



# Amélioration de la production de froid en milieu rural côtier



**Jaime Moreno Serna**

**Laure Patouillard**

**Adrien Vincent**

**C4-1 : Energies renouvelables**

# Sommaire

## 1. Introduction

## 2. Une application existante

## 3. Autres technologies :

- **Biogaz/réfrigération par absorption**
- **Solaire/réfrigération par adsorption**
- **Axe de recherche : thermoacoustique**

## 4. Conclusions

# 1. Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Il s'agit d'énergies provenant de ressources que la nature renouvelle en permanence (eau, vent, soleil, matières organiques, chaleur de la Terre).

L'utilisation des énergies conventionnelles a pour conséquence un des principaux enjeux environnementaux : le réchauffement climatique, un défi à long terme pour toute la planète. Il est très important de favoriser, d'augmenter et de développer l'utilisation des énergies renouvelables pour arriver à un modèle de développement durable.

Les pays en développement sont des acteurs majeurs de l'enjeu énergétique mondial. Ils ont besoin de modèles efficaces qui permettent d'arriver à des niveaux de développement acceptable. Néanmoins, ces modèles ne peuvent pas être fondés sur les énergies uniquement fossiles comme ceux des pays du nord l'ont été. Les énergies renouvelables auront donc un rôle prépondérant (surtout dans des cas des zones de forte valeur environnementale, comme celles que nous allons étudier)

Tout au long de ce rapport nous allons décrire et analyser une application des énergies renouvelables : l'optimisation de la production de froid en milieu rural côtier dans une démarche de développement durable.

Nous présenterons dans un premier temps la solution adoptée par la communauté de Punta de Manabique au Guatemala, à savoir un système hybride solaire-éolien. Nous nous intéresserons ensuite à des solutions alternatives pour optimiser la production de froid à l'aide d'énergies renouvelables. Enfin la dernière partie proposera un bilan comparatif de toutes les solutions possibles.

Notre motivation pour ce mini-projet vient du fait qu'un d'entre nous va faire son PFE dans ce domaine là. Concrètement, il va participer au développement d'un outil d'analyse multicritère pour la détermination de la technologie la plus adéquat dans six centres différentes de la côte Pacifique du Guatemala.

## 2. Une application existante

### 2.1. La problématique

L'évolution de la société au Guatemala dans ces quarante dernières années a été dominée par un conflit civil qui a généré plusieurs dizaines de milliers de morts. De plus, ce conflit a empêché l'application de politiques pour la réduction de la pauvreté et l'amélioration des conditions de vie, dans de larges secteurs de la population.

Dans ce contexte là, la pêche artisanale représente 30% des produits pêchés, et représente la nourriture de presque deux cent mille personnes. Cependant, l'absence d'une chaîne de froid adéquat dans la majorité des centres a comme conséquence la perte d'environ 90% du produit, et des produits de qualité sanitaire médiocre.

Il a donc été envisagé de mettre en place une solution pour optimiser la production de froid pour les pêcheries guatémaltèques dans une démarche de développement durable. Les objectifs sont les suivants :

- *Améliorer la chaîne du froid*
- *Réutiliser les déchets de poissons pour produire des farines destinées à la vente aux fermes piscicoles*
- *Développer des sources d'énergie à partir d'énergies renouvelables*
- *Créer des emplois*

### 2.2. La solution

Le premier centre de traitement de la pêche avec des énergies renouvelables a été développé à *Punta de Manabique*, dans une réserve naturelle de l'Atlantique. Ce projet a trois points clefs : le premier, l'établissement d'une chaîne de froid avec des ER pour augmenter la durée de vie des produits et l'efficacité des activités de pêche. Ensuite, le traitement des déchets organiques dérivés de la transformation du poisson en les valorisant pour produire de la farine (avec un marché assuré par l'activité aquicole). Et pour finir, la formation de la population locale dans la maintenance de systèmes installés et la gestion des PME.

Ce projet a une multitude d'objectifs spécifiques : augmenter l'efficacité de la production de poissons et de produits dérivés pour augmenter le développement économique des populations locales, diminuer la pression de la pêche sur l'écosystème littoral (plus d'efficacité, moins de captures nécessaires), réduire l'impact des résidus organiques, fortifier le rôle des femmes dans la société (la gestion des centres est presque entièrement faite par des femmes), favoriser des modèles de développement propres, former des opérateurs capables pour la maintenance du centre, optimiser la durabilité financière du projet...

## Amélioration de la production de froid en milieu rural côtier

En ce qui concerne l'aspect technique du projet, la solution adoptée a plusieurs composantes :

**Une chambre froide** : une chambre de 12 m<sup>3</sup>, isolée avec du polystyrène (10 cm). Elle est dotée d'une machine frigorifique et d'un système de régulation de la température.

**Un système hybride éolienne-solaire pour la production d'électricité** composée de:

- Plaques photovoltaïques de 1200W
- Eolien de 1500W
- Batteries de 1500 A\*h à 45V DC
- Inverseur de 4500W à 220V

