Etude, conception et réalisation d'un chauffe eau solaire.
Étude technico-économique

Auteurs: Gama Fatiha, Chekired Fathya, Aouchiche Nedjma; Prof. C.E.Chitour.
Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles. E.N.Polytechnique. 10 avenue Hassen Badi. Belfort.

Résumé:

Dans le cadre de ce travail on c'est proposer de faire l'étude et la réalisation (sous forme de programme) d'un logiciel de dimensionnement d'un chauffe-eau solaire. La méthode de dimensionnement doit être capable de gérer tous types d'installations individuel ou collectifs, le logiciel réalisé permettra d'autre part d'apporter une estimation du coût de l'installation ainsi que le temps d'amortissement de l'investissement.

Après une étude bibliographique sur le sujet, on a procédé à la programmation de la méthode de dimensionnement on s'appuyant sur des données de rayonnement considérant le cas de l'Algérie, ensuite on a réalisé la partie du logiciel concernant l'évaluation du coût adaptée au marché algérien actuel. L'intérêt de ce travail réside; de manière générale, dans sa contribution à la production de qualité avec un coût réduit, les tests entrepris pour vérifie la fiabilité du logiciel, montrent que le programme de travail défini initialement a été réalisé dans son ensemble. Les résultats obtenus sont satisfaisants et ne constituent qu'une partie d'un vaste domaine.

Summary:

In this work we propose to study and realized (in the form of program) a software to dimensioning a solar heat water. The dimensioning method must be able to manage all types of installations individual or collectives, the software realized will allow to make an estimate of the cost of the installation as well the time of damping of the investment.

After a bibliographical study on the subject, we process the programming of the dimensioning method we being based on data of radiation considering Algeria, and then we realized the part of the software relating to the costing adapted to the current Algerian market. The interest of this work resides; in a general way, in its contribution to the production of quality with a reduced cost, the tests undertaken for checks the reliability of the software, show that the program of work defined initially was carried out as a whole. The results obtained are satisfactory and constitute only part of a vast field.

Sommaire:

1. Introduction
2. Généralités
   2.1. Les énergies renouvelables
   2.2. L'énergie solaire
   2.3. Les applications de l'énergie solaire
   2.4. L'énergie solaire thermique à travers le monde
3. Le chauffe eau solaire
   3.1. Principe de fonctionnement d'un chauffe eau solaire
   3.2. Les types de chauffe eau solaire
   3.3. Les principaux composants d'un chauffe eau solaire
   3.4. Les types de capteur solaire
   3.5. L'appoint énergétique
   3.6. Le système solaire collectif

3.7. Le coût des chauffes eau solaire
3.8. L'impact environnemental
4. L'énergie solaire en Algérie
4.1. La consommation énergétique mondiale
4.2. La consommation du gaz naturel et de l'électricité en Algérie
4.3. Comparaison des agents énergétique pour la production d'eau chaude
4.4. Avantage des chauffes eau solaire
4.5. Le bilan des énergies renouvelables en Algérie
4.6. Les ressources solaires en Algérie
4.7. Le solaire thermique en Algérie
4.8. Perspectives d'évolution de la consommation finale d'énergie en Algérie

5. Réalisation d'un logiciel de dimensionnement
5.1. La méthode de calcul utilisée par le logiciel
5.2. L'organigramme générale du programme
5.3. La description du logiciel
5.4. Les tests établis et les résultats obtenus
5.5. Validation et interprétation des résultats
6. Etude économique d'un chauffe eau solaire
7. Conclusion
8. Bibliographie

1. Introduction

Les besoins énergétiques de l'humanité n'ont pas cessé de croître avec son évolution: on a utilisé d'abord des ressources naturelles telle que le charbon, le bois et par la suite avec le progrès scientifique, le pétrole, le gaz, l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire. Actuellement les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature et selon les estimations, les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au plus tard vers 2100 si des efforts sont fournis concernant la production et la consommation nécessaire. Cette forme d'énergie étant limité dans le temps, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser d'autres sources d'énergies, tout en tenant compte des factures économiques et environnementales.

L'énergie solaire qui est l'objectif de notre étude se caractérise par une absence de pollution et une disponibilité exceptionnelle. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême au conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion,.....etc.), et donc une grande longévité, il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

Cette source d'énergie est utilisée de manières différentes, par exemple; dans les systèmes thermiques (chauffes-eau solaires), pour la production d'eau chaude, domaine où elle connaît un développement considérable particulièrement dans le secteur de l'habitat.

Le dimensionnement des systèmes à chauffe-eau solaires occupe une fonction déterminante, en effet la gestion de cet élément est fonction de plusieurs paramètres :
- Les besoins de l'utilisateur en quantité d'eau chaude ;
- La température de l'eau chauffée ;
- Les conditions climatiques locales ;
- Les performances du système à capteurs plans.

2. Généralités

2.1. Les énergies renouvelables

Les énergies dites renouvelables sont celles qui proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles ne sont pas limitées dans le temps, tant que le soleil brillera (c'est-à-dire encore pendant 5 milliards d'années environ). Elles sont par contre limitées en puissance disponible. Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme [01]. Leur relatif, faible impact, sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche.

2.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire présente certains avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques, elle est : locale, gratuite, propre, silencieuse et durable. Les premières tentatives d'exploitation de l'énergie solaire utilisaient l'interaction rayonnement matière, c'est-à-dire l'échauffement d'un corps noir au soleil. [02]

L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser. Aujourd'hui, nous captons l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau, et pour produire de l'électricité, et cela au moyen de trois différentes méthodes et technologies: l'énergie photovoltaïque, l'énergie solaire passive et l'énergie solaire active.

2.2.1. Le soleil

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (système solaire auquel la terre appartient), le soleil n'est qu'une étoile parmi tant d'autres dans notre galaxie, sa lumière met 8mn et 18s pour parvenir sur terre. Le soleil est une énorme sphère incandescente de plasma à la température voisine de 5750K dont le diamètre atteint 1391000km, la puissance émise par ce dernier est estimée à $1,7*10^{23}$kW dont une partie atteint le globe terrestre, elle est de l'ordre de $8,5*10^{13}$kW; uniquement 70% (environ $6*10^{13}$kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère.

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25jours, le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. (Figure1) C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147millions de km et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée : 152millions de km, la distance moyenne étant de 149,5millions de km, la terre coupe le plan perpendiculaire au grand axe de son orbite et contenant le soleil aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre). [03] Elle tourne sur elle-même avec une période de 24h, son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle de 23°27' avec la normale au plan de l'écliptique.

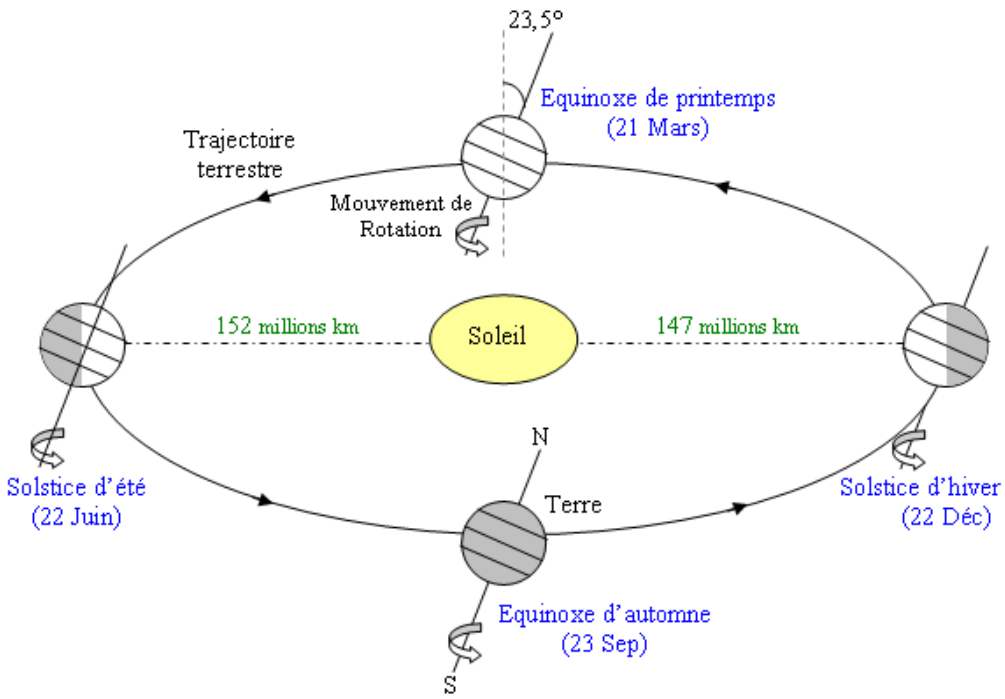


Figure1: Les mouvements de la terre autour du soleil. [04]

2.2.2. Le rayonnement solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde variant de 0,22µm à 10µm, la figure2 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour $\lambda \leq 0{,}3\mu m$ le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre 0,3 et 0,7µm l'absorption par l'atmosphère est faible. [05]

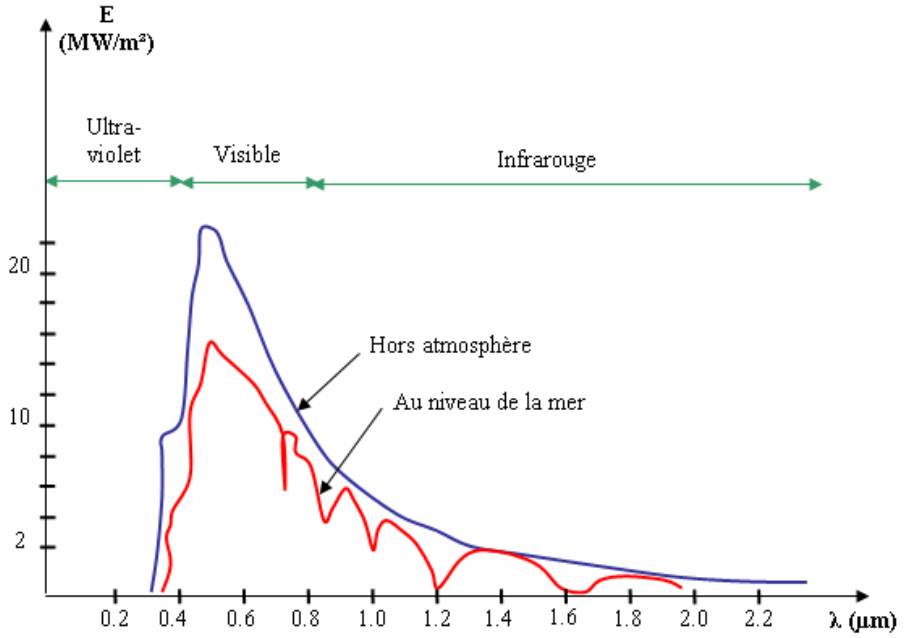


Figure2: La répartition spectrale du rayonnement solaire. [05]

On décompose le rayonnement global (total) terrestre en rayonnement direct (rayonnement provenant directement du soleil) et en rayonnement diffus (rayonnement provenant de l'atmosphère); Un capteur incliné d'un angle donnée sur l'horizontale subit une autre composante du rayonnement : la part renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par le sol ; (Figure3)

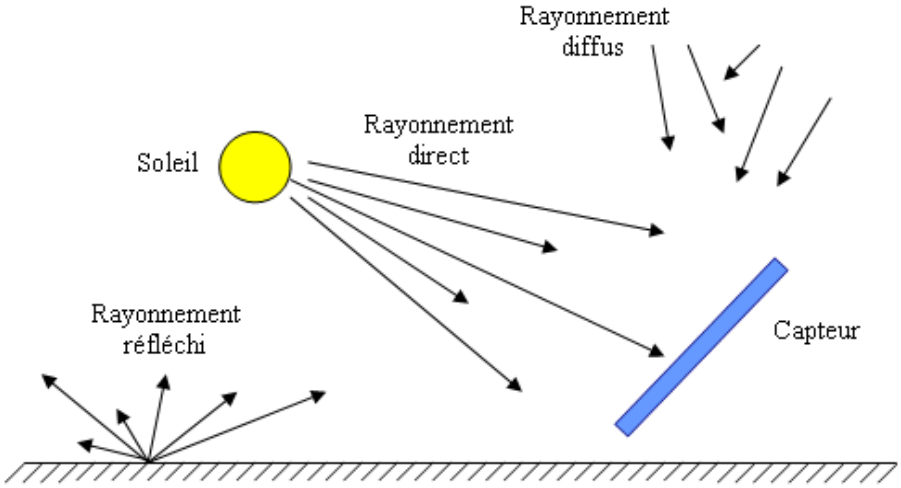


Figure3: Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur. [06]

2.2.3. Le potentiel solaire

Les sources d'énergie renouvelable dans les pays bord de la méditerranée seulement peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. En effet la ressource d'énergie la plus importante dans les ces pays est l'irradiation solaire, avec un potentiel qui peut satisfaire la demande en l'électricité du monde entier. Cette ressource peut être employée dans les systèmes photovoltaïques comme dans les systèmes thermiques. [07]

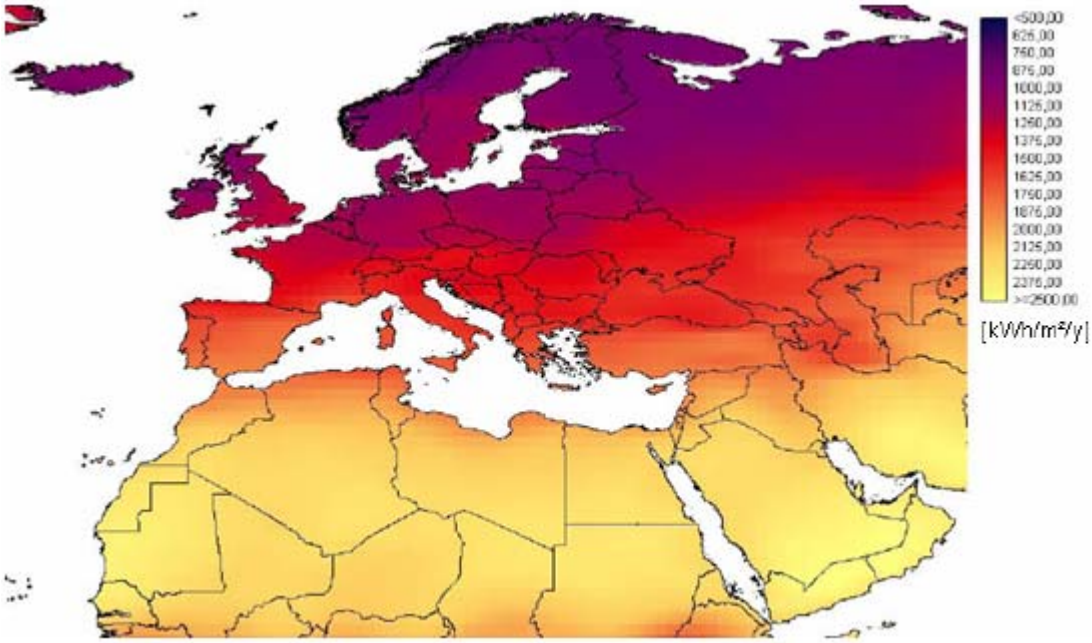


Figure4: Les ressources solaires dans les pays méditerranéens. [08]

2.3. Les applications de l'énergie solaire

2.3.1. Le solaire passive

Le terme passif renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie, ces techniques misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire plutôt que sur de l'équipement mécanique. Aujourd'hui, la conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble (les murs, la toiture et les fenêtres) pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue. La conception solaire passive aide aussi à conserver la fraîcheur en été. [09]

2.3.2. Le solaire active

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de l'électricité afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud, tell que les systèmes à chauffe eau solaire qui utilisent les capteurs plan vitrés ou non vitrés pour chauffé de l'eau, ou le chauffage des locaux et la ventilation solaire qui utilisent aussi des capteurs vitrés ou un bardage perforé pour chauffer l'air. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales électriques solaires.

La concentration du rayonnement solaire sur un foyer permet d'atteindre des températures élevées, ce principe utilise des capteurs cylindro-paraboliques (Figure5.a), paraboliques (Figure5.b) ou des centrales à tours (Figure5.c), pour lesquels une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur le récepteur, il permet le réchauffement de fluides caloporteurs, en général du l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 800°C, selon les techniques utilisées, ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne une alternateur; comme dans les centrales thermiques conventionnelles, pour produire de l'énergie électrique.[10]

a

b

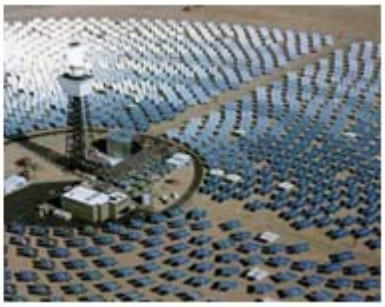

c

Figure5: Photos prises pour des systèmes thermodynamiques réalisés à travers le monde. [11]
A: Les systèmes à collecteur cylindro-paraboliques, B: Le collecteur paraboliques, C: Les centrales à tours.

2.3.3. Le solaire photovoltaïque

Le processus photovoltaïque transforme l'énergie de rayonnement du soleil en courant électrique continu.

Le physicien Edmond Becquerel a décrit l'effet en 1839, mais ce n'est que vers le milieu et la fin des années 1950 que des cellules photovoltaïques pratiques ont été commercialisées. [09]

Figure6: Photo prise pour une installation photovoltaïque.

2.4. L'énergie solaire thermique dans le monde

2.4.1. La capacité thermique installée à travers le monde

Les énergies renouvelables sont devenus un élément significatif de l'économie mondiale, ils totalisent une puissance de 190 GW, soit 4% de la puissance énergétique dans le monde. [12] Selon les statistiques de l'année 2005, la capacité en solaire thermique installée dans le monde avait atteint 115 GWth (164 millions de m^2) (figure7), comparé à d'autres sources d'énergies renouvelables le solaire thermique se trouve classé en deuxième position après l'éolien (120 GWth), à satisfaire la demande mondiale croissante en d'énergie. [13]

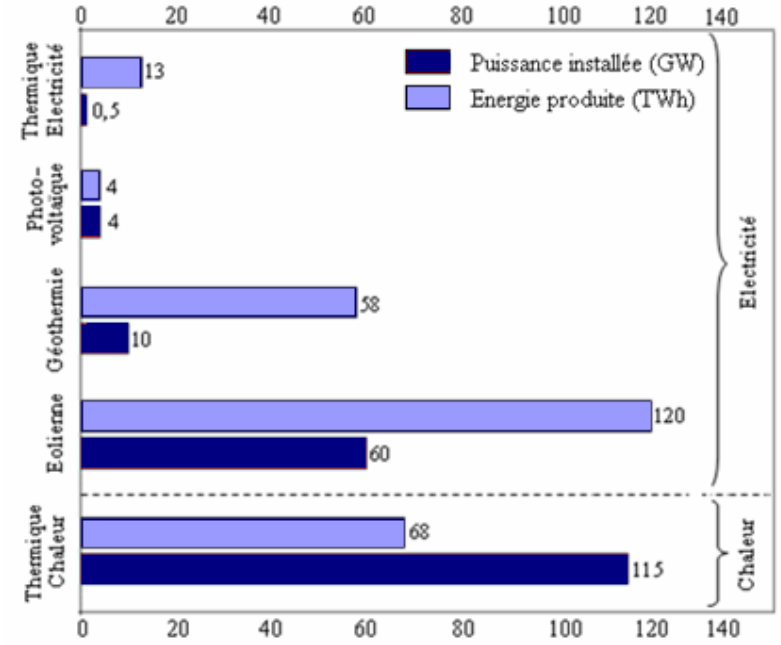


Figure7: La puissance installée et l'énergie annuelle produite en énergies renouvelables dans le monde.

Depuis le début des années 90, le marché du solaire thermique a subi un développement favorable, à la fin de l'année 2004, un total de 141 millions de m^2 de capteurs (98.4 GWth) ont été installés dans le monde entier, Ceci est équivalent à 9,3 milliards de litre de pétrole. [13] La capacité installée varie d'une manière considérable d'un pays à un autre (figure8), la Chine et le Taiwan sont leaders (44%) avec une capacité installée de 43,4 GWth et c'est les capteurs sous vide qui prennent l'initiative, en second vient l'Amérique du Nord (les Etats-Unis et le Canada) où le chauffage des piscines est dominant avec une capacité installée de 18,8 GWth des capteurs non vitré, tandis que le Japon est classé troisième avec 5,4 GWth des capteurs plan vitré, les pays européen tous rassemblés totalisent une capacité de 10,8 GWth.

