

# 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<sup>e</sup> 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 PELTIER .....18  
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 intermittente .....20  
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 solaire .....37

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Critère de choix entre capteurs plan et à concentration .....10  
Tableau 2: Analyse comparative des différentes filières .....25  
Tableau 3: Consommation énergétique des réfrigérateurs.....31  
Tableau 4: Coûts comparés réfrigérateurs .....37  
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 SOLAIRE .....2**

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 SOLAIRE .....23**

II.1. ANALYSE COMPARATIVE.....23  
II.2. ETUDES DE CAS .....30  
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 inventorié 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.

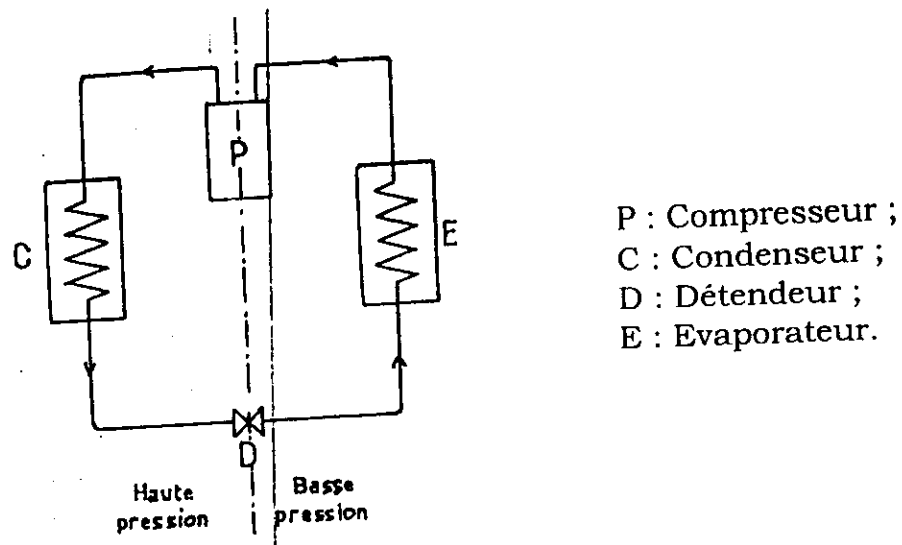
Les commentaires sur les différents systèmes de production de froid se trouvent en **annexe 2**.

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 :

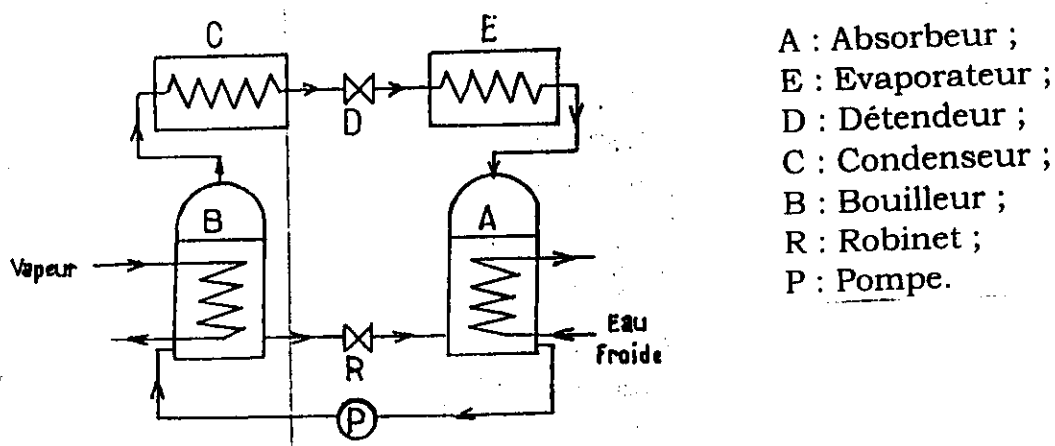
H<sub>2</sub>O - LiBr (eau - bromure de lithium) où l'eau est le fluide frigorigène ;  
 NH<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O (ammoniac - eau) où l'ammoniac est le fluide frigorigène.

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.

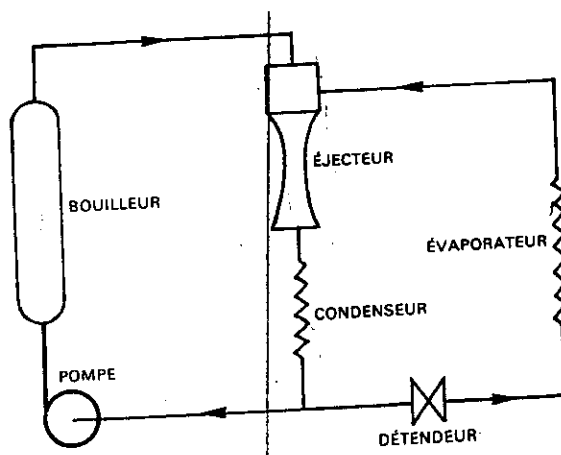
On dispose d'un échangeur sur le circuit des solutions: la solution pauvre sortant du bouilleur s'y refroidit en échauffant la solution riche sortant de l'absorbeur.



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

c) - Systèmes frigorifiques à éjection

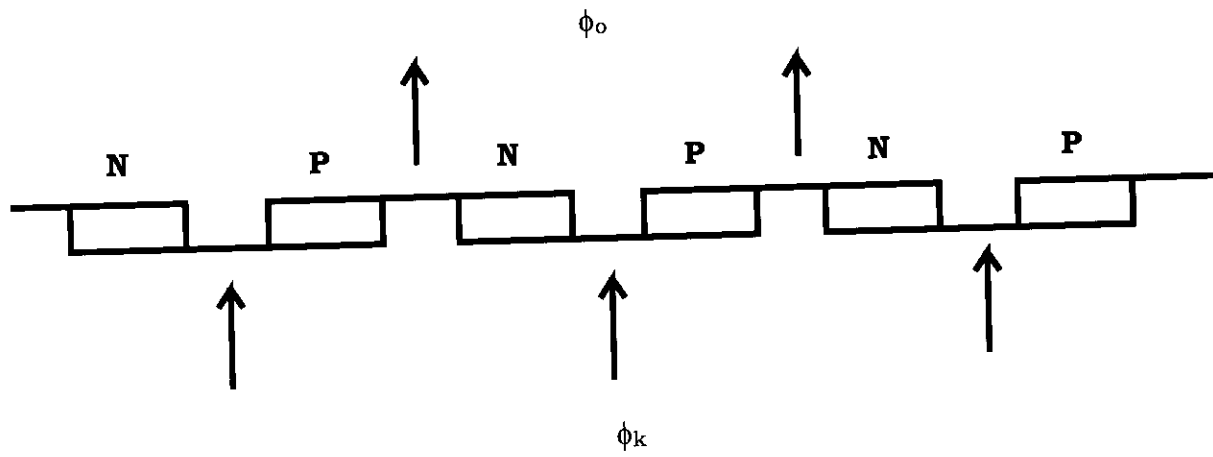
Le principe de fonctionnement est décrit par la figure 3. Les machines frigorifiques à éjection ne sont pas très répandues. Le compresseur du cycle à compression est remplacé par un éjecteur. Il est alimenté en vapeur vive, de même nature que le frigorigène, issues du bouilleur. Cette vapeur entraîne, 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**

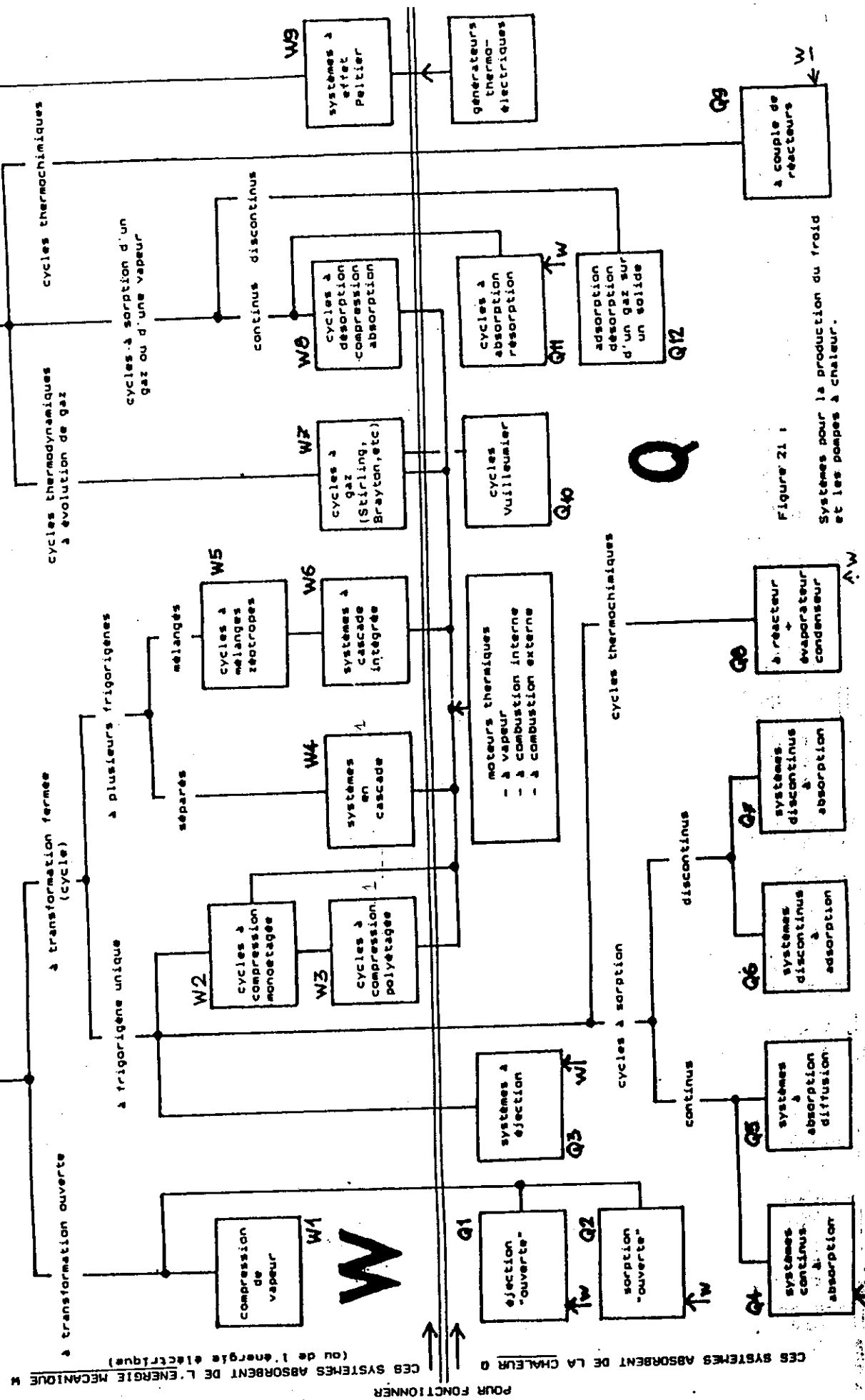


Figure 21 :

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

Figure 5: Organigramme des différentes filières de production de froid (d'après M. DUMINIL)

## **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  $2.10^8$  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  $5800^\circ\text{C}$ . Une partie de l'énergie y est absorbée, ce qui ramène la quantité d'énergie disponible à  $1\text{KW/m}^2$  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  $600 \text{ W/m}^2$ .

### 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**

<b>CRITERES</b>	<b>CAPTEUR PLAN</b>	<b>CAPTEUR A CONCENTRATION</b>
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, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, ...)

⇒ *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

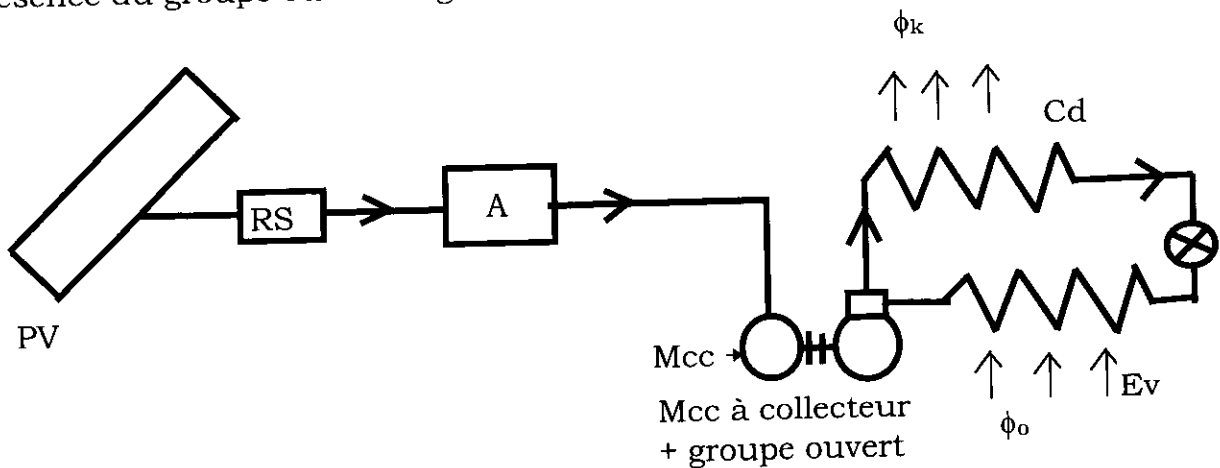
1) - Filière photovoltaïque + machine à compression

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.

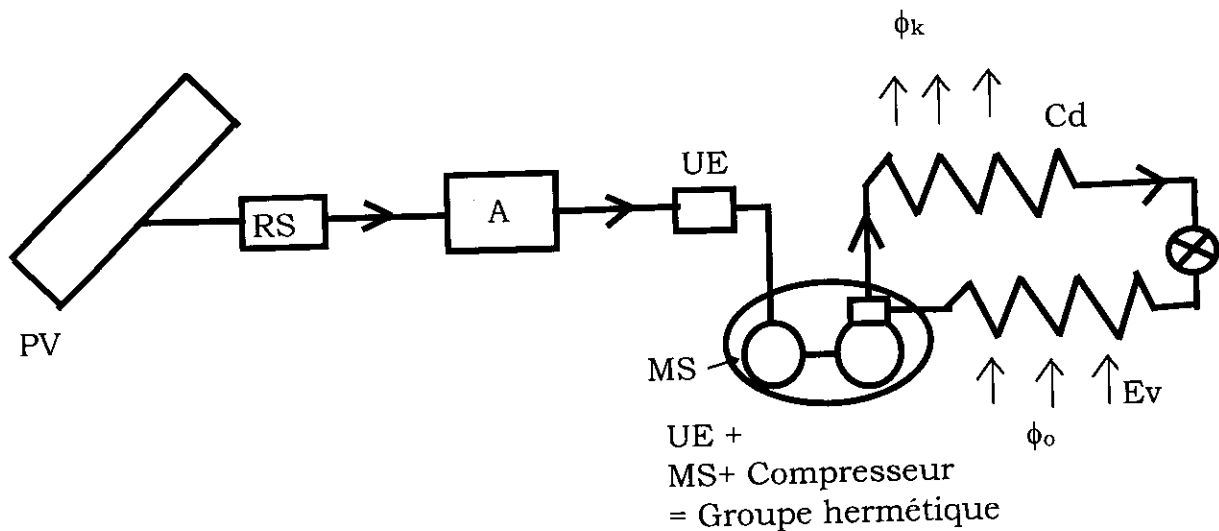


- PV = Cellules photovoltaïques
- RS = Régulation Sécurité
- A = Accumulateur
- Mcc = Moteur à courant continu
- Cd = Condenseur
- Ev = Evaporateur
- $\phi_k$  = puissance calorifique au condenseur
- $\phi_o$  = puissance frigorifique de la machine

**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.

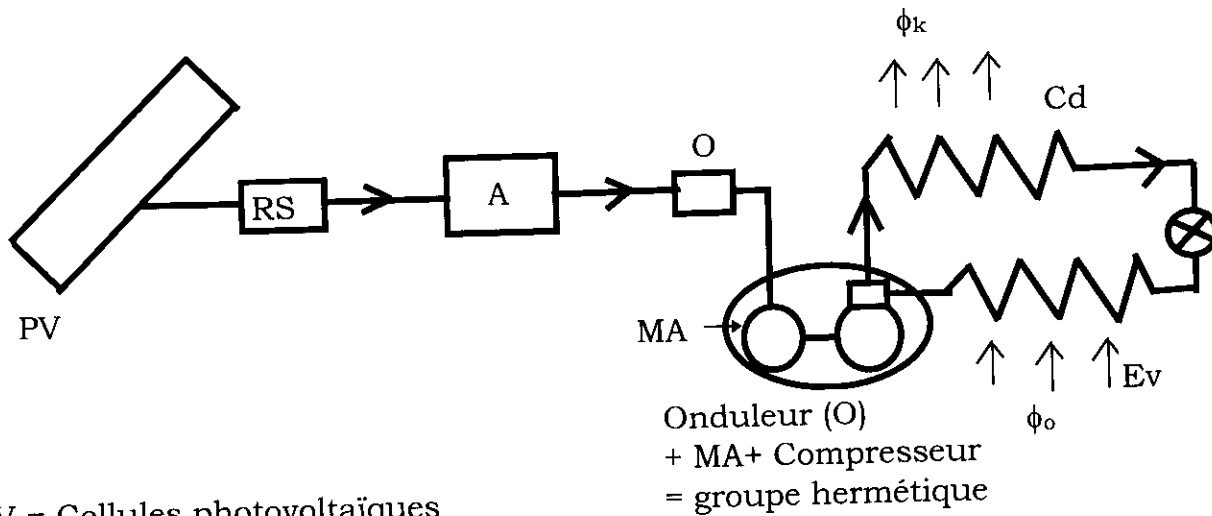


- PV = cellules photovoltaïques
- RS = Régulation Sécurité
- A = Accumulateur
- UE = Unité Electronique
- MS = Moteur Spécial
- Cd = Condenseur
- Ev = Evaporateur
- $\phi_k$  = puissance calorifique au condenseur
- $\phi_o$  = puissance frigorifique à l'évaporateur

**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.



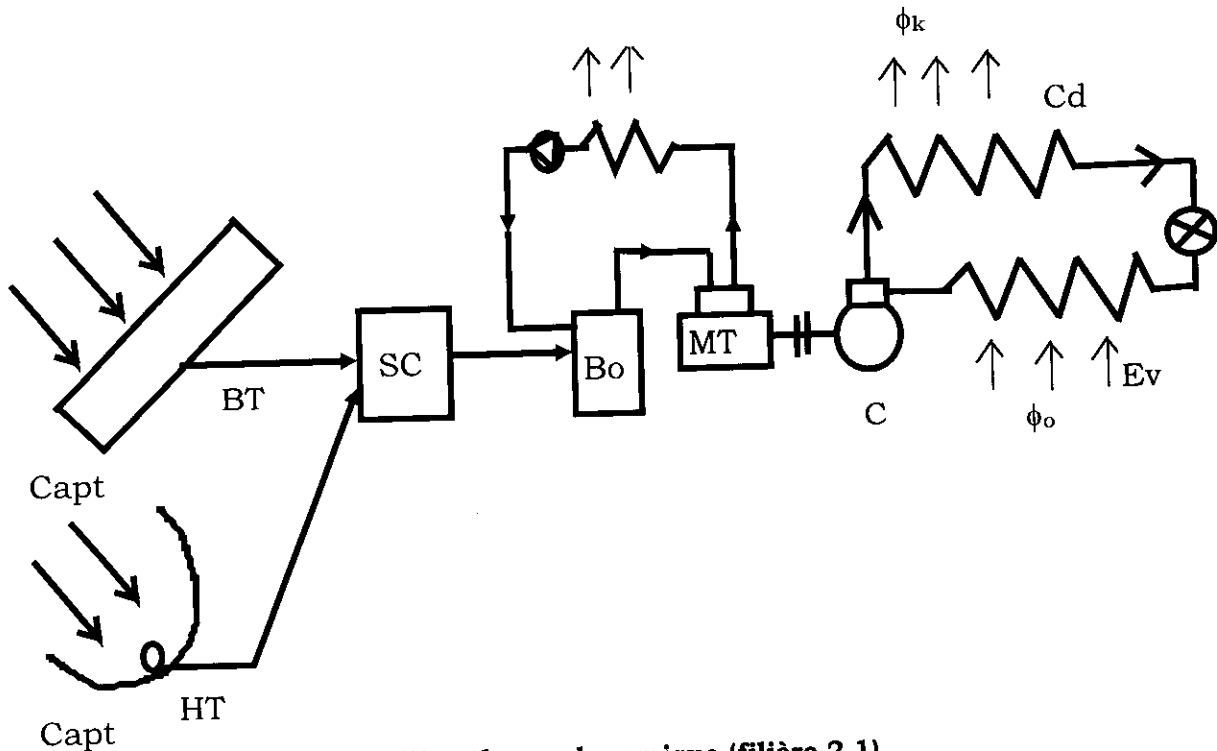
**Figure 8 Schéma de principe filière photovoltaïque (filière 1.3)**

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.

