

CARREAU Christel
DUFOUR Mélanie
GIBILISCO Magalie

Energie Eolienne

Energie Hydraulique

Energie Solaire

LES ENERGIES RENOUVELABLES DANS L'HABITAT

Energie De Biomasse

Energie Géothermique

Energie de Marée Motrice

LA MAISON DU TROISIEME MILLENAIRE

Professeur encadrant: Mr Jeanjacquot
Lycée Charlie Chaplin
Années 2000/2001

SOMMAIRE

Synthèse

Introduction

A/ L'énergie hydraulique

I/ Introduction

II/ Turbines

- 1- Historique des turbines hydrauliques
- 2- Principe de fonctionnement d'une turbine
- 3- Caractéristiques générales
- 4- Différentes turbines
 - a- Turbine Pelton
 - b- Turbine Francis
 - c- Turbine Kaplan
 - d- Turbine Banki-Mitchell
 - e- Turbine Turgo
 - f- Pompes inversées

III/ Choix de la turbine

IV/ Différentes installations hydroélectriques

- 1- Installations avec retenue d'eau (barrage)
- 2- Installations hydroélectriques sur réseau d'eau potable
- 3- Technique de transformation de l'énergie hydraulique en électricité et coût de l'installation

V/ Comment fonctionne l'installation ?

- 1- Descriptif de l'installation
- 2- Choix des matériaux pour la maquette : le PVC

VI/ Expériences

VII/Calculs

- 1- Puissances maximum, minimum et moyenne consommées par le foyer énergie journalière consommée par le foyer et capacité de stockage du réservoir
 - a- Calcul de la puissance moyenne à fournir
 - b- Calcul de l'énergie à stocker et de la taille du bassin d'eau en amont
 - c- Calcul du débit nécessaire pour obtenir P_{\max}
- 2- Formules utilisées pour dimensionner l'installation
- 3- Utilisation des formules pour la maquette

VIII/ Conclusion

B/ Une énergie en plein essor: l'énergie éolienne

I/Introduction

II/ L'origine du vent et son utilisation au fil du temps

- 1- L'origine
- 2- L'historique
- III/ Présentation et caractéristiques principales des différents types de capteurs éoliens
 - 1- Les capteurs à axe horizontal
 - 2- Les capteurs à axe vertical
- IV/ Montage de notre expérience
 - 1- Objectif
 - 2- Choix du rotor
 - 3- Quelle pompe utiliser ?
- V/ Expériences
 - 1- Expérience avec l'anémomètre
 - a- Comment utiliser l'anémomètre ?
 - b- Donner la mesure du vent du ventilateur pour l'expérience suivante.
 - 2- Fonctionnement du rotor
- VI/ Calculs
 - 1- Calcul de la puissance de l'énergie éolienne
 - 2- Courbes théoriques
 - 4- Calculs pour le pompage de l'eau
 - 5- Calcul de la taille de l'éolienne pour alimenter la maison
- VII/ Conclusion

C/ L'énergie solaire

- I/ Introduction :
- II/ Généralités sur le rayonnement solaire
 - 1- Qu'est ce que le rayonnement solaire
 - 2- Quel est le rôle de l'atmosphère
 - 3- Qu'est ce que le rayonnement diffus et le rayonnement direct
 - 4- Quelques notions fondamentales en astronomie
 - 5- Nomenclature des différents instruments de mesure
- III/ Calcul et réalisation de la maison
 - 1- Le chauffage
 - 2- Le système passif
 - 3- Les avantages et les inconvénients du système passif
 - 4- Bilan énergétique du système passif
 - 5- Le chauffage d'appoint
 - 6- Avantages et inconvénients du système actif
 - 7- Bilan énergétique du système actif
- IV/ Conclusion générale sur l'énergie solaire

Annexes

Bibliographie

Conclusion

Remerciements

Synthèse

LA MAISON DU TROISIEME MILLENAIRE : Les nouvelles énergies pour l'habitat.

- Résumé :

L'étude porte sur les énergies renouvelables pouvant rendre une maison autonome.

Le projet c'est rapidement orienté sur 3 types d'énergies :

- ⇒ L'énergie solaire(système passif et actif) pour le chauffage.
- ⇒ L'énergie hydraulique pour la production d'électricité. Le stockage de l'énergie se fait par le réservoir d'eau.
- ⇒ L'énergie éolienne (couplée à l'hydraulique) permet de remonter l'eau nécessaire au stockage d'énergie.

- Réalisations :

- ⇒ Maquettes : D'une éolienne à axe vertical de type Savonnius ; d'une turbine avec l'alternateur ; d'une maison avec le système de chauffage solaire ; d'un montage permettant de réaliser des diagrammes solaires (sans calcul) et d'un insolateur.

- Les partenaires :

- ⇒ M GOY architecte spécialisé dans les maisons bioclimatiques
- ⇒ M. TILLIER propriétaire d'une maison à chauffage solaire actif
- ⇒ M. ALLARY propriétaire d'une maison à chauffage solaire passif.

- Résultats: Prix spécial offert par la Société Française d'Energie Nucléaire (3ème prix)



Dispositif mis au point au lycée pour réaliser des diagrammes solaires sans calcul



Maquette de la maison.

INTRODUCTION

Notre thème est l'application des énergies renouvelables à l'habitat. Des énergies renouvelables comme la biomasse ; bois et autres ; l'énergie solaire, la chaleur de l'environnement et l'énergie éolienne peuvent se substituer à des matières premières non renouvelables. La plupart d'entre elles ont connu un bel essor ces dernières années, et leur potentiel est loin d'être épuisé.

La région Rhône-Alpes se mobilise pour la valorisation des énergies renouvelables et la protection de l'environnement à travers une incitation à la réduction des consommations d'énergie et l'encouragement de l'utilisation des énergies renouvelables. Les efforts de la région se sont notamment concrétisés en 1999 par le développement du plan « bois énergie ».

L'énergie solaire, l'énergie dégagée par le vent, ou produite par les chutes d'eau ou les vagues, sont inépuisables, et peuvent produire de l'électricité tout comme l'uranium, le gaz, le pétrole ou le charbon qui sont les plus utilisés actuellement, mais qui mettent des millions ou des milliards d'années à se former et risquent d'être épuisés.

Ce sujet nous tient à cœur du fait que les énergies dites inépuisables sont très populaires de nos jours. Ainsi nous avons choisi de n'étudier que trois énergies que nous nous sommes partagées : solaire, hydraulique et éolienne. Les énergies géothermique, biomasse ... ne sont pas rentable pour notre projet. Ainsi nous allons vous présenter notre travail.

A/ L'énergie hydraulique

I/ Introduction

La production mondiale d'électricité d'origine hydraulique (226.10^6 tep) est inférieure à celle d'origine nucléaire (617.10^6 tep). La production d'électricité d'origine hydraulique représente 2.6% de la production d'électricité mondiale totale, la production d'origine nucléaire 7.1%, le gaz naturel 23.1% (soit 2001.10^6 tep), le pétrole brut 40.3% (soit 3475.10^6 tep), le charbon et lignite 26.9% (soit 2321.10^6 tep) ; soit au total une production d'électricité de 8640.10^6 tep. 1 tep = 42 GJ soit 11.6 MWh. Le potentiel d'énergie hydroélectrique mondial encore disponible dépasse les 4000 térawattheures par an (1 TWh = 1 milliard de kilowattheures soit 10^{12} wattheures), soit environ le double de la production hydroélectrique atteinte en 1992. La grande hydroélectricité a la belle part dans la production d'énergie renouvelable : 93% de la production mondiale. L'évolution attendue en la matière concerne la taille des barrages. Les petites centrales (moins de 10 MW) qui respectent davantage l'environnement devraient se développer, notamment dans les agglomérations isolées où les coûts de raccordement en électricité sont très élevés.

L'énergie hydraulique est également appelée « houille blanche ». Elle est relativement peu dépendante des conditions météorologique. C'est une énergie non polluante à produire et facile à mettre en place. Dans notre maison, elle est uniquement utilisée pour fournir l'électricité nécessaire à la consommation du foyer.

Un bassin d'eau est situé en amont de la maison ; il constitue notre réservoir d'énergie : l'eau descend du réservoir vers la turbine qui fournit alors de l'électricité, puis elle est remontée au réservoir initial grâce à un système de pompe actionné par l'éolienne. Notre construction ne prévoit pas l'utilisation de batteries dont le recyclage est relativement polluant. Pour ce faire, une vanne du réservoir d'eau supérieur s'ouvre et se ferme suivant les besoins en électricité, pour envoyer plus ou moins d'eau à la turbine. La réserve d'eau étant prévue pour une durée d'environ trois jours, il ne devrait pas y avoir de problèmes quand à l'absence ponctuelle de vent. Toutefois notre système électrique sera muni d'un compteur à double sens relié au réseau d'EDF pour le cas où la réserve amont d'eau serait épuisée à cause de l'absence de vent pendant plusieurs jours d'affilé.

Les turbines hydrauliques sont utilisées dans les installations hydroélectriques pour entraîner les générateurs qui produisent le courant électrique. Les pales sont parfois orientables afin d'obtenir le rendement maximal selon la hauteur de la chute d'eau. Certaines turbines sont maintenant aussi adaptées à l'usage des particuliers ayant une petite hauteur de chute et/ou un petit débit. C'est ce que je vais essayer de vous montrer.

II/ Turbines

1- Historique des turbines hydrauliques

Le mot « turbine » est issu du latin turbo qui signifie toupie.

Les roues hydrauliques étaient connues des Romains, qui les utilisaient dans les moulins à grain. Elles ont animé pendant longtemps les moulins à céréales mais aussi des installations artisanales ou industrielles. Héritières des antiques moulins à aubes, les turbines hydrauliques apparurent au cours du dix-neuvième siècle. La première réalisation de turbine hydraulique est due à Benoît Fourneyron, un français, en 1827, elle est le perfectionnement des roues hydrauliques qui existaient depuis plusieurs siècles ; c'est une turbine à réaction. L'invention de la turbine hydraulique puis de la dynamo et enfin de l'alternateur ont ouvert une voie importante vers l'hydroélectricité qui constitue la source d'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Les noms de Francis et Pelton sont rattachés aux principales découvertes techniques. Elles permettent aujourd'hui d'obtenir des puissances unitaires très élevées, de l'ordre de 200 000 kW avec une roue Pelton et atteignant 500 000 kW avec une roue Francis ; ainsi que des rendements énergétiques dépassant 90%.

Les premières turbines de haute chute, fonctionnant sous 200 m de hauteur d'eau, furent installées, en 1869, près de Lancey, dans le Dauphiné, par l'ingénieur Aristide Bergès.

Actuellement les turbines hydrauliques utilisent des chutes allant de quelques mètres comme les centrales marémotrices (par exemple dans la centrale marémotrice installée dans l'estuaire de la Rance, en Bretagne) jusqu'à plus de 2 000 m.