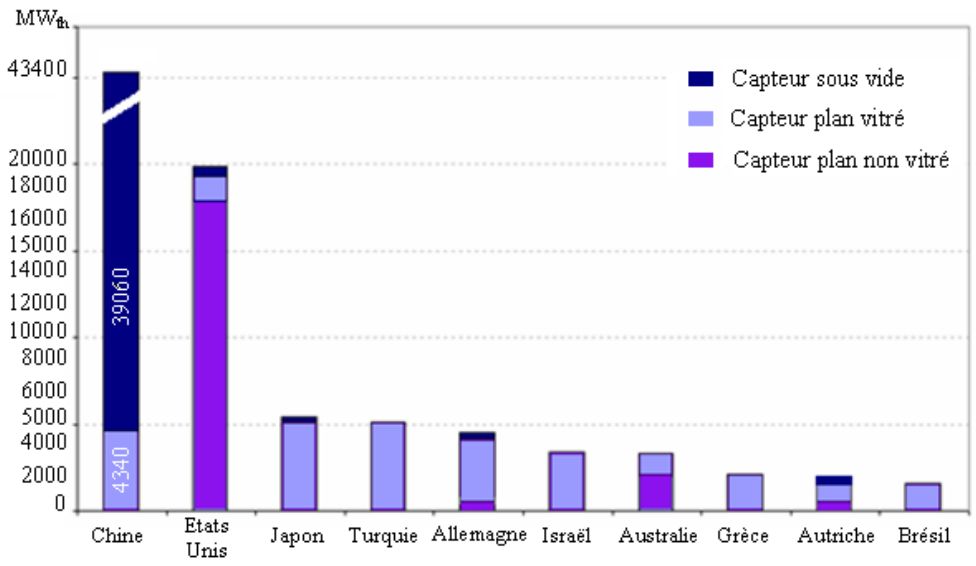


Figure8: La puissance thermique installée dans le monde par les dix pays leaders (fin 2004).

Selon le type de technologie (figure9), le parc mondial de capteurs solaires peut être divisé de la manière suivante: la capacité totale est de 98,4 GWth (141 millions de m^2) [13] avec 74,3 GWth pour les capteurs plan vitrés et les capteurs sous vide qui sont utilisés pour produire de l'eau chaude et pour le chauffage des locaux et 23,1 GWth pour les capteurs non vitrés, qui sont utilisés principalement pour le chauffage des piscines. En terme de surfaces [12], les capteurs sous vide avec 58 millions de m^2 représentent 41% du marché et les capteurs plans vitrés avec 49 millions de m^2 (35%), puis les capteurs non vitré avec 33 millions de m^2 (33%) et les capteurs à air avec 1 millions de m^2 (1%).

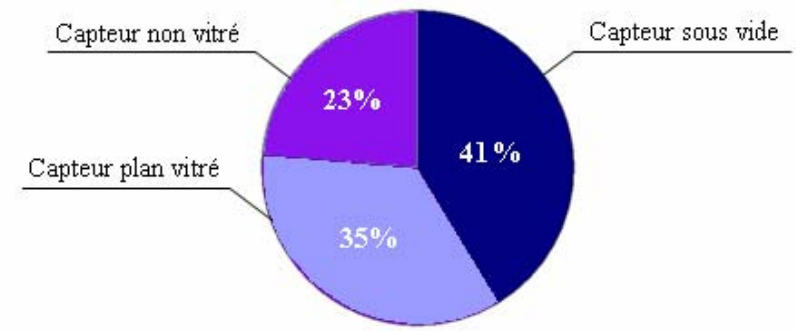


Figure9: La capacité en solaire thermique existante dans le monde par type de collecteur (fin 2004).

2.4.2. La puissance installée en Europe

En Europe la capacité énergétique nominale du parc des capteurs solaires thermiques est évaluée à 11 millions de kWth selon les statistiques de l'année 2005. La croissance annuelle moyenne du marché est de 13% depuis 1990, en se référant aux années 2000; le marché du solaire thermique a bénéficié d'une capacité installée de 1 million de m^2 par an, de ce fait le marché a beaucoup plus que doublé comparé à la moitié des années 90 [14]. Selon les même statistiques, la nouvelle capacité installée en solaire thermique en Europe en 2005 à dépassé les 2 millions m^2 (1400 MWth) (figure10), il est estimé que 37 millions de m^2 de capteurs solaires thermiques seront installés en Europe à l'horizon 2010 [12], soit 91m^2 pour 1000 habitants.

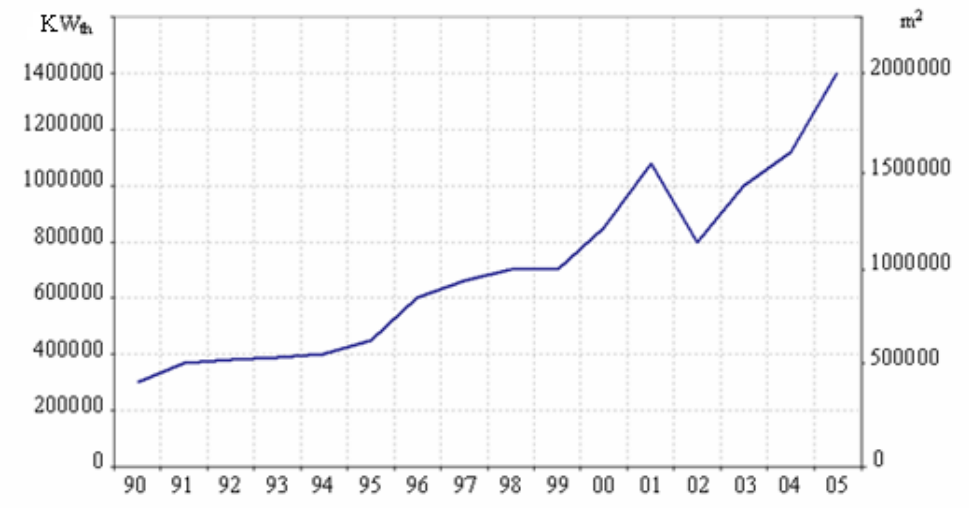


Figure10: L'évolution de la capacité installée en solaire thermique par an en Europe.

Selon les statistiques de l'année 2005, l'Allemagne est classée première (figure11), en terme de capacité installée et énergie annuelle produite avec 6,5 millions de m² (4,5 GW_{th}), la Grèce est classée en second position avec 3 millions de m² (2,1GW_{th}), ensuite vient l'Autriche avec 2 millions de m² (1,6GW_{th}), L'Espagne avec 0,52 millions de m² (0,36GW_{th}), Et l'Italie avec 0,51 millions de m² (0,36GW_{th}), et enfin Chypre avec 0,5 millions de m² (0,35GW_{th}).

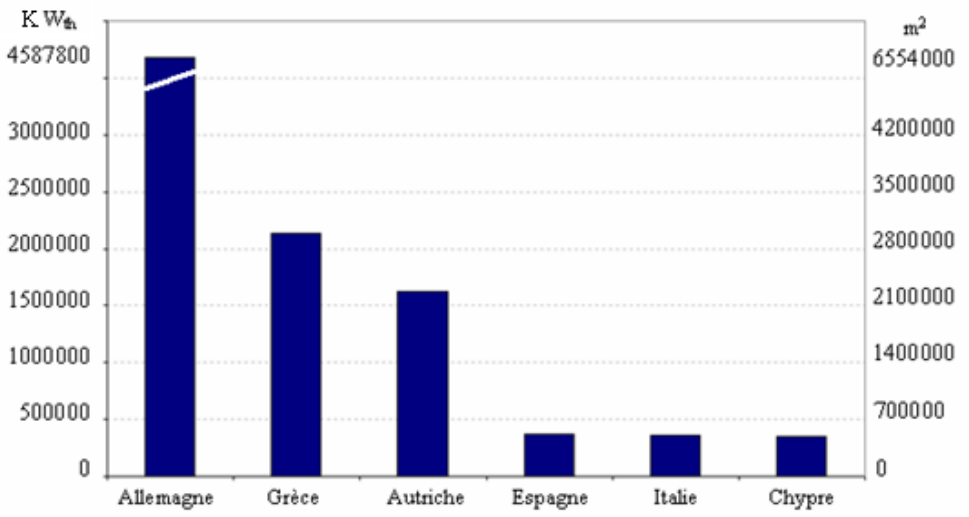


Figure11: Les pays leader en solaire thermique selon les statistiques de 2005.

Selon les indicateurs du tableau de la figure12, et ce basant sur les données de l'année 2005, l'ensemble des capteurs solaire thermiques installés sur les toits européens approche les 16 millions de m² (11 175465 KW_{th}); un chiffre essentiellement dû aux marchés allemand, autrichien et grec, cependant, en Espagne et en Italie, des programmes nationaux se mettent en place afin de favoriser l'essor de cette technologie. [05]

Pays	**Surface totale de capteurs (m²)** [14]	**Surface installée /1000 hbts (m²)** [12]	**Marché total en (m²)** [12]	**Puissance installée en (KW_{th})** [14]
Allemagne (DE)	6554000	79	950000	4587800
Autriche (AT)	2318958	286	233470	1623271
Belgique (BE)	68483	7	20234	47938
Chypre (CY)	500200	715	50000	350140
Danemark (DK)	336980	67	21250	235886
Espagne (ES)	527166	13	106800	369016
Estonie (EE)	820	0,6	250	574
Finlande (FI)	13980	3	2000	9786
France (FR)	395600	7	121500	276920
Grèce (GR)	3047200	272	220500	2133040
Hongrie (HU)	5250	0,5	1000	3675
Irlande (IE)	10790	3	3500	7553
Italie (IT)	516285	9	72000	361400
Lettonie (LV)	2650	0,7	500	1855
Lituanie (LT)	2150	0,8	1000	1505
Luxembourg (LU)	13400	27	1900	9380
Malte (MT)	19360	49	4000	13552
Pays Bas (NL)	303756	19	20248	212629
Pologne (PL)	137520	4	35000	96264
Portugal (PT)	160950	15	16000	112665
Rép. Tchèque (CZ)	65900	4	8500	46130
Royaume-Uni (UK)	196920	3	28000	137844
Slovaquie (SK)	64250	12	7500	44975
Slovénie (SI)	102400	51	4800	71680
Suède (SE)	208390	23	22621	145873
Suisse (CH)	391592	53	39132	274114
Europe (EU)	**15 964950**	**35**	**1 998755**	**11 175465**

Figure12: La puissance installée des capteurs solaires thermiques en Europe (fin 2005).

2.4.3. Exemples de pays développés

- **La chine**

Durant ces dernières années, la demande énergétique chinoise à augmenter d'une manière considérable, la Chine est devenu; en ci peu de temps, le deuxième consommateur mondial d'énergie, elle est aussi le premier producteur mondial des polluants atmosphériques, par conséquent l'impact sur l'environnement est très remarquable. Pour faire face à ces problèmes, la Chine c'est lancé dans le développement des énergies renouvelables, notamment le solaire.

La Chine dispose d'importantes ressources solaires, les deux tiers du pays reçoivent 2200 heures de soleil par an [15], de ce fait elle est le premier consommateur et producteur de chauffe eau solaires au monde (80M m^2 installés fin 2005 et prévision de 175M m^2 fin 2010) (Figure13), dont la part du marché progresse de 25 à 30% par an.

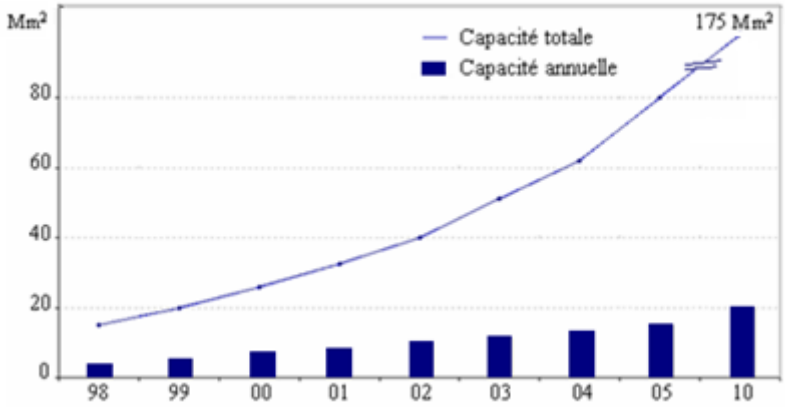


Figure13: Le marché du solaire thermique en Chine et les perspectives d'avenir. [8]

- **L'Allemagne**

L'Allemagne n'est pas vraiment réputée pour son climat ensoleillé et pourtant elle domine le marché européen depuis plusieurs années. En fin 2005 elle comptait sur ses toits une surface installée de capteurs de 6,5 millions de m² [9], soit 0,95 millions de m² de surface ajoutée, (Figure14). Actuellement 4% de l'ensemble des foyers allemands font appel à l'énergie solaire en tant que source de chauffage de l'eau et de locaux.

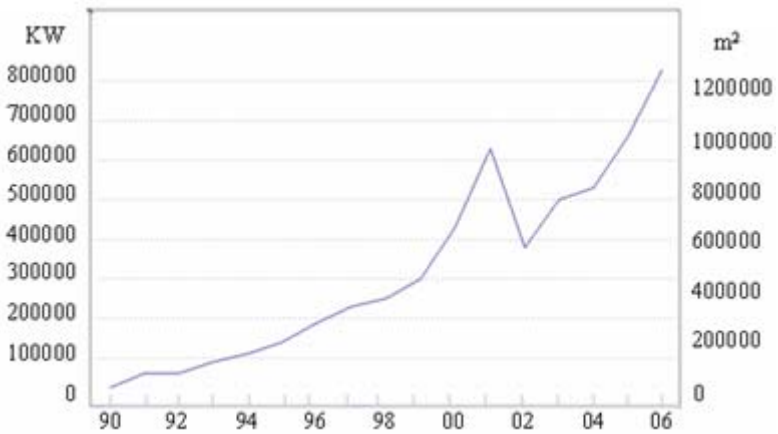


Figure14: Le marché du solaire thermique en Allemagne. [33]

En Allemagne, le marché actuel s'est développé essentiellement pour répondre à la demande des particuliers fortement sensibilisés par les problèmes environnementaux. Ces dernières années, il s'est ainsi développé un nombre croissant de petites installations collectives conçues comme des installations individuelles sur la base de superficies comprises entre 10 et 40m². De plus, depuis 1997, une dizaine de grands systèmes solaires (500 à 3000m² de capteurs) ont été installés. [03]

Le très riche savoir-faire acquis dans le développement des produits, la production, la planification et le montage depuis le début de l'utilisation du solaire thermique dans les années 70, se reflète aujourd'hui dans un éventail complet de systèmes tant efficaces qu'esthétiques. [33]

2.4.4. Exemples de pays en développement

Dans les 20 prochaines années, la croissance démographique fera passer la population du sud de la méditerranée de 200 à 400 millions d'habitants, cette augmentation devrait s'accompagner d'un triplement de la consommation d'énergie [09]. Dans ce contexte, le développement de l'ensemble des énergies locales et renouvelables et, plus particulièrement de l'énergie solaire, doit être favorisé; vu le potentiel énorme dont ils disposent (Figure15), ce développement contribuera à augmenter l'indépendance énergétique d'une part et participera à la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'autre part.

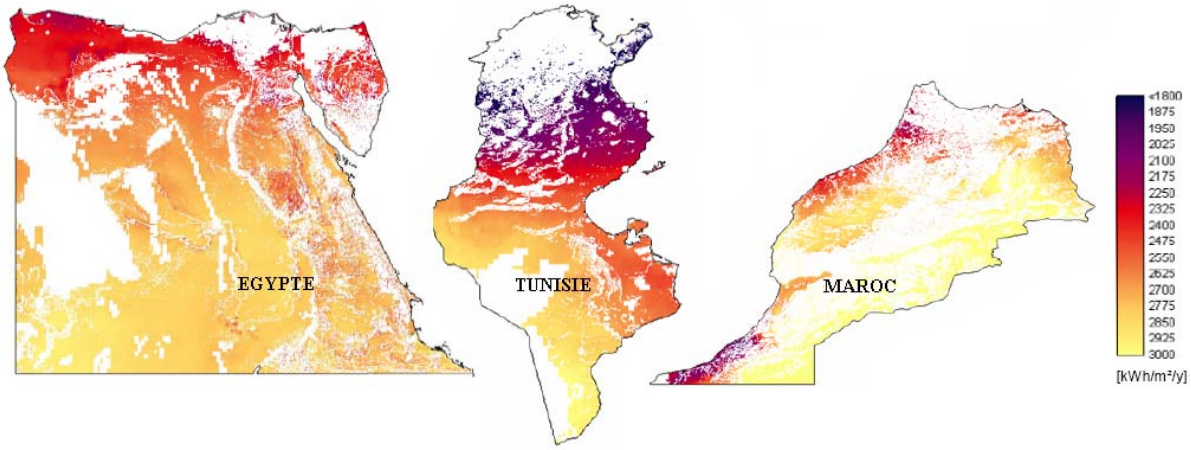


Figure15: Le potentiel solaire dans les pays sud de la méditerranée. [07]

- **L'Egypte**

L'Egypte dispose d'un fort potentiel en énergie solaire, avec un ensoleillement de 2300 à 4000 heures par an, le parc des chauffe-eau solaires été d'environ 100000m^2 à la fin 2004, de ce fait L'Egypte a passer de 180000m^2 en 2000 à 300 000m^2 en 2005 [09] . Deux unités de production d'eau chaude solaire dans l'industrie sont en fonctionnement, la première; depuis 1993, avec une économie de 140 tep/an et depuis 1994; pour la seconde, avec une économie de 320 tep/an. [17]

- **La Tunisie**

Pour diminuer ses importations d'énergie et exploiter son ensoleillement, la Tunisie s'attache à renforcer la place de l'énergie solaire en favorisant notamment l'installation de chauffe-eau solaires. Depuis 1997, un programme de diffusion de chauffe-eau solaires a été lancé en Tunisie, il a fait l'objet d'un financement par le FEM géré par la banque mondiale (correspondant à 35 % de l'investissement), complété à hauteur de 5 % par l'état tunisien, [16]

conformément aux objectifs initiaux, ce programme a permis l'installation de 100000m^2 de capteurs jusqu'à 2005, (Figure16).

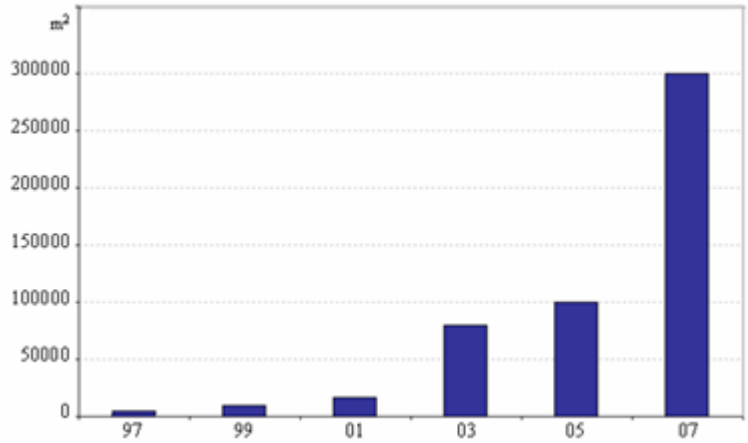


Figure16: Evolution du marché des CES en Tunisie. [18]

Développée initialement dans le secteur individuel, l'installation de chauffe-eau solaires s'applique actuellement majoritairement au collectif (hôtels, clubs de vacances, hôpitaux…), en ce moment les marchés individuels et collectifs sont en forte croissance. Le programme développement des ERNs adopter par la Tunisie est très rentable non seulement en termes énergétiques, stratégiques, sociaux et environnementaux mais aussi en termes économiques [18]. D'ici 2010 la Tunisie prévoit d'implantation 230000m^2 de capteurs solaires de façon à augmenter la part de l'énergie solaire dans la consommation du chauffage de l'eau sanitaire de 3% à 8%, et cela en abaissant le prix de l'installation de chauffe-eau solaires. [19]

- **Le Maroc**

Le Maroc importateur net de produits énergétiques (importations de plus de 95 % des besoins), prévoit une augmentation considérable de la consommation d'énergie d'ici un avenir proche, passant de 10Mtep en 2000 à 15Mtep en 2010, ces prévisions en inciter le Maroc au développement des énergies renouvelables, tel que l'éolien et le solaire thermique [20]. En 2004 près de 20000m^2 de capteurs solaires thermiques on été installées au Maroc, les objectifs visent à atteindre l'installation de 40000m^2 d'ici 2007, (Figure17), ce qui permettra d'économiser l'importation de 100000tep d'énergie et de réduire l'émission de gaz à effet de serre de 1,3MtC, actuellement le Maroc s'intéresse à créer et enrichir un réseau de distribution et de fabrication de CES et surtout améliorer la productivité de la production de CES.

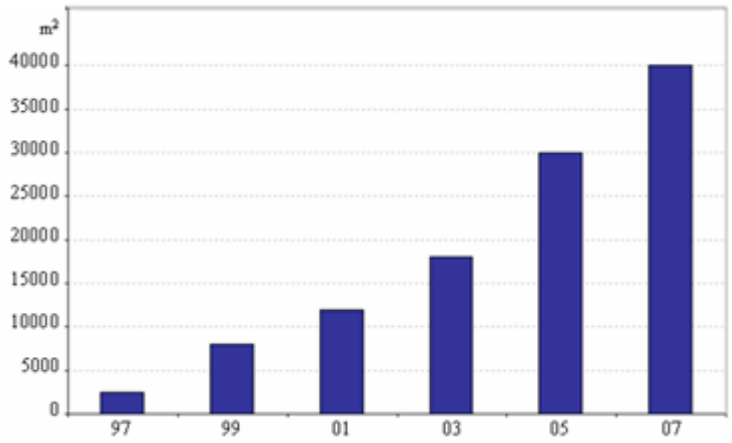


Figure17: Evolution du marché des CES au Maroc. [20]

3. Le chauffe eau solaire

3.1. Principe de fonctionnement d'un chauffe eau solaire

Le chauffe eau solaire individuel est un équipement robuste et fiable, conçu et fabriqué pour tirer le meilleur parti du moindre rayon de soleil. Un CES permet de couvrir 50 à 70% de la demande annuelle d'eau chaude sanitaire d'une famille (et jusqu'à 99% en période estivale). [16] Il assure un ensemble de fonction :

- Captage de l'énergie solaire et conversion du rayonnement en chaleur par les capteurs solaire thermique;
- Transfert de la chaleur des capteurs vers l'eau chaude sanitaire par une boucle fermée à circulation naturelle ou forcée;
- Stockage de l'énergie dans le ballon solaire;
- Distribution de l'eau chaude vers le système d'appoint et les points de puisage.

Le CES doit être préservé des risques de gel et de détérioration par surchauffe, ses différents composants doivent être optimisés pour limités les pertes d'énergie captée et les consommations d'énergie d'appoint. [21]

3.2. Les types de chauffe eau solaire

3.2.1. Monobloc

Relie les capteurs et le ballon dans un seul composant (Figure18), son fonctionnement est autonome et son installation très simple. En effet, il suffit de brancher l'alimentation de l'eau froide et connecter le départ de l'eau chaude à un robinet.

C'est le chauffe eau solaire le moins cher et un grand nombre sont utilisés à travers le monde. Les inconvénients sont dus au ballon qui reste dehors avec les capteurs : Les pertes thermiques peuvent être importantes et son intégration architecturale est plus difficile, il est particulièrement adapté à une usage en été. [12]

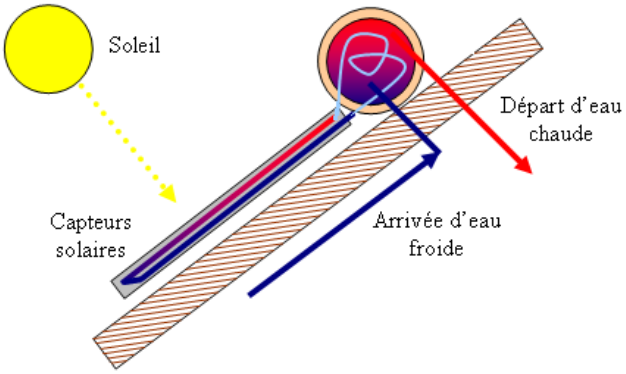


Figure18: Le chauffe eau solaire monobloc.

3.2.2. Thermosiphon

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce à la différence de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs. Les capteurs et le ballon sont assemblés en un seul composant, l'installation est simple, le fonctionnement est autonome (Figure19), Les inconvénients sont les pertes thermiques importantes et son intégration architecturale difficile.

Ce type de système est utilisé pour la production d'eau chaude pour des maisons individuelles situées souvent en milieu rural. Les risques de pannes sont faibles, les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes. [12]

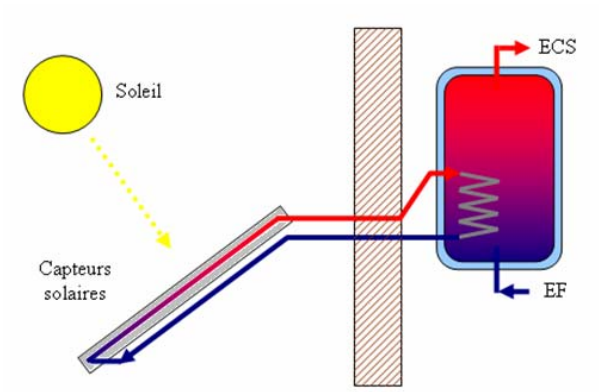


Figure19: Le chauffe eau solaire Thermosiphon.

3.2.3. À circulation forcée

Ce type de chauffe eau solaire "avec pompe et régulation" (Figure20), est adapté à toutes les différentes configurations. Ainsi, le ballon peut être installé dans une cave ou éloigné des capteurs. Le coût de ce système est généralement plus cher que celui des systèmes monobloc à cause des équipements supplémentaires, pompe de circulation et système de régulation. [12]

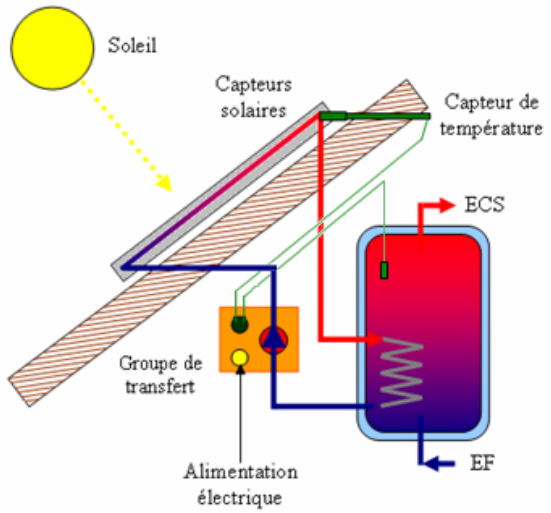


Figure20: Le chauffe eau solaire à circulation forcée.

3.3. Les principaux composants d'un chauffe eau solaire

Un chauffe eau solaire est généralement, configuration simple, constitué de trois parties :

3.3.1. Le capteur plan solaire

Le rôle du capteur solaire est d'absorber un maximum d'énergie solaire avec le moins de pertes par refroidissement possible, puis de faire passer cette chaleur dans l'eau de circulation qui chauffera l'eau sanitaire. La surface des capteurs plans varie selon les besoins en eau des utilisateurs. Elle est de l'ordre de 4m² pour une maison individuelle pour couvrir les besoins en eau sanitaire et de l'ordre de 20m² dans le cas d'une utilisation pour le chauffage de la maison, bien entendu cette surface est aussi fonction du rayonnement solaire. Les capteurs plans peuvent être fixés sur un toit, incliné à afin de recevoir le maximum de rayonnement solaire au mieux.

3.3.2. L'unité de stockage

Appelé réservoir ou ballon de stockage solaire, ce dernier bien isolé, maintient l'eau en température jusqu'à ce qu'elle soit utilisée. Le transfert de chaleur est réalisé par un échangeur monté à l'intérieur du ballon. Ce dernier est aussi équipé d'un chauffage d'appoint, alimenté par réseau électrique, dans le cas d'une utilisation en zone à faible rayonnement solaire.

3.3.3. Le groupe de transfert

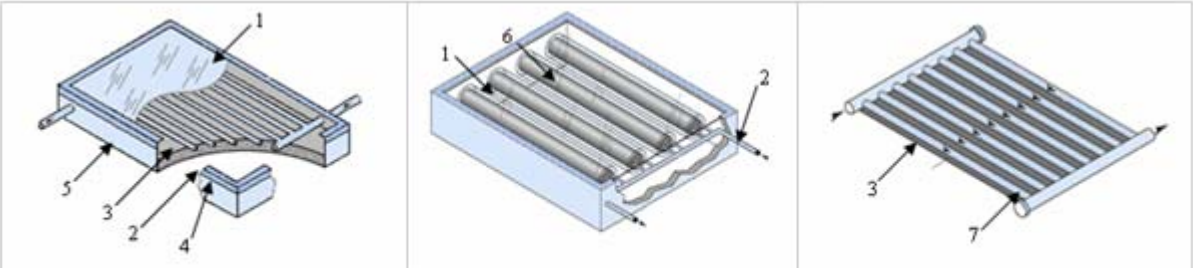
Le groupe de transfert est composé de tous les éléments nécessaires pour transférer la chaleur des capteurs à l'unité de stockage dans les meilleures conditions. Il est composé d'une pompe pour faire circuler le fluide caloporteur, d'un ensemble de capteurs de température et d'un système de régulation pour mettre en marche la pompe quand cela est nécessaire.

3.4. Les types de capteur solaire

3.4.1. Le capteur plan vitré

Le capteur plan solaire le plus couramment utilisé (Figure21.a), comprend un coffre isolant, à l'intérieur duquel est disposé un verre transparent (1), une feuille métallique noire, appelé absorbeur (2), constitué de tuyaux dans lesquels circule le fluide caloporteur (3), en contact avec cette surface absorbante est intégré un isolant aussi bien à l'arrière (4) que sur les cotés pour (4), afin de réduire les déperditions thermiques, l'ensemble est monté dans un boîtier (5) en aluminium.

La plupart des capteurs plans vitrés permettent des gains de température allant jusqu'à 70°C par rapport à la température ambiante et sont de ce fait parfaitement adaptés à la production d'eau chaude sanitaire.



a: Capteur plan vitré. b : Capteur sous vide. c : Capteur plan sans vitre.

Figure21: Les types de capteur solaire.

3.4.2. Le capteur sous vide

Le capteur sous vide (Figure21.b), est constitué d'une série de tubes de verre sous vide (6) à l'intérieur desquels se trouve un absorbeur avec un circuit hydraulique, qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur. Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur sont faibles. Ainsi, on peut obtenir des gains de température de 100°C et plus. Ce type de capteur est particulièrement bien adapté aux applications nécessitant des hautes températures. [22]

3.4.3. Le capteur plan sans vitrage

Ces capteurs simplifiés (Figure21.c), sont généralement constitués d'un absorbeur noir en matière synthétique (7) sans coffre ni couverture transparente. Ils sont particulièrement adaptés aux besoins de chauffage des piscines où l'augmentation de température par rapport à la température ambiante est faible. [22]

3.5. L'appoint énergétique

Un chauffe eau solaire ne peut pas fournir de l'eau chaude en cas de faible ensoleillement, dans ce cas, il faut se servir d'un chauffage d'appoint utilisant une source d'énergie conventionnelle (gaz, fioul, électricité, bois). Cependant:

- Le fonctionnement du chauffage d'appoint ne doit pas réduire le rendement du chauffe eau solaire et la priorité doit être donnée à l'énergie solaire toujours;
- Le ballon de stockage aura besoin d'une bonne isolation thermique afin de conserver l'énergie solaire au mieux et réduire le recours au chauffage d'appoint;
- Un voyant doit montrer que le chauffe eau solaire marche correctement; sinon, l'eau chaude pourrait être fournie exclusivement par l'appoint sans que l'utilisateur se rende compte. [12]

Lorsque on étudie les besoins globaux en énergies et ceux de l'apport solaire pour un chauffe eau, la situation parait favorable, puisque les besoins en eau chaude sont a priori constante tous au long de l'année. [12] la (Figure22) illustre un exemple de l'apport solaire et de l'énergie d'appoint pour une maison de 4 personnes en zone méditerranée, avec 4mètres carré de capteurs, et un ballon de 200litres, où la consommation d'énergie peut être réduite jusqu'à la moitié pendant les mois les plus défavorable.

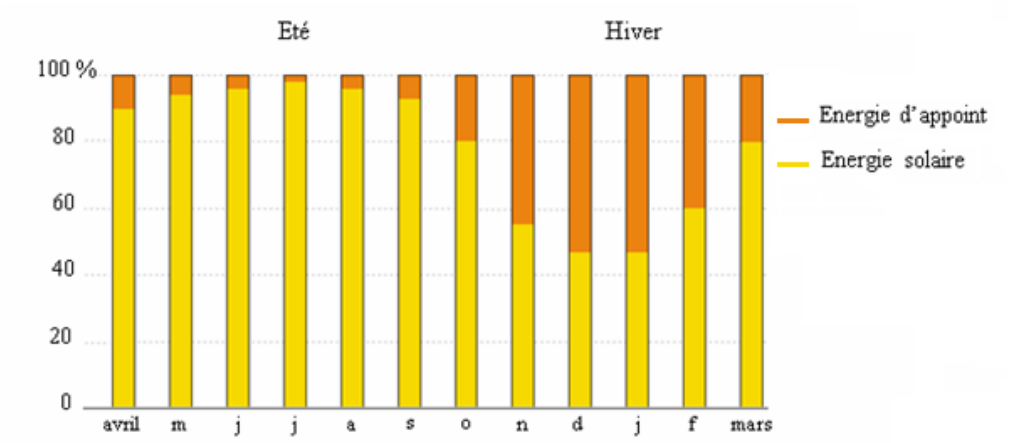


Figure22: La moyenne mensuelle de la production d'un chauffe eau solaire et de l'appoint.

Il existe plusieurs types de chauffage d'appoint:

3.5.1. L'appoint intégré: Dans ce cas l'installation ne dispose que d'un seul ballon, pourvue de deux échangeurs, l'un récupère l'énergie solaire et chauffe d'abord l'eau située en partie basse du ballon "circuit capteurs". L'autre échangeur; qui peut être une résistance électrique (Figure23.a) ou provenant d'une chaudière à gaz (Figure23.b), situé en partie haute, apporte le complément d'énergie nécessaire à l'obtention du degré recherché.

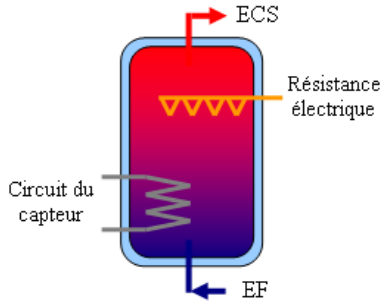


Figure23.a: L'appoint électrique.

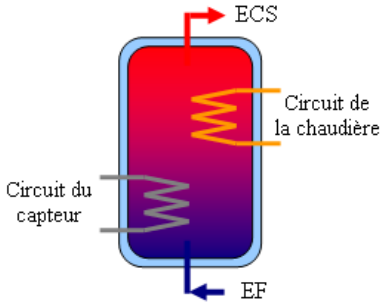


Figure23.b: L'appoint chaudière à gaz.

3.5.2. L'appoint séparé: Le nombre de jours qu'un chauffe eau solaire puisse fonctionner sans appoint varie surtout avec le climat, mais aussi suivant le dimensionnement de l'installation par rapport aux besoins, l'appoint séparé peut être envisagé dans certains cas, généralement quand un ballon de stockage existe déjà, cette configuration comporte alors deux ballon de stockage et deux échangeurs de chaleurs (Figure24).

3.5.3. L'appoint en série: On peut envisager l'installation d'un chauffe eau solaire en série avec un chauffe eau électrique conventionnel (existant ou neuf), l'eau chaude solaire pourrait servir directement ou transiter par le chauffe eau électrique (Figure25). Si nécessaire, le chauffe eau électrique servira comme appoint et pourrait augmenter la température de l'eau préchauffée par le soleil.

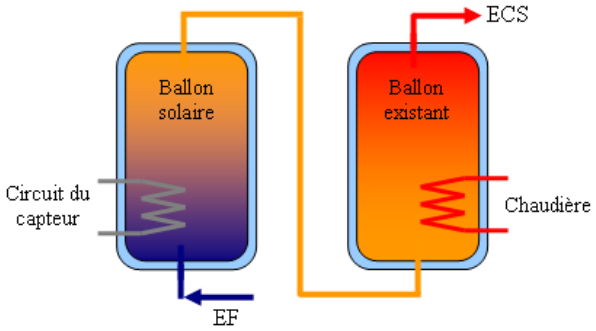


Figure24: L'appoint séparé.

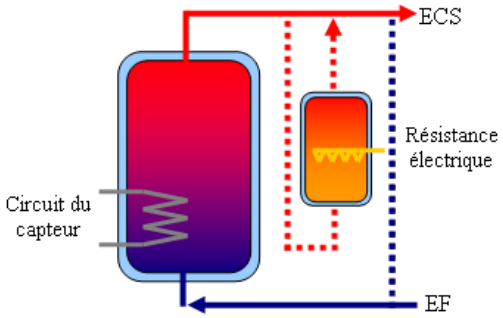


Figure25: L'appoint en série.

Le choix entre l'énergie d'appoint (résistance électrique ou chaudière à gaz) présente toujours un compromis, le tableau de la (Figure26) présente une comparaison entre ces deux vecteurs énergétiques utilisés comme appoint:

Solutions mixtes	Economie	Ecologique	Rendement
Solaire et électricité	Economique à l'investissement, l'hybridation à l'électricité coûte en consommation, mais une résistance coûte peu à remplacer.	Le risque lié au stockage des déchets radioactifs.	50 à 70%
Solaire et gaz naturel	L'équipement est moins cher, cependant avec le couplage à gaz le brûleur doit être changé assez souvent.	Le gaz naturel rejette du CO2 qui participe à l'effet de serre.	88 à 94%

Figure26: Comparaison entre l'appoint électrique et l'appoint à gaz naturel. [12]

3.6. Le système solaire collectif

A l'instar des chauffes eau solaire individuel, l'énergie solaire peut être utilisé pour produire l'eau chaude sanitaire dans des immeubles, ou des hôpitaux, des hôtels ou des résidences de loisirs. Pour des systèmes collectifs, le rendement est meilleur que pour les systèmes individuels, grâce aux possibilités de rationalisation de l'installation solaire et aux besoins réguliers sur toute l'année. La production collective d'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie solaire est maintenant bien au point, l'installation est en général dimensionnée pour fournir 40 à 60 % des besoins.

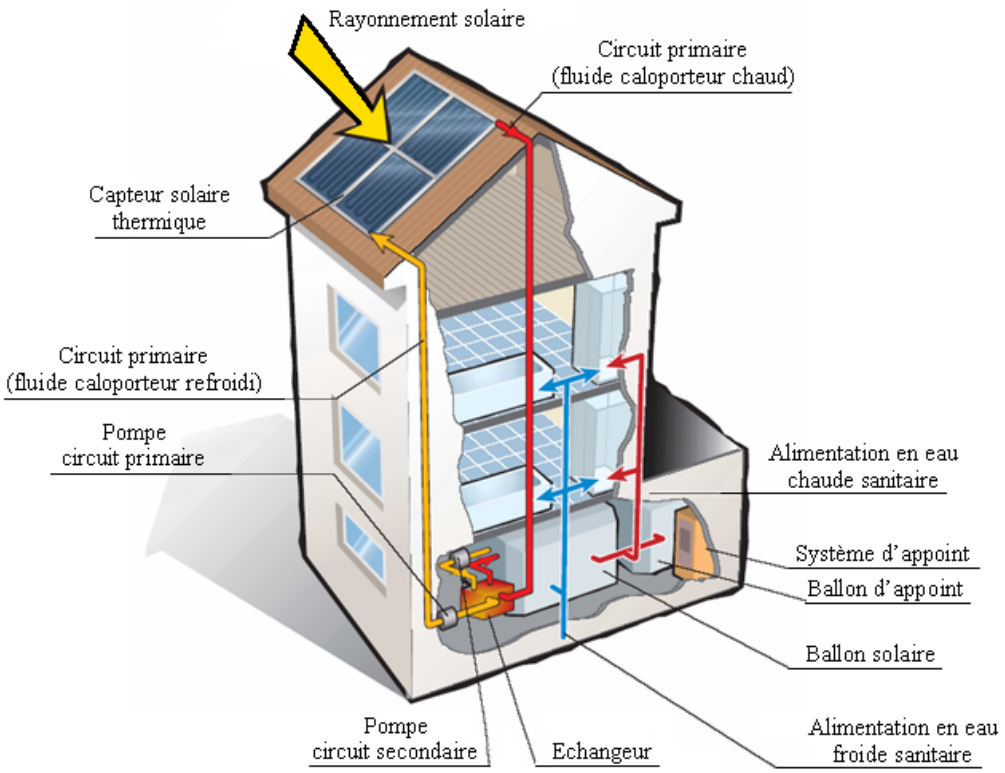


Figure27: Le schéma d'un chauffe eau solaire collectif.

Une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire (Figure27) comporte en général cinq sous-ensembles (captage, transfert, stockage, appoint et distribution):

Des capteurs solaires convertissent le rayonnement solaire en chaleur et la communiquent au liquide caloporteur circulant dans les tubes des capteurs et le circuit primaire. Ce liquide protège le circuit capteur du gel et transfère la chaleur à l'eau sanitaire par l'intermédiaire d'un échangeur. Cette eau chaude est ensuite stockée dans un ballon solaire, souvent disposé en série avec un ballon d'appoint (ou une installation de production d'eau chaude instantanée). Cet appoint est nécessaire pour garantir la température de consigne et la permanence de la fourniture d'eau chaude. Dans les applications collectives, la circulation du liquide caloporteur est effectuée au moyen d'une pompe électrique. Son fonctionnement est contrôlé par un dispositif de régulation jouant sur les différences de températures : si l'eau des ballons est plus chaude que le liquide des capteurs, le régulateur stoppe le circulateur, si elle est moins chaude, le circulateur se met en marche et le liquide primaire peut transmettre sa chaleur à l'eau stockée. [16]

3.7. Le coût des chauffes eau solaire

Le coût d'un chauffe-eau solaire peut varier suivant les modèles, la localisation de l'installation et aussi de l'individuel au collectif. Selon l'ADEME, en été 2006, le prix d'un chauffe-eau solaire, équipé de 3 à 5m^2 de capteurs et d'un ballon de 200 à 300litres (3 à 4 personnes) est compris entre 3800 € et 5500 € TTC. Pour le cas d'un collectif de 4 logements (10 personnes) équipé de 9m² de capteurs et d'un ballon d'ECS de 500litres le coût de l'installation peut déscendre jusqu'à 2200 € HT par logement, avec une couverture des besoins annuels en eau chaude sanitaire de 50%, c'est l'équivalent de 700 à 900 €/m^2 de capteurs selon la taille de l'installation[16]. Le prix d'un système solaire combiné de chauffage des locaux et de l'eau sanitaire pour un local est généralement compris entre 12000 € pour les petites installations et 25000 € pour les plus grosses, ce prix inclus le matériel et l'installation.

En Europe, l'achat d'équipements de chauffage ou de chauffe eau fonctionnant à l'énergie solaire donne accès à un crédit d'impôt, Le montant de ce crédit d'impôt est de 40 % des dépenses TTC (subventions déduites, hors main d'oeuvre) facturées et payées entre janvier 2005 et décembre 2009. [16]

La figure28 représente les prix des CES en Europe en fonction de la puissance installée.

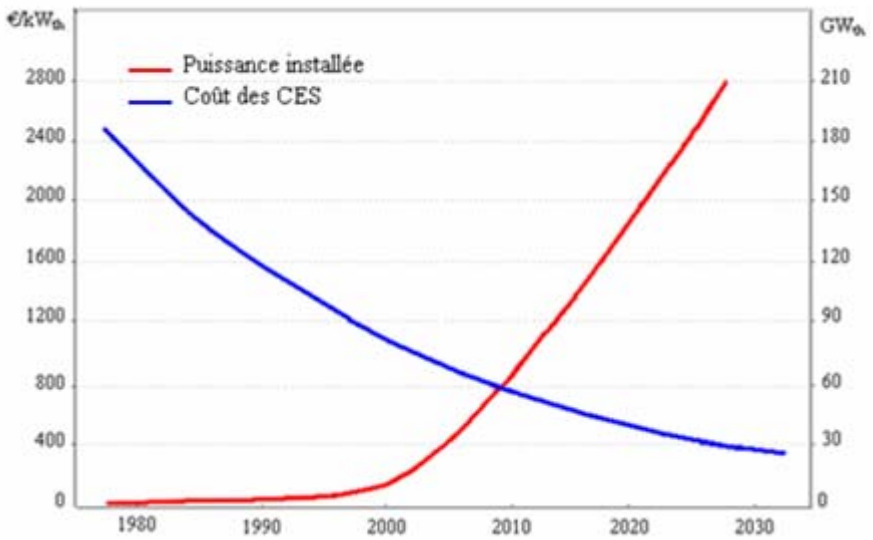


Figure28: Evolution de la puissance installée en CES à circulation forcée et leurs prix en Europe et les prévisions d'avenir. [23]

3.8. L'impact environnemental

3.8.1. L'augmentation des émissions de CO_2

Dans le monde entier, les phénomènes météorologiques extrêmes semblent se multiplier ces dernières années et c'est devenu très inquiétant, les scientifiques ont constaté une augmentation des températures moyennes sur notre planète depuis un siècle environ. Les activités humaines, qui ont considérablement augmenté depuis le début de l'ère industrielle, ont bouleversé l'équilibre planétaire en augmentant les taux de gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre, le gaz carbonique CO_2 est le principal GES émis par l'activité humaine, 75 % des émissions de CO_2 proviennent de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz). De ce fait l'activité humaine modifie le climat de la terre à une vitesse jamais atteinte au cours des derniers milliers d'années et cela devient de plus en plus dangereux, la (Figure29) illustre les émissions de CO_2 liées à la combustion d'énergie dans le monde au cours de ces dernières vingtaine d'années.

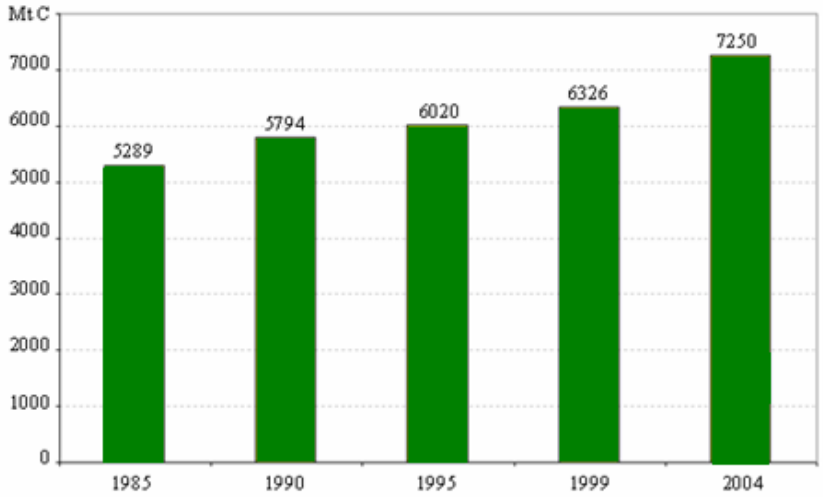


Figure29: Les émissions de CO_2 liées à la combustion d'énergie dans le monde.

En 2004, les émissions mondiales de CO_2 dues à l'énergie ont atteint 7,2 milliards de tonnes de carbone, principalement du fait de la chine, qui a vu son niveau plus que doubler, passant de 624 Mt C en 1990 à 1,3 Gt C en 2004. En Europe, la situation est contrastée, avec des records enregistrés en Espagne (+59%), au Portugal (+52%), en Irlande (+37%) et en Grèce (+33%), la croissance économique explique l'essentiel de ces évolutions. A l'inverse, l'Allemagne perdent 12,2%, le Royaume-Uni avec –3,7% de réduction, la baisse est significative, du fait de la restructuration de leurs économies. [04]

3.8.2. L'effet d'utilisation des CES

Une des principales causes de l'utilisation des systèmes solaires thermiques est de jouer un rôle actif vis à vis des problèmes sociaux et environnementaux tels que la modification du climat, les pluies acides et l'insécurité d'approvisionnement énergétique. L'installation d'un système solaire thermique est le moyen pour chacun d'apporter une petite, mais réelle contribution, au règlement de ce type de problèmes. Cette démarche ne sauvera pas le monde du jour au lendemain mais s'inscrit de manière très concrète dans la bonne direction. [03]

Figure30: L'impact environnemental d'un chauffe eau solaire.

A la fin de l'année 2004 la capacité installées dans le monde des capteurs thermiques vitré et sous vide avait atteint 74,3 GWth, cependant celle des capteurs plan non vitré été de 23,1 GWth.[13] Ceci est équivalent à une réduction annuelle de CO_2 de 25,4 millions de tonnes. (Figure31)

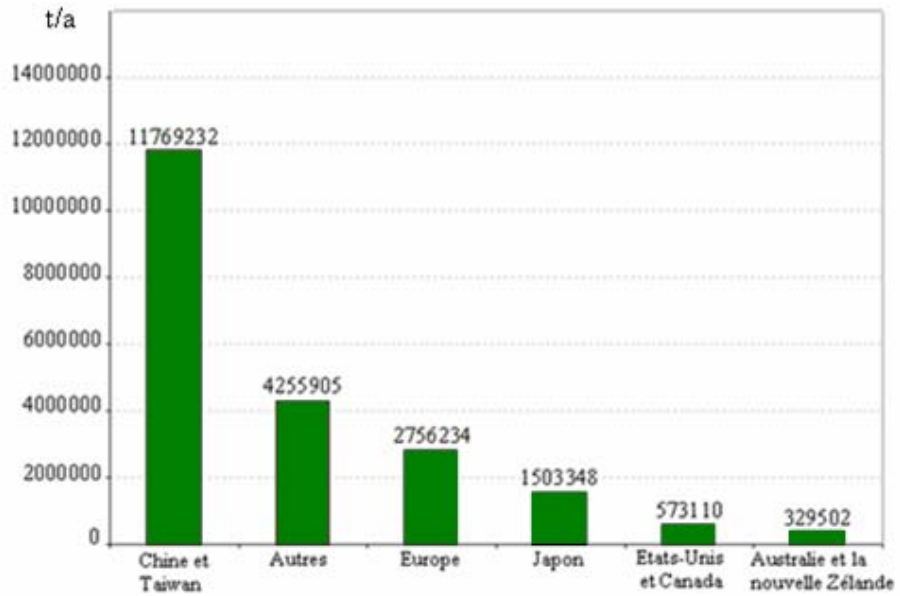


Figure31: La contribution de la puissance installée des capteurs thermique en 2004 à la réduction du CO_2.

4. L'énergie solaire en Algérie

4.1. La consommation énergétique mondiale

Les grands pays consommateurs de gaz et de l'électricité sont des pays développés, ce sont souvent aussi des pays en développement possédant une production importante et une population nombreuse. La consommation de gaz naturel et de l'électricité est en augmentation régulière chaque année, plus rapide même que celle du pétrole [24], et on s'attend pour les prochaines années à un fort accroissement de la consommation mondiale en raisons de l'augmentation de la demande énergétique. [25]

A la fin de l'année 2005, la consommation mondiale de gaz naturel avait atteint 2474,7MTEP [26]; soit une augmentation de 2.3% par rapport à 2004, l'Europe est classée première avec un totale de 1009,7MTEP (Figure32) et la Fédération de Russie est en tête avec 364,6MTEP suivie du Royaume-Uni avec 85,1MTEP et de l'Allemagne avec 77,3MTEP, l'Afrique est la dernière avec 64,1MTEP, l'Egypte est classé premier en Afrique avec 23MTEP suivie de l'Algérie avec 21.7MTEP. Quand à la consommation mondiale d'électricité, elle avait atteint 18184,176TWh fin 2005; soit une augmentation de 4% par rapport à 2004, les pays gros consommateurs sont: les Etats-Unis avec 4239,241TWh, la Chine avec 2474,7TWh, le Japon avec 1133,584TWh et la Fédération de Russie avec 952,2TWh [26]

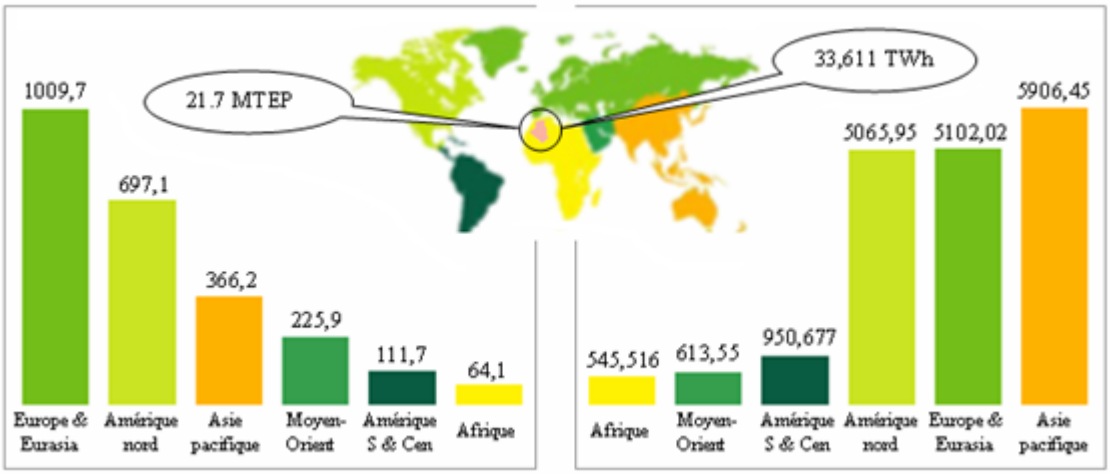


Figure32: La consommation mondiale du gaz naturel et de l'électricité (fin 2005).

4.2. La consommation du gaz naturel et de l'électricité en Algérie

Selon les statistiques de l'année 2005, la consommation de l'Algérie en gaz naturel est de 21.7MTEP, environ 0.9% de la consommation mondiale, soit une augmentation de 9.8% par rapport à 2004, Au début des années 90 l'augmentation annuelle était de 0.96%. La consommation d'électricité en Algérie avait atteint 34TWh à la fin 2005, environ 0.2% de la consommation mondiale, soit une augmentation de 9% par rapport à 2004, de ce fait l'Algérie est devenu le deuxième payé au monde; après la chine (12.6%), à avoir augmenter sa consommation en électricité avec un tel pourcentage, au début des années 90 on avait une augmentation annuelle de 5.6 % seulement. [27]

La figure33 représente la consommation du gaz naturel et de l'électricité en Algérie depuis l'année 2000.

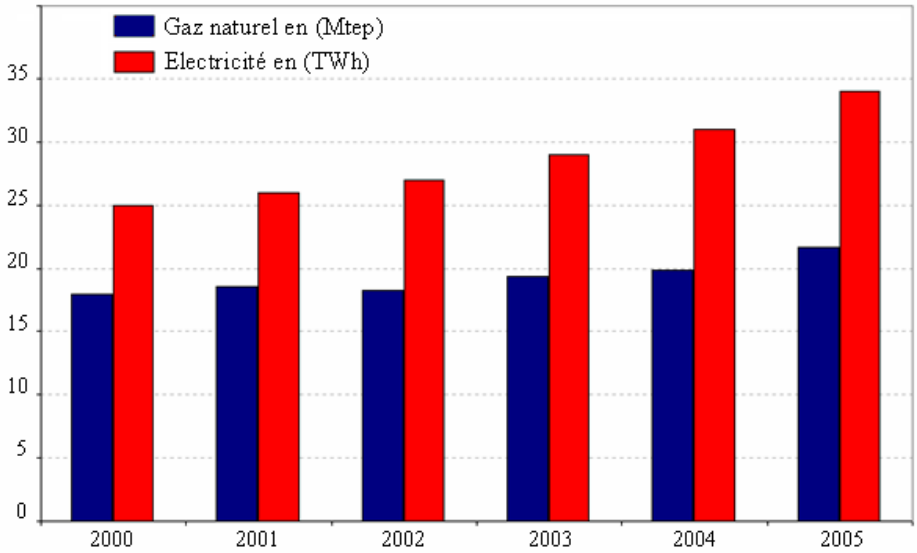


Figure33: La consommation du gaz naturel et de l'électricité en Algérie.

4.3. Comparaison des agents énergétique pour la production d'eau chaude

Le choix d'une énergie (Figure34) ne doit pas se limiter à la seule prise en compte du coût des installations de production d'eau chaude, il doit se faire en ayant connaissance des conséquences à moyen et long terme, il est donc primordial de bien connaître le prix des énergies, leur disponibilité locale, les contraintes matérielles des installations, leurs effets sur l'environnement…etc.

Type de chauffe eau	Avantages	Inconvénients
Le gaz naturel	- Chauffage rapide de l'eau - Possibilité de raccorder à une cheminée ou à un conduit dans un mur extérieur. - Le prix du kilowattheure permet d'obtenir des coûts de fonctionnement acceptables.	- Le choix de l'emplacement du chauffe-eau est restreint à cause de son raccordement. - L'installation du système est assez coûteux et fait appel à des règles d'installation très strictes. - Le gaz naturel n'est pas disponible à tout endroit. - Le gaz naturel émet des polluants et du CO_2 qui contribue à l'effet de serre.
L'électricité	- Energie disponible pratiquement sur toute la planète. - Energie facile à utiliser et propre pour l'utilisateur final. - Faciles à installer, le chauffe eau peut être situes dans de nombreux endroits de la maison. - Ne requièrent aucun dispositif d'évacuation. - Les systèmes électriques de production d'eau chaude sont les moins coûteux à l'installation.	- L'eau prend plus de temps à chauffer avec un appareil électrique. - Le prix élevé du kilowattheure engendre des coûts de fonctionnement élevés. - La production peut être très polluante.
Le solaire	- C'est une énergie renouvelable.	- L'utilisation de l'énergie solaire

	- L'énergie émanant du soleil est gratuite. - Ecologique par excellence, l'énergie solaire ne produit aucune émission de gaz à effet de serre. - La possibilité de combinaison d'un système solaire avec un chauffage classique.	dépend de l'ensoleillement et varie donc suivant les saisons et le recourt à une énergie d'appoint est nécessaire. - Une installation solaire est plus coûteuse à l'achat qu'une installation de production d'eau chaude classique. Toutefois l'investissement est amorti par les économies de fonctionnement réalisées.

Figure34: Comparaison des différents systèmes de production d'eau chaude. [16] [28]

4.4. Avantage des chauffes eau solaire

Pour démontrer l'intérêt des chauffes eau solaire nous avons examiné une expérience testant un chauffe eau solaire, installé dans une zone très fraîche, où le nombre d'heures de soleil par an est de 1750h/an, pour cela un suivi mensuel de la consommation électrique pour la production d'eau chaude à été réaliser avant et après l'insertion du chauffe eau solaire, la température d'eau froide fournie par le réseau est de 12° en été et entre 2° et 5° en hiver. L'intérêt du couplage entre le solaire et le chauffe-eau électrique réside dans le fait que le premier augmente la température de l'eau qui entre dans le chauffe-eau électrique, ainsi le travail de la résistance électrique est amoindri voire totalement annulé par le préchauffage solaire et la consommation d'électricité est réduite. [29]

Les résultats sont représentés sur la figure35, la consommation annuelle entre 97-98 sans chauffe-eau solaire est de 2573kWh, pour la période 98-99 sans le solaire la consommation est de 2621kWh, une fois le chauffe eau solaire inséré (entre 90-00), la consommation été réduite à 1418 kWh, avec 54%: apport de l'appoint électrique et 46%: apport solaire, pour une installation dans une zone plus tempérée, ce système peut faire réaliser jusqu'à 60% d'économies dans de bonnes conditions, pour le nord de l'Algérie on peut réaliser jusqu'à 80% d'économies.

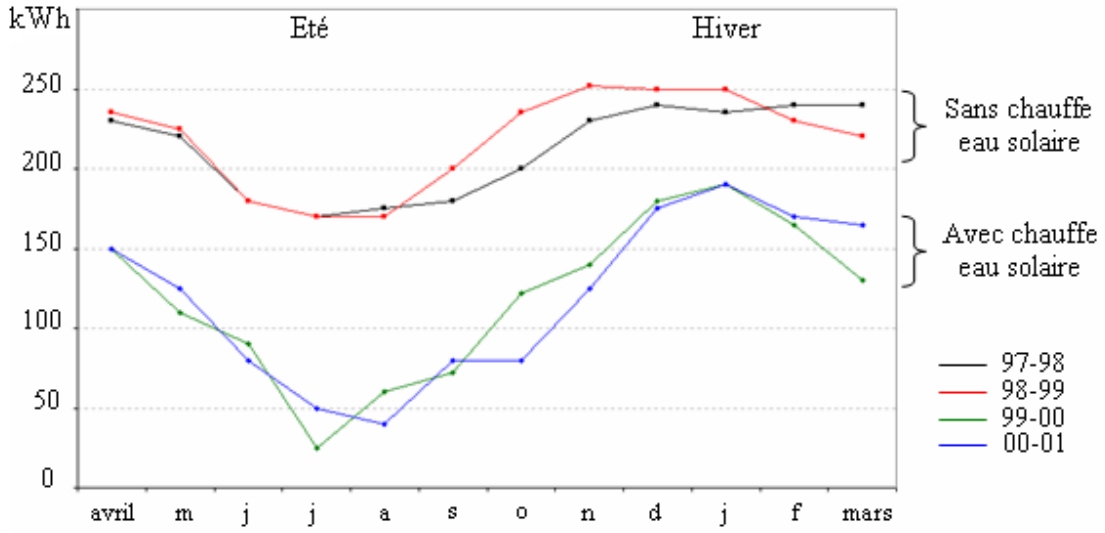


Figure35: Comparaison de la consommation d'un chauffe eau (sans et avec système solaire).

4.5. Le bilan des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie possède des potentialités en énergies renouvelables (ENRs) très importante, elle dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde, son régime de vent est très modéré de 2 à 6m/s, plus de 200 sources chaudes ont été inventoriées dans la partie nord du pays, un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C, les quantités globales de pluies tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65milliards de m^3, le potentiel actuel de la forêt est évalué à environ 37Mtep, le gisement des déchets urbains et agricoles est de l'ordre de 1.33 Mtep/an. [30]

Jusqu'à l'année 2006, l'Algérie avait une puissance installée en ENRs de 2353kW, avec principalement 2279kW, soit 97% pour le solaire et 73kW pour l'eolien (3%). La puissance installée est réparti selon 57% sur l'électrification et 12% pour le pompage, 2% pour l'éclairage public et 21% pour les télécommunication, reste 7% pour les autres applications. Les wilaya de l'Agérie (Figure36) qui ont plus de chance à benifier de ces réalisations sont notament: Tamanrasset avec 578kW et Adrar avec 234kW, Illizi avec 153kW, Djelfa avec 114kW, Tindouf avec 96kW et Laghouat avec 93kW, la capitale ne compte que 46kW. [30]

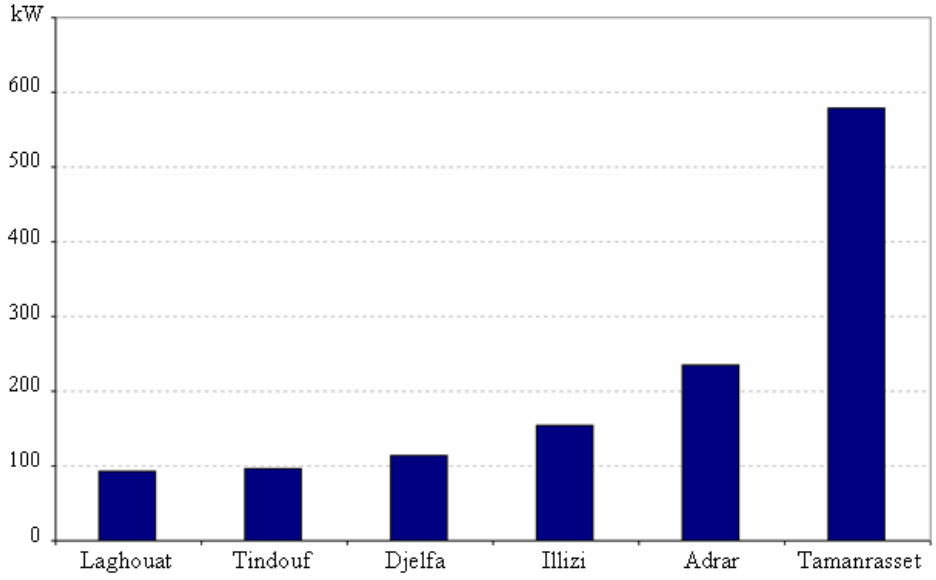


Figure36: Le bilan des réalisations en ENRs par Wilaya.

4.6. Les ressources solaires en Algérie

Avec 2381741km² de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du méditerranéen, selon une étude de l'agence aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes; à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerrané qui dispose d'un potentiel solaire énorme, selon les données d'ensoleillement (Figure37), l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillé au monde.[31] La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000heures annuellement et peut atteindre les 3900heures dans les hauts plateaux et le Sahara, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire national, soit prés de $1700kWh/m^2/an$ au Nord et $2263kwh/m^2/an$ au Sud du pays, le potentiel des ressources solaires de notre payé est donc optimal pour l'exécution des projets solaires. [30]

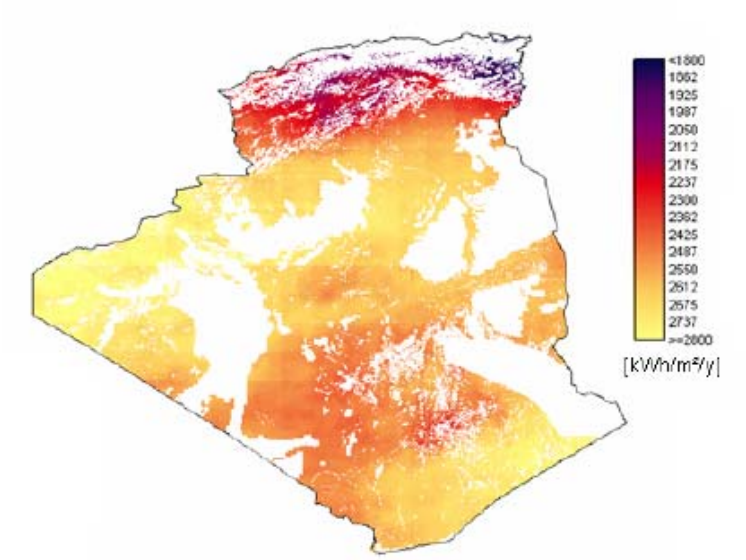


Figure37: Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire.

4.7. Le solaire thermique en Algérie

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire thermique est aujourd'hui la plus proche de la compétitivité économique avec les énergies fossiles et la plus prometteuse en terme de marché puisque les besoins en eau chaude sont universels et en développement constant, dans le cadre du projet: application de l'énergie solaire thermique dans le bassin méditerranéen avec garantie de résultats solaires (AESTBM-GRS) initié par l'association des agences nationales de maîtrise de l'énergie et soutenu par la commission Européenne, l'Algérie prévoit d'installée une puissance de 12700281m^2 de capteurs solaire thermique [32] d'ici l'année 2010, réparti sur quatre zones climatiques (Figure38): la zone côtière ou littorale (4991606m^2), la zone des hauts plateaux (4646366m^2) et la zone du Sahara; répartie en deux sous zones climatiques: le nord-sud (2143411m^2) et le grand sud (918898m^2), cette puissance sera répartie également sur quatre secteurs: la santé, le tourisme, l'habitat collectif, le tertiaire. Ce projet une fois réalisé devra promouvoir l'émergence d'un marché solaire thermique autonome et durable en Algérie, qui contribuera au développement d'industries au niveau local.

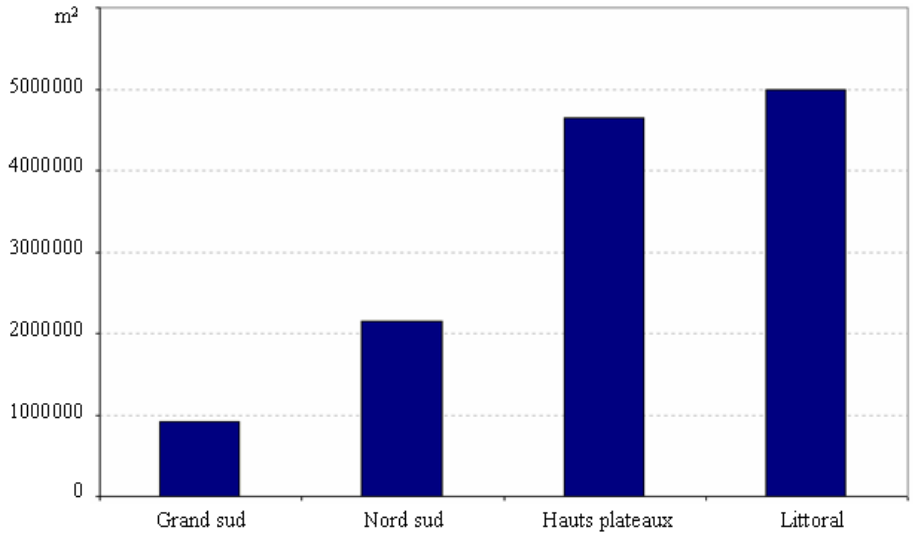


Figure38: Exemple de réalisations du solaire thermique en Algérie.

4.8. Perspectives d'évolution de la consommation finale d'énergie en Algérie

L'objet est de représenter une étude sur les perspectives d'évolution de la consommation d'énergie finale en Algérie à l'horizon 2020. Et s'inscrit dans le cadre plus global d'une analyse de la demande et de l'offre d'énergie dans les pays de l'Union du Maghreb Arabe [30].

4.8.1. Scénarios Energétiques

Il a été décidé d'étudier deux grandes variantes concernant la demande énergétique:

- un scénario " **fil de l'eau** " dans lequel l'évolution des consommations spécifiques n'est déterminée que par les effets de parc (renouvellement et extension des installations et équipements) et les tendances " spontanées " de la technologie ;
- un scénario d' "**économies d'énergie renforcées** ", dans lequel une impulsion forte est donnée pour sélectionner les équipements à durée de vie relativement longue.

4.8.2. Projection et analyse de la consommation finale

4.8.2.1. Scénario " fil de l'eau"

La consommation d'énergie évoluerai à un taux de 6.2%/an en moyenne entre 1990 et 2000, 8.5% entre 2000 et 2010 et 4.7%/an entre 2010 et 2020.

Durant la décennie 1990, l'intensité énergétique globale devrait croître à un taux de 1.2%/an pour atteindre $0.164*10^{-3}$ toe/US$ppa90 en 2000. Compte tenu de la restructuration économique et de la modernisation des équipements, le contenu en énergie finale de l'économie algérienne devrait baisser et atteindre $0.144*10^{-3}$ toe/US$ppa90 (*) en 2010 et $0.127 *10^{-3}$ toe/US$ppa90 en 2020, soit une amélioration d'environ 0.5%/an sur toute la période.

L'intensité énergétique électrique devrait croître régulièrement à un taux de 1.5%/an entre 1990 et 2010 et se stabiliser par la suite pour atteindre 225 GWH/US$ppa90 en 2020.

La consommation d'énergie finale par habitant devrait passer de 0.48 toe en 1990 à 0.71 toe en 2000, 1.35 toe en 2010 et 1.88 toe en 2020, soit un accroissement annuel moyen de 4.6%.

L'évolution relative des différentes formes d'énergie se caractérise comme suit :

- le gaz naturel devrait se substituer massivement aux produits pétroliers pour atteindre 44% de la consommation finale en 2020 contre 26% en 1990;
- l'option " tout gaz " adoptée lors de l'élaboration du scénario énergétique devrait baisser la part des produits pétroliers dans la demande pour atteindre 33% en 2020 contre 64% en 1990;
- le développement de la sidérurgie se répercute par une forte croissance de la consommation de coke qui atteindrait 7% de la demande en 2020 contre 2% en 1990;
- l'énergie électrique connaîtrait une croissance soutenue de 8%/an et se situerait à 15% de la demande finale en 2020 contre 10% en 1990.

4.8.2.2. Scénario "économies d'énergie renforcées":

La consommation d'énergie devrait croître à une taux de 5.2% entre 1990 et 2000, 7.2% entre 2000 et 2010 et 4% entre 2010 et 2020.

Les économies d'énergie escomptées atteindraient 2 Mtoe en 2000, 9.7 Mtoe en 2010 et 18 Mtoe en 2020, soit respectivement 9%, 19% et 23% de la consommation du scénario "fil de l'eau ".

Les améliorations d'efficacité énergétique sont attendues essentiellement dans l'industrie qui devrait couvrir 50% du potentiel d'économie d'énergie contre 33% pour le secteur résidentiel et tertiaire et 17% pour le transport.

La politique volontariste d'efficacité énergétique se traduit aussi par une amélioration de l'intensité énergétique globale qui atteindrait $0.095*10^{-3}$ toe/US$ppa90 en 2020 contre 0.146 en 1990, soit une baisse de 1.4%/an.

(*): Dollars américains en parité de pouvoir d'achat de 1990.

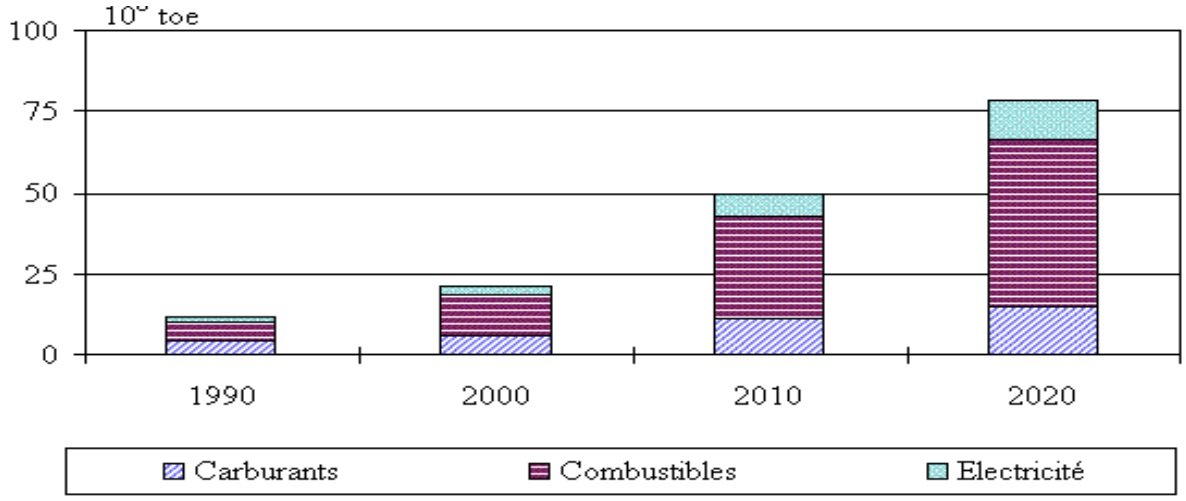


Figure 39 : Prévisions de la consommation finale par énergie ; scénario « fil de l'eau »

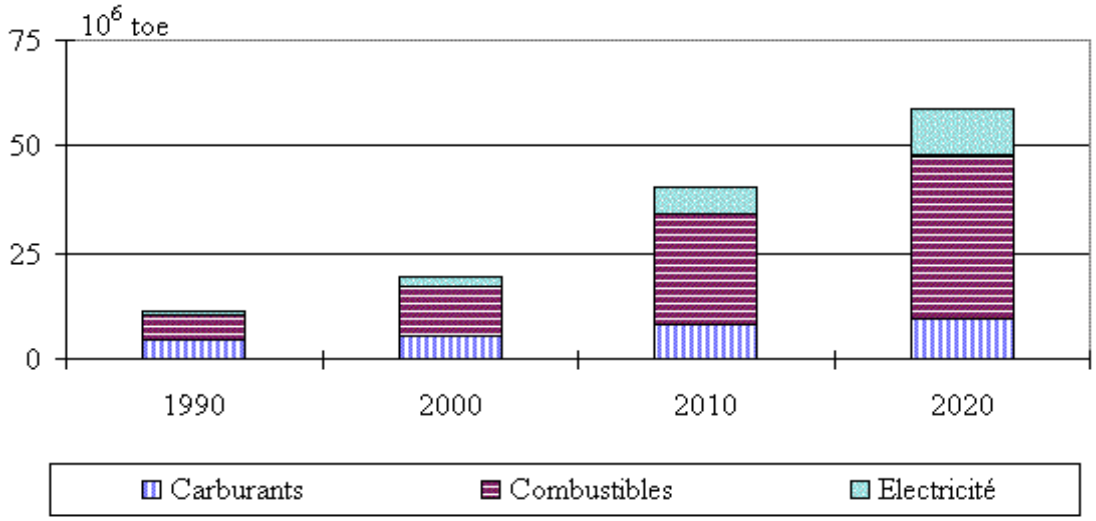


Figure40: Prévisions de la consommation finale par énergie; scénario«économies d'énergie renforcées

5. Réalisation d'un logiciel de dimensionnement

Une fois arrivé à ce stade on a pu faire une étude complète des systèmes solaires thermique, passons par les éléments constitutifs d'un chauffe eau solaire, son principe de fonctionnement, les types existant, l'utilisation collective du système et les différents appoints adoptés. On a aussi parlé des chauffes eau solaire à travers le monde, la puissance installée, les coûts et leurs l'impact environnemental, comme on a considéré le cas de l'Algérie avec ses ressources solaires et les agents énergétique utilisés pour la production d'eau chaude, ainsi que ses projets d'avenir tracés.

Cette partie à pour but l'élaboration d'un logiciel informatique; écrit en DELPHI 5, permettant le dimensionnement des chauffes eau solaire et l'estimation des coûts du système ainsi que le temps qu'il faut pour amortir l'investissement dans ce genre de projet.

5.1. La méthode de calcul utilisée par le logiciel

5.1.1. Calcul de la température d'eau froide (T_f)

La température de l'eau froide pour le mois (*i*) est égale à la température moyenne annuelle de l'eau plus 0.35 fois la différence entre la température ambiante et la température moyenne pour le mois (*i-1*). Après simplification on obtient l'équation (1) qui permet le calcul de la température de l'eau froide pour chaque mois de l'année. [34]

$$T_f = \frac{T_{min} - T_{max}}{2} - \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cdot h \cdot cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n-2}{12}\right) \qquad (1)$$

T_f: Température d'eau froide;
T_{min} : Température minimale;
T_{max} : Température maximale;
h: (+1) en l'hémisphère Nord et (-1) en l'hémisphère Sud;
n: le mois considéré.

5.1.2. Estimation des besoins en chauffage (Q_c)

Pour calculer la quantité d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire, il faut d'abord connaître le volume d'eau à produire. La quantité réelle d'énergie nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire est calculée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée [34], cette énergie est donnée par:

$$Q_c = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot (T_c - T_f) \qquad (2)$$

C_p : Capacité calorifique de l'eau (1.167Wh/kg/°C);
ρ : Masse volumique d'eau (1kg/L);
V : Volume d'eau chaude à soutirer (en Litre);
T_c : Température d'eau chaude demandée (°C);
T_f : Température d'eau froide (°C).

5.1.3. Production d'eau chaude (Méthode f-Chart)

Le rendement d'un système de production d'eau chaude sanitaire avec stockage peut être évalué grâce à la méthode de calcul du taux de recouvrement de la charge par l'énergie solaire (fraction solaire *f*) dite méthode *f-Chart*. [35] Cette méthode permet de calculer, sur une base mensuelle, la quantité d'énergie fournie par un système de chauffage solaire avec

stockage, en fonction des valeurs mensuelles de rayonnement solaire incident, de la température ambiante et de la charge de chauffage. Deux nombres sans dimension ***X*** et ***Y*** sont définis :

$$X = \frac{A_c \cdot F_R^{'} \cdot U_L \cdot \left(T_{réf} - T_a\right)}{Q_c} \qquad (3)$$

$$Y = \frac{A_c \cdot F_R^{'} \cdot \left(\overline{\tau\alpha}\right) \cdot R_y \cdot N}{Q_c} \qquad (4)$$

A_c : Surface des capteurs (en m²);
F'_R : Facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire;
U_L : Coefficient global de pertes thermiques;
T_{ref}: Valeur empirique de référence égale à 100°C;
T_a : Moyenne mensuelle de la température ambiante (°C);
Q_c : Besoin de chauffage total mensuelle;
$\overline{\tau\alpha}$: Moyenne mensuelle du produit de la transmissivité et de l'absorptivité du capteur;
R_y: Moyenne mensuelle du rayonnement solaire incident quotidien dans le plan des capteurs;
N : Nombre de jours dans le mois.

Les équations (3) et (4) peut s'écrire comme suite [35] :

$$X = \frac{F_R U_L \cdot \frac{F_R^{'}}{F_R} \cdot \left(T_{ref} - \overline{T}_a\right) \cdot \Delta t \cdot A_c}{Q_c} \qquad (5)$$

$$Y = \frac{F_R \left(\tau\alpha\right)_n \cdot \frac{F_R^{'}}{F_R} \cdot \frac{\left(\overline{\tau\alpha}\right)}{\left(\tau\alpha\right)_n} \cdot R_y \cdot N \cdot A_c}{Q_c} \qquad (6)$$

$F_R\left(\tau\alpha\right)$ *et* $(F_R U_L)$: Sont spécifiées par l'utilisateur ou choisis parmi les paramètres des capteurs solaires sélectionnés dans la base de données;
X doit être corrigé à la fois en fonction de la dimension du stockage et de la température de l'eau froide. La méthode *f-Chart* a été développée avec une capacité de stockage standard de 75litres m² de capteur solaire. Pour les autres capacités de stockage, ***X*** doit être multiplié par un facteur correctif (***X_c / X***) défini par:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{Volume\ réel\ de\ stockage}{Volume\ standard\ de\ stockage}\right)^{-0.25} \qquad (7)$$

Pour prendre en considération les fluctuations de la température de l'eau froide (T_f) et pour avoir une température de l'eau chaude minimale acceptable (T_c) (les deux ayant une influence sur la performance du chauffe-eau solaire) ***X*** doit être multiplié par un facteur correctif (***X_cc / X***) défini par:

$$\frac{X_{cc}}{X} = \frac{11{,}6 + 1{,}18 \cdot T_c + 3{,}86 \cdot T_f - 2{,}32 \cdot T_a}{100 - T_a} \qquad (8)$$

T_a : La moyenne mensuelle de la température ambiante (°C).

La fraction f de la charge de chauffage totale mensuelle couverte par le chauffe-eau est donnée en fonction de $\boldsymbol{X}$ et $\boldsymbol{Y}$:

$$f = 1{,}029 \cdot Y - 0{,}065 \cdot X - 0{,}245 \cdot Y^2 + 0{,}0018 \cdot X^2 + 0{,}0215 \cdot Y^3 \qquad (9)$$

5.1.4. Calcul de la surface des capteurs solaires (S_r)

A fin de calculer (f) on doit calculer la surface des capteurs, l'évaluation de la surface des capteurs théoriquement nécessaire [36]; en se basant par exemple sur les données de rayonnement solaire du site, s'obtient comme suit:

$$S = \frac{12 \cdot Q_c \cdot 31}{Ry} \qquad (10)$$

Un tel calcul suppose que cette surface de capteur plan couvre 100% le besoin en énergie pour l'eau chaude durant toute l'année. Or, en pratique ceci n'est pas possible: une installation de surface calculé répondant au besoin d'une famille dépasse de loin les dimensions durant l'été et le degré de rendement est bien au-dessus du rendement moyen. En hiver par contre, la surface des capteurs ne répond pas au besoin en énergie (du moins dans les pays de nord où on espère à atteindre un taux de couverture de 50%). Le choix recommandable est la surface optimale (S_r) qui est donnée par:

$$S_r = S \cdot 0{,}5 \qquad (10)$$

5.1.5. Calcul de l'apport solaire ($Q_{app_solaire}$)

L'apport solaire est tous simplement le produit de (f) obtenu de l'équation (9) par le besoin (Q_c) issue de l'équation (2) :

$$Q_{app_solaire} = f \cdot Q_c \qquad (11)$$

5.1.6. Calcul de l'énergie d'appoint ($Q_{appoint}$)

L'appoint est égal à la différence entre le besoin (Q_c) de l'équation (2) et l'apport solaire ($\boldsymbol{Q_{app_solair}}$) de l'équation (11):

$$Q_{appoint} = Q_c - Q_{app_solaire} \qquad (12)$$

5.2. L'organigramme générale du programme

L'organigramme générales (Figure41) représentant les fonctions du programme réalisé est décrit comme suit:

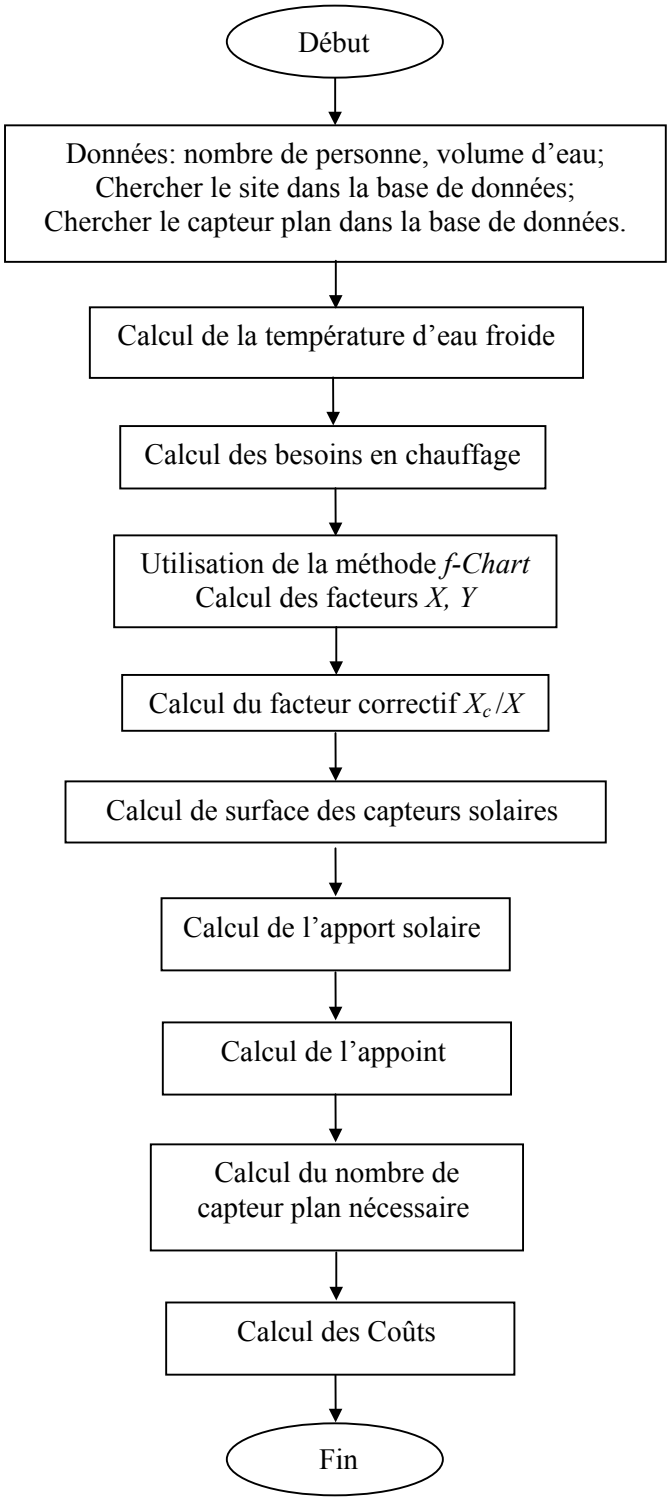


Figure41: Organigramme général du logiciel 'ENP-CESolaire'.

5.3. La description du logiciel

Le logiciel 'ENP-CESolaire' contient en général deux fonctions principales: la réalisation du dimensionnement et le calcul des coûts.

5.3.1. Feuille de présentation

Comme tous les logiciels, le logiciel 'ENP-CESolaire' commence par une fenêtre de présentation générale; (Figure42) qui s'affiche juste après le lancement de l'exécution.

Figure42: Représentation de la feuille 'Présentation' du logiciel.

5.3.2. Feuille principale

C'est une feuille de face qui contient une bar de menu et une bar d'outils principale, chaque bouton a une action spécifique (Figure43).

Figure43: Représentation de la feuille principale.

- **Boutons généraux du logiciel 'ENP-CESolaire'**

➢ Bouton 'Nouveau' : Permet d'ouvrir la fenêtre de la figure44 afin d'introduire les données d'un nouveau projet a dimensionner.

➢ Bouton 'Ouvrir' : Permet d'aller à la fenêtre de la figure45, qui pour rôle d'ouvrir un rapport déjà enregistré ou consulter les données d'un projet a dimensionné.

➢ Bouton 'Ray' : Ce bouton permet d'afficher la feuille de la figure46, qui à pour but la mise à jour de la base de données concernant le rayonnement solaire.

➢ Bouton 'CP' : Ce bouton permet d'afficher la feuille de la figure47, qui à pour rôle la mise à jour de la base de données concernant les capteurs plan.

➢ Bouton 'Aide' : Permet d'ouvrir le fichier d'aide du logiciel.

➢ Bouton 'Quitter' : Permet de sortir du logiciel.

5.3.3. Feuille de dimensionnement

Cette fenêtre (Figure44); est partagée en 3zones principales, la première est consacrée pour le choix d'un site et la saisie de ces données géographiques, ces données sont visualisés sur la même feuille sous forme de table et de graphe, la second zone est pour le choix du type de capteur plan. La dernière zone est réservée pour la saisie des paramètres nécessaire pour le dimensionnement.

Cette feuille contient également trois boutons d'actions qui sont:

- Le bouton [Annuler] : C'est pour annuler le projet et fermer la fenêtre en question.
- Le bouton [Enregistrer] : Pour enregistrer les entrées saisies.
- Le bouton [Calcul >>>>] : Pour lancer le calcul et pour afficher la fenêtre des résultats de la figure52.

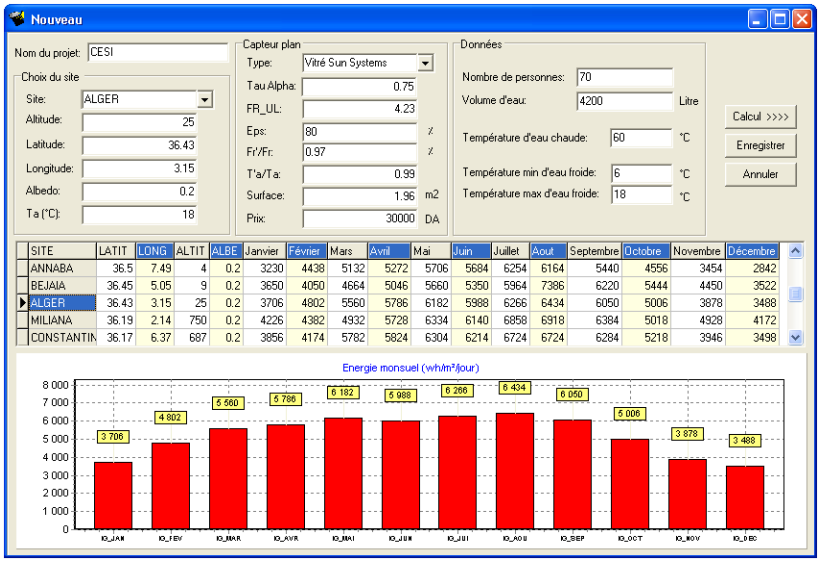


Figure44: Représentation de la feuille de dimensionnement.

5.3.4. Feuille 'Ouvrir'

Dans cette fenêtre (Figure45); l'utilisateur a le choix d'ouvrir soit un rapport déjà enregistré (Figure52); ou d'ouvrir le fichier concernant les données d'entrées d'un projet a dimensionné.

Figure 45: Représentation de la feuille 'Ouvrir'.

5.3.5. Feuille 'Rayonnement'

Dans cette fenêtre (Figure46); on a la possibilité d'ajouter, de supprimer ou de modifier toutes les données du rayonnement de chaque site, le bouton 'Enregistrer' sert au sauvegarde des nouvelles informations saisies, le bouton 'annuler' c'est pour abandonner une opération, 'Fermer' pour fermer la fenêtre.

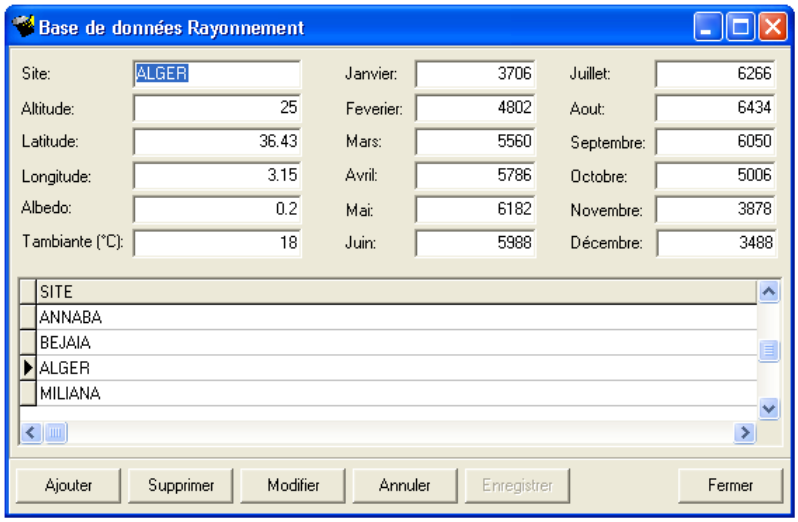


Figure46: Représentation de la feuille 'Rayonnement'.

5.3.6. Feuille 'Capteurs plan'

Les fonctions de cette fenêtre (Figure47); sont les même que ceux de la fenêtre 'rayonnement', on a la possibilité d'ajouter, de supprimer ou de modifier les données concernant les capteurs plan.

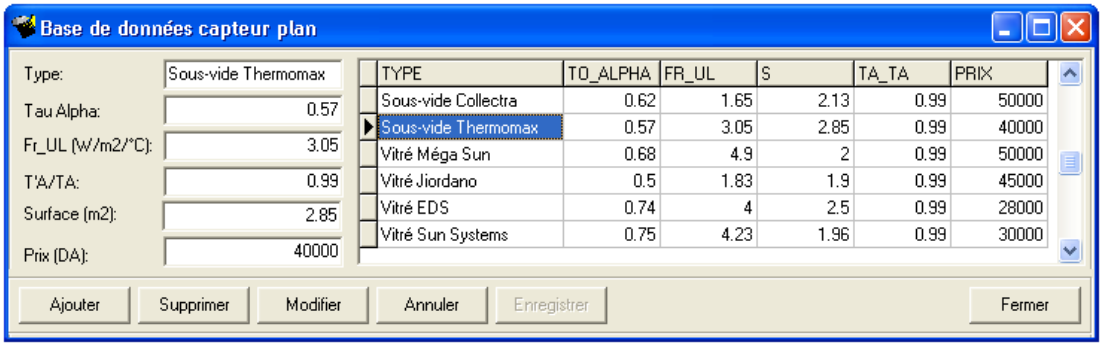


Figure47: Représentation de la feuille 'Capteurs plan'.

5.3.7. Feuille 'Résultats'

La fenêtre 'Résultats' comprend 4onglets:

- Onglet pour les résultats numérique (Figure48);
- Onglet pour le graphe de la température d'eau froide (Figure49);
- Onglet pour l'affichage graphique de la production annuelle (Figure50);
- Onglet pour l'affichage de la proportion annuelle (Figure51);

Le bouton Aperçu pour l'affichage du rapport global (Figure52);
Le bouton fermer pour la fermeture de la fenêtre.

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
V (m3):	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Tc (°C):	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Tf (°C):	6.80	6.00	6.80	9.00	12.00	14.99	17.19	18.00	17.20	15.01	12.01	9.01
Ry (kWh/m2):	114.89	134.46	172.36	173.58	191.64	179.64	194.25	199.45	181.50	155.19	116.34	108.13
Qb (kWh):	575.26	527.44	575.26	533.74	519.12	470.98	462.92	454.18	447.88	486.50	502.17	551.36
Couverture (f):	0.47	0.59	0.67	0.71	0.78	0.79	0.85	0.87	0.82	0.69	0.53	0.46
Apport (kWh):	272.05	309.56	387.95	381.32	406.55	373.18	391.94	396.47	368.39	334.28	264.01	253.41
Appoint (kWh):	303.21	217.88	187.31	152.42	112.57	97.81	70.98	57.71	79.49	152.23	238.16	297.95

Figure48: Représentation des résultats numérique.

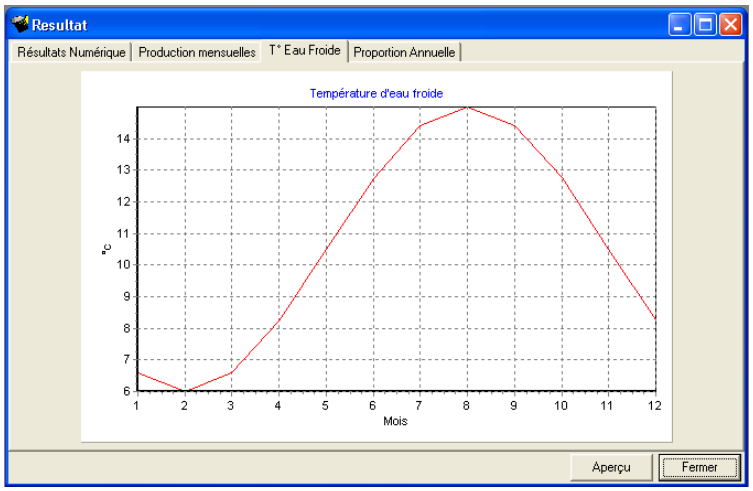


Figure49: Représentation du graphe de la température d'eau froide.

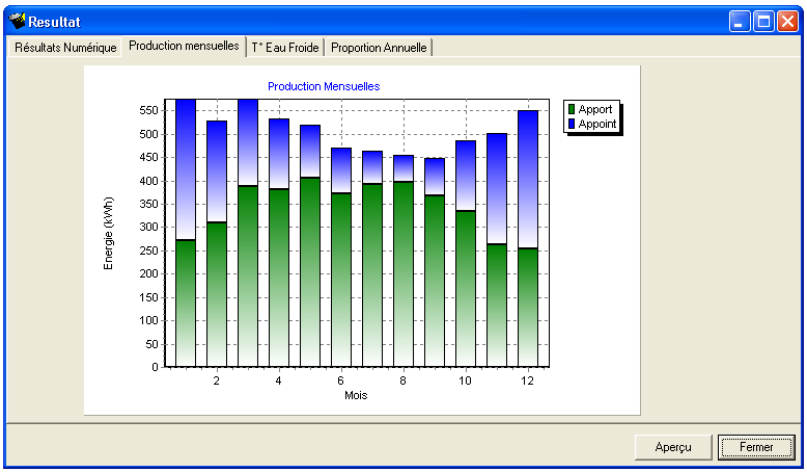


Figure50: Représentation graphique de la production annuelle d'énergie.

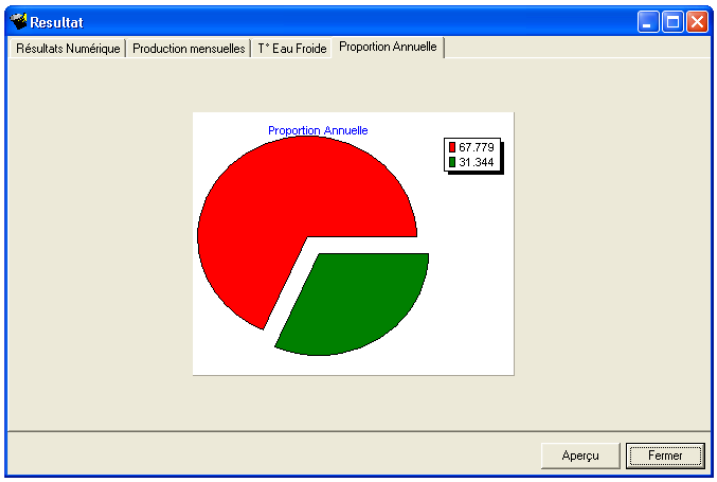
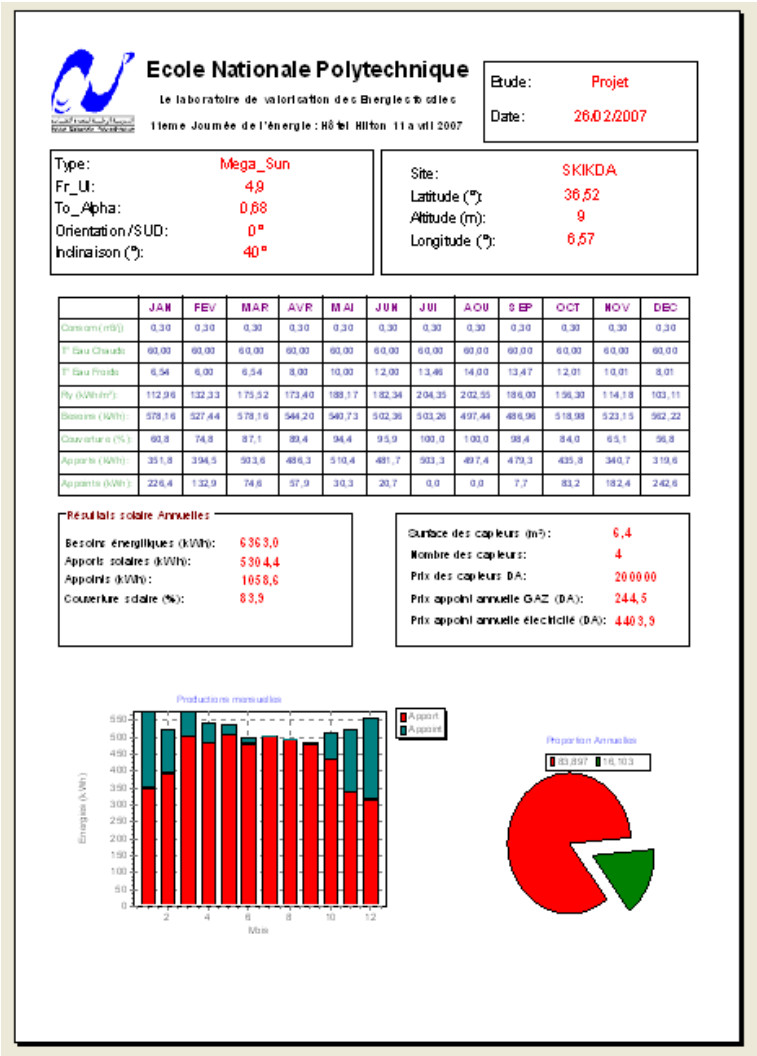


Figure52: Représentation graphique de la proportion annuelle.

Le rapport (Figure52); est une feuille de format A4 représentant tous les paramètres des entrées et les résultats de calcul obtenus, ainsi que deux graphes: de la production et la proportion annuelle d'énergie.



Ecole Nationale Polytechnique

Le laboratoire de valorisation des Energies renouvelables

11ème Journée de l'énergie : Hôtel Hilton 11 avril 2007

Etude:	Projet
Date:	26/02/2007

Type:	Mega_Sun
Fr_Ul:	4,9
To_Alpha:	0,68
Orientation /SUD:	0°
Inclinaison (°):	40°

Site:	SKIKDA
Latitude (°):	36,52
Altitude (m):	9
Longitude (°):	6,57

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m³/j)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
T° Eau Chaude	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
T° Eau Froide	6,54	6,00	6,54	8,00	10,00	12,00	13,46	14,00	13,47	12,01	10,01	8,01
Ry (kWh/m²)	112,96	132,33	175,52	173,40	188,17	182,34	204,35	202,55	186,00	156,30	114,18	103,11
Besoins (kWh)	578,16	527,44	578,16	544,20	540,73	502,36	503,26	497,44	486,96	518,98	523,15	562,22
Couverture (%)	60,8	74,8	87,1	89,4	94,4	95,9	100,0	100,0	98,4	84,0	65,1	56,8
Apports (kWh)	351,8	394,5	503,6	486,3	510,4	481,7	503,3	497,4	479,3	435,8	340,7	319,6
Appoints (kWh)	226,4	132,9	74,6	57,9	30,3	20,7	0,0	0,0	7,7	83,2	182,4	242,6

Résultats solaire Annuelles

Besoins énergétiques (kWh):	6363,0
Apports solaires (kWh):	5304,4
Appoints (kWh):	1058,6
Couverture solaire (%):	83,9

Surface des capteurs (m²):	6,4
Nombre des capteurs:	4
Prix des capteurs DA:	200000
Prix appoint annuelle GAZ (DA):	244,5
Prix appoint annuelle électricité (DA):	4403,9

Productions mensuelles

Apport

Appoint

Energies (kWh)

Mois

Proportion Annuelles

83,897

16,103

Figure52: Représentation du rapport global.

5.4. Les tests établis et les résultats obtenus

5.4.1. Le dimensionnement d'un chauffe eau solaire individuel

Supposant qu'on va dimensionner un chauffe eau solaire individuel par le logiciel 'ENP_CESolaire' en prenant; par exemple, le cas d'une famille de 4 personnes résidant a Alger, et qui possède une cuve de stockage de 300litres, la température d'eau chaude souhaitée sera à 60°C, le capteur plan choisit est un capteur vitré du type 'Sun Systems'. Avec 2 capteurs plans de ce type, les résultats obtenus pour l'énergie solaire fournie et l'apport solaire sont les suivants:

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	6.80	6.00	6.80	9.00	12.00	14.99	17.19	18.00	17.20	15.01	12.01	9.01
Ry (kWh/m²):	114.89	134.46	172.36	173.58	191.64	179.64	194.25	199.45	181.50	155.19	116.34	108.13
Besoins (kWh):	575.26	527.44	575.26	533.74	519.12	470.98	462.92	454.18	447.88	496.50	502.17	551.36
Couverture (%):	47.3	58.7	67.4	71.4	78.3	79.2	84.7	87.3	82.3	68.7	52.6	46.0
Apports (kWh):	272.1	309.6	388.0	381.3	406.5	373.2	391.9	396.5	368.4	334.3	264.0	253.4
Appoints (kWh):	303.2	217.9	187.3	152.4	112.6	97.8	71.0	57.7	79.5	152.2	238.2	297.9

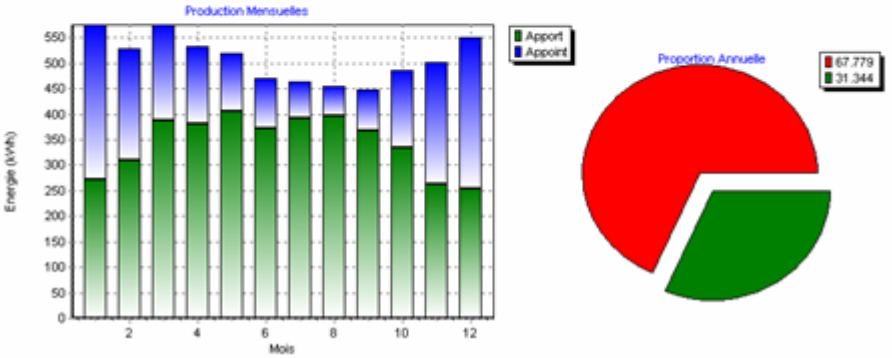


Figure53: Les résultats obtenus pour la ville d'Alger (CES individuel).

Maintenant on va prendre l'exemple de la même famille mais pour le site de Ghardaïa, avec 2 capteurs plans du même type que pour Alger, on a obtenus les résultats suivants:

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	7.34	6.00	7.34	11.00	15.99	20.99	24.65	26.00	24.67	21.02	16.02	11.02
Ry (kWh/m²):	176.20	192.02	224.87	212.94	214.71	203.52	220.04	227.60	186.12	195.30	151.14	165.73
Besoins (kWh):	569.47	527.44	569.47	512.83	475.89	408.23	382.23	367.67	369.73	421.54	460.21	529.63
Couverture (%):	70.0	79.6	84.6	86.8	90.8	96.3	100.0	100.0	94.3	90.7	70.9	69.7
Apports (kWh):	398.6	420.0	481.7	444.9	432.0	389.1	382.2	367.7	348.6	382.4	326.4	369.3
Appoints (kWh):	170.9	107.4	87.8	67.9	43.9	19.2	0.0	0.0	21.1	39.2	133.8	160.3

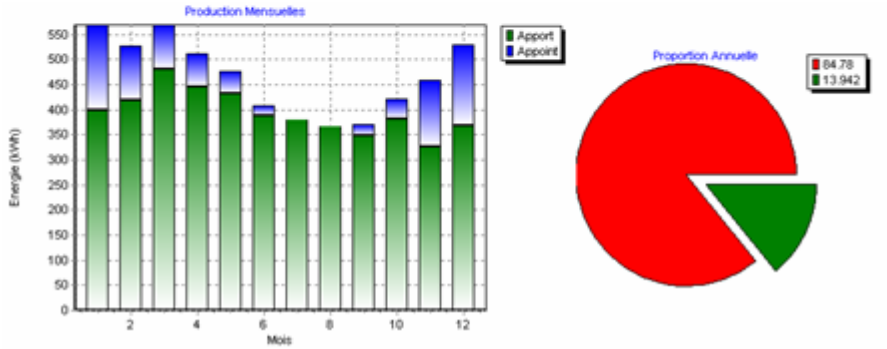


Figure54: Les résultats obtenus pour la ville de Ghardaïa (CES individuel).

Maintenant on va prendre l'exemple de la même famille mais pour le site de Adrar, avec 2 capteurs plans du même type que pour Alger, on a obtenus les résultats suivants:

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	7.20	6.00	7.20	10.50	14.99	19.49	22.79	24.00	22.80	19.52	15.02	10.52
Ry (kWh/m²):	201.19	199.47	245.27	237.00	228.66	217.86	227.17	228.47	217.92	212.85	190.26	187.55
Besoins (kWh):	570.92	527.44	570.92	518.06	486.70	423.92	402.40	389.30	389.27	437.78	470.70	535.06
Couverture (%):	77.4	81.7	89.7	92.9	93.5	97.6	100.0	100.0	100.0	94.2	83.6	76.3
Apports (kWh):	441.9	431.1	512.4	481.2	454.9	413.8	402.4	389.3	389.3	412.2	393.6	408.1
Appoints (kWh):	129.0	96.3	58.5	36.8	31.8	10.1	0.0	0.0	0.0	25.6	77.1	126.9

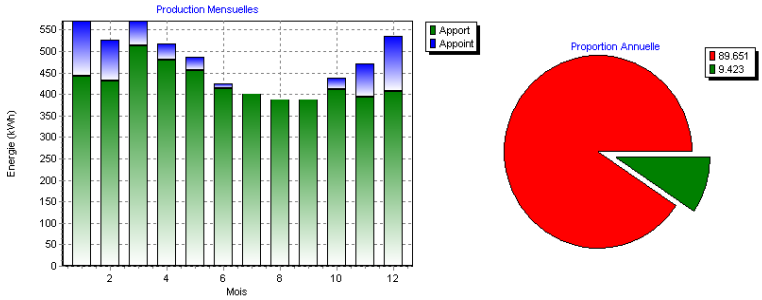


Figure55: Les résultats obtenus pour la ville d'Adrar (CES individuel).

Au cours de cette expérimentation nous avons effectué d'autres tests sur le même système pour comprendre son comportement, deux exemple de l'ensemble des tests sont décrits comme suit:

- **Type de capteurs**

On a effectuer le dimensionnent du chauffe eau solaire en prenant l'exemple de la famille précédente, avec la même capacité de stockage (300litres), la température d'eau chaude souhaitée sera à 60°C, le premier capteur choisit est un capteur sous vide de 'Thermomax', le second est celui de 'Collectra'. Les résultats obtenus sont les suivants:

Tau Alpha	Fr_UL ($W/m^2/°C$)	Surface brute_cap (m^2)	Surface totale (m^2)	Nombre de capteurs	Besoins énergétiques (MWh)	Energie fournie (MWh)	Apport solaire %	Energie d'appoint %
0.57	3.05	2.85	**5.7**	**2**	**6.1**	**4**	**73.74**	**25.34**
0.62	1.65	2.13	**4.26**	**2**	**6.1**	**4**	**65.66**	**33.44**

Figure56: Les résultats obtenus pour des capteurs sous vide.

- **Volume**

On a effectuer le dimensionnent du chauffe eau en prenant la cas d'une famille de 4personnes à faible consommation (35L/j), moyenne consommation (60L/j) et forte consommation (80L/j), avec le capteur vitré du type 'Sun Systems', les résultats obtenus respectivement sont les suivants:

Volume (L)	Nbr capteur	Besoins (MWh)	Energie fournie (MWh)	Apport %	Appoint %
140	**1**	**2.8**	**2**	**70.35**	**28.77**
240	**2**	**4.9**	**3.9**	**79.3**	**19.76**
320	**3**	**6.5**	**5.5**	**85.19**	**13.96**

Figure57: Les résultats obtenus pour différents volumes de stockage.

5.4.2. Le dimensionnement d'un chauffe eau solaire collectif

Cette fois nous allons faire le dimensionnement d'un chauffe eau solaire collectif, qui va s'utiliseras dans toute installation collectif (habitats, hôpitaux, hôtels, université…..etc.), prenant le cas d'Alger, la température d'eau chaude souhaitée sera la même (60°C), le capteur plan choisit est un capteur vitré du type 'Sun Systems', le type d'application choisit est le dimensionnement d'un CES pour un bâtiment de 4étages comprenant 70individus. Les résultats obtenus sont les suivants:

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	6.80	6.00	6.80	9.00	12.00	14.99	17.19	18.00	17.20	15.01	12.01	9.01
Ry (kWh/m²):	114.89	134.46	172.36	173.58	191.64	179.64	194.25	199.45	181.50	155.19	116.34	108.13
Besoins (kWh):	8053.68	7384.10	8053.68	7472.41	7267.62	6593.76	6480.83	6358.54	6270.38	6811.05	7030.38	7718.99
Couverture (%):	48.8	60.3	68.9	73.3	80.5	81.9	87.6	90.4	85.3	71.3	54.8	47.7
Apports (kWh):	3930.1	4449.4	5552.7	5474.6	5847.9	5400.2	5677.2	5745.8	5347.3	4855.9	3852.4	3684.1
Appoints (kWh):	4123.6	2934.7	2501.0	1997.8	1419.7	1193.6	803.6	612.7	923.1	1955.1	3178.0	4034.9

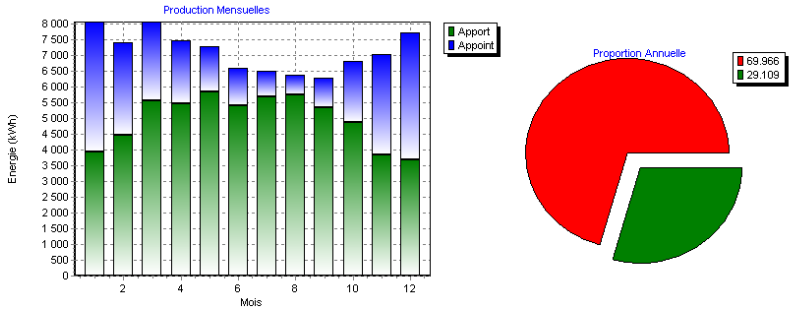


Figure58: Les résultats obtenus pour la ville d'Alger (CES collectif).

Maintenant nous allons dimensionner le même système pour les villes de Ghardaïa et Adrar, les résultats obtenus sont respectivement les suivants:

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	6.80	6.00	6.80	9.00	12.00	14.99	17.19	18.00	17.20	15.01	12.01	9.01
Ry (kWh/m²):	176.20	192.02	224.87	212.94	214.71	203.52	220.04	227.60	186.12	195.30	151.14	165.73
Besoins (kWh):	8053.68	7384.10	8053.68	7472.41	7267.62	6593.76	6480.83	6358.54	6270.38	6811.05	7030.38	7718.99
Couverture (%):	60.3	69.5	73.5	74.5	76.3	78.5	84.1	87.3	75.8	74.2	58.8	59.1
Apports (kWh):	4857.8	5130.7	5922.4	5564.0	5544.2	5174.0	5448.9	5550.0	4753.8	5050.8	4136.3	4565.8
Appoints (kWh):	3195.8	2253.4	2131.3	1908.4	1723.4	1419.7	1031.9	808.5	1516.6	1760.2	2894.1	3153.2

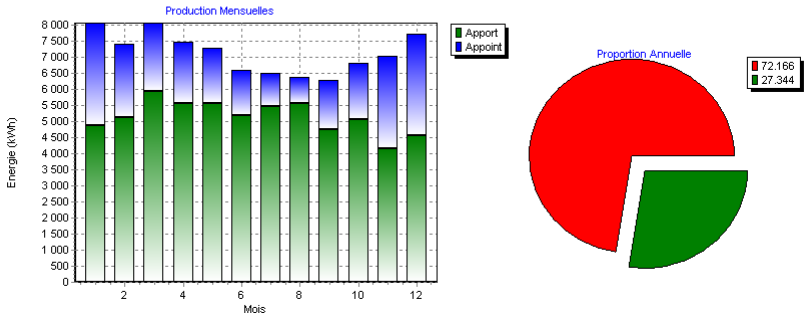


Figure59: Les résultats obtenus pour la ville de Ghardaïa (CES collectif).

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	6.80	6.00	6.80	9.00	12.00	14.99	17.19	18.00	17.20	15.01	12.01	9.01
Ry (kWh/m²):	201.19	199.47	245.27	237.00	228.66	217.86	227.17	228.47	217.92	212.85	190.26	187.55
Besoins (kWh):	8053.68	7384.10	8053.68	7472.41	7267.62	6593.76	6480.83	6358.54	6270.38	6811.05	7030.38	7718.99
Couverture (%):	62.4	66.6	73.3	75.4	74.7	77.2	80.5	81.9	79.9	73.9	66.1	60.8
Apports (kWh):	5029.4	4915.5	5903.1	5635.4	5427.2	5087.8	5217.8	5209.0	5011.1	5035.5	4649.3	4694.5
Appoints (kWh):	3024.2	2468.6	2150.6	1837.0	1840.5	1505.9	1263.1	1149.6	1259.2	1775.5	2381.1	3024.5

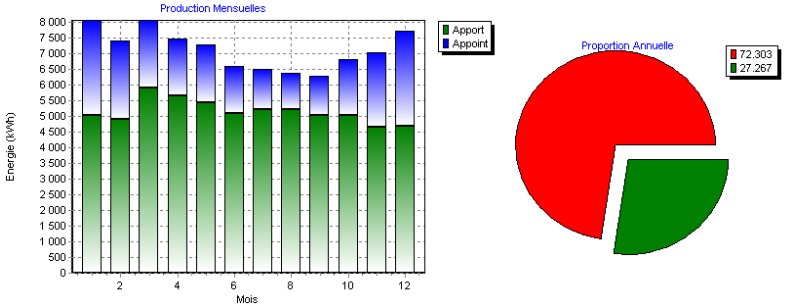


Figure60: Les résultats obtenus pour la ville d'Adrar (CES collectif).

Cette fois nous allons reprendre l'exemple de Alger et nous allons dimensionner le même système avec le même type de capteurs et la même température demandée d'eau chaude et avec d'une autre suggestion: le nombre d'individus étant plus important (84individus), les résultats obtenus sont comme suit:

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Consom (m3/j)	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04
T° Eau Chaude	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
T° Eau Froide	6.80	6.00	6.80	9.00	12.00	14.99	17.19	18.00	17.20	15.01	12.01	9.01
Ry (kWh/m²):	114.89	134.46	172.36	173.58	191.64	179.64	194.25	199.45	181.50	155.19	116.34	108.13
Besoins (kWh):	9664.42	8860.92	9664.42	8966.90	8721.14	7912.51	7777.00	7630.24	7524.45	8173.25	8436.46	9262.78
Couverture (%):	49.4	60.9	69.7	74.0	81.3	82.7	88.5	91.2	86.1	72.1	55.4	48.3
Apports (kWh):	4771.2	5397.9	6732.4	6637.1	7087.6	6545.9	6879.7	6961.7	6481.3	5890.5	4677.7	4474.0
Appoints (kWh):	4893.2	3463.1	2932.0	2329.8	1633.6	1366.6	897.4	668.5	1043.1	2282.8	3758.7	4788.8

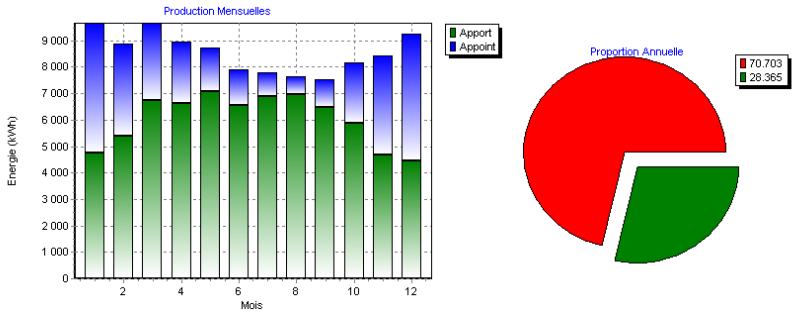


Figure61: Les résultats obtenus pour la ville d'Alger, 84individus (CES collectif).

5.5. Validation et interprétation des résultats

5.5.1. Validation des résultats

Afin de valider notre logiciel en va comparer les résultats obtenus avec ceux d'un autre logiciel, on a choisi pour cela le logiciel 'RETscreen' qui est très connu, il se présente sous forme de fichier Excel, pour; exactement, les même données d'entrées et pour les différentes villes de l'Algérie on a obtenus les résultats suivants :

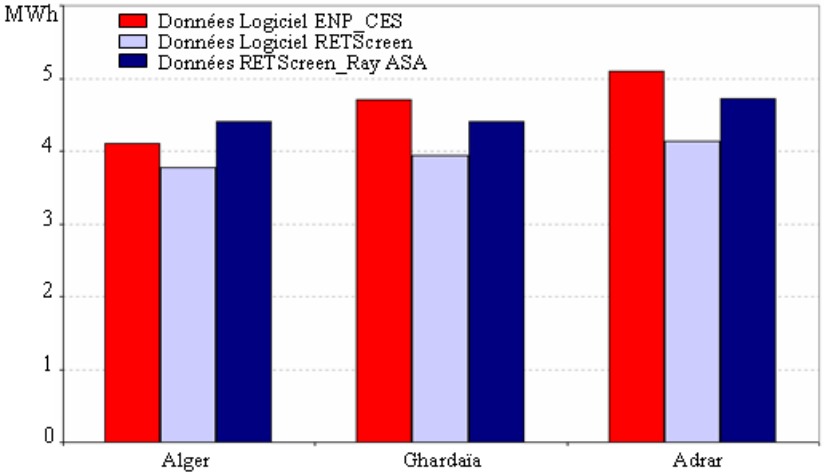


Figure62: Comparaison des résultats (énergie solaire fournie).

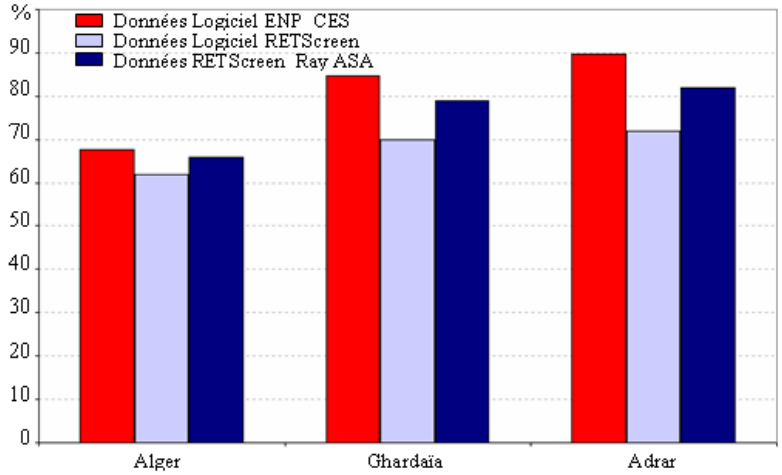


Figure63: Comparaison des résultats (taux de recouvrement solaire).

5.5.2. Interprétation des résultats

La validation du logiciel 'ENP_CESolaire' par le logiciel 'RETscreen' à permet de distinguer un léger écart entre les deux logiciels, exemple: l'énergie solaire fournie est de 4.1MWh pour le premier logiciel et de 3.7MWh pour le second (cas d'Alger) (Figure62), cela est dû au faite que le logiciel 'RETscreen' utilise des données mondiales d'ensoleillement, par contre; dans le cas du logiciel 'ENP_CESolaire' on s'est basé sur les données de 'l'Atlas Solaire de l'Algérie' de 'Michel Capderou', qui sont plus précis puisque elles sont destinées à calculer le rayonnement solaire pour le cas de l'Algérie. Pour remédier à ce problème on est ramener a modifié la base de données du logiciel 'RETscreen' et la remplacée par celle de l'Atlas Solaire, les résultats étaient plus proche cette fois.

Exemple: l'apport solaire est de 67.78% pour le logiciel 'ENP_CESolaire' et de 66% pour le logiciel 'RETscreen Ray ASA' contre 62% pour le logiciel 'RETscreen' (cas d'Alger) (Figure63).

- Pour le dimensionnement du chauffe eau solaire individuel, on a considérer le cas de trois villes de l'Algérie: Alger, Ghardaïa et Adrar, situés respectivement au nord, milieu et sud de l'Algérie, où le rayonnement solaire moyen annuel varie considérablement d'une zone à l'autre: 5.26kWh/m^2/j pour Alger, 6.49kWh/m^2/j pour Ghardaïa et 7.11kWh/m^2/j pour Adrar, les résultats obtenus sont représentés respectivement sur les (Figure55), (Figure56), (Figure57).

Pour une famille de 4 personnes et une cuve de stockage de 300litres, en utilisant 2 capteurs vitrés du type 'Sun Systems', les besoins énergétiques de cette famille s'élèvent à 5.8MWh en moyenne dans les trois zones, l'énergie solaire fournie est de 4.6MWh en moyenne, l'apport solaire est plus important à la région d'Adrar (89.65%) qu'à Ghardaïa (84.78%) et encore beaucoup mieux qu'Alger (67.78%), et l'énergie d'appoint sera presque négligeable à Adrar et Ghardaïa (9.42% et 13.94% respectivement), mais on peut très bien dire l'investissement en CES à Alger est aussi très rentable (énergie d'appoint 31.34%).

- Concernant le type de capteur utilisé, on a réalisé le test de 3capteurs possédant des caractéristiques différentes (Figure56): le capteur avec vitrage 'Synox 9000 si' de 'Sun Systems', le capteur sous vide 'Solamax AST20' de 'Thermomax', et le capteur sous vide 'OPC 15 H' de 'Collectra', on a constater que les capteurs sous vide offre de plus haut rendement mais sous certain conditions:

Prenant l'exemple de la famille précédente habitant à Alger: avec 2 capteurs vitré elle arrive à couvrir ces besoins à 67.78% en énergie solaire, si elle utilisait le capteurs sous vide de 'Thermomax' elle gagneras encore plus (couverture de 73.74%), tandis qu'avec le capteur sous vide de 'Collectra' elle ne gagneras presque rien (65.66%), malgré que le nombre de capteurs est le même dans les trois cas, cela est dû au faite que les paramètres 'Tau Alpha' et 'Fr_UL' de chaque capteurs ne sont pas égaux, le coefficient 'Tau Alpha' est très sensible, une légère variation entraîne un grand écart des résultats (0.57 pour Thermomax) et (0.62 pour Collectra), un 'Tau Alpha' au dessous de 0.60 présente un capteur sous vide très performant, même chose pour le paramètres 'Fr_UL' qui influe également sur le rendement (3.05 W/m^2/°C pour Thermomax) et (1.65 W/m^2/°C pour Collectra). Les résultats trouvés prouvent que le capteur solaire sous vide 'Solamax AST20' est très rentable mais on est confronté toujours au compromis qualité prix.

- Pour le test de la capacité de stockage (Figure57), on constate que le volume de la cuve change entre les différente familles selon la consommation et que l'apport solaire est inversement proportionnel au volume.

Une famille de faible consommation (35L/per/j) n'aura besoin que d'un seul capteur vitré du type 'Sun Systems' pour couvrir 70.35% de ces besoin avec un volume de stockage de 140L seulement, la famille à consommation moyenne (60L/per/j) auras besoin de 2capteurs du même type pour couvrir ces besoins avec une capacité de 240L, la famille à forte consommation (80L/per/j) utiliseras 3capteurs du même type pour couvrir 85.19% de ces besoin, autrement un seul capteur ne lui permettras de couvrir que 38%de ces besoin, ce nombre de capteurs important se reflèteras directement sur la surface ou seront placés les capteurs et le coût totale de l'installation.

Il ne faut pas oublier l'influence de la température d'eau froide qui joue un rôle très important pour le dimensionnement de la cuve de stockage, une marge de (6 à 18°C) pour la température d'eau froide permettras de couvrir 67.78% des besoin d'une famille de

4personnes habitant Alger avec une cuve de stockage de 300L, une marge de (6 à 26°C) ne permet de couvrir ces besoins que si la cuve de stockage est d'une capacité de 320L.

- Arrivant au dimensionnement du chauffe eau solaire collectif, la température d'eau chaude souhaitée sera la même (60°C), le capteur plan est celui de 'Sun Systems', l'application est le dimensionnement d'un CESC pour un immeuble de 4étages, 14appartement et 70individus, le volume de la cuve de stockage seras 2400L soit 60L/per/j, les besoins énergétiques s'élèvent à 85.5MWh, situé a Alger (Figure58), cet immeuble auras besoin de 28capteurs plan pour couvrir 69.97% de ces besoins; soit une surface de 53.9m^2 , à Ghardaïa (Figure60), on auras besoin que de 23capteurs du même type (43.7m^2 de surface), à la région d'Adrar (Figure62), seulement 21capteurs plan (40m^2 de surface) suffiront pour couvrir 72.3% des besoins, soit une énergie solaire fournie de 61.8MWh.

L'investissement en CESC est très bénéfique, à Alger on aura besoin de 2 capteur/famille de 5personnes, on gagnera une personne de plus que pour un projet de CESI. A Ghardaïa, le nombre de capteurs nécessaire pour une famille de 5personnes est 1.64 capteur/famille, soit 5capteurs d'économie sur l'ensemble de l'immeuble par rapport au CESI. Pour la région d'Adrar on aura besoin 1.5 capteur/famille, soit 0.3 capteur/personne et on gageras 7 capteurs pour l'immeuble, soit 0.2 capteur d'économie pour chaque individu.

- Plus le nombre d'unité est élevé, plus le CESC est intéressant, c'est ce qui reflète le dernier test de la figure61 réalisé pour la ville d'Alger, on prenant exactement les même données que pour le cas précédent, le nombre d'individu étant 84, le volume de la cuve de stockage est de 5040L soit 60L/per/j, les besoins énergétiques s'élèvent à 102.6 MWh, l'énergie solaire fournie est de 72.5 MWh, l'apport solaire étant cette fois un peu plus élevé %, l'énergie d'appoint est de 28.36%, la surface nécessaire est de 64.7m^2, le nombre de capteur est de 34, soit 2.43 capteur par famille de 6personnes, et 0.4 capteur par personne contre 0.5 capteur par personne pour le CESI , soit un gain de 8 capteur par famille et un gain de 0.1 capteur par personne.

6. Etude économique d'un chauffe eau solaire

Dans cette section du logiciel 'ENP_CESolaire' d'analyse de projets de chauffage solaire de l'eau, nous allons donner une estimation des coûts liés aux chauffes eau solaire, nous prenons en considération les coûts d'investissement et les frais annuels, La feuille du logiciel qui permet de faire l'étude économique est représenté sur la figure63.

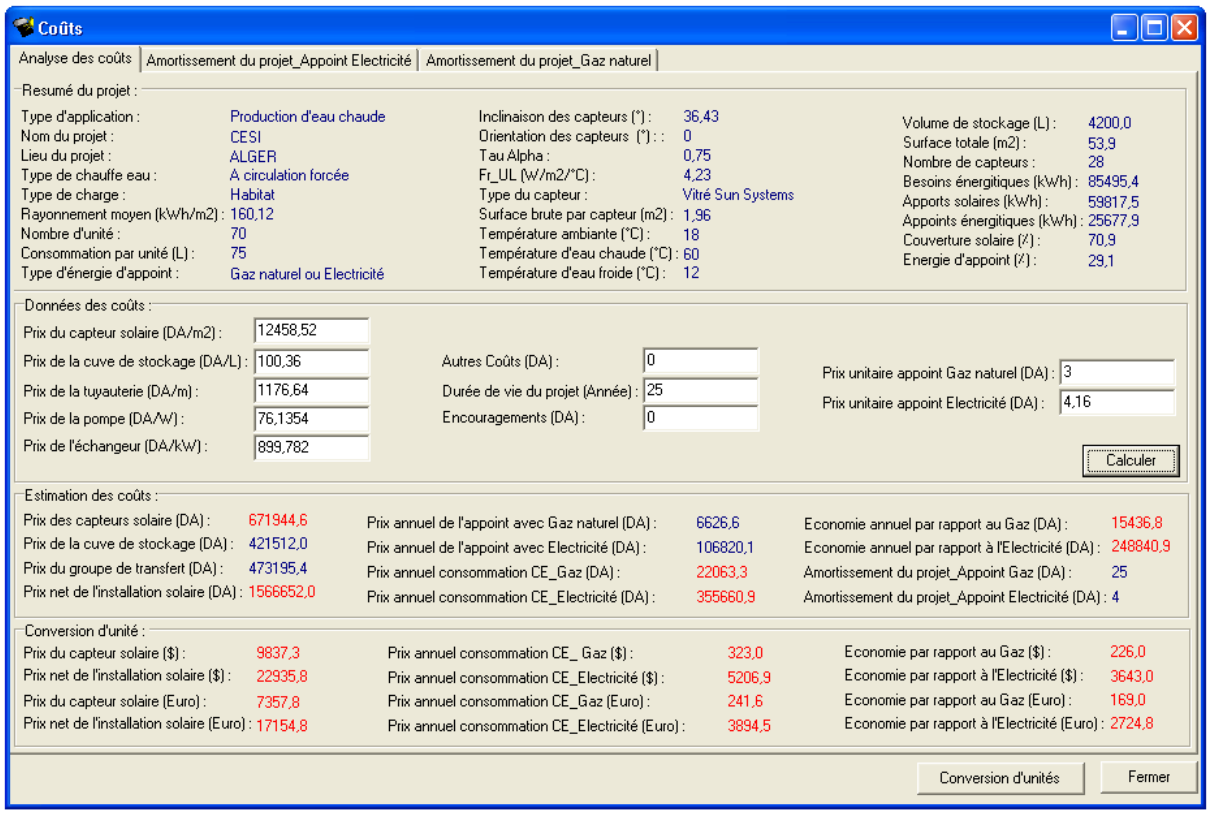


Figure63: Représentation de la feuille 'Coûts'.

6.1. Estimation des coûts d'un CES individuel

Supposant qu'on va calculer le coûts d'un chauffe eau solaire individuel pour une famille de 4 personnes résidant a Alger, et qui possède une cuve de stockage de 300litres, la température d'eau chaude souhaitée sera à 60°C, le capteur plan choisit est un capteur vitré du type 'Sun System', les prix unitaires relatives aux équipements énergétiques utilisés sont données ci-après:

Prix du capteur solaire	12458.52 DA/m^2
Prix de la cuve de stockage	74.75 DA/L
Prix de la tuyauterie	622.92 DA/m
Prix de la pompe	1211.24 DA/m
Prix de l'échangeur	1384.28 DA/kW

Figure64: Prix unitaire des équipements.

Le prix des capteurs solaire sera de 47996 DA, le réservoir coûtera 22425 DA et le groupe de transfert coûtera 74370 DA, le prix net de l'installation solaire sera alors **144791 DA**, Si cette famille utilise comme énergie d'appoint le gaz naturel, elle aura à payer un frais annuel de 507.8 DA, et si cette énergie était de l'électricité le montant du frai annuel s'élèveras à 8185.6 DA.

Nous allons maintenant comparer les résultats issus du logiciel à ceux d'une famille ne possédant pas de chauffe eau solaire. Si cette famille utilisée un chauffe eau à gaz, le coût de sa consommation annuelle de gaz naturel sera de 1576 DA, par contre si ce chauffe eau été fonctionnel en électricité, cette famille aura a payé 25404.4 DA par an. L'économie annuel qu'elle réaliseras en utilisant un chauffe eau solaire sera de 1068.2 DA pour le gaz et de 17218.7 DA pour l'électricité, soit environ une économie de 31% d'énergie.

6.2. Variation des coûts selon le modèle

Les coûts de l'installation varie considérablement selon le type de chauffe eau choisi (Avec régulation ou thermosiphon), selon le type de capteur (vitré ou sous vide), la cuve de stockage et l'échangeur de chaleur.

- Supposant qu'on change le capteur solaire précédent par un autre à tube sous vide, le prix du capteur sera de 33914.86 DA, soit 16957.43 DA/m^2, ce qui résulte que le prix de l'installation solaire sera un peu plus élevé **162123 DA**, généralement pour L'Algérie on utilise des capteurs simple vitrage qui donne de très bon rendement pour le chauffage de l'eau et leurs prix est acceptable par rapport a ceux à tube sous vide. Si on choisissait un capteur vitré plus performant que le précédent, son coût sera plus cher, mais sa durée de vie et son rendement sera meilleur. Exemple un capteur plan qui coûtera 39407.9 DA, donnera un prix de l'installation solaire de **175610.8 DA**.

- Les coûts relatifs à cette installation seront beaucoup plus moins si ce système été du type thermosiphon, dans ce cas certains coûts s'élimineront, et l'installation comprend uniquement: le capteur, la cuve et l'échangeur de chaleur, le prix des capteurs seras 47996 DA, celui de la cuve sera 22425 DA et celui de l'échangeur est de 3045.4 DA, le coût total de l'installation seras donc **73466.5 DA**.

6.3. Estimation des coûts d'un CES collectif

- Arrivant à l'estimation des coûts d'un CES collectif, on reprendra l'exemple de l'immeuble pré dimensionné dans la pertie1 du logiciel, avec un volume de stockage total de 2400L, on a besoin de 28capteurs plan du type 'Sun Systems' pour la ville d'Alger, par contre 23capteurs du même type suffiront pour Ghardaïa et seulement 21capteurs pour Adrar. Nous allons maintenant faire une étude économique des trois villes, les résultats obtenus varie d'une zone à l'autre, pour Alger une installation de ce type coûteras **1566652 DA** avec un appoint annuel en gaz de 6626.6 DA et en électricité de 106820.1 DA, soit une économie annuel de gaz naturel estimé à 15436,8 DA et en électricité à 248840,9 DA (70% d'économie), le temps qu'il faut pour l'amortissement de l'investissement dans ce projet est de 4ans pour un appoint en électricité. L'installation sera d'un montant de **1439425,1 DA** si elle est réalisée à Ghardaïa et uniquement **1392492,2 DA** à Adrar avec une économie d'énergie de 72%.

- Les coûts des systèmes collectifs seront d'autant plus élevés que le nombre d'unités croient, si on évalue le coût du système collectif précédent avec un nombre de personne de 48, l'installation coûteras **1785343,4 DA** contre **1566652 DA** pour 70 individus (Figure65), l'économie annuelle sera plus intéressante et le temps de retour également (4ans seulement). (Figure64).

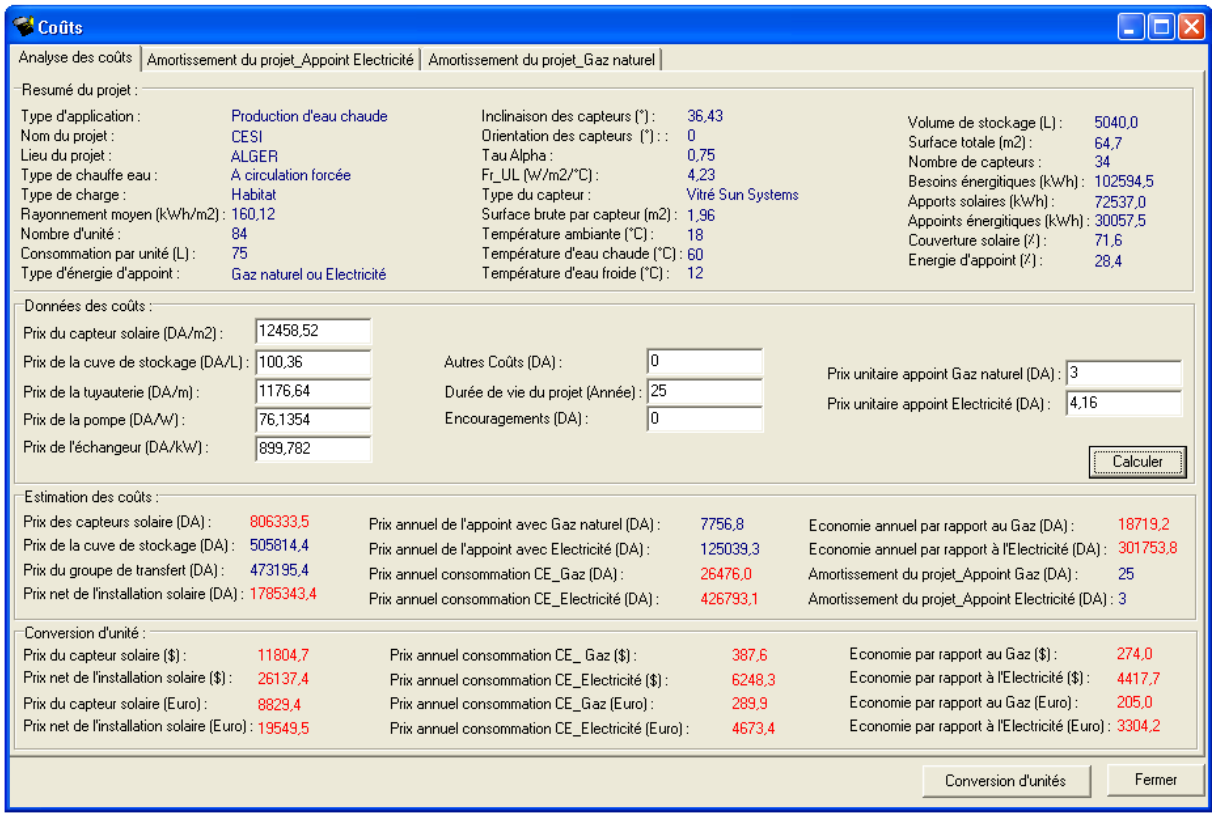


Figure65: Estimation des coûts pour le projet CESC situé à Alger.

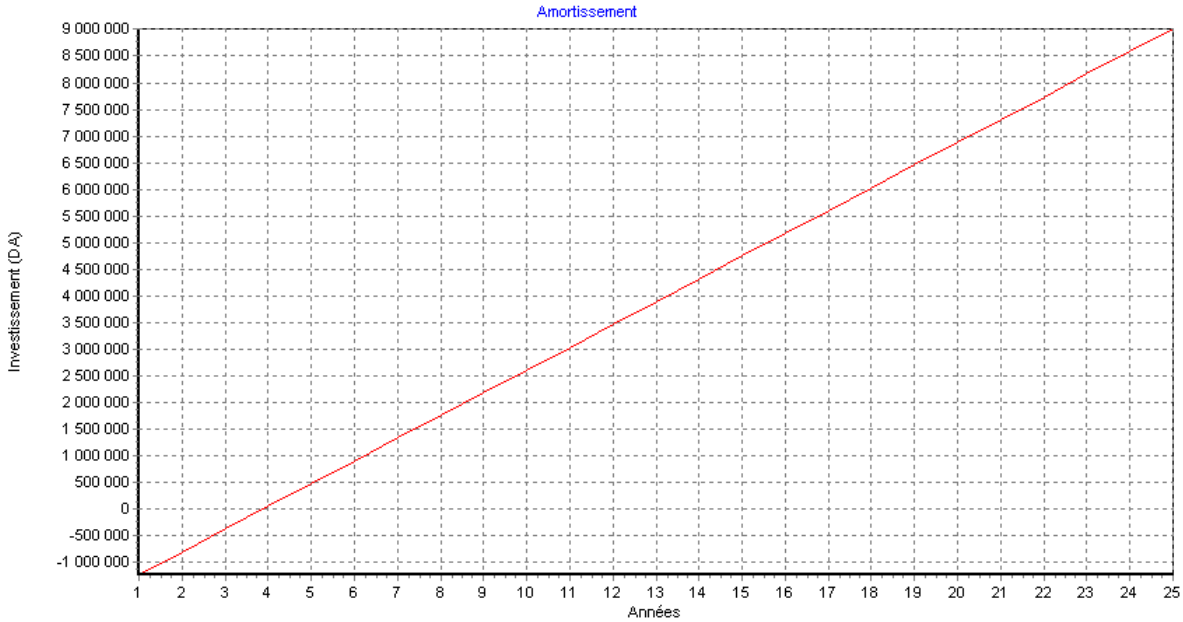


Figure66: Amortissement de l'investissement du projet CESC situé à Alger.

7. Conclusion

Actuellement les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature et selon les estimations, les réserves mondiales seront épuisées vers l'année 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au plus tard vers 2100 si des efforts sont fournis concernant la production et la consommation nécessaire.

L'énergie solaire se caractérise par une disponibilité exceptionnelle et une absence de pollution. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême au conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion,.....etc.), et donc une grande longévité, il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

L'Algérie a commencé dernièrement à s'introduire dans le solaire thermique à plusieurs échelles en coopération avec des sociétés étrangère, mais l'investissement reste encore minime par rapport a son potentiel énorme en énergie solaire. Pour cela, il est important que le pays commence à maîtriser cette technologie pour pouvoir à terme, équilibrer sa consommation en introduisant de plus en plus l'énergie solaire thermique et des énergies renouvelables en terme général.

Dans le cadre de ce travail on s'est proposés de développer un outil informatique pour la gestion des projets de chauffage solaire de l'eau, le logiciel réalisé permet de faire l'étude économique des chauffes eau solaire et cela en passons d'abord par un dimensionnement optimal de l'installation en question. L'approche que nous avons donnée montre la faisabilité de ce genre de projets (chauffes eau solaire collectifs) en Algérie, les résultats obtenus sont satisfaisants, le modèle thermosiphon avec des capteur vitré est très économique par contre le modèle avec régulation est un peu plus coûteux mais très rentable et peu être améliorable, l'énergie d'appoint recommandable est l'électricité du faite que son utilisation est très propre par rapport à l'environnement et le temps de retour de son investissement est minime.

Un pays comme l'Algérie pourra donc dégager d'énormes quantités de gaz naturel pour l'exportation. Ces quantités ne seraient pas utilisées pour le chauffage ou dans la production électrique, du fait de la mise en place des systèmes de chauffe eau collectifs avec l'aide technique et le financement de l'Union Européenne dans le cadre d'un partenariat énergétique à long terme.

8. Bibliographie

[06] «Systèmes photovoltaïques pour les pays en développement», Théodore FOGELMAN, 1983.
[07] «Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region», by German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment, 2005.
[08] «Global Initiative For Concentrating Solar Power », F.Morse, 2004.
[09] Applications de l'énergie solaire thermique dans le bassin méditerranéen, AESTBM, Mars 2004.
[10] « L'abc des technologies de l'énergie renouvelable», K.Ogilvie, 2003.
[11] « Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration», A.Ferriere, G.Flamant, 2005.
[15] «Fiche de synthèse de la missions économiques de l'ambassade de France en Chine» 'Les énergies renouvelables en Chine', Octobre 2004.
[16] «Le secteur des énergies renouvelables en Tunisie», Unité pour la promotion des investissements, avril 2002.
[18] Extrait du «Séminaire sur le rôle des énergies renouvelables dans la sécurité et la diversité énergétique», par l'Agence Nationale pour la maîtrise de l'Énergie, Tunis le 26 Avril 2005.
[21] «Guide pour l'intégration architecturale des capteurs solaire thermique», pays d'AIX, 2005.
[27] « Statistical Review of world Energy», BP, 2005
[30] Algérie: Ministère de l'Energie et des Mines, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, 2006.
[31] «Report on the SolarPACES START Mission to Algeria», M.Geyer, 2003.

[34] Manuel d'ingénierie et d'études de cas, RETscreen, 2004.
[35] Solar Engineering of thermal processes, John A.DUFFIE, William A.BECKMAN, 1991.
[36] L'énergie Solaire utilisation thermique et photovoltaïque, Ahmed KHEDIM, ANEP, 2005.

[01] http://www.notre-planete.info
[02] http://www.wikipedia.org
[03] http://www.tecsol.fr
[04] http://www.industrie.gouv.fr
[05] http://www.Planete-energies.com
[12] http://www.outilssolaires.com
[13] http://www.iea-shc.org
[14] http://www.estif.org
[16] http://www.Ademe.fr
[17] http://www.enerdata.fr
[19] http://www.opet-network.net
[20] http://www.cder.org.ma
[22] http://www.eere.energy.gov
[23] http://www.esttp.org
[24] http://www.planete-energies.com
[25] http://www. Gaz-naturel.ch/fr
[26] http://www.bp.com
[28] http://oee.nrcan.gc.ca
[29] http://basile.chez-alice.fr
[32] http://www.aprue.org.dz
[33] http://www.renewables-made-in-germany.com/fr