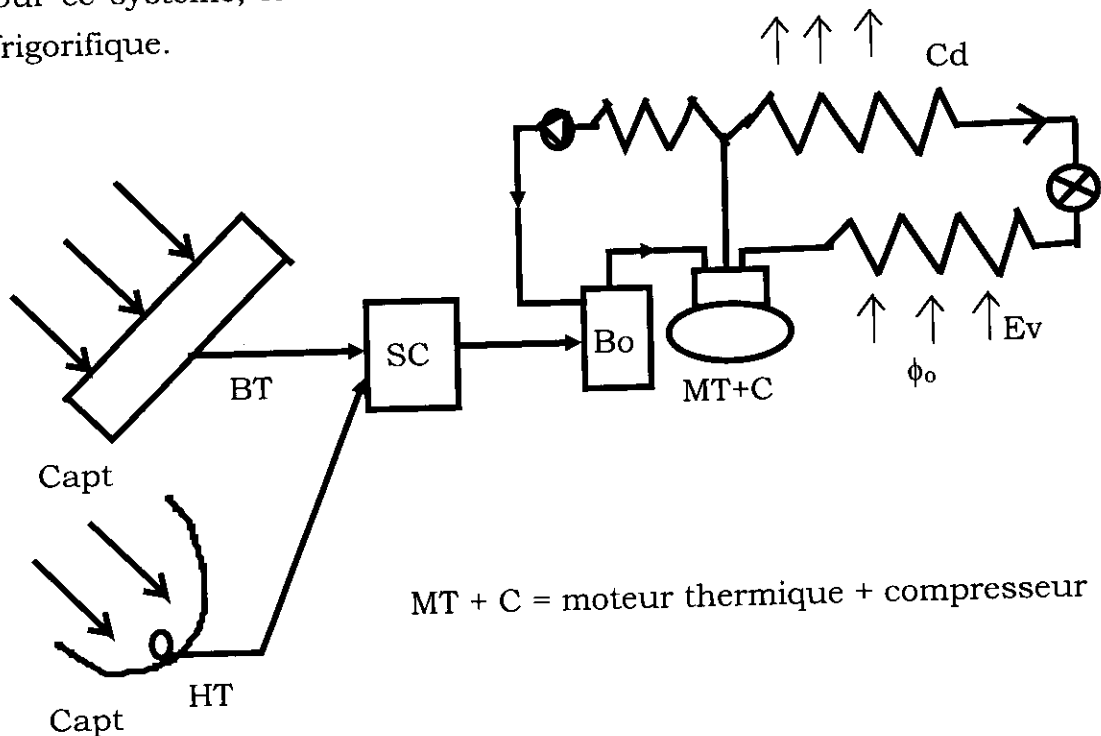
Pour ce système, les arbres du moteur et du compresseur étant accessibles, on peut y relier un alternateur pour une production d'énergie mécanique ou un moteur électrique de secours.



**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  $\phi_k$  moteur et au circuit frigorifique.

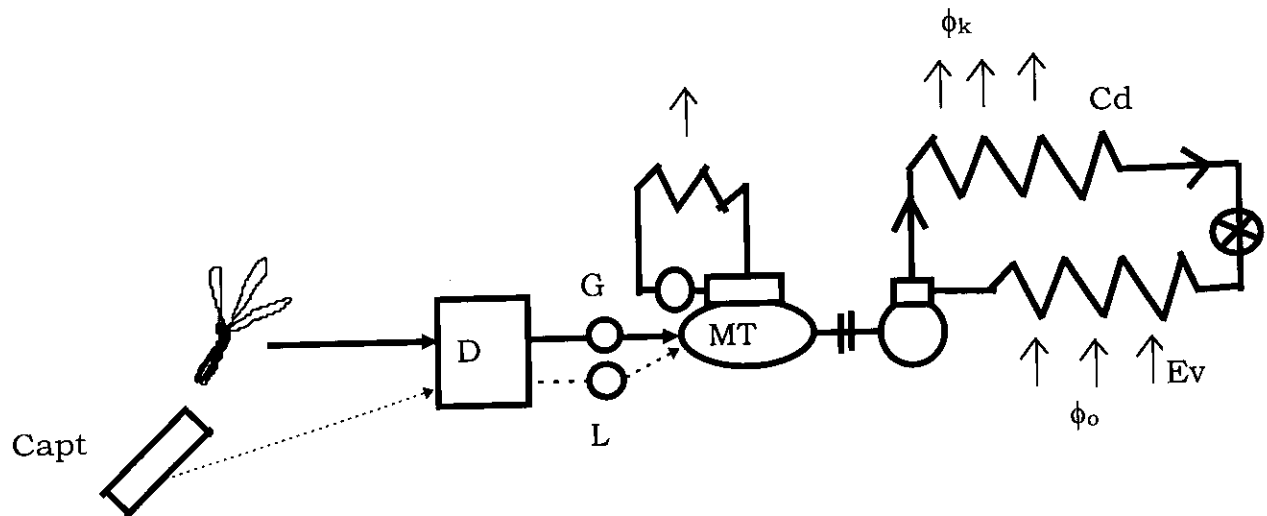


**Figure 10** Schéma de principe filière thermodynamique (filière 2.2)

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.



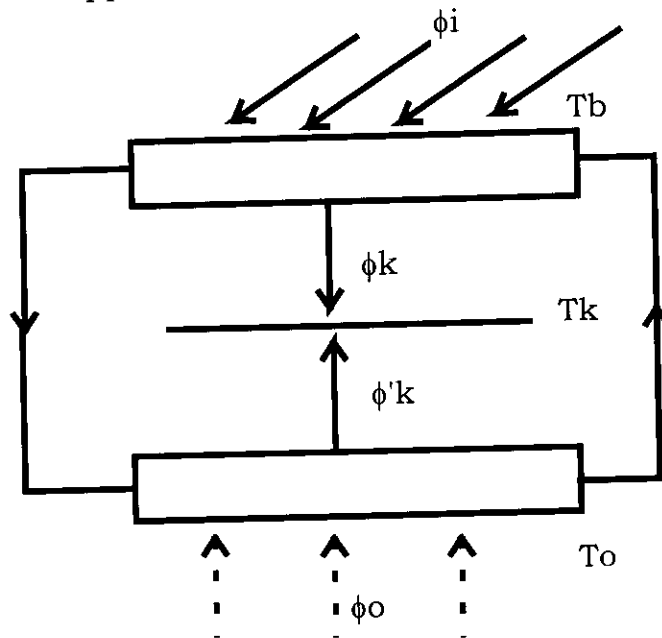
- Capt = Capteur plan basse tension
- MT = Moteur Thermique
- D = digesteur
- Cd = Condenseur
- Ev = Evaporateur
- $\phi_k$  = puissance calorifique au condenseur
- $\phi_o$  = puissance frigorifique à l'évaporateur
- G = gaz
- L = liquide

**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. Systèmes consommant de l'énergie calorifique

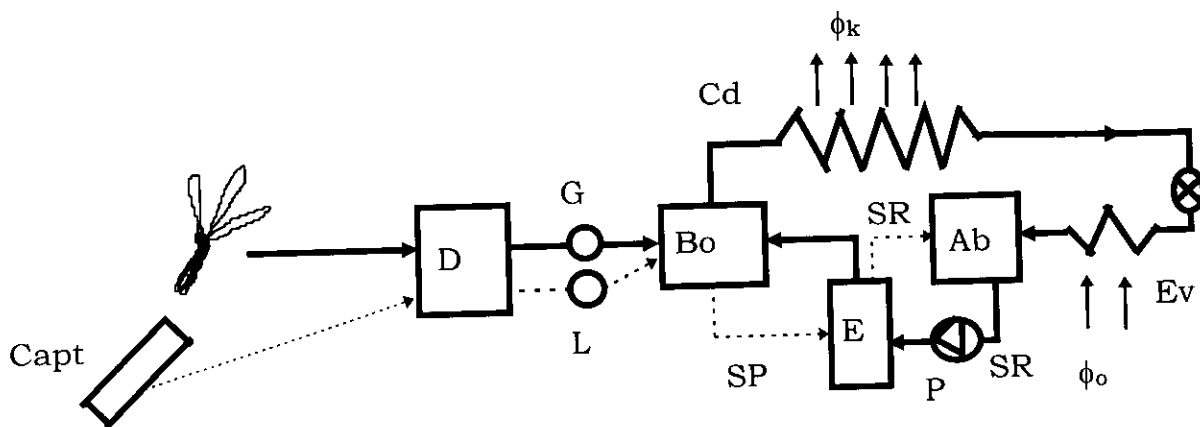
5) - Filière biomasse + machine à absorption

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.

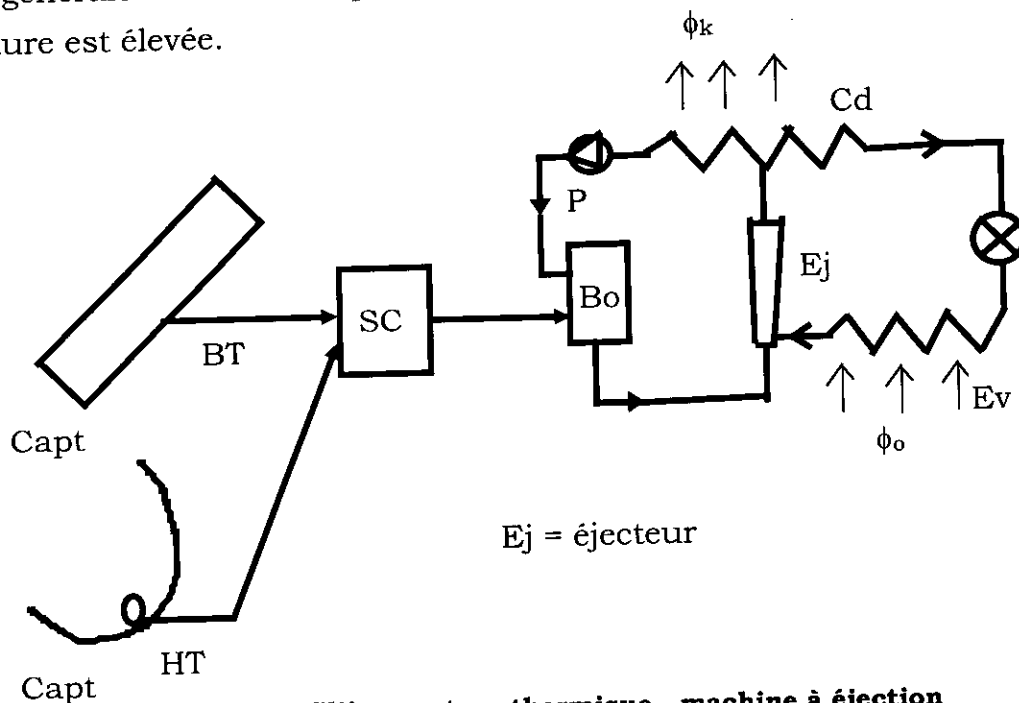
Cette filière est réservée particulièrement à la climatisation.



**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

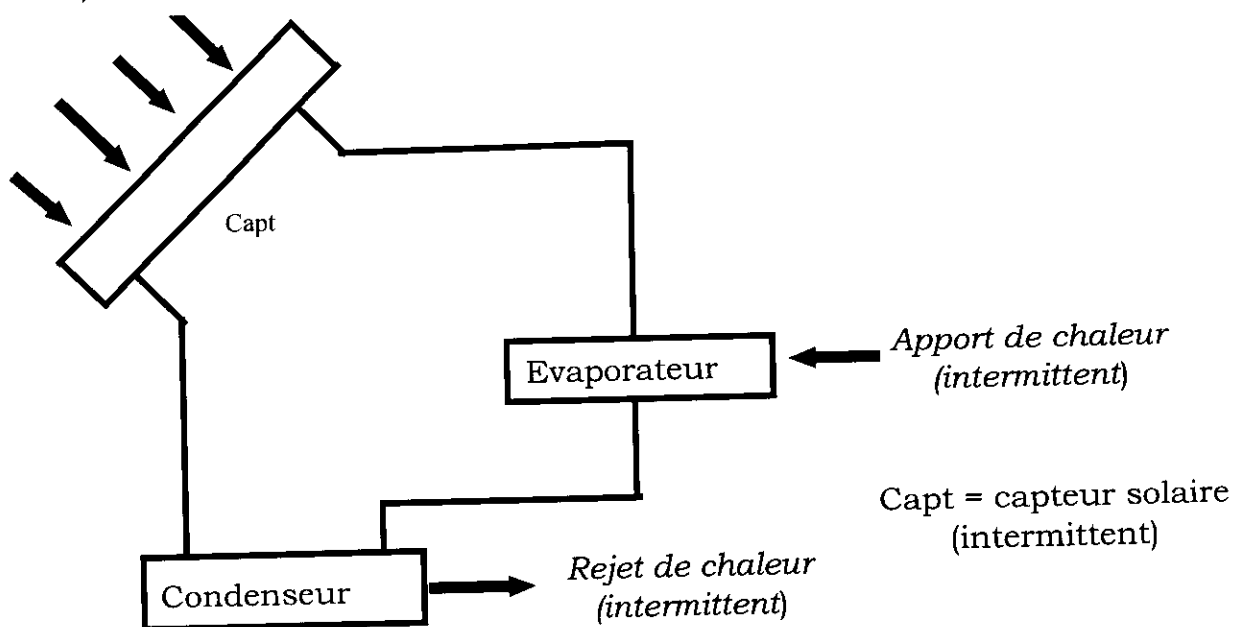
Cette filière peut mettre en oeuvre un couple frigorigène absorbant - liquide ou un couple frigorigène adsorbant - solide. Le capteur solaire est alimenté aussi de façon intermittente (discontinue), ce qui lui permet de jouer alternativement le rôle de générateur et d'absorbeur.

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

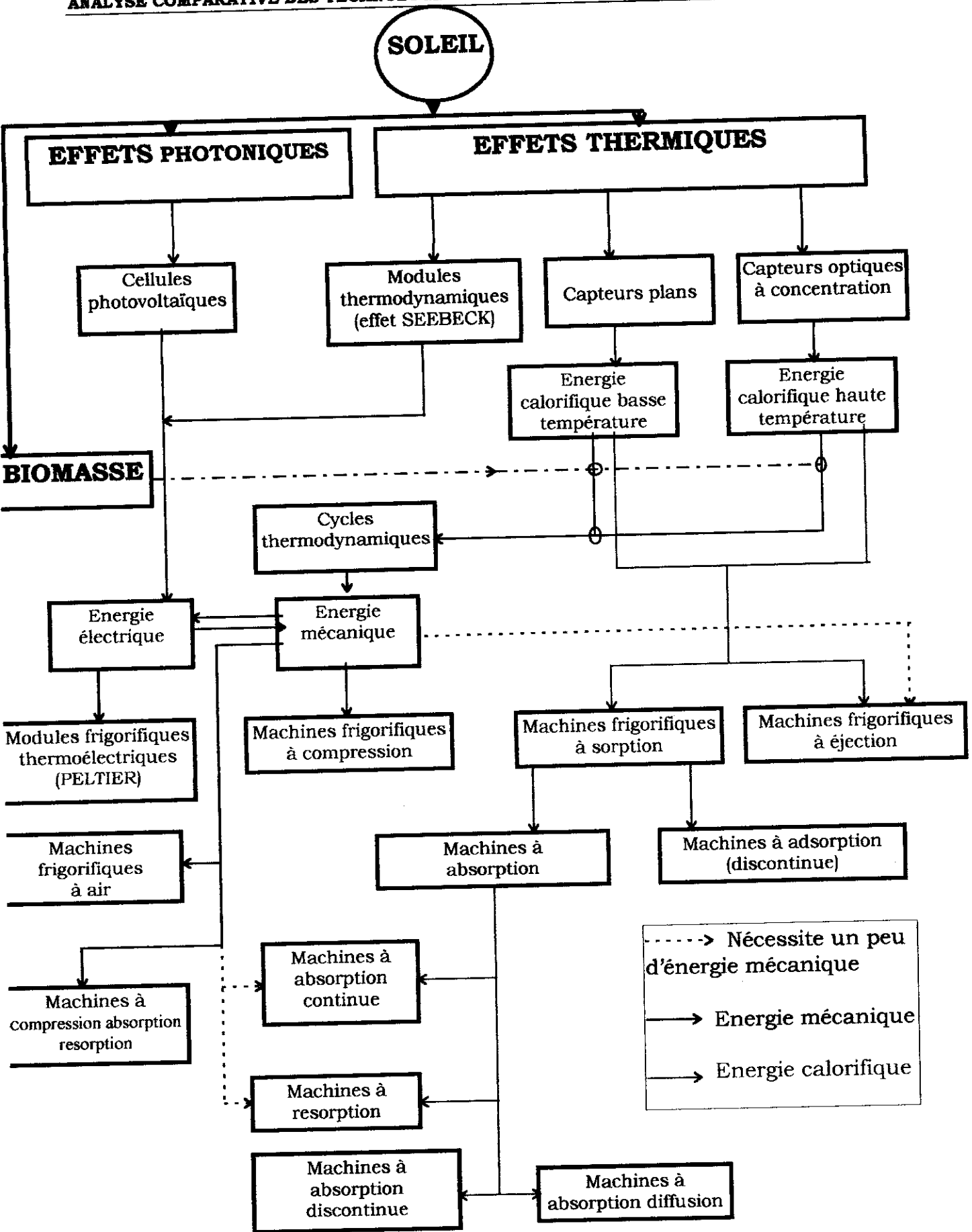


Figure 16: Organigramme des différentes filières de production de froid par voie solaire (d'après M. DUMINIL)

## 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;

$\phi_o$  = puissance frigorifique de la machine;

$\phi_k$  = 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;  
 $\phi_o$  = puissance frigorifique de la machine;  
 $\phi_B$  = 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"> <li>assez simple</li> <li>assez performante</li> <li>rejet de peu de chaleur dans l'ambiance à <math>T_k</math></li> <li>les 2 modes de stockage froid sont possibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>capteur très cher</li> <li>accumulateur amont de type électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>réfrigération</li> <li>climatisation</li> <li>procédés industriels</li> </ul>	entre 2 et 4	
1.1		<ul style="list-style-type: none"> <li>glace</li> <li>eau glacée</li> </ul>	Idem que 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Idem que 1 +</li> <li>groupe ouvert : surveillance des fuites</li> </ul>			
1.2		<ul style="list-style-type: none"> <li>glace</li> <li>eau glacée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Idem que 1 +</li> <li>groupes classiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Idem que 1 +</li> <li>moteurs spéciaux, limités aux petites puissances</li> </ul>			
1.3		<ul style="list-style-type: none"> <li>glace</li> <li>eau glacée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Idem que 1 +</li> <li>groupes classiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Idem que 1 +</li> <li>l'onduleur doit permettre le courant de</li> </ul>			



**ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE**

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

ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE

2.2		<ul style="list-style-type: none"> <li>. glace</li> <li>. eau glacée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idem que 2 +</li> <li>• moteur monobloc robuste et fiable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idem + que 2 +</li> <li>• le système renferme le fluide actif qui résulte d'un compromis</li> </ul>			
3	Digesteur = Appoint en combustible	<ul style="list-style-type: none"> <li>. glace</li> <li>. eau glacée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• appoint facile</li> <li>• production complémentaire d'énergie électrique possible</li> <li>• matériel assez classique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• filière assez complexe</li> <li>• problème thermique qu'impose le bon fonctionnement des digesteur</li> <li>• nécessite souvent les capteurs plans</li> <li>• stockages amont indispensables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• climatisation</li> <li>• réfrigération</li> <li>• Procédés industriels</li> </ul>	entre 2 et 4	de pas sens
4	Appoint en combustible	<ul style="list-style-type: none"> <li>. glace</li> <li>. eau glacée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• simple</li> <li>• pas besoin d'énergie mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• efficacité insuffisante</li> <li>• encore à l'état de prototype</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• climatisation</li> </ul>		
5	Digesteur = Appoint en combustible	<ul style="list-style-type: none"> <li>. eau glacée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• matériel classique</li> <li>• appoint en combustible facile</li> <li>• stockage de froid par</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idem que 4 +</li> <li>• gros rejet de chaleur à <math>T_k</math></li> <li>• stockage de froid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• climatisation</li> </ul>		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	. glace . eau glacée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• système assez simple et statique exception faite de la pompe alimentant le bouilleur</li> <li>• entretien limité</li> <li>• appoint en combustible facile</li> <li>• stockage de froid possible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• très gros dégagement de chaleur à <math>T_k</math></li> <li>• système à un seul fluide actif qui doit résulter d'un compromis</li> <li>• nécessite un peu d'énergie mécanique pour la pompe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• climatisation</li> <li>• Procédés industriels</li> </ul>	
7	Stockage chaud + Apport en combustible	. glace . eau glacée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• entretien modéré</li> <li>• appoint en combustible facile</li> <li>• stockage de froid possible (eau glacée)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gros rejet de chaleur à <math>T_k</math></li> <li>• nécessite un peu d'énergie mécanique</li> <li>• faible coefficient</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• climatisation</li> <li>• réfrigération</li> <li>• Procédés industriels</li> </ul>	

**ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE**

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

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*

*Dimensionnement des modules solaires*

Calcul de l'énergie produite ( $E_p$ ), c'est l'énergie qui sera consommée:

$$E_p = \frac{E_c}{k} = \frac{800}{0.65} = 1231 W_c$$

Où  $k$  est un coefficient correcteur qui tient compte de plusieurs paramètres: incertitude météorologique; l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison; rendement de charge et de décharge de la batterie (90%); rendement du régulateur (95%); rendement de l'onduleur, s'il y en a un; point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par: la baisse des caractéristiques des modules dans le temps (vieillessement et poussière).

Nous avons en présence un système avec batteries, on prend  $k = 0.65$ .

Calcul de la puissance crête du générateur ( $P_c$ ):

Les relevés météorologiques donnent une irradiation quotidienne moyenne de 6 kWh/m<sup>2</sup>.j pour cette région (Sahel).

$$P_c = \frac{E_p}{I_r} = \frac{1231}{6} = 205 W_c$$

**Choix final: 4 modules cristallins de 50 Wc**

*Dimensionnement des batteries*

$E_c = 1231 W_c$ ;

On choisit 5 jours d'autonomie:  $N=5$  puisqu'on se trouve dans la zone tropicale, classe A). Cf. **Annexe 4**

Le pourcentage de décharge acceptable est de 80%:  $D=0.8$ ;

On obtient une capacité

$$C_{100} = \frac{(E_c \times N)}{(D \times U)} = \frac{800 \times 5}{0.8 \times 24} = 208 Ah$$

avec

- $C$  = capacité de la batterie (Ah);
- $E_c$  = énergie consommée par jour (Wh/j);

- N = nombre de jours d'autonomie;
- D = décharge maximale admissible (de 0.5 à 0.8) pour batteries au plomb;
- U = tension de la batterie (V).

Une capacité de 200 Ah est acceptable. **Le choix sera: 12 batteries de 200 Ah/2 V**

Dimensionnement du régulateur:

Les besoins de ce centre de santé étant:

- ◆ le stockage de 30 litres de vaccins;
- ◆ la congélation de 4 accumulateurs de froid par jour.

La température ambiante étant de 41°C au maximum.

La puissance du générateur est de 200 Wc; la tension de la batterie est de 24 V; les modules de 50 Wc seront nécessairement montés en série (2 par 2) pour obtenir 24 V et en parallèle (2 par 2) pour obtenir 200 Wc. D'après les caractéristiques du constructeur, le courant maximal fourni par un module est de 3 A. Le courant maximal fourni par le générateur est donc de 6 A.

La puissance du réfrigérateur correspond à celle de son compresseur. Ainsi, si l'appareil fonctionne 18 heures par jour, la puissance du compresseur sera de 800Wh/18h; soit 45W. L'intensité du courant appelée est donc d'environ 2 ampères (=45/24). Il est à noter que le courant de démarrage d'un compresseur est beaucoup plus élevé que le courant standard d'utilisation ( $\approx 7$  fois le courant nominal). Ce courant élevé est très bref. Le régulateur sera équipé d'une temporisation pour pouvoir supporter cette intensité sans se déclencher.

Le régulateur choisi aura les caractéristiques minimales suivantes:

- ◆ **tension d'alimentation: 24 V;**
- ◆ **courant d'entrée: 6 A;**
- ◆ **courant de sortie: 2 A.**

Les réfrigérateurs photovoltaïques sont des appareils à compression, à isolation renforcée et fonctionnant en courant continu.



Il existe principalement trois types de réfrigérateurs solaires: les réfrigérateurs, les congélateurs et les appareils mixtes (partie réfrigération et partie congélation). Il existe par contre de nombreux modèles suivant la capacité de stockage désirée.

Un générateur de type photovoltaïque est généralement composé:

- d'une caisse à simple ou double compartiments à ouverture sur le dessus (type bahut) et à isolation renforcée;
- d'un groupe frigorifique à compression (évaporateur latéral + condenseur latéral + compresseur hermétique à courant alternatif basse tension 12 V ou 24 V);
- d'une unité électronique comprenant un convertisseur (onduleur) DC/AC (12 V ou 24 V) et une commutation électronique.

Tous les éléments sont intégrés au sein d'un même ensemble: les réfrigérateurs photovoltaïques. (Cf. **Annexe 4**).

La conservation des vaccins en sites isolés nécessite depuis de nombreuses années l'utilisation des réfrigérateurs à pétroles ou à gaz. Ces deux types de réfrigérateurs présentent deux types de difficultés d'utilisation. Ceux fonctionnant à pétrole ont souvent des problèmes techniques dus à la qualité du pétrole, au réglage de la mèche et à la maintenance; le fonctionnement des réfrigérateurs à gaz, plus fiables, repose sur l'approvisionnement en bouteilles de gaz qui n'est pas toujours régulièrement assurée.

La mise en place des réfrigérateurs solaires apporte un gain réel en terme de fiabilité et de respect de la chaîne du froid. Ces réfrigérateurs permettent en général de stocker jusqu'à 20 000 doses de vaccins (30 à 100 litres) et de produire 2 à 3 kg de glace par jour. Cette production de glace est nécessaire pour permettre de congeler des accumulateurs de froid (récipients en plastiques remplis d'eau, briquettes). Cette glace sera utilisée à l'intérieur de petites glacières pour la conservation des vaccins lors de tournées dans les villages où il n'y a pas de réfrigérateurs.

Comparaison technique entre les différents systèmes de réfrigération:

L'énergie traditionnellement utilisée reste le pétrole. Toutefois, le gaz, comme énergie de substitution, s'implante dans beaucoup de régions privées d'électricité? Les réfrigérateurs utilisant ces énergies sont de type à absorption (groupe de froid fonctionnant à partir d'une source de chaleur). La comparaison va donc essentiellement se faire entre ces deux modèles et le modèle solaire.

**Réfrigérateur à pétrole (absorption)**

<b>AVANTAGES</b>	<b>INCONVENIENTS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- technique simple et répandue</li> <li>- assez bonne maîtrise de la part du personnel</li> <li>- coût des pièces détachées modéré</li> <li>- facile à installer</li> <li>- coût d'investissement faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- approvisionnement et qualité médiocres des pétroles</li> <li>- qualité de froid souvent médiocre</li> <li>- pas de thermostat</li> <li>- entretien et maintenance lourde et "capricieuse"</li> <li>- coût de fonctionnement non négligeable</li> </ul>
<p><i>En résumé:</i> le pétrole est très répandu et bien approvisionné, cependant les problèmes de qualité du pétrole et d'entretien entraînent des risques importants de rupture de la chaîne de froid.</p>	

**Réfrigérateur à gaz (absorption)**

<b>AVANTAGES</b>	<b>INCONVENIENTS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- technique simple</li> <li>- maintenance facile et réduite</li> <li>- facile à installer</li> <li>- coût des pièces détachées modéré</li> <li>- coût d'investissement faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- approvisionnement en gaz souvent difficile (parfois ruptures)</li> <li>- production de froid lente (absorption)</li> <li>- coût de fonctionnement non négligeable</li> </ul>
<p><i>En résumé:</i> le réfrigérateur à gaz est fiable, assez performant et d'un coût de revient faible. Son bon fonctionnement dépend de la disponibilité en bouteilles de gaz qui n'est pas toujours assurée, selon les régions ou les saisons.</p>	

**Réfrigérateur photovoltaïque (compression)**

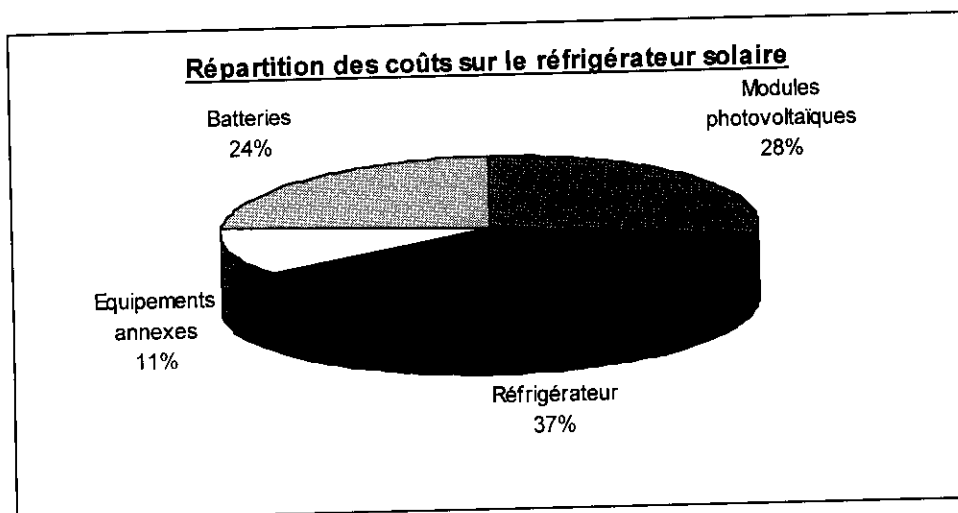
<b>AVANTAGES</b>	<b>INCONVENIENTS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- suppression des problèmes de carburant</li> <li>- production de froid rapide (compression)</li> <li>- maintenance facile et réduite</li> <li>- durée de vie théorique élevée</li> <li>- bon contrôle de température</li> <li>- faibles dépenses de fonctionnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- présence d'équipements électroniques (qualité et approvisionnement)</li> <li>- requiert un spécialiste pour l'installation</li> <li>- technologie et réparation complexes</li> <li>- remplacement des batteries après 7 ans</li> <li>- faible disponibilité des pièces détachées</li> <li>- coût élevé des sous-ensembles</li> <li>- coût moyen annuel élevé (dépenses + amortissements)</li> </ul>
<p><i>En résumé:</i> le réfrigérateur photovoltaïque est d'un coût élevé d'investissement. Son coût de fonctionnement étant similaire à celui de ses concurrents, il est globalement plus cher que ses concurrents. Il permet toutefois d'assurer une bonne qualité de froid avec une excellente fiabilité.</p>	

**Point sur le coût des systèmes de production de froid**

Niveau d'investissement

Comme pour tous les systèmes photovoltaïques, le coût d'investissement des réfrigérateurs solaires est important. Il sera donc nécessaire d'analyser en parallèle les coûts d'investissement et de fonctionnement afin d'établir des comparaisons avec les autres solutions.

La répartition des coûts d'investissement entre les différents éléments du système se divise de la façon suivante:



Source: "Vaccine solar refrigerator: Lessons learnt from large scale programme survey". OMS, 1991.

**Figure 17: Répartition des coût sur le réfrigérateur solaire**

Comparaison économique avec d'autres énergies

Le **tableau 4** suivant indique les coûts détaillés d'un réfrigérateur photovoltaïque, comparés aux coûts d'un réfrigérateur à pétrole et d'un modèle à gaz. Tous trois sont normalisés OMS.

**Tableau 4: Coûts comparés réfrigérateurs**

	Durée de vie	PV (FCFA)	Gaz (FCFA)	Pétrole (FCFA)
<u>Coût d'investissement</u>				
- modules PV (4X50Wc)	15 ans	944000		
- installation	15 ans	250000		
- batterie (12 X 200 Ah/2V)	5 ans	2850000		
- Réfrigérateur et régulateur	10 ans	1310000	1000000	1000000
- accessoires, câblage	2 ans	327500		
- brûleur, verre, mèche	5 ans		89000	89000
Total investissement		5681500	1089000	1089000
<u>Coût de consommation</u>				
- pétrole (30litres/mois à F/l)				81000 F/an

**ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE**

- gaz (2bouteilles/mois à 4000 F/b)			84000 F/an	
- changement de brûleur et autres			89000 F/5 ans	89000 F/5 ans
- changement de batterie		2850000 F/5 an		
- Main-d'oeuvre maintenance		70000 F/an	40000 F/an	40000 F/an
<b>Coût total</b>				
- en 5 ans		8881500	1798000	1783000
- en 10 ans		12081500	2507000	2477000
<b>Coût moyen (sur 10 ans)</b>				
		1208150 F/an	250700 F/an	247700 F/an

*Source: "Sahel Energie Solaire et Programme Elargie de Vaccination (PEV)  
OUAGADOUGOU" Mai 1998*

**Conclusion sur les études comparatives:**

- Par rapport au pétrole, les réfrigérateurs photovoltaïques présentent une qualité de froid et une fiabilité bien supérieures au pétrole lorsqu'il y aura des problèmes de carburant (principalement à cause de sa mauvaise qualité). Dans ce cas, le choix du solaire est préférable.
- Par rapport au gaz, les réfrigérateurs à gaz, assez fiables et moins coûteux, présentent un avantage certain par rapport au solaire. Toutefois des problèmes de disponibilité de gaz (ou de coût élevé de gaz) peuvent justifier l'option solaire.

**II.2.2. Chambre froide en site isolé**

**(Cf. Annexe 5)**

Supposons la construction d'une chambre froide destinée à stocker des fruits et légumes dans un village de la périphérie de Ouagadougou. Les conditions extérieures sont :

- température extérieure maximale: 41°C.
- $HR_{ext} = 35\%$

La chambre devra stocker 10 tonnes de denrées. Les volumes utile et brut de la chambre sont fonctions des densités utiles d'entrepôts. On maintient la chambre à une température ambiante de 5°C ( $T_1 = 5^\circ\text{C}$ ). La densité d'entreposage de 160 Kg/m<sup>3</sup>, conduit à un volume utile de 62.5 m<sup>3</sup>. L'accessibilité dans la chambre est moyenne. On suppose le volume brut

intérieur de la chambre de l'ordre de 1.4 fois le volume utile de la chambre. On a donc comme volume brut une capacité de 87.5 m<sup>3</sup>. Ce qui correspond aux dimensions intérieures suivantes: 7 m × 5 m × 2.5 m.

**Calcul des caractéristiques techniques de la chambre:**

*Bilan frigorifique*

Il permet de déterminer l'épaisseur de l'isolant des parois et la puissance frigorifique de l'installation. Le bilan est déterminé par période de 24 heures et comprennent les postes suivants:

- ◆ P: Pertes à travers les parois de la chambre:

$$P = 24 \times p \times S$$

Avec p: pertes par unité de surface des parois. On prendra p=8 W/m<sup>2</sup>;  
S: surface globale de toutes les parois.

$$\begin{aligned} S &= [2 \times (L + l) \times h + 2 \times L \times l] \\ &= [2 \times (7 + 5) \times 2.5 + 2 \times 7 \times 5] \\ &= 130 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$P = 24 \times 8 \times 130 = 24960$$

$$P = 24960 \text{ KJ/24h}$$

- ◆ R: pertes par renouvellement d'air

$$R = 10 \times V \times 2 \times (T_e - T)$$

Avec V = volume de la chambre;  
T<sub>e</sub> = température extérieure;  
T = température intérieure.

$$V = L \times l \times h$$

$$= 7 \times 5 \times 2.5 = 686$$

$$= 87.5 \text{ m}^3$$

$$R = 10 \times 87.5 \times 2 \times (41 - 5) = 123840$$

$$\underline{R = 63000 \text{ KJ/24h}}$$

- ◆ D: Divers. Ceci correspond aux apports de chaleur dans la chambre, dus à la ventilation, à la circulation des personnels, à l'éclairage, aux opérations de dégivrage, à la respiration des fruits et légumes réfrigérés, etc.

On prendra

$$\boxed{D = 0.2 \times (P + R)}$$

$$D = 0.2 \times (24960 + 63000) = 17592$$

$$\underline{D = 17592 \text{ KJ/24h}}$$

- ◆ Q: Refroidissement des produits

$$\boxed{Q = C \times M \times (T_p - T)}$$

Avec M = masse maximale des produits qui peuvent être introduits par jour dans la chambre froide;

C = chaleur massique des produits ( $C \approx 4.2 \text{ KJ/Kg.}^\circ\text{C}$ );

$T_p$  = température des produits à l'entrée de la chambre;

T = température de la chambre froide.

$$Q = 4.2 \times 10000 \times (25 - 5) = 840000$$

$$\underline{Q = 840000 \text{ KJ/24h}}$$

- ◆ B: Bilan. Le bilan maximal de la chambre froide est la somme des postes précédents

$$B = P + R + D + Q$$

$$B = 24960 + 63000 + 17592 + 840000 = 945552$$

$$B = 945552 \text{ KJ}/24\text{h}$$

### *Puissance frigorifique*

La puissance totale  $\phi_o$  est définie par:

$$\phi_o = \frac{B}{t \times 3600}$$

Avec  $t$  = temps moyen de fonctionnement quotidien de la machine de l'installation. On prendra  $t = 16$  heures

$$\phi_o = \frac{945552}{18 \times 3600} = 14.6$$

$$\text{On prend } \phi_o = 14.6 \text{ KW}$$

On fait une majoration de 20%, et on obtient :  $\phi_o = 18 \text{ KW}$

A Ouagadougou, les caractéristiques extérieures sont les suivantes :

$T_{\text{ext}} = 41^\circ\text{C}$  et  $HR_{\text{ext}} = 35\%$ . Ce qui donne les caractéristiques de la machine frigorifique suivantes :  $T_e = 55^\circ\text{C}$  et  $HR = 85\%$

Comme nous avons à faire aux fruits et légumes, on doit respecter les caractéristiques du local qui sont les suivantes :  $T_{\text{local}} = 5^\circ\text{C}$  et  $HR_{\text{local}} = 85\%$ .

Sur **l'abaque n°1 de l'annexe 5**, on trouve pour  $HR_{\text{local}} = 85\%$ , une valeur de  $\Delta T_o = 6^\circ\text{C}$ .

On se fixe une surchauffe de  $+5^\circ\text{C}$ , et un sous refroidissement de  $+5^\circ\text{C}$ . On suppose que la machine fonctionne au  $R_{22}$ , on a :

$$\Delta T_k = 14^\circ\text{C} \quad \text{d'où } T_k = +50^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_o = 6^\circ\text{C} \quad \text{d'où } T_o = -1^\circ\text{C}$$

Le tracé du cycle thermodynamique donne les valeurs suivantes du **tableau 5**



**Tableau 5 : Caractéristiques du cycle thermodynamique de la machine**

Caractéristiques	P(bars)	T(°C)	h(KJ/Kg)	x	v(m <sup>3</sup> /Kg)
<b>Points</b>					
1	4.9	+4	409	1	0.05
2	22	+85	448	1	-
3	22	+50	262	0	-
4	4.9	-1	262	0.27	-
5	4.9	-1	406	1	-

On sait que :

$$m_f = \frac{\phi_o}{h_1 - h_4} \text{ et } P_{abs} = \frac{m_f \times (h_2 - h_1)}{\eta_i \times \eta_m}, \text{ et } P_{mot} = \frac{m_f \times (h_2 - h_1)}{\eta_i \times \eta_m \times \eta_{mot}}$$

On sait aussi que :

$$\tau = \frac{P_k}{P_o}, \text{ et } V_r = m_f \times v_1, \text{ et } \eta_i = 1 - 0.05 \times \tau$$

$$COP_{réel} = \frac{\phi_o}{P_{mot}}, \quad COP_{théo} = \frac{T_o}{T_k - T_k}$$

Avec :

$\eta_m = 0.9$ , le rendement mécanique ;

$\eta_{mot} = 0.8$ , le rendement moteur ;

$m_f$  = le débit masse

$V_r$  = débit volume réel ;

$P_{abs}$  = Puissance absorbée par le moteur ;

$P_{mot}$  = Puissance du moteur

$$T_o = -1^\circ\text{C}$$

$$T_k = 55^\circ\text{C}$$

**A.N.**

$$m_f = 358 \text{ KJ/h}$$

$$V_r = 17.9$$

$$\eta_i = 0.78$$

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{abs}} = 19889 \text{ KJ/h} = 5.52 \text{ KW}$$

$$P_{\text{mot}} = 24861 \text{ KJ/h} = 6.9 \text{ KW}$$

$$\text{COP}_{\text{réel}} = 2.12$$

$$\text{COP}_{\text{théo}} = 3.8$$

Cette machine a un bon COP. La puissance du moteur du compresseur doit être d'environ 7 KW.

Avec cette puissance, il faut 140 panneaux photovoltaïques. Ce qui couvrirait une superficie de  $140 \times 0.5 \text{ m}^2 = 70 \text{ m}^2$ . Ce qui est énorme du point de vue superficie occupée.

On sait aussi qu'un panneau photovoltaïque coûte à peu près 1.000.000 FCFA au BURKINA. Ce qui suppose que les 140 panneaux coûteront 140.000.000 FCFA. En comptant et la machine frigorifique, et tous les accessoires qui vont avec le photovoltaïque, on se retrouve avec un coût très élevé.

Nous pouvons dire que la solution photovoltaïque n'est pas la meilleure du point de vue investissement initial, fonctionnement et superficie occupée.

Il faut faire des recherches sur l'utilisation de la biomasse brûlée pour l'alimentation des machines frigorifiques, car elle représente une solution avantageuse. En plus, elle est présente sur la majeure partie de la terre; elle est peu polluante: elle contient généralement moins de 0.1 pour cent de soufre et trois à cinq pour cent de cendres. Enfin quand la biomasse n'est pas surexploitée, le gaz carbonique émis lors de son traitement et de sa combustion est entièrement réabsorbé par la photosynthèse: ainsi l'utilisation de la biomasse n'augmenterait pas la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique et ne risquerait pas de réchauffer l'atmosphère.

## **RECOMMANDATIONS**

L'élaboration des recommandations pour le développement de la production de froid par voie solaire est une tâche délicate. Il est intéressant d'étudier profondément la solution solaire avant de la mettre en œuvre.

La solution solaire étant plus coûteuse que les solutions classiques en terme d'investissement surtout, il faut l'adopter lorsque l'applicabilité des autres sources d'énergie est impossible.

En Afrique, il faut éviter servilement de copier, en matière de production de froid par voie solaire, ce qui se fait dans les pays industrialisés, à climat tempéré. Il faut souligner qu'en assouplissant les règles techniques qui sont en vigueur dans ces pays industrialisés, on peut obtenir des résultats encore plus satisfaisants, sinon parfait, par le traitement des denrées périssables.

Il faut explorer la filière biomasse qui revêt beaucoup d'intérêts en matière de production d'énergie. L'énergie de la biomasse nous est donnée, d'emblée, sous forme stockée: les tissus végétaux par la photosynthèse, stockent l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique; nous pouvons récupérer celle-ci en brûlant les plantes, par exemple. Nous recommandons vivement aux dirigeants des Etats africains de fournir beaucoup d'efforts de recherche en vue de l'utilisation de cette énergie (biomasse brûlée) pour la production de froid.

## CONCLUSION

Nous avons passé en revue, les différentes technologies de production de froid par voie solaire; pour celles qui semblent susceptibles d'intéresser les pays africains, nous avons rappelé quelques rudiments de techniques frigorifiques, en attirant chaque fois l'attention sur les particularités résultant des conditions propres à ces pays.

Au terme de notre analyse, nous voudrions dégager et rassembler quelques idées qui ont été évoquées à diverses reprises tout au long de cette étude.

Sauf quelques cas (conservation des vaccins notamment) où le rôle du froid est directement social, c'est dans l'ordre économique que se placent essentiellement les interventions du froid par énergie solaire. Le froid est le moyen techniquement idéal de préserver, dans ces pays chauds, des denrées alimentaires très périssables, mais c'est un moyen coûteux, qui exige, pour être efficace, la mise en place de tout un ensemble d'installations.

Dans les sites isolés, l'application du froid par voie solaire permet d'éviter des pertes d'aliments périssables, en valorisant les produits. Il faut noter qu'il existe néanmoins d'autres moyens de préservation qui peuvent être moins coûteux, mais qui ne maintiennent pas aussi parfaitement les qualités nutritionnelles et organoleptiques de l'aliment, surtout si c'est destiné à l'exportation.

Le critère de rentabilité immédiate dans les conditions économiques du moment, souvent retenu pour écarter une solution solaire au profit des solutions plus classiques, reste très discutable, et même injustifiable au plan de l'économie nationale, surtout au moyen et long termes; nous pouvons donc accepter un "surcoût solaire" non négligeable en pariant sur l'avenir sans nous attarder aux bas prix commerciaux auxquels est vendue, temporairement, aujourd'hui, l'énergie sous forme électrique ou thermique, sans aucune garantie.

La production du froid par énergie solaire est assez avancée dans de nombreux instituts de recherches, et diverses installations dépassant même le stade du laboratoire sont en fonctionnement. Néanmoins, celles-ci restent à l'état de prototypes et la fabrication industrielle d'équipements frigorifiques solaires n'est pas encore une réalité.

Les besoins de froid étant réels, il serait souhaitable que les dirigeants des pays africains portent beaucoup plus d'efforts de recherche sur cette source d'énergie renouvelable à l'infini qu'est le soleil.

**BIBLIOGRAPHIE**

- (1) **CHASSAGE G.** (1984) Energie solaire: Production d'énergie à usage industriel dans les régions méditerranéennes et africaines.
- (2) **INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID** (1967) Conditions recommandées pour l'entreposage frigorifique des produits périssables (Tome 2).
- (3) **INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID** (1976) Les techniques du froid dans les pays chauds en développement.
- (4) **COULIBALY Y.** (1990) Sources d'énergie (EIER).
- (5) **DJIAKO T.** (1992) Production du froid (EIER).
- (6) **Chr. PERRIN de BRICHAMBAUT** (1987) Energie solaire : Evaluation des ressources utilisables I.G.A.C.E.M. / Météorologie.
- (7) **DUMINIL M.** (1984) Considération sur la production de froid par voie solaire en vue de la climatisation des locaux Rev. Gén. du Froid, Juillet-Août 1984 375-396.
- (8) **BONNIN J.** (1980) Réfrigération solaire, Collection énergie solaire, édition SCM.
- (9) **SEMA** (1977) Evaluation des énergies nouvelles pour le développement des Etats africains, Ministère de la coopération française, collection technologies et développement n°1.
- (10) **SEMA** (1978) Evaluation des énergies renouvelables pour les pays en voie de développement, Ministère de la coopération française, collection technologies et développement n°2.

- (11) **SEMA** (1982) Energies renouvelables du Sahel, Evaluation des projets, Ministère de la coopération française, Dossier techniques et développement.
- (12) **IEPF** (1993) Liaison Energie-Francophonie n°18, l'énergie de la biomasse, Agence de la coopération culturelle et technique.
- (13) **IIF** (1990) Manuel d'entreposage frigorifique dans les pays chauds en développement.
- (14) **ONUDI** (1980) Série "Mise au point et transfert des technologies" n°5, Techniques d'utilisation de l'énergie solaire.
- (15) **H. J. GOLDSMID** (1964) Thermoelectric Refrigeration.

**ANNEXES**

**ANNEXE 1 CONDITIONS RECOMMANDEES POUR L'ENTREPOSAGE  
FRIGORIFIQUE**

**Annexe 1.1** Conservation des denrées alimentaires

**Annexe 1.2** Conservation des produits pharmaceutiques

**ANNEXE 2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES  
FRIGORIFIQUES**

**Annexe 2.1** Systèmes mécanofrigorifiques

**Annexe 2.2** Systèmes thermofrigorifiques

**ANNEXE 3 MOYENS DE CAPTATION DE L'ENERGIE SOLAIRE**

**Annexe 3.1** Les capteurs thermiques

- *Les capteurs plans*
- *Les capteurs à concentration*

**Annexe 3.2** La biomasse

**ANNEXE 4 CONSERVATION DES VACCINS PAR LE  
PHOTOVOLTAIQUE**

**ANNEXE 5 CHAMBRE FROIDE EN SITE ISOLE**



**ANNEXE 1**

**CONDITIONS RECOMMANDEES POUR  
L'ENTREPOSAGE FRIGORIFIQUE**

Le stockage des produits nécessite une classification par groupe car les conditions d'entreposage diffèrent d'un produit à l'autre. Nous donnons ci-dessous le classement par groupe:

- ◆ produits sans évolution biologique (cacao, café, arachide, ...)
- ◆ produits vivriers (fruits, légumes,...)
- ◆ produits pharmaceutiques
- ◆ viandes, poissons, laits et produits laitiers, oeufs,...

Les conditions de stockage dépendent de :

1. la température de conservation (T)

2. la durée d'entreposage (D)

- jusqu'à 8 jours : court terme
- de 8 jours à 3 mois moyen terme
- au delà de 3 mois long terme

3. la vitesse de mise à froid (V)

- moins de 1 jour rapide
- de 1 à 7 jours moyenne
- au delà de 7 jours lente

4. l'humidité relative (HR)

5. la charge de stockage au m<sup>2</sup> (Q/m<sup>2</sup>)

**Annexe 1.1 Conservation des denrées alimentaires**

**PRODUITS SANS EVOLUTION BIOLOGIQUE**

Produits	T (°C)	D	HR (%)	Q/m <sup>2</sup>
Cacao	20	long terme	< 70	1,5 à 2t/m <sup>2</sup>
café	20	long terme	70	1,5 à 2t/m <sup>2</sup>
arachide	21	long terme	85	1,5 à 2t/m <sup>2</sup>

**PRODUITS VIVRIERS**

Produits	T(°C)	D	HR (%)	Q/m <sup>2</sup>
Igname	16	long terme	90 à 95	1t/m <sup>2</sup>
Banane - verte - mûre	11.5 à 14.5 13 à 16	10 à 20 jours 5 à 10 jours	90 à 95 85 à 90	< 300 Kg/m <sup>2</sup>
Manioc	15	court terme	80 à 90	200 Kg/m <sup>2</sup>
Patate douce	11 à 13 13 à 15	13 semaines 4 à 6 semaines	85 à 90 80 à 85	1t/m <sup>2</sup>
Tarot	15	long terme	95	1t/m <sup>2</sup>
Ananas - vert - mûr	10 4.5 à 7 8 à 10	2 à 4 semaines 2 à 4 semaines 6 semaines	90 90 85 à 90	150 à 200 kg/m <sup>2</sup>
Avocat	5 à 10 7 à 13	2 à 4 semaines 4 semaines	90 85 à 90	300 Kg/m <sup>2</sup>
Goyave	7 à 10	3 semaines	90	-
Mangue	10	moyen terme	85 à 90	300 Kg/m <sup>2</sup>
Papaye	4 à 5.5 7	5 semaines 2 à 3 semaines	85 à 90 85 à 90	300 Kg/m <sup>2</sup>

**ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE FROID PAR VOIE SOLAIRE**

	10	2 à 3 semaines	90	
Melon	0 à 1 2 4.5 à 10	7 semaines 1 semaines 1 à 4 semaines	85 à 90 85 à 90 85 à 90	-
Pastèque	2 à 4	2 à 3 semaines	85 à 90	-
Orange	-1 à 1	2 à 3 mois	85 à 90	-
Maïs	-0.5 à 0	4 à 8 jours	85 à 90	-
Oignon	-3 à 0	6 mois	70 à 75	-
Petit pois	-0.5 à 0	1 à 3 mois	85 à 90	-
Pomme de terre - nouvelle - tardive	3 à 4 5	qques semaines 8 mois	85 à 90 85 à 90	-
Chou	0	2 à 6 mois	85 à 95	-
Concombre	7 à 10 11.5	2 semaines 1 à 2 semaines	90 à 95 85 à 95	-
Haricot vert	0 2 à 7 7	1 à 3 semaines 10 à 15 jours 8 à 10 jours	90 à 95 85 à 90 85 à 90	-
Pamplemousse	0	-	85 à 90	-
Mandarine	4 à 7 5.5 à 7	3 à 6 semaines 10 à 12 semaines	85 à 90 85 à 90	-
Citron - vert - coloré	11 à 14.5 0 à 4.5	1 à 4 mois 3 à 6 mois	85 à 90 85 à 90	-

**VIANDES, POISSONS, LAIT ET PRODUITS LAITIERS, OEUFS**

<b>Produits</b>	<b>T (°C)</b>	<b>HR (%)</b>	<b>D</b>
<u>Viandes</u> - Boeuf - Mouton - Porc - Veau	-1.5 à 0 -1 à 0 -1.5 à 0 -1 à 0	90 90 à 95 90 à 95 90	jusqu'à 3 semaines 4 à 5 semaines 10 à 15 jours 1 à 2 semaines
Volaille	-1 à 0 0	- > 95	4 à 5 jours 7 à 10 jours
<u>Oeufs</u> - en coquille - après cassage	-1.5 à 0 -15 à -18	85 à 90 > 95	6 à 7 mois 6 à 10 mois
Poissons	-0.5 à -1	80 à 90	jusqu'à 8 mois
<u>Produits laitiers</u> - lait frais - lait concentré sucré - lait en poudre - beurre - crème	0 à 1 16 > 12 0 à 2 4 à 6 0 à 2		7 à 8 jours quelques mois > 6 mois 4 à 5 semaines 2 à 3 semaines quelques jours

**Annexe 1.2** Conservation des produits pharmaceutiques

<b>Produits</b>	<b>T (°C)</b>	<b>D</b>	<b>HR (%)</b>
<b>VACCINS</b> - fièvre jaune - variole - poliomyélite - rougeole - B.C.G. - coqueluche	-20 +4 +4 +4 1 an à +4 1 mois à +20 +4	2 ans 2 à 3 ans 2 ans 2 ans - 2 ans	40 à 60
<b>ANATOXINE</b> - tétanos - diphtérie	4 à 10	5 ans	40 à 60
<b>SUPPOSITOIRES</b>	+4	quelques mois	40 à 60
<b>SOLUTION BUVALE</b>	+4	de qq. jours à qq. mois	40 à 60
<b>PREPARATIONS INJECTABLES</b> (antibiotiques et médicaments tels que analgésiques anti-inflammatoires et stupéfiants)	+4	de qq. mois à 1 an	40 à 60
<b>SANGS et DERIVES</b> - sang frais - sang concentré de globule rouge congelé - concentré de plaquette sanguine - plasma sanguin	+4 à +5 -20 +4 +4 à +5	2 ans 5 ans 2 ans 2 ans	40 à 60
<b>COMPRIMES</b>	+20		40 à 60

**ANNEXE 2**

**PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES  
SYSTEMES FRIGORIFIQUE**

# LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE PRODUCTION DE FROID

Maxime DUMINIL

**L**es systèmes frigorifiques nécessitent pour fonctionner qu'on leur fournisse de l'énergie. Cette fourniture peut se faire :

- sous la forme mécanique ou équivalente, par exemple électrique, (pure exergie) - Systèmes mécanofrigorifiques
- sous la forme calorifique (exergie + anergie) - Systèmes thermofrigorifiques.

La figure ci-contre montre comment se présentent ces différents systèmes et comment ils se placent les uns par rapport aux autres\*. Pour les repérer plus facilement on a attribué à chacun un numéro conventionnel.

## 1- Systèmes consommant de l'énergie mécanique ou systèmes mécanofrigorifiques (systèmes W).

Ils communiquent avec l'extérieur par, au moins, deux sources de chaleur : une source froide, où la chaleur est prélevée à basse température, et un puits chaud, où la chaleur est rejetée à température plus élevée. Ce sont des systèmes au moins dithermes. Ils sont généralement d'architectures simples. Ils sont aussi efficaces (bons coefficients de performance) puisqu'ils consomment une énergie "noble" qu'il faut cependant produire ailleurs moyennant dépense.

W1 - Systèmes à compression de vapeur en circuit ouvert.

Il sont utilisés pour la concentration de jus dans l'industrie.

W2 - Cycles à compression monoétagée de vapeur de frigorigène.

Ce frigorigène étant un corps pur ou un mélange azéotropique, ses changements d'état se font à température constante : vaporisation pour la production de froid (effet endothermique) puis condensation, après compression, pour le rejet de chaleur (effet exothermique). Ce sont les systèmes de production du froid les plus simples et les plus répandus : réfrigération et conservation des denrées, production d'eau glacée, conditionnement d'air, etc... La plupart des pompes à chaleur utilisent aussi ces cycles.

\* Il ne s'agit ici que des systèmes pouvant produire des températures modérément basses. D'autres principes peuvent être mis en œuvre pour la production des plus basses températures, par exemple celles du domaine cryogénique.

W3 - Cycles à compression polyétagée. Moins courants que les précédents, on les rencontre cependant souvent, notamment dans la version bi-étagée (techniques de congélation).

W4 - Cycles "en cascade".

Utilisant plusieurs frigorigènes séparés, pour la production de températures déjà basses (disons entre -60 et -120°C pour fixer les idées).

W5 - Cycles à mélanges zéotropes (binaires ou ternaires - 2 ou 3 constituants du mélange).

Les changements d'état du mélange frigorigène se font avec variation de sa température de qui peut être avantageux dans certains cas.

W6 - Cycles à cascade intégrée.

Ils utilisent des mélanges zéotropes à multiples constituants, 4, 5, 6, ou plus. Les systèmes à cascade intégrée sont employés couramment pour la liquéfaction du gaz naturel (-161°C).

W7 - Cycles frigorifiques à gaz.