**Une machine de production de glace** : avec une capacité de 100 kg/jour

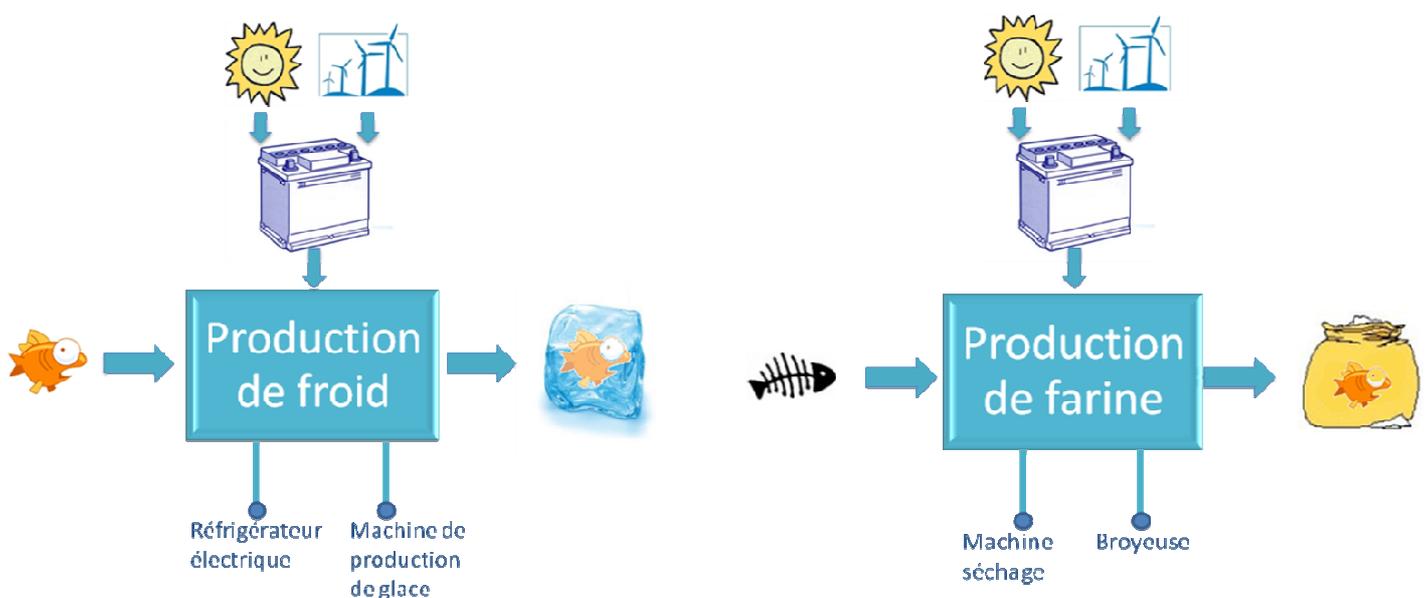
**Un réseau électrique auxiliaire** : pour l'alimentation électrique de l'école, les installations sanitaires et le foyer commun.

**Un système de traitement des déchets organiques** : pour le traitement des résidus et la production de farine. Il est composé de :

- Machine électrique de séchage de 1000W
- Machine broyeuse des résidus secs de 1200 W
- Zone de stockage de farine

**Un programme de formation** :

- 10 techniciens locaux pour la maintenance d'équipements de production de froid, et systèmes d'ER
- Formation des gestionnaires du centre en gestion de PME
- Contrat avec une société de maintenance pour assurer le fonctionnement des équipes pendant les périodes de formation



### 2.3. Coût de l'opération

Le budget du projet est présenté dans le tableau suivant. Le coût correspondant à l'achat et à l'installation des sources d'énergies renouvelables s'élèvent à 50 k€.

<b>Construction des batiments</b>	10700
<b>Equipement et matériel</b>	50325
<b>Personnel local</b>	27500
<b>Personnel expatrié</b>	1654
<b>Transport et dépenses diverses</b>	38353
<b>Total</b>	<b>129732</b>

### 2.4. Analyse des résultats

Premièrement il faut garder à l'esprit qu'au bout d'un an il est un peu tôt pour faire une évaluation de qualité du projet. En effet les projets de coopération internationale sont normalement évalués sur des bases de procédures déterminées à plus long terme.

On peut néanmoins établir un bilan et dégager des points positifs et des faiblesses du projet. Ainsi le principal problème a été l'absence initiale d'un coordinateur expatrié. L'utilisation des énergies renouvelables est assez complexe et le projet n'a pas décollé jusqu'à l'arrivée de Carlo Salvaneli, ingénieur coordinateur espagnol. Pour les points positifs, le projet a été très bien préparé. Sa formulation était très complète et les objectifs bien ciblés. On peut distinguer deux points spécialement positifs:

- Les sources de revenus : les pêcheurs gagnent de l'argent avec la vente de la glace aux autres pêcheurs, à travers de la farine, et avec les poissons « traités » (conservés au vide pour pouvoir les transporter plus loin). Les trois sources sont équilibrées, et elles ont la même rentabilité.
- Durabilité en termes de futur : ils ont sous traité la maintenance des équipements les plus sensibles à une société qui connaissait bien ce type de technologies. Ainsi un fonctionnement correct est assuré pour les cinq années à venir. De plus, les techniciens locaux travaillent en parallèle avec la société de maintenance pour apprendre le métier et garantir un fonctionnement satisfaisant dans l'avenir.

### 3. Autres technologies

La solution hybride éolien-solaire adoptée dans le cas du projet présenté dans la partie 2.2 est satisfaisante pour répondre aux objectifs décrits en 2.1. Cependant cette solution est adaptée au cas particulier de la communauté de Punta de Manabique, sur la côte Atlantique. Il existe actuellement un projet d'optimisation de la production de froid dans les pêcheries de la côte Pacifique du Guatemala. Le climat, la végétation et l'utilisation des sols sont très différents dans cette région, on peut donc se poser la question de solutions alternatives mieux adaptées pour répondre aux mêmes objectifs.

