

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES 1998

Présenté par :

CHEMBOU NDONGHO Evariste J.

**Analyse comparative
des technologies
de production de froid
par voie solaire**

E. I. E. R.	
Enregistré à l'Arrivée	
le _____	s/N° 335/98

MENTION : **ASSEZ BIEN**

Encadrement
T. DJAKO

A mon feu papa ;

A ma mère ;

A mes frères et soeurs ;

A tous ceux qui me sont chers...

MES REMERCIEMENTS

- à M. Thomas DJIAKO, maître de ce mémoire, professeur à l'EIER (département EDR*), pour son encadrement et ses multiples conseils.
- à M. Yézouma COULIBALY, professeur à l'EIER (département EDR), pour sa disponibilité et son aide.
- à messieurs EBO Félix et YAONABA Lazare, en recherche à l'EIER, pour leur assistance, leurs conseils et pour toute la documentation qu'ils ont mise à notre disposition.
- à l'ensemble de la 27^e promotion, pour l'entente et l'entraide qui ont toujours régné durant notre formation.
- à la coopération française, pour avoir financé tout au long de ces trois années ma formation.
- à tous les professeurs de l'EIER pour m'avoir soutenu pendant les trois années de ma formation.
- à tous mes copains et copines pour leurs soutiens continuels.
- à tous ceux qui, de loin ou de près ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

*EDR : Energie pour le Développement Rural.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma de principe d'un circuit frigorifique à compression mécanique 3
Figure 2: Schéma de principe d'un système frigorifique à absorption continue4
Figure 3: Schéma de principe des systèmes frigorifiques à éjection 5
Figure 4: Schéma de principe des systèmes frigorifiques thermoélectriques . 6
Figure 5: Organigramme des différentes filière de production de froid (d'après M. DUMINIL)..... 7
Figure 6 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.1).....13
Figure 7 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.2).....14
Figure 8 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.3).....15
Figure 9 Schéma de principe filière thermodynamique (filière 2.1)16
Figure 10 Schéma de principe filière thermodynamique (filière 2.2).....16
Figure 11: Schéma de principe filière biomasse - machine à compression ...17
Figure 12: Schéma de principe filière générateur thermoélectrique - module de PELTIER18
Figure 13: Schéma de principe de la filière biomasse - machine à absorption19
Figure 14: Schéma de principe filière capteur thermique - machine à éjection19
Figure 15: Schéma de principe filière à sorption intermittente20
Figure 16: Organigramme des différentes filières de production de froid par voie solaire (d'après M. DUMINIL).....22
Figure 17: Répartition des coût sur le réfrigérateur solaire37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Critère de choix entre capteurs plan et à concentration10
Tableau 2: Analyse comparative des différentes filières25
Tableau 3: Consommation énergétique des réfrigérateurs.....31
Tableau 4: Coûts comparés réfrigérateurs37
Tableau 5 : Caractéristiques du cycle thermodynamique de la machine.....42

AVANT-PROPOS

L'Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) de Ouagadougou est une institution qui regroupe quatorze (14) États francophones d'Afrique du Centre et de l'Ouest. Elle comprend deux (2) cycles de formation:

- la Formation Initiale d'ingénieurs de l'équipement rural, qui dure trois (3) ans, dont les domaines de compétence sont: la mise en valeur des ressources hydrauliques, les aménagements hydro-agricoles, l'alimentation en eau potable, l'assainissement, l'énergie et froid, le génie civil, la voirie.
- Les Formations Post-Universitaires de spécialisation durent un (1) an: Génie Sanitaire (GS), Informatique appliquée aux Sciences de l'Eau (ISE), Génie Énergétique et Froid Industriel (GEFI), Mobilisation des Ressources en Eau (MRE), Hydraulique Agricole (HA).

L'Ecole organise des sessions de formation continue et réalise également des activités de Recherche et d'Ingénierie.

La formation initiale se termine par un mémoire de fin d'études qui vise à familiariser l'élève-ingénieur à l'exercice de la profession d'ingénieur en mettant l'accent sur le travail personnel.

L'Analyse comparative des technologies de production de froid par voie solaire est le thème de mon mémoire, proposé par l'EIER.

L'étude a été décomposée pour la clarté de l'exposé, en deux parties:

- ♦ La première partie: Technologies de production de froid par voie solaire.
 - Dans cette partie, nous analyserons aussi les possibilités d'utilisation de l'énergie solaire pour la production du froid.
- ♦ La deuxième partie: Analyse comparative des technologies de production de froid par voie solaire.
 - Cette seconde partie a pour objectif de comparer ces technologies entre elles et de faire une étude de cas pour valider l'analyse comparative.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....ii
AVANT-PROPOS.....iii
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....iv
RESUME.....vi
INTRODUCTION.....1

I. TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE2

I.1. LA PRODUCTION DE FROID 2
I.1.1. *besoins*..... 2
I.1.2. *Technologies de production de froid*..... 2

I.2. UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE POUR L'ALIMENTATION DES
MACHINES FRIGORIFIQUES..... 8
I.2.1. *Gisement solaire*..... 8
I.2.2. *Captation de l'énergie solaire*..... 9
I.2.3. *Technologies de production de froid par voie solaire*..... 11

**II. ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE
FROID PAR VOIE SOLAIRE23**

II.1. ANALYSE COMPARATIVE.....23
II.2. ETUDES DE CAS30
II.2.1. *Conservation des vaccins par le photovoltaïque*..... 30
II.2.2. *Chambre froide en site isolé*..... 38

RECOMMANDATIONS.....44
CONCLUSION.....45
BIBLIOGRAPHIE.....47
ANNEXES.....49

RESUME

Le développement des énergies nouvelles a été l'objet d'un très important regain d'intérêts à la suite de la crise de 1973.

D'importantes recherches, en Afrique et à l'étranger, ont ainsi conduit à la mise au point de solutions techniques originales pour plusieurs domaines dont on peut citer: le pompage de l'eau, la production d'énergie électrique, le séchage, la réfrigération.

En parlant de la réfrigération, les besoins de froid sont réels aussi bien pour les denrées alimentaires, les produits pharmaceutiques que pour toutes autres denrées périssables. Les pertes post récoltes, très grandes, varient entre 25 et 40% selon les produits. Ces besoins peuvent en partie être satisfaits par le froid produit à l'aide de l'énergie solaire.

Notre étude consiste à faire une étude comparative des technologies de production de froid par voie solaire. Elle nous permettra de déceler celles qui conviennent mieux en particulier aux sites isolés d'Afrique sub-saharienne.

Après une étude bibliographique approfondie et quelques visites de terrain (installations et utilisations), nous pouvons dire que les filières photovoltaïque et biomasse conviendraient au contexte africain.

INTRODUCTION

Le développement rural dans les pays en développement exige souvent l'énergie dans les sites où la production et la distribution conventionnelles sont extrêmement coûteuses. L'énergie solaire étant en abondance dans ces régions privées de toute source d'énergie autre que le rayonnement solaire, elle palliera à ce problème.

Ainsi, l'exploitation de l'énergie solaire peut permettre un développement local bénéfique à un coût raisonnable; bien que l'investissement initial soit toujours élevé.

La production de froid apparaît comme une des utilisations de l'énergie solaire quant à la conservation des denrées périssables.

Notre étude consiste à comparer les différentes technologies de production de froid par voie solaire. Après avoir inventorier tous les dispositifs permettant la production de froid par cette filière, nous montrerons comment utiliser cette énergie pour l'alimentation des machines frigorifiques. Il sera ensuite question de faire une analyse comparative de toutes ces technologies et la valider par des études de cas.

I. TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

I.1. LA PRODUCTION DE FROID

I.1.1. besoins

Les techniques frigorifiques sont susceptibles de recevoir des applications très variées, qu'on peut rapporter principalement à trois domaines principaux :

- Conservation des denrées périssables (conservation des vaccins ou des denrées alimentaires) ;
- Conditionnement de l'air (climatisation) ;
- Procédés industriels (brasseries, jus de fruits, chocolaterie,...)

Dans les pays d'Afrique sub-saharienne, en particulier les sites isolés, c'est dans la conservation des denrées périssables que les réalisations présentent le plus grand intérêt. On trouvera en **annexe 1**, les conditions recommandées pour l'entreposage des denrées périssables.

I.1.2. Technologies de production de froid

Les machines frigorifiques nécessitent pour leur fonctionnement, de l'énergie. Cette énergie est fournie :

- sous la forme mécanique ou électrique, (pure exergie) - systèmes mécanofrigorifiques, voir **annexe 2.1**;
- sous la forme calorifique, (exergie + anergie) - systèmes thermofrigorifiques, voir **annexe 2.2**.

La **figure 5** ci-dessous montre comment se présentent ces différentes machines et comment elles se présentent les unes par rapport aux autres. Pour les repérer plus facilement, on a attribué à chacun un numéro conventionnel.

Les commentaires sur les différents systèmes de production de froid se trouvent en **annexe 2**.

Présentons ci-dessous le principe de fonctionnement des systèmes qui présentent plus d'intérêt pour les pays chauds africains. Il s'agit de :

a) - Systèmes frigorifiques à compression mécanique

C'est le système frigorifique le plus répandu. Le principe de fonctionnement est décrit par la **figure 1**.

L'évaporateur ou source froide de la machine est placée dans l'enceinte à refroidir. Le fluide frigorigène s'y vaporise à la pression d'évaporation P_0 correspondant à la température T_0 de vaporisation de ce frigorigène. Ces vapeurs pénètrent dans le compresseur où elles sont comprimées à la pression P_k correspondant à la température de condensation T_k du frigorigène. Les vapeurs ci-dessus se liquéfient à la température T_k dans le condenseur (qui constitue la source chaude de la machine). Puis, au travers d'un détendeur, à commande généralement automatique, le liquide passe dans l'évaporateur.