2- Principe de fonctionnement d'une turbine

Une turbine est un dispositif muni d'ailettes, de pales ou d'aubes (dont l'ensemble s'appelle aubage), auquel un fluide imprime un mouvement de rotation transmis à un mécanisme par l'intermédiaire d'un arbre placé au centre du dispositif. Par extension, on appelle turbine un ensemble formé des appareils injecteurs ou compresseurs, de la chambre de combustion et de la turbine proprement dite, ensemble dit aussi turbomoteur.

Une installation hydroélectrique est une installation qui transforme l'énergie hydraulique de l'eau en énergie mécanique par l'intermédiaire d'une roue dite « turbine ». Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique à l'aide d'une génératrice (dynamo ou alternateur).

Une turbine est constituée d'une partie fixe, le distributeur ou stator, et d'une partie mobile, le rotor. Le stator peut être constitué d'un ou plusieurs injecteurs comme dans la turbine Pelton, ou comporter, comme le rotor, des aubages disposés de telle sorte que la conversion de l'énergie de l'eau en énergie mécanique de rotation s'effectue suivant les principes d'action, de réaction, ou résulte de la combinaison des deux. Ces différents modes de fonctionnement sont obtenus à partir de la forme et de la disposition du stator et du rotor, et par des profils d'aubes adaptés.

3- Caractéristiques générales

L'élément central de toute installation hydroélectrique est la turbine, qui transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Le choix des turbines se fait en fonction de la hauteur de chute et du débit d'eau disponible ; ce qui détermine la puissance de chaque installation.

Les turbines sont des machines rotatives dans lesquelles l'énergie cinétique et la pression de l'écoulement de l'eau sont transformée en énergie mécanique directement utilisable sur l'arbre moteur de la machine. Elles comportent un système distributeur d'eau, le plus souvent réglable, et une ou plusieurs roues motrices (roues à aubes, à augets, à ailettes). Les turbines peuvent fournir de quelques watts avec relais batteries pour les plus petites jusqu'à plusieurs kilowatts en 220 volts pour les plus importantes. Techniquement les turbines constituent les recours idéal quand les sites sont isolés et très éloignés des réseaux, d'autant qu'elles contribuent à une économie significative des énergies fossiles. Mais ce recours à l'hydraulique est fortement handicapé par les difficultés d'accès aux financements contrairement au photovoltaïque, les seuls partenaires restants certaines régions de France comme Provence-Alpes-Côte-d'Azur ou Rhône-Alpes.

Les principales turbines pour habitations personnelles sont les turbines Pelton et Banki.

On distingue un certain nombre de turbines dont nous verrons les principales plus bas et 4 types de roues :

- La roue pendante, à palettes, à axe horizontal, que le courant d'eau frappe à sa partie inférieure.
- La roue de côté, à aubes ou à godets, qui reçoit l'eau d'une canalisation à la hauteur de son axe ; c'est le poids de l'eau qui agit comme force motrice.
- La roue à augets en dessus, qui utilise la force vive d'une chute d'eau frappant ses augets d'une hauteur de plusieurs mètres.
- La roue à cuillères, à axe vertical, qui utilise la force vive d'un jet d'eau venant frapper la partie concave de ses cuillères.

On distingue aussi les turbines axiales, dans lesquelles l'écoulement du fluide est, en gros, parallèle à l'axe de rotation de la roue, et les turbines radiales (généralement centripètes), dans lesquelles le fluide se dirige tangentiellement, l'atteignant à sa périphérie et la quittant près de son centre.

Turbine à action : le fluide n'apporte que de l'énergie cinétique ; quand il entre dans la roue, il n'est plus sous pression car il a subi une détente complète. Le stator communique à l'eau une vitesse élevée avant de la diriger sur les aubes du rotor ; c'est donc l'énergie cinétique de l'eau qui est convertie en énergie mécanique.

Turbine à réaction : quand il entre dans la roue, le fluide est encore sous pression. Il apporte à la roue à la fois de l'énergie cinétique et de l'énergie de pression. Il se détend à son passage à travers la roue. L'eau est dirigée de telle sorte qu'une force de réaction apparaît, de sens opposé au mouvement de l'eau ; la vitesse de l'eau intervenant également, de sorte que l'énergie mécanique résultante provient à la fois de l'énergie cinétique et de la pression de l'eau.

Coup de bélier : régime non permanent s'établissant dans une conduite après une variation rapide du débit à l'extrémité aval. Chaque tranche d'eau subit des variations de pression et de vitesse à des instants différents mais sans oscillation d'ensemble, ce qui peut faire éclater la conduite.

4- Différentes turbines

a- Turbine Pelton

Débit d'utilisation : 0.5 à 100 litres par seconde en usage privé (faible débit)

Hauteur de chute : de 10 à 1000 mètres (chutes importantes)

Généralement utilisée dans le cadre de chutes d'eau élevées, avec des débits relativement faibles, c'est la turbine la plus répandue sur les réseaux d'adduction d'eau.

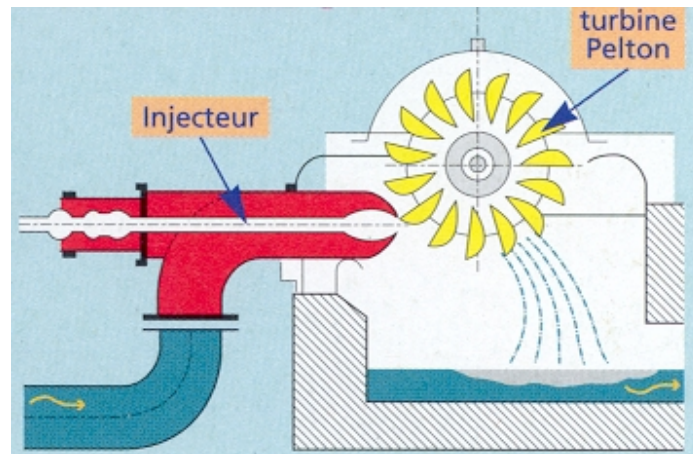
C'est la première turbine à action.

L'eau dirigée par un injecteur frappe à grande vitesse les augets disposés à la périphérie d'une roue.

La turbine Pelton transforme l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique. Le rendement des turbines hydrauliques est de 80%.

La turbine Pelton est formée d'une roue mobile, composée d'augets en forme de double cuillère avec échancrure médiane. Le système de distribution comporte un injecteur avec une buse, une aiguille d'injection et un déflecteur. L'aiguille d'injection sert à réguler le débit qui vient « frapper » la roue. Le déflecteur est un dispositif de sécurité permettant d'éviter un « coup de bélier » qui se produirait si, pour arrêter rapidement la turbine, la seule solution était de fermer la vanne d'entrée. Le déflecteur, grâce à un électro-aimant, permet donc de dévier le jet afin qu'il ne frappe plus la roue et que la turbine s'arrête.

Pelton est un ingénieur américain. Un concours organisé par l'université de Californie l'amène à étudier une turbine pour laquelle il dépose un brevet en 1887.



sch. 1 : la turbine Pelton

b- Turbine Francis

Débit d'utilisation : débits importants
 Hauteur de chute : 3 à plus de 100 mètres
 Sa complexité et donc son prix élevé font qu'elle n'est que rarement utilisée dans les petites centrales.
 C'est une turbine centripète qui sert pour les moyennes chutes.
 Francis est l'inventeur des turbines à réaction.
 C'est un turbine à réaction créée en 1870.

c- Turbine Kaplan

Débits d'utilisation : débits importants
 Hauteur de chute : 1 à quelques dizaines de mètres
 Il s'agit d'une turbine à réaction dont les hélices sont réglables en fonction du débit. Elle est essentiellement utilisée pour les faibles chutes et les débits importants.
 Elle sert pour les très basses chutes. La turbine Francis est une turbine à hélice, axiale, à réaction. Les pales de l'hélice motrice peuvent prendre des inclinaisons variables, de façon à maintenir un rendement optimal à toutes les puissances et sous chute variable. Dans une version moderne des turbines axiales de basse chute, les groupes-bulbes, la turbine et l'alternateur qu'elle entraîne sont combinés dans une machine unique, incluse dans un bulbe placé au cœur même de l'écoulement fluide. Les turbines de la centrale marémotrice de la Rance sont de ce type.
 La turbine Kaplan date de 1912.

d- Turbine Banki- Mitchell

Débit d'utilisation : 20 à 1000 litres par seconde
 Hauteur de chute : 1 à 200 mètres
 Malgré un rendement légèrement inférieur aux autres, elle supporte de forts changements de débit.
 C'est une turbine de type Pelton mais conçue pour des chutes plus petites et un débit plus grand.

e- Turbine Turgo

Débit d'utilisation : 30 à 300 mètres cubes par seconde
 Hauteur de chute : de 30 à 300 mètres
 Elle a sensiblement les mêmes caractéristiques que la Pelton, toutefois son faible diamètre lui permet d'être directement couplée au générateur.

f- Pompes inversées

Débit d'utilisation : débits allant de quelques litres à quelques dizaines de litres
 Hauteur de chute : jusqu'à quelques dizaines de mètres
 Peut être utilisée comme pompe ou comme turbine selon le sens d'écoulement de l'eau, particulièrement dans les réseaux d'eau potable.

III/ Choix de la turbine

Pourquoi avoir choisi une turbine Banki- Pelton pour le montage plutôt qu' une turbine Francis, Turgo, ou Kaplan ?

La turbine Banki est une turbine de type Pelton, donc avec un injecteur qui permet de mieux diriger l'eau et de l'avoir sous pression, mais elle a des pales plus grandes que la turbine Pelton donc le jet peut mieux frapper les pales pour faire tourner la turbine.

IV/ Différentes installations hydroélectriques

1- Installations avec retenue d'eau (barrage)

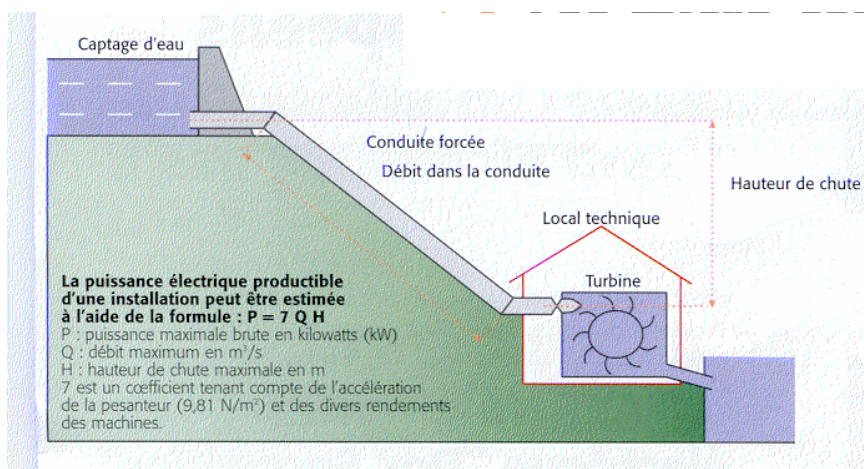
Les turbines hydrauliques sont utilisées dans les centrales hydroélectriques. Ce type de turbine permet de convertir en énergie mécanique, l'énergie d'une chute d'eau, et sert essentiellement à la production d'électricité. Les turbines sont en général associées à des barrages créant une retenue. Les hauteurs de chute peuvent être très variables.