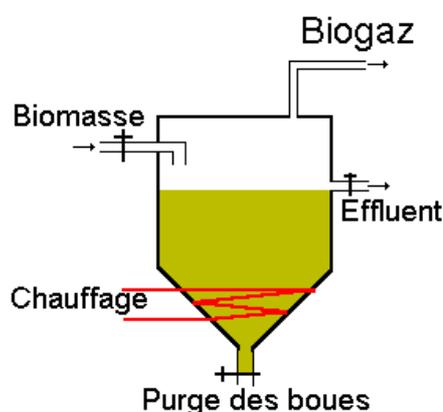
#### Le biogaz

La première de ces solutions est l'utilisation du biogaz. En effet dans la région de la côte Pacifique du Guatemala la langue de terre longeant la côte regorge de sols volcaniques fertiles, il y a donc une intense végétation tropicale mais aussi un développement important de cultures de sucre de canne, de caoutchouc et d'élevage. Par conséquent on peut facilement imaginer une production de biogaz à partir de ces déchets agricoles.

#### Principe de la production de biogaz

On utilise les déchets de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche pour la production de biogaz. A l'intérieur d'une cuve adaptée se produit la méthanisation des matières organiques, c'est-à-dire une digestion anaérobie des matières organiques par des micro-organismes méthanogènes (les archées) pour des conditions de température appropriées. Les matières organiques sont donc hydrolysées puis fermentées et enfin intervient la méthanogénèse. Le biogaz est donc constitué de méthane (50 à 75%) et de dioxyde de carbone (25 à 45%) essentiellement. La partie solide des rejets de production de biogaz peut être utilisée comme engrais ou compost.

#### Technologie disponible pour la production



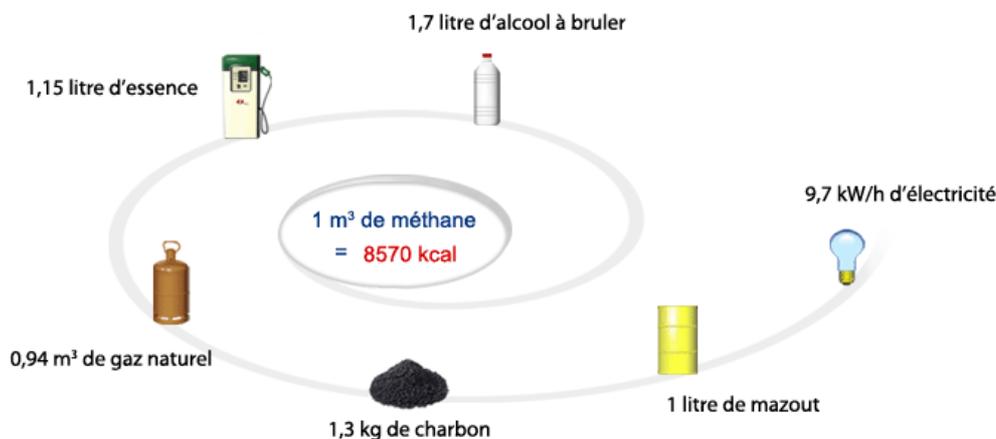
*Digesteur de 10 m<sup>3</sup> au Vietnam*

Pour produire du biogaz on utilise un digesteur, c'est-à-dire une cuve de stockage des

matières organiques où a lieu la méthanisation. Cette cuve doit être fermée et étanche pour pouvoir piéger le biogaz produit par les bactéries proliférant dans la cuve.

Généralement il faut que cette cuve soit chauffée pour que les bactéries puissent agir de manière optimale, mais pour une utilisation dans une région tropicale, la chaleur ambiante est suffisante. Il faut également assurer le brassage de la cuve.

Chaque mètre cube de biogaz composé de 65% de méthane contient l'équivalent de 6 kWh d'énergie calorifique. Le pouvoir calorifique du biogaz, c'est-à-dire la quantité de chaleur produite en brûlant une unité de biogaz, est proportionnel à sa teneur en méthane ; plus la teneur en méthane est élevée plus le pouvoir calorifique sera grand ( $9,42 \times 0,7 = 6,59$  Kwh/m<sup>3</sup> pour un biogaz à 70% de méthane, à 15°C et à pression atmosphérique normale).



L'association EDEN propose l'installation d'un biodigester souple de 10 m<sup>3</sup> pour pays tropicaux au prix de 10 euros. Matériaux de base : tube en plastique (polyéthylène)

Il est aussi possible de construire un digester en briques et ciment pour un somme un peu plus conséquente mais d'une durée de vie de plus de 20 ans.

Les avantages du biogaz sont :

- *Un bilan carbone neutre*
- *Peu ou pas d'énergie pour sa production*
- *Un coût d'installation faible*
- *Une valorisation des déchets nécessairement produits*

### Production de froid par un système de réfrigération par absorption

Dans le cas de notre étude on s'intéresse à la production de froid. L'avantage du biogaz est qu'il peut directement alimenter certains réfrigérateurs, dits à absorption, sans passer par une phase de production d'électricité.

