

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE SAAD DAHLAB-BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté au DEPARTEMENT des ENERGIES RENOUVELABLES

Par : Ayas fatima zohra

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN ENRGIES RENOUVELABLES

OPTION : Conversion thermique

THEME :

**Optimisation de la consommation énergétique d'un
Réfrigérateur solaire domestique**

Soutenu le : 24/09/2017

Devant le jury composé de :

- | | |
|------------------|------------|
| - Pr M. Merzouk | Président |
| - Mr K.kaci | Examineur |
| - Dr K.Mehalaine | Examineur |
| - Mme R.ouali | Promotrice |

2016-2017

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en énergies renouvelables, option conversion thermique au département des énergies renouvelables de l'université Saad dahlab Blida 1, sous la direction du **Pr MERZOUK Mustapha** que je remercie vivement pour toute aide qu'il m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.

Je tiens également à remercier la **Mme R.Ouali** pour l'aide et les conseils qu'elle m'a apportés en sa qualité de promotrice du présent travail et Mr **M.OUALI** mon Encadreur.

Tout comme je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire de Froid et Climatisation par Energies Renouvelables (UDES) pour l'aide qu'ils m'ont apportée durant la préparation du présent travail.

Mes plus vifs remerciements vont au **Pr M.Merzouk** pour m'avoir fait l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury en qualité Président.

Je remercie vivement Mr **K.kaci**, Dr **K.Mehalaine** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury en qualité d'examineurs.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des enseignants personnes, qui ont largement contribué à son aboutissement.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A Ma lumière, mon bonheur, mon premier amour ma chère Mère, qui était Tjr à mes cotée pour me soutenir je la remercie jamais assez

A mon père Allah yarahmou soit fier de moi.

A mes frères : Adlane, Mohamed, Rachid, Billel et Raouf et mes belles sœurs khadidja , justine et leur enfants : rahaf, islem , farouk. Pour leurs encouragement et leur soutiens moral et matériel.....merci ma famille.

A toute la famille ayas et djafer khoudja .

A tous mes amis qui m'ont aidé, encouragée « Meriem, Omar, Ramzi, sidali , chaima, rahil, Maroua ,khadidja, sissila, , Roumaissa , mimi ,sara, Naziha , karima..... »

*A la fin une spécial dédicace à une personne très chère, qui étais Tjrs mon bras droit, si je suis la car il est a mes cotés, il a tout fait pour réussir mes études
Je lui dis merci beaucoup pour tout ce que t'a fais pour moi mon cher mari
Bilal.*

ZOLLA

Résumé : Optimisation de la consommation énergétique d'un réfrigérateur solaire domestique

Le réfrigérateur solaire photovoltaïque est conçu pour répondre aux besoins en froid des populations localisées dans les zones enclavées, les bases de vie et les postes avancés non couverts par le réseau électrique. Il est destiné principalement à la conservation d'aliments (fruits, légumes et viandes), à la conservation des produits pharmaceutiques (médicaments et vaccins) et à assurer un cadre de vie confortable dans les zones rurales. La présente étude concerne l'optimisation énergétique et thermique d'un réfrigérateur domestique alimenté par énergie solaire photovoltaïque. Ce dernier s'appuie sur la technique de compression de vapeur. Le principe d'accumulation de froid par solutions eutectiques est utilisé dans notre appareil. L'utilisation des Matériaux à changement de phase (MCP) offre une grande autonomie de conservation dans les cas les plus défavorables. Ceci a pour effet une réduction de l'énergie consommée permettant ainsi de réaliser un gain sur le nombre de modules photovoltaïques et le nombre des batteries associées.

Mots clés : Réfrigération solaire, photovoltaïque, chaleur latente, matériaux de changement de phases

Abstract: Optimization of the energy consumption of a domestic solar refrigerator

The solar photovoltaic refrigerator is designed to meet the cooling needs of populations located in landlocked areas, life bases and advanced substations not covered by the electricity grid. It is mainly intended for the preservation of food (fruits, vegetables and meat), the preservation of pharmaceutical products (medicines and vaccines) and to ensure a comfortable living environment in rural areas. The present study concerns the energy and thermal optimization of a domestic refrigerator powered by solar photovoltaic energy, The latter is based on the technique of compression of steam. The principle of accumulation of cold by eutectic solutions is used in our apparatus. The use of Phase Change Materials (PCM) offers a high degree of self-sustainability in the worst cases. This has the effect of reducing the energy consumed, thus making it possible to realize a gain on the number of photovoltaic modules and the number of associated batteries.

Keywords: Solar energy; refrigeration; photovoltaic. chaleur latente, materials for changing phases

الملخص : لاستفادة المثلى من استهلاك الطاقة من التلاجة الشمسية المحلية

تم تصميم التلاجة الشمسية لتلبية احتياجات التبريد للسكان الموجودين في المناطق غير الساحلية وقواعد الحياة والمحطات الفرعية المتقدمة التي لا تغطيها شبكة الكهرباء ويهدف أساسا إلى الحفاظ على الأغذية (الفواكه والخضراوات واللحوم)، والحفاظ على المنتجات الصيدلانية (الأدوية واللقاح)، وضمان بيئة معيشية مريحة في المناطق الريفية. وتتعلق هذه الدراسة بالطاقة والتحسين الحراري للتلاجة المنزلية التي تعمل بالطاقة الشمسية الضوئية ويستند هذا الأخير على تقنية ضغط البخار. يتم استخدام مبدأ التراكم البارد من خلال حلول يوتكتيك في جهاز لدينا. استخدام مواد تغيير المرحلة (MCP) يوفر درجة عالية من الاستدامة الذاتية في أسوأ الحالات. وهذا له تأثير على خفض الطاقة المستهلكة مما يجعل من الممكن تحقيق مكاسب على عدد من الوحدات الضوئية وعدد البطاريات المرتبطة بها.

كلمات مفاتيح: التلاجة الشمسية, الفتوضوي, الحرارة الكامنة

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Sommaire	vii
Nomenclatures	xii
Liste des tableaux	xiv
Liste des figures	xvi

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction	4
I.1.Machine frigorifique	4
I.2 Production du froid solaire	5
I.2.1 Réfrigérateur à compression de vapeur	5
I.2.1.1.Revue critique sur les réfrigérateurs solaires photovoltaïques réalisés	6
I.2.1.2.Les éléments du cycle frigorifique (compression).....	9
I.2.1.3.Principe de fonctionnement d'un cycle frigorifique	12
I.3.Conversion de l'énergie solaire	14
I.3.1.Potentiel solaire en Algérie	15
I.3.2 Procèdes de conversion et de stockage photovoltaïque	15
I.3.2.1 Principe de fonctionnement	15
I.3.2.2 Générateur photovoltaïque.....	16
I.3.2.3 Configuration des installations photovoltaïques	17
I.3.2.4 Système de stockage (Installations autonomes)	18
I.4 matériaux à changement de phase	18
I.4.1 Les MCP existants	19
I.4.2 Les fonctionnalités	21
I.4.3 Les applications	21

I.5 Objective	22
Conclusion	22

CHAPITRE II : BILAN ENERGETIQUE

Introduction	23
II.1 Bilan thermique d'un réfrigérateur	23
II.1.1 Détermination des charges externes	24
II.1.1.1 Charges thermiques par transmission à travers les parois	24
II.1.1.2 Quantité de chaleur journalière passant par renouvellement d'air	27
II.1.2 Détermination des charges externes	29
II.1.2.1 Quantité de chaleur journalière passant par les produits	29
II.1.2.2 Charges thermiques dues à l'éclairage	30
II.1.3 Apport total QT	31
Conclusion	31

CHAPITRE IV : DISPOSITIF EXPERIMENTAL, RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction	32
III.1. Dispositif Expérimental et conditions d'essais	33
III.1.1. Réfrigérateur.....	33
III.1.2. Mesures expérimentales et acquisition.....	33
III.1.2.1. Mesure de la température	33
III.1.2.2. Mesure de la consommation électrique.....	34
III.1.2.3. Acquisitions des données	35
III.1.3 Disposition des thermocouples sur le réfrigérateur.....	36
III.1.3.1 Contrôle et régulation de la température de la chambre frigorifique.....	37
III.1.4. Emplacement du pack à accumulation de froid	39

III.1.5. Dimensionnement de l'installation frigorifique solaire DC-AC par PVSystem.....	39
III.2 Résultats et Discussions.....	42
III.2.1 Caractérisation thermique du réfrigérateur.....	42
III.2.2 Etude thermomécanique du réfrigérateur	44
III.2.3 Influence des ouvertures de la porte sur le comportement thermique du réfrigérateur (avec/sans PCM).....	47
III.2.3.1 Réfrigérateur Sans PCM	47
III.2.3.2 Réfrigérateur Avec PCM.....	46
III.2.4 Consommation électrique du Réfrigérateur (avec/sans PCM).....	49
III.2.4.1 Consommation électrique en régime établie sans ouverture de la porte.....	49
III.2.4.2 Consommation électrique en régime établie avec ouverture de porte.....	49
Conclusion.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	52
ANNEXES	57

Figure. I.1: Diagramme énergétique d'une machine frigorifique.....	5
Figure I.2 : Température à l'intérieur du compresseur pour diverses sources de courant Alternatif Légende.....	7
Figure. I.3: Schéma d'un compresseur.....	10
Figure. I.4 : Un condenseur.....	11
Figure. I.5: Détendeur thermostatique.....	11
Figure I.6: Evaporateur	12
Figure. I.7: Diagramme Enthalpique du cycle frigorifique : diagramme de Mollie.....	13
Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	16
Figure I.9 : Installation hybride	17
Figure I.10 : Installation autonome.....	17
Figure I.11: Installation connectée au réseau.....	18
Figure I.12 : Matériaux à changement de phase m minéraux	19
Figure I.13 : Matériaux à changement de phase organiques	20
Figure I.14 : Matériaux à changement de phase eutectique	20
Figure II.1 : Dimension d'un réfrigérateur	24
Figure II.2 : Les surfaces d'un réfrigérateur.....	26
Figure II.3 : Coupe transversale sur la paroi du réfrigérateur.....	27
Figure III.1 : Réfrigérateur domestique à compression de vapeur.....	34
Figure III.2 : Thermocouples K et T.....	35
Figure III.3 : Compteur d'énergie électrique à courant alternatif AC.....	36
Figure III.4 : Système d'acquisition Data Logger (Hydra 2700).....	36
Figure III.5 : Interface d'acquisition Hydra.....	37
Figure III.6 : Evolution des températures à l'intérieur du réfrigérateur.....	38
Figure III.7 : Thermostat mécanique à dégivrage manuel.....	39

Figure III.8 : Plaque PCM en contact avec l'évaporateur.....	40
Figure III.9: Méthodologie de dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque autonome avec stockage électrochimique.....	41
Figure III.10 : Evolution des températures lors du cycle primaire sans PCM.....	43
Figure III.11 : Evolution des températures lors du cycle primaire avec PCM.....	44
Figure III.12 : Variation de la température du réfrigérateur en différents niveaux et en régime établie (Sans PCM).....	44
Figure III.13 : Variation de la température du réfrigérateur en différents niveaux et en régime quasi-permanent (Avec PCM).....	45
Figure III.14 : Comparaison de la distribution des températures au niveau du thermostat pour les deux configurations en régime établie.....	46
Figure III.15 : Evolution de la température du réfrigérateur sans PCM lors des ouvertures de la porte.....	48
Figure III.16 : Evolution de la température du réfrigérateur avec PCM lors des ouvertures de la porte.....	49

Tableau I.1: Différents types de système de réfrigération solaire selon les sources énergétiques disponible	5
Tableau I.2: Potentiel solaire en Algérie.....	15
Tableau III.1 : La gamme de température des différents types de thermocouples.....	35
Tableau III.2 : Emplacement des thermocouples.....	37
Tableau III.3. Dimensionnement du système de réfrigération solaire photovoltaïque.....	42
Tableau III.4 : Durée des cycles Marche/Arrêt du réfrigérateur Sans PCM Mode établie une période de 5h30min.....	46
Tableau III.5 : Durée des cycles Marche/Arrêt du réfrigérateur Avec PCM Mode établie sur une période de 5h30min.....	46
Tableau III.6 : Taux moyen de fonctionnement et d'arrêt du réfrigérateur sur un cycle en régime établi.....	47
Tableau III.7 : Consommation électrique du réfrigérateur en régime établi sans ouverture de porte dans les 24h.....	50
Tableau III.8 : Consommation électrique du réfrigérateur en régime établi avec ouverture de porte dans les 24h.....	50

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'homme des pays tempérés s'est rapidement rendu compte que les produits alimentaires périssables pouvaient être conservés dans de bien meilleures conditions l'hiver que l'été.

L'utilisation du "froid naturel" s'est faite très tôt et aussi très longtemps puisqu'au début du 20ème siècle le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace produite naturellement, sans machines, était :

- soit issue, de façon permanente, de régions froides et transportée sur de longues distances
- soit issue, de manière discontinue, des pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il était nécessaire de conserver cette glace dans des édifices particuliers les "glacières" dont les parois devaient être thermiquement isolantes [2].

Dans ce chapitre, on fait une synthèse des différents travaux antérieurs et des généralités concernant le domaine du froid et de la réfrigération [22].

I.1.Machine frigorifique

Une machines frigorifique, est une machine thermodynamique destinée à assurer le froid d'un local ou d'un système à partir d'une source de chaleur externe dont la température est supérieure à celle du local ou du système à refroidir. C'est donc un système de froid qui transfère des calories d'un milieu à haute niveau de température vers un milieu où la température doit être inférieur [30].

L'écoulement naturel de la chaleur s'effectuant toujours d'un corps chaud vers un corps froid, on peut définir également la machine frigorifique comme un matériel permettant de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel, c'est-à-dire d'un milieu froid vers un milieu chaud. Une dépense d'énergie sera bien entendu inévitable pour réaliser ce transfert inverse. L'énergie nécessaire pour assurer le transfert doit être inférieure à l'énergie calorifique utile pour que le système ait un quelconque intérêt [5].

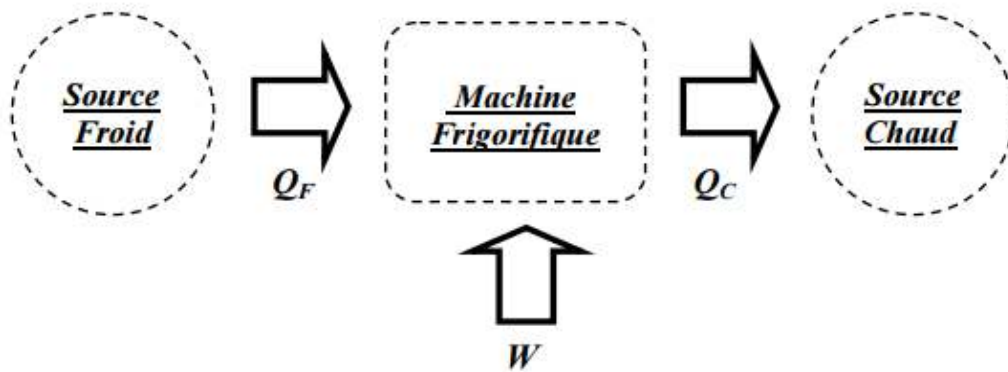


Figure. I.1: Diagramme énergétique d'une machine frigorifique

I.2. Production du froid solaire

Le choix d'une installation de réfrigération solaire se fait généralement en fonction des ressources disponibles dans le lieu où l'on se trouve. Il existe plusieurs types de réfrigérateurs adaptés à différentes sources d'énergies disponibles (tableau I.1) [7].

Tableau I.1: Différents types de système de réfrigération solaire selon les sources énergétiques disponibles

	Mode de fonctionnement	Source d'énergie	Type de réfrigérateur
Réfrigérateur solaire	Conversion du rayonnement solaire en énergie thermique	Rayonnement solaire	Adsorption / absorption
	Conversion du rayonnement solaire en énergie électrique (panneaux photovoltaïques)	Rayonnement solaire	Compression

I.2.1 .Réfrigérateur à compression de vapeur

Les systèmes de réfrigération les plus employés sont les systèmes à compression de vapeur ces derniers utilisent généralement une source d'énergie électrique pour leur fonctionnement [1].

Dans les régions où cette énergie est disponible, ces systèmes est souvent adéquat pour satisfaire la plupart des exigences en froid. Cependant, plusieurs régions ne disposent pas d'électricité. Ceci inclut les villages ruraux et les sites isolés.

La production de froid dans ces régions, par conséquent, exige une solution alternative. L'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie électrique pour l'alimentation des systèmes frigorifiques est très intéressante puisqu'elle est inépuisable et abondante dans les régions où le besoin en froid est énorme.

Plusieurs systèmes ont été réalisés dans ce contexte. Parmi ces systèmes, les systèmes frigorifiques alimentés par photovoltaïques sont les plus appropriés. On trouve dans la littérature plusieurs travaux qui montrent le progrès de réalisation des réfrigérateurs domestiques, dans le but principalement de réduire la consommation électrique et protéger l'environnement, et cela soit par le changement des équipements frigorifiques tels que l'emploi des compresseurs qui marchent en courant continu, évaporateurs eutectiques ou d'autres équipements ou soit par l'emploi des réfrigérants qui ne participent pas à la dégradation de l'environnement [23]. De plus, l'intégration des énergies renouvelables comme source de production d'électricité à aider à avoir des réfrigérateurs autonomes et propres.

I.2.1.1. Revue critique sur les réfrigérateurs solaires photovoltaïques réalisés

La recherche bibliographique effectuée dans cette partie est relative aux récents réfrigérateurs domestiques à compression de vapeur réalisés jusqu'à 2013 et leurs alimentation en énergie solaire photovoltaïque, ces travaux sont résumés comme suit :

Les travaux relatifs à l'alimentation de petits réfrigérateurs alimentés par des générateurs solaires photovoltaïques sont réalisés par Tomachan et al. 1996 ; Les mêmes auteurs, en 2000 ont prouvé que les réfrigérateurs domestiques conventionnels peuvent être alimentés en courant alternatif sinusoïdal ou non-sinusoïdal sans aucune dégradation thermique des compresseurs hermétiques [47].

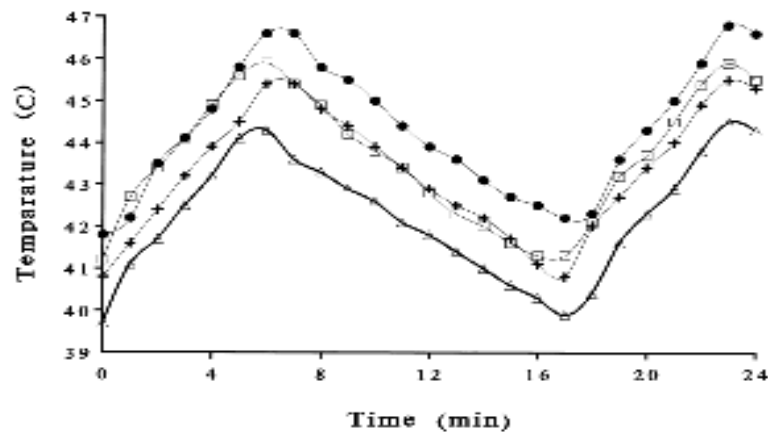


Figure I.2 : Température à l'intérieur du compresseur pour diverses sources de courant alternatif. Légende : ● -250 V ; □ -230 V ; △-200 V ; + -180 V.

En 1997 Siaka Toure et Wanignon Ferdinand Fassinou rapportons les résultats de l'étude du premier modèle de Réfrigérateur solaire photovoltaïque avec trois compartiments : un pour le stockage des vaccins et des médicaments, le second Pour l'usage personnel de la station médicale et le troisième pour la congélation de l'eau. Un entreposage à froid est fait autour de l'évaporateur pour donner au système plusieurs jours d'autonomie.

L'étude expérimentale du système a été réalisée, ainsi qu'un dimensionnement du générateur photovoltaïque [54].

En 1999, Ulrich et al. ont étudié la performance de deux réfrigérateurs alimentés en énergie solaire photovoltaïque autonomes sous les conditions climatiques éthiopiennes. Les résultats montrent la rentabilité des deux prototypes étudiés [49].

L'étude effectuée en 2003 par Blas et al. sur une installation frigorifique conçue pour refroidir une production quotidienne de 150 litres de lait a permis de montrer que l'autonomie photovoltaïque du système est de 2.5 jours. L'énergie photovoltaïque obtenue pendant la journée est stockée sous la forme de chaleur latente de l'eau glacée dans une cuve entourant le réservoir de lait, s'il y a une formation de 80% de glace [13].

Socrates et al. (2006) ont choisi un réfrigérateur conventionnel pour l'alimenter en énergie solaire, pour cela quelques modifications ont été apportées sur le réfrigérateur afin de réduire la charge de refroidissement et par conséquent la puissance requise [14].

Les tests expérimentaux et les simulations numériques menées par Anish et al. en 2009 sur un réfrigérateur domestique conventionnel converti pour fonctionner en énergie solaire ont montré la possibilité de réduire le coût des équipements principalement le champ et les batteries, et par conséquent le coût global du système [15].

Petros et al. (2009) ont réalisé un congélateur solaire photovoltaïque qui fonctionne sans stockage d'énergie pour être utilisé dans des applications véritablement autonomes dans les régions éloignées. Un nouveau concept de commande a été établi pour permettre la gestion de l'alimentation et le démarrage du compresseur, en outre le suivi de puissance maximale. Les résultats de prototype ont montré une très bonne capacité de fabrication de glace et un fonctionnement fiable et une grande amélioration dans les caractéristiques de démarrage des compresseurs, qui restent opérationnelles même pendant les jours à faible ensoleillement et de fonctionner avec une meilleure utilisation de l'énergie photovoltaïque disponible [16].