Le principe d'une installation hydraulique consiste à créer une retenue d'eau en barrant le cours d'une rivière, et à utiliser l'énergie potentielle de l'eau accumulée. Suivant la hauteur de chute, on distingue les usines de haute chute, de moyenne chute, et les usines au fil de l'eau. Différents types de turbines sont adaptés au fonctionnement optimal selon le type de chute.

La roue Pelton, à axe horizontal, enfermée dans une bache métallique, reçoit la pression d'un barrage (situé très au dessus) transmise par une canalisation. Utilisée dans les centrales électriques de montagne, avec des pressions d'eau de l'ordre de 1 à 100 bar, les roues Pelton peuvent fournir une puissance de plusieurs mégawatts. Les roues Pelton sont les plus fréquemment utilisées dans les grandes centrales.

MICROCENTRALES HYDROELECTRIQUES

On désigne sous le terme de microcentrale hydroélectrique, une installation de production d'énergie électrique de faible puissance allant de 1 à 8000 kW, pour des chutes de 1 à plusieurs centaines de mètres, et des débits allant de quelques litres d'eau par seconde à quelques dizaines de mètres cubes par seconde.



Source : programme européen thermique par la région Rhône Alpes

2- Installations hydroélectriques sur réseau d'eau potable

Au cours des dernières décennies, les impacts environnementaux et paysagers des centrales hydrauliques se sont avérés être un frein considérable au développement de cette forme d'énergie. Ainsi, les projets de création de centrales hydroélectriques ont été soumis à des exigences grandissantes en terme de législation et de respect de l'environnement.

Si l'on ajoute à cela le fait que les sites les plus intéressants d'un point de vue énergétique sont déjà exploités, on comprendra qu'il est aujourd'hui de plus en plus difficile de réaliser de nouvelles centrales hydroélectriques.

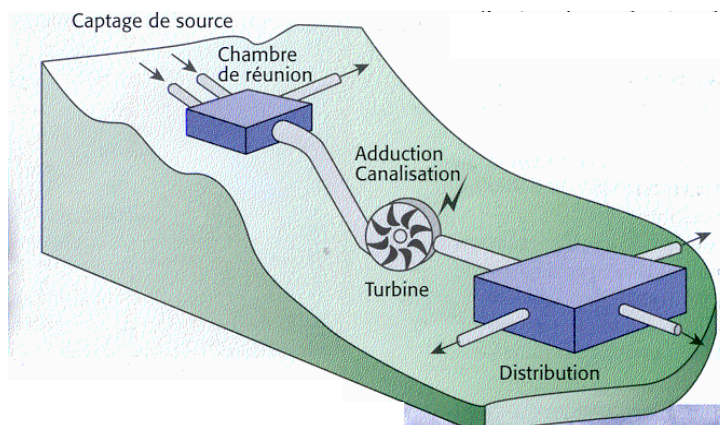
Pourtant, l'énergie hydraulique, qui a l'immense avantage d'être une énergie à la fois propre et renouvelable, dispose encore d'un potentiel important de développement sous certaines formes. En s'inspirant d'autres pays comme la Suisse, on peut utiliser un nouveau gisement : équiper et valoriser des réseaux d'eau existants ou à créer, c'est à dire turbiner les eaux des canalisations d'eau potable, usée ou d'irrigation.

Ce type d'installation hydroélectrique n'a alors aucun impact sur l'environnement puisque ce sont des canalisations existantes qui sont valorisées. D'un point de vue technique, on retrouve les éléments de la petite hydraulique de cours d'eau : un captage d'eau (de source ou de n'importe quel autre point de collecte) et une conduite forcée (canalisation) menant à une turbine.

Les avantages de cette solution sont nombreux : valorisation de conduites existantes, apport de ressources supplémentaires augmentant la rentabilité des équipements existants, coûts de génie civil réduits, débit d'eau régulier, « problème » des poissons écarté, pas d'impacts visuels supplémentaires (les canalisations existent déjà et la construction d'un barrage n'est pas nécessaire), pas de perturbation des écosystèmes aquatiques.

Mais des contraintes existent : l'exploitation d'un réseau ne doit pas faire oublier les priorités à respecter : assurer la sécurité d'approvisionnement dans n'importe quelle situation, préserver la qualité de l'eau.

Le schéma suivant décrit une installation type de turbinage sur adduction d'eau potable :



3- Technique de transformation de l'énergie hydraulique en électricité et coût d'une installation

Technique de transformation :

Pour produire de l'électricité, on utilisera une génératrice ou un alternateur. L'installation fait appel :

- soit à un système de stockage
- soit à un générateur d'appoint (ex : roue à aubes + système photovoltaïque)
- soit à la fois à un système de stockage et à un générateur d'appoint (ex : roue à aubes + batteries + système photovoltaïque)
- soit à une connexion au réseau

Un système hydraulique autonome de production d'électricité se compose :

- d'un hydrogénérateur
- d'un régulateur qui assure le contrôle du chargement et du déchargement de l'accumulateur
- d'un système de stockage.

Une installation autonome nécessite un système de stockage. S'il y a utilisation de batteries, les accumulateurs les plus répandus et les plus accessibles au grand public sont les batteries au plomb. Elles ont un rendement assez faible, 50% environ, et doivent être remplacées après une demi-douzaine d'années. Les batteries pour installations électriques autonomes doivent fournir un courant faible sur une longue période. Enfin, elles contiennent des substances dangereuses pour l'utilisateur –de l'acide sulfurique– et l'environnement –du plomb. Leur fabrication, qui nécessite une forte consommation d'énergie, leur retraitement et leur élimination entraînent donc des risques environnementaux importants. L'écobilan des batteries est donc plutôt négatif. Cependant, des nouveaux types de batteries apparaissent, plus intéressants : c'est le cas notamment d'un modèle au Lithium, sûr et puissant.

Dans notre cas, c'est le réservoir d'eau en amont qui sert au stockage de l'énergie.

L'énergie hydraulique à quel prix

Le coût d'une installation varie fortement en fonction de l'infrastructure périphérique qu'il faut mettre en œuvre (barrage, ...). Dans ces conditions on dira que le coût d'investissement du kilowatt installé varie entre 1 200 et 2 500 euros.

En règle de bonne pratique, on compte généralement 10% du revenu annuel comme « frais de fonctionnement », sachant que l'installation est censée pouvoir fonctionner 60% du temps (crues, étiages, et arrêts techniques = 40%).

V/ Comment fonctionne l'installation ?

1- Descriptif de l'installation

Un plan d'eau artificiel (marre, petit lac) est situé en amont de la maison. Etant donné la situation de cette habitation en altitude, l'eau suit la pente du terrain pour arriver à la turbine, à proximité de la maison dans notre maquette, dans le vide sanitaire au rez-de-chaussée pour la maison réelle. Là, la turbine convertit l'énergie hydraulique de l'eau en énergie mécanique. Elle est reliée à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en électricité pour faire fonctionner le système électrique de la maison. L'eau va alors dans un second réservoir où l'éolienne, grâce à un système de pompage, vient la chercher pour la remonter au plan d'eau initial.

L'eau contenue dans le réservoir en amont constitue la forme de stockage de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la maison.

2- Choix des matériaux pour la maquette : le PVC

Le plastique est plus léger que le bois.

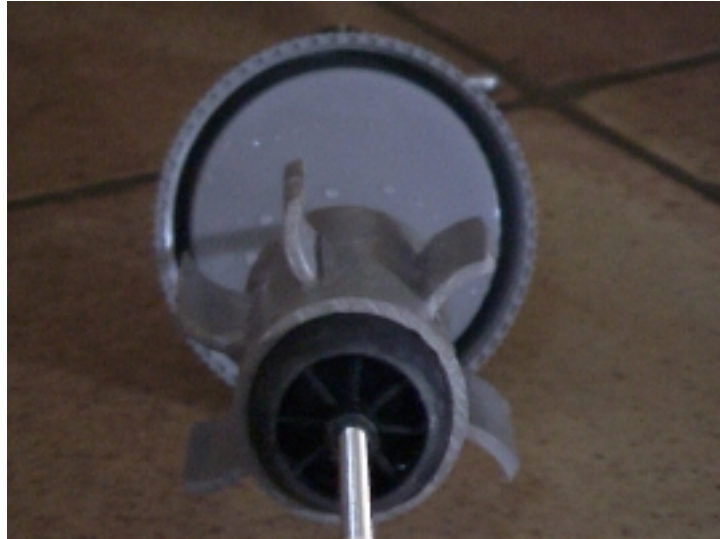
Le plastique est plus résistant à l'eau et plus étanche que le bois.

Il est nécessaire de monter l'axe du rotor sur des roulements à billes. Sinon la perte d'énergie due aux frottements diminue considérablement le rendement.

Le système étant fermé dans un tube, il est plus représentatif d'une turbine qui est le système le plus adapté à l'usage des particuliers par rapport à une roue à aubes qui nécessite une grande quantité d'eau.

VI/ Expériences

Mon expérience consiste à mesurer la puissance que peut fournir la turbine.



Sch. 2 : photos de la turbine de profil, de face et gros plan sur les pales



sch. 3 : photos de la turbine dans son tuyau fermé et couplée à la dynamo

VII/ Calculs

1- Puissances maximum, minimum et moyenne consommées par le foyer

Energie journalière consommée par le foyer et capacité de stockage du réservoir

a- calcul de la puissance moyenne à fournir

L'énergie nécessaire au fonctionnement d'une habitation moyenne est de 3100 kWh/an.

Ce qui nous donne :

$3100 / 365 = 8.4$ kWh par jour $\rightarrow E = 30.2$ Mjoulles par jour

puissance moyenne pour une journée de douze heures : $P_m = E / t$

$P_m = (30.2 \cdot 10^6) / (3600 \times 12) \rightarrow P_m = 0.7$ kW

b- calcul de l'énergie à stocker et de la taille du bassin d'eau en amont

Il faut néanmoins avoir une réserve d'environ trois jours en cas d'absence totale de vent. Il est possible de la calculer et de trouver les dimensions du lac artificiel à réaliser.