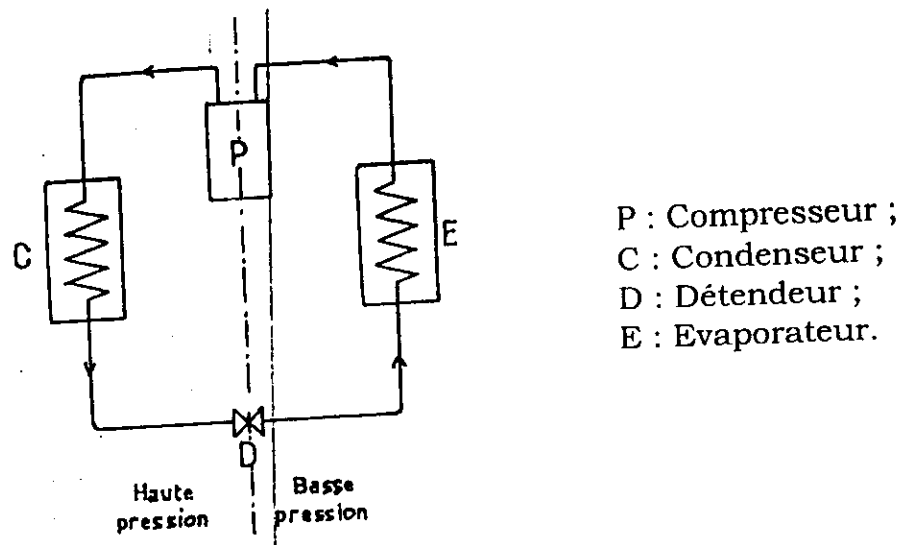


Figure 1: Schéma de principe d'un système frigorifique à compression mécanique

b) - Systèmes frigorifiques à absorption continue

Le principe de fonctionnement est décrit par la **figure 2**. Ces machines sont peu courantes. Elles renferment une solution composée d'un fluide frigorigène et d'un solvant (absorbant), qui ont l'un et l'autre une certaine affinité. Le fluide frigorigène est soit l'eau soit l'ammoniac. Avec l'ammoniac on peut descendre aux très basses températures nécessaires à la congélation, alors que les machines à absorption d'eau sont réservées à la climatisation. On utilise généralement les mélanges binaires suivants :

H₂O - LiBr (eau - bromure de lithium) où l'eau est le fluide frigorigène ;
 NH₃ - H₂O (ammoniac - eau) où l'ammoniac est le fluide frigorigène.

Le compresseur du cycle à compression est remplacé par l'ensemble absorbeur - échangeur - bouilleur - pompe; les autres éléments du cycle restent sans changement. Le soluté est moins soluble à chaud que froid dans son solvant

Les vapeurs du fluide frigorigène formées dans l'évaporateur - placé dans l'enceinte à refroidir - sont absorbées dans un absorbeur où arrive une solution pauvre en réfrigérant, venant du bouilleur par l'intermédiaire d'un robinet. Cette solution pauvre peut s'enrichir dans l'absorbeur en dissolvant le fluide à la température basse qui y est maintenue par une circulation d'eau froide. On apporte de la chaleur à la solution enrichie dans le bouilleur où règne une pression P_k (T_k température du bouilleur). Le fluide s'évapore en laissant une solution pauvre en réfrigérant. Ces vapeurs passent dans un condenseur à la pression P_k , et se liquéfient en cédant la chaleur. Le réfrigérant liquide arrive à l'évaporateur à la pression P_0 , où il s'évapore en produisant du froid.

Compte tenu de la différence de pression entre l'absorbeur et le bouilleur, la solution enrichie de l'absorbeur est remontée jusqu'au bouilleur par une pompe qui nécessite un apport électrique. Le transfert inverse de la solution appauvrie du bouilleur vers l'absorbeur s'effectue naturellement grâce au gradient de pression.

On dispose d'un échangeur sur le circuit des solutions: la solution pauvre sortant du bouilleur s'y refroidit en échauffant la solution riche sortant de l'absorbeur.

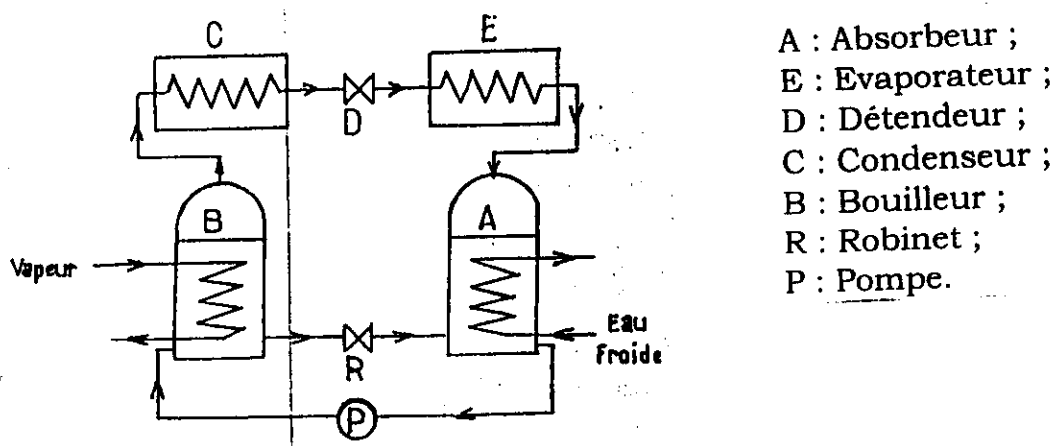


Figure 2: Schéma de principe d'un système frigorifique à absorption continue

c) - Systèmes frigorifiques à éjection

Le principe de fonctionnement est décrit par la figure 3. Les machines frigorifiques à éjection ne sont pas très répandues. Le compresseur du cycle à compression est remplacé par un éjecteur. Il est alimenté en vapeur vive, de même nature que le frigorigène, issues du bouilleur. Cette vapeur entraîne, par induction, les vapeurs issues de l'évaporateur. Les deux vapeurs sont liquéfiées dans le condenseur. A la sortie de ce dernier, une fraction du liquide est détendue et évaporée alors que l'autre fraction, remontée en pression à l'aide d'une pompe nécessitant un apport électrique parvient au bouilleur. La pression qui règne dans le bouilleur étant supérieure à la pression de condensation.

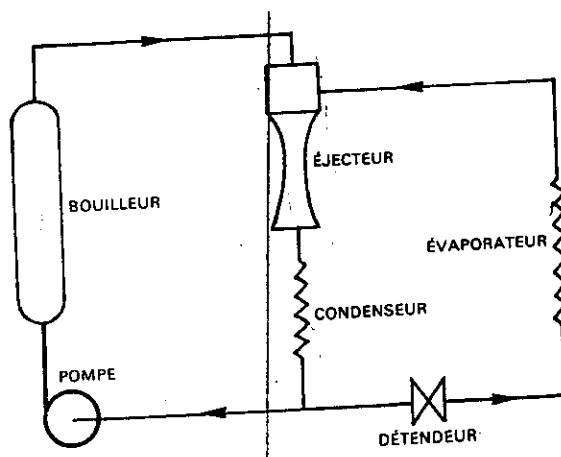


Figure 3: Schéma de principe des systèmes frigorifiques à éjection

d) - Systèmes frigorifiques thermoélectriques

Le principe de fonctionnement est décrit par la **figure 4**. Leurs usages restent marginaux. Ces machines fonctionnent grâce à l'effet PELTIER. Lorsqu'on fait passer un courant continu dans une chaîne hétérogène constituée de deux semi-conducteurs différents, N,P,N,P, associés en série par des ponts de cuivre, on constate que les liaisons N-P se refroidissent en absorbant de la chaleur, et que les liaisons P-N s'échauffent en dégageant de la chaleur. Cet effet permet donc de réaliser un petit système frigorifique. Le procédé est techniquement séduisant, lié à l'utilisation du rayonnement solaire; mais le prix du froid produit par ce système est prohibitif. Notons qu'un tel procédé n'est utilisable que pour des machines de très faibles puissances frigorifiques (quelques watts à quelques dizaines de watts frigorifiques).