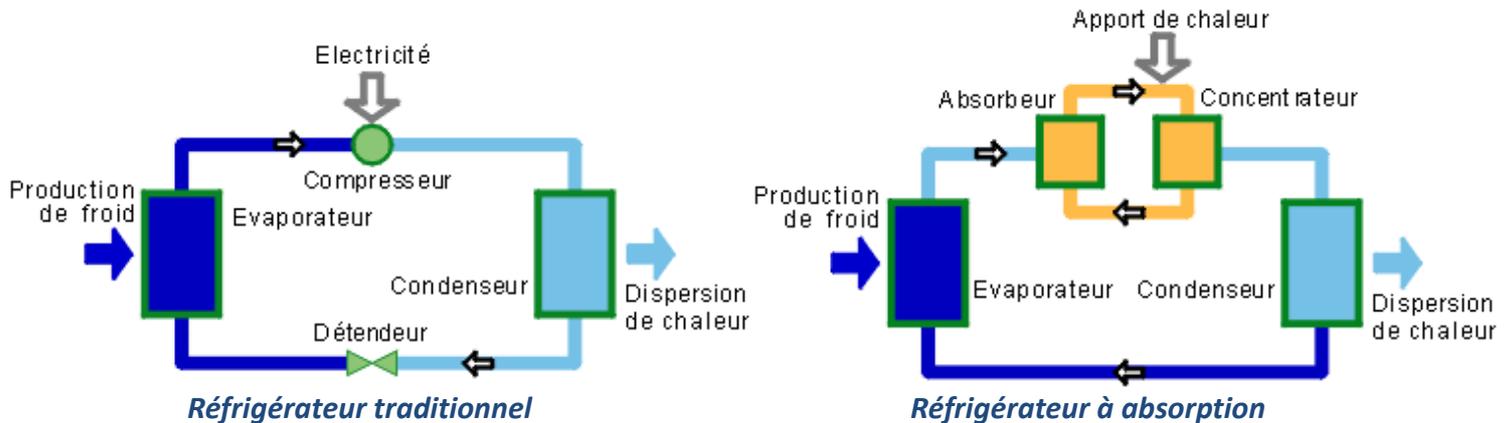
Les réfrigérateurs classiques sont des pompes à chaleur qui fonctionnent selon un cycle de Carnot en 4 étapes : compression du gaz, refroidissement, détente puis réchauffement du gaz. C'est lors de cette dernière étape que la chaleur est prise au système à refroidir et transmise au gaz réfrigérant.

Dans un système de réfrigération par absorption le compresseur mécanique, qui consomme de l'énergie électrique est remplacé par un compresseur thermique, c'est-à-dire une source

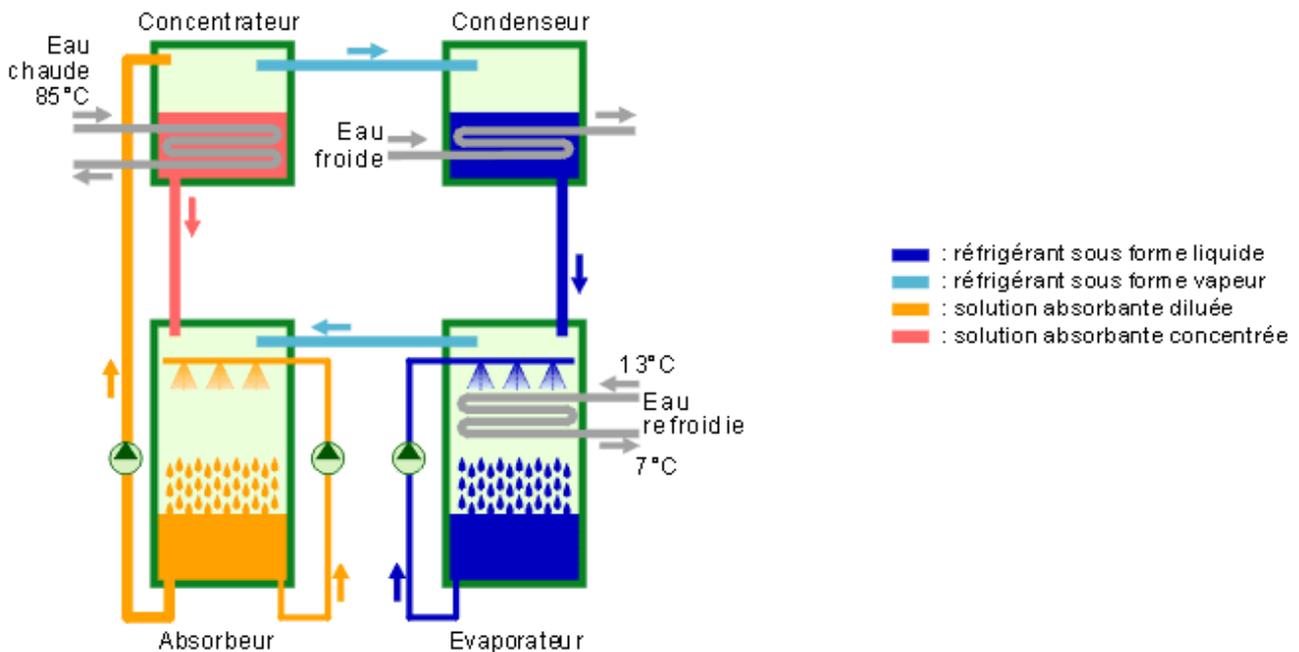
## Amélioration de la production de froid en milieu rural côtier

de chaleur, produite par exemple par combustion du biogaz obtenu.

La réfrigération s'effectue donc grâce à l'interaction d'un fluide réfrigérant et d'un fluide absorbant.



Le principe est donc le suivant :



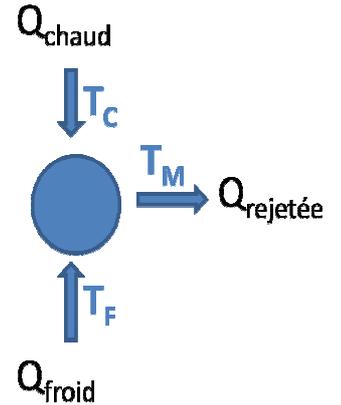
Le réfrigérant, maintenu à basse pression dans l'évaporateur, se vaporise en prenant de la chaleur au compartiment à réfrigérer. Pour éviter la saturation en vapeur d'eau et ainsi garder une basse pression dans l'évaporateur, la vapeur d'eau est aspirée dans l'absorbeur où le fluide absorbant joue son rôle en captant la vapeur d'eau. La solution absorbante est de plus en plus diluée et donc de moins en moins efficace. La solution absorbant/réfrigérant est donc amenée dans le concentrateur où elle est chauffée à environ 85°C afin de régénérer le fluide absorbant qui retourne dans l'absorbeur. La vapeur d'eau émise dans le concentrateur est envoyée dans le condenseur pour être refroidie et retourner dans l'évaporateur.