$E = P \times t \rightarrow E = 700 \times 3600 \times 12 \times 3$

$E = 90.5$ MJ

$= 25.2$ kWh

On suppose que la hauteur du bassin est $h = 7$ m

$E = m \cdot g \cdot h$

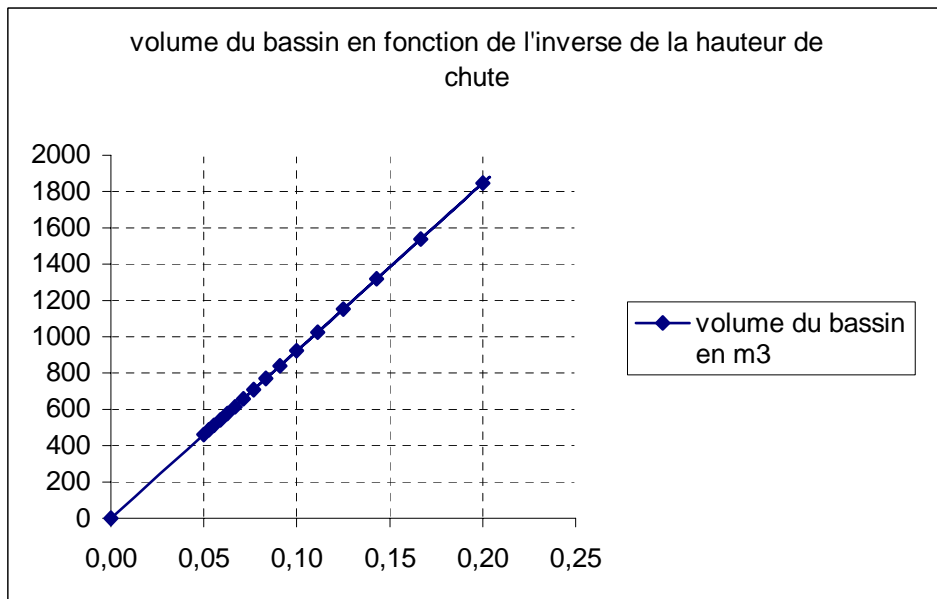
$= \rho \cdot V \cdot g \cdot h \rightarrow V = E / (\rho \cdot g \cdot h)$

$\rightarrow V = (90.5 \cdot 10^6) / (1000 \times 9.8 \times 7)$

$\rightarrow V = 1350$ m³

Ce qui correspond à un bassin de 2m de profondeur, 26m de largeur et 26m de longueur.

Pour diminuer la taille du bassin, il faut augmenter la hauteur de chute.



c- calcul du débit nécessaire pour obtenir P_{maxi}

La puissance maximale consommée par un foyer moyen est d'environ 6 000 watts. La puissance minimale est d'environ 100 watts. La puissance moyenne a été calculée ci-dessus. En utilisant des ampoules basse consommation, la puissance maximale à fournir sera d'environ 3 000 watts.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{maxi}} &= E_{\text{maxi}} / t \\
 &= m.g.h / t \\
 &= \rho.Q_{\text{vol}}.g.h \quad \rightarrow \quad Q_{\text{vol}} = P_{\text{maxi}} / (\rho.g.h) \\
 &= 3000 / (1000 \times 9.8 \times 7) \\
 &= 43 \text{ L/s}
 \end{aligned}$$

Pour P_{moyenne} : $Q_{\text{vol}} = 700 / (1000 \times 9.8 \times 7) = 10 \text{ L/s}$

Taille de la vanne : $S = Q / k \times \sqrt{h}$

$$\begin{aligned}
 S &= 0.043 / 3 \times \sqrt{7} \\
 S &= 5.4.10^{-3} \text{ m}^2 \\
 S &= 54 \text{ cm}^2 \quad \rightarrow \quad \text{section de la vanne}
 \end{aligned}$$

$r = \sqrt{S/\pi} \rightarrow r = 4.1 \text{ cm}$; c'est le rayon de la vanne

2- Formules utilisées pour dimensionner l'installation

1. Relation vitesse / hauteur

La relation vitesse – hauteur est une formule très courante en hydraulique.

$$V = \sqrt{2gH}$$

V : vitesse de l'eau qui sort d'un orifice, en mètres par seconde

H : hauteur d'eau qui évalue la pression amont, en mètres

Pour peaufiner les calculs, on peut mettre en relation le théorème de Bernoulli, qui prend en compte la pression, avec la formule de la vitesse – hauteur

2. Théorème de Bernoulli

Ce théorème essentiel découvert par Bernoulli (1700 – 1782) nous montre que l'énergie spécifique par unité de poids d'un fluide non visqueux (pour nous, de l'eau) dans un écoulement sans pertes de charges est constante.

$$P + H + (V^2 / 2 / g) = \text{constante}$$

P : pression du fluide évaluée en mètres d'eau

Si la pression est en Pascals, il faut remplacer P par P / ϖ , ϖ étant le poids spécifique en Newton par mètre cube soit 10 000 pour l'eau.

H : hauteur du point d'observation considérée par rapport à un niveau de référence arbitraire mais fixe.

V : vitesse du fluide en mètres par seconde.

3. Débit d'une vanne simple

La formule est très approchée.

$$Q = k S \sqrt{H}$$

S : section de passage en m²

H : charge : différence de hauteur entre le niveau haut et le dessus de la lame d'eau stabilisée sortant de la vanne, en mètres

Q : débit en mètres cubes par seconde

k varie de 3.2 à 3.0 selon les dimensions et l'ouverture de la vanne

Attention : il y a lieu de bien choisir la valeur de H qui correspond à la surface libre de la veine.

4. Puissance d'une chute

La puissance théorique valable pour toute installation est donnée par la formule :

$$P = 9.81 \times Q \times H$$

P : puissance en Watts

Q : débit de la chute en litres par seconde

Attention : si le débit Q est en mètres cubes par seconde, la puissance P est en kilowatts

5. Formule rigoureuse de la puissance :

$$P = \varpi \times Q \times H$$

P : puissance en watts

g = 9.81 N / kg

$\varpi = 1\,000 \text{ kg} / \text{m}^3$

Pour avoir la puissance réelle il faut multiplier par le rendement, coefficient inférieur à 1.

6. Puissance théorique simplifiée d'une installation

$$P = M \times g \times H$$

P : puissance en watts

M : débit en litres par seconde

g : coefficient de pesanteur : 9.81 N / kg

H : hauteur en mètres

7. Puissance simplifiée d'une chute

$$P = m \times g \times h$$

P : puissance en watts

m : masse d'eau tombant de la chute toutes les secondes en kg (1 litre = 1 kg)

g : champ de pesanteur : 9.81 N / kg (pour simplifier, prendre g = 10 N / kg)

h : hauteur de chute en mètres

La transformation de cette énergie hydraulique en énergie utilisable, en électricité pour notre installation, entraîne inévitablement des pertes. En estimant que le rendement d'une installation est de 50%, le calcul devient donc :

$$P = (1/2) \times m \times g \times h \quad \text{soit } P = 5 \text{ m h}$$

P : en watts
m : en kg / s
h : en mètres

8. Puissance mécanique d'un jet d'eau

La puissance mécanique d'un jet d'eau est l'énergie contenue dans ce jet. Elle dépend de la vitesse et du débit.

$$P_m = 0.5 \times Q \times \varpi \times V^2 = 0.5 \times S \times V^3 \times \varpi$$

ϖ étant ici la masse spécifique de l'eau en kg / m³ soit 1 000 pour l'eau.
Q : débit en m³ / seconde
S : section du jet en m²
V : vitesse en mètres par seconde
P_m : en watts

Si la section est circulaire et de diamètres d en mètres,

$$V = 0.2 \times \sqrt[3]{(P_m / \pi / d / d)}$$

9. Choc d'un jet sur une surface.

Quand un jet d'eau animé d'une vitesse V rencontre une surface à angle droit, il exerce sur cette surface une force F.

$F = \varpi \times Q \times (V - v)$
F : force exercée en Newtons
Q : débit en m³/seconde
V : vitesse d'arrivée en m / s
v : vitesse de recul de la plaque dans la direction du jet en m / s
 ϖ : masse spécifique de l'eau en kg / m³ soit 1 000

10. Energie cinétique du jet

$$E_c = (m \times V^2) / 2$$

M : masse en kg
v : vitesse en m / s
E_c : en Joules

11. Puissance reçue par la turbine

Si la surface est immobile, celle-ci ne récupère aucune énergie.
Si la vitesse v n'est pas nulle, la puissance récupérée est :

$$P = F \times v$$

Si enfin $v = V / 2$, la puissance devient maximale pour $v = V / 2$
Soit donc : $P = \varpi \times Q \times V^2 / 4$

12. Diamètre d'un arbre

$$D = K \times \sqrt[3]{P / N}$$

K : 96 à 120 selon la sécurité désirée

P : puissance en CV
N : en t / min
D : diamètre en mm

$$P = (0.01333 p) / 9.81$$

P : puissance en CV
p : puissance en Watts

13. Pertes de charges

Tout fluide qui circule à l'air libre ou en canalisation subit une dégradation d'énergie appelée perte de charge. Cette perte existe dans les lignes droites (dus à la rugosité et aux frottements), elle est accentuée par les changements de direction, les variations de section, ...

Il est d'usage d'affecter à ces pertes, locales notamment, un coefficient par rapport à la quantité connue : $2gv^2$.

Ces coefficients ont été étudiés le plus souvent expérimentalement, et de nombreux facteurs interviennent notamment les diamètres et l'état des parois.

14. Obstacle dans un fluide en mouvement

Tout obstacle dans un écoulement reçoit une réaction de la part du fluide. La force exercée dans le sens du courant porte le nom de traînée.

La force exercée perpendiculairement au sens du courant porte le nom de portance.

Une plaque totalement en travers du courant agit de façon strictement opposée : la portance est nulle, la traînée considérable.

15. Ecoulement torrentiel

Un écoulement de type torrentiel est celui que l'on trouve au pied d'une vanne ouverte, par exemple.

Ce type d'écoulement, à grande vitesse, ne peut se maintenir que si la pente du radier a une certaine valeur minimale, dite pente critique (torrents de montagne). Dans ce type d'écoulement, la valeur du terme $v^2/2g$ a une valeur importante.

Si la pente devient insuffisante, il y a ressaut. Après le ressaut, il y a eu une perte considérable d'énergie.

Le contraire de l'écoulement torrentiel est l'écoulement fluvial.

3- Utilisation des formules pour la maquette

Pour produire de l'électricité, une dynamo est couplée à la turbine. Elles sont reliées à un voltmètre et à un ampèremètre qui permettent ainsi de calculer la puissance fournie.

VIII/ Conclusion

La production d'électricité d'origine hydraulique est d'une grande souplesse ; elle participe à la production de base des réseaux, mais peut venir également en complément aux heures de pointe grâce à sa rapidité de mise en œuvre. Les barrages hydroélectriques participent également à la régulation des crues.

Dans notre maison, il faut compter un coût de 1500 euros par kilowatt installé au départ. Sachant que le coût de l'électricité pour un ménage moyen est d'environ 150 euros par an, on peut prévoir que l'installation sera amortie en dix ans, le coût de l'entretien des installations hydroélectriques par an est négligeable.

Ce sujet est très intéressant car il nous touche tous : le problème de la production d'électricité par rapport à la protection de l'environnement a toujours été et continuera d'exister tant que des solutions ne seront pas trouvées. Les énergies renouvelables et notamment l'énergie hydraulique peuvent en être une intéressante qu'il faudrait exploiter à sa juste valeur.