Zhang et al. (2010) ont fait une étude sur l'adaptation d'un réfrigérateur solaire photovoltaïque pour fonctionner dans la région de Shanghai. Les résultats trouvés montrent que la plus basse température dans le congélateur peut atteindre près de -15°C avec une consommation raisonnable de l'énergie. Vu les performances du réfrigérateur il peut servir pour le stockage de denrées périssables, des vaccins, des médicaments [53].

Dans ce même contexte, Ekren et al. (2011-2012) ont montré la faisabilité d'alimenter un réfrigérateur domestique fonctionnant avec un compresseur qui marche à courant continu avec une vitesse variable par énergie solaire photovoltaïque sans utilisation de l'onduleur, dans le but de réduire le coût du système. La comparaison a montré que le fonctionnement à vitesse variable du compresseur à courant continu peut être beaucoup plus efficace que le fonctionnement à vitesse constante, en particulier à des vitesses plus élevées [50].

En 2011, Mehmet et al. Ont réalisé un réfrigérateur photovoltaïque polyvalent pour étudier expérimentalement ses performances au cours de fonctionnement journalier et saisonnier sous les conditions climatiques de la Turquie. Les résultats révèlent que dans l'ensemble, ce réfrigérateur peut être utilisé de manière fiable en permanence indépendamment du réseau local [47].

Dans le but de la protection de l'environnement, Nawaz et al. 2012 ont conduit une comparaison entre un système de réfrigération solaire à compression, et conventionnel. D'après les résultats trouvés, le réfrigérateur solaire s'avère être techniquement meilleur, et aussi économique lorsqu'il est utilisé dans les petites industries et des usages domestiques, où encore lorsqu'il y a des crises de l'électricité ou dans les régions de climats chauds, la quantité d'émissions de CO₂ a été complètement supprimée alors qu'il y a des émissions produites par le système conventionnel [48].

A travers les résultats obtenus par Liu et al. (2012), sur l'étude expérimentale comparative entre un réfrigérateur solaire photovoltaïque qui fonctionne à courant continu avec et sans Matériau à Changement de Phase (MCP). Le réfrigérateur avec MCP présente de nombreux avantages par rapport à celui sans MCP [50].

En 2012, Mba et al. ont abordé une modélisation suivie d'une simulation sur le système, notamment l'effet des différents panneaux solaires sur la relation existante entre les températures de sortie du système de congélation et le rayonnement solaire incident. Il est à noter que lorsque la tension du réseau augmente, la taille de la batterie de fonctionnement du système diminue et le courant correspondant à la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'insolation. Il a été également observé que la puissance MPP (Maximum Power Point) augmente quand l'insolation solaire incidente augmente, alors que la tension MPP reste constante (14.2V) et indépendamment du niveau de l'insolation. (en conclusion quel est l'effet du rayonnement sur la température) [52].

I.2.1.2 .Les éléments du cycle frigorifique à compression

a) Compresseur :

Le compresseur, dans un dispositif de réfrigération, a pour rôle de créer une Haute Pression (HP) d'un côté, et une Basse Pression (BP) de l'autre, afin d'assurer la circulation d'un fluide dans le circuit frigorifique d'une pompe à chaleur [7].



Figure. I.3: Schéma d'un compresseur

Un compresseur aspire et refoule toujours un réfrigérant en phase gazeuse (vapeur).

- **Les différents types de compresseurs**

Il existe différents types de compresseurs sur le marché :

- **Les compresseurs à piston** : c'est un modèle courant qui équipe principalement les réfrigérateurs et les congélateurs ménagers. Peu encombrant et compact. En phase d'admission, le piston aspire le fluide, puis le comprime pour l'évacuer ensuite comprimé dans le circuit. Et un nouveau cycle recommence. On peut aussi rencontrer ce genre de compresseur dans le froid industriel, pour les groupes de production d'eau glacée par exemple, ou pour les centrales de traitements d'air.
- **Les compresseurs à spirale** : on les appelle aussi compresseurs « scroll ». On les reconnaît à leur forme allongée. Ils emploient deux spirales intercalées comme des palettes pour pomper et comprimer les fluides. Souvent, une des spirales est fixe alors que l'autre se déplace excentriquement, sans tourner de sorte à emprisonner des poches de fluide entre les spires. Leur champ d'application est plutôt pour la climatisation du fait de leur discrétion sonore.
- **Les compresseurs à vis** : on les appelle aussi, hélico compresseur, Ils sont constitués de deux vis synchronisées contre rotatives qui permettent de comprimer le fluide. On joue sur une diminution du volume pour comprimer le fluide. En effet, l'empreinte des vis est plus creusée à l'entrée qu'à la sortie. Suivant les modèles et la distance entre les deux vis, un film d'huile est utilisé pour assurer l'étanchéité.

En conclusion à chaque dispositif de froid sa technologie de compresseur.

b) Condenseur :

Un condenseur est un élément dont la fonction principale est de liquéfier ou condenser (transformation d'un gaz en liquide) la vapeur sur une surface froide, ou via un échangeur thermique maintenu froid par la circulation d'un fluide réfrigérant.

La chaleur latente du corps est transférée dans le fluide réfrigérant, ce qui consiste en un changement de phase à température constante. Le fluide réfrigérant varie en fonction du débit de gaz ou vapeur à condenser et de la température de condensation du gaz : air, eau, saumure.



Figure. I.4 : Un condenseur

c) Détendeur :

Le détendeur fait partie des 4 éléments indispensables (le compresseur, le condenseur et l'évaporateur) au bon fonctionnement d'une installation frigorifique. Il permet de régler automatiquement la quantité de fluide admise dans l'évaporateur et de passer de la HP à la BP. Il existe plusieurs types de détendeurs frigorifiques tels que les détendeurs thermostatiques à égalisation interne/externe de pression, détendeurs électronique, détendeurs à tube capillaire.



Figure. I.5: Détendeur thermostatique

d) Évaporateur :

L'évaporateur est un échangeur de chaleur qui absorbe l'énergie provenant du médium à refroidir par le biais d'un liquide s'évaporant après avoir été détendu. Au début de l'évaporation nous observons un mélange vapeur + liquide, mais la proportion de liquide est à ce moment-là majoritaire, puis petit à petit le fluide absorbe la chaleur contenue dans le médium à refroidir (air, eau, saumure), cet échange thermique va permettre d'inverser la proportion vapeur/liquide, pour avoir finalement en sortie d'évaporateur que de la vapeur qui sera aspiré par le compresseur.



Figure I.6: Evaporateur

I.2.1.3. Principe de fonctionnement d'un cycle frigorifique

Dans un premier temps, le compresseur va aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température (1). L'énergie mécanique apportée par la compression va permettre l'élévation de la pression et de la température du gaz frigorigène. Une augmentation d'enthalpie en résultera (2). La deuxième étape représente le passage du fluide caloporteur dans le condenseur. Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur et ainsi se refroidir "Désurchauffe 2-3" et cela avant l'apparition de la première goutte de liquide (3) zone I du condenseur. La condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur (4) zone II du condenseur. Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés "sous-refroidissement 4-5" avant de quitter le condenseur (5) zone III. La phase de condensation est en rapport directe avec la quantité de chaleur évacuée au niveau du condenseur. La troisième étape, nécessite l'insertion d'un dispositif de détente (détendeur), afin d'abaisser la pression dans le circuit (6), pour permettre le changement de phase dans l'évaporateur, du fluide caloporteur, de l'état liquide à l'état gaz.

Le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans l'organe d'étranglement ou détendeur.

La quatrième et dernière étape, représente la production frigorifique du système au niveau de l'évaporateur. Le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur (7). Enfin, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur, c'est ce qu'on appelle la phase de "surchauffe 7-1". Le cycle est fermé, le fluide frigorigène évolue sous l'action du compresseur dans les quatre éléments constituant la machine frigorifique. L'ensemble du cycle peut être représenté dans le diagramme enthalpie pression [23].

Sous la courbe en cloche se situent les états de mélange liquide-vapeur; à gauche de la cloche, le fluide est à l'état liquide "sous-refroidi", à droite, le fluide est à l'état vapeur "surchauffé", (Figure I.7) [15].

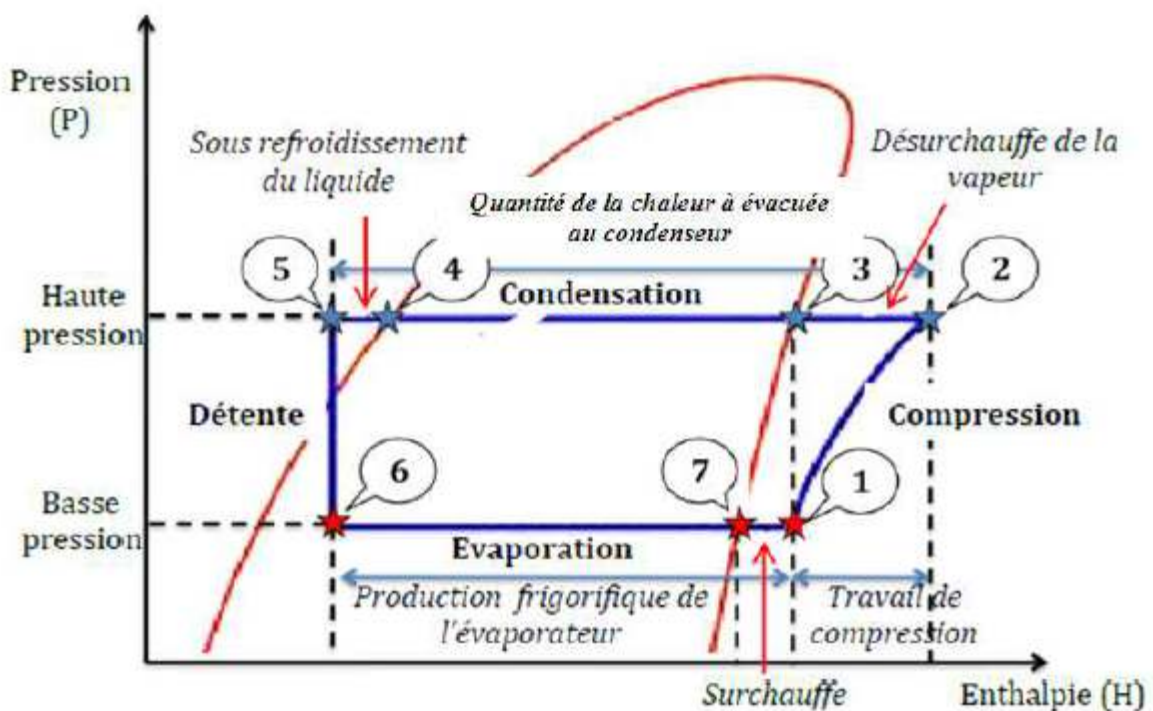


Figure. I.7: Diagramme Enthalpique du cycle frigorifique : diagramme de Mollie [28]

A) La surchauffe

La surchauffe est un renseignement important sur les conditions de fonctionnement d'un évaporateur. Elle représente une augmentation de la température des vapeurs aspirées à la fin de l'évaporateur sans augmentation de la pression, c'est aussi ce qui détermine la bonne alimentation en fluide de l'évaporateur.

La surchauffe représente la différence entre la température mesurée avec un thermomètre au bulbe du détendeur et la température d'évaporation lue au manomètre BP, (relations : pression, température).

On considère que les pertes de charge des tuyauteries sont négligeables, si celles-ci sont importantes, il sera nécessaire de mettre une vanne schrader en sortie d'évaporateur pour avoir une lecture fiable. Elle est généralement comprise entre 5 et 8 C°. Surchauffe trop importante Le détenteur est fermé, il ne laisse passer que peu de liquide ou l'installation n'est pas suffisamment chargée en fluide, la puissance frigorifique est faible, la différence entrée, sortie sur l'évaporateur est faible, la BP est faible, l'installation n'arrive pas à température.

B) Le sous-refroidissement

Le sous-refroidissement donne une indication sur le niveau du remplissage en fluide d'une installation, et représente la différence entre la température de condensation lue au manomètre HP (relation : pression, température) et la température mesurée à la sortie du condenseur. Généralement la valeur du sous-refroidissement est comprise entre 4 et 7 C°. Un trop grand sous-refroidissement indique qu'il y a trop de liquide dans le condenseur, à l'inverse un faible sous-refroidissement suggère un manque de fluide.

I.3. Conversion de l'énergie solaire

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre. Le rayonnement solaire global est composé de rayonnements de différentes longueurs d'ondes et intensités. Le maximum d'intensité a lieu dans le rayonnement visible, soit pour une longueur d'onde de 0.5 μm . La répartition de l'énergie solaire à la surface de la terre est comme suit [39]:

- Rayons ultra-violets $\approx 6\%$
- Rayons visibles $\approx 50\%$
- Rayons infrarouges $\approx 44\%$

Un panneau solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme. On distingue deux types de panneaux solaires : les panneaux (capteurs) solaires thermiques qui convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude ; les panneaux (modules) solaires photovoltaïques qui convertissent la lumière en électricité.

I.3.1. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays [8] .

Tableau I.2: Potentiel solaire en Algérie

Régions (ce gisement solaire dépasse les 5milliards de Gwh)	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.3.2. Procèdes de conversion et de stockage photovoltaïque

I.3.2.1. Principe de fonctionnement

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (*Si*), le germanium (*Ge*), le sélénium (*Se*) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (*GaAs*), le tellure de cadmium (*CdTe*). La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. Les cellules de type *GaAs* sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La cellule solaire ou photopile à semi-conducteur permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière [26].

Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

- a) Les photons de lumière heurtent la surface photovoltaïque disposée en cellule ou en couche mince.
- b) Ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction, Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires "électron- trou".
- c) Les électrons chargés négatives (-) et les trous chargés positifs (+), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.
- d) Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule.
- e) Des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres recueillent alors le courant électrique continu qui est créé. Le courant est alors additionné d'une cellule à l'autre jusqu'aux fiches de connexion du panneau photovoltaïque et va ensuite s'additionner aux panneaux suivants connectés en série [47].

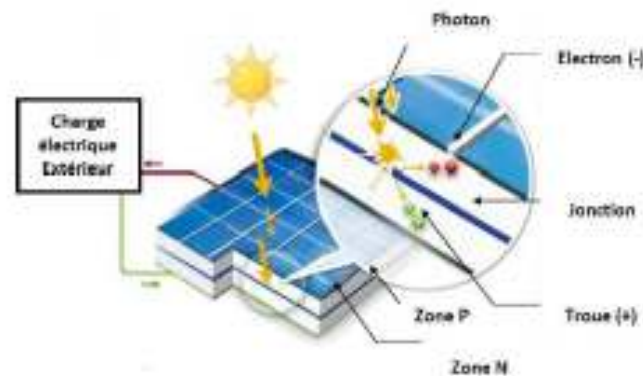


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.3.2.2. Générateur photovoltaïque

Chaque cellule photovoltaïque ne peut pas produire qu'une tension continue nominale de 0.5V à 0.6V en circuit ouvert et une puissance nominale voisine de 1.5Wc. Pour satisfaire les besoins des charges couramment utilisées, il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques soit en série soit en parallèle. Cet assemblage forme ce qu'on appelle "module photovoltaïque" [34]. Un module composé de 36 cellules en silicium cristallin est adapté pour la charge d'une batterie de 12V.

Le dimensionnement du système solaire détermine le nombre de modules à mettre soit en parallèle afin d'accroître le courant en conservant la tension, soit en série afin d'augmenter la tension en conservant le courant, et pour avoir une satisfaction en courant et en tension, un groupement mixte "série- parallèle" est obligatoire.

I.3.2.3. Configuration des installations photovoltaïques

La Configuration des installations photovoltaïques se fait selon ces trois manières [32]

a) Installation hybride : Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés ou il est important d'avoir l'électricité à tout moment, le groupe intervient lors des pic de puissance ou bien pour charger les batteries en cas de non ensoleillement.

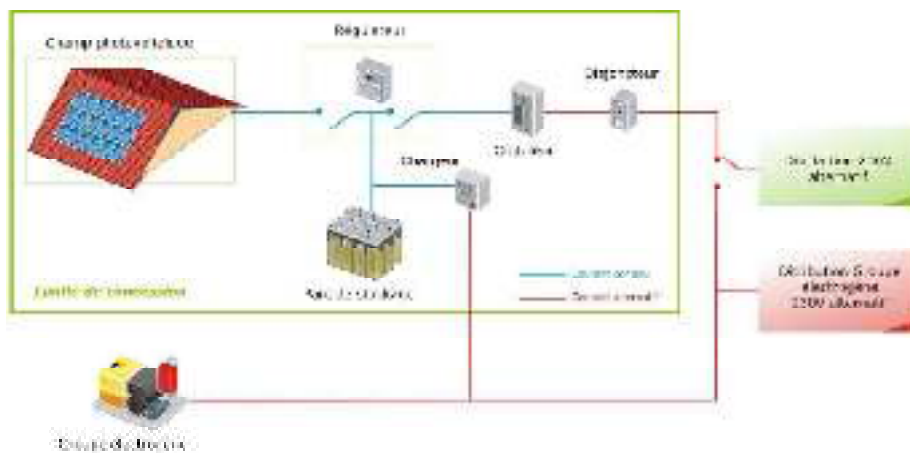


Figure I.9: Installation hybride

b) Installations autonomes : comme les maisons en sites isolés, elles nécessitent le plus souvent un stockage de l'électricité à l'aide d'accumulateurs. Si elles marchent en courant alternatif, il faut ajouter un onduleur.

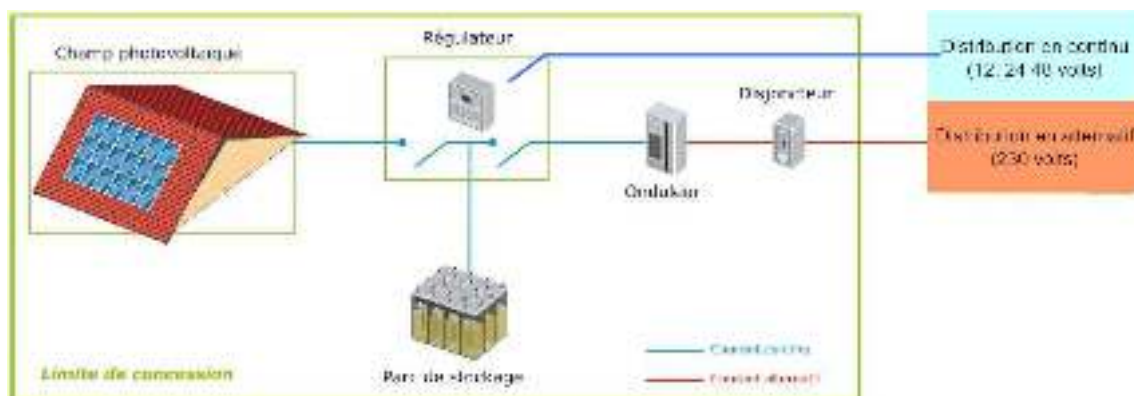


Figure I.10: Installation autonome

c) Installations ou centrales photovoltaïques connectées au réseau : Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

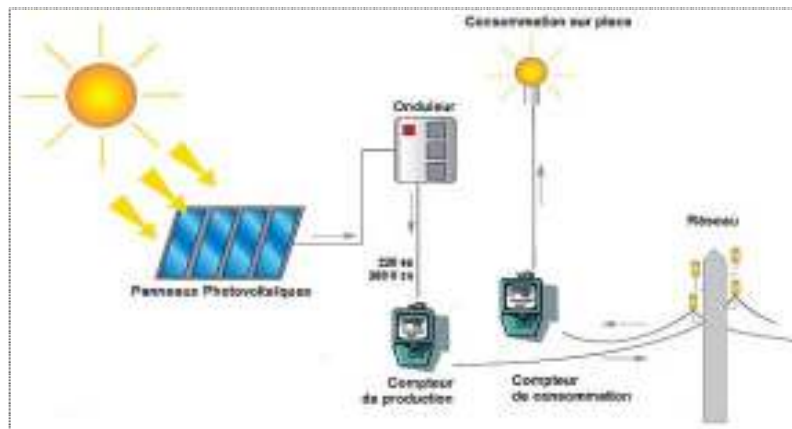


Figure I.11: Installation connectée au réseau

I.3.2.4. Système de stockage (Installations autonomes)

Dans le cas où l'énergie photovoltaïque doit assurer la totalité des besoins en électricité, il est nécessaire de la stocker pour les périodes non ensoleillées. Ce stockage est généralement assuré par des batteries. La plupart des systèmes photovoltaïques comportent des batteries spéciales (batteries stationnaires à alliages de Plomb) qui accumulent l'excédent d'électricité produit puis le restituent en cas de besoin. La présence d'un régulateur est nécessaire pour protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes. Ces batteries sont conçues pour restituer un courant stable pendant de longues périodes en conservant leurs aptitudes à la recharge, et ceci à un grand nombre de reprises (cycles), on parle de batteries stationnaires ou à décharge profonde [10].

I.4. matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase MCP ont particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente.

La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à état liquide (et vice versa).

Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple .Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse.

Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume. Plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage / restitution de la chaleur seront intéressantes.

Pour le stockage de l'énergie. D'autres changements de phase sont théoriquement envisageable (.solide-gaz. liquide-gaz). Mais en pratique c'est le passage solide-liquide qui offre le plus applications.