Dans de tels dispositifs, le fluide en circulation est le mélange d'un fluide frigorigène et d'un adsorbant (pour le couple  $H_2O/NH_4$ , le frigorigène est l'ammoniac, pour le couple  $LiBr/H_2O$ , le frigorigène est l'eau).

$Q_{\text{froid}}$  est la quantité de chaleur extraite de l'eau glacée au niveau de l'évaporateur.  $Q_{\text{chaud}}$  est la quantité de chaleur requise pour faire fonctionner le processus (chaleur motrice).  $Q_{\text{rejetée}}$ , somme de  $Q_{\text{froid}}$  et  $Q_{\text{chaud}}$ , est la quantité de chaleur à évacuer à la température moyenne  $T_M$ .  $Q_{\text{chaud}}$  est fournie par la combustion du biogaz.

Une machine à absorption est caractérisée par son COP (Coefficient de Performance Thermique), rapport entre la chaleur extraite et la chaleur motrice. Le COP d'un frigidaire classique est de l'ordre de 3 alors que le COP réel d'un frigo à absorption est de l'ordre de 0,7.

Celui d'une machine à adsorption varie entre 0.5 et 0.6.

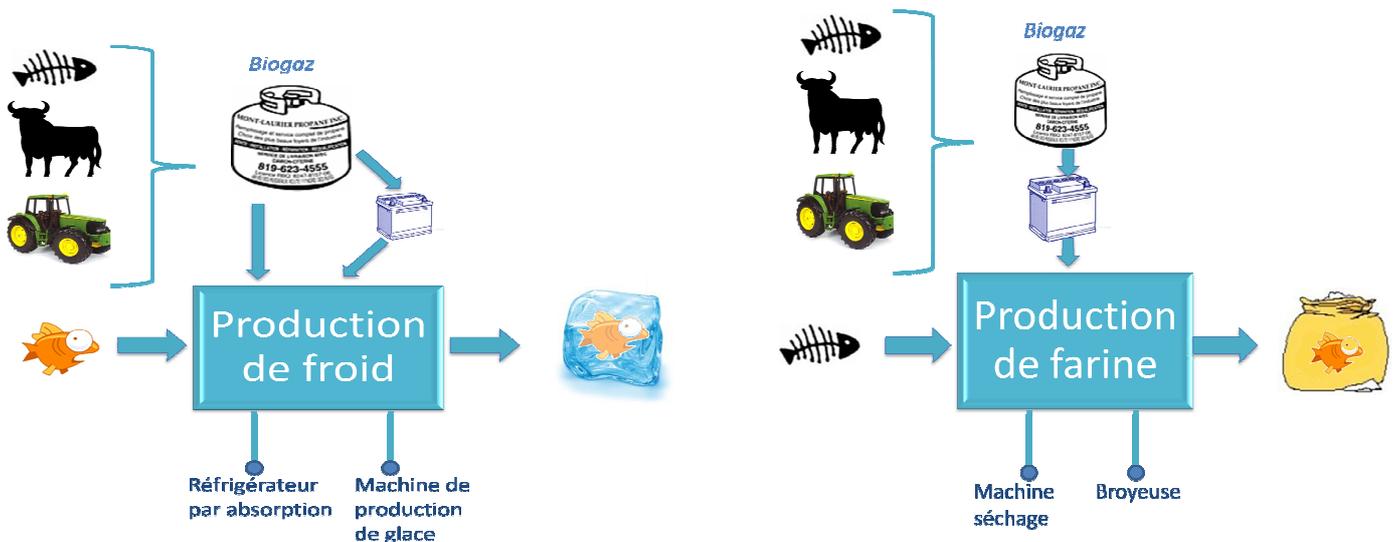


Les avantages d'un tel système:

- Pas besoin d'électricité
- Utilisation d'une source de chaleur disponible
- Silencieux, pas de vibration, entretien limité, durée de vie longue

Inconvénients :

- Température de la source chaude plus élevée que pour l'adsorption.
- Production de CO<sub>2</sub> lors de la combustion du biogaz (même si le bilan total carbone est nul)



Prix : pour un réfrigérateur de 60L : 300€, nous n'avons cependant pas réussi à trouver des prix pour des installations de taille supérieure.