B/ L'énergie éolienne : une énergie en plein essor

I/ Introduction

L'énergie éolienne est une énergie inépuisable et non polluante. Elle ne nécessite que le choix d'un bon lieu d'implantation et l'utilisation de l'éolienne la plus adaptée à la construction prévue. D'après certaines recherches, on estimerait que le vent distribuerait entre 2.5 et 5.10^{15} kWh chaque année, soit une énergie très importante mais difficilement récupérable.

En premier lieu, nous expliquerons en quelques mots l'origine et le gisement du vent, puis nous ferons la présentation des différents types de capteurs éoliens. , nous montrerons comment marche l'installation. Nous ferons ensuite quelques expériences que nous démontrerons ou expliquerons par des calculs.

II/ L'origine du vent et son utilisation au fil du temps

1- Historique

Le vent a été utilisé très tôt pour la propulsion d'embarcations à voiles. Ce fut sa première utilisation.

Dès le V^{ème} siècle avant J.-C., on pouvait trouver des panémons (éoliennes à axe vertical) dans les îles grecques. Mais c'est en Perse que le premier moulin à vent a été fabriqué en 134 avant J.-C.. Ces premières éoliennes étaient utilisées essentiellement pour l'irrigation.

Au fil des siècles, l'éolienne continue une lente évolution et ce n'est qu'au XIII^{ème} siècle qu'apparurent les éoliennes à axe horizontal.

L'idée de l'aérogénérateur date de 1802 quand un physicien anglais, Lord Kelvin, associa une génératrice d'électricité à un moteur éolien. Et dès 1850 les premiers aérogénérateurs virent le jour. Cette nouvelle application a connu un certain succès et en 1920 on comptait 300 constructeurs d'aérogénérateurs. C'est à ce moment là que les éoliennes commencèrent à se développer.

2- Gisement éolien

Le vent est le produit d'une différence de température entre deux endroits différents. Les ressources éoliennes sont plus abondantes le long des côtes qu'à l'intérieur des continents, à cause de la différence de température entre la terre et la mer. En effet la terre se réchauffe plus vite que l'eau durant la journée et se refroidit plus rapidement durant la nuit. Ainsi le vent souffle du large vers les côtes durant la journée et des terres vers le large la nuit. La vitesse du

vent dépend du lieu géographique où l'on se trouve. Le relief accidenté et les montagnes gênent beaucoup la circulation du vent mais il est malgré tout plus uniforme en altitude.

III/ Présentation et caractéristiques principales des différents types de capteurs éoliens

1- Les capteurs à axe horizontal

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, "hélice au vent", et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, "hélice sous le vent".

Les moulins hollandais : ils se caractérisent par un assez bon coefficient de puissance de la machine pour des vitesses voisines de 2 à 3 m/s.

Les moulins américains : ils peuvent comporter de 12 à 30 pales. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s, au-delà il faut prévoir un dispositif d'arrêt.

Les éoliennes rapides : la puissance de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts. Les coefficients de moment et de puissance sont optimaux pour des valeurs comprises entre 6 et 10.

2- Les capteurs à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent.

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants. Seuls les deux premiers seront étudiés.

Le rotor de Savonius : Il est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Il est caractérisé par un grand couple de démarrage, il fonctionne à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s.

Le rotor de Darrieus : le principe repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.

IV/ Montage de notre expérience

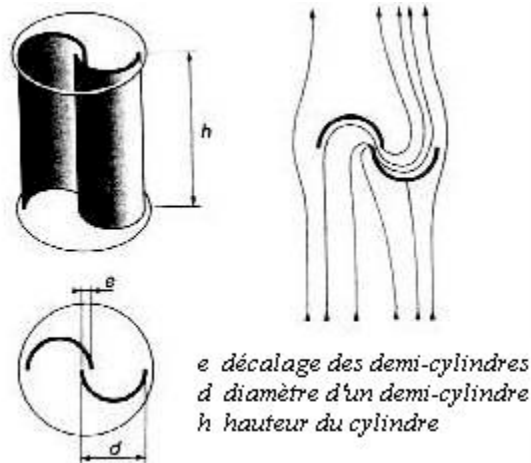
1- Objectif

Il s'agit de remonter une quantité d'eau en un certain temps (c'est le débit) sur une hauteur donnée. Dans notre cas, il faut remonter l'eau dans le bassin supérieur à partir de l'énergie mécanique créée par le rotor de Savonius.

2- Choix du rotor de Savonius

Gros plan sur ce rotor :

L'éolienne du type Savonius est l'une des plus facile à réaliser. Celle-ci est utilisée pour des vents variant aux alentours de 1m/s. Grâce à sa forme demi-cylindrique, elle crée une différence dans la forme du flux d'air.



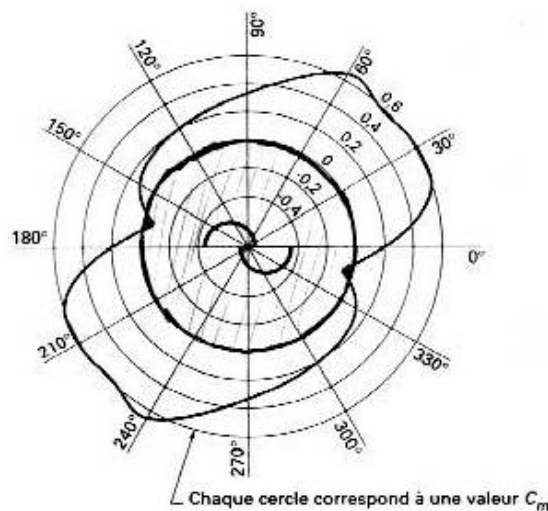
Sch. 1 : Forme et flux d'air pour le rotor de Savonius

Nous obtenons un rendement maximal pour un rapport $e/d=1/6$ où d est le diamètre du cylindre constructif du rotor et e le décalage entre les deux demi-cylindres.

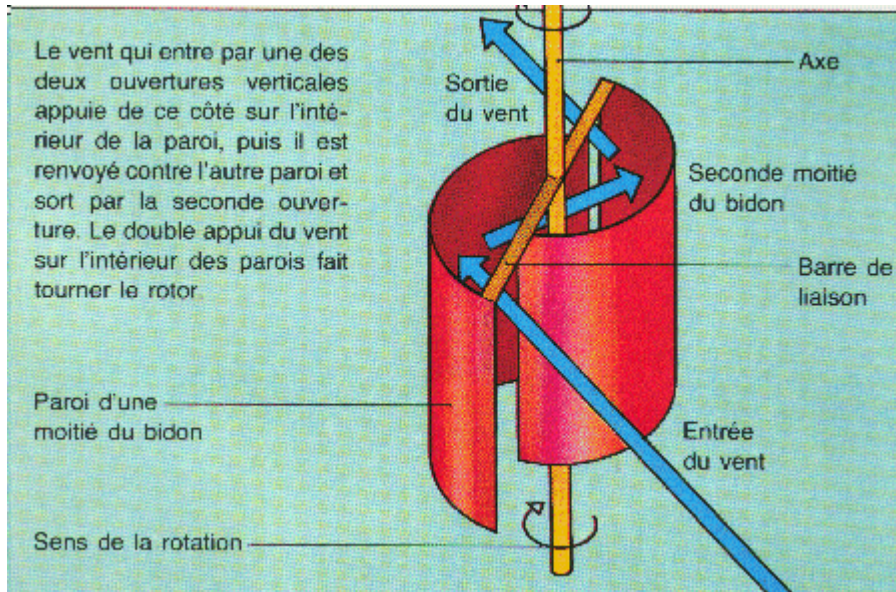
Nous savons que le couple au démarrage est très élevé dans les conditions optimales, cependant, si l'orientation du rotor n'est pas bonne, le couple au démarrage peut diminuer, voire s'annuler.

Il est donc d'usage d'utiliser deux rotors orientés à angle droit l'un par rapport à l'autre afin d'éviter tout problème.

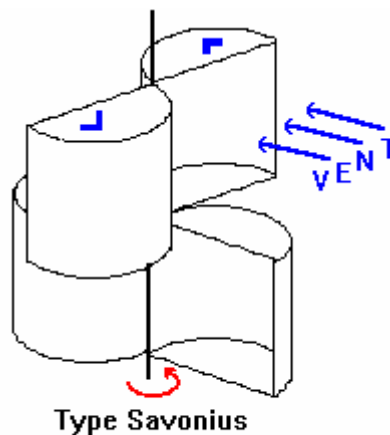
A partir du diagramme représentant le coefficient de démarrage, nous pouvons en créer un nouveau pour notre installation, c'est à dire deux rotors superposés. Nous obtenons une seconde courbe (noire) qui représente le coefficient du deuxième rotor. A partir de cela, nous avons pu trouver le coefficient total de démarrage pour notre éolienne (courbe rouge)



Sch. 2 : Coefficient au démarrage en fonction de la position du rotor



Sch. 3 : Principe du rotor de Savonius



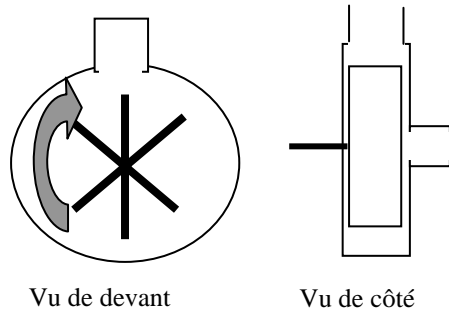
Sch. 4 : Principe de notre rotor de Savonius

3- Quelle pompe utiliser ?

Il existe de nombreuses pompes permettant l'acheminement de l'eau en surface. Mais toutes n'ont pas les mêmes capacités. Après les avoir étudiées en fonction de nos besoins, nous avons choisi une pompe de type «pompe d'aquarium » appelée aussi pompe à palettes : le fluide entre au centre des palettes et est envoyé vers l'extérieur par la force centrifuge.

Ces pompes fonctionnent à partir d'électricité. Mais dans notre cas, elle sera active grâce à l'énergie mécanique produite par notre éolienne.

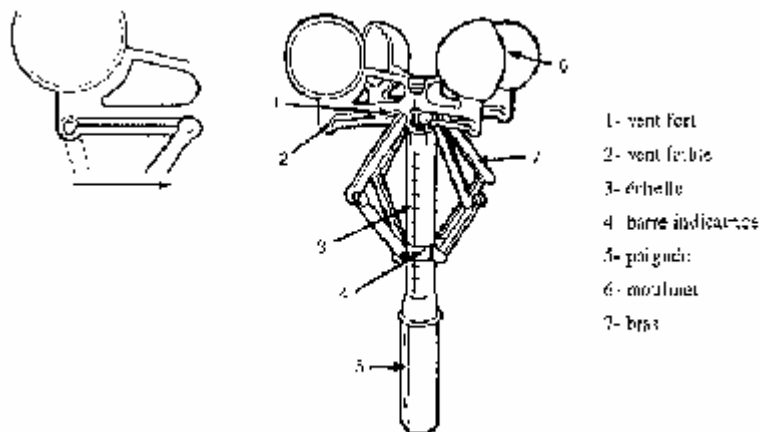
Le prix moyen d'une pompe de ce genre est 300 Euros (soit 2000 francs).