La plupart des transitions liquide-gaz est solide-gaz impliquent des volumes importants ou des hautes pressions pour stocker le matériau à son état gazeux.

De plus, ces transitions demandant des températures (et donc de l'énergie) lus importantes que dans le cas des transitions solide-liquide. Quant aux transitions solide-solide. Elles sont généralement très lentes et ont de faible énergie de transformation.

I.4.1. Les MCP existants

Il existe de nombreux types de matériaux à changement de phase, de nature physico-chimique particulièrement différentes les unes des autres.

Ce sont leurs caractéristiques de fusion-cristallisation qui les rendent intéressants pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces matériaux, on distingue les 3 grandes familles

Suivantes [9] :

- Les composés minéraux (ou inorganiques)

Parmi ces composés, seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation comme MCP, ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas. En revanche, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion.



Figure I.12: Matériaux à changement de phase minéraux

- Les composés organiques

De propriétés thermiques (chaleur latente et conductivité thermique surtout) moindre que les sels hydratés, ceux-ci présentent l'avantage de n'être pas ou particulièrement peu concernés par la surfusion. On utilise surtout, pour le stockage de chaleur latente, les paraffines et les acides gras qui appartiennent à cette famille.

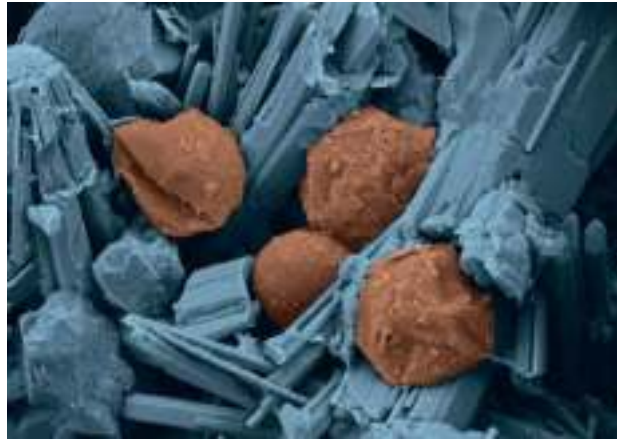


Figure I.13: Matériaux à changement de phase organiques

- Les composés eutectiques

Les Eutectiques sont un mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur spécifique de concentration. Ils peuvent être inorganiques et/ou organiques.

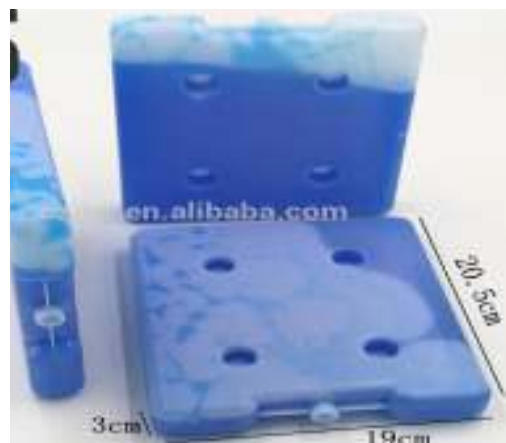


Figure I.14: Matériaux à changement de phase eutectiques

I.4.2. Les fonctionnalités

L'utilisation des MCP s'articule principalement autour de trois fonctionnalités :

- La capacité de garder au froid.
- La capacité de garder au chaud.
- La capacité de stocker la chaleur.

Comme nous l'avons vu, ces fonctionnalités reposent sur la faculté des MCP à stocker de l'énergie de manière latente. Lors d'une transition solide/liquide, les MCP vont utiliser la chaleur autour d'eux pour changer de phase, laissant la température stable aux alentours.

La force des MCP est d'être disponibles dans de larges gammes de températures en fonction de l'application visée [42].

I.4.3. Les applications

Les principales applications industrielles des matériaux à changement de phase sont les suivantes :

- isolation des bâtiments
- climatisation passive
- stockage d'énergie thermique
- refroidissement et transport de produits alimentaires ou de produits sensibles pharmaceutiques ou médicaux.
- Industrie textile

Et également :

- Récupération de la chaleur issue de l'incinération des déchets
- Diminuer les effets exothermiques de réactions chimiques
- Energie solaire
- Système thermique dans l'aérospatiale
- Refroidissement de moteur dans l'industrie automobile
- Protection thermique de composants et circuits électroniques

I.5. Objective

Cette étude vise l'optimisation de la consommation électrique pour une plus grande efficacité énergétique des appareils ménagers en particulier le réfrigérateur afin d'intégrer une maison à basse consommation alimentée en partie par les énergies renouvelables.

Les principaux objectifs de la présente étude consistent à étudier et à modifier un réfrigérateur domestique classique à compression de vapeur dans le but de réduire sa consommation électrique et son utilisation avec une source d'énergie électrique photovoltaïque.

L'intégration du stockage de froid par l'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP), réduit le temps de fonctionnement de l'appareil et par conséquent sa consommation électrique. Cette rationalisation énergétique permet l'optimisation de l'installation PV associée au réfrigérateur (Champ PV, Batteries Solaire, Régulation et Conversion).

Conclusion

Il ressort de cette étude théorique que la réfrigération à compression de vapeur est le procédé le plus répandu pour la production du froid. Les systèmes de réfrigération conventionnels nécessitent de l'énergie électrique pour leur fonctionnement, les sources de cette énergie sont responsables à l'émission de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre tels que les CFC et les HFC qui sont considérés la cause principale de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Ces problèmes poussaient les chercheurs à trouver des autres sources d'électricité, tel que la conversion du rayonnement solaire par les panneaux photovoltaïques.

CHAPITRE II

BILAN ENERGETIQUE

Introduction

Dans ce chapitre on va présenter une étude énergétique préliminaire de l'ensemble des pertes et de gains thermiques de notre réfrigérateur.

Du à l'importance de cette partie dans la détermination de l'influence de l'ouverture de la porte du réfrigérateur sur la déperdition frigorifique ainsi sur la consommation énergétique de notre réfrigérateur [37], les caractéristiques techniques du dispositif étudié ont été fournies par le fabricant CONDOR Algérie.

II.1. Bilan thermique d'un réfrigérateur

Un réfrigérateur ayant la forme d'un parallélépipède rectangle de 0,82m de haut, 0,52m de large et 0,54m de profondeur.

- La température à l'extérieure de réfrigérateur est variée entre [21°C à 27°C] « maison climatisée » donc la température moyenne des faces extérieures est de 24 °C=297 K.
- La température à l'intérieur de réfrigérateur est variée entre [-3°C à -9°C] donc la température moyenne des faces intérieures est de -6 °C=267 K.

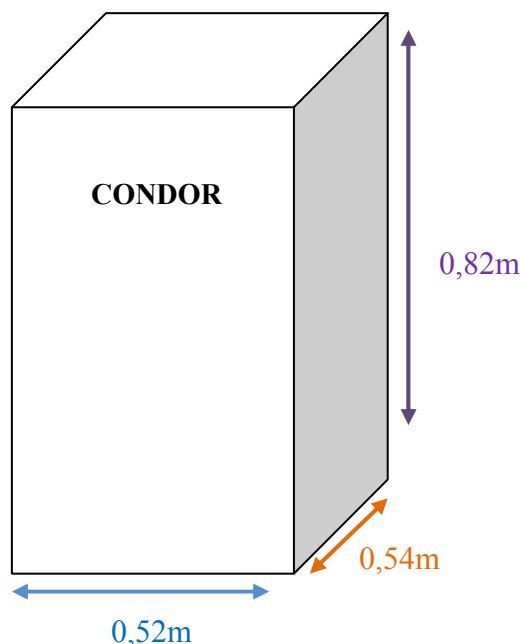


Figure II.1 : Dimension d'un réfrigérateur

Les charges thermiques autour d'un container se résument en deux composantes:
Les charges externes et les charges internes [7].

❖ **Les charges externes :**

Elles sont constituées essentiellement de :

- les charges dues aux apports de chaleur par transmission travers des parois : Q1,
- les charges thermiques dues la infiltration et ouverture des portes: Q2.

❖ **Les charges internes :**

On les subdivise en deux catégories:

- l'introduction de produits à température ambiante extérieure : Q3.
- le système d'éclairage : Q4.

Ces quantités de chaleur sont calculées sur 24 h.

II.1.1. Détermination des charges externes

II.1.1.1. Charges thermiques par transmission à travers les parois

$$Q1 = (S \times k \times \Delta T) \times 24 \quad (II.1)$$

- Q1 : Quantité de chaleur journalière passant par conduction au travers des parois(Wh).
- S : Surfaces d'échange totales (m²).
- k : Coefficient de transmission thermique des parois en W/m².K.
- ΔT : Différence entre la température extérieure et la température intérieure (K).
- 24 : Durée d'une journée en heures.

Les parois du réfrigérateur étaient constituées de deux plaques en plastique de 0,003m d'épaisseur séparées par polyuréthane de 0,04m.

- La conductivité thermique du polyuréthane = 0,0023 W/m.K
- La conductivité thermique de plastique = 0,12 W/m.K

On admettra que les déperditions calorifiques s'effectuent d'une manière uniforme à travers les 6 faces du réfrigérateur [35].

❖ Calcul de la surface d'échange

$$S = \text{longueur} \times \text{largeur} \quad (\text{II.2})$$

$$S_1 = 0,82 \times 0,52 = 0,43 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 0,82 \times 0,54 = 0,44 \text{ m}^2$$

$$S_3 = 0,54 \times 0,52 = 0,28 \text{ m}^2$$

Soit :

$$S_{\text{Totale}} = 2 \times (S_1 + S_2 + S_3)$$

$$S_{\text{Totale}} = 2,3 \text{ m}^2$$

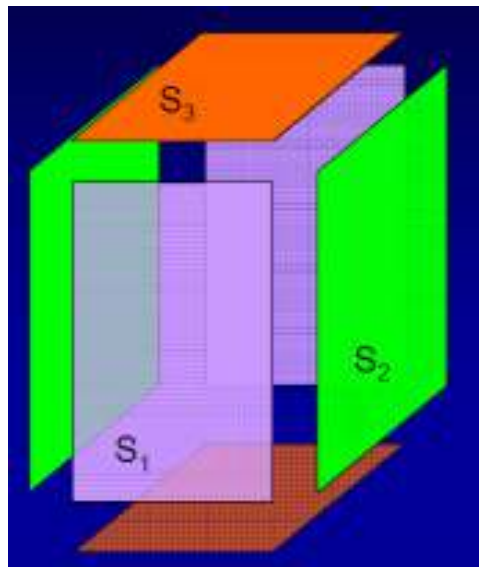


Figure II.2 : Les surfaces d'un réfrigérateur

❖ Coefficient global d'échange de chaleur (K)

Le coefficient global d'échange de chaleur est donné par la formule suivante :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_0} + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j}} \quad (\text{II.3})$$

- h_i : Coefficient de convection intérieure en $\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$
- h_0 : Coefficient de convection extérieure en $\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$
- e : Epaisseur de la paroi j (n parois composées en série) en m
- λ : Conductivité thermique de la paroi « j » en $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$

Les parois des réfrigérateurs étant souvent bien isolées thermiquement [36], par souci de simplification, on ne tient compte dans les calculs, que de la résistance thermique de l'isolant

$$\frac{e}{\lambda}$$

❖ Calcul de la résistance thermique

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (\text{II.4})$$

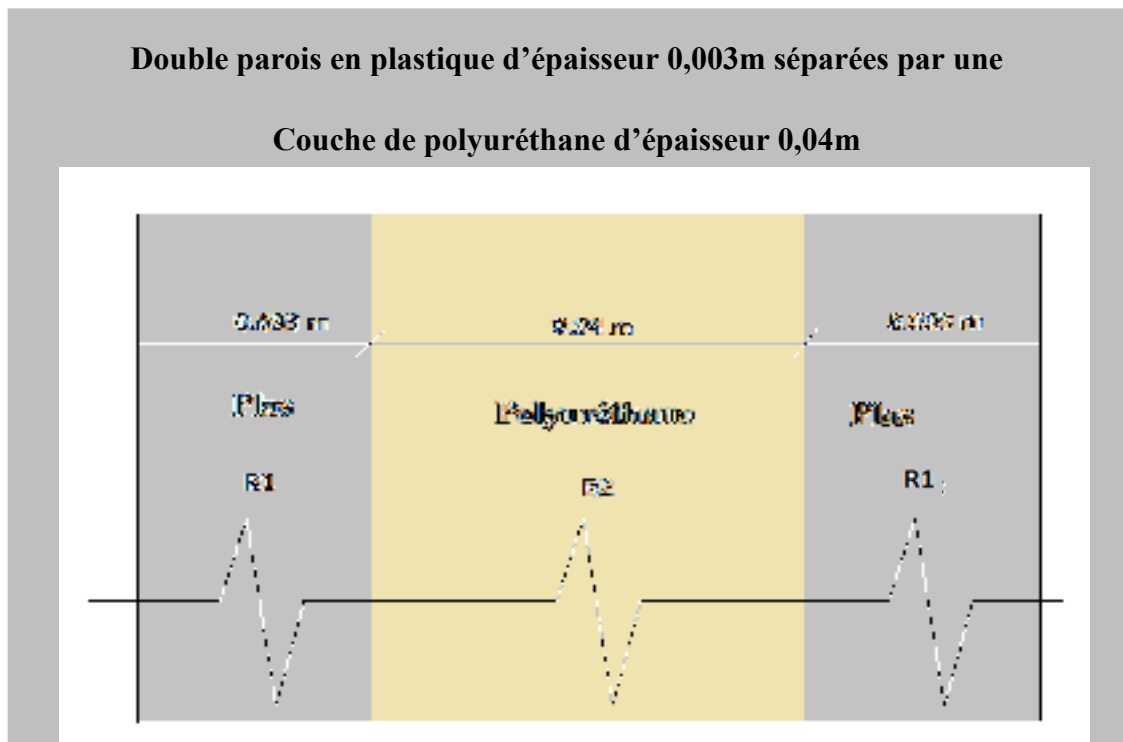


Figure II.3 : Coupe transversale sur la paroi du réfrigérateur.

$$R1 = \frac{e1}{\lambda1} = \frac{0,003}{0,12} = 0,025 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$R2 = \frac{e2}{\lambda2} = \frac{0,04}{0,023} = 1,74 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$R_{\text{Totale}} = 2R1 + R2$$

$$R_{\text{Totale}} = 1,79 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

❖ Calcul le coefficient de transmission thermique des parois

$$K = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (\text{II.5})$$

$$K = \frac{1}{1.79}$$

$$K = 0.558 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

❖ Ecart de température ΔT en K

L'écart de température représente la différence des températures entre l'extérieur et l'intérieur de réfrigérateur.

- La Température moyenne des faces extérieure est de $24 \text{ }^\circ\text{C} = 297 \text{ K}$.
- La Température moyenne des faces intérieure est de $-6 \text{ }^\circ\text{C} = 267 \text{ K}$.

$$\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta t = 297 - 267$$

$$\Delta t = 30 \text{ K}$$

❖ Calcul la quantité de chaleur journalière passant par conduction au travers des parois

$$Q_1 = k \times S \times \Delta T \times 24$$

$$Q_1 = 0,558 \times 2,3 \times 30 \times 24$$

$$Q_1 = 924.048 \text{ Wh}$$

II.1.1.2. Quantité de chaleur journalière passant par infiltration

Dans un réfrigérateur, il est prévu de renouveler plus ou moins l'air ambiant. Ce renouvellement a pour objectif [36]:

- de conserver les denrées dans un bon état de fraîcheur.
- éliminer les odeurs.
- éviter une modification de la composition de l'air due à la respiration des Produits et des personnes.

Il s'agit de la chaleur provenant des entrées d'air par infiltration et par ouverture de la porte.

La quantité d'air admise doit être refroidie de la température extérieure à la température réfrigérateur.

Donc constitue une charge thermique donnée par la formule suivante :

$$Q_2 = V \times \Delta h \times \rho \times n \quad (\text{II.7})$$

Où :

- Q2 : Quantité de chaleur journalière par infiltration (Wh).
- V : Volume de la chambre froide (en m³).
- Δh : Différence d'enthalpie entre l'ambiance dans le réfrigérateur et l'ambiance extérieure (KJ/kg).
- ρ : Densité de l'air (kg/m³).
- n : Nombre de renouvellements de l'air sur 24 h.

❖ **Calcul le volume de réfrigérateur**

$$V = \text{longueur} \times \text{largeur} \times \text{hauteur} \quad (\text{II.8})$$

$$V = 0.82 \times 0.52 \times 0.54$$

$$V = 0.23 \text{ m}^3$$

❖ **Calcul la différence d'enthalpie**

Δh : Est déterminée par le tableau « Enthalpie de L'air humide ». L'humidité relative de réfrigérateur peut être considérée égale à 90 %. L'humidité relative de l'air extérieur dépend du projet (70 %).

Température (°C)	Humidité relative (%)	Enthalpie de l'air humide (KJ /Kg)
T _{extérieure} = 24	70	57.43
T _{intérieure} = - 6	90	-0.65

$$\Delta h = h_{\text{ext}} - h_{\text{int}} \quad (\text{II.9})$$

$$\Delta h = 57.43 + 0.65$$

$$\Delta h = 58.08 \text{ kJ/kg}$$

❖ **Calcul la densité de l'air**

ρ : Est déterminée par le tableau «Masse volumique de l'air humide »

Température (°C)	Humidité relative (%)	Masse volumique (Kg/m ³)
T _{extérieure} = 24	70	1.179

❖ **Calcul le nombre de renouvellements de l'air sur 24 h**

Pour les températures négatives

On a utilisé la formule suivante :

$$n = \frac{85}{v^{1/2}} \quad (\text{II.10})$$

$$n = \frac{85}{0.23^{1/2}} \quad n=177$$

❖ **Quantité de chaleur journalière par infiltration**

$$Q_2 = V \times \Delta h \times \rho \times n$$

$$Q_2 = 0.23 \times 58.08 \times 1.179 \times 177$$

$$Q_2 = 2787.671 \text{ KJ}$$

Note :

1h=3600 secondes

❖ **Convertir de KJ à Wh**

$$Q_2 = \frac{2787.671 \times 1000}{3600}$$

$$Q_2 = 774.353 \text{ Wh}$$

II.1.2. Détermination des charges externes**II.1.2.1. Quantité de chaleur journalière passant par les produits**

Nature du produit : l'eau

Introduction journalière : 9 kg

Température initiale : 26 °C

Température finale : 6 °C

$$Q_3 = m \times C_p \times \Delta T \quad (\text{II.11})$$

- Q₃ : Les apports de chaleur à travers l'introduction l'eau (KJ).
- m : Masse volumique de l'eau (Kg).
- C_p : Chaleur spécifique de l'eau 4.18 KJ/Kg.°C
- ΔT : La différence des températures entre l'extérieur et l'intérieur de l'eau.

$$Q_3 = m \times C_p \times \Delta T$$

$$Q_3 = 9 \times 4.18 \times (26-6)$$

$$Q_3 = 752.4 \text{ KJ}$$

❖ **Convertir de KJ à Wh**

$$Q_3 = \frac{752.4 \times 1000}{3600}$$

$$Q_3 = 209 \text{ Wh}$$

II.1.2.2. Charges thermiques dues à l'éclairage

La charge thermique apportée par les lampes

$$Q_4 = P \times t \times 3,6 \quad (\text{II.12})$$

- Q_4 : Charges thermique dues à l'éclairage (Wh).
- P : Puissance installée (W).
- t : Temps d'éclairage en heures par jour (h).

❖ **La puissance de lampe**

$$P = 15 \text{ W}$$

❖ **Calcul le Temps l'éclairage en heures par jour**

Si on ouvre le réfrigérateur 18 fois par jour pendant 15 secondes

$$t = \frac{15 \times 18}{3600}$$

$$t = 0.075 \text{ h}$$

❖ **Charges thermique dues à l'éclairage**

$$Q_4 = P \times t \times 3,6$$

$$Q_4 = 15 \times 0.075 \times 3.6$$

$$Q_4 = 4.05 \text{ Wh}$$

II.1. 3. Apport total QT

$$QT = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 \quad (\text{II.13})$$

$$QT = 924.048 + 774.353 + 209 + 4.05$$

$$QT = 1911.451 \text{ Wh}$$

Conclusion

Le présent chapitre représente une modélisation faite sur le groupe de réfrigération étudié. Les dimensions ainsi que les caractéristiques thermiques des matériaux ont été utilisés pour établir un model mathématique qui nous permet de calculer les pertes thermiques agissant sur l'ensemble du réfrigérateur.

Le résultat obtenu dans ce chapitre nous permet de prévoir la quantité d'énergie perdue pendant l'ouverture de la porte principale du réfrigérateur ainsi tous les pertes relatives aux conditions externes de température ambiante.

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL, RESULTATS ET DISCUSION

Introduction

Les pics de consommation électrique nationale en Algérie se succèdent à un rythme rapide. En été 2016, la Sonelgaz (entreprise Algérienne de distribution d'électricité) a enregistré de nouveaux records de consommation électrique durant les périodes de canicule. Les conséquences sont connues : délestages, coupures inopinées, ... etc. Face à cette situation causée par le réseau conventionnel, une solution alternative pourrait être utilisée par la Sonelgaz, c'est la rationalisation de l'utilisation de l'électricité et l'efficacité énergétique qui reste une notion inconnue en Algérie et la diversification des ressources énergétiques. Des estimations de l'APRUE (Agence Nationale Pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie) ont montré que près de 46% de la consommation d'électricité des ménages sont due à la réfrigération et la climatisation [2]. Comme l'Algérie est un pays riche en potentiel énergétique renouvelable, elle planifie de s'orienter d'avantage vers les énergies renouvelables pour varier ses ressources énergétiques. L'utilisation de l'énergie solaire pour la réfrigération et la climatisation est une application à promouvoir, car les besoins en froid coïncident la plupart du temps avec la disponibilité du rayonnement solaire.

Pour contribuer au développement des systèmes frigorifiques photovoltaïques en Algérie, un projet de Laboratoire de Froid et Climatisation par Energies Renouvelables FTEER de l'Unité de Développement des Equipements Solaire UDES de Bou-Ismaïl EPST/CDER intitulé « Application des matériaux à changement de phase (PCM) dans la réfrigération solaire » qui consiste à étudier l'influence de l'intégration matériaux à changement de phase dans un réfrigérateur solaire intégré dans une maison intelligente à base consommation d'énergie.

Dans ce chapitre on va exposer les résultats liés à l'étude du réfrigérateur CONDOR équipé par des PCM et voir le comportement thermique de ce dernier comparant avec le cas classique (sans PCM).

III.1. Dispositif Expérimental et conditions d'essais

III.1.1. Réfrigérateur :

Dans le présent travail nous étudions un réfrigérateur domestique conventionnel de rang énergétique « A » d'une capacité de 117 litres. Ce réfrigérateur est composé de deux parties distinctes, une partie d'environ 100 litres assure la réfrigération et une autre de 17 litres assure la congélation, il fonctionne avec un compresseur de puissance moyenne de 60W, et une alimentation AC de 220-240V, 50/Hz, avec un gaz réfrigérant R600a. Il consomme selon le fabricant, 0.42 kWh/24h soit 152 kWh/an (Figure III.1).



Figure III.1 : Réfrigérateur domestique à compression de vapeur.

III.1.2. Mesures expérimentales et acquisition

III.1.2.1. Mesure de la température

La mesure des températures s'est opérée avec des thermocouples. Un thermocouple est un capteur utilisé pour mesurer la température. Les thermocouples se composent de deux fils de fil fabriqués à partir de différents métaux. Les jambes des fils sont soudées ensemble à une extrémité, créant une jonction. Cette jonction est l'endroit où la température est mesurée. Lorsque la jonction connaît un changement de température, une tension est créée. La tension peut ensuite être interprétée à l'aide de tables de référence de thermocouple pour calculer la température. Il existe de nombreux types de thermocouples, chacun avec ses propres caractéristiques uniques en termes de température, de durabilité, de résistance aux vibrations, de résistance chimique et de compatibilité des applications. Type J, K, T et E sont des thermocouples «en métal de base», les types de thermocouples les plus courants. Les thermocouples de type R, S et B sont des thermocouples "Noble Metal", utilisés dans des applications à haute température [5] (Tableau III.1.a et III.1.b)

Tableau III.1.a : Les différents types de thermocouple

Thermocouple type	T/C	ANSI	IEC
	Type Code	Color Code	Color Code
Iron Constantan	J	Black	Black
Copper Constantan	T	Blue	Brown
Chromel Alumel (NiCr-Ni)	K	Yellow	Green
Nicrosil Nisil	N	Orange	Pink
Chromel Constantan	E	Violet	Violet
Platinum 10% Rhodium	S	Green	Orange
Platinum 13% Rhodium	R	Green	Orange
Uncompensated *	Cu	White	White
Tungsten Rhenium	C	Brown	-

Tableau III.1.b : La gamme de température des différents types de thermocouples.

Type	Température (°C)	Température (°F)	Température (°C)
J	0 - 760	32 - 1400	0 - 760
T	0 - 350	32 - 662	0 - 350
K	0 - 1300	32 - 2372	0 - 1300
N	0 - 1300	32 - 2372	0 - 1300
E	0 - 1000	32 - 1832	0 - 1000
S	0 - 1800	32 - 3272	0 - 1800
R	0 - 1800	32 - 3272	0 - 1800
Cu	0 - 100	32 - 212	0 - 100
C	0 - 2300	32 - 4172	0 - 2300

Dans notre cas, la mesure c'était faite par des thermocouples de type K de composition Chrome/Alumel et des thermocouples de type E (Figure III.2). Ces thermocouples ont été étalonnés avant d'être utilisés. Les sondes ont été bien isolées et collées sur la surface extérieure de la tuyauterie et à l'intérieur du réfrigérateur.



Figure III.2 : Thermocouples K et T

III.1.2.2. Mesure de la consommation électrique

La consommation du réfrigérateur est contrôlée et noté par un compteur d'énergie placé entre la sortie de l'onduleur et le réfrigérateur qui nous indique l'énergie consommée en kWh (Figure III.3). La consommation est relevé chaque 24h, afin d'avoir la consommation journalière de l'appareil.



Figure III.3 : Compteur d'énergie électrique à courant alternatif AC.

III.1.2.3.Acquisitions des données :

Afin d'évaluer la performance du réfrigérateur sous test, une acquisition de données a été effectuée par un Data Logger Hydra 2700. C'est un instrument électronique qui enregistre les mesures à intervalles réguliers sur une période de temps. En fonction de l'enregistreur de données particulier, les mesures peuvent inclure: la température de l'air, l'humidité relative, le courant et la tension AC/DC, la pression différentielle, le temps d'utilisation (lumières, moteurs, etc.), l'intensité de la lumière, la température de l'eau, le niveau de l'eau, L'oxygène dissous, l'humidité du sol, les précipitations, la vitesse et la direction du vent, les signaux d'impulsions, l'occupation de la pièce, la charge de la fiche et bien d'autres encore [15].

(Figure III.4), Il est relié à un ordinateur via une interface graphique de communication. Le Data Logger enregistre les températures mesurées par thermocouples toutes les 30 secondes.



Figure III.4 : Système d'acquisition Data Logger (Hydra 2700)

Les données ainsi récoltées sont sauvegardées sous forme de fichier Excel. Il permet aussi un suivi instantané de l'évolution des températures à l'aide d'un tracé de celles-ci en fonction du temps de marche (Figure III.5).

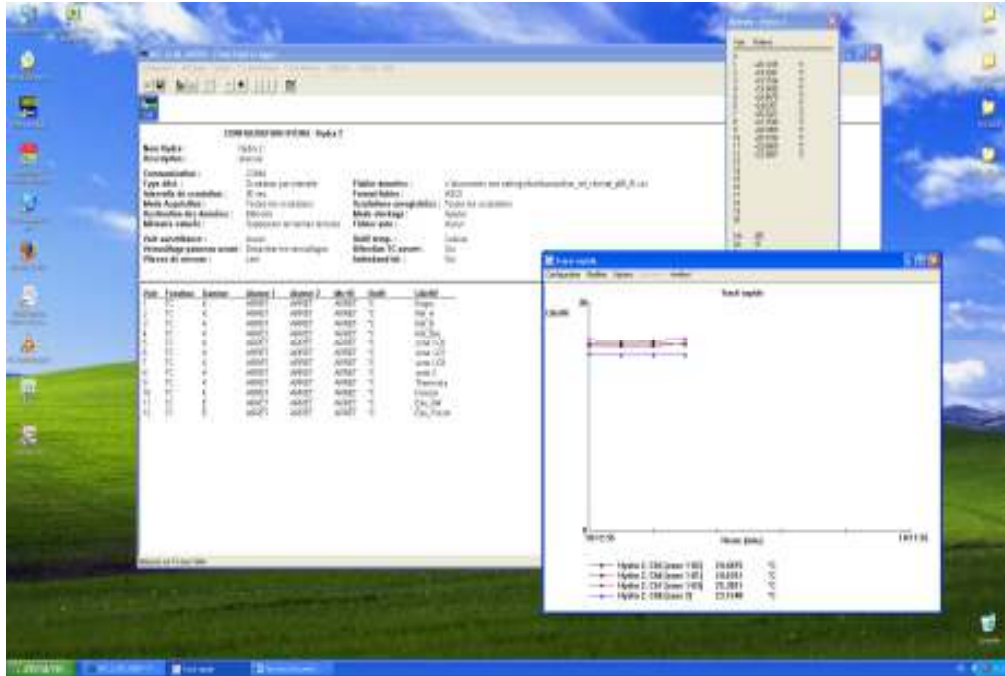


Figure III.5 : Interface d'acquisition Hydra

III.1.2. Disposition des thermocouples sur le réfrigérateur

Dans nos expériences nous avons utilisé 08 thermocouples placés principalement à l'intérieur du réfrigérateur. Cette disposition vise à contrôler l'évolution thermique du réfrigérateur étudié dans le temps (Tableau III.2) et en fonction de la température ambiante de la maison dans les deux configurations étudié à savoir sans et avec PCM.

Tableau III.2 : Emplacement des thermocouples

Thermocouple	Emplacement	Thermocouple	Emplacement
N°01	Evaporateur	N°07	Ambiance
N°02	Réfrigérateur Partie Supérieur	N°09	Thermostat
N°03	Réfrigérateur Milieu	N°10	Freezer
N°04	Réfrigérateur Bac	N°12	Eau freezer

Le suivi de l'évolution instantané des températures est représenté sur le (Figure III.6). Au cours de nos tests, nous avons utilisé comme charge thermique 09 litres d'eau répartie sur 06 bouteilles de 1.5 L chacune.

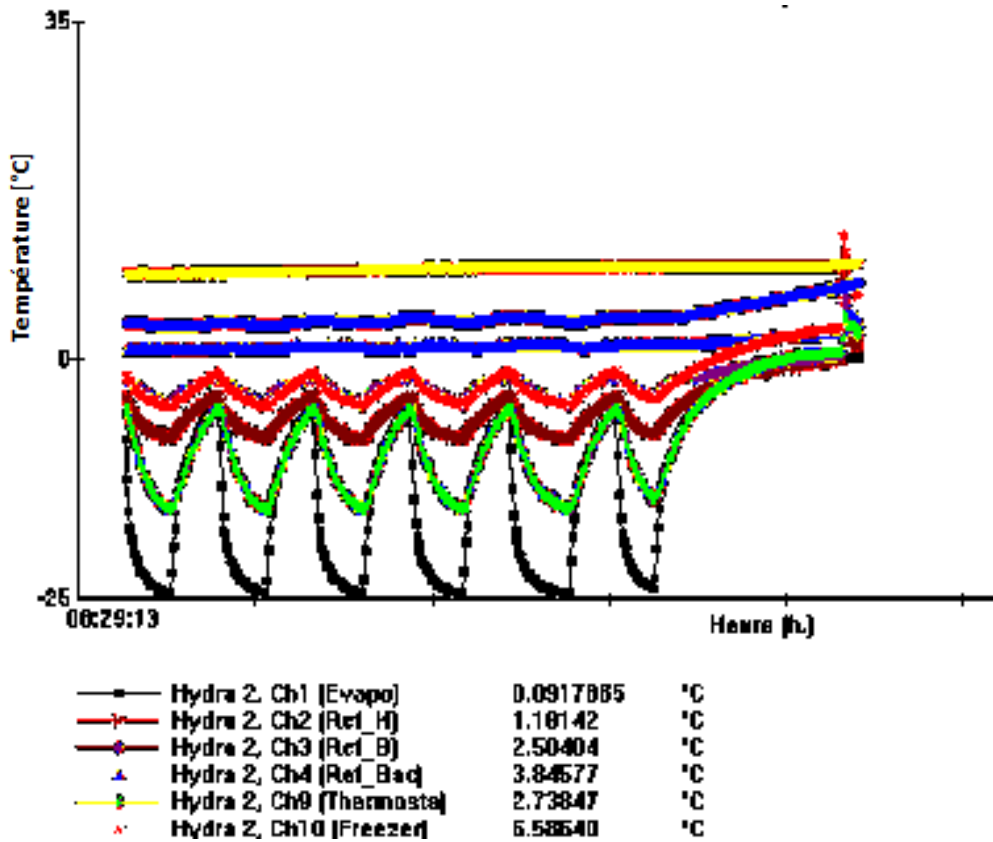


Figure III.6 : Evolution des températures à l'intérieur du réfrigérateur

III.1.3 Contrôle et régulation de la température de la chambre frigorifique

La plus part des appareils frigorifiques domestiques ; réfrigérateurs simples portes, doubles portes, combinés (appareil combinant un congélateur en dessous et un réfrigérateur en dessus) ainsi que les congélateurs, utilisent un régulateur ou contrôleur de température (thermostat) mécanique ou digitale. On en distingue en général 03 sortes [28]:

- **Thermostat à dégivrage manuel:** souvent employé dans les réfrigérateurs de petits volumes "TOP" pour dégivrer, il faut mettre le bouton thermostat sur 0 puis l'actionner dès la fin du dégivrage.
- **Thermostat à dégivrage semi-automatique:** souvent employé sur des réfrigérateurs avec un compartiment freezer. Un petit bouton est au centre de la manette de réglage, il suffit de l'actionner et le dégivrage commencera, le thermostat se réarmera (réenclenchera) dès que la température avoisinera les 5°C.

- **Thermostat à dégivrage automatique:** celui-ci se trouve dans la plupart des appareils vendus actuellement, pas besoin de faire quoique ce soit, le thermostat gère tout seul le dégivrage.

Le réfrigérateur utilisé pour nos tests est équipé d'un thermostat mécanique avec dégivrage manuel. Nous avons fixé le thermostat sur la position 06. Il dispose de 08 positions, chaque une représente une gamme de température T minimale et T maximale pour laquelle le compresseur démarre ou s'arrête (Figure III.7). Le principe de fonctionnement s'appuie sur le phénomène de dilatation des gaz. Le bulbe contient un gaz sous pression qui réagit selon la température « *plus un gaz est refroidi, plus il se contracte* », il est relié à un soufflet déformable, le tout étant parfaitement hermétique. Le soufflet est en contact avec un basculeur qui lui-même est en contact avec les cosses du bornier et la came de la manette, le bulbe quant à lui est en contact direct avec l'évaporateur [29].

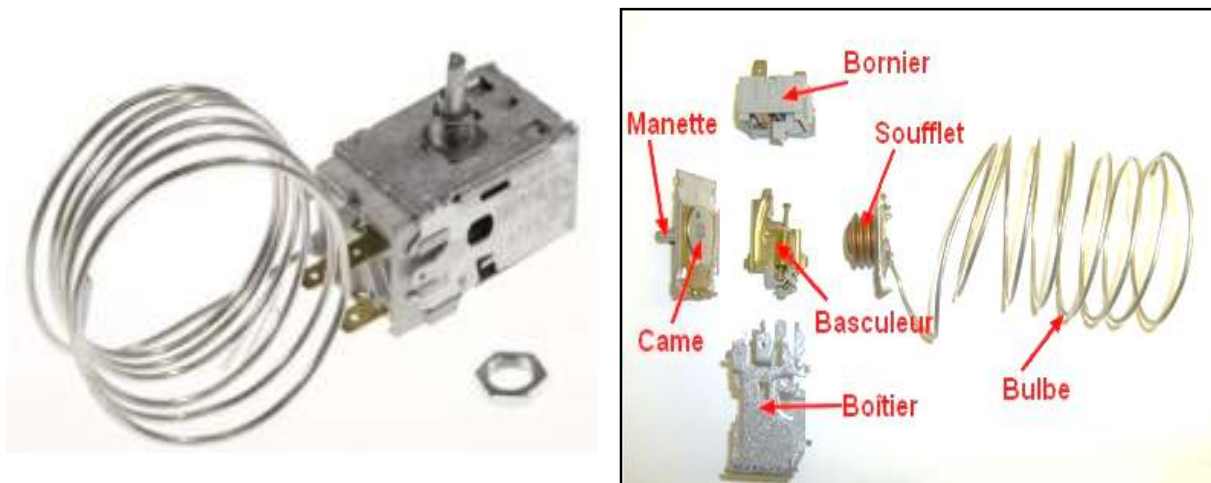


Figure III.7 : Thermostat mécanique à dégivrage manuel

III.1.4. Emplacement du pack à accumulation de froid

Nous avons intégré un pack d'accumulation de froid au réfrigérateur classique au niveau de l'évaporateur dans sa partie inférieure en contact avec le compartiment de réfrigération. Le pack contient une solution eutectique (PCM) de l'éthylène glycol (10% éthylène glycol- 90% eau) (Figure III.8). La température de changement de phase de la solution est dans la gamme de -6°C à -7°C . On utilise un caisson en plaques d'inox polis (325'250'60) mm d'un volume effectif de 2250cm^3 le volume de la solution est de 2100cm^3 avec un évaporateur. La comparaison systématique entre les deux configurations sans et avec PCM va nous offrir une vue d'ensemble sur la modification d'un réfrigérateur classique pour plus d'efficacité énergétique et frigorifique et son adaptation pour une alimentation photovoltaïque.

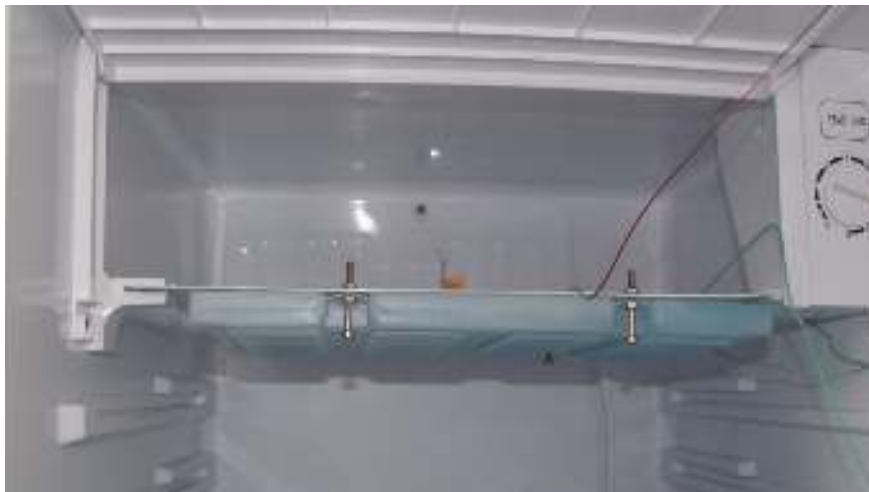


Figure III.8 : Plaque PCM en contact avec l'évaporateur

III.1.5. dimensionnement de l'installation frigorifique solaire DC-AC

Par PVSyst

Vu de la complexité de prévision des conditions météorologiques et des performances des composants de l'installation solaire photovoltaïque, des méthodes informatiques ont été mises au point, ces méthodes de dimensionnement fournissent directement une installation optimisée, c'est-à-dire la plus petite installation en modules et en batteries qui répond aux exigences du taux de couverture solaire voulu et à la profondeur de décharge maximale admissible par les batteries et respectant le fonctionnement des éventuels onduleurs du générateur photovoltaïque. On peut citer des logiciels comme PVSyst, PV Design, etc. L'optimisation du dimensionnement de nos installations de réfrigération solaire photovoltaïque a été effectuée avec le logiciel de dimensionnement de systèmes et d'installations solaires photovoltaïques PVSyst V6.43 [43].

Les étapes de simulation par PVSyst sont illustrées dans l'organigramme suivant, (figure III.9).

Entrées

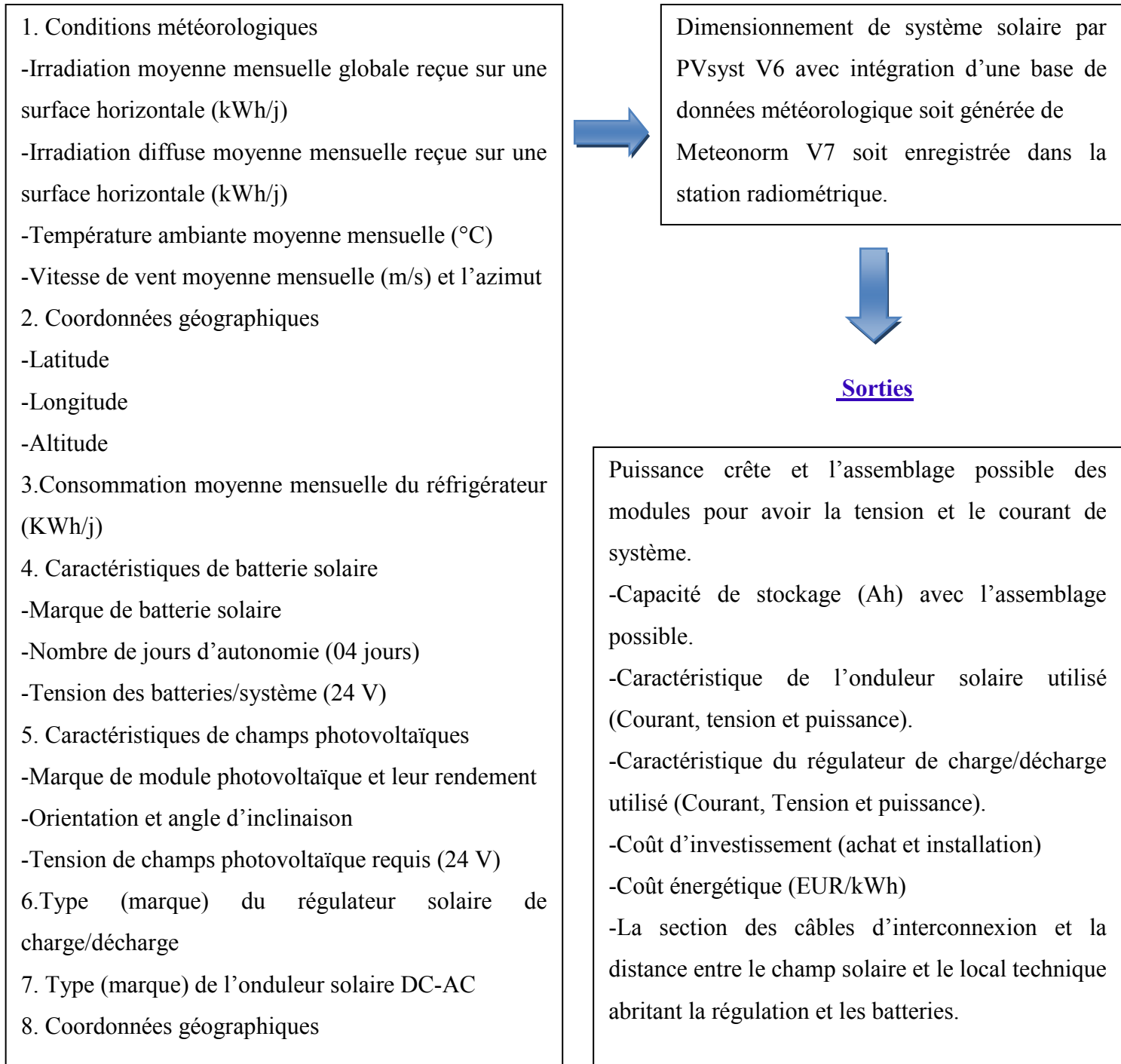


Figure III.9: Méthodologie de dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque autonome avec stockage électrochimique [34].

Le tableau illustre les résultats de dimensionnement du système photovoltaïque DC-AC sous les conditions climatiques méditerranéennes de Bou-Ismaïl

Tableau III.3. Dimensionnement du système de réfrigération solaire photovoltaïque

Région	Coordonnées géographiques	Puissance du Champ PV (Wc/24V)	Capacité de stockage (Ah / 24V)
UDES - Bou-Ismaïl (Tipaza)	Latitude : 36.64° Longitude : 02.69° Altitude : 5.00 m	113.9	82

❖ Résultat

Le champ photovoltaïque, comportant deux panneaux solaires de type Si mono-cristallin (2 en série) de 50W, délivrant un voltage de 14V par panneau, Le cadre est placé sur un support incliné de 34° Sud.

La capacité de stockage pour le système DC-AC est de 82Ah/24V pour 04 jours d'autonomie. Dans notre cas on a opté pour deux batteries solaires de type Solar PV (8G27) de 80Ah et 12V chacune, relié 2 en série et 1 en parallèle pour avoir 24V à la sortie. La partie régulation est assurée par un MPPT de 24 V.

III.2. Résultats et Discussions

III.2.1. Caractérisation thermique du réfrigérateur

Dans cette partie, on suit l'évolution des températures à l'intérieur du réfrigérateur. Dans une première étape, nous traçons les mesures enregistrées par les thermocouples T1, T9 et T7, qui représentent, respectivement, l'évaporateur, le thermostat et l'ambiance dans les deux configurations étudiés, à savoir sans la plaque PCM et avec la plaque PCM. Les tests ont été effectués pratiquement dans les mêmes conditions expérimentales, à l'intérieur de la Platform de la maison solaire au niveau de l'UDES. Avec une température moyenne ambiante de 21.5° et 24.5°C entre les deux campagnes de mesure et la même heure de lancement des tests 11h30 du matin.

Nous avons veillé aussi à avoir les mêmes conditions initiales pour chaque configuration. Pour cela, à la fin de chaque test, nous arrêtons le réfrigérateur, ouvrons la porte et laissant jusqu'à l'homogénéisation des températures avec l'ambiance.

Les Figures III.10 et III.11 représentent le tracé des températures en régime transitoire (cycle primaire) des deux configurations traitées. Les graphes montrent que la première configuration (sans PCM) a pris environ 1180 min pour atteindre le régime permanent ou périodique, contre 760 min pour la seconde configuration (avec PCM). Soit environ 400min de moins, ce qui représente pratiquement 6h30min.

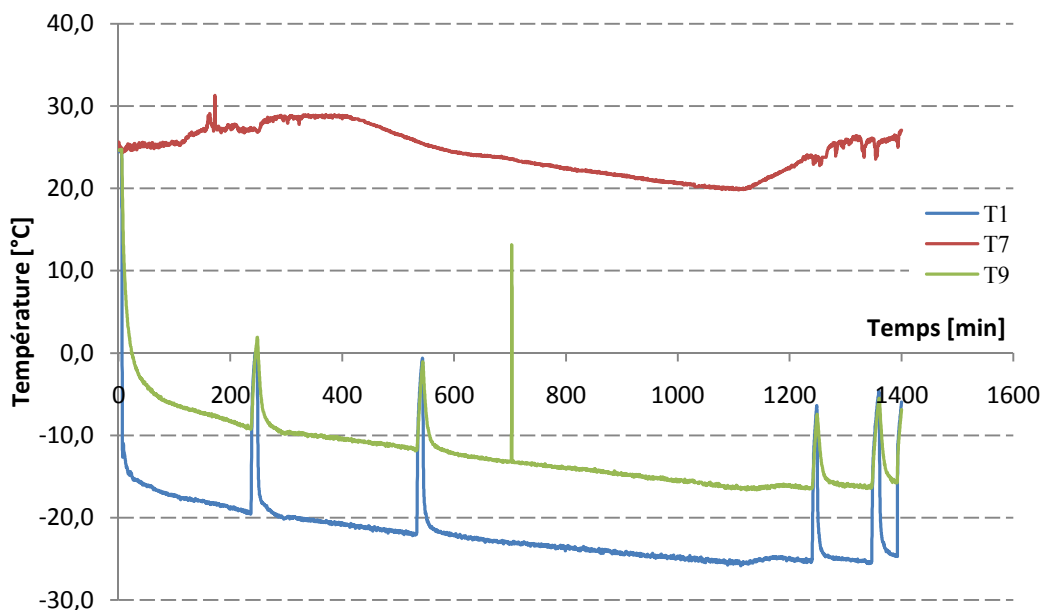


Figure III.10 : Evolution des températures lors du cycle primaire sans PCM

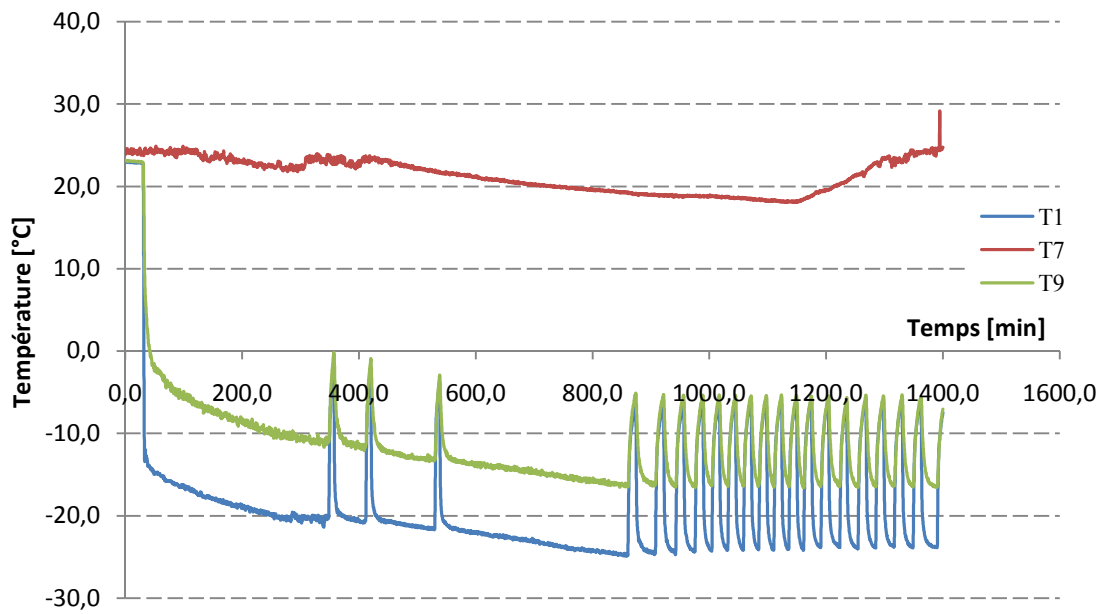


Figure III.11 : Evolution des températures lors du cycle primaire avec PCM

Dans la deuxième partie de l'étude thermique du réfrigérateur, nous nous intéressons aux températures de la chambre de réfrigération, T2, T3 et T4 qui représentent, respectivement, la partie supérieure de l'enceinte de réfrigération, le milieu de réfrigérateur et le bac à légume.

Les résultats obtenus représentent des températures moyennes des thermocouples T2, T3 et T4 de l'ordre de -5.7°C , -2.7°C et 1.7°C , respectivement, pour la première configuration (Figure III.12).

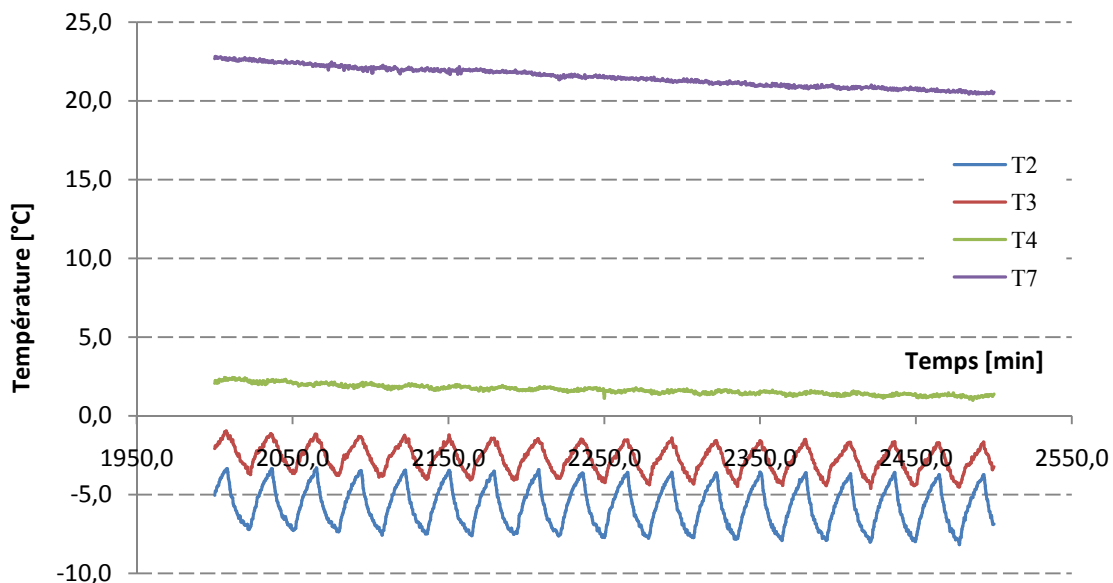


Figure III.12 : Variation de la température du réfrigérateur en différents niveaux et en régime établie (Sans PCM).

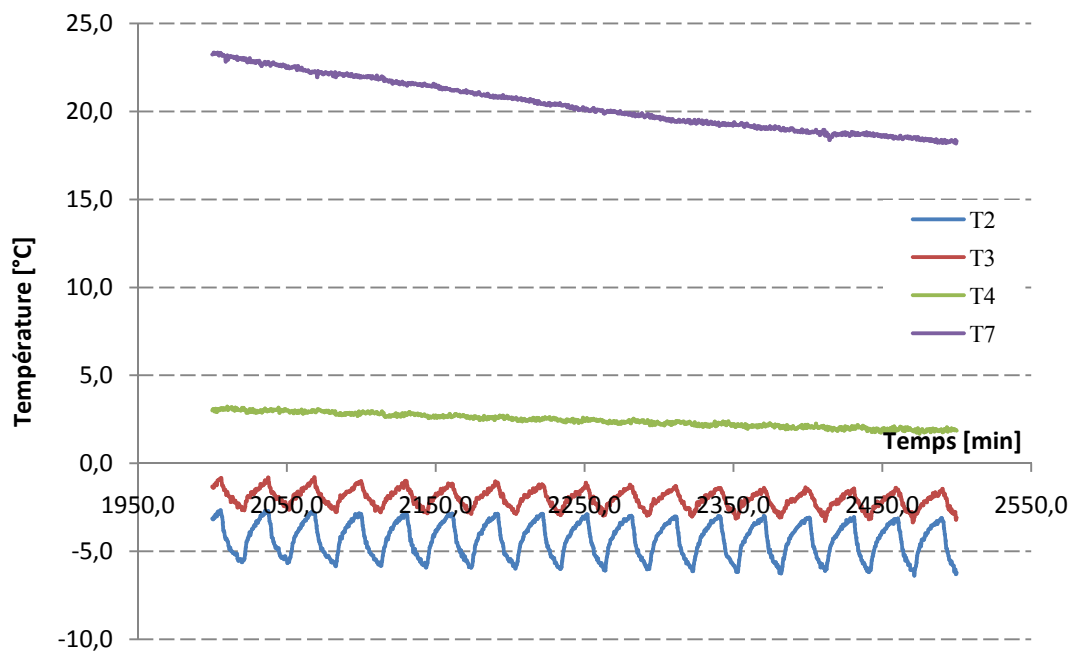


Figure III.13 : Variation de la température du réfrigérateur en différents niveaux et en régime quasi-permanent (Avec PCM).

Dans la seconde configuration avec PCM, les températures moyennes mesurées par les thermocouples T2, T3 et T4 sont de l'ordre de -4.3°C , -2°C et 2.4°C , respectivement (Figure III.13).

Dans cette figure on remarque que la répartition des températures en régime établie et sans ouverture de porte ou différence de charge à l'intérieur du réfrigérateur est pratiquement identique. Avec une légère augmentation des valeurs dans le cas avec PCM, expliqué par la présence d'une inertie causé par la plaque à PCM.

III.2.2. Etude thermomécanique du réfrigérateur :

La comparaison entre les deux configurations en termes de nombre de cycle (Marche/Arrêt) en régime établie est représentée sur la Figure.14. Les résultats montrent un gain de 2 cycles sur une période d'environ 5h30min dans les mêmes conditions expérimentales. Soit une différence de 08 cycle/24h. Le Tableau.4 et 5 présentent les durées des cycles d'arrêt et de marche du réfrigérateur sur la période de 5h30min. Le choix de cette période est justifié par l'élimination de l'éventuel influencé de la température ambiante sur notre étude. La durée moyenne d'un cycle de fonctionnement est de $t_{\text{on}} = 14.5\text{min}$ et l'arrêt est de $t_{\text{off}} = 16\text{min}$ pour

la configuration sans PCM. Pour la configuration avec PCM les durées sont de $t_{on} = 16\text{min}$ et de $t_{off} = 21\text{min}$.

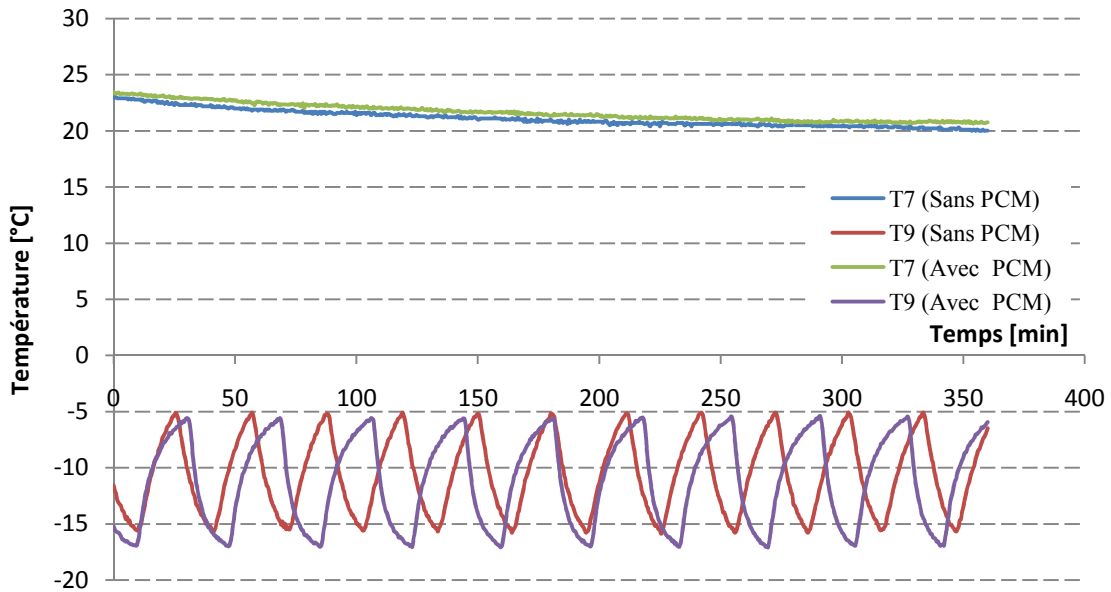


Figure III.14 : Comparaison de la distribution des températures au niveau du thermostat pour les deux configurations en régime établie

Tableau III.4 : Durée des cycles Marche/Arrêt du réfrigérateur Sans PCM
Mode établie sur une période de 5h30min

Cycle	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	Moyenne
t off (min)	15	16	16	16.	17	16.5	16	15	16.5	16.5	16.5	16
t on (min)	15.5	15	15	14.5	13.5	15	14.5	15	13.5	14.5	13.5	14.5
Temps total	30.5	31	31	30.5	30.5	31.5	30.5	30	30	31	30	30.5

Tableau III.5 : Durée des cycles Marche/Arrêt du réfrigérateur Avec PCM
Mode établie sur une période de 5h30min

Cycle	01	02	03	04	05	06	07	08	09	Moyenne
t off (min)	19.5	21	21.5	21.5	21.5	21	21	20	22	21
t on (min)	18	16.5	16	15	15.5	16	14.5	16	14	16
Temps total	37.5	37.5	37.5	36.5	37	37	35.5	36	36	37

D'après les résultats obtenus Tableau.4 et 5, on remarque que la durée moyenne du cycle dans la configuration sans PCM est de 30.5min contre 37min pour la seconde configuration avec PCM. Et selon la répartition des temps de marche et d'arrêt dans les deux configurations, nous déduisons par un simple calcul de pourcentage que l'intégration de la solution PCM a permis de diminuer le temps de fonctionnement du réfrigérateur pratiquement de 10% (Tableau III.6).

Tableau III.6 : Taux moyen de fonctionnement et d'arrêt du réfrigérateur sur un cycle en régime établie

Configurations	Sans PCM	Avec PCM
Taux moyen de marche (on)	52.5%	43%
Taux moyen d'arrêt (off)	47.5%	57%

III.2.3. Influence des ouvertures de la porte sur le comportement thermique du réfrigérateur (avec/sans PCM)

Le protocole expérimental des tests d'ouverture de la porte consiste à ouvrir cette dernière 2 fois de 15s chaque 30min pour la première heure, puis 6 fois de 15s chaque 10min dans la deuxième heure et en fin 10 fois de 15s chaque 6min à la troisième heure (Figure III.15 et Figure III.16).

III.2.3.1. Réfrigérateur Sans PCM :

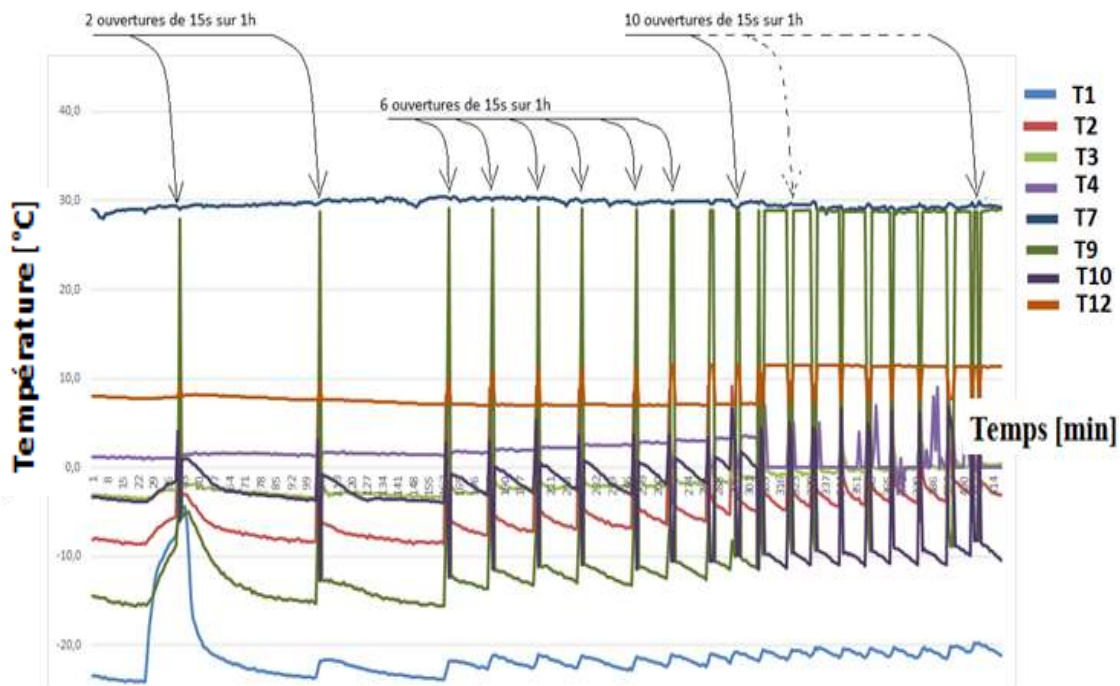


Figure III.15 : Evolution de la température du réfrigérateur sans PCM lors des ouvertures de la porte

Cette figure représente la variation des températures T1 ... T12 en fonction du temps dans le cas standard (sans PCM). La disposition des thermocouples est décrite dans le tableau III.2.

Ce qui est claire de cette figure est que l'ouverture de la porte du réfrigérateur engendre une perte d'énergie considérable qui est traduite par l'augmentation de la température d'Evaporateur ainsi des milieux haut, milieu et bac du réfrigérateur.

III.2.3.2. Réfrigérateur Avec PCM :

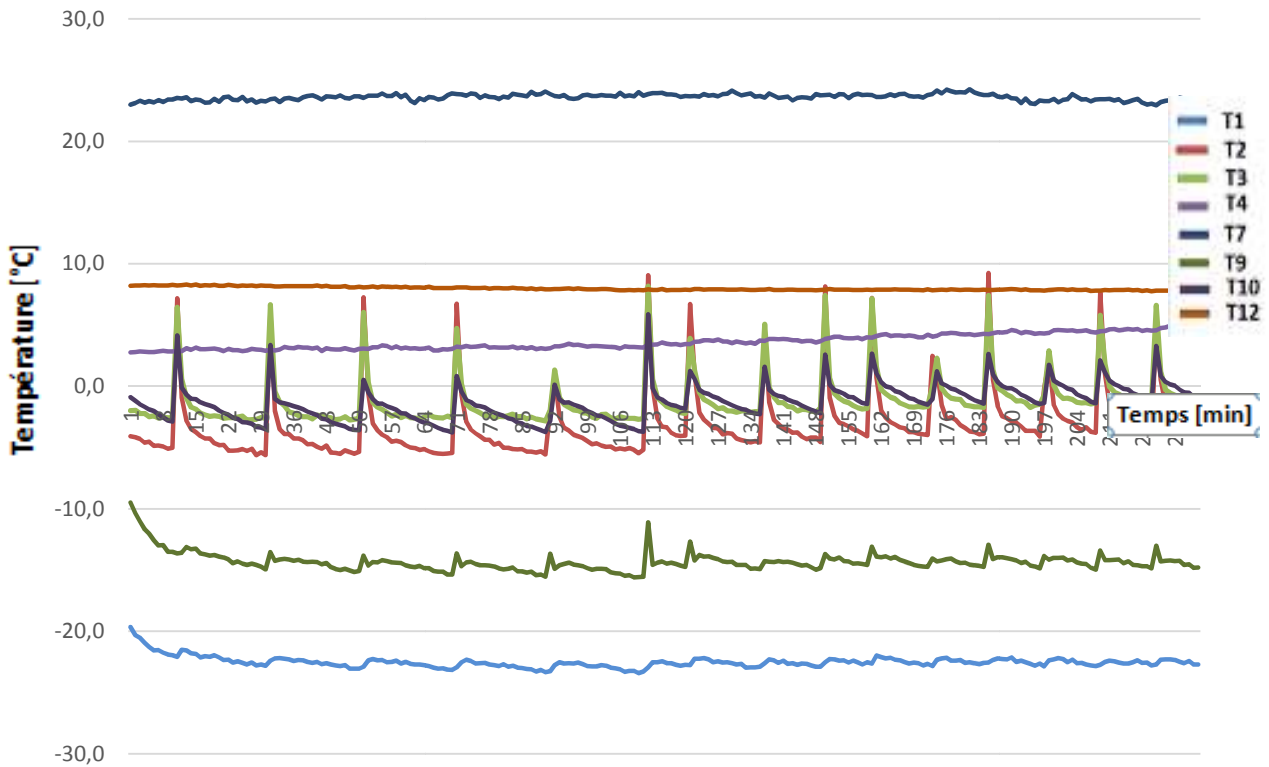


Figure III.16 : Evolution de la température du réfrigérateur avec PCM lors des ouvertures de la porte

Dans la présente figure, il est clairement remarquable que l'influence de l'ouverture de la porte du réfrigérateur est moins comparant au cas précédent (sans PCM) ce qui est expliqué par le fait d'inertie contenant dans les PCM. Ces derniers aident à garder une température stable et constante à l'intérieur du réfrigérateur.

On remarque aussi d'après ces deux figures que la configuration avec PCM prend moins de temps pour revenir à l'état de stabilité comparé à la configuration sans PCM. Selon les résultats de l'analyse thermique, le temps de stabilisation du cas sans PCM est trois fois plus que le cas avec PCM suite à l'ouverture successive de la porte.

Le temps « t » de stabilisation sans PCM est de 90 min contre 30 min avec PCM.

III.2.4. Consommation électrique du Réfrigérateur (avec/sans PCM)

III.2.4.1. Consommation électrique en régime établie sans ouverture de la porte

Tableau III.7 : Consommation électrique du réfrigérateur en régime établi sans ouverture de porte/ dans les 24h

Configuration	Sans PCM	Avec PCM
Consommation (kWh/24h)	0.70	0.61

L'intégration des PCM a permis de diminuer la consommation électrique de 12.9 % comparant au cas sans PCM en régime établi et sans ouverture de la porte.

III.2.4.2. Consommation électrique en régime établie avec ouverture de porte

Tableau III.8 : Consommation électrique du réfrigérateur en régime établi avec ouverture de porte/ dans les 24h

Configuration	Sans PCM	Avec PCM
Consommation (kWh/24h)	0.90	0.75

L'intégration des PCM a permis de diminuer la consommation électrique de 16.7 % comparais au cas sans PCM en régime établi et avec ouverture de porte

L'influence de l'ouverture de la porte sur les résultats pour le cas avec PCM est estimée à plus de 18.7% contre 22.2%, pour le cas sans PCM.

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté les résultats liés à l'étude thermique d'un réfrigérateur de marque CONDOR. La nouveauté dans cette étude est d'intégrer des matériaux à changement de phase PCM (phase change materials) pour améliorer les performances thermiques du réfrigérateur ce qui permet une bonne gestion de la consommation électrique de ce dernier. Les tests ont été établis en régime permanent (après stabilisation des températures à l'intérieur du réfrigérateur).

Les résultats ont montrés une bonne stabilité thermique établie à l'intérieur du réfrigérateur après l'intégration des matériaux PCM, ce comportement nous a permis d'économisé une bonne quantité d'énergie.

L'intégration des matériaux à changement de phase dans les dispositifs de stockage froid (réfrigérateur, chambre froide ...) est considéré comme une bonne façon d'améliorer les performances ainsi l'économie d'énergie de ces derniers.

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE II

BILAN ENERGETIQUE

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL, RESULTATS ET DISCUSSIONS

CONCLUSION GENERALE

- [1] : Anish M., Anirban C., Bhavesh V., Jyotirmay M., "Performance analysis of a solar photovoltaic operated domestic refrigerator", Applied Energy, Vol. 86, 2009, pp. 2583–2591.
- [2] : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE).
- [3] :Awanto, M. Adj, A. Vianou and A. Girardey, ‘Sizing Procedure for Photovoltaic Refrigerating Systems Using a Simple Approach of the LLP Calculation’, Solar Energy, Vol. 56, N°4, pp. 337 – 342, 1996.
- [4] : Bekkouche S.M.A, T. Benouaz, « Etude thermique d’un habitat pour l’adaptation au climat local. Effet de l’isolation thermique », Revue internationale d’Héliotechnique Energie Environnement 36B, 8-13. 2007.
- [5] : Bentayeb .F ,lemmini.F . Simulation d’entrepôts frigorifiques solaires dans un climat marocain chaud et sec .faculté des sciences . département de physique Avenue Ibn Battota Rabat 2002.
- [6] :Belhadj.M, Modélisation d’un Système de captage photovoltaïque Autonome, Mémoire de Magister option : Microélectronique -Photovoltaïque, Centre Universitaire de Béchar, 2007-2008.
- [7] :Bounouioua Ahmed Saber, « MODÉLISATION D’UNE MACHINE FRIGORIFIQUE A COMPRESSION MÉCANIQUE», mémoire de Magister Centre Universitaire Oum EL Bouaghi.
- [8] : Capdérrou Michel, Atlas Solaire de l’Algérie, OPU.
- [9] : Cherif.A and A. Dhoub, ‘Optimisation and Management of a Solar Refrigeration Plant Using Latent Storage’, Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 535 – 541, 1996.
- [10] : Chikh.M, Thèse de Magister, Etude analytique conceptuelle des systèmes photovoltaïques de puissance adaptés aux sites isolés de l’Algérie, U. Tlemcen, (1994).
- [11] :Deblas M., Appelbaum J., Torres J L., Garcia A., Prieto E., Illanes R., "A refrigeration facility for milk cooling powered by photovoltaic solar energy", Progress in Photovoltaics, Vol. 11, 2003, pp. 467 479.
- [12] : Diaf et A. Malek, ‘Simulation des Propriétés Thermo-Physiques du R134a’, 1er Congrès International de Mécanique, Constantine, 14 - 16 Décembre 2002.
- [13] D. Diaf, ‘Etude et Simulation d’un Conservateur Médical Solaire’, Mémoire de Magister, Université M’Hamed Bouguera, Boumerdès, 2003.
- [14] : Dubinin MM, Radushkevisth VA. Adv chemSer 1970 ;102.

- [15] : El Tom O M M , S.A. Omer, A.Z. Taha and A.A.M. Sayigh, ‘Performance of a Photovoltaic Solar Refrigerator in Tropical Climate Conditions’, Solar Energy, Vol. 1, N°2, pp. 199 – 205, 1991.
- [16] :Ekren O., "Performance evaluation of a variable speed DC compressor”, International Journal of Refrigeration, Vol. 36, No. 3, 2012, pp. 745–757.
- [17] :Ekren O., Yilanci A., Cetin E., Ozturk H K., "Experimental performance evaluation of a PV-powered refrigeration system", Electronics and Electrical Engineering, Vol. 114, No. 8, 2011, pp. 1392 – 1215.
- [18] :Eltawil M., Samuel D., "Vapour compression cooling system powered by solar PV array for potato storage", Agricultural Engineering International: the CIGR Journal, Vol. 9, 2007, pp. 1-23.
- [19] :Emmanuel P F V., "Production de l'énergie photovoltaïque à la société NOVA DIFFUSION", mémoire de master, Université de Ngaoundere, Cameroun, 2008.
- [20] : Évaluation des ambiances froides. Détermination de l'isolement. Rapport technique. ISO/TR11079 Décembre 1993. Saint-Denis La Plaine: AFNOR; 1993: 38 p.
- [21] :Florence P., "Etude des systèmes énergétiques à adsorption modulés en température: Application à la réfrigération", thèse de doctorat, Université de Paris VI, 1996.
- [22] :Francis M., "Les énergies renouvelables", ISBN : 978-2- 84670-188-4, le Cavalier Bleu éditions, France, 2007.
- [23] : Humady.M, A. Maki, S. Shawi and Y. Khader, ‘Iraq Solar Refrigerator in Rural Area’, 8th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Vol. 1, pp. 189 – 193, 1988.
- [24] :Guen,A, Contribution à l'étude des Systèmes de communication Alimentés par Energie Solaire, Thèse de Magister, 1992.
- [25] :Ghellaï.N, Thèse de Magister, Dimensionnement d'une installation photovoltaïque, U. Tlemcen, (1991).
- [26] :Gilbert C., "Comprendre le dimensionnement d'un système photovoltaïque". <http://energienouvelles.com>, consulté en juin 2017.
- [27] : Kattakayam T.A and K. Srinivasan, ‘Photovoltaic Panel-Generator Based Autonomous Power Source for Small Refrigeration Units’, Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 543 – 532, 1996.

- [28] : Kattakayam T.A and K. Srinivasan, ‘Uninterrupted Power Supply for Autonomous Small Refrigerators’, *Energy Conversion & Management*, Vol. 39, N°1/2, pp. 21 – 26, 1998.
- [29] :Khelif Abdel Gheffar ,Modélisation d'une Machine Frigorifique À Compression mécanique de Vapeur ,09/06/2014.
- [30] : Kilfoyle D and G.G. Ventre, ‘Test and Evaluation of Vaccine Refrigeration Systems’, *Photovoltaic Specialists Conferences, Conference Record of the Twentieth IEEE*, Vol. 2, pp. 1200 – 1205, 1988.
- [31] : Kilfoyle and G.G. Ventre, ‘A Simple Analytical Load Model for Sizing PV-Powered Vaccine Refrigerators’, *ASES Annual Conference*, pp. 19 – 22, Août 1990.
- [32] :Labouret A., Viloz M., "Energie solaire photovoltaïque", 2^{ème} édition, Dunod, Paris,2000.
- [33] :Marcia L. Huber et F. Ely. A predictive extended corresponding states model for pure and mixed refrigerants including an equation of state for R134a. *International Journal of Refrigeration*, Volume 17, Issue 1, 1994, Pages 18-31.
- [34] : Mayer,D, Dimensionnement des systèmes Photovoltaïques sur Batterie.
- [35] :Maxime Duminil, Théorie des machines frigorifiques, Machine à compression mécanique B 9 730, traité Génie énergétique, Techniques de l’Ingénieur, fév.1996.
- [36] : Maxime DUMINIL– FRIGOPORTEURS Guide technique pour le refroidissement indirect- AFF 2005.
- [37] :Mba E F., Chukwuneke, J, L., Achebe, C, H., Okolie, P, C., "Modeling and simulation of photovoltaic powered vapour compression refrigeration system", *Journal of Information Engineering and Applications*, Vol. 2, No. 10, 2012, pp. 1-15.
- [38] :Mehmet A A., "Experimental study of a multi-purpose PV-refrigerator system, experimental study of a multi-purpose PV-refrigerator system", *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 6, No. 4,2011, pp. 746-757.
- [39] :Ministère de l’Energie et des Mines, Guide des énergies renouvelables, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, Édition 2007.
- [40] :Modi A., Chaudhuri A., Vijay B., Mathur J., "Performance analysis of a solar photovoltaic operated domestic refrigerator", *Applied Energy*, Vol. 6, 2009, pp. 2583–2591.

- [41] :Nawaz, I., Ankur, K., Raman, R, S., "Energy Efficient Solar Refrigeration System", VSRD International Journal of Mechanical, VSRD-MAP, Vol. 2, No. 1, 2012,pp. 1-8.
- [42] : PLANTIER Christophe, Étude numérique et expérimentale d'un prototype de chauffe-eau solaire équipé d'un stockage à chaleur latente, 29 mars 2005.
- [43] :PVSYST, logiciel pour système photovoltaïque, version 4 .37, A. Mermoud, GAP, Université de Genève, 2009
- [44] : Porkhial.S, B. Khastoo et M.R. Modarres Razavi. Transient response of finned-tube condenser in household refrigerators. Applied Thermal Engineering, Volume 26, Issues 14 15, October 2006, Pages 1725-1729.
- [45] : RAPIN .P.Jet P. JACQUARD, Installations frigorifiques, Editions PYC etH. NOACK et R. SEIDEL, Pratique des installations frigorifiques, Editions PYC.
- [46] : Tchernev DI , solar energy application of zeolites , in natural zeolite : occurrence , proprerties and use . Oxford : Pergamon Press :1978.
- [47] :Thomachan A, K., Srinivasan K., "Photovoltaic panel-generator based autonomous power source for small refrigeration units", Solar Energy, Vol. 56, No. 6, 1996, pp. 543-552.
- [48] :Thomachan A., Kattakayam K., Srinivasan. "Thermal performance characterization of a photovoltaic driven domestic refrigerator", International Journal of Refrigeration Vol. 23, 2000, pp. 190-196.
- [49] :Ulrich S., Tesfaye N., Amensisa A., "Performance of small-scale photovoltaic systems and their potential for rural electrification in Ethiopia", Renewable Energy, Vol. 18, 1999, pp. 35-48.
- [50] :Wang J., Wang L W., Luo W L., Wang R Z., "Experimental study of a two-stage adsorption freezing machine driven by low temperature heat source", International Journal of Refrigeration, Vol. 36, No. 3, 2013, pp. 1029–1036.
- [51] : Wagdy.R, Anis et Robert P Solar and Wind Technology 2, 9-14, (1985).
- [52] : Webasto "Technique frigorifique/ Climatisation", Centre de test et de formation de pompes à chaleur et les systèmes de réfrigération, Allemagne, 2003.
- [53] :Zhang P., Liu Q S., Wang R Z., "Performance and applicability of a DC refrigerator powered by the photovoltaic's, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2, No.1, 2010, pp. 1-18.

[54] :Zhong B L., Bao H W., Shuang Y., "Experimental investigation of a solar photovoltaic DC refrigerator with cold storage", *Advanced Materials Research*, Vol. 550, No. 553, 2012, pp. 3103-3107.

Abréviations :

AC : Courant Alternatif

Ah : Ampère heure

BP : Basse Pression

COP : Coefficient de Performance

DC : Courant Continu

HP : Haute Pression

LFCER : Laboratoire du Froid et Climatisation par Energie Renouvelable

MCP : Matériau à Changement de Phase

PV : Photovoltaïque

UDES : Unité de Développement des Equipements Solaires

Nomenclature :

Lecture	Désignation	Unité
T	Température	°C
ΔT	Différence des températures	°C
Q	Chaleur	KJ
w	Travail	KJ
H	Enthalpie	KJ/Kg
v	Volume spécifique	m ³ /Kg.
Cp	chaleur spécifique	kJ/Kg.°C
k	coefficient de transmission thermique	W/m ² .K
h	Coefficient de convection	W /m ² .K
ρ	densité de l'air	Kg/m ³
λ	La conductivité thermique	W /m.K
R	La résistance thermique	m ² .K/W
e	Epaisseur	m
S	surface	m ²
V	Volume	m ³
n	nombre de renouvellements de l'air sur 24 h	-----
m	masse volumique	Kg
P	puissance	W
t	temps	h

ANNEXE A

Masse volumique de l'air humide

Ts = Température sèche en °C

Hr = Humidité relative

Ts	100% Hr	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr	1% Hr
-10 °C	1,340	1,340	1,340	1,340	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341
-9 °C	1.335	1.335	1.335	1.335	1.335	1.336	1.336	1.336	1.336	1.336	1.336
-8 °C	1.330	1.330	1.330	1.330	1.330	1.330	1.331	1.331	1.331	1.331	1.331
-7 °C	1.324	1.325	1.325	1.325	1.325	1.326	1.326	1.326	1.326	1.326	1.326
-6 °C	1.319	1.320	1.320	1.320	1.320	1.320	1.321	1.321	1.321	1.321	1.321
-5 °C	1.314	1.314	1.315	1.315	1.315	1.315	1.316	1.316	1.316	1.316	1.316
-4 °C	1.309	1.309	1.310	1.310	1.310	1.310	1.311	1.311	1.311	1.311	1.311
-3 °C	1.304	1.304	1.305	1.305	1.305	1.305	1.306	1.306	1.306	1.306	1.307
-2 °C	1.299	1.299	1.300	1.300	1.300	1.301	1.301	1.301	1.301	1.302	1.302
-1 °C	1.294	1.295	1.295	1.295	1.295	1.296	1.296	1.296	1.296	1.297	1.297
0 °C	1.289	1.290	1.290	1.290	1.290	1.291	1.291	1.291	1.292	1.292	1.292
1 °C	1.284	1.285	1.285	1.285	1.286	1.286	1.286	1.287	1.287	1.287	1.288
2 °C	1.279	1.280	1.280	1.281	1.281	1.281	1.282	1.282	1.282	1.283	1.283
3 °C	1.275	1.275	1.275	1.276	1.276	1.276	1.277	1.277	1.277	1.278	1.278
4 °C	1.270	1.270	1.271	1.271	1.271	1.272	1.272	1.272	1.273	1.273	1.274
5 °C	1.265	1.265	1.266	1.266	1.267	1.267	1.267	1.268	1.268	1.269	2.269
6 °C	1.260	1.261	1.261	1.261	1.262	1.262	1.263	1.263	1.264	1.264	1.264
7 °C	1.255	1.256	1.256	1.257	1.257	1.258	1.258	1.259	1.259	1.260	1.260
8 °C	1.250	1.251	1.251	1.252	1.252	1.253	1.253	1.254	1.254	1.255	1.255
9 °C	1.246	1.246	1.247	1.247	1.248	1.248	1.249	1.249	1.250	1.251	1.251
10 °C	1.241	1.241	1.242	1.243	1.243	1.244	1.244	1.245	1.245	1.246	1.247
11 °C	1.236	1.237	1.237	1.238	1.239	1.239	1.240	1.240	1.241	1.242	1.242
12 °C	1.231	1.232	1.233	1.233	1.234	1.235	1.235	1.236	1.237	1.237	1.238
13 °C	1.227	1.227	1.228	1.229	1.229	1.230	1.231	1.231	1.232	1.233	1.234
14 °C	1.222	1.223	1.223	1.224	1.225	1.226	1.226	1.227	1.228	1.229	1.229
15 °C	1.217	1.218	1.219	1.220	1.220	1.221	1.222	1.223	1.223	1.224	1.225
16 °C	1.212	1.213	1.214	1.215	1.216	1.217	1.217	1.218	1.219	1.220	1.221
17 °C	1.208	1.209	1.210	1.210	1.211	1.212	1.213	1.214	1.215	1.216	1.217
18 °C	1.203	1.204	1.205	1.206	1.207	1.208	1.209	1.210	1.211	1.211	1.212

Annexes

19°C	1.198	1.199	1.200	1.201	1.202	1.203	1.204	1.205	1.206	1.207	1.208
20°C	1.194	1.195	1.196	1.197	1.198	1.199	1.200	1.201	1.202	1.203	1.204
21°C	1.189	1.190	1.191	1.192	1.193	1.194	1.196	1.197	1.198	1.199	1.200
22°C	1.184	1.185	1.187	1.188	1.189	1.190	1.191	1.192	1.194	1.195	1.196
23°C	1.179	1.181	1.182	1.183	1.184	1.186	1.187	1.188	1.189	1.191	1.192
24°C	1.175	1.176	1.177	1.179	1.180	1.181	1.183	1.184	1.185	1.187	1.188
25°C	1.170	1.171	1.173	1.174	1.176	1.177	1.178	1.180	1.181	1.183	1.184
26°C	1.165	1.167	1.168	1.170	1.171	1.173	1.174	1.176	1.177	1.178	1.180
27°C	1.160	1.162	1.164	1.165	1.167	1.168	1.170	1.171	1.173	1.174	1.176
28°C	1.156	1.157	1.159	1.161	1.162	1.164	1.165	1.167	1.169	1.170	1.172
29°C	1.151	1.153	1.154	1.156	1.158	1.160	1.161	1.163	1.165	1.166	1.168
30°C	1.146	1.148	1.150	1.151	1.153	1.155	1.157	1.159	1.161	1.163	1.164

Enthalpie de l'air humide

Ts = Température sèche en °C

Hr = Humidité relative

Ts	100% Hr	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr	1% Hr
-10 °C	-5.69	-6.12	-6.56	-7.00	-7.43	-7.87	-8.31	-8.74	-9.18	-9.61	-10.05
-9 °C	-4.32	-4.79	-5.27	-5.74	-6.21	-6.68	-7.16	-7.63	-8.10	-8.57	-9.05
-8 °C	-2.92	-3.44	-3.95	-4.46	-4.97	-5.49	-6.00	-6.51	-7.02	-7.53	-8.04
-7 °C	-1.50	-2.05	-2.61	-3.16	-3.72	-4.27	-4.83	-5.38	-5.93	-6.48	-7.04
-6 °C	-0.05	-0.65	-1.25	-1.85	-2.44	-3.04	-3.64	-4.24	-4.84	-5.43	-6.03
-5 °C	1.44	0.79	1.14	-0.50	-1.115	-1.80	-2.45	-3.09	-3.74	-4.38	-5.03
-4 °C	2.96	2.26	1.56	0.86	0.16	-0.54	-1.23	-1.93	-2.63	-3.32	-4.02
-3 °C	4.52	3.76	3.01	2.25	1.50	0.74	-0.01	-0.76	-1.51	-2.26	-3.02
-2 °C	6.11	5.30	4.48	3.67	2.85	2.04	1.23	0.42	-0.39	-1.20	-2.01
-1 °C	7.75	6.87	5.99	5.11	4.24	3.36	2.49	1.61	0.74	-0.13	-1.01
0 °C	9.43	8.48	7.53	6.59	5.64	4.70	3.76	2.82	0.88	0.94	0.00
1 °C	11.16	10.13	9.12	8.10	7.08	6.06	5.05	4.04	3.02	2.01	1.01
2 °C	12.93	11.83	10.73	9.64	8.54	7.44	6.36	5.27	4.18	3.10	2.01
3 °C	14.76	13.58	12.39	11.22	10.04	8.86	7.69	6.52	5.35	4.18	3.02
4 °C	16.64	15.37	14.10	12.83	11.57	10.30	9.04	7.78	6.53	5.27	4.02
5 °C	18.58	17.21	15.85	14.49	13.13	11.77	10.42	9.07	7.72	6.37	5.03
6 °C	20.58	19.11	17.65	16.19	14.73	13.27	11.82	10.37	8.92	7.47	6.03
7 °C	22.64	21.07	19.50	17.93	16.36	14.80	13.24	11.69	10.13	8.58	7.04
8 °C	24.78	23.09	21.40	19.72	18.04	16.36	14.69	13.02	11.36	9.70	8.04
9 °C	26.98	25.17	23.36	21.56	19.76	17.96	16.17	14.38	12.60	10.82	9.05
10 °C	29.27	27.32	25.39	23.45	21.52	19.60	17.68	15.77	13.86	11.95	10.05
11 °C	31.62	29.55	27.47	25.40	23.34	21.28	19.22	17.17	15.13	13.09	11.06
12 °C	34.08	31.85	29.63	27.41	25.20	22.99	20.79	18.60	16.42	14.23	12.06
13 °C	36.62	34.23	31.85	29.48	27.11	24.75	22.40	20.06	17.72	15.39	13.07
14 °C	39.26	36.70	34.15	31.62	29.08	26.56	24.05	21.54	19.04	16.55	14.07
15 °C	41.99	39.26	36.53	33.82	31.11	28.42	25.73	23.05	20.39	17.73	15.08
16 °C	44.83	41.91	39.00	36.10	33.21	30.33	27.46	24.60	21.75	18.91	16.08
17 °C	47.78	44.66	41.55	38.45	35.36	32.29	29.29	26.17	23.13	20.10	17.09

Annexes

18°C	50.86	47.52	44.19	40.88	37.59	34.30	31.03	27.78	24.54	21.31	18.09
19°C	54.05	50.49	46.94	43.40	39.88	36.38	32.89	29.42	25.96	22.52	19.10
20°C	57.38	53.57	49.78	46.01	42.26	38.52	34.80	31.10	27.42	23.75	20.10
21°C	60.84	56.78	52.74	48.71	44.71	40.73	36.76	32.82	28.90	24.99	21.11
22°C	64.45	60.12	55.80	51.51	47.25	43.00	38.78	34.58	30.40	26.24	22.11
23°C	68.22	63.59	58.99	54.42	49.87	45.35	40.85	36.38	31.93	27.51	23.12
24°C	72.14	67.21	62.31	57.43	52.59	47.77	42.99	38.23	33.50	28.79	24.12
25°C	76.24	70.98	65.76	60.56	55.40	50.28	45.18	40.12	35.09	30.09	25.13
26°C	80.52	74.91	69.34	63.81	58.32	52.87	47.45	42.06	36.72	31.41	26.13
27°C	84.98	79.01	73.08	67.19	61.35	55.54	49.78	44.06	38.38	32.74	27.14
28°C	89.53	83.29	76.97	70.70	64.48	58.31	52.19	46.11	40.07	34.08	28.14
29°C	94.53	87.75	81.02	74.36	67.74	61.18	54.67	48.21	41.80	35.45	29.15
30°C	99.63	92.41	85.25	78.16	71.12	64.15	57.23	50.37	43.58	36.82	30.15

ANNEXE B

Description de Logiciel PVSyst

Le logiciel PVSyst est un logiciel de simulation et de dimensionnement d'installations solaires photovoltaïques autonomes et reliés au réseau. Ce logiciel a été élaboré par l'Université de Genève (en Suisse). Le logiciel PVSyst dispose de plusieurs entrées : entrée flux solaires moyens mensuels, températures moyennes mensuelles, besoins énergétiques, choix de modules PV et de leur inclinaison, choix des batteries, régulateurs de charge, onduleurs, entrée du nombre de jours d'autonomie, du taux de couverture solaire et du coût d'investissement (achat matériel, coût d'installation du système). Les principaux résultats de la simulation sont : la puissance du champ requis, la capacité de stockage, les caractéristiques des composants sous des conditions précises et le coût de revient du kilowattheure (kWh).

Ce logiciel se décompose en 2 parties. La première sert à faire un dimensionnement rapide de l'installation à partir de la météo, de la charge, de l'orientation des panneaux, de la profondeur de décharge maximale des batteries et du taux de couverture voulu. On obtient alors la puissance totale des panneaux et la capacité des batteries à installer. Dans la seconde partie une simulation du fonctionnement de l'installation solaire peut être faite à partir de ces premiers résultats de simulation qui prend en compte des facteurs comme les pertes de puissances dues au régulateur, aux câbles. Le logiciel fonctionne aussi bien en simulation qu'en pré dimensionnement. Il dispose de sorties détaillées et de base de données des caractéristiques de matériel (capteurs, batteries, onduleurs, ..), (Manuel PVSyst de cours photovoltaïque, 1996).

1. Application

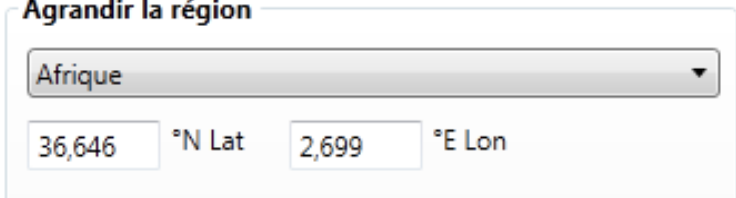
- **Situation du projet**

Maison intelligente à basse consommation d'énergie UDES (bous -mail).

- **La demande**

Dimensionner le système autonome nécessaire pour alimenté un réfrigérateur à l'aide du logiciel PV Système

- **Les données climatiques**



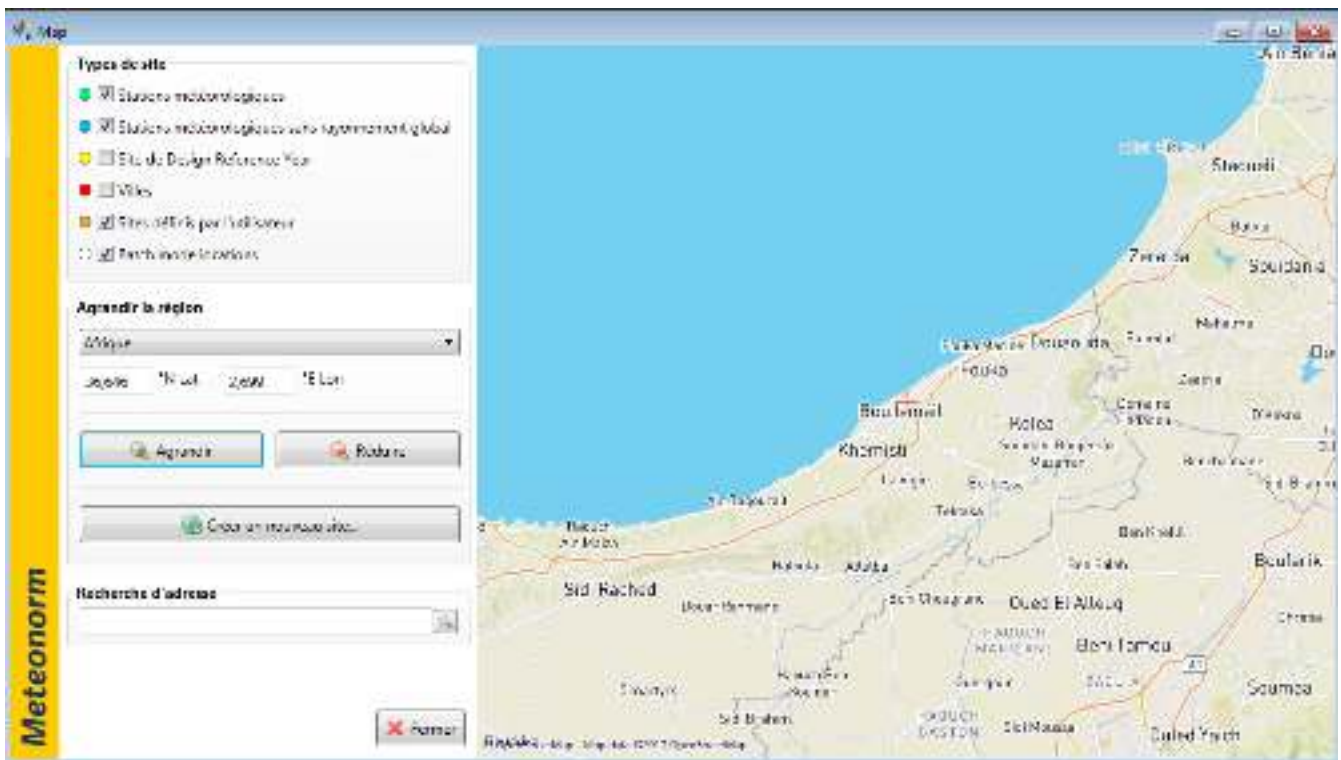
Agrandir la région

Afrique

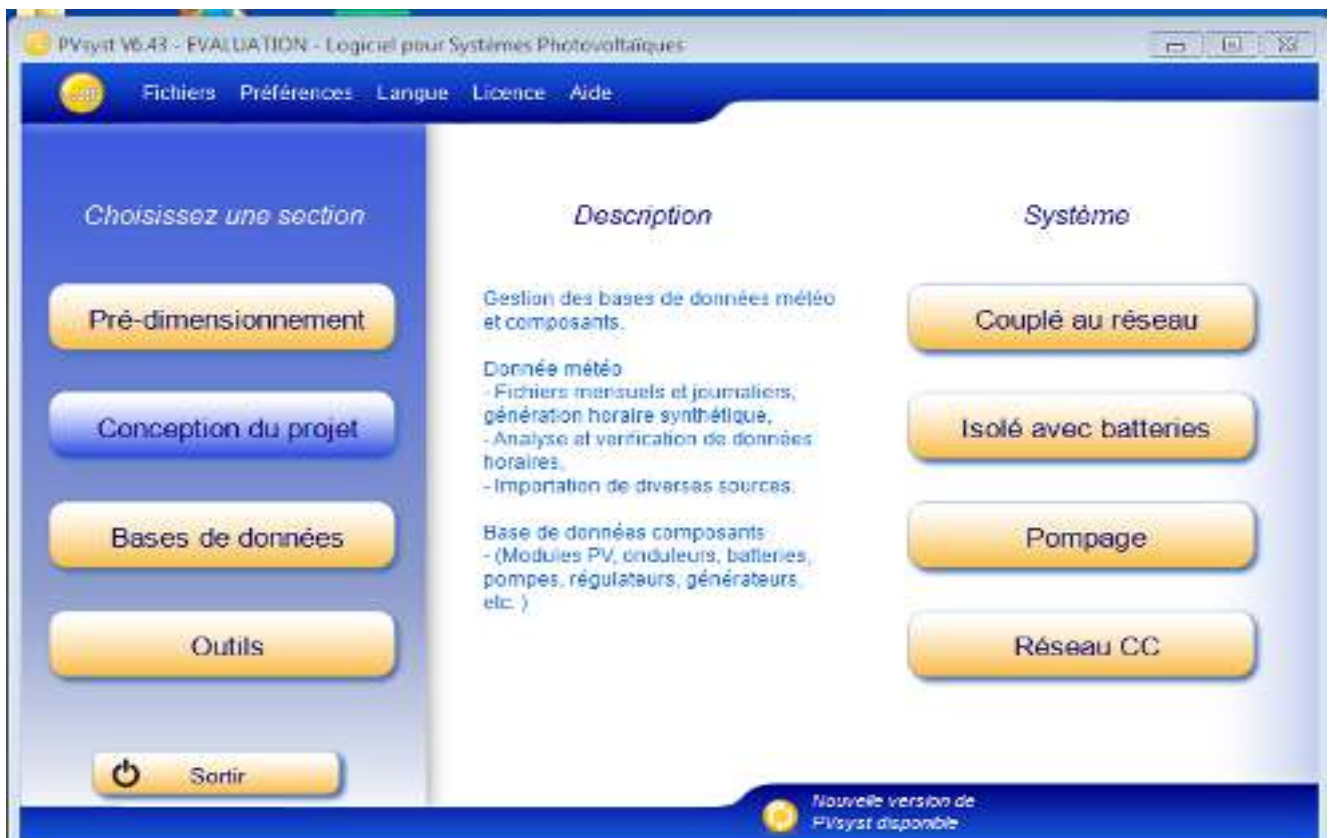
36,646 °N Lat 2,699 °E Lon

2. Début de l'analyse

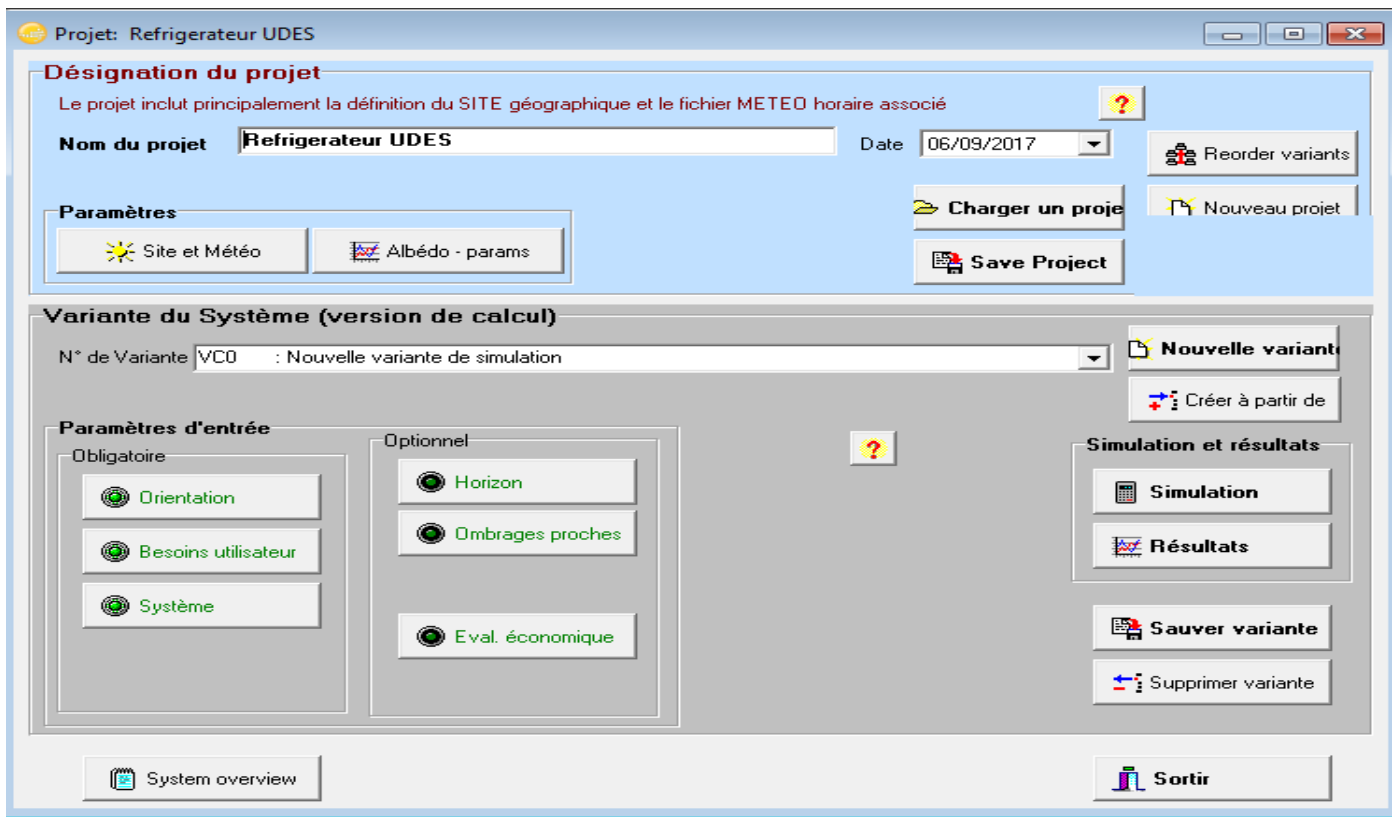
Etape 1 : intégration d'une base de données météorologique soit générée de Métronome V7



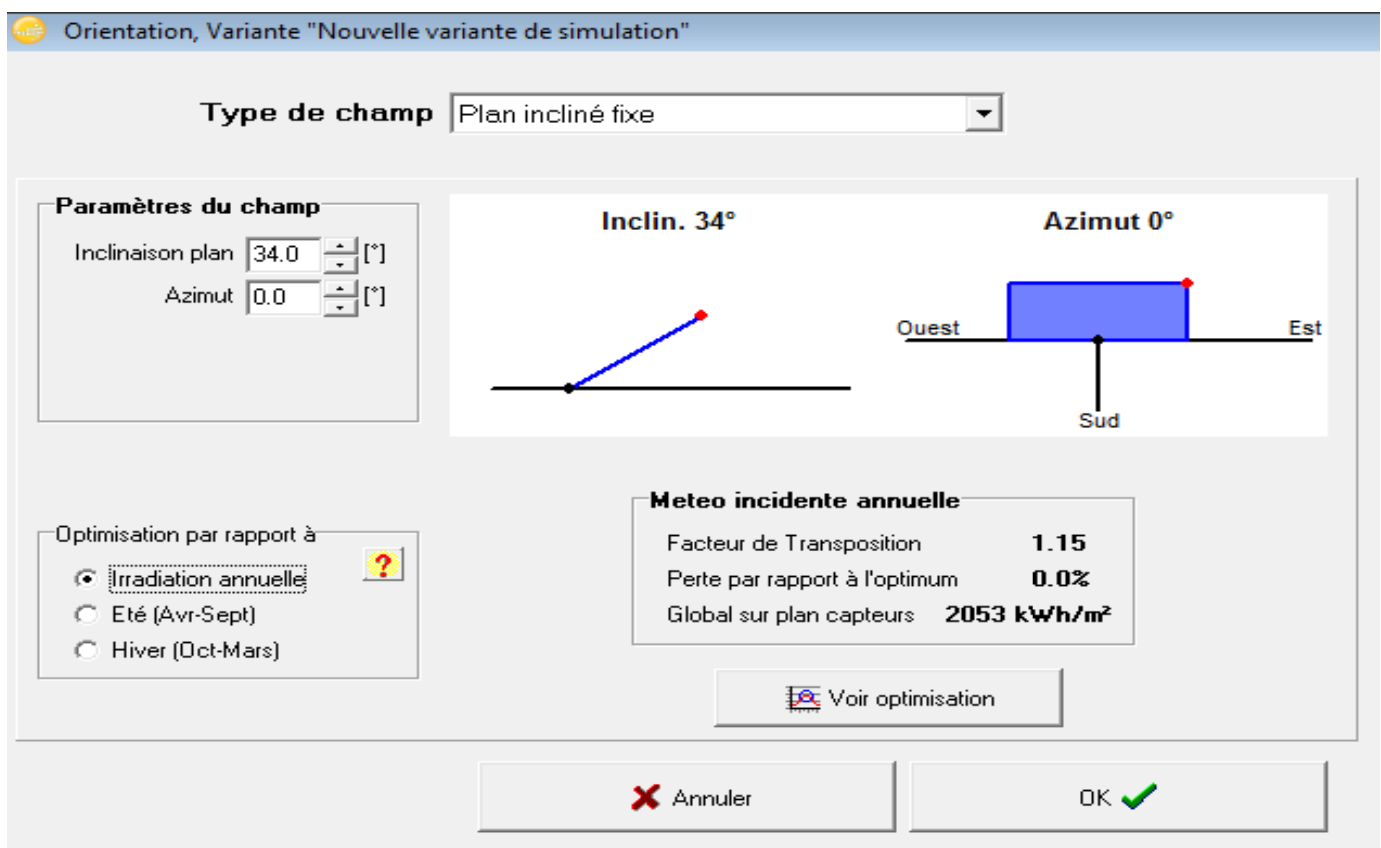
Etape 2 : Lancement du logiciel PVsyst en cliquant sur l'icône conception du projet après isolé avec batteries



Etape 3 : Complétez les données concernant le site



Etape 4 : On clique sur l'icône Orientation, pour composer l'inclinaison du plan



Etape 5 : On clique sur l'icône Système, Complétons les données des récepteurs branchés sur le générateur photovoltaïque (un réfrigérateur).

Daily use of Energy, Variant "Nouvelle variante de simulation"

Consumptions | Hourly distribution

Daily consumptions

Number	Appliance	Power	Daily use	Hourly distrib	Daily energy
	Lamps (LED or fluo)	0 W/lamp	0.0 h/day		0 Wh
0	TV / PC / Mobile	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
0	Appareils domestiques	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
1	Frigo / Congélateur	0.42 kWh/day	24.0 h/day	OK	420 Wh
0	Dish- & Cloth-washers	0.0 W aver.	0.0 h/day		0 Wh
0	Autres utilisations	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
0	Autres utilisations	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
Stand-by consumers		0 W tot	24 h/day		0 Wh
Total daily energy					420 Wh/day
Total monthly energy					12.6 kWh/month

Appliances info

Consumption definition by

Year Seasons Months

Week-end or Weekly use

Use only during

7 days in a week

Model

Load Save Cancel

Etape 6 : On Choisie la batterie selon la capacité.

Design of a Standalone system, Variant "Nouvelle variante de simulation"

Specified Load | Pre-sizing suggestions | System summary

Av. daily needs: 0.4 kWh/day

Enter accepted LOL: 5.0 %

Enter requested autonomy: 4.0 day(s)

Battery (user) voltage: 24 V

Suggested capacity: 82 Ah

Suggested PV power: 113.2 Wc (nom.)

Detailed pre-sizing

Storage | Champ PV | Back-up | Schema

Procedure

1. Pre-sizing: The Pre-sizing suggestions are based on the Monthly meteor and the user's needs definition.
2. Storage: Define the battery pack. (default checkboxes will approach the pre-sizing)
3. PV Array design: Design the PV array (PV module) and the control mode. You are advised to begin with a universal controller.
4. Back-up: Define an eventual Genset.

Specify the Battery set

Sort Batteries by: voltage capacity manufacture

Deka 12V 80Ah Solar PV 8G27

2 Batteries in serie

1 Batteries in parallel

Number of batteries: 2

Number of elements: 12

Battery pack voltage: 24 V

Global capacity: 80 Ah

Stored energy (80% DOD): 1.5 kWh

Total weight: 57 kg

Operating battery temperature

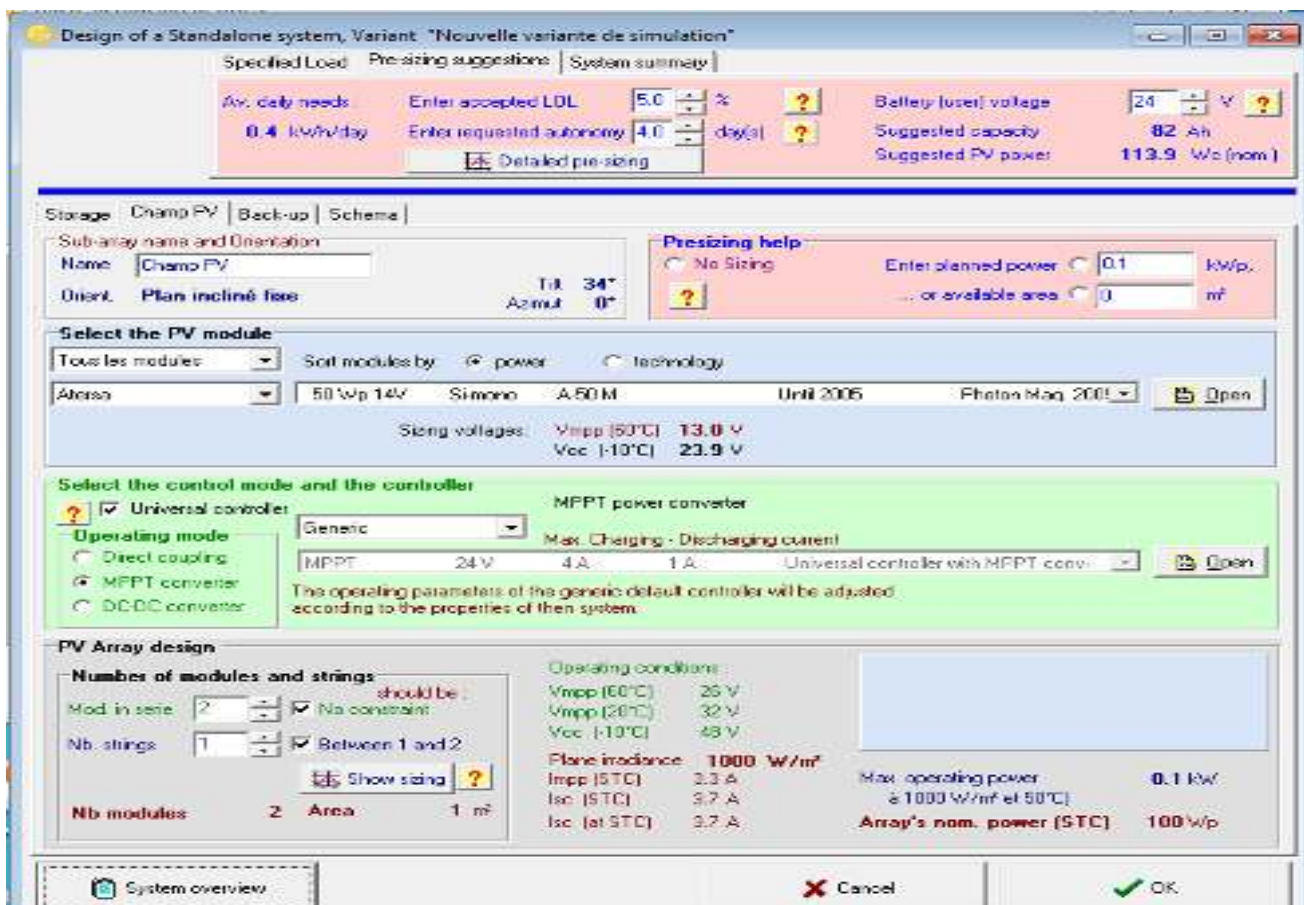
Temper. mode: Fixed (tempered local)

Fixed temperature: 20 °C

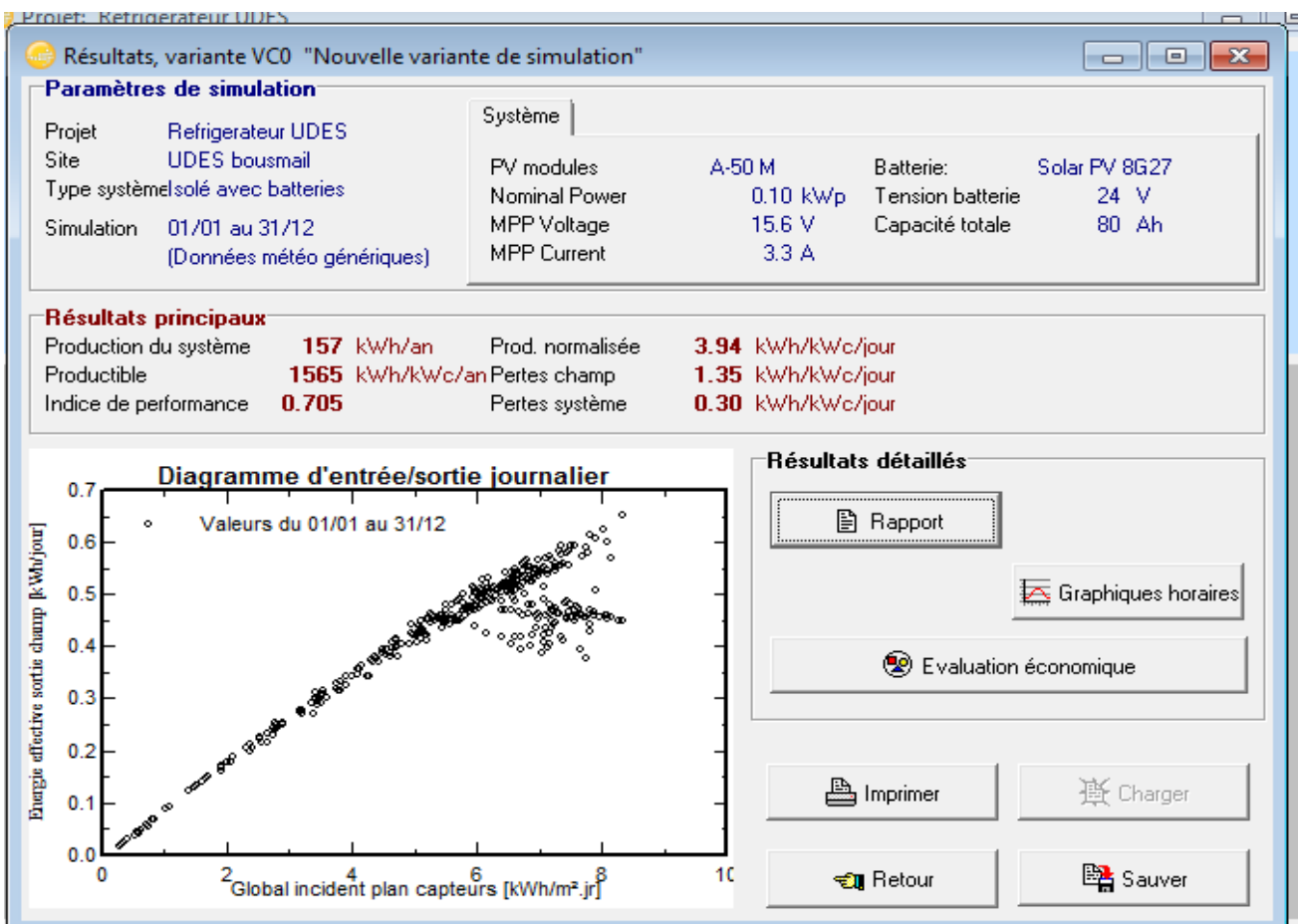
The battery temperature is important for the ageing of the battery. An increase of 10 °C divides the "static" battery life by a factor of 2.

System overview Cancel OK

Etape 7 : On Choisie le panneau selon la puissance crête.



Etape 8 : On clique sur l'icône rapport pour afficher des résultats



Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation

Projet : Réfrigérateur UDES

Site géographique : UDES bous mail

pays : Algérie

Situation Latitude 36.0°N Longitude 2.7°E

Temps défini comme Temps légal Fus. Horaire TU+1 Altitude 5 m Albédo 0.20

Données météo: UDES bous mail

Métronome 7.1 - Synthétique

Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Date de la simulation 06/09/17 à 20h54

Paramètres de simulation

Orientation plan capteurs Inclinaison 34° Azimut 0°

Modèles utilisés Transposition Perez Diffus Perez, Métronome

Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV	Si-mono	Modèle A_50 M
<small>Original PVsyst database</small>		Fabricant Atersa
Nombre de modules PV		En série 2 modules
Nombre total de modules PV		Nbre modules 2
Puissance globale du champ		Nominale (STC) 100 Wc
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp 27 VI
Surface totale	Surface modules 1.0 m ²	En parallèle 1 chaînes
		Puissance unitaire 50 Wc
		Aux cond. de fonct. 89 Wc (50°C)
		mpp 3.3 A

Facteurs de perte du champ PV :

• Fact. de pertes thermiques	Uc (const) 20.0 W/m ² K	Uv (vent) 0.0 W/m ² K / m/s
• Perte ohmique de câblage	Rés globale champ 142 mOhm	Frac. Pertes 1.5 % aux STC
• Perte diode série :	Chute de tension 0.7 V	Frac pertes 2.3 % aux STC
• Perte de qualité module	Frac. Pertes 4.0 %	
• Perte de "mismatch" module :	Frac. Pertes 1.0 % au MPP	
• Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE :	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)	Param. Bo 0.05

Paramètres du système: **Type de système** Système isolé avec batteries

Batterie:

Modèle: Solar PV 8G27

Fabricant: Deka

Caractéristiques du banc de batteries **Tension** 24 V **Capacité nominale** 80 Ah

Nombre d'unités 2 en série

Température Fixée (20°C)

Controller

Modèle : Universal controller with MPPT converter

Technologie MPPT converte **Coeff. de temp** -5.0 mV/°C/elem.

Convertisseur **Efficacité maxi et EURO** 97.0/95.0 %

Battery management control : **Threshold commands as** SOC calculation

• **Charge** SOC = 0.90/0.75 i.e. approx. 28.0/25.1 V

• **Décharge** SOC = 0.20/0.4 i.e. approx. 23.3/24.4 V

Système isolé avec batteries: Besoins de l'utilisateur

Projet : Réfrigérateur UDES

Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Principaux paramètres système	Type de système	Isolé avec batteries
Orientation plan capteurs	inclinaison 34°	azimut 0°
Modules PV	Modèle A-50	MPnom 50 Wc
Champ PV	Nombre de modules 2	Pnom total 100 Wc
Batterie	Modèle Solar PV 8G27	Technologie cellée, Gel
Batteries	Nombre d'unités 2	Tension / Capacité 24 V / 80 Ah
Besoins de l'utilisateur	Consomm. Domestique	Constants sur l'année global 153 kWh/an

Consomm. domestique, Constants sur l'année, moyenne = 0.4 kWh/jr

Valeurs annuelles

	Nombre	Puissance	Utilisation	Energie
Frigo / Congélateur	1		124 Wh /jour	420 Wh/jour
Energie journalière totale				420 Wh/jour

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail a pour but d'étudier et de modéliser un réfrigérateur solaire, l'objectif de l'étude théorique d'un réfrigérateur domestique qui fonctionne en énergie solaire photovoltaïque avec une faible consommation et un moindre coût.

Ces réfrigérations à compression de vapeur qu'a été réalisées au niveau de l'unité de développement des équipements solaires UDES de volume de 117 L alimenté indirectement par l'énergie solaire en utilisant un onduleur solaire (DC-AC) avec modification dans le cycle frigorifique

L'alimentation PV de ce prototype a été dimensionnée avec le logiciel PVSyst. V6.43 pour une autonomie de 4 jours sans ensoleillement et testés sous les conditions climatiques méditerranéennes.

Le résultat théorique nous permet de prévoir la quantité d'énergie perdue pendant l'ouverture de la porte principale du réfrigérateur ainsi que toutes les pertes relatives aux conditions externes de température ambiante.

Les résultats expérimentaux de cette étude montrent que la consommation journalière de notre système frigorifique DC-AC est de 0.7kWh/jour sans PCM et de 0.61KWh/jour avec PCM. On conclure que l'intégration des PCM a permis de diminuer la consommation électrique de 12.9 % comparant au cas sans PCM en régime établi et sans ouverture de la porte.

En outre, la consommation journalière du système frigorifique DC-AC est de 0.9kWh/jour sans PCM, et de 0.75KWh/jour avec PCM, on conclure que l'intégration des PCM a permis de diminuer la consommation électrique de 16.7 % comparant au cas sans PCM en régime établi et avec ouverture de porte

L'intégration des matériaux à changement de phase dans les dispositifs de stockage froid (réfrigérateur, chambre froide ...) est considéré comme une bonne façon d'améliorer les performances ainsi que l'économie d'énergie de ces derniers.

Références bibliographiques

ANNEXES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les besoins énergétiques de l'humanité n'ont cessé de croître avec son évolution, l'homme a utilisé des ressources qui sont apparues avec le progrès scientifique telle que le charbon, le pétrole, le gaz ou encore le nucléaire. Actuellement les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon,) sont consommées plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature, et il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée [24]. L'utilisation de ces énergies fossiles est manifestée principalement par la pollution et le réchauffement climatique de la terre par effet de serre. Face à ces problèmes, et afin de limiter l'emploi des énergies fossiles, certains pays, se sont tournés vers l'emploi des énergies renouvelables faisant appel de façon directe ou indirecte à l'énergie solaire [22]. L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre car elle ne provoque pas d'émissions de gaz nocifs pour notre environnement, elle peut être utilisée de deux manières différentes, soit par conversion photovoltaïque, permettant de générer l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, soit par conversion thermique, en transformant le rayonnement en chaleur ou en froid [19]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les importants, car la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie renouvelable présente une bonne alternative pour nombreux secteur et en particulier le froid domestique.

Le besoin de production de froid dans les zones rurales ou les bases de vie et les postes avancés qui sont privés d'électricité est une nécessité de première envergure. Cette production de frigorifique vise la conservation d'aliments, fruits, légumes et viandes. Ainsi que les produits pharmaceutiques. Pour subvenir à la demande en production de froid, nombreux systèmes frigorifiques ont été mis en pratique selon divers cycles thermodynamiques. Parmi ces cycles, le cycle à compression de vapeur, le cycle d'absorption et le cycle à adsorption sont les plus utilisés dans le domaine de la réfrigération et de la climatisation [21].

Dans la réfrigération domestique les systèmes rencontrés le plus souvent sont des systèmes à compression de vapeur. Ces derniers nécessitent de l'énergie électrique pour leur fonctionnement [23]. Dans les régions où l'énergie électrique est disponible, ce système de réfrigération est habituellement adéquat pour satisfaire la plupart des exigences en réfrigération. Cependant, plusieurs régions ne disposent pas d'électricité. Ceci inclut des villages ruraux et des sites isolés dans les pays en voie de développement. La réfrigération dans ces régions, par conséquent, exige une solution alternative. L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque comme source d'énergie électrique pour leurs alimentations est une option très intéressante puisqu'elle est inépuisable, abondante et facile d'utilisation et d'installation. Dans ces régions le besoin en froid coïncide la plupart du temps avec la disponibilité de la ressource solaire [11].

Dans cette perspective et dans le cadre d'un projet fédérateur sur une maison solaire qui regroupe plusieurs Equipe de Recherche de l'Unité de Développement des Equipement Solaire UDES/EPST CDER et en collaboration avec l'Equipe Froid et Climatisation par Energies Renouvelable d'origine Photovoltaïque qu'a été développé ce travail de mémoire.

Dans ce contexte, cette étude vise l'optimisation de la consommation électrique pour une plus grande efficacité énergétique des appareils ménage en particulier le réfrigérateur afin d'intégrer une maison à basse consommation alimentée en partie par les énergies renouvelable. Les principaux objectifs de la présente étude consistent à étudier et modifier un réfrigérateur domestique classique à compression de vapeur dans le but de réduire sa consommation électrique et son utilisation avec une source d'énergie électrique photovoltaïque.

L'intégration du stockage de froid par l'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (PCM), réduit le temps de fonctionnement de l'appareil et par conséquent sa consommation électrique. Cette rationalisation énergétique permet l'optimisation de l'installation PV associée au réfrigérateur (Champ PV, Batteries Solaire, Régulation et Conversion).

Le présent mémoire s'organise en trois Chapitres:

Après l'Introduction Générale, une synthèse bibliographique a été présentée dans le premier chapitre contenant quelques travaux concernant les réfrigérateurs solaires photovoltaïques réalisés. Ainsi que des généralités sur les systèmes frigorifique et le solaire

photovoltaïque, avec concepts de base du rayonnement solaire et conversions possibles de l'énergie.

Dans deuxième Chapitre, on expose un bilan thermique des différents compartiments du réfrigérateur.

Pour le troisième chapitre nous présentons notre dispositif expérimental qui est un réfrigérateur domestique conventionnel et les différents outils de mesure et d'acquisition et les différentes étapes de simulation sous logiciel PV-Sys qui nous permettront de dimensionner le champ de capteurs solaire PV pour une puissance donnée du réfrigérateur. Ainsi que les résultats expérimentaux et leur interprétation.

En fin, on termine ce mémoire par une Conclusion Générale qui résume les résultats obtenus.