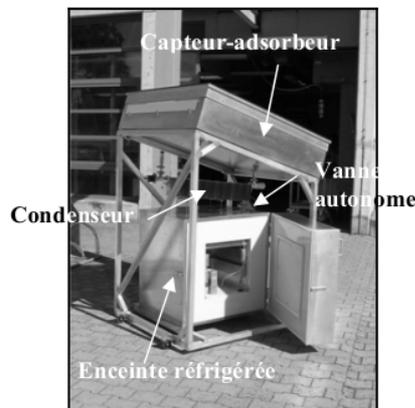
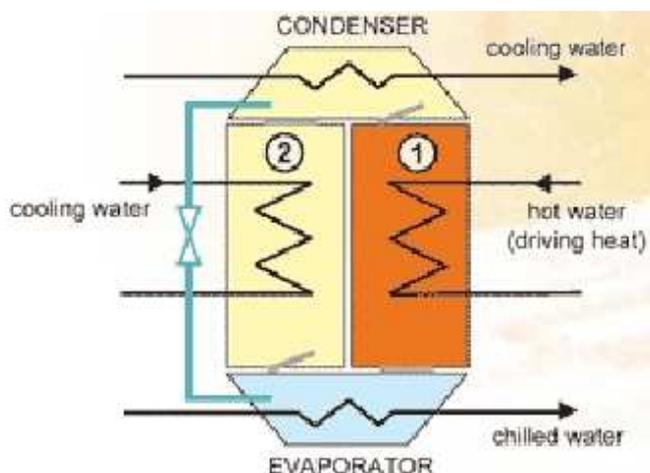
### Adsorption avec le rayonnement solaire :

Une autre alternative au biogaz est un système de réfrigération qui utilise directement l'énergie solaire sans passer par un système de production d'électricité. L'adsorption se définit comme l'équilibre gaz/solide. Dans le cas d'un système de réfrigération par adsorption, on utilise un couple adsorbent solide/fluide réfrigérant (absorbat) et toujours

une source de chaleur provenant ici du soleil.

## Principe de la réfrigération par adsorption

Les compartiments 1 et 2 de la machine sont remplis par le solide adsorbant. Cette machine fonctionne de manière cyclique.



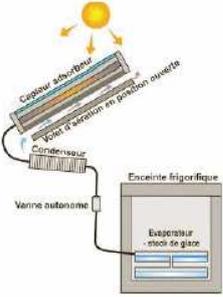
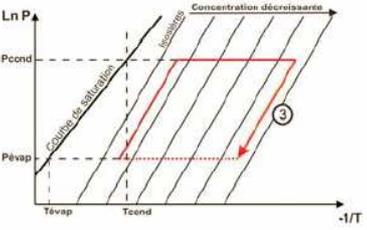
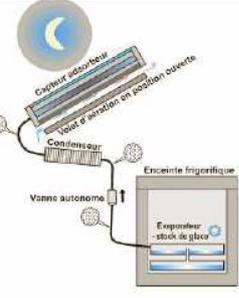
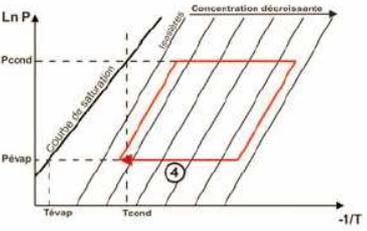
Réfrigérateur solaire à adsorption installé depuis 2005 en Erythrée

Le compartiment 1 est chauffé grâce à une source de chaleur afin de séparer la vapeur d'eau de l'adsorbant. La vapeur d'eau passe dans le condensateur puis rejoint l'évaporateur où elle est à nouveau vaporisée à basse pression en prenant de la chaleur au compartiment à refroidir, c'est l'étape de production de froid. La vapeur d'eau ainsi formée migre dans le compartiment 2 où elle est captée par l'adsorbant. Une fois le compartiment 2 saturé en vapeur d'eau, les rôles de 1 et de 2 sont inversés à l'aide de clapets.

## Réfrigération solaire à adsorption

Ce type de réfrigération utilise donc le principe vu ci-dessus mais en intégrant la contrainte solaire, à savoir le soleil brille le jour, le froid est donc produit par intermittence et seulement la nuit. Un cycle se présente donc de la manière suivante :

Phase	Descriptif	Schéma	Diagramme
Chauffage isostérique <sup>6</sup> (8h-10h)	Le rayonnement solaire chauffe le capteur-adsorbant. La pression de vapeur et la température augmentent dans le système.		
Désorption (10h-16h)	Lorsque la pression de saturation correspondant à la température du condenseur est atteinte, les vapeurs se condensent et s'écoulent vers l'évaporateur.		

<p>Refroidissement isostérique (16h-19h)</p>	<p>Lorsque l'ensoleillement diminue, le capteur se refroidit et la pression diminue dans le système pour atteindre la pression de l'évaporateur. Le refroidissement est favorisé par l'ouverture d'un volet d'aération en face arrière du capteur-adsorbeur.</p> 	
<p>Adsorption – production de froid (19h-8h)</p>	<p>En continuant son refroidissement, l'adsorbant se trouve physiquement en déséquilibre et va se "recharger" en adsorbant la vapeur contenue dans le système. Cette vapeur est produite par évaporation du liquide se trouvant dans l'évaporateur, en produisant l'effet frigorigène désiré. Lorsque la température dans l'évaporateur atteint le point de congélation, il y a formation d'un stock de glace qui permet à l'enceinte de rester à basse température pendant la journée suivante, éventuellement plusieurs jours (2-3) en cas de conditions météorologiques défavorables.</p> 	

Avantages de cette technologie :

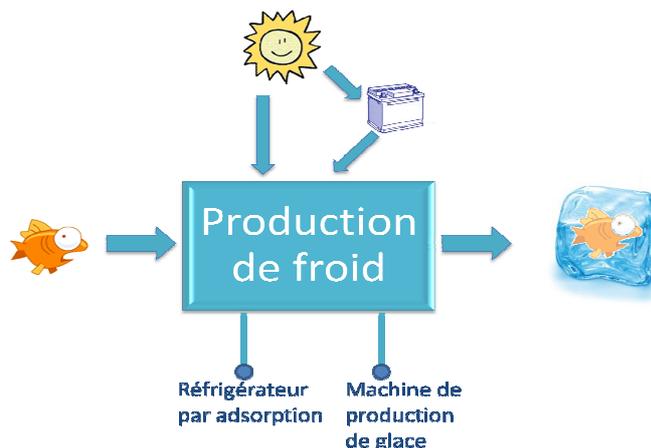
- Utilisation exclusive de l'énergie solaire qui est illimitée
- Pas de partie mobile donc peu d'entretien
- Le liquide réfrigérant peut être simplement de l'eau
- Le COP est meilleur que pour l'électro-solaire.

Inconvénients :

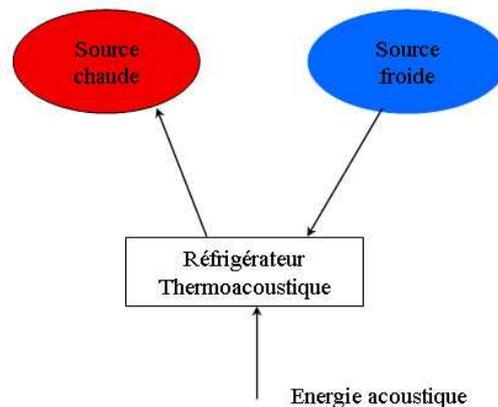
- La production est non continue
- Nécessité d'une source froide la nuit
- Le COP est inférieur au réfrigérateur classique

Prix de vente : 1250 € pour 300 litres

Ce système a déjà été expérimenté avec succès au Sahel et au Burkina Faso

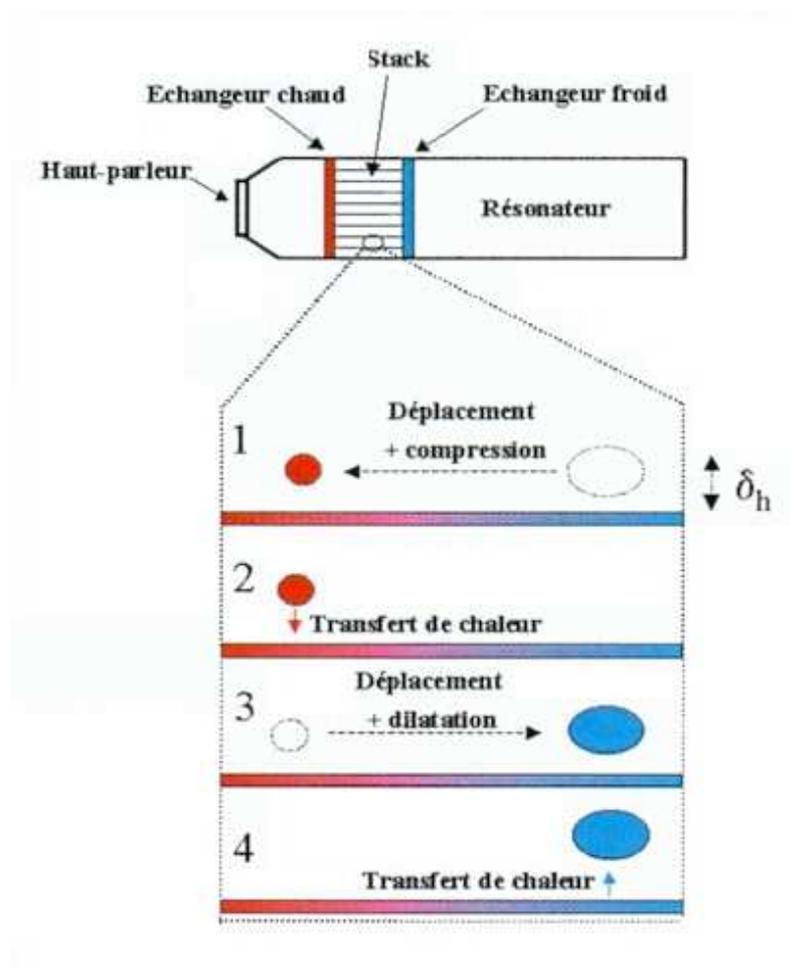


## Un axe de recherche : le réfrigérateur thermoacoustique



Le concept qui se cache sous le nom de réfrigérateur thermoacoustique est la génération de froid à partir d'ondes sonores. Cette technologie a pour avantages de ne pas produire de gaz à effet de serre polluants contenus dans le réfrigérateur et d'offrir la possibilité d'atteindre des températures très basses (-150°C).

### Principe



On crée une onde sonore stationnaire grâce au haut-parleur. Une parcelle de gaz se déplace donc en subissant une compression adiabatique ainsi son volume diminue et sa température augmente. Quand elle atteint la plaque, la parcelle cède sa chaleur à l'échangeur chaud puis parcourt le chemin inverse en subissant une dilatation quasi-adiabatique, ainsi sa température diminue.

Un côté du système est donc chaud tandis que l'autre côté reste froid : voici le principe du réfrigérateur thermique.

Avantages de cette technologie:

- *Plus de gaz frigorigènes à effet de serre polluant contenu dans le frigo*
- *Possibilité d'atteindre des températures très basses (-150C)*
- *Source d'énergie gratuite*
- *Aucune partie mobile donc plus fiable*
- *Coût de production réduit car peu de pièces, miniaturisation possible*

Inconvénients :

- *20 à 30 % moins efficace que les frigos classiques, nécessité d'avoir une source de sons et de la moduler*

On notera cependant qu'à l'heure actuelle cette technologie n'est utilisée que dans le domaine aérospatial ou sur certains vaisseaux de guerre. Des brevets ont été achetés par des compagnies qui travaillent beaucoup à des applications industrielles mais il n'y a à l'heure actuelle aucun produit qui pourrait être utilisé dans le cas de la production de froid pour des pêcheries de petite échelle, bien que nous sommes persuadés que cette technologie a de l'avenir.

## Conclusions

Dans le cadre de l'optimisation de la production de froid en milieu rural côtier la partie 2 a présenté une solution déjà mise en place et ayant montré sa fiabilité et son efficacité. La partie 3 a présenté des solutions alternatives pour répondre aux objectifs d'optimisation de cette production de froid dans une démarche de développement durable. Nous allons maintenant présenter un tableau récapitulatif des différentes technologies, avec leurs avantages, inconvénients et coûts. Concernant l'éolien et le solaire pour produire de l'électricité, étant donné qu'il s'agit d'énergies intermittentes nous ne gardons que la solution hybridant les deux technologies.

### Production de froid

Technologie	Avantages	Inconvénients	<sup>1</sup> Coût
Hybride solaire-éolien	Technologie robuste, ayant fait ses preuves	Durée de vie limitée des batteries	35000€
	Ensoleillement et vent suffisant en région tropicale	Pollution des batteries usagées	
		Recours aux pays industrialisés en cas de panne	
Réfrigérateur à absorption (biogaz)	Bilan carbone neutre	Dépendance sur la quantité de déchets organiques disponibles	15000€
	Peu ou pas d'énergie pour sa production		
	Coût d'installation faible		
	Valorisation des déchets nécessairement produits		
Réfrigérateur à adsorption (photovoltaïque)	Utilisation exclusive de l'énergie solaire qui est illimitée	La production est non continue	25000€
	Pas de partie mobile donc peu d'entretien	Nécessité d'une source froide la nuit	
	Le liquide réfrigérant peut être simplement de l'eau	Le COP est inférieur au réfrigérateur classique	
	Le COP est meilleur que pour l'électro-solaire		
Réfrigérateur thermoacoustique	Plus de gaz frigorigènes à effet de serre polluant contenu dans le frigo	20 à 30% moins efficace qu'un réfrigérateur classique	NC
	Possibilité d'atteindre des températures très basses (-150C)	Nécessité d'avoir une source de son et de la moduler	
	Aucune partie mobile donc plus fiable	Aucune application à échelle moyenne ou individuelle	
	Coût de production réduit car peu de pièces,		

<sup>1</sup> Les coûts sont des estimations à partir des prix que nous avons trouvé dans le commerce mais ne correspondent pas forcément au devis exact qui serait établi dans le cas d'une chambre froide de pêche.

En conclusion, il serait possible de reproduire le projet de Punta de Manabique à d'autres pêcheries. Cependant dans des régions où l'élevage et l'agriculture sont suffisamment développés pour produire des déchets en quantité suffisante pour alimenter un biodigester, il est intéressant de travailler avec du biogaz, dans la mesure où pour un bilan carbone nul et des coûts assez faibles d'installation et d'utilisation, il existe des technologies fiables pour produire du froid (réfrigérateur à absorption) et de l'électricité (combustion du biogaz). Le biogaz a de plus l'avantage de permettre un fonctionnement continu. Un réfrigérateur à adsorption semble être une solution intéressante mais on gardera à l'esprit que premièrement cette solution ne résout pas le problème de l'alimentation électrique des autres appareils (machine fabriquant de la glace, broyeuse, sécheuse) et a de plus l'inconvénient de fonctionner de manière non continue. Quant au réfrigérateur thermoacoustique, la technologie est réellement intéressante mais est encore à un stade de balbutiement pour des applications de petite ou moyenne échelle, comme c'est le cas ici.

### Bibliographie

- Texte de formulation du projet : "Chaîne de froid pour le soutien de la pêche artisanale dans les communautés de la réserve naturelle de Punta de Manabique, Département d'Izabal, Guatemala." FCULP 2006.
- Texte de formulation du projet : "étude des alternatives pour la production du froid avec des énergies renouvelables dans des centres d'approvisionnement de la pêche artisanale au Guatemala : application de l'analyse multicritère pour la détermination des solutions technologiquement durables" Université de San Carlos 2008.
- Fondation MAPFRE. 2007. « Guía de uso industrial y comunitario de energías renovables. » España. 49p.
- <http://www.econologie.com/le-froid-solaire-ou-la-climatisation-refrigeration-par-adsorption-articles-3265.html>
- <http://energie.wallonie.be/energieplus/CDRom/Climatisation/equipements/machinefrigorifique/frames/cbcliequmachineabsorb.htm>
- MEM (Ministerio de Energía y Minas, GT). 2005. Promoción de las energías renovables en Guatemala. (en ligne). Disponible sur <http://www.mem.gob.gt>
- MEM (Ministerio de Energía y Minas, GT). 2005. Proyectos de energías renovables en Guatemala. (en ligne). Disponible sur <http://www.mem.gob.gt>
- <http://www.enr.fr>
- <http://www.ademe.fr>
- [fr.wikipedia.org/wiki/Réfrigérateur\\_à\\_absorption\\_de\\_gaz](http://fr.wikipedia.org/wiki/Réfrigérateur_à_absorption_de_gaz)
- [www.enerzine.com](http://www.enerzine.com)
- [igt.heig-vd.ch](http://igt.heig-vd.ch)
- [www.thermoacoustique.free.fr](http://www.thermoacoustique.free.fr)
- [www.forums.futura-sciences.com](http://www.forums.futura-sciences.com)
- <http://thermoacoustic.free.fr/>
- [www.savoirs.essonne.fr/dossiers/les.../energies/...thermoacoustique/le-refrigerateur-thermoacoustique](http://www.savoirs.essonne.fr/dossiers/les.../energies/...thermoacoustique/le-refrigerateur-thermoacoustique)