V/ Expériences

1- Expérience avec l'anémomètre

a- Utilisation de l'anémomètre ?



Sch. 5 : Anémomètre

Afin que la mesure soit totalement exacte, il faut maintenir l'anémomètre bien vertical. Grâce à cet appareil, nous pouvons mesurer la vitesse du vent soit en m/s soit sur l'échelle de Beaufort.

Plus le vent souffle fort, plus les bras s'écartent, faisant ainsi monter verticalement la barre de lecture le long de l'axe, sur l'échelle.

Lecture des résultats :

FORCEN°	TYPE DE VENT	VITESSE (m/s)
0	pas de vent	0
1	très légère brise	0,3-1,5
2	légère brise	1,6-3,1
3	petite brise	3,2-5,4
4	brise modérée	5,5-7,9
5	bonne brise	8,0-10,8
6	vent frais	10,9-13,7
7	grand frais	13,8-17,0
8	courant de vent	17,1-20,5
9	tout coup de vent	20,6-24,5
10	tempête	24,6-28,7
11	violente tempête	28,5-32,6
12	ouragan	32,7 et +

b- Mesure du vent produit par notre ventilateur

Par cette expérience, nous déterminons la vitesse du vent. Nous trouvons $V_{\max} = 8\text{m.s}^{-1}$

2- Fonctionnement du rotor

Cette expérience doit nous permettre de calculer la puissance produite par l'éolienne et la puissance à fournir nécessaire pour le pompage.

VI/ Calculs

1- Calcul de la puissance de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent qui traverse le rotor. Cette énergie cinétique a pour expression générale :

$$E_c = 1/2 \times m \times V^2$$

Avec m : masse d'air en Kg et v : vitesse en m/s.

Si l'on prend : m = masse d'air traversant le rotor en 1 seconde, la puissance sera égale à l'énergie cinétique, soit :

$$P = 1/2 \times m \times V^2$$

Or $m = S \times V \times \rho$ et $S = \pi \times r \times h$

Avec S : surface du rotor en m^2 et ρ : masse volumique de l'air = 1.25Kg/m^3

On a donc :

$$P = 1/2 \times 1.25 \times S \times V \times V^2$$

$$P = 0.625 \times S \times V^3$$

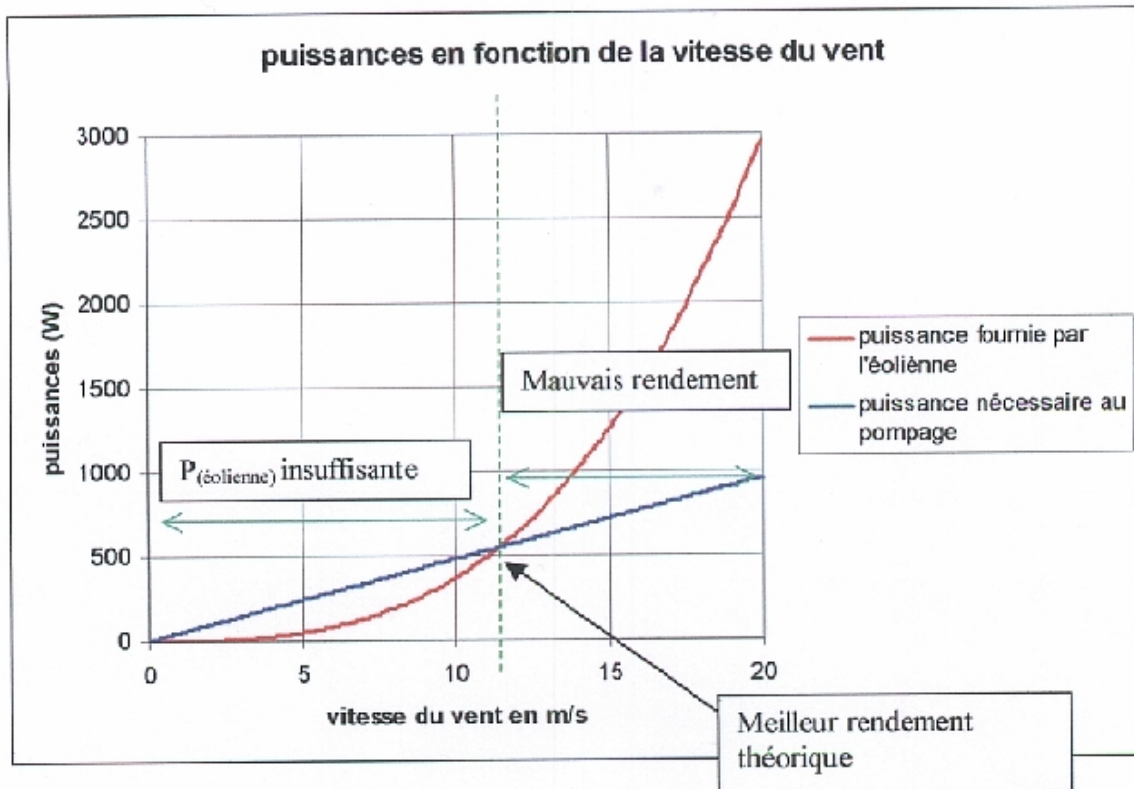
D'après les travaux de BETZ, nous savons que l'on peut récupérer au maximum les 16/27 de cette puissance ;

La puissance sera donc : $P = 16/27 \times 0.625 \times S \times V^3$

$$\text{Donc : } P = 0.37 \times \pi \times r \times h \times V^3$$

2- Courbes théoriques

Cette courbe nous permet de visualiser quelle puissance il faut fournir pour avoir un bon rendement lors du pompage. La courbe bleue nous présente donc la puissance nécessaire au pompage et la rouge la puissance fournie par l'éolienne. Nous remarquons que lorsque $P_{\text{éolienne}} < P_{\text{pompage}}$ et $P_{\text{éolienne}} > P_{\text{pompage}}$ le rendement est mauvais. Il faut donc que $P_{\text{éolienne}} = P_{\text{pompage}}$ pour que le rendement soit le meilleur.



3- Calculs pour le pompage de l'eau

Comparaison de la puissance fournie par l'éolienne avec la puissance nécessaire au pompage.

$$P_{\text{(éolienne)}} = 0.37 \times S \times V^3. \quad \text{si } S = 1\text{m}^2 \text{ on a : } P = 0.37 \times V^3. \quad (P \text{ en Watt, } V \text{ en m.s}^{-1})$$

$$P_{\text{(pompage)}} = Q \times h \times g$$

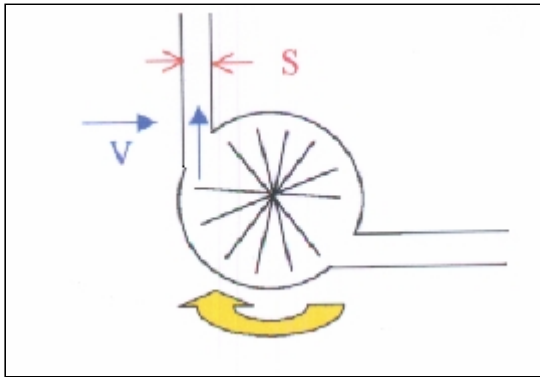
si $h = 7\text{m}$
 $g = 9.8 \text{ m.s}^{-2}$
 si la turbine débite dans un tuyau de diamètre $\varnothing = 1.5 \text{ cm}$
 alors la surface du tuyau est $S = \pi (\varnothing/2)^2$ ici $S = 7.10^{-4} \text{ m}^2$.

$$Q = S \times \rho \times V$$

Et $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

$$P_{(\text{pompage})} = S \times \rho \times V$$

(P en watt, V en m.s^{-1})



4- Calcul de la taille de l'éolienne pour alimenter la maison

On donne :

Le gisement éolien moyen : $V = 8 \text{ m.s}^{-1}$

La consommation électrique moyenne de la maison : $E = 8400 \text{ Wh}$ par jour

Calcul de la puissance moyenne électrique consommée :

$$P = \frac{E}{T} \quad P = \frac{8400}{24} \quad P = 350 \text{ W}$$

Calcul de la surface de l'éolienne :

Nous savon que $P = 0.37 \times S \times V^3$

$$\text{Donc } S = P / (0.37 \times V^3) \quad S = 350 / (0.37 \times 8^3) \quad S = 1.84 \text{ m}^2$$

Taille des cylindres :

On a $S = h \times \pi \times r$

Or pour avoir un bon fonctionnement, il faut que $h = 3 \times r$

D'où $S = 3 \times \pi \times r^2$

$$\text{Donc } r = \sqrt{S / (3 \times \pi)} \quad r = \sqrt{1.84 / (3 \times \pi)} \quad r = 0.44 \text{ m}$$

D'où $h = 1.32 \text{ m}$

VII/ Conclusion

L'énergie éolienne est une énergie pouvant être utilisée dans n'importe quel lieu, du moment que le site choisi est suffisamment venté. Notre expérience nous permet de coupler l'éolienne à une pompe pour remonter l'eau, ce qui limite les pertes (car il n'y a pas de conversion en énergie électrique).

De plus notre éolienne est construite avec des matériaux de récupération, donc le coût de sa construction est minimal. Le seul élément coûteux est la pompe (qui doit être de bonne qualité).

C/ L'énergie solaire

I /Introduction :

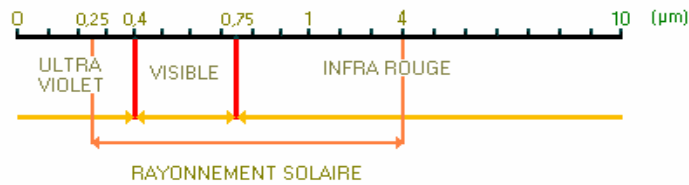
De nos jours, les énergies renouvelables sont d'actualité et très favorisées du fait qu'elles sont abondantes et non polluantes. Parmi les énergies renouvelables, celle qui est la plus développée, la plus populaire et la plus répandue est l'énergie solaire. C'est une énergie qui est très intéressante car elle peut être employée dans différents secteurs : l'agriculture, l'habitat, les centrales électriques.... ;et pour différents domaines : chauffage, électricité, chauffe-eau, dessalement des eaux salines.... De plus nous avons le choix entre différentes installations pour optimiser son rendement selon son utilisation.

Après avoir donné quelques généralités et quelques définitions fondamentales sur cette source principale d'énergie, nous ferons part de notre choix sur son utilisation ainsi que tous les calculs nécessaires pour son application dans notre maison autonome. Ensuite nous conclurons cette partie en donnant les avantages et les inconvénients que peut apporter l'utilisation d'une énergie renouvelable dans l'habitat.

II /Généralités sur le rayonnement solaire :

1- Qu'est ce que le rayonnement solaire :

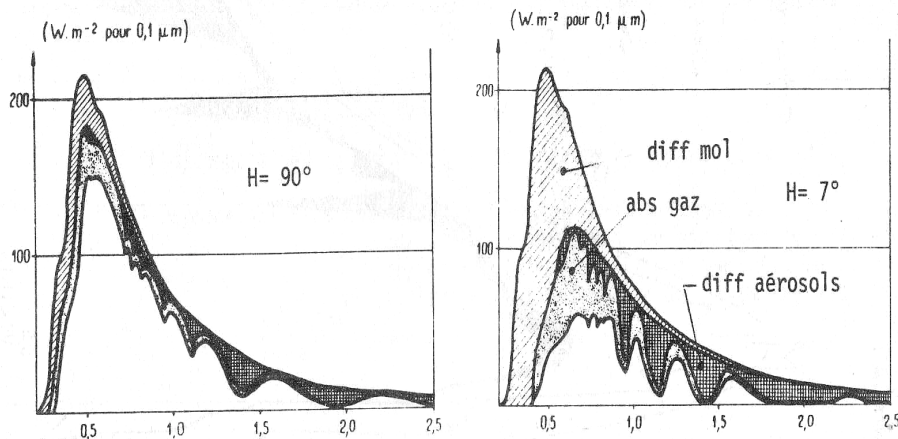
Il faut savoir tout d'abord que le soleil est une sphère de 1 400 000 km de diamètre qui diffuse tout autour de lui un rayonnement phénoménal qui provient des réactions nucléaires en chaîne. On évalue à environ 100 milliards de milliards de kilowatts heure l'énergie rayonnée chaque seconde (la puissance est donc égale à $3,6 \cdot 10^{26}$ W) dans toutes les directions par le soleil. Une grande partie de cette énergie diffusée par le soleil sert à maintenir la température de cet astre qui est de l'ordre de 6 000°C à la surface et seulement une partie infime arrive à la surface de la terre (la terre avec son atmosphère n'en reçoit qu'environ 30 milliards de kWh par seconde). Un faisceau cylindrique de rayons solaires d'un kilomètre carré de section droite apporte donc à son entrée dans l'atmosphère terrestre une puissance de 1395 mégawatts. Cette énergie nous arrive essentiellement sous la forme d'ondes électromagnétiques. Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 à 4 micro mètres (μm). Cette énergie se décompose en 3% d'ultra violet (U.V), 42% de lumière (VISIBLE) et 55% d'infrarouge (I.R).



Sch 1 : Longueurs d'onde du rayonnement solaire :

2- Quel est le rôle de l'atmosphère :

L'atmosphère dissipe une partie de l'énergie qui vient du soleil, donc dès son entrée dans l'atmosphère, ce rayonnement est ainsi sujet à toutes sortes de transformations : diffusion moléculaire, diffusion par les aérosols et absorption gazeuse. C'est à ces deux premiers mécanismes que l'on attribue l'éclairement de la voûte céleste. Lorsque les nuages seront présents, ils intensifieront les mécanismes d'absorption et rediffuseront leur lumière et énergies propres vers le sol. Les gaz de l'atmosphère, qui sont principalement les gaz carboniques et l'ozone, et les vapeurs d'eau ont dans le spectre solaire des raies ou bandes d'absorption bien déterminées, de ce fait ils absorbent des radiations, donc de l'énergie.



Sch 2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire direct

L'absorption par les poussières se manifeste surtout dans l'ultraviolet, tandis que l'absorption gazeuse affecte principalement les longueurs d'ondes supérieures à 0,5 µm. Par conséquent après avoir traversé l'atmosphère, qui est constituée de ces différentes substances, le rayonnement solaire se trouve ainsi très affaibli. Ce phénomène est très marqué dans les villes et les agglomérations industrielles. Une partie de l'énergie du rayonnement solaire absorbée sert à entretenir en partie le rayonnement propre de grandes longueurs d'ondes émises par l'atmosphère sous forme de chaleur, d'énergie cinétique, ou bien afin d'entretenir une modification physique ou chimique des masses atmosphériques traversées.

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus la couche d'air à traverser par les rayons est importante, moins il arrive d'énergie au sol. Lorsque l'angle fait par le plan horizontal du lieu et les rayons solaires est inférieur à 15° il est inutile de capter ces rayons, l'épaisseur d'air

traversée a pratiquement absorbé toute l'énergie. Cette remarque est intéressante car elle permet de juger si un obstacle au rayonnement est un masque pour le capteur.

En conclusion, une partie du rayonnement solaire reçu à la surface du globe est renvoyée par réflexion et diffusion, le reste est absorbé. La surface du globe, de son côté, émet un rayonnement propre de grandes longueurs d'ondes comprises entre 5 et 80 μm environ en rapport avec sa température.

3- Qu'est ce que le rayonnement diffus et le rayonnement direct ?

Définitions :

- Rayonnement direct :

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est «linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné.

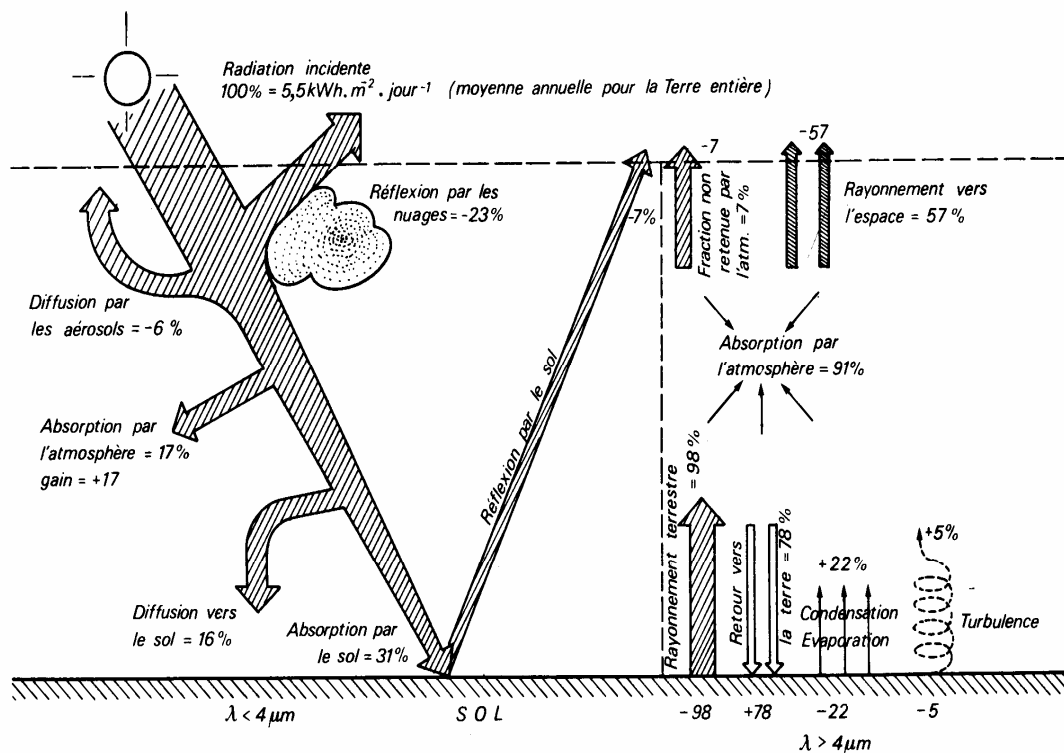
- Rayonnement diffus :

Il provient de la voûte céleste et (ou) des nuages ; il est toujours présent, en plus ou moins grande quantité. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol.

- Rayonnement global :

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus.

55



Sch 3 : Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre

En désignant par : - G : le rayonnement solaire global
- D : le rayonnement solaire diffus
- I : le rayonnement solaire direct
- h : la hauteur du soleil

On peut écrire la relation suivante : $G=D+I.\sin.h$

Remarque : Chacune de ces radiations présente une répartition spectrale différente variant principalement avec la hauteur h du soleil dans le ciel.

D'autres phénomènes, en plus du rayonnement global, interviennent encore pour déterminer la somme des rayonnements au sol, car le sol réfléchit une partie du rayonnement vers l'atmosphère qui le rediffuse. Par ailleurs, le sol et l'atmosphère étant chauffés, ils émettent leur propre rayonnement.

4- Quelques notions fondamentales en astronomie :

Définition :

-La déclinaison : δ :

La déclinaison solaire est l'angle caractérisant la trajectoire du soleil dans le ciel à une période donnée de l'année. Elle s'associe donc à un mois, ou parfois, avec plus de précision, à une décade d'un mois. Elle varie de $-23^{\circ}27'$ à $+23^{\circ}27'$, atteignant les extrêmes aux solstices d'hivers et d'été (trajectoire la plus «haute » et la plus «basse »).

-La décade :

Période de dix jours consécutifs.

-La latitude d'un lieu : l :

C'est l'angle compris entre une direction de midi d'équinoxe et le zénith du lieu. Elle est comprise entre 42 et 51 pour la France.

-L'angle horaire : h :

C'est l'angle compris entre la direction du midi et la direction du soleil à l'instant considéré.

-La hauteur du soleil dans le ciel : H :

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et la projection horizontale de cette direction.

-L'azimut solaire : A :

C'est l'angle compris entre la projection horizontale des rayons et la direction du sud.

Remarque :

A une époque de l'année, à un instant donné de la journée, la position du soleil sera donc caractérisée par le couple (A, H) (pour une latitude fixée).
(voir annexe 1 et 2)

Les diagrammes permettant d'obtenir (A, H) en fonction du mois, de la latitude et de l'heure sont les diagrammes solaires.

5- Nomenclature des différents instruments de mesure :

Pyrradiomètre :

Instrument de mesure du rayonnement total parvenant sur une surface à partir d'un angle solide 2π stéradians ; il sert principalement à la mesure du rayonnement total descendant Q_{\downarrow} ,

somme des rayonnements solaire et atmosphérique dirigés vers le sol (Q_{\downarrow} est relatif aux mesures faites dans l'espace).

Pyranomètre :

Instrument destiné à mesurer le rayonnement global G parvenant à une surface plane à partir d'un angle solide 2π stéradians ; lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus D . G et D concernant les rayonnements mesurés au sol.

Pyrhéliomètre :

Instrument mesurant le rayonnement solaire direct I , l'appareil est orientable de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires ;

Pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre :

Mesure le bilan du rayonnement total, différence entre le rayonnement total descendant Q_{\downarrow} et le rayonnement total ascendant (rayonnements solaire et atmosphérique renvoyés vers l'espace) Q_{\uparrow} : $Q = Q_{\downarrow} - Q_{\uparrow}$.

Les anciens termes actinomètre, solarimètre, pyrgéomètre ne sont plus utilisés.

Héliographe : instrument de mesure et d'enregistrement de la durée de l'insolation.

III/Calcul et réalisation de la maison :

Quand un architecte veut élaborer une maison bioclimatique, il va dans un premier temps faire l'étude précise du lieu d'implantation de l'habitation (situation géographique, climat, quantité d'énergie solaire captée au sol...). Ensuite à partir de ces données, il peut déterminer la structure de la maison, et ainsi effectuer tous les calculs nécessaires pour sa construction, pour le choix et l'installation des panneaux solaires ou autres appareillages indispensables au bon fonctionnement du logement et au bien être des occupants.

Mais dans notre cas, la démarche utilisée pour faire l'étude de notre maison consacrant l'énergie solaire seulement pour le chauffage (nous n'avons pas choisi l'électricité solaire car il a un rendement maximal qui est d'environ 15%, que le coût de l'installation est très élevé et que $10m^2$ de capteur ne produise que $1kW$ donc 10000 à $13000kWh/an$), sera très différente du fait que c'est une maison virtuelle, nous n'avons aucun lieu précis pour la réaliser, ce ne sera donc que de la théorie. Pour les données dont nous aurons besoins pour les calculs nous utiliseront les mesures effectuées dans la région lyonnaise.

1- Le chauffage

Afin d'être dans la capacité d'apporter la quantité d'énergie nécessaire au besoin du chauffage, nous avons recours à deux systèmes : le système passif (le phénomène effet de serre) et le système actif (les panneaux solaires).

Mais avant d'expliquer plus amplement ces deux systèmes, nous allons calculer la quantité totale d'énergie nécessaire au besoin de la maison.

⇒Calcul pour la quantité d'énergie utile :

Volume d'air à chauffer :

-rez de chaussée : $3,5 \times 5 \times 2,5 = 43,75m^3$ (une seule pièce)

-1^{er} étage : $9,5 \times 10 \times 2,5 = 237,5m^3$ (tout l'étage)

-2^{ème} étage : $3,5 \times 10 \times 2,5 = 87,5 \text{ m}^3$ (la moitié de l'étage)

Quantité d'énergie nécessaire Q_1 pour chauffer l'air de la maison :

$$* Q_1 = m \times C \varphi \times \Delta \theta$$

$$* C \varphi = \frac{\varphi \times R}{\varphi - 1 \times M}$$

Avec : φ : 1,4 pour les gaz diatomiques

R : 8,31 J/K/mol

M : 28g/mol pour le diazote et 32g/mol pour le dioxygène

$$C \varphi = \frac{1,4 \times 8,31}{1,4 - 1 \times 28,8 \cdot 10^{-3}} = 1,01 \cdot 10^3 \text{ J/kg/K}$$

$$\underline{C \varphi = 1,01 \times 10^3 \text{ J/kg/K}}$$

$$* m = \frac{M}{V_m}$$

Avec ; m : en grammes, M : en g/mol, V_m : en l /mol

$$* V_m = \frac{n \times R \times T}{\varphi}$$

Avec : n : en mol, R : 8,31J/K/mol, T : en K, φ : 10⁵

$$V_m = \frac{1 \times 8,31 \times 293}{10^5} = 24,3 \text{ L/mol à } 293 \text{ K (} 20^\circ \text{c)}$$

Ou
$$V_m = \frac{1 \times 8,31 \times 285}{10^5} = 23,9 \text{ L/mol à } 285 \text{ K (} 12^\circ \text{c)}$$

$$\underline{V_m = 24,3 \text{ L/mol ou } 23,9 \text{ L/mol}}$$

$$* m = \frac{28,8}{24,3} = 1,18 \text{ g/L}$$

Ou
$$m = \frac{28,8}{23,9} = 1,20 \text{ g/L}$$

$$\underline{m = 1,18 \text{ g/L ou } 1,20 \text{ g/L}}$$

$$* Q_1 = 1,2 \cdot 10^{-3} \times 1,01 \cdot 10^3 \times \Delta \theta$$
$$= 1,2 \times \Delta \theta \text{ pour 1 litre}$$
$$= 1,2 \cdot 10^3 \times \Delta \theta \text{ pour 1 m}^3$$

$$\underline{Q_1 = 1,2 \cdot 10^3 \times \Delta \theta \text{ pour 1 m}^3}$$

Quantité d'énergie stockée Q_4 pour chauffer le béton :

$$* Q_4 = m \times C \varphi \times \Delta \theta$$

Avec :

$$* C \varphi = 0,22 \text{ kcal.kg}^{-1}$$
$$= 0,22 \times 10^3 \text{ cal.kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$$
$$= \underline{920 \text{ J.kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}}$$

$$* m = \rho \times V$$

Avec:

$$* V = S \times e$$
$$S = 2 \times 10 \times 12 \times 9$$

$$\begin{aligned}
 &= \underline{396 \text{ m}^2} \\
 e &= 0,2 \text{ m} \\
 \text{D'où } V &= 396 \times 0,2 \\
 &= \underline{80 \text{ m}^3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * m &= \rho \times V \\
 &= 2 \times 80 \\
 &= \underline{160 \text{ tonnes}}
 \end{aligned}$$

Avec: $\rho = 2 \text{ tonnes} / \text{m}^3$

$$\begin{aligned}
 * Q_4 &= 920 \times 160.10^3 \times \Delta\theta \\
 &= \underline{1,48.10^8 \text{ J}} \\
 &= (1,48.10^8 \times \Delta\theta) / 3600 \\
 \underline{Q_4} &= \underline{41.10^3 \text{ Wh}}
 \end{aligned}$$

Quantité d'énergie Q_5 dissipée par le mur :

$$* Q_5 = \Phi \times S \times 3600 \times 24 \times 30$$

Isolant utilisé pour la maison: polystyrène : $e = 0,1 \text{ m}$ (épaisseur)

$$\begin{aligned}
 \text{Avec } * \Phi &= (\lambda / e) \times \Delta\theta \\
 &= (0,04/0.1) \times \Delta\theta \\
 &= 0,4 \times \Delta\theta \text{ W.m}^2
 \end{aligned}$$

Avec : $\lambda = 0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{c}^{-1}$

Le flux thermique Φ est la quantité de chaleur dissipée par l'isolant par unité de surface et durant un temps donné.

$$\begin{aligned}
 \text{Avec: } S &= (4 \times 10 \times 9) + (12 \times 10) \\
 &= 480\text{m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * \Phi_{\text{total}} &= \Phi \times S \\
 &= 0,04 \times 480 \\
 &= \underline{192 \times \Delta\theta \text{ W} . \text{m}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * Q_5 &= \Phi_{\text{total}} \times 3600 \times 24 \times 30 \\
 &= 192 \times 3600 \times 24 \times 30 \times \Delta\theta \\
 &= \underline{4,9. 10^8 \times \Delta\theta \text{ J}} \\
 &= (4,9.10^8) / 3600 \\
 \underline{Q_5} &= \underline{138.10^3 \times \Delta\theta \text{ Wh}}
 \end{aligned}$$

2- Le système passif :

Le principe du phénomène «effet de serre» est très employé en agriculture, mais depuis quelques années, il est aussi très adopté dans l'architecture, surtout depuis l'emploi de l'énergie solaire pour le chauffage. Ce procédé simple permet de récupérer une partie de l'énergie solaire sous forme de chaleur de manière naturelle.

Dans une serre, le sol de préférence de couleur foncée absorbe toutes les radiations du spectre lumineux, donc toute son énergie, ce qui provoque son échauffement, les vitres transparentes qui composent la serre, laissent passer le rayonnement solaire mais piège le rayonnement calorifique qui se dégage du sol. Par conséquent, ce phénomène permet l'augmentation, l'élévation de la température dans la serre.

Dans certains climats (les climats chauds et secs), l'application de ce seul principe permet d'être tout à fait autonome du point de vue énergétique. Une conception et une construction appropriées du bâtiment éliminent les besoins de chauffer ou de refroidir. Tandis que dans les régions à climat tempéré, d'autres facteurs sont à prendre en compte et nécessitent parfois la complémentarité d'un autre système.

Le choix de la disposition de la maison, des pièces est quelque chose de primordial. Il faut orienter les baies vitrées vers le sud afin de favoriser la pénétration des rayons du soleil. Avec cette orientation on peut capter ce rayonnement dès le levé du soleil jusqu'à son coucher. Tandis que le mur situé au Nord ne doit posséder aucune ouverture voire très peu de manière à limiter les pertes calorifiques avec l'extérieur. Pour les pièces, celles qui sont les plus fréquentées (cuisine, salle à manger, séjour et les chambres) doivent se situer le plus près possible de la serre afin que la chaleur produite par celle-ci se dissipe directement dans les pièces communes. Tandis que les espaces tampons doivent se situer au Nord (Nord-Est, Nord-Ouest). Dans une maison se sont toujours les pièces non-habitable comme les garages, les selliers, les débarras... qui sont utilisées comme barrières entre l'extérieur et les pièces chauffées. En effet l'air chaud se dirige vers les pièces les plus froides. Les espaces tampons ont donc un rôle d'isolants, ils empêchent les contacts directs entre les espaces vivables et l'extérieur, ils diminuent donc les pertes énergétiques. (voir annexe 3)

Il y a un autre paramètre qui est aussi important que l'orientation de la maison ainsi que de ces pièces : c'est l'isolation. Dans un premier temps on a le choix des matériaux de construction et dans un deuxième temps on doit tenir compte des ponts thermiques. Les ponts thermiques sont les lieux où le sol et le plafond rentrent en contact avec le mur, ce qui permet des échanges thermiques et entraîne des pertes. On peut soit éviter de créer ces ponts thermiques en installant un isolant qui empêchera le plafond et le sol de toucher directement le mur et réduira ainsi la diffusion de chaleur, soit s'en servir comme c'est le cas dans notre situation. En faisant circuler la chaleur à travers ceux-ci, elle passera donc du plafond au mur (l'air chaud monte, donc il s'accumule dans celui-ci), puis une partie vers sol. Les murs et le sol seront réalisés dans des matériaux ayant un coefficient de conductivité thermique très élevé, ce qui permet un échange beaucoup plus rapide. De cette manière le mur et le sol vont servir de lieu de stockage pour l'énergie calorifique emmagasiné durant toute la période d'ensoleillement, elle sera ensuite redistribuée naturellement durant la première partie de la nuit dès que la température de la pièce diminuera. Mais il faudra par conséquent sur isoler la maison de l'extérieur afin de favoriser les échanges à l'intérieur et non avec la périphérie. Les murs, le sol et le plafond seront donc réalisés dans du béton, et on utilisera comme isolant des plaques de polystyrènes mis à l'extérieur de la maison.

Pour mieux illustrer ce système passif nous avons imaginé une maquette qui permettra ensuite de réaliser l'expérience avec le pyréliomètre.

Maquette n°1 :

L'idée de la création de la maquette est due à la complexité et la difficulté à comprendre les diagrammes solaires. En effet ce qui nous a posé le plus de problèmes était de visualiser le diagramme solaire, de faire le lien entre la réalité et ce graphique. Par conséquent l'intérêt de la maquette était d'obtenir les mêmes données qu'avec un diagramme solaire. On a donc conçu une maquette qui met en jeu la position du soleil par rapport à la terre (on se place donc dans un référentiel terrestre et non dans celui du soleil comme dans la réalité)

selon une latitude, un mois et une heure précise. Pour cela on a recréé les mêmes paramètres que dans la réalité, à la différence qu'ici c'est le soleil qui tