solaire (source. Google earth, 2012)

Fig. (II-I-2)- situation des prototypes du village solaire (source. Google earth, 2012)

Fig. (II-I-3)- vue en plan du prototype 1.

Fig. (II-I-4)- Façades Nord et Sud du prototype 1.

Fig. (II-I-5)- Plan rez de chaussé du prototype 2

Fig. (II-I-6)- Plan 1er étage du prototype 2.

Fig. (II-I-7)- Façade Sud du prototype 2.

Fig. (II-I-8)- Coupe du prototype 2.

Fig. (II-I-9)- vue en plan du prototype 3.

Fig. (II-I-10)- façade Sud du prototype 3.

Fig. (II-II-1)- Interface du TRNSYS studio simulation.

Fig. (II-II-2)- ajout des composants fortran.

Liste des tableaux (partie-chapitre-numéro)

- Tableau (I-II-1).** Coefficient d'absorption α et d'émission ε pour les supports les plus utilisée comme absorbeur. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Tableau (I-II-2)-** Conductivité thermique des matériaux les plus courants. (Source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)
- Tableau (II-II-1)-** besoins en chauffage et climatisation du P1 à Biskra (S. AP. Int.).
- Tableau (II-II-2)-** besoins en chauffage et climatisation du P1 à Biskra (A. AP. Int.)
- Tableau (II-II-3)-** besoins en chauffage et climatisation du P2 à Biskra (S. AP. Int.).
- Tableau (II-II-4)-** besoin en chauffage et climatisation du P2 à Biskra (A. AP. Int.).
- Tableau (II-II-5)-** besoin en chauffage et climatisation du P1 à Batna.
- Tableau (II-II-6)-** besoin en chauffage et climatisation du P2 à Batna.
- Tableau (II-II-7)-** besoin en chauffage et climatisation du P1 à Annaba.
- Tableau (II-II-8)-** besoin en chauffage et climatisation du P2 à Annaba.
- Tableau (II-II-9)-** besoins annuels en froid (climatisation) dans les trois régions (Kwh).
- Tableau (II-II-10)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra, orientation Sud.
- Tableau (II-II-11)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra, orientation Sud-ouest.
- Tableau (II-II-12)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra, orientation Sud-est.
- Tableau (II-II-13)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Biskra.
- Tableau (II-II-14)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Batna, orientation Sud.
- Tableau (II-II-15)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Batna, orientation Sud-ouest.
- Tableau (II-II-16)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Batna, orientation Sud-est.
- Tableau (II-II-17)-** productions en électricité d'un PV de 1m² à Batna.
- Tableau (II-II-18)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Annaba, orientation Sud.
- Tableau (II-II-19)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Annaba, orientation Sud-ouest.
- Tableau (II-II-20)-** production en électricité d'un PV de 1m² à Annaba, orientation Sud-est.

Tableau (II-II-21)- productions en électricité d'un PV de 1m² à Annaba.

Tableau (II-II-22)- Comparaison des productions en électricité d'un PV de 1m² dans les trois régions à 30°.

Tableau (II-II-23)- Comparaison des productions en électricité d'un PV de 1m² dans les trois régions à 45°.

Tableau (II-II-24)- Comparaison des productions en électricité d'un PV de 1m², orientation plein Sud.

Tableau (II-II-25)- besoins en froid du P1 à Biskra et production en énergie des PV.

Tableau (II-II-26)- besoins en froid du P2 Biskra et production en énergie des PV.

Tableau (II-II-26)- besoins en froid du P1 à Batna et production en énergie des PV.

Tableau (II-II-27)- besoins en froid du P2 à Batna et production en énergie des PV.

Tableau (II-II-28)- besoins en froid du P1 à Annaba et production en énergie des PV.

Tableau (II-II-29)- besoins en froid du P2 à Annaba et production en énergie des PV.

Tableau (II-II-30)- Production des capteurs PV en KWh.

Tableau (II-II-31)- Quantité de CO₂ (en gr) évitée d'être dégagée.

Liste des graphes (partie-chapitre-numéro)

Graphe (II-II-1)- Bilan énergétique annuel du P1 sans apports internes à Biskra (KJ/h)

Graphe (II-II-2)- Bilan mensuel à Biskra : P1 sans apports internes (KWh).

Graphe (II-II-3)- Bilan énergétique annuel du P1 avec apports internes à Biskra (KJ/h)

Graphe (II-II-4)- Bilan mensuel à Biskra : P1 avec apports internes (KWh).

Graphe (II-II-5)- Bilan énergétique annuel du P2 sans apports internes à Biskra (KJ/h)

Graphe (II-II-6)- Bilan mensuel à Biskra : P2 sans apports internes (KWh).

Graphe (II-II-7)- Bilan énergétique annuel du P2 avec apports internes à Biskra (KJ/h).

Graphe (II-II-8)- Bilan mensuel à Biskra : P2 avec apports internes (KWh).

Graphe (II-II-9)- Bilan énergétique annuel du P1 à Batna (KJ/h).

Graphe (II-II-10)- Bilan mensuel du P1 à Batna (KWh).

Graphe (II-II-11)- Bilan énergétique annuel du P2 à Batna (KJ/h)

Graphe (II-II-12)- Bilan mensuel du P2 à Batna (KWh).

Graphe (II-II-13)- Bilan énergétique annuel du P1 à Annaba (KJ/h).

Graphe (II-II-14)- Bilan mensuel du P1 à Annaba (KWh).

Graphe (II-II-15)- Bilan énergétique annuel du P2 à Annaba (KJ/h).

Graphe (II-II-16)- Bilan mensuel du P2 à Annaba (KWh).

Graphe (II-II-17)- Besoin annuel en froid dans les régions (KWh).

Graphe (II-II-18)- Besoin en froid par an à la région de Biskra (KWh).

Graphe (II-II-19)- Besoin en froid par an à la région de Batna (KWh).

Graphe (II-II-20)- Besoin en froid par an de la région d'Annaba (KWh).

Graphe (II-II-21)- Production du capteur PV dans la région de Biskra orienté au Sud (KWh).

Graphe (II-II-22)- Production du capteur PV dans la région de Biskra orienté au Sud-ouest (KWh).

Graphe (II-II-23)- Production du capteur PV dans la région de Biskra orienté au Sud-est (KWh).

Graphe (II-II-24)- comparaison de la production de 1 m² de PV à Biskra (KWh).

Graphe (II-II-25)- Production du capteur PV dans la région de Batna orienté au Sud (KWh).

Graphe (II-II-26)- Production du capteur PV dans la région de Batna orienté au Sud-ouest (KWh).

Graphe (II-II-27)- Production du capteur PV dans la région de Batna orienté au Sud-est (KWh).

Graphe (II-II-28)- comparaison de la production électrique de 1 m² de PV à Batna (KWh).

Graphe (II-II-29)- Production du capteur PV dans la région d'Annaba orienté au Sud (KWh).

Graphe (II-II-30)- Production du capteur PV dans la région d'Annaba orienté au Sud-ouest (KWh).

Graphe (II-II-31)- Production du capteur PV dans la région d'Annaba orienté au Sud-est (KWh).

Graphe (II-II-32)- comparaison de la production de 1 m² de PV à Annaba (KWh).

Graphe (II-II-33)- Production en électricité de 1 m² de PV incliné à 30° (KWh).

Graphe (II-II-34)- Production en électricité de 1 m² de PV incliné à 45° (KWh).

Graphe (II-II-35)- Production en électricité de 1 m² de PV dans les 3 régions (KWh).

Graphe (II-II-36)- Balances énergétiques du Prototype 1 à Biskra (KWh).

Graphe (II-II-37)- Balances énergétiques du Prototype 2 à Biskra (KWh).

Graphe (II-II-38)- Balances énergétiques du Prototype 1 à Batna (KWh).

Graphe (II-II-39)- Balances énergétiques du Prototype 2 à Batna (KWh).

Graphe (II-II-40)- Balances énergétiques du Prototype 1 à Annaba(KWh).

Graphe (II-II-41)- Apports énergétiques pour la climatisation du P2 à Annaba (KWh).

Graphe (II-II-42)- Production des capteurs PV (KWh).

Graphe (II-II-43)- Quantité de CO₂ en gramme évitée d'être dégagée.

Liste des photos (partie-chapitre-numéro)

Photo (I-II-1)- Capteur solaire plan à air exposé au soleil (Dgm. Univ de Biskra) (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Photo (I-II-2)- Capteur solaire plan à air en expérimentation (Dgm. Univ de Biskra) (source : cours de M. MOUMI Abdelhafid, énergétique 1^{ère} année magister, 2007-2008)

Photo (II-I-1)- forme très simple, compacte.

Photo (II-I-2)- façade Sud, ouvertures de dimensions importante.

Photo (II-I-3)- façade Nord, ouvertures très réduites assurant juste la ventilation.

Photo (II-I-4)- serre avec mur intérieur en pierre pour stocker la chaleur.

Photo (II-I-5)- la serre avec les orifices de ventilation pour les chambres.

Photo (II-I-6)- fentes du mur Trombe permettant la circulation de l'air chaud en hiver.

Photo (II-I-7)- vue d'extérieur du mur trombe

Photo (II-I-8)- système ventilation naturelle des espaces.

Photo (II-I-9)- façade Sud avec des grandes ouvertures pour la serre.

Photo (II-I-10)- vue du côté Sud, définition de 3 espaces : le séjour familial avec la serre au centre et les chambres de part et d'autre avec leurs ouvertures et mur trombe.

Photo (II-I-11)- ouvertures en hauteur, pour captage solaire au séjour.

Photo (II-I-12)- vue du mur d'Ouest totalement aveugle.

Photo (II-I-13)- mur trombe, et réservation pour capteurs solaires.

Bibliographie

Bibliographie

Ouvrages

1. **Alain chatelet, Pierre Fernandez & Pierre Lavigne**, Architecture Climatique - Une contribution au developpement durable (Tome 2 : Concepts et dispositifs), edition EDISUD, Aix-en-provence, 1998.
2. **Alain liebard & André De Herde**, Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bioclimatiques (concevoir, edifier, et aménager avec le developpement durable), edition Le moniteur, France, 2005.
3. **Albert Ducrocq**, victoire sur l'énergie, édition flammarion, France, 1980.
4. **Anne Labouret & Michel villoz**, Energie solaire Photovoltaïque. 3eme edition DUNOD, Paris, 2006.
5. **Anne Labouret & Pascal Cumunel et autres**, cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque, collection ETSF, 4 ème édition, France, 2005.
6. **Benjamin dessus et François Pharabod**, l'énergie solaire, que sais-je ?, édition PUF (presses universitaires de France), Paris, 1996.
7. **Charles Chauliguet**, l'énergie solaire dans le bâtiment, édition Eyrolles, Paris, 1981.
8. **Christian Vauge**, le choix solaire (une énergie qui entre dans la vie quotidienne, édition CNRS, Paris, 1979.
9. **Commission des communautés européennes**, architecture solaire en europe (conception, performances, usages), rapport n°EUR-13094, Edisud, Luxembourg, juin, 1991.
10. **Georges Alexandroff & Alain Liebard**, L'habitat solaire: comment ?, édition l'équerre, Paris, 1979.
11. **Jean Pierre champetier & Loic Hamayon et autres**, traité de construction durable, principes, détails de construction, édition moniteur, France, septembre 2007.
12. **Jean Pierre Ménard**, maisons solaires (premiers bilans), collection architecture « les bâtiments », édition moniteur , Paris, 1980.
13. **J.R.Vaillant**, utilisation et promesses de l'énergie solaire, collection du BCEOM.
14. **Michel Capderou**, Atlas solaire de l'algérie, (aspect énergétique), tome II, édition n°2075, EPAU (école polytechnique d'architecture et d'urbanisme), Alger, 1985.

15. **Michel Tissot**, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, 2 éditions Eyrolles, France 2012.
16. **Michel Tissot**, guide de l'énergie solaire et photovoltaïque, groupes Eyrolles, France, 2008
17. **Mostefa Boudiaf & Michel Capderou et autres**, étude thermique des trois prototypes du village solaire intégré, édition CRAU (centre de recherche d'architecture et d'urbanisme), 1983.
18. **Patrick Rousseaux & Tiberiu Apostol**, valeur environnementale de l'énergie, édition presses polytechniques et universitaires romande, Lyon, 2000.
19. **Pierre Fernandez & Pierre Lavigne**, concevoir des bâtiments bioclimatiques (fondements et méthodes), édition moniteur, Paris, 2009.
20. **Pierre Lavigne & Pierre Lavigne, Paul Brejon**, Architecture climatique- Une contribution au développement durable (Tome 1 : Bases physiques), édition EDISUD, Aix-en provence, 1994.
21. **Theirry Cabriol & Daniel Roux**, chauffage de l'habitat et énergie solaire, tome I, édisud, Aix en provence, 1982.
22. **Theirry Cabriol & Daniel Roux**, chauffage de l'habitat et énergie solaire, tome II, édisud, Aix en provence, 1984.

Mémoires

23. **Ben Guehza Mohamed Lakhdar**, impact de l'espace entre les deux vitrages sur le rendement d'un capteur solaire, mémoire de magister, sous-direction du Pr Abdnacer Kaabi, université Kasdi Merbah, Ourgla, 2009.
24. **Boukhers Djamil**, optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque, application au pompage, mémoire de magister en électrotechnique, sous-direction de A.Bouزيد, Constantine, 2007.
25. **Chiba Younes**, étude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire, mémoire de magister, sous- direction du Dr S. Saouli, faculté des sciences de l'ingénieur, Constantine, 2005.
26. **Clarence Semassou**, aide à la décision pour le choix des sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins de Bénin, thèse de doctorat, sous-direction de J.P. Nadeau, école doctorale de sciences physiques pour l'ingénieur, université de Bordeaux, 2001.
27. **Gobbo Emilie**, architecture et photovoltaïque (intégration des modules photovoltaïque en architecture, mémoire de fin d'étude d'architecte, institut d'architecture Saint Luc, Bruxelles, 2006.
28. **Hatem Djeghaba**, a passive solar village as an instrument for rural développement in Alegria, master de philosophie, département des sciences et construction, université de Sheffield, 1987.
29. **Lopez Varela Jonathan**, faut-il passer à l'énergie solaire pour l'ECS en rénovation, mémoire de fin d'étude d'architecte, institut supérieur d'architecture intercommunal Victor Horta, Bruxelles, 2004.
30. **Magri el Ouadjeri Sahar**, rapport entre éclairage naturel et confort thermique dans les milieux à climat chaud aride (proposition d'une typologie de dispositifs architecturaux), mémoire de magister, option architecture et environnement encadré par Boussoualim.A, EPAU, Alger, mars 2006.
31. **Miloudi Lalia**, étude et simulation de la poursuite de la trajectoire d'un soleil par un panneau solaire photovoltaïque, mémoire de magister, sous-direction du Dr Acheli Dalila, université M'hamed Bougara, Boumerdes, 2011.

32. **Otten Véronique**, habitations solaires en Belgique (étude de trois exemples et facteurs d'influence psychologiques et climatiques), institut supérieur d'architecture intercommunal Victor Horta, Bruxelles, 1995.
33. **Said Mazouz**, a study of passive solar design strategies and their integration in the process of housing design, master de philosophie, département d'architecture, Oxford polytechnique, septembre 1988.

Revues

34. Guide régional pour l'intégration architecturale des capteurs solaires, édition ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), délégation régionale, Languedoc-Roussillon.
35. La marsa (Tunis-Tunisie), 10^{ème} journée internationale de thermique, revue internationale des énergies renouvelables, n°1112-2242, 1998.
36. **S.E Laouini&B.Ben Haoua et autres**, étude expérimentale et développement d'un bassin d'eau utilisé comme capteur solaire, revue des sciences fondamentales et appliquées, n° 159/173, vol 2, centre universitaire d'el Oued, 2010 ;

Séminaires

37. SOTEHI Oualid, Comportement Energétique des capteurs hybrides PV/T à eau intégrés dans les bâtiments algériens, séminaire sur l'énergie, Alger, 25-27 mars 2012.
38. Villes (dynamiques, climat et environnement, septième colloque du département de géographie, manouba, mars, 2008.

Documents électroniques

Audit-solaire-de-la-maison-de-repos-la-charmille-a-Gembloux [2].PDF

concpt-energie.pdf

Ensoleill2004.pdf

Guide-Capteurs-Solaires.pdf

Memento%20HQE%20facade%20legere.pdf

PHOTOVOLT.pdf

photovoltaique.pdf

Solaire thermique.pdf

Annexe

Annexe

- D'après l'entretien tenu au centre de recherche en énergie renouvelable de Bouzereah avec M. A. KHELLAF (PhD) directeur de recherche, une décision a été fixée par les responsables et particulièrement M. le président de la république d'ôter 1% du revenu du pétrole afin de financer un programme pour produire 40% de la consommation nationale en énergie électrique par des sources renouvelables et ce d'ici l'an 2030, ce qui démontre une volonté de la part des hauts responsables pour diversifier l'exploitation des sources énergétiques, moins de sources fossiles et plus de sources renouvelables.

Pour l'équipement des bâtiments en Algérie quelques expériences ont été appliquées :

- Pour les bâtiments administratifs ou autres les applications se font rares, et restent en phase de recherches théoriques par quelques étudiants de l'université algérienne ou bien les chercheurs du centre qui s'intéressent plus à développer les cellules photovoltaïques pour améliorer leur efficacité qui ne dépasse pas les 12% des rayons solaires reçus et qui est réduite à 10% sous l'influence de la chaleur produite par 88% du reste du rayonnement solaires absorbés par le capteur ;
- Dans le grand désert (Illizi et Tamanrasset) la sonelgaz a osé prendre l'initiative en équipant 20 villages en panneaux photovoltaïques pour le pompage de l'eau des puits ou bien le besoin en électricité pour la population, donc la création de micro centrales pour alimenter un groupement de trois maisons, chacune a droit à 2 kWh/jour avec un système de stockage et leur donnant la possibilité d'éclairer 1 lampe, actionner un ventilateur et fonctionner une télévision ou une radio, tout en les chargeant de l'entretien du système et assurer sa durabilité ;
- L'équipement des stations de services le long de l'autoroute Est-Ouest en capteurs thermiques et panneaux photovoltaïques pour les alimenter en électricité et produire l'eau chaude ;
- Une centrale solaire a été programmée a Rouïba dans le cadre des perspectives traces par l'état ;