Contrairement aux précédents, le fluide actif du cycle ne change pas d'état et reste gazeux au cours de son évolution thermodynamique. Il en existe de nombreux types mais qui ne sont pratiquement pas employés dans le domaine frigorifique courant. On les retrouve, par contre, pour la production des basses températures (cryogénie). Notons cependant l'usage de cycles à air pour la climatisation de certains avions (Concorde).

W8 - Cycles hybrides à désorption-compression-absorption.

Dans ces cycles à compression, l'évaporation du frigorigène est remplacée par la désorption d'une vapeur hors d'une solution et la condensation par la réabsorption de ladite vapeur dans la solution. Ils font l'objet de recherches mais ne sont encore nullement opérationnels.

W9 - Les systèmes frigorifiques électriques, magnétiques ou électroniques.

On en a proposé de nombreux modèles qui sont essentiellement restés dans les laboratoires. Ceux qui ont fait l'objet de plus d'études, et même d'applications, sont ceux utilisant l'effet thermoélectrique (effet Peltier). Toutefois une efficacité insuffisante pour concurrencer valablement les systèmes à compression les a tenu en dehors des applications courantes. Leurs usages restent donc marginaux.



## **2- Systèmes consommant de l'énergie thermique ou systèmes thermofrigorifiques (système Q).**

Ils communiquent avec l'extérieur par, au moins, trois sources de chaleur : les deux déjà citées dans le cas des systèmes mécanofrigorifiques, la source froide et le puits chaud et une troisième la source chaude de chaleur motrice apportant au système l'énergie thermique nécessaire. Ce sont donc des systèmes au moins trithermes. Notons que certains d'entre eux imposent l'usage d'une petite quantité d'énergie mécanique, généralement requise pour l'entraînement de pompes. Dans la figure ils sont repérés par  $\uparrow w$  à côté du plot les concernant. L'énergie mécanique nécessaire reste cependant, dans le cas général, très faible par rapport à l'énergie calorifique consommée par le système Q. Il est aussi vrai que lorsque le système à une certaine puissance il nécessite la circulation forcée de fluides caloporteurs au contact de ses sources thermiques. Là aussi la fourniture d'énergie mécanique pour les ventilateurs ou pompes qui déplacent ces fluides s'impose. Les systèmes thermofrigorifiques sont d'architectures généralement plus complexes que les systèmes V. Ils sont aussi moins efficaces (coefficients de performance sensiblement plus faibles) puisqu'ils consomment une énergie, la chaleur, de qualité inférieure, cette énergie est, par contre, plus facilement disponible que l'énergie mécanique.

Notons, comme le suggère le plot central de la figure, que l'on peut produire du froid à partir de la chaleur en associant un moteur thermique à un système mécanofrigorifique. Il s'agit alors d'un système thermofrigorifique dissociable puisqu'on peut facilement séparer le moteur thermique du système mécanofrigorifique. Cet ensemble se rencontre couramment dans les camions frigorifiques.

### **Q1 - Systèmes à éjection en circuit ouvert.**

Ces systèmes à éjection, sans récupération de la vapeur aspirée, sont utilisés pour le refroidissement rapide de certaines denrées périssables ("vacuum-cooling"). Le frigorigène est alors l'eau.

### **Q2 - Systèmes à sorption en circuit ouvert.**

Il existe toute une variété de systèmes de climatisation simplifiés dans lesquels 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 extérieur est chaud et humide, ce qui est souvent le cas, il faut d'abord assécher cet air 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. Toutes ces opérations s'effectuant sous la pression atmosphérique, les systèmes considérés sont relativement simples à construire. La désorption de l'eau fixée par l'absorbant (ou l'adsorbant), s'effectue par chauffage, par exemple solaire.

### **Q3 - Cycles à éjection.**

Ils sont relativement difficiles à mettre en oeuvre de manière efficace en raison des problèmes que pose la réalisation d'éjecteurs performants. On a utilisé, en son temps, des systèmes de climatisation à éjection utilisant l'eau comme frigorigène (Leblanc, Follain). L'expansion des systèmes à compression et à absorption a gêné le développement de ces systèmes.

### **Q4 - Cycles continus à absorption.**

Comme dans les cycles à compression, la production du froid est assurée par la vaporisation d'un frigorigène. La vapeur formée est ensuite absorbée par une solution absorbante qui, pompée, transporte le frigorigène dans le côté haute pression du système. La vapeur de frigorigène y est libérée par chauffage de la solution absorbante puis condensée comme dans les cycles à compression. On utilise essentiellement 2 couples frigorigène(F)-absorbant(A) : ammoniac(F)-eau(A) (couple de Carré l'inventeur de ce cycle en 1859) pour la production de froid à basse température et eau(F)-bromure de lithium(A) (1940) pour la climatisation.

**Q5 - Cycles continus, à absorption-diffusion.** Ils utilisent le couple ammoniac-eau auquel on ajoute un gaz (l'hydrogène) ne participant pas aux opérations de production de froid mais qui permet, par sa présence, de compenser la différence des pressions de vapeur de l'ammoniac entre les côtés haute et basse température de la machine. Ces systèmes, strictement thermiques, ne consomment aucune énergie mécanique. Ils sont couramment employés dans les réfrigérateurs ménagers à absorption.

**Q6 et Q7 - Cycles discontinus à sorption.** Lorsque la sorption du gaz actif s'effectue à la surface d'un solide, on a affaire au système discontinu à adsorption (Q6). Lorsque cette sorption s'effectue dans la masse même d'un liquide, il s'agit alors d'un système discontinu à absorption (Q7). Dans une première phase, non productrice de froid, le frigorigène, extrait du sorbant par chauffage à température suffisamment haute, va se liquéfier dans un condenseur en cédant de la chaleur au puits chaud. Dans la seconde phase, productrice de froid, le sorbant est refroidi à la température du puits

chaud (généralement l'ambiance). Il réabsorbe (ou réabsorbe) la vapeur de frigorigène issue de la vaporisation du liquide formé au cours de la première phase. C'est la phase de production de froid. On note quelques réalisations utilisant ces systèmes (réfrigérateurs solaires à vaccins). En combinant plusieurs de ces systèmes discontinus fonctionnant selon des cycles temporellement décalés, on peut obtenir une production de froid quasi-continue.

**Q8 - Systèmes thermochimiques avec changement d'état du frigorigène.**

Les systèmes en question ressemblent technologiquement aux précédents. Ils en diffèrent cependant car la vapeur de frigorigène émise au cours de la première phase non productrice de froid ne résulte pas d'une désorption, mais d'une décomposition chimique, par chauffage dans un "réacteur" à température suffisamment haute, d'un composé convenablement choisi. C'est une chaleur de décomposition, plus importante, qui est donc mise en oeuvre et non une chaleur de désorption. Comme précédemment, la vapeur de frigorigène se liquéfie en cédant de la chaleur au puits chaud. Au cours de la seconde phase, en refroidissant le composé chimique à la température du puits chaud, on recombine la vapeur de frigorigène avec ce composé. Cette vapeur provient de la vaporisation à basse température du liquide précédemment formé. On produit alors du froid.

**Q9 - Systèmes thermochimiques à deux réacteurs (ou plus).**

Dans les systèmes précédents le fluide actif change périodiquement d'état (condensation puis évaporation) ce qui implique que sa vapeur soit liquéfiable dans le domaine de températures considéré. Pour s'affranchir de cette limitation on préfère utiliser au moins deux réacteurs chimiques renfermant des composés qui réagissent avec le gaz frigorigène à des températures différentes. Lorsque, dans la phase non productrice de froid, on chauffe, à haute température le premier composé à haute température de décomposition, le gaz frigorigène issu de cette décomposition va se combiner avec le second composé, cédant la chaleur de combinaison au puits chaud avec lequel est en contact ce second composé. Dans la seconde phase, on refroidit le premier composé à la température du puits chaud. Le frigorigène s'y recombine. Le second composé se décompose puisque le frigorigène le quitte. Sa température s'abaisse. C'est la phase de production du froid. Les systèmes thermochimiques font l'objet de nombreuses recherches mais ne sont pas encore opérationnels

**Q10 - Cycle de Vuilleumier.**

Il constitue le rassemblement, dans une même machine d'un moteur thermique à évolution thermodynamique de gaz, du type Stirling, et d'un refroidisseur ou un gaz suit également un cycle du type Stirling (Stirling inverse). Il peut être employé pour la production de petites puissances frigorifiques à basse température (refroidisseurs de détecteurs infra-rouge pour des missions spatiales par exemple).

**Q11 - Système à absorption-résorption.**

Le système en question est le pendant du système W8. Il s'agit essentiellement d'un cycle à absorption continue dans lequel le phénomène endothermique d'évaporation du frigorigène est remplacé par le phénomène endothermique de désorption d'une vapeur hors d'une solution absorbante (riche). De même, le phénomène exothermique de condensation de la vapeur de frigorigène, qui apparaît dans le cycle à absorption continue, est remplacé ici par le phénomène exothermique de résorption de cette vapeur dans une solution absorbante (pauvre). S'il est étudié actuellement dans quelques laboratoires du monde pour la production de froid ou la réalisation de pompes à chaleur, ce cycle n'est cependant pas opérationnel.

**Q12 - Système à adsorption à deux adsorbants.**

Ce système se présente apparemment comme le système Q9 mais au lieu de mettre en oeuvre un couple de réactions chimiques, composés solides-gaz, s'effectuant dans deux réacteurs associés, on utilise ici les phénomènes d'adsorption et de désorption physiques d'une vapeur dans deux adsorbants de nature différentes renfermés dans les deux récipients associés. A ma connaissance ce type de système n'est guère étudié. Bien d'autres phénomènes susceptibles de produire du froid ont été volontairement omis de cette présentation dans un but de simplification, soit que les effets soient insignifiants (refroidissement d'une barre d'acier lorsqu'on l'étire), qu'ils concernent plutôt les très basses températures (tube à pulsation, demixion, effet Pomeranchuk, dilution de  $^3\text{He}$  dans  $^4\text{He}$ , ...) ou bien qu'ils soient peu efficaces ou peu pratiques (effet Ranque, dissolution d'un soluté dans un solvant, ...).

# LES MÉLANGES FRIGORIGÈNES

Maxime DUMINIL

On distingue :

- **Les mélanges zéotropes**  
contrairement aux corps purs (fig.1), leur température varie, parfois notablement, au cours des changements d'état sous pression constante (fig.2)
- **Les mélanges azéotropes**  
ceux qu'on nous propose, généralement binaires, se comportent comme des corps purs : leur température reste constante au cours des changements d'état sous pression constante
- **Les mélanges quasi-azéotropes**  
leurs variations de température au cours des changements d'état, bien que non nulles, sont alors suffisamment petites pour qu'on n'en tienne pas compte pratiquement.

## I- Mélanges zéotropes (ou zéotropiques)

On les appelle encore *mélanges non-azéotropiques*.  
On note que :

- il y a une différence de composition entre les phases liquide et vapeur en équilibre thermodynamique, la phase vapeur étant plus riche en composant le plus volatil,
- les compositions, différentes, de ces deux phases variant au cours des changements d'état, on observe une évolution de la température au cours de la vaporisation ou de la condensation sous pression constante. C'est le **glissement de température  $\Delta\theta$**  (fig.2).

L'usage de mélanges zéotropes dans les circuits frigorifiques peut présenter divers avantages :

- Les températures de vaporisation et de condensation du mélange frigorigène (MF) évoluant au cours de ces transformations, comme évoluent d'ailleurs les températures des fluides caloporteurs, froid (frigoporteur FP) et chaud, qui apportent et enlèvent de la chaleur à la machine, les écarts de température entre frigorigène et caloporteurs sont beaucoup moins variables le long de l'évaporateur et du condenseur, ce qui est favorable sur le plan thermodynamique (la fig.3 correspond au cas de l'évaporateur).
- On peut donc accroître, dans certaines conditions, les coefficients de performance frigorifique

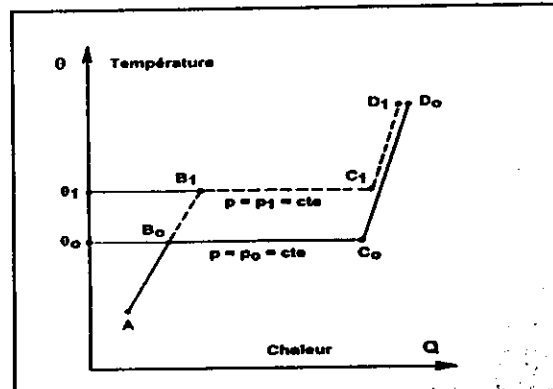


Figure 1 - Corps pur - En apportant de la chaleur  $Q$  à un corps pur, maintenu sous pression constante  $p = p_0 = \text{cte}$  et initialement totalement liquide (liquide sous-refroidi) on observe les faits suivants :

- de A à  $B_0$ , échauffement du liquide (réduction puis disparition du sous-refroidissement)
- de  $B_0$  à  $C_0$ , vaporisation complète du liquide à température constante  $\theta_0$
- $C_0$  à  $D_0$ , échauffement de la vapeur formée (surchauffe de la vapeur).

Sous une pression plus élevée  $p = p_1$ , on trouve une série de phénomènes semblables, mais décalés vers les températures plus élevées :  $A B_1$ , puis  $B_1 C_1$  à  $\theta_1$ , enfin  $C_1 D_1$ .

En enlevant de la chaleur au fluide on décrit ces transformations en sens inverse.

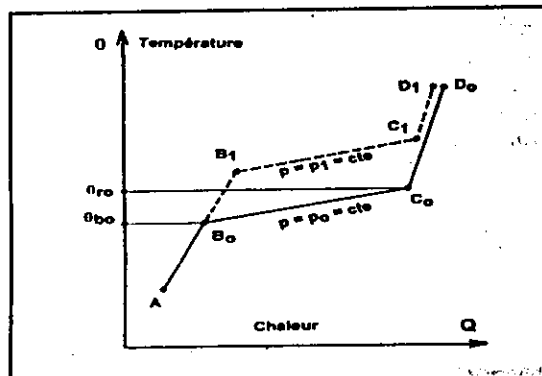


Figure 2 - Mélange zéotrope - En apportant de la chaleur  $Q$  à un mélange zéotrope, maintenu sous pression constante  $p = p_0 = \text{cte}$  et initialement totalement liquide (liquide sous-refroidi) on observe les faits suivants :

- de A à  $B_0$ , échauffement du liquide
- à  $B_0$ , apparition de la première bulle de vapeur à la température  $\theta_{bo}$  point de bulle
- de  $B_0$  à  $C_0$ , vaporisation du mélange liquide avec augmentation progressive du composant le moins volatil dans le liquide. La température s'élève de  $\theta_{bo}$  à  $\theta_{ro}$  point de rosée.  $\Delta\theta = \theta_{ro} - \theta_{bo}$  est le glissement de température (glide en anglais)
- de  $C_0$  à  $D_0$ , échauffement de la vapeur formée (surchauffe de la vapeur).

Sous une pression plus élevée  $p = p_1$ , on retrouve une série de phénomènes semblables, mais décalés vers les températures plus élevées. En enlevant de la chaleur au fluide on décrit ces transformations en sens inverse ; c'est notamment en  $C_0$  à  $\theta_{ro}$ , qu'apparaît alors la première gouttelette de liquide d'où le nom de point de rosée qu'on lui donne.

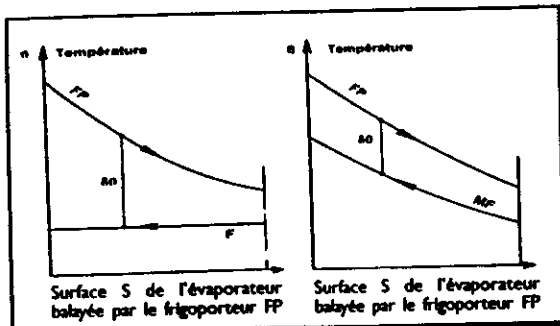


Figure 3 - Refroidissement du frigoporteur FP par un frigorigène pur F. L'écart de température  $\delta\theta$  le long de l'évaporateur est très variable. Refroidissement du frigoporteur FP par un frigorigène mélange zéotrope MF. L'écart de température  $\delta\theta$  le long de l'évaporateur est beaucoup moins variable.

(machine frigorifique) ou calorifique (thermo-pompe) de ces systèmes. Ceci est d'ailleurs d'autant plus net que les caloporteurs subissent des variations de températures plus grandes.

- On a la possibilité, en modifiant la composition du mélange cyclé de faire varier la puissance frigorifique (ou calorifique) d'une machine donnée.
- En enrichissant le mélange frigorigène en circulation avec le composant le plus volatil, celui qui a la plus grande pression de vapeur, on peut accroître la puissance thermique de la machine lorsqu'elle fonctionne à basse température.
- On peut enfin, en utilisant un seul compresseur, donc en ne mettant en oeuvre dans la machine que deux pressions, produire du froid à plusieurs niveaux de température.

1-1- Mélanges zéotropes binaires

Ils comportent deux composants de pression de vapeur différentes.

Soit un zéotrope binaire formé d'un composant A, plus volatil, donc de pression de vapeur plus grande, et d'un composant B, moins volatil, de pression de vapeur plus faible. Etudions le comportement d'un de ces mélanges dans un diagramme où les abscisses représentent le titre massique du mélange en constituant A et les ordonnées la température (diagramme composition-température) (figure 4)

Soit x la composition de ce mélange soumis à la pression constante p. On admet qu'à tout moment ce mélange est dans un état d'équilibre thermique. Dans l'état I, à température  $\theta_1$  suffisamment basse, le mélange est entièrement liquide. Chauffons-le.

Le titre massique en constituant A d'un mélange se définit par une masse  $m_A$  de constituant A et une masse  $m_B$  de constituant B, est par définition  $x_A = \frac{m_A}{m_A + m_B}$ . On le mesure généralement par  $x_A$  le titre massique en A du mélange liquide et par  $y_A$  le titre massique en A du mélange vapeur.

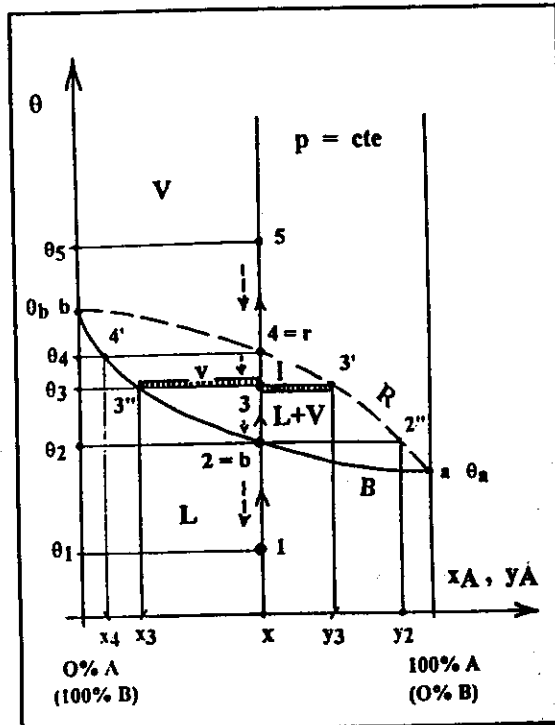


Figure 4 - Diagramme température - titre massique d'un mélange zéotrope sous pression constante. L = domaine du liquide ; V = domaine de la vapeur ; L + V = domaine du liquide mêlé de la vapeur

Lorsqu'on atteint la température  $\theta_2$  la première bulle de vapeur apparaît.  $\theta_2$  est la température d'ébullition commençante ou température "de bulle" et le point 2 est le "point de bulle", b de ce mélange, de composition x donnée, et pour cette pression particulière, p. En examinant la composition de la phase gazeuse, on trouve que celle-ci est beaucoup plus riche en composant le plus volatil, A, que le liquide qui lui a donné naissance :

$$y_2 > x_2 = x.$$

A température plus élevée  $\theta_3$  le mélange est partiellement vaporisé et comporte :

- une phase vapeur, v, de composition  $y_3$  toujours supérieure à x mais inférieure à  $y_2$ . Son importance massique relative est donnée par le rapport des segments  $33''/3'3''$
- une phase liquide, l, de composition  $x_3 < x$  et d'importance relative donnée par  $33''/3'3''$

A la température  $\theta_4$ , la dernière gouttelette de liquide, de composition  $x_4 < x$ , disparaît. Tout le mélange est maintenant à l'état de vapeur dont la composition  $y_4 = x$ . Le "glissement de température" au cours de la vaporisation de ce mélange donné sous la pression particulière p, est  $\Delta\theta = \theta_4 - \theta_2$ . Le point 4 est le point de fin de vaporisation du mélange

En continuant d'apporter de la chaleur, on chauffe le mélange gazeux jusqu'à  $\theta_5$  par exemple (point 5). La vapeur est alors surchauffée de la valeur  $\Delta\theta_{sc} = \theta_5 - \theta_4$ .

En procédant à rebours et en refroidissant la vapeur toujours sous la même pression  $p$ , on voit apparaître, en 4, la première phase liquide justifiant le nom de "point de rosée" donné à ce point particulier  $4 = r$  pour le mélange de composition  $x$  sous la pression  $p$

Au cours de la condensation du mélange zéotrope sous la pression constante  $p$ , la température s'abaisse de  $\theta_4$  à  $\theta_2$ . On retrouve, mais dans l'autre sens, le même glissement de température  $\Delta\theta$  que celui rencontré au cours de la vaporisation sous la même pression.

En refroidissant encore le liquide formé, par exemple jusqu'en  $\theta_1$ , on obtient un mélange liquide sous-refroidi dont le sous-refroidissement est alors  $\Delta\theta_{sr} = \theta_2 - \theta_1$ .

En examinant ce qui se passe pour les mélanges zéotropes A + B de compositions différentes de celle que nous venons de considérer, on trouve que les points de bulle se placent sur une même courbe : la "courbe de bulle" B correspondant à la pression  $p$ .

De même les points de rosée se placent sur une autre courbe : la "courbe de rosée" R correspondant à la pression  $p$ .

Ces deux courbes se rejoignent sur les axes aux points a et b. La température du point a,  $\theta_a$  est la température de saturation du composant le plus

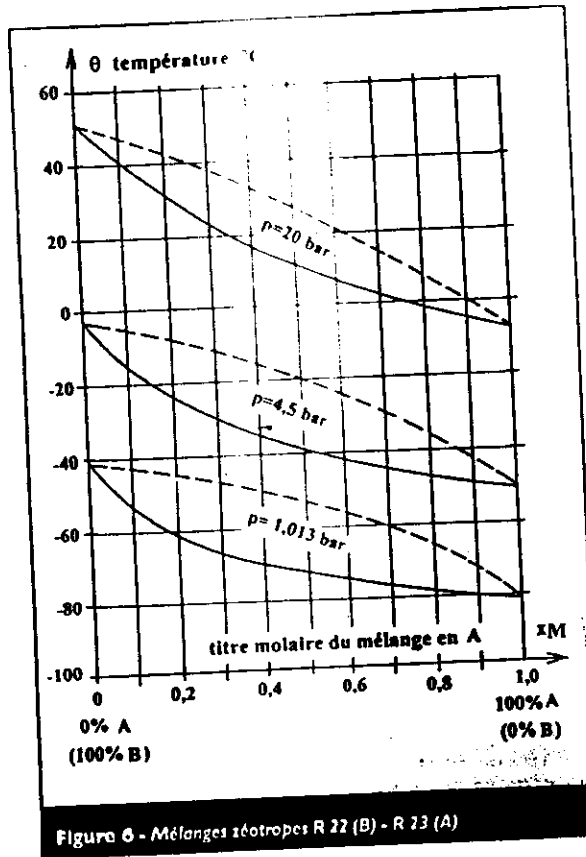


Figure 6 - Mélanges zéotropes R 22 (B) - R 23 (A)

volatil, A, sous la pression  $p$ , celle du point b,  $\theta_b$ , est la température de saturation de l'autre composant, B, sous la même pression.

L'aire L qui se trouve au dessous de la courbe de bulle correspond aux mélanges liquides sous-refroidis. L'aire V qui se trouve au dessus de la courbe de rosée correspond aux mélanges vapeurs surchauffés. L'aire L+V, intérieure au "fuseau" délimité par les courbes B et R, correspond aux mélanges liquide + vapeur en équilibre.

Si l'on adopte une représentation différente, en portant en ordonnée non point la température mais la pression  $p$ , le paramètre étant ici la température  $\theta = cte$ , les positions du faisceau, celles des courbes de "bulle" et de "rosée" et celles des aires sont, en quelque sorte, inversées (figure 5).

Lorsque, pour la première représentation  $\theta = f(x)$ , la pression change, on observe une évolution et une déformation du "fuseau" formé par les courbes B et R (figure 6)<sup>(2)</sup>.

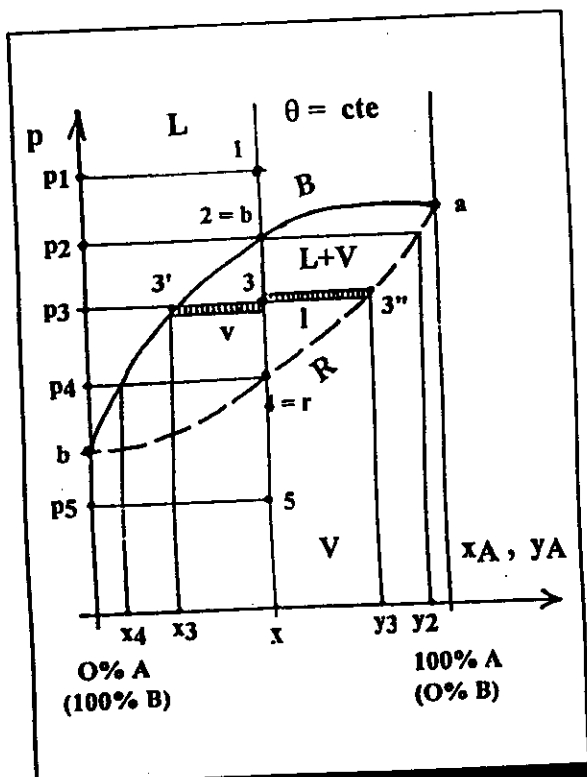


Figure 5 - Diagramme pression - titre massique d'un mélange zéotrope à température constante. L = domaine du liquide ; V = domaine de la vapeur ; L+V = domaine du liquide mélangé à de la vapeur

(2) - Il s'agit ici de mélanges de R 23 (CHF<sub>3</sub>), ce CHF, représenté ici par A, est le composant le plus volatil (température d'ébullition -82,2° C), et de R 22 (CHF<sub>2</sub>Cl), HCFC représenté ici par B, dont la température d'ébullition est beaucoup plus haute : -40,8° C. En abscisse de ce diagramme on a porté les fractions molaires de A (R 23) et non les fractions (ou titres) massiques ce qui est un peu différent.

(3) - Généralement le logarithme de la pression : log p  
 (4) - Et pour les mélanges azéotropes qui se comportent de la même façon

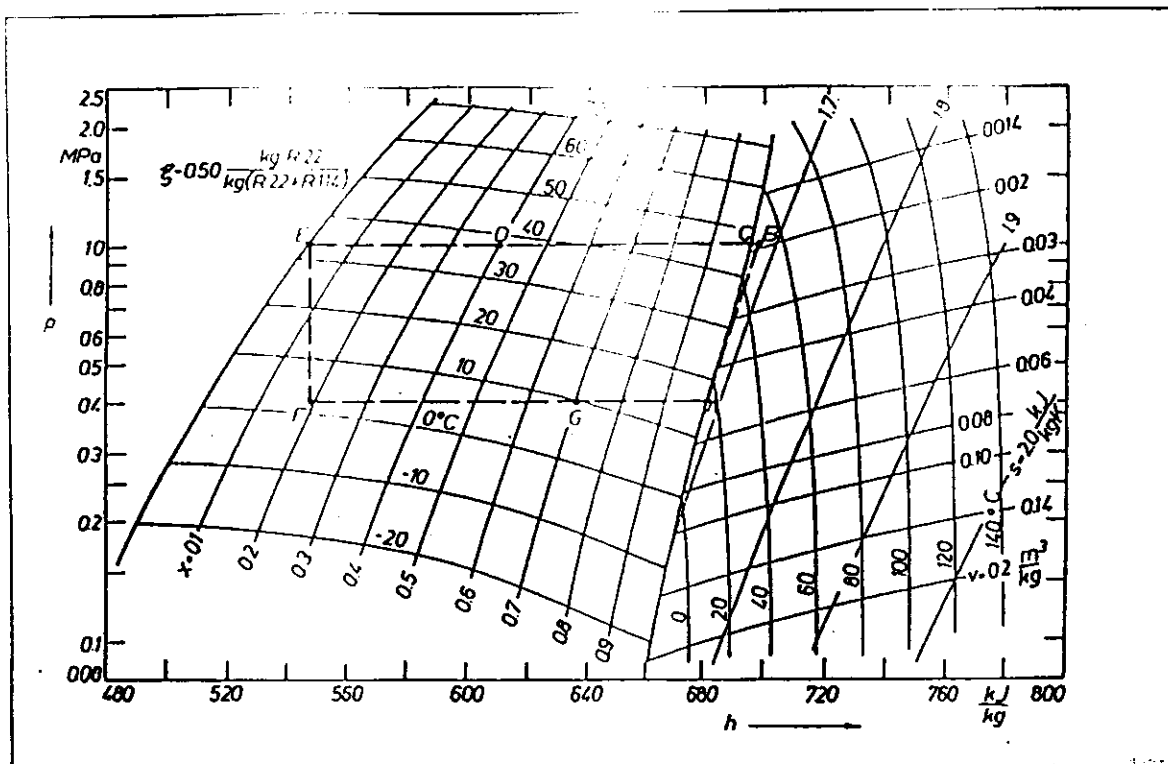


Figure 7 - diagramme enthalpique p-h du mélange zéotrope R 22  
 - R 114 x R22 = 0,5.  
 Un cycle à compression monoétagé y est tracé.  
 (Source : Kraus & Vallmer)

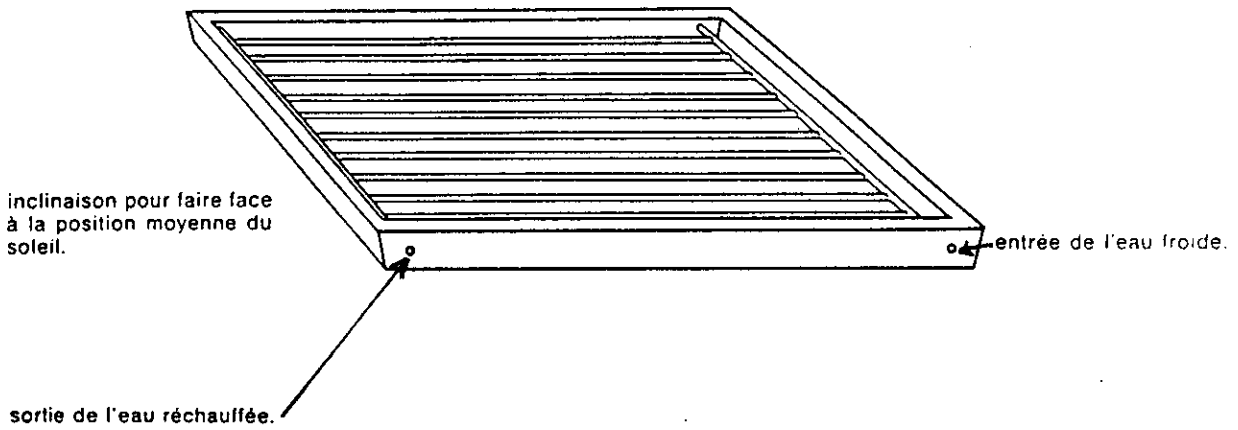
L'aspect général des diagrammes enthalpiques h-p (enthalpie spécifique, h, en abscisse et pression<sup>(1)</sup> en ordonnée) des mélanges zéotropes binaires est voisin de celui des diagrammes des corps purs. La différence est surtout marquée dans la forme présentée par les isothermes dans le domaine liquide + vapeur. En effet, celles-ci sont horizontales pour les corps purs<sup>(2)</sup> tandis qu'elles sont inclinées sur l'horizontale, avec une pente négative plus ou moins importante, pour les mélanges zéotropes. La figure 7, correspondant au mélange zéotrope R 12 (CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) - R 114 (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>), (naguère étudié mais depuis abandonné car ces fluides sont des CFC), illustre bien ce fait.

On note que le glissement de température d'un mélange binaire est, d'une façon générale, d'autant plus important que les composants ont des pressions de vapeur (ou des températures d'ébullition) plus différentes. Ainsi la figure 6 montre que pour le mélange R22 / R 23 (écart des température d'ébullition de l'ordre de 40 K), et la composition molaire 50% / 50% prise à titre d'exemple, les glissements de température varient, selon la pression considérée de 15 à 20K ce qui est important.

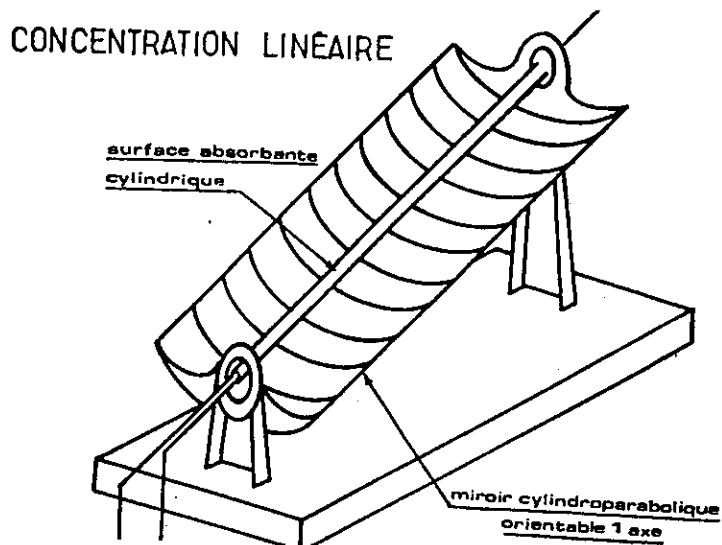
**ANNEXE 3**

**MOYENS DE CAPTATION DE  
L'ENERGIE SOLAIRE**

Les capteurs thermiques



Les capteurs plans



Les capteurs à concentration



**Annexe 3.2 Contenu énergétique des plantes**

Les plantes, à l'état parfaitement sec, ont un pouvoir calorifique moyen de l'ordre de 5800 Kcal/Kg (de matière sèche) soit environ 50% de pouvoir calorifique de 1 Kg de gas-oil; naturellement, la présence d'eau peut réduire très sensiblement ce pouvoir calorifique. Le tableau ci dessous donne quelques valeurs:

**Pouvoir calorifique de quelques plantes en Kcal/Kg**

Type de plante	Partie de la plante	% H <sub>2</sub> O	Kcal/Kg
canne à sucre	bagasse	12	3860
canne à sucre	bagasse	52	2220
bambou	canne	11	3925
noix de coco	coque	13	4010
pin	bois	12	4230
pin	écorce	0	4790
séquoia	écorce	0	4425
graine oléagineuse	graine	-	4775

Source: Alich et Himman, 1974

Le tableau ci-dessous précise le volume de gaz méthanique (55 à 75% de CH<sub>4</sub>) obtenu par fermentation en laboratoire.

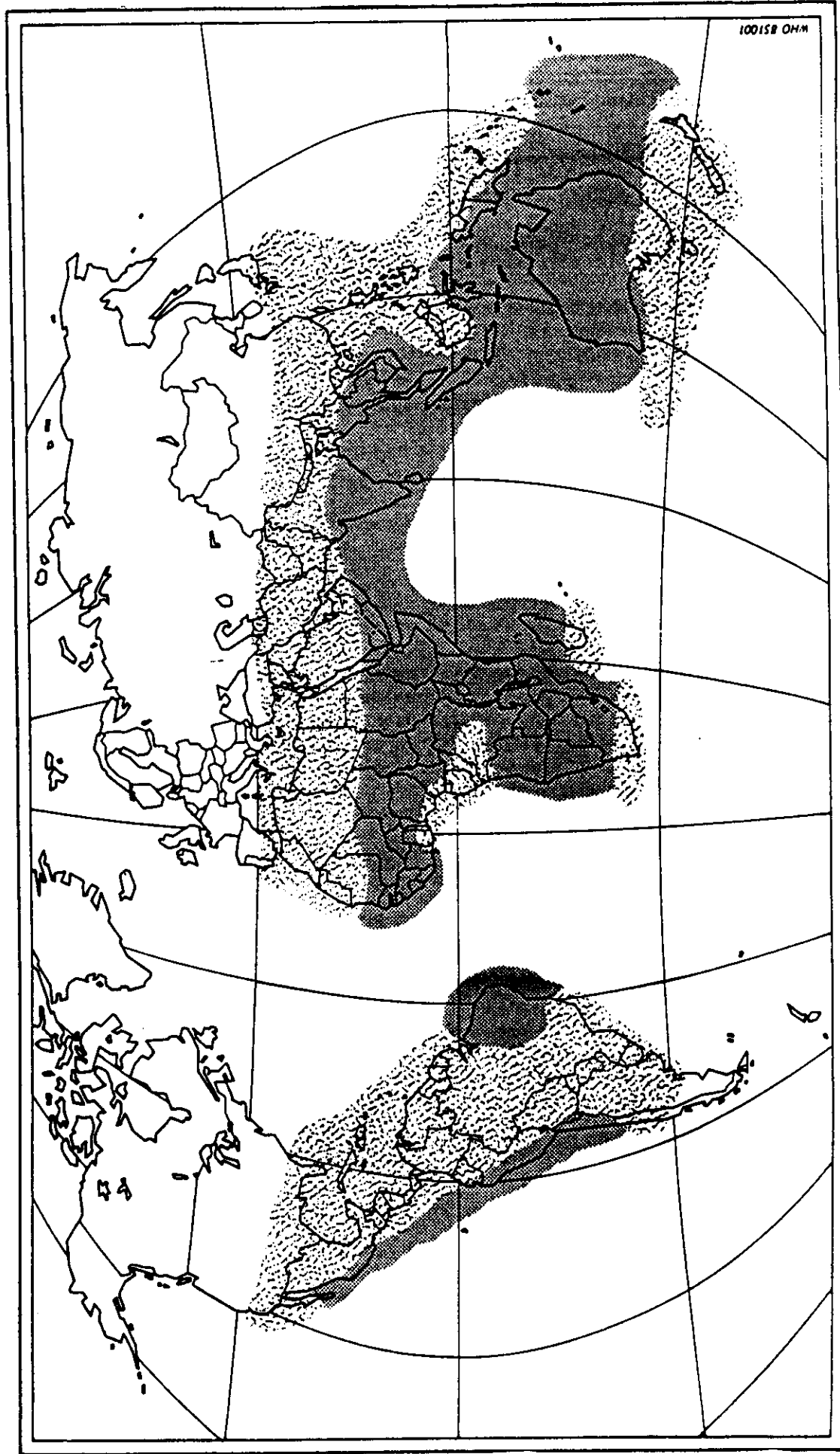
<b>Production de gaz, en litre par kilogramme de matière sèche de divers déchets végétaux (d'après G. DUCCELLIER)</b>			
paille de blé tendre	300	graine de coton	357
paille de blé dur	318	paille de seigle	315
paille d'avoine	368	fanes d'arachides	298
paille d'orge	380	fanes de lentilles	292
paille de riz	360	fanes de pois chiches	297
tige de maïs	295	farine de feuillus	222
tige de sorgho	278	sisal	358
poussière de minoterie	345		

**ANNEXE 4**

**CONSERVATION DES VACCINS  
PAR LE PHOTOVOLTAIQUE**

REGIONS DU MONDE DANS LEQUELLES LE RAYONNEMENT SOLAIRE (DU PLUS MAUVAIS MOIS DE L'ANNEE) EST COMPRIS ENTRE

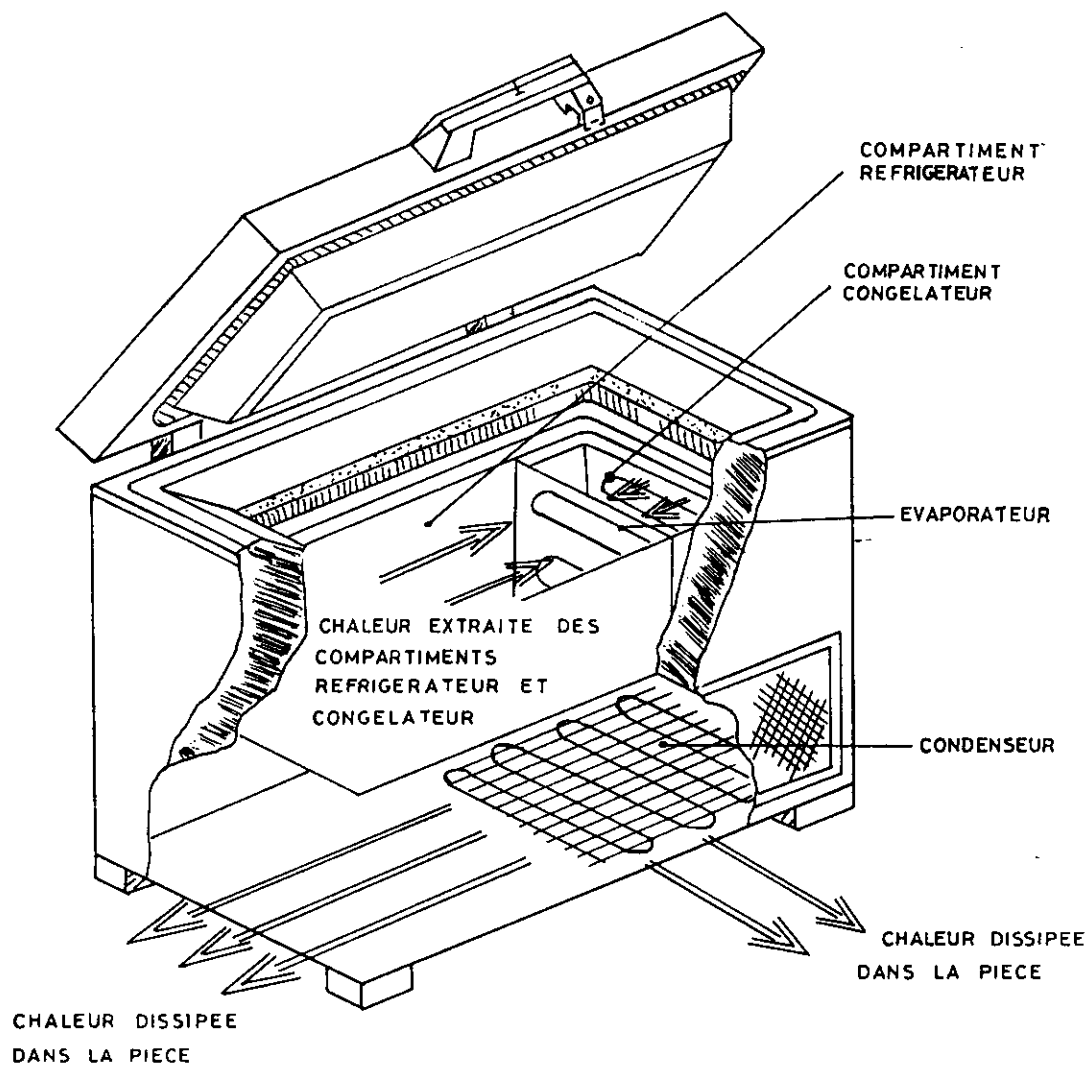
3,5 - 5,1 KWH/M<sup>2</sup>/JOUR ET 5,2 - 7,0 KWH/M<sup>2</sup>/JOUR



Rayonnement de 5,2 à 7,0 kwh/m<sup>2</sup>/jour.  
Convient au système B.

Rayonnement de 3,5 à 5,2 kwh/m<sup>2</sup>/jour.  
Convient au système A.

Rayonnement inférieur à 3,5 kwh/m<sup>2</sup>/jour.  
S'adresser au fabricant.



**Figure 1.1** L'ÉCHANGE DE CHALEUR DANS UN REFRIGERATEUR

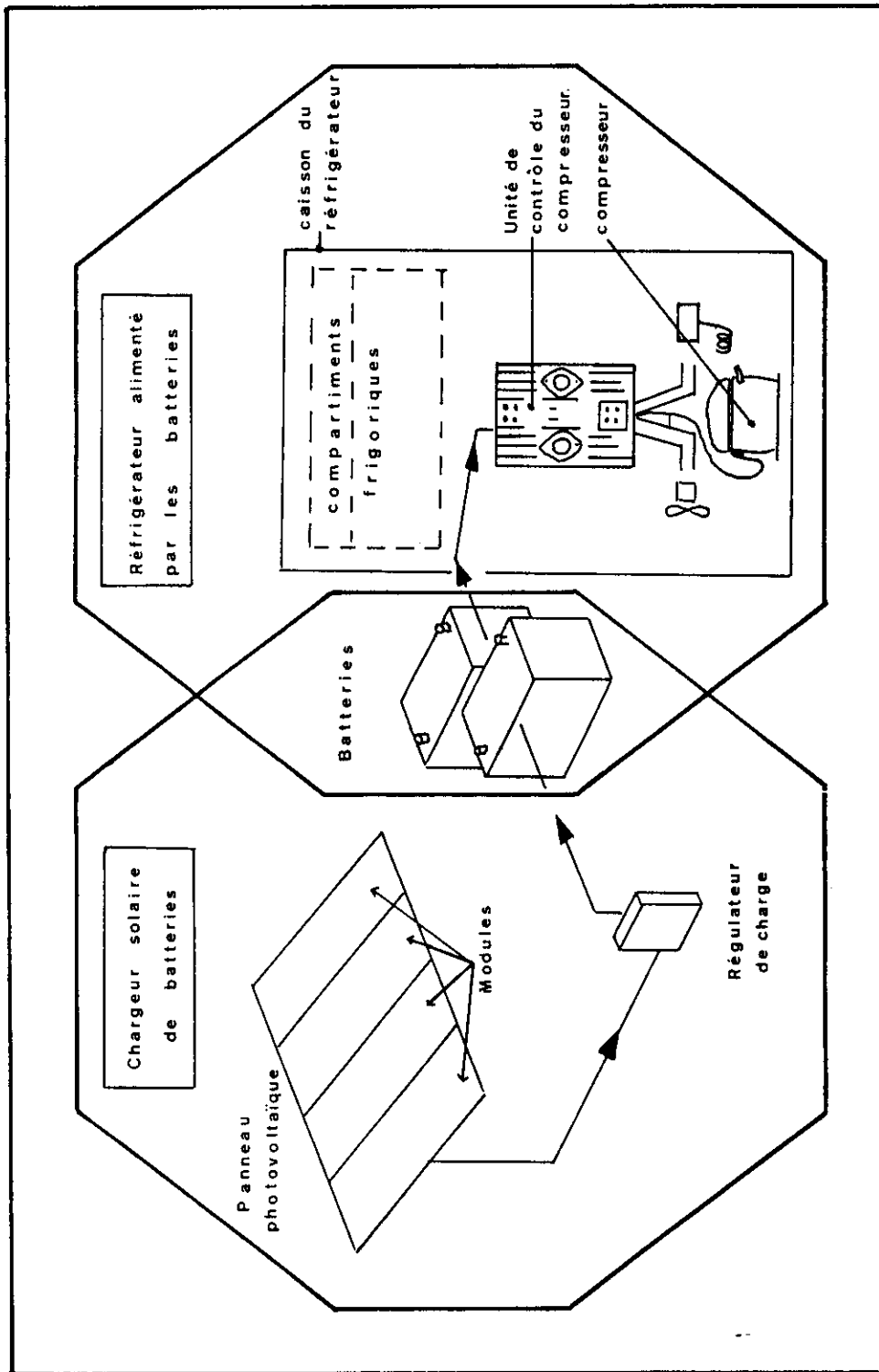


figure 1.2

SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REFRIGERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

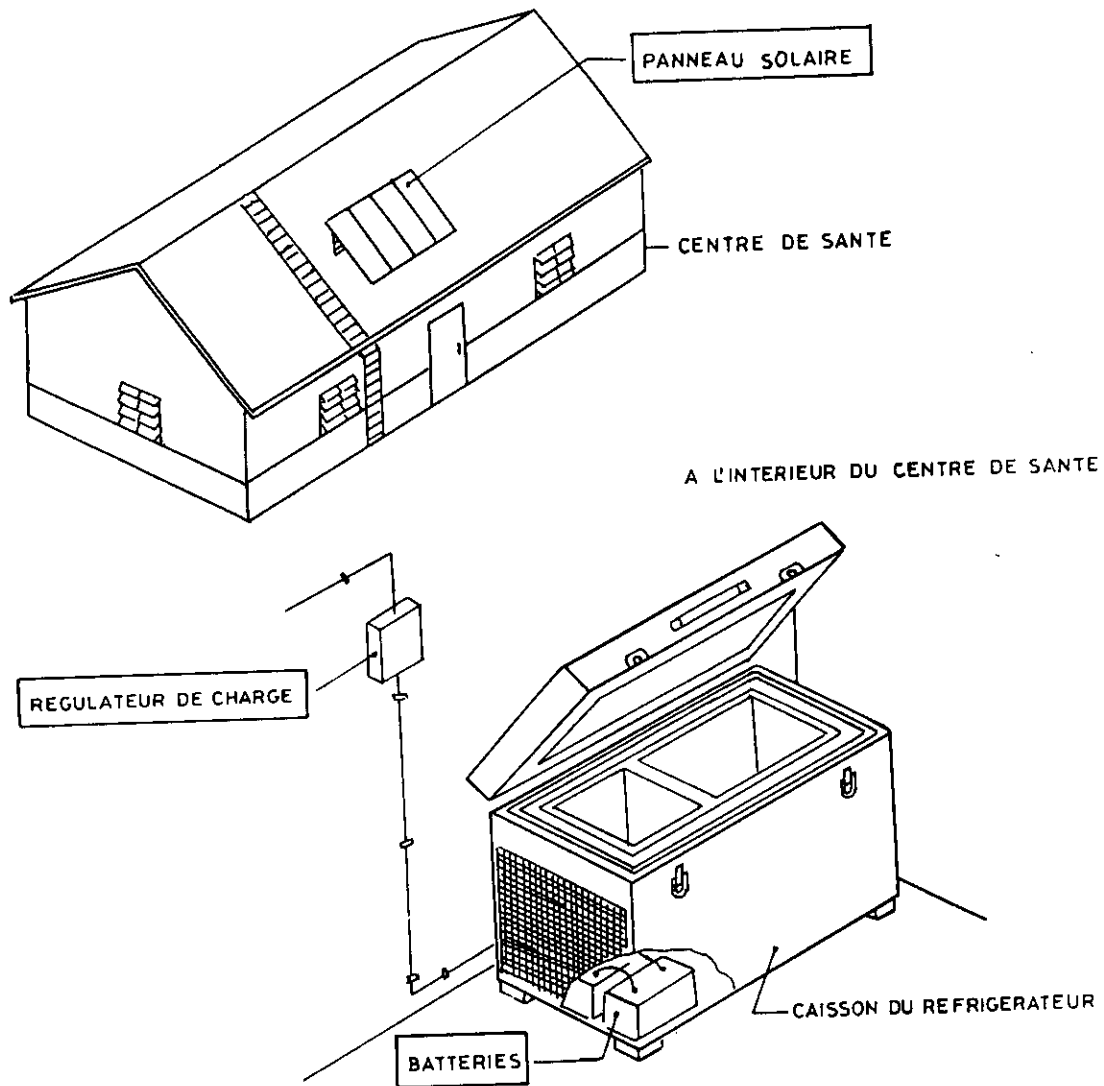
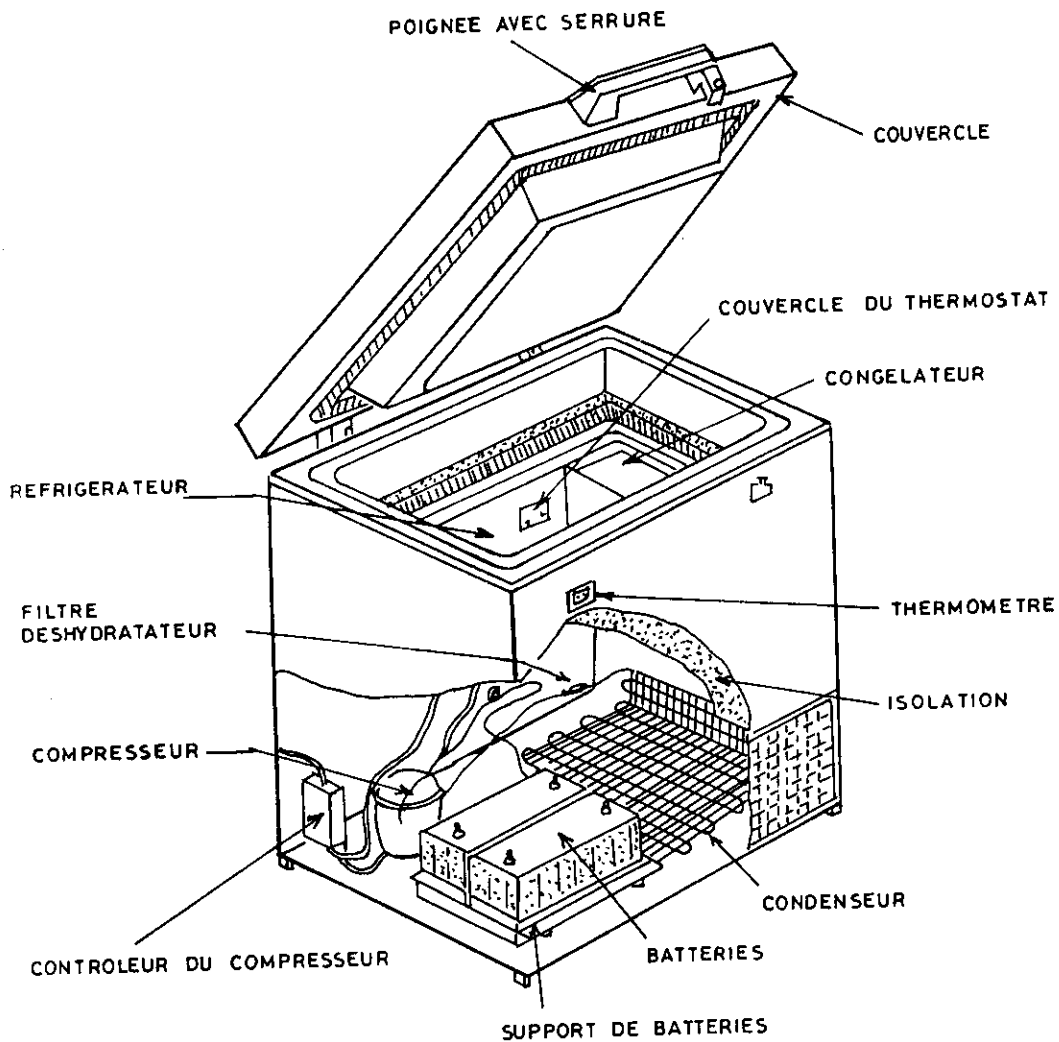


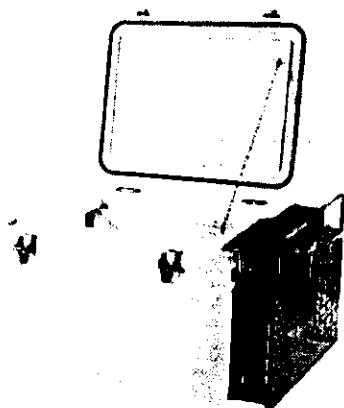
figure 1.3      COMPOSANTS DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE SOLAIRE



**figure 1.4** COMPOSANTS D'UN REFRIGERATEUR PHOTOVOLTAIQUE TYPIQUE







**CODE**

**PIS E3/21**

**DESIGNATION**

Réfrigérateur & congélateur pour briquettes, à absorption, Classe B. Modèle RCW 42 EG (P) (9205141 01)

**NOM ET ADRESSE DU FABRICANT**

Electrolux (Luxembourg)  
4, rue de la Frontière  
L-9412 Vlanden  
Luxembourg  
Téléphone : 84595; Téléc : 3468 ELUX VI;  
Fax : 848 11-300

**Dimensions**

Volume brut fabricant  
Volume stockage vaccin  
Dimensions hors tout (HxLxL)  
Volume/poids brut à l'expédition

	REFRIGERATEUR	CONGELATEUR	UNITE
	40	1,6	litres
	24	0	litres
	50x56x82	++	cms.
	0,33/50,0	--	kgs.

**Performance à**

Briquettes congelées, avec vaccin  
Briquettes congelées, sans vaccin  
Températures intérieures, minimale  
Températures intérieures, maximale  
Autonomie en cas de panne de courant  
Consommation d'énergie en 24 heures :  
    électricité  
    pétrole  
    gaz PL

	32	43	32	43	degrés C.
	--	--	0,6/24	0,5/24	kg/h.
	--	--	++ --	++	kg/h.
	+2	+4	++	++	degrés C.
	+4	+6	++	++	degrés C.
	12,5	6,5	++	++	heures
	1,0	1,6	++	++	kwh
	--	--	--	--	litres
	0,13	0,20	--	--	kgs

Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15 degrés C) : minimale +4; maximale +6 degrés C.

**ENERGIE NECESSAIRE**

Source d'énergie CA220 V/50Hz ou gaz PL

**PIECES DETACHEES/10 UNITES**

	Numéro	Quantité	\$EU/1
Dispositif sécurité flamme	2922006-01/730	3	10,62
Elément chauffant électrique (CA220V)	2929374-02/870	2	12,85
Thermostat à gaz	2929363-00/730	2	30,00
Joint de porte ou fermeture couvercle	2928510-01/510	1	9,05
Buse brûleur (butane, 30 mbar)	2928787-06/710	2	9,85
Thermocouple	2928742-01/730	2	4,86

**OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES**

Révision le : 28/2/89

Compte rendu des essais : CATR.A.9960

Satisfont à la norme E3/RF.2, Classe B de l'OMS/UNICEF.

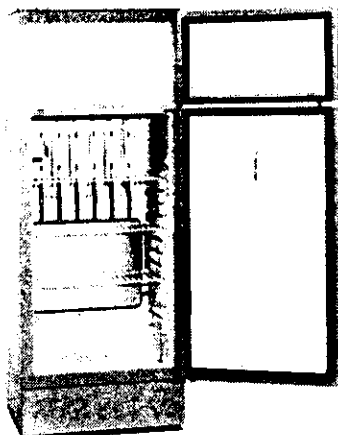
Accessoires : Porte(s) verrouillable(s), thermomètre extérieur, buse de brûleur 30 mbar. Cet appareil peut congeler des accumulateurs de froid (capacité totale : 4x0,3 litre). (Types : E5/01, E5/02, E5/06, E5/08, E5/10 & E5/12). Disponible également avec bac à glace.

Paroi amovible entre compartiment réfrigérateur et compartiment congélateur également fournie.

RCW42EG (C) disponible avec éléments chauffants 12 volts et 120 volts. FOB Luxembourg.

**PRIX FOB 1989**

Quantité/Prix :	1-39	ECU 697,00 (\$EU 766,78)
	40-99	ECU 662,00 (\$EU 728,27)
	100+	ECU 629,00 (\$EU 692,00)



**CODE**  
Référence UNICEF

**PIS E3/28**  
11-216-10

**DESIGNATION**

Réfrigérateur et congélateur, à absorption, Classe B.  
Modèle V 240 KE, pétrole et électricité.

**NOM ET ADRESSE DU FABRICANT**

Sibir Ltd  
Munchwiesen 5  
P.O. Box 362  
8952 Schlieren, Suisse  
Téléphone : 01-730 70 70; Télex : 827 713 SIBR CH;  
Fax : 01 730 70 65

Dimensions	REFRIGERATEUR		CONGELATEUR		UNITE
	32	43	32	43	
Volume brut fabricant	240		33		litres
Volume stockage vaccin	68		30		litres
Dimensions hors tout (HxLxL)	151x59x68		++		cms.
Volume/poids brut à l'expédition	0,88/118,0		--		m3/kg
<b>Performance à</b>					<b>degrés C.</b>
Briquettes congelées, avec vaccin	--	--	2,9/24	3,4/24	kg/h.
Briquettes congelées, sans vaccin	--	--	++	++	kg/h.
Températures intérieures, minimale	+3	+3	-21	-15	degrés C.
Températures intérieures, maximale	+6	+7	-21	-15	degrés C.
Autonomie en cas de panne de courant	[11]	6	++	4	heures
Consommation d'énergie en 24 heures :					
électricité	4,3	5,2	--	--	kwh.
pétrole	0,9	1,0	--	--	litres
gaz PL	--	--	--	--	kgs.

Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15 degrés C) : minimale 0; maximale +9 degrés C.

**ENERGIE NECESSAIRE**

Source d'énergie CA220V/50Hz ou Pétrole

**PIECES DETACHEES/10 UNITES**

	Numéro (Fabricant)	Référence (UNICEF)	Quantité	\$EU/1
Mèche	624 003	11-216-11	60	1,31*
Verre de lampe	B40 132	11-216-13	10	5,93*
Ecouvillon pour conduit d'évacuation	B30 103	11-216-15	20	11,83*
Élément chauffant électrique (CA220V)	B30.071.2	11-216-20**	2	18,73*
Mouchette	624.012	11-216-14	10	0,66*
Brûleur	624.010	11-216-12	--	23,04*

**OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES**

Révision le : 01/03/89. Compte-rendu des essais : CATR.A.9968,A.99112,A.9911. Satisfont à la norme E3/RF2, Classe B de l'OMS/UNICEF.

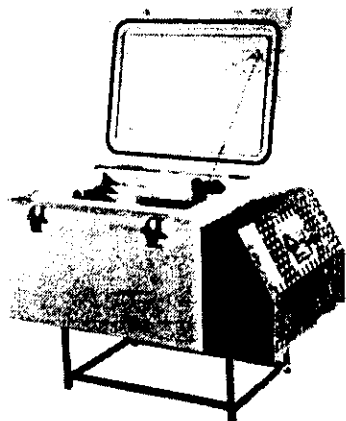
Autres tensions disponibles sur demande. Emballage type pour fret maritime (caisse en contre-plaqué). Accessoires : Porte(s) verrouillable(s); thermomètre extérieur; écouvillon. Equipé d'un stabilisateur pour utilisation dans des pays où le climat présente de fortes variations de température diurne/nocturne. Livré avec 5 mèches de rechange, 3 verres de lampe de rechange, 3 diffuseurs de rechange, 5 mouchettes, 1 collerette et 4 bacs à glace.

**PRIX FOB 1989**

Quantité/Prix : 1/\$EU 1 076,98\*

\* Prix UNICEF.

\*\* Voir dans catalogue UNICEF numéro de pièce pour modèle antérieur (S2325).



**CODE**

**PIS E3/31**

**DESIGNATION**

Réfrigérateur & congélateur pour briquettes, solaire PV, à compression, Classe B. RCW 42 DC Electrique (991 23 03 01)

**NOM ET ADRESSE DU FABRICANT**

Electrolux (Luxembourg)  
4, rue de la Frontière  
L-9412 Vlanden, Luxembourg  
Téléphone : 84595; Téléc : 3468 ELUX VI;  
Fax : 848 11-300

Dimensions	REFRIGERATEUR		CONGELATEUR		UNITE
	Volume brut fabricant	27*	43	--*	43
Volume stockage vaccin	14*	--	--*	2,4/24	litres
Dimensions hors tout (HxLxL)	92x55x50*	--	--*	++	cms.
Volume/poids brut à l'expédition	0,39/60,0*--*	--	kgs.	++	
<b>Performance à</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>degrés C.</b>
Briquettes congelées, avec vaccin	--	--	1,9/24	2,4/24	kg/h.
Briquettes congelées, sans vaccin	--	--	++	++	kg/h.
Températures intérieures, minimale	+2,8	+4,2	++	++	degrés C.
Températures intérieures, maximale	+5,3	+7,6	++	++	degrés C.
Autonomie en cas de panne de courant	5,0	2,0	3,8	1,7	heures
Consommation d'électricité en 24 heures :					
avec congélation de briquettes	--	--	0,75	[1,0]	kwh.
sans congélation de briquettes	0,5{0,2}	0,7{0,3}	--	--	Kwh.

Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15 degrés C) : minimale +1,7; maximale +6,5 degrés C.

**ENERGIE NECESSAIRE**

Source d'énergie CC12V

**PIECES DETACHEES/10 UNITES**

	Numéro	Quantité	\$US/1
Thermostat pour réfrig. électrique	2922007-06/810	3	13.71
Thermostat pour congélateur	2922007-07/810	3	10.00
Compresseur pour réfrig. électrique	2928567-01/810	1	423.00

**OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES**

Révision le : 28/02/89

Compte rendu des essais : GET-SOL.REF/1.86;

Satisfait à la norme E3/RF.4, Classe B de l'OMS/UNICEF.

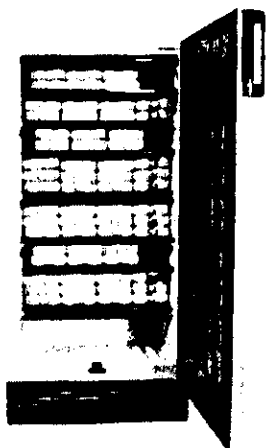
Disponible en 24 volts sur demande. FOB Luxembourg.

Accessoires : Porte(s) verrouillable(s); thermomètre à cristaux liquides intérieur. Comporte un compartiment pour congélation accumulateurs de froid (capacité : 8x0,3 l ou 4x 0,6 l).

**PRIX FOB 1989**

Quantité/Prix :	1-39	ECU 1 017,00 (\$EU 1 118,81)
	40-99	ECU 966,00 (\$EU 1 062,71)
	100+	ECU 916,00 (\$EU 1 007,70)

\* Dimensions valables dans les deux cas, le thermostat permettant d'utiliser l'appareil comme réfrigérateur/congélateur pour briquettes OU comme congélateur bahut.



<b>CODE</b>	<b>PIS E3/26</b>
Référence UNICEF	11-516-20

**DESIGNATION**  
 Congélateur à compression pour briquettes, Classe A.  
 Modèle TFW 791 (922 58 02 01)

**NOM ET ADRESSE DU FABRICANT**  
 Electrolux (Luxembourg)  
 4, rue de la Frontière  
 L-9412 Vlanden  
 Luxembourg  
 Téléphone : 84595; Téléc : 3468 ELUX VI;  
 Fax : 848 11-300

Dimensions	REFRIGERATEUR		CONGELATEUR		UNITE
Volume brut fabricant	--	--	234	--	litres
Volume stockage vaccin	--	--	0	--	litres
Dimensions hors tout (HxLxL)	--	--	125x60x68	--	cms.
Volume/poids brut à l'expédition	--	--	0,65/74,0	--	kgs.
<b>Performance à</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>degrés C.</b>
Briquettes congelées, avec vaccin	--	--	++	++	kg/h.
Briquettes congelées, sans vaccin	--	--	30/14	36/21	kg/h.
Températures Intérieures, minimale	--	--	-22	-27	degrés C.
Températures Intérieures, maximale	--	--	-18	-21	degrés C.
Autonomie en cas de panne de courant	--	--	3,4	2,6	heures
Consommation d'énergie en 24 heures :					
électricité	--	--	1,8	2,9	kwh.
pétrole	--	--	--	--	litres
gaz PL	--	--	--	--	kgs.

Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15 degrés C) : minimale -27; maximale +13 degrés C.

**ENERGIE NECESSAIRE**

Source d'énergie CA220V/50Hz

**PIECES DETACHEES/10 UNITES**

	Numéro (Fabricant)	Référence (UNICEF)	Quantité	\$EU/1
Thermostat pour congélateur	2940091-00/8	11-537-65	3	16,65*
Démarrateur du compresseur	2912087-05/9	11-537-50	3	3,66*
Condenseur réfrigérateur compresseur	2912146-00/4	11-537-40	1	9,65*
Compresseur, Danfoss FR8.5B	2100251-10/3	11-537-41	1	73,58*

**OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES**

Révision le : 28/02/89

Compte rendu des essais : UNIVALLE.REF.1

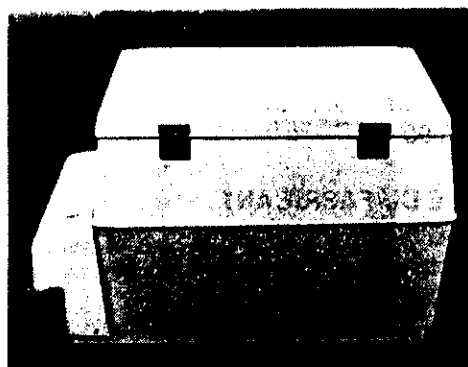
Satisfait à la norme E3/FR.2, Classe A de l'OMS/UNICEF.

Capacité de stockage de 50 litres pour les accumulateurs de froid précongelés. FOB Suède.

**PRIX FOB 1989**

Quantité/Prix : 1/\$EU 1 234,95\*

\* Prix UNICEF.



CODE

PIS E3/34

**DESIGNATION**

Réfrigérateur & congélateur, à compression, Classe B.  
Modèle E-3

**NOM ET ADRESSE DU FABRICANT**

Polar Products  
2808 Oregon Court, Building K-4  
Torrance, California 90503  
Etats-Unis d'Amérique  
Téléphone : 213 320 3514; Télax : 494 0451 POLARSA;  
Fax : 213 320 3135

Dimensions	REFRIGERATEUR	CONGELATEUR	UNITE		
Volume brut fabricant	100*	27*	litres		
Volume stockage vaccin	30*	13*	litres		
Dimensions hors tout (HxLxL)	70x110x66	++	cms.		
Volume/poids brut à l'expédition	0,8/92,0	--	kgs.		
<b>Performance à</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>degrés C.</b>
Briquettes congelées, avec vaccin	--	--	2,19/17	2,1/14	kg/h.
Briquettes congelées, sans vaccin	--	--	++	++	kg/h.
Températures intérieures, minimale	+2	+1	-19	-21	degrés C.
Températures intérieures, maximale	+8	+8	-12	-7	degrés C.
Autonomie en cas de panne de courant	14	8	--	--	heures
Consommation d'énergie en 24 heures :					
électricité	1,2	3,6	--	--	kwh.
pétrole	--	--	--	--	litres
gaz PL	--	--	--	--	kgs.

Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15 degrés C) : minimale -1; maximale +9 degrés C.  
Nombre heures électricité minimum nécessaires par 24 h : 14 h. à 43 degrés C.

**ENERGIE NECESSAIRE**

Source d'énergie CA220V/50Hz

**PIECES DETACHEES/10 UNITES**

	Numéro	Quantité	\$EU/1
Thermostat pour réfrig. électrique	E115	3	22,00
Compresseur, Danfoss 2660	-	1	85,00

**OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES**

Révision le 15/04/89

Compte rendu des essais : -

Satisfait à la norme E3/RF.1, Classe B de l'OMS/UNICEF.

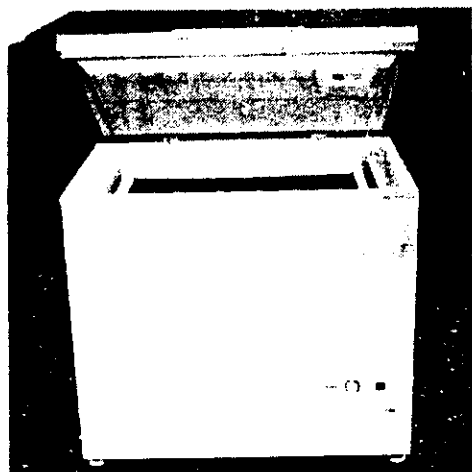
Existe également en version 110 volts (60 Hz).

Accessoires : Porte(s) verrouillable(s). Fourni avec 4 bacs à glace.

**PRIX FOB 1989**

Quantité/Prix :	1	\$EU 1 195,00
	2-9	\$EU 975,00
	10-19	\$EU 896,00

\* Paroi intérieure mobile permettant de répartir le volume disponible selon les besoins. Volume brut max. : 127 litres.



**CODE**

**PIS E3/67**

**DESIGNATION**

Réfrigérateur à compression, Classe B.  
Modèle MK 202, gaine réfrigérante

**NOM ET ADRESSE DU FABRICANT**

Vestfrost A/S  
P. O. Box 2079  
Spangsbjerg mollevej 100  
DK 6075 Esbjerg 0, Danemark  
Téléphone: 4575 142 222; Télax: 54122 VEFRO DK;  
Fax: 75-142775

Dimensions	REFRIGERATEUR		CONGELATEUR		UNITE
	185	43	32	43	litres
Volume brut fabricant	185		--		litres
Volume stockage vaccin	129		--		litres
Dimensions hors tout (HxLxL)	85x68x92		--		cms.
Volume/poids brut à l'expédition	0,75/110,0		--		kgs.
<b>Performance à</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>32</b>	<b>43</b>	<b>degrés C.</b>
Briquettes congelées, avec vaccin	--	--	--	--	kg/h.
Briquettes congelées, sans vaccin	--	--	--	--	kg/h.
Températures intérieures, minimale*	0,0	-1,7	--	--	degrés C.
Températures intérieures, maximale*	+7,0	+6,8	--	--	degrés C.
Autonomie en cas de panne de courant	53	60	--	--	heures
Consommation d'électricité en 24 heures	0,46	1,12	--	--	kwh.
Réglage thermostat :					
énergie continue	6,5	8,5	--	--	
énergie intermittente	6,5	8,5	--	--	

Températures relevées essais jour/nuit (+43/+15 degrés C) : minimale -1,5; maximale +4,0 degrés C.

**ENERGIE NECESSAIRE**

Source d'énergie CA220V/50Hz  
Nombre heures électricité minimum nécessaires par 24 h : 8 h. à 43 degrés C. \_

PIECES DETACHEES/10 UNITES	Numéro	Quantité	\$EU/1
Démarrateur pour compresseur	02 70 38 101	3	--
Thermomètre extérieur	70 38 016	--	--
Compresseur, Danfoss TFS 4AT	03 65 38 015	1	--

**OBSERVATIONS ET ACCESSOIRES**

Révision le 01/05/89  
Compte rendu des essais : Vestfrost/Bureau Veritas 88/01  
Satisfait à la norme E3/RF.3, Classe B de l'OMS/UNICEF.

Accessoires : Plateau à vaccins, paniers, porte(s) verrouillable(s)

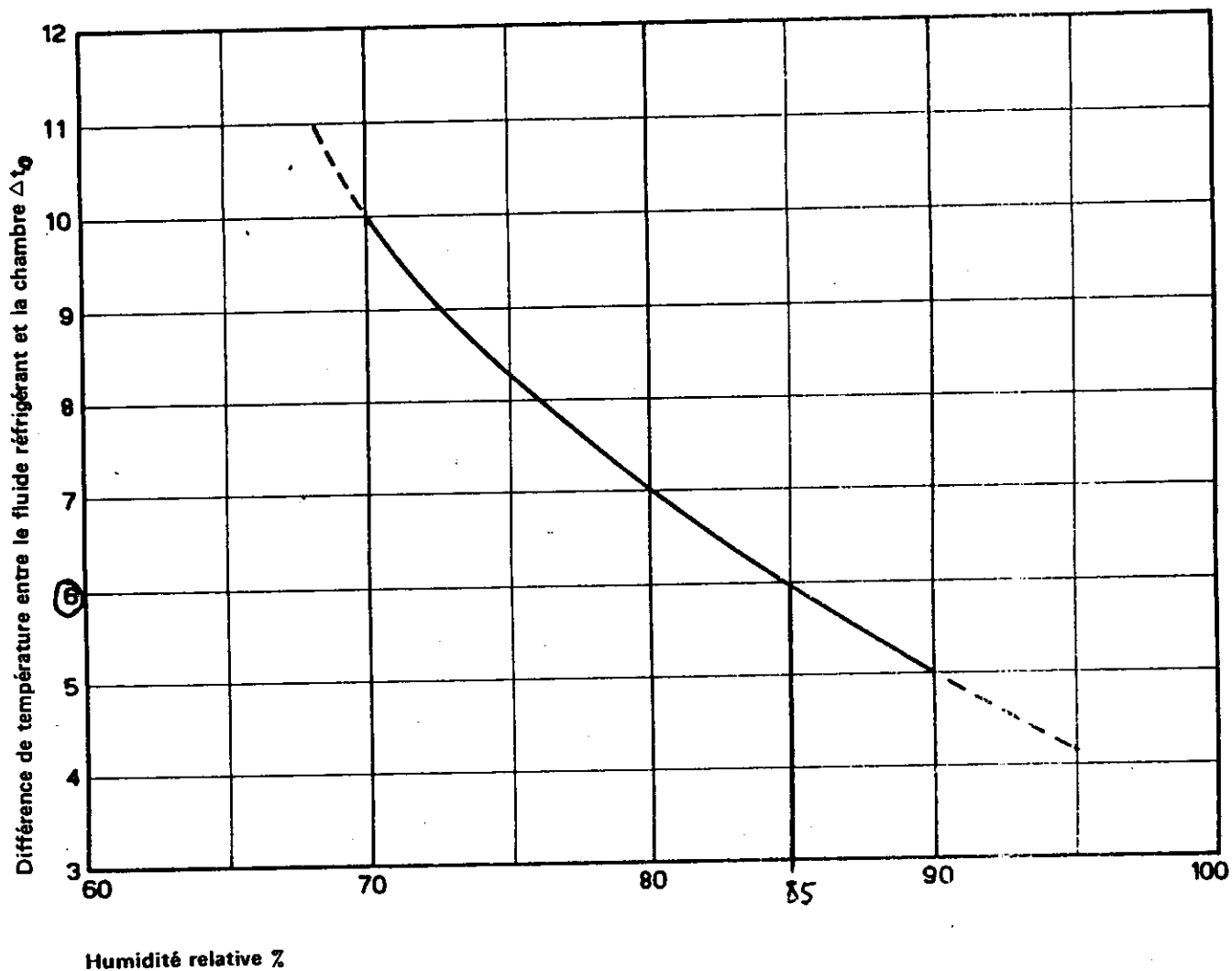
**PRIX FOB 1989**

Quantité/Prix : 1/DM 649,00 (\$EU 343,38)

\* Mesurée pendant test avec énergie intermittente (8h. d'électricité, 16 h. sans électricité).

**ANNEXE 5**

**CHAMBRE FROIDE EN  
SITE ISOLE**



$HR = 85\% \Rightarrow \Delta T_0 = 6^\circ C$

DIAGRAMME N° 1 - Choix du  $\Delta t$  en fonction de l'hygrométrie requise