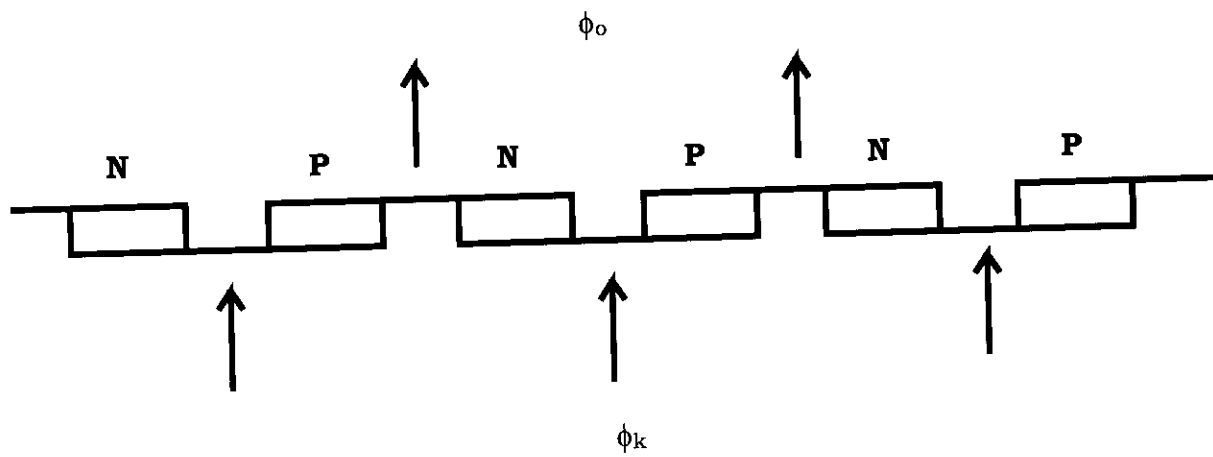
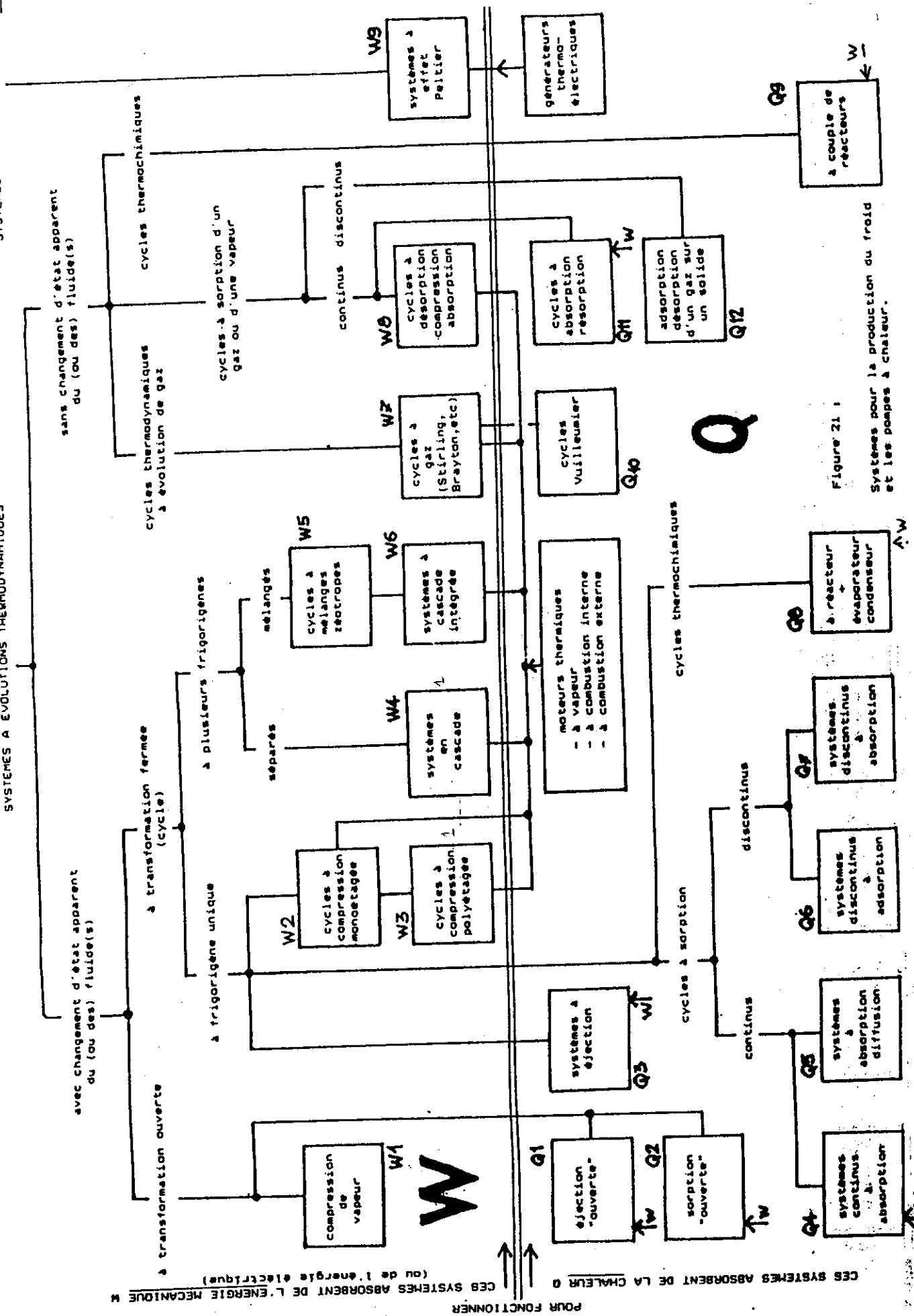


Figure 4: Schéma de principe des systèmes frigorifiques thermoélectriques



POUR FONCTIONNER
 CES SYSTEMES ABSORBENT DE LA CHALEUR Q
 (ou de l'énergie électrique)
 (ou de l'énergie électrique)

Figure 21 :

Systemes pour la production du froid et les pompes à chaleur.

I.2. UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE POUR L'ALIMENTATION DES MACHINES FRIGORIFIQUES

I.2.1. Gisement solaire

Le soleil, sphère de rayon 7.10^8 m et de masse 2.10^{30} Kg est à l'origine, directement ou indirectement, de plusieurs formes d'énergies disponibles sur terre. Il nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique - de même nature que les ondes hertziennes, mais de longueur d'ondes plus courtes - à travers quelques 150.000 Km d'espace.

L'énergie véhiculée par le rayonnement solaire dans l'espace est d'environ $1,4 \text{ KW/m}^2$, ce qui représente en 24 heures 32,5 Kwh. Ce rayonnement parvient à l'atmosphère terrestre à une température voisine de 5800°C . Une partie de l'énergie y est absorbée, ce qui ramène la quantité d'énergie disponible à 1KW/m^2 au plus. Cette valeur varie très peu d'un endroit à l'autre et dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels on peut citer: la localisation géographique, l'heure, la saison, l'altitude, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité, etc.).

Au niveau du sol, une surface plane d'inclinaison quelconque reçoit trois types de rayonnement:

- le rayonnement direct, qui est l'énergie provenant directement du soleil (le reste de la voûte céleste n'est pas pris en compte);
- le rayonnement diffus, qui est l'énergie provenant de la voûte céleste;
- le rayonnement global, qui est la somme des deux précédents.

Le rayonnement solaire apparaît ici comme une source d'énergie particulièrement favorable, puisque plus abondante dans les régions où les besoins en froid sont plus grands.

L'utilisation de l'énergie solaire est à priori intéressante dans la zone intertropicale. Dans cette zone, la moyenne annuelle d'insolation correspond à plus de $5000 \text{ Kcal/m}^2/\text{j}$, soit environ $5.8 \text{ KWh/m}^2/\text{j}$.

Au BURKINA FASO, on reçoit sur un capteur plan horizontal, un rayonnement d'environ 600 W/m^2 .

1.2.2. Captation de l'énergie solaire

On distingue plusieurs procédés pour capter l'énergie solaire (voir **annexe 3**).

♦ Les capteurs purement thermiques :

Les capteurs plans :

Ils utilisent les rayonnements directs et diffus et peuvent donc fonctionner par ciel clair. Pour capturer de l'énergie il suffit de placer sur le toit, dans le jardin ou sur une terrasse quelques mètres carrés de ces capteurs. Le capteur plan est une petite serre qui renferme un échangeur plan dans lequel l'eau circule et se réchauffe. Les conduites où l'eau se réchauffe sont fixées au dos d'une plaque de couleur noire qui absorbe de l'énergie solaire. Le fond et les côtés sont garnis d'isolants pour éviter les pertes de chaleur. Une vitre est placée au-dessus du capteur pour "piéger" les rayons solaires comme une serre. Cependant, ils ne permettent pas pratiquement d'obtenir une température dépassant 100°C.

Les capteurs à concentration :

Ce sont des capteurs qui font appel à la concentration optique du soleil au moyen des miroirs. Ces miroirs de forme cylindro-paraboliques ou paraboliques permettent d'obtenir des températures beaucoup plus élevées. Ils utilisent uniquement les rayonnements directs, ce qui limite leur implantation à des régions comportant une très forte proportion de jours clairs. Ils nécessitent une orientation précise dans la direction du soleil et sont considérablement plus coûteux.

Les capteurs thermoélectriques :

Ils fournissent directement de l'énergie électrique avec une efficacité très faible. Ce sont des capteurs capables de produire de l'énergie électrique par effet SEEBECK lorsqu'on chauffe par rayonnement solaire une de leur face et que l'on refroidit l'autre.

Il existe en général deux grandes variétés de capteurs thermiques: les capteurs plans et les capteurs à concentration, dont les critères de choix peuvent se résumer dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1: Critère de choix entre capteurs plan et à concentration

CRITERES	CAPTEUR PLAN	CAPTEUR A CONCENTRATION
Utilisation des rayonnements direct et diffus	Oui	Non Ne fonctionne qu'avec le rayonnement direct.
Rendement énergétique	Bon à basse ou moyenne température, mauvais au delà de 100°C.	Bon à haute température.
Facilité d'utilisation	Excellente.	Médiocre, il faut suivre en permanence l'image du soleil. Le système est nettement plus complexe.
Entretien	Faible.	Important (miroirs, mécanisme d'orientation, etc.).
Durée de vie	Elevée.	Incertaine, les miroirs vieillissent assez mal, les mécanismes se détériorent.
Nécessité de personnel	Non.	Oui, pour l'orientation continue si orientation manuelle.
Coût d'investissement	Moyen.	Très élevé.

Les cellules photovoltaïques : encore appelées photopiles, transforment directement l'énergie fournie par le soleil sous forme de lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque est un composant électronique à base de matériau semi-conducteur. Lorsque les particules de lumière, appelées photons, frappent ce matériau, il se crée un champ électrique qui produit deux types de charges: positives et négatives. Elles sont séparées et collectées sur les faces avant et arrière de la cellule photovoltaïque qui se comporte alors comme un générateur de courant continu.

Le semi-conducteur (cellule photovoltaïque) actuellement le plus utilisé est à base de silicium (Si) que nous trouvons en grande quantité dans le sable.

♦ La biomasse :

Contrairement aux autres modes de captation, l'énergie de la biomasse existe sous forme stockée : les tissus végétaux, par la photosynthèse, stockent l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique ; cette énergie peut être récupérée en utilisant les trois voies suivantes : Photosynthèse + combustion directe, Photosynthèse + fermentation méthanique, Photosynthèse + pyrolyse ou gazéification.

⇒ *La combustion directe* ou oxydation complète se fait dans une chaudière.

⇒ *La fermentation méthanique* résulte de la filière énergétique suivante :

1. production par photosynthèse de matière végétale, dans laquelle l'énergie solaire se trouve accumulée sous forme chimique ;
2. récolte de cette matière, transport et conservation, généralement à l'état sec, pour son utilisation ultérieure ;
3. transformation partielle de cette matière en combustible (gaz) par des voies biologiques (fermentation méthanique).

La production de gaz se fait à l'aide d'un digesteur, qui est une cuve gazomètre, constituée par une fosse (construite en pierres, en moellons, béton ou même en briques d'argile non cuites recouvertes d'un enduit de ciment sur l'intérieur) fermée par une cloche à gaz en tôle.

⇒ *La gazéification* est une combustion incomplète, dans un gazogène où l'on produit un gaz pauvre (CO, H₂, CO₂, H₂O, N₂, ...)

⇒ *La pyrolyse* ou carbonisation, est une décomposition à la chaleur à l'abri de l'oxygène. Un four de carbonisation conduit à la production de carbone (30% en poids de Matière Sèche : MS), de pyroligneux liquide (50% de la MS) et d'un gaz pauvre (20% de la MS).

1.2.3. Technologies de production de froid par voie solaire

Nous présenterons ci-dessous la possibilité d'utiliser l'énergie solaire pour l'alimentation de chacun des systèmes frigorifiques décrits plus haut .

L'utilisation de l'énergie solaire pour l'alimentation des machines frigorifiques peut être obtenue à partir de plusieurs procédés:

a) - Energie solaire et machine frigorifique à compression mécanique

On peut produire de l'énergie mécanique par une machine thermique à vapeur dont le collecteur est la source chaude ou de l'énergie électrique par une centrale solaire et entraîner le compresseur d'une machine frigorifique à compression.

b) - Energie solaire et machine frigorifique à absorption

Ce système se prête beaucoup mieux à utiliser de l'énergie solaire, puisque c'est directement de la chaleur qui est nécessaire au bouilleur de la machine. Les machines les plus employées sont de type ammoniac - eau et eau - bromure de lithium.

c) - Energie solaire et machine frigorifique à éjection

Au moyen des collecteurs plans, on pourrait produire efficacement du froid. Ce système existe encore sous forme de prototype.

d) - Energie solaire et machine frigorifique thermoélectrique

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique se fait soit à l'aide des thermocouples (rendement faible), soit à l'aide de cellules photoélectriques. Les cellules photoélectriques utilisant le silicium pur, permettent un rendement compris entre 10 et 15%. On peut coupler ces photopiles avec des éléments thermoélectriques produisant du froid par effet PELTIER. Le procédé est techniquement, extrêmement séduisant par sa simplicité. Mais le froid produit par ce système est assez coûteux.

On distingue plusieurs filières de production de froid par voie solaire dont les plus courants sont :

1.2.3.1. Systèmes consommant de l'énergie mécanique ou électrique

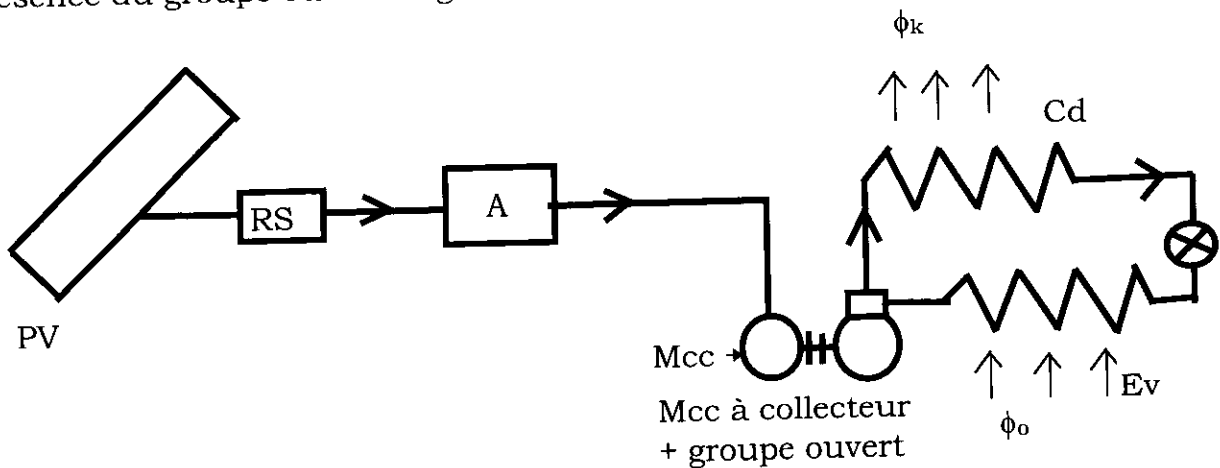
1) - Filière photovoltaïque + machine à compression

Cette filière est assez simple, assez performante, a une longévité assurée, son matériel est de petites dimensions. On rejette peu de chaleur dans l'ambiance à T_k (température de condensation), ce qui réduit le problème de cette évacuation. La production de l'énergie motrice grâce à des photopiles conduit à des rendements de l'ordre de 10%. Les modes de

stockage de froid (stockage aval) par chaleur sensible (eau glacée) ou chaleur latente (formation de glace) sont tous deux possibles. Par contre, les prix actuels très élevés des photopiles, réservent cette filière aux systèmes de petites tailles (conservation des vaccins par exemple). L'accumulateur amont de type électrique (batteries) conduit à le limiter et à accroître l'importance du stockage froid. Ce qui augmente l'importance du groupe frigorifique. Cette filière comprend trois sous filières :

Filière 1.1: moteur à courant continu à collecteur + groupe ouvert

Les moteurs à collecteur peuvent se trouver aisément, mais la présence du groupe ouvert exige une surveillance des fuites.

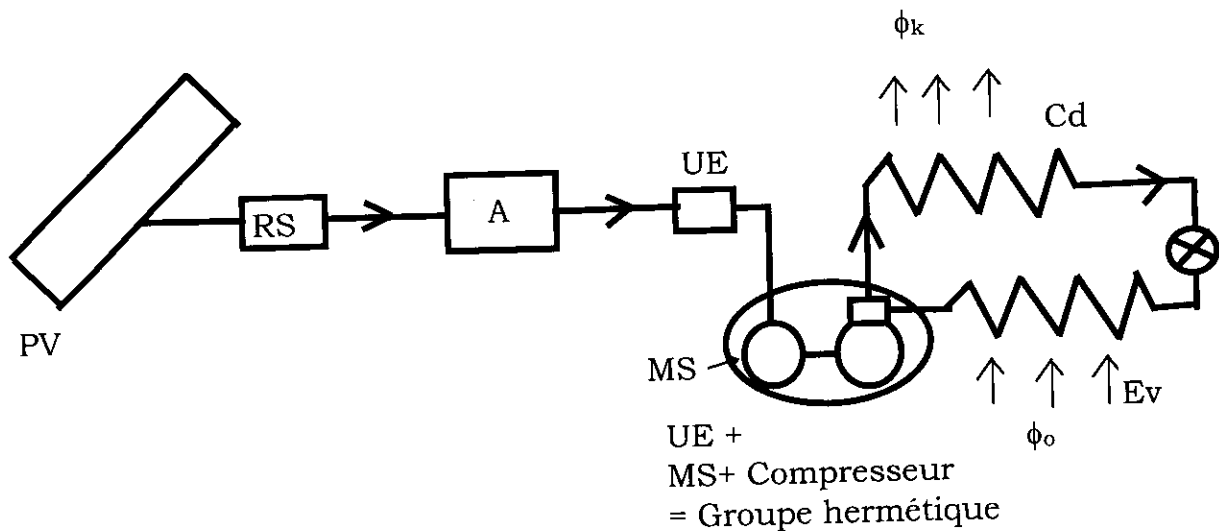


- PV = Cellules photovoltaïques
- RS = Régulation Sécurité
- A = Accumulateur
- Mcc = Moteur à courant continu
- Cd = Condenseur
- Ev = Evaporateur
- ϕ_k = puissance calorifique au condenseur
- ϕ_o = puissance frigorifique de la machine

Figure 6 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.1)

Filière 1.2: groupe hermétique (unité électronique + moteur spécial + compresseur)

Le groupe frigorifique n'est pas classique et ne se trouve pas facilement. Le choix des groupes à moteurs spéciaux est extrêmement réduit et limité aux petites puissances.



- PV = cellules photovoltaïques
- RS = Régulation Sécurité
- A = Accumulateur
- UE = Unité Electronique
- MS = Moteur Spécial
- Cd = Condenseur
- Ev = Evaporateur
- ϕ_k = puissance calorifique au condenseur
- ϕ_o = puissance frigorifique à l'évaporateur

Figure 7 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.2)

Filière 1.3: groupe hermétique (onduleur + moteur asynchrone + compresseur)

Le groupe frigorifique est classique et bien connu, mais la présence de l'onduleur permet un courant de démarrage qui est assez conséquent.

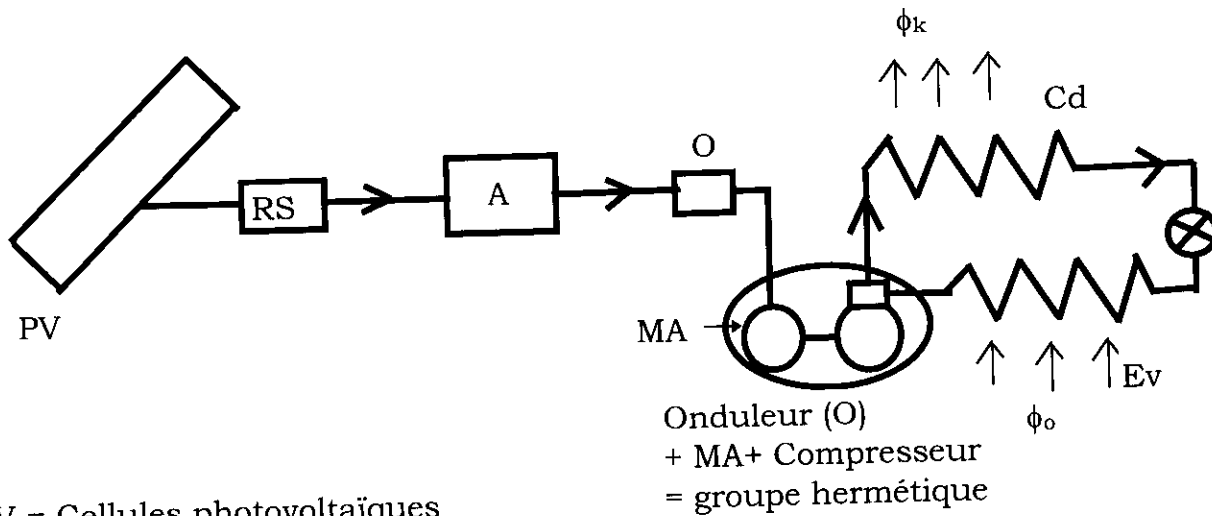


Figure 8 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.3)

2) - Filière thermodynamique (capteur thermique + moteur thermique + cycle à compression)

Cette filière utilise des machines thermiques d'une part pour produire de l'énergie mécanique avec des rendements pratiques relativement bas (voie solaire): $COP < 0.20$. Un bon accouplement avec un alternateur produit une puissance électrique utilisable par une machine frigorifique classique à compression; ce type de machine est très au point. Son COP pratique propre est souvent supérieur à 3.5. Elle comprend deux sous filières:

Filière 2.1: moteur et compresseur séparés: fluides actifs différents. Ce système est complexe, ce qui demande beaucoup d'entretien. Par contre, l'énergie mécanique supplémentaire est possible et on peut utiliser les fluides actifs les mieux adaptés aux régimes thermiques du moteur, d'une part, et du compresseur d'autre part.

Pour ce système, les arbres du moteur et du compresseur étant accessibles, on peut y relier un alternateur pour une production d'énergie mécanique ou un moteur électrique de secours.

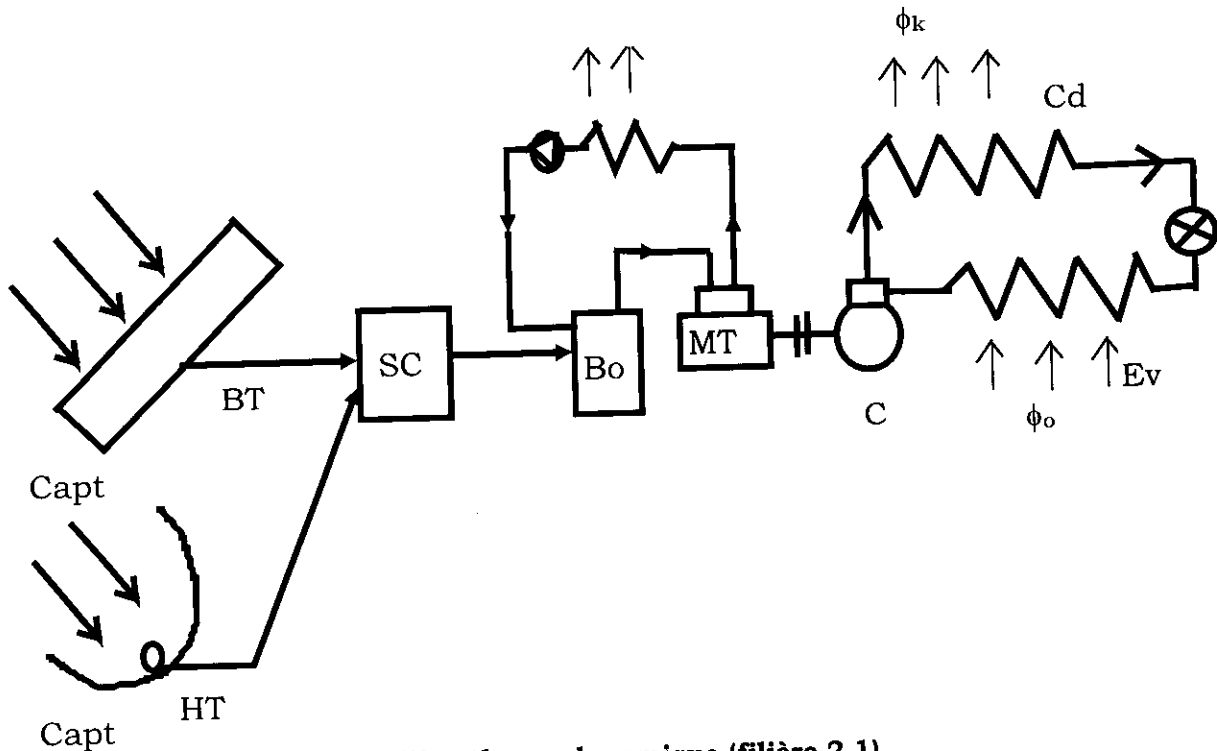


Figure 9 Schéma de principe filière thermodynamique (filière 2.1)

Filière 2.2: moteur thermique et compresseur monobloc: même fluide actif pour les circuits moteur et frigorifique qui doit résulter d'un compromis. Par contre, le système monobloc peut être robuste et fiable.

Pour ce système, le condenseur est commun au ϕ_k moteur et au circuit frigorifique.

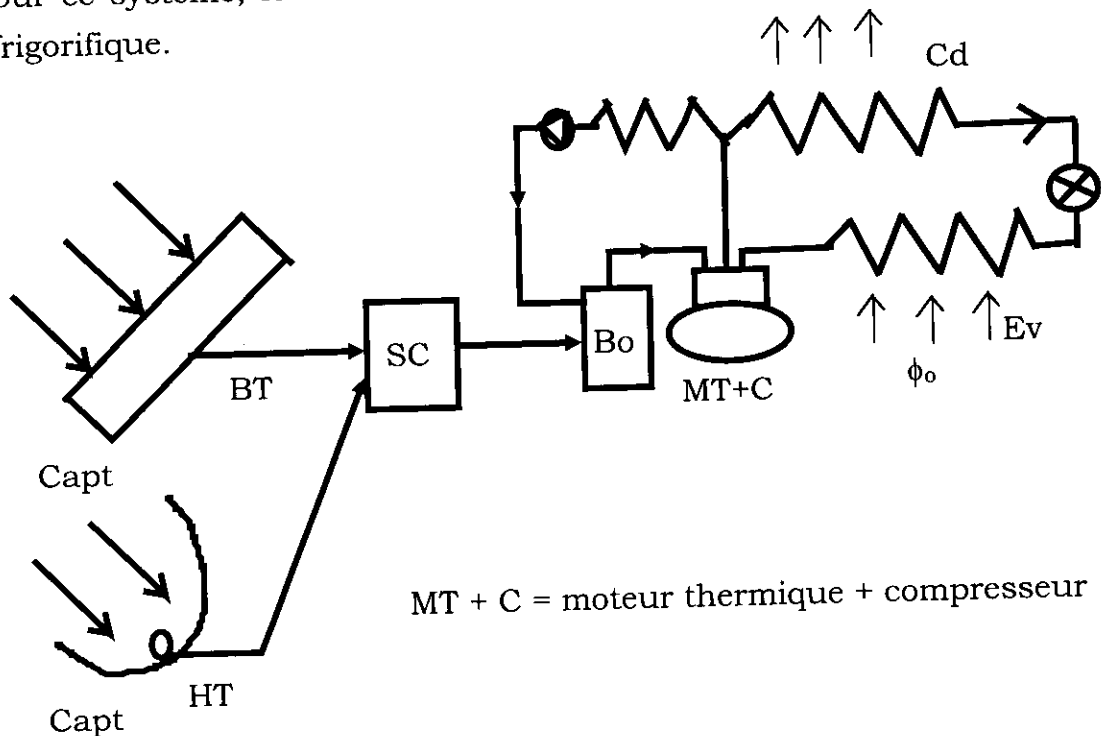
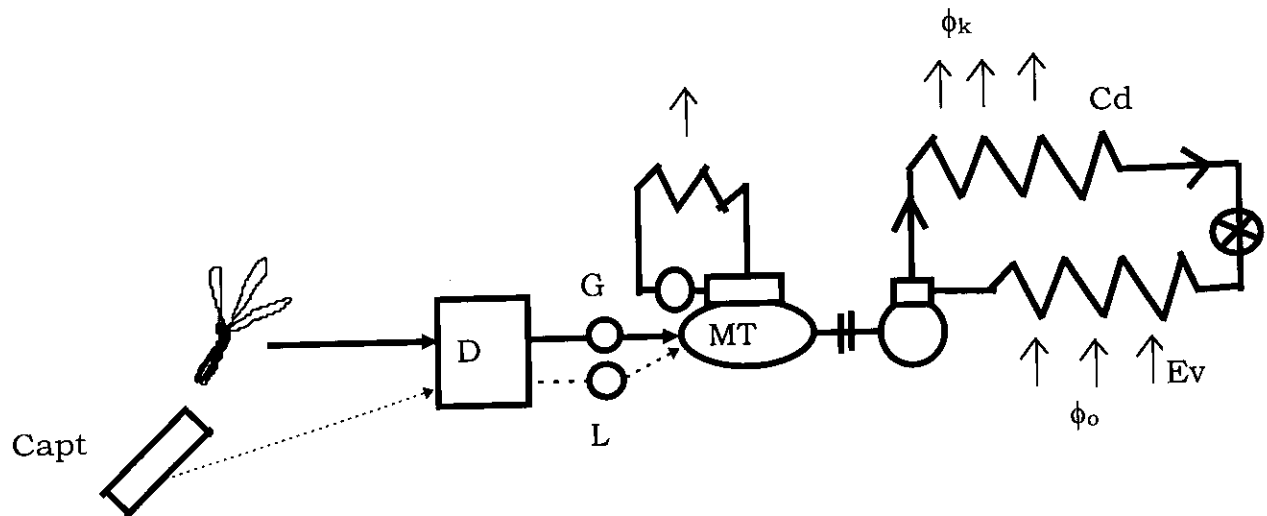


Figure 10 Schéma de principe filière thermodynamique (filière 2.2)

Pour les deux systèmes, les capteurs thermiques peuvent être avec ou sans concentration. Les capteurs sans concentration sont fixes, fiables et peu coûteux. Les deux modes de stockage de froid (eau glacée ou glace) sont possibles. Par contre, il y a un gros dégagement de chaleur vers l'ambiance. Le refroidissement par l'eau du condenseur s'impose. Le moteur thermique n'existe pas encore dans le commerce. Les deux systèmes requièrent de l'énergie mécanique pour la pompe alimentaire du cycle moteur. Il faut chercher à ce que le moteur entraîne la pompe.

3) - Filière biomasse + machines à compression

Cette filière nécessite l'évacuation, dans l'ambiance d'une puissance thermique très grande. Par contre, comme le moteur thermique fonctionne à température élevée, ce rejet ne pose aucun problème. Ici, le coefficient de performance solaire n'a aucun sens, il faut se préoccuper uniquement de la puissance frigorifique à produire grâce à la biomasse disponible.



- Capt = Capteur plan basse tension
- MT = Moteur Thermique
- D = digesteur
- Cd = Condenseur
- Ev = Evaporateur
- ϕ_k = puissance calorifique au condenseur
- ϕ_o = puissance frigorifique à l'évaporateur
- G = gaz
- L = liquide

Figure 11: Schéma de principe filière biomasse - machine à compression

4) - Filière générateur thermoélectrique + machines à effet PELTIER

Cette filière est assez simple techniquement. Toutefois, une efficacité insuffisante pour concurrencer valablement les systèmes à compression les tient en dehors des applications courantes. Leurs usages restent donc marginaux.

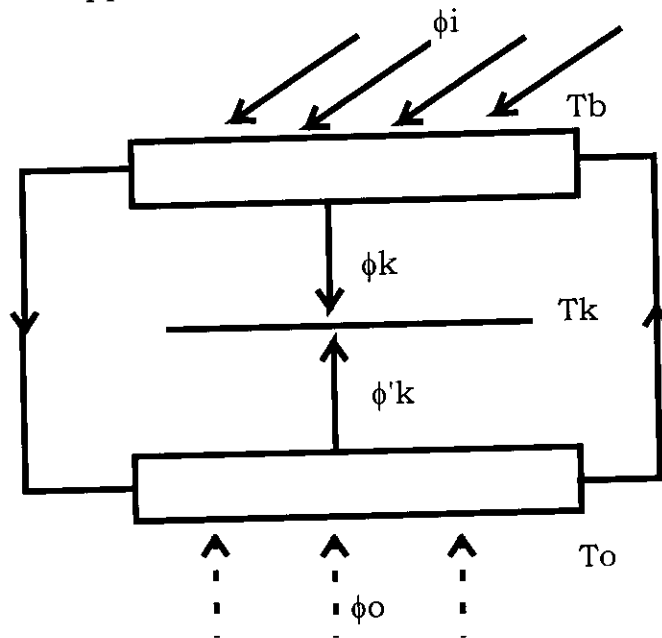


Figure 12: Schéma de principe filière générateur thermoélectrique - module de PELTIER

1.2.3.2. Systemes consommant de l'énergie calorifique

5) - Filière biomasse + machine à absorption

Cette filière nécessite vers l'ambiance, l'évacuation d'une forte puissance calorifique, malheureusement au condenseur et à l'absorbeur du système à absorption qui doit être la plus basse possible. Le stockage amont est indispensable. Les digesteurs posent souvent des problèmes thermiques, d'où l'utilisation des capteurs thermiques basse température. Le stockage de froid par la glace est impossible avec eau - bromure de lithium.

Par contre, le matériel de production de froid par absorption est classique avec eau - bromure de lithium. De même, l'appoint en combustible est facile et le stockage de froid par eau glacée est toujours possible.

Il est à noter que le coefficient de performance frigorifique solaire n'a pas de sens ici. Il faut cependant se préoccuper de la puissance frigorifique à produire avec la biomasse disponible.

Cette filière est réservée particulièrement à la climatisation.

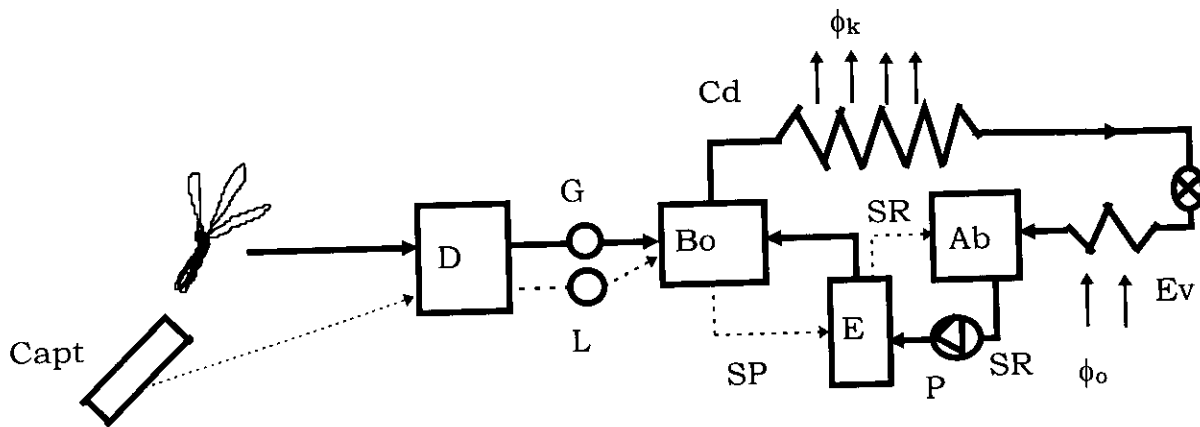


Figure 13: Schéma de principe de la filière biomasse - machine à absorption

6) - Filière capteur thermique + machines à éjection

Elle est relativement difficile à mettre en oeuvre de manière efficace en raison des problèmes que pose la réalisation d'éjecteurs performants. Il conduit généralement à des pressions élevées dans la chaudière où la température est élevée.

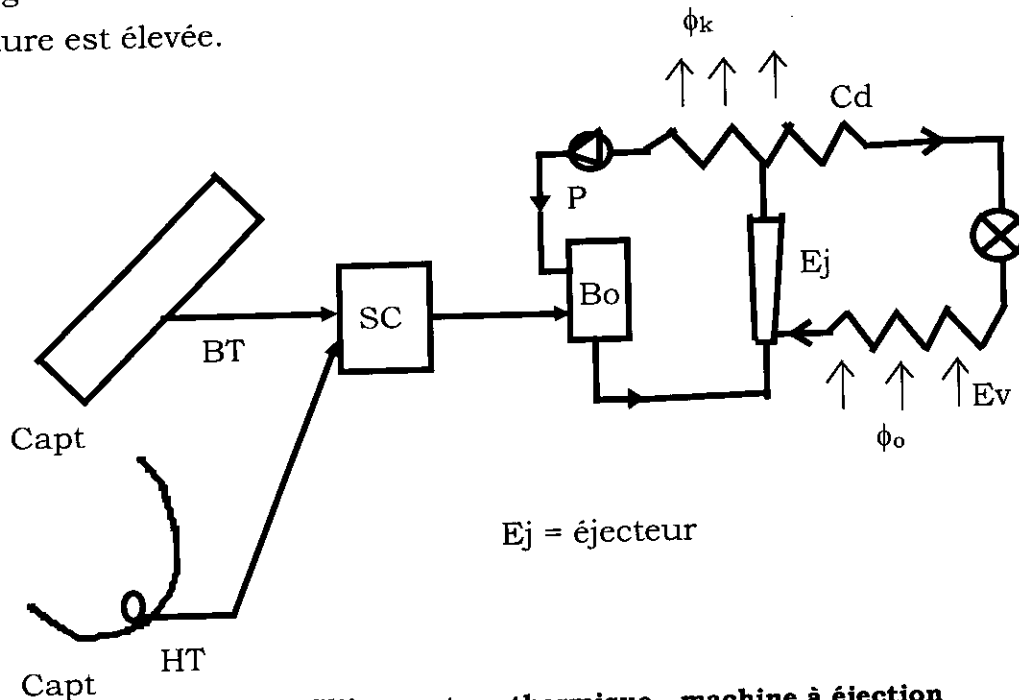


Figure 14: Schéma de principe filière capteur thermique - machine à éjection

7) - Filière capteur thermique + machines à absorption continue

C'est la filière la plus exploitée pour l'utilisation pratique de l'énergie thermique d'origine solaire à des fins de climatisation. La production de froid est assurée par deux couples frigorigène(F) - absorbant(A): eau(F) - bromure de lithium(A) et ammoniac(F) - eau(A). Le cycle à absorption est tritherme et dibare.

8) - Filière capteur thermique + machine à sorption intermittente

Cette filière peut mettre en oeuvre un couple frigorigène absorbant - liquide ou un couple frigorigène adsorbant - solide. Le capteur solaire est alimenté aussi de façon intermittente (discontinue), ce qui lui permet de jouer alternativement le rôle de générateur et d'absorbeur.

Le fonctionnement du système comprend deux phases bien distinctes.

Pendant la première phase, l'évaporateur contient du fluide réfrigérant pur ou très concentré. Si le capteur est alors froid et contient une solution de fluide absorbeur pauvre en réfrigérant, ce dernier s'évapore de l'évaporateur pour se condenser dans l'absorbeur. Mais comme le mélange des deux corps est exothermique, la chaleur d'absorption est supérieure à la chaleur d'évaporation; elle doit être évacuée par le capteur, qu'il faut concevoir pour qu'il assure correctement cette évacuation, sans chute thermique excessive.

Pendant la deuxième phase, l'absorbeur que contient le capteur solaire est chauffé et joue alors le rôle du générateur du cycle précédent. La vapeur de réfrigérant quittant le générateur est dirigée vers le condenseur, qui a pour rôle d'évacuer à l'extérieur la chaleur de condensation de cette vapeur pur ou très concentrée; Le liquide produit est alors introduit dans l'évaporateur, et le cycle peut recommencer.

*Apport de chaleur
(intermittent)*

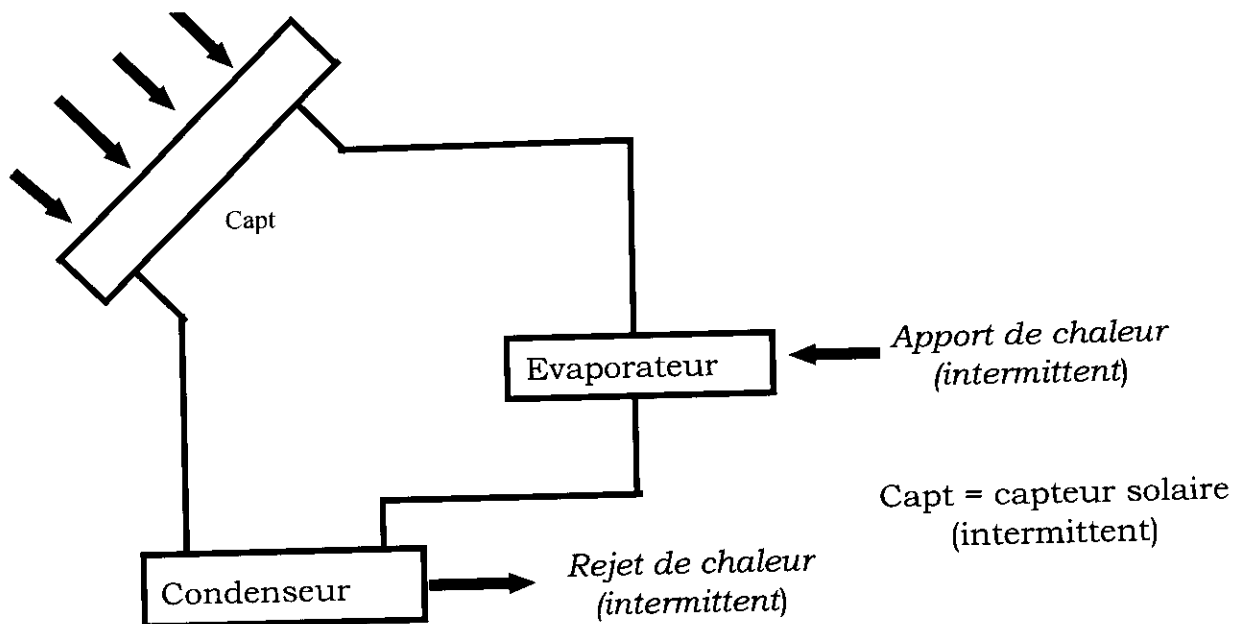


Figure 15: Schéma de principe filière à sorption intermittente

9) - Filière capteur thermique + machine à sorption en cycle ouvert

Cette filière utilise l'eau comme fluide frigorigène. La production de froid est assurée par la vaporisation directe d'eau dans l'air à refroidir. Lorsque l'air extérieur est chaud et sec cela ne pose aucun problème et l'effet frigorifique est important. Mais si l'air est chaud et humide, il faut d'abord l'assécher en le mettant en contact avec un milieu absorbant (ou adsorbant) l'humidité atmosphérique, puis le refroidir jusqu'à la température ambiante avant de le refroidir enfin, comme précédemment par vaporisation directe d'eau. L'ensemble de ces cycles se déroulent à la pression atmosphérique. La désorption de l'eau fixée par l'absorbant (ou adsorbant), s'effectue par chauffage solaire. Cette filière réservée surtout à la climatisation.

La **figure 16** ci-dessous donne une vue récapitulative des différentes filières de production de froid par voie solaire

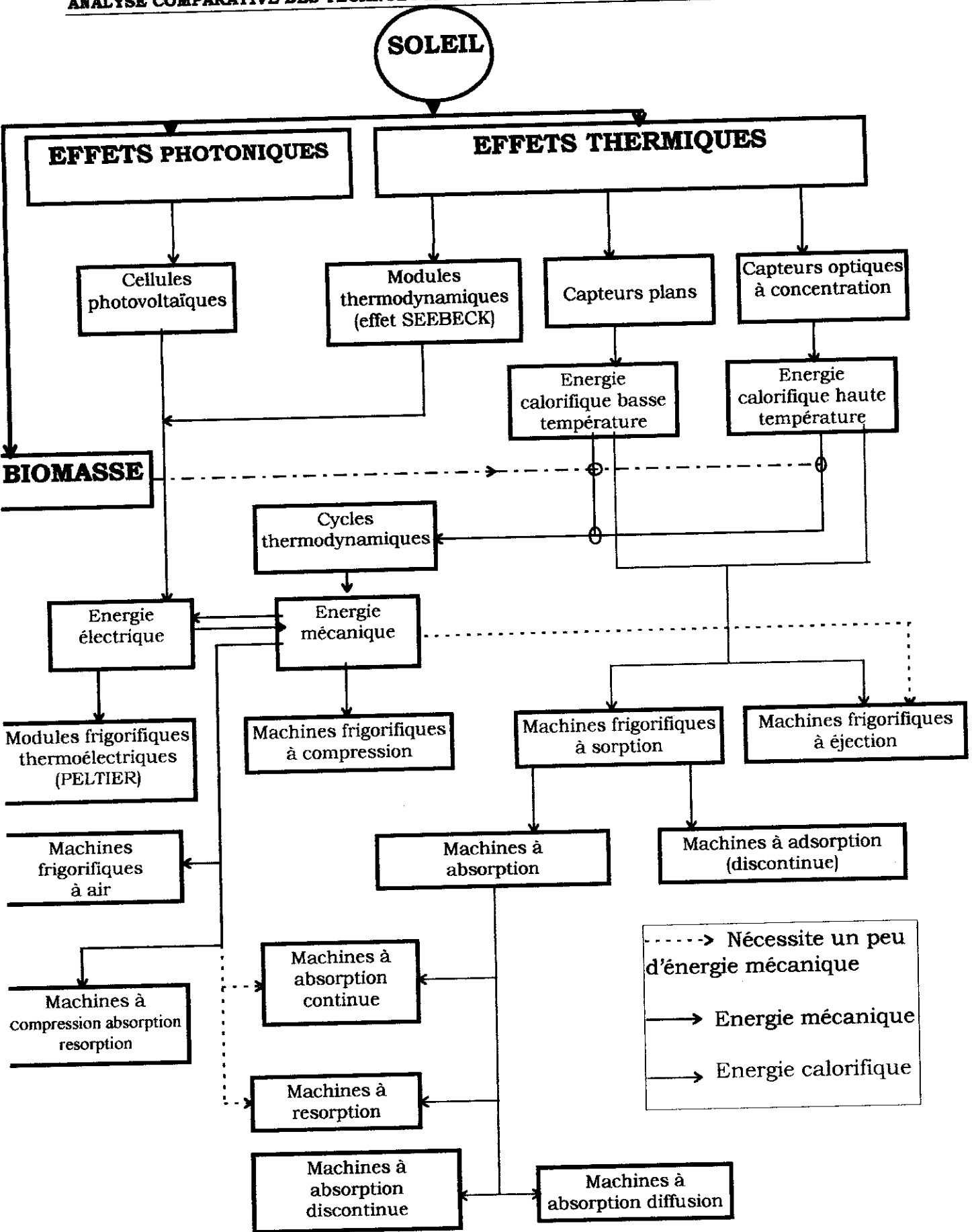


Figure 16: Organigramme des différentes filières de production de froid par voie solaire (d'après M. DUMINIL)

II. ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

Après avoir présenté les différentes technologies de production de froid par voie solaire, nous allons les comparer entre elles et faire ressortir celles qui conviennent mieux aux pays chauds africains.

II.1. ANALYSE COMPARATIVE

Pour comparer ces technologies, nous nous limiterons à situer ces technologies à la lumière de quelques critères. Le **tableau 2** ci-dessous donne une vue récapitulative des différentes filières.

De tous ces systèmes, seules les machines frigorifiques à compression mécanique et à absorption sont les plus performantes et les plus utilisées. Nous donnerons ci-dessous une idée sur leurs coefficients de performance respectifs. Une machine frigorifique est d'autant plus performante qu'elle réclame moins d'énergie pour son fonctionnement.

◆ Machines frigorifiques à compression mécanique

Le coefficient de performance de ces machines est le rapport de la puissance frigorifique à la puissance absorbée par le compresseur.

$$COP_{réel} = \frac{\phi_o}{P_{abs}}$$

$$COP_{théorique} = \frac{T_o}{T_k - T_o}$$

Avec T_o = température d'évaporation;

T_k = température de condensation;

ϕ_o = puissance frigorifique de la machine;

ϕ_k = puissance absorbée par le compresseur.

Le $COP_{réel}$ des machines frigorifiques à compression varie entre 2 et 4.

Le coefficient théorique tourne autour de 5.

◆ Machines frigorifiques à absorption

Le coefficient de performance frigorifique de ces machines est le rapport de la chaleur prélevée à l'espace à refroidir à la quantité de chaleur fournie par le réservoir chaud.

$$COP_{réel} = \frac{\phi_o}{\phi_B}$$

$$COP_{théorique} = \frac{T_o}{T_k - T_o} \times \frac{T_M - T_k}{T_M}$$

- Avec T_o = température d'évaporation;
 T_k = température de condensation;
 T_M = température du générateur;
 ϕ_o = puissance frigorifique de la machine;
 ϕ_B = chaleur fournie par le générateur.

Le $COP_{réel}$ des machines frigorifiques à absorption varie entre 0.2 et 1.
Le coefficient théorique tourne autour de 1.5.

Tableau 2: Analyse comparative des différentes filières

N°	Stockage amont	Stockage aval	Avantages filière	Inconvénients filière	Applications privilégiées	COP machine	COP solaire
1	Accumulateur (batterie) Apport en combustible		<ul style="list-style-type: none"> assez simple assez performante rejet de peu de chaleur dans l'ambiance à T_k les 2 modes de stockage froid sont possibles 	<ul style="list-style-type: none"> capteur très cher accumulateur amont de type électrique 	<ul style="list-style-type: none"> réfrigération climatisation procédés industriels 	entre 2 et 4	
1.1		<ul style="list-style-type: none"> glace eau glacée 	Idem que 1	<ul style="list-style-type: none"> Idem que 1 + groupe ouvert : surveillance des fuites 			
1.2		<ul style="list-style-type: none"> glace eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> Idem que 1 + groupes classiques 	<ul style="list-style-type: none"> Idem que 1 + moteurs spéciaux, limités aux petites puissances 			
1.3		<ul style="list-style-type: none"> glace eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> Idem que 1 + groupes classiques 	<ul style="list-style-type: none"> Idem que 1 + l'onduleur doit permettre le courant de 			

ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

				<p>démarrage. Il est assez conséquent</p>				
2	Stockage chaud + Apport en combustible		matériel classique apport en combustible facile	<ul style="list-style-type: none"> • stockage amont indispensable • nécessité de l'énergie mécanique pour le fonctionnement de la pompe • gros dégagement de chaleur vers l'ambiance à T_k 		<ul style="list-style-type: none"> • climatisation • réfrigération • Procédés industriels 	0.2 et 1	
2.1	. glace . eau glacée		<ul style="list-style-type: none"> • Idem que 2 + • énergie mécanique supplémentaire possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem que 2 + • système complexe, problèmes d'entretien • fuites possibles au niveau des joints rotatifs du compresseur et du moteur 				

ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

2.2		<ul style="list-style-type: none"> . glace . eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem que 2 + • moteur monobloc robuste et fiable 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem + que 2 + • le système renferme le fluide actif qui résulte d'un compromis 			
3	Digesteur = Appoint en combustible	<ul style="list-style-type: none"> . glace . eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> • appoint facile • production complémentaire d'énergie électrique possible • matériel assez classique 	<ul style="list-style-type: none"> • filière assez complexe • problème thermique qu'impose le bon fonctionnement des digesteur • nécessite souvent les capteurs plans • stockages amont indispensables 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation • réfrigération • Procédés industriels 	entre 2 et 4	de pas sens
4	Appoint en combustible	<ul style="list-style-type: none"> . glace . eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> • simple • pas besoin d'énergie mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> • efficacité insuffisante • encore à l'état de prototype 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation 		
5	Digesteur = Appoint en combustible	<ul style="list-style-type: none"> . eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> • matériel classique • appoint en combustible facile • stockage de froid par 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem que 4 + • gros rejet de chaleur à T_k • stockage de froid 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation 		de pas sens

ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

		eau glacée possible	par impossible de glace nécessite de l'énergie mécanique pour le fonctionnement de la pompe			
6	Stockage chaud + Apport en combustible	<ul style="list-style-type: none"> • glace • eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> • système assez simple et statique exception faite de la pompe alimentant le bouilleur • entretien limité • appoint en combustible facile • stockage de froid possible 	<ul style="list-style-type: none"> • très gros dégagement de chaleur à T_k • système à un seul fluide actif qui doit résulter d'un compromis • nécessite un peu d'énergie mécanique pour la pompe 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation • Procédés industriels 	
7	Stockage chaud + Apport en combustible	<ul style="list-style-type: none"> • glace • eau glacée 	<ul style="list-style-type: none"> • entretien modéré • appoint en combustible facile • stockage de froid possible (eau glacée) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gros rejet de chaleur à T_k • nécessite un peu d'énergie mécanique pour la pompe • faible coefficient 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation • réfrigération • Procédés industriels 	

ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

				de performance		
8	Appoint possible		<ul style="list-style-type: none"> • système parfaitement simple et entièrement statique • apport thermique possible • pas besoin d'énergie mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> • encore à l'état de prototype • poids élevé d'absorbant possible • problème de stockage de froid 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation • réfrigération 	
9	Stockage chaud + Apport en combustible	. eau glacée	<ul style="list-style-type: none"> • technologie simple • accumulation possible de froid dans la maçonnerie du local • bonne synergie entre besoins en froid et production 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessite de l'énergie mécanique • consomme de l'eau • encombrant • entretien assez important 	<ul style="list-style-type: none"> • climatisation 	

Nous avons passé en revue les différentes technologies de production de froid par voie solaire. Les techniques de réfrigération solaire pouvant être appliquées économiquement en Afrique doivent répondre aux conditions suivantes:

- ◆ Le matériel doit être simple et peu coûteux, de façon qu'il puisse être fabriqué dans les pays en question avec les matériaux et la main-d'oeuvre disponibles;
- ◆ Le matériel doit être acceptable du point de vue social et conformes aux habitudes de vie et de travail de la population;
- ◆ Aucune autre source d'énergie, ni aucun autre matériel ne doivent être nécessaire.

Nous pouvons donc dire que la filière photovoltaïque et la filière biomasse peuvent mieux fonctionner dans ces pays.

II.2. ETUDES DE CAS

Le problème de la conservation des vaccins et des denrées périssables conditionnent absolument l'existence des populations. Notre étude portera essentiellement sur ces deux applications.

II.2.1. Conservation des vaccins par le photovoltaïque

(Cf. **annexe 4**)

Pour prévoir un faible taux de mortalité, les meilleures conditions de vie pour les années à venir, l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) préconise de faire vacciner les populations, même des sites isolés, contre certaines maladies graves qui minent l'existence de l'homme. Pour être éradiquées, ces maladies doivent être suivies par des campagnes de vaccination bien programmées. Le problème de conservation de ces vaccins se pose, dans ces zones où la température diurne dépasse parfois 43°C. L'existence des réfrigérateurs mécaniques, couplés à des panneaux photovoltaïques, représente une solution possible à cette difficulté.

Supposons qu'on veule construire un centre de santé situé dans la périphérie de Ouagadougou, en vue d'y installer un réfrigérateur pour:

- ◆ stocker l'équivalent de 30 litres de vaccins;
- ◆ congeler quatre (4) accumulateurs de froid par jour.

La température ambiante maximale est de 41°C. En se référant aux données de l'OMS pour 43°C, le réfrigérateur adéquat a une consommation énergétique de 800 Wh/j.

Calcul des caractéristiques techniques de la chaîne de froid

Les grandeurs caractéristiques d'un système de réfrigération sont::

- ◆ la puissance crête du générateur photovoltaïque (Wc);
- ◆ l'énergie journalière consommée par le générateur (Wh/j), donnée pour différentes températures;
- ◆ le volume de stockage (en litres);
- ◆ la capacité à produire de la glace (nombre de kg/j);
- ◆ l'autonomie en cas d'absence de soleil (en jours);
- ◆ la température ambiante moyenne (en degré Celcius, °C);
- ◆ la tension d'alimentation (V);
- ◆ la capacité des batteries (Ah).

Besoins en énergie d'un réfrigérateur solaire

La consommation dépend du modèle de réfrigérateur ou du changement de la température extérieure (voir **annexe 4**). Le tableau ci-dessous apporte quelques informations:

Tableau 3: Consommation énergétique des réfrigérateurs

	capacité		quantité de glaces produite		énergie consommée	
	à + 4°C	à - 20°C	à 32 °C	à 43 °C	à 32 °C	à 43 °C
Réfrigéra- teur à vaccins	25 litres	-	-	2.4 kg/j	-	320 Wh/j
	38 litres	5 litres	6.2 kg/j	3.1 kg/j	700 Wh/j	1000 Wh/j
	50 litres	14 litres	4.8 kg/j	4.8 kg/j	1100 Wh/j	1500 Wh/j
	80 litres	20 litres	5.4 kg/j	5.2 kg/j	540* Wh/j	660* Wh/j

**La mesure de consommation pour ce modèle a été effectuée avec une production de 2.4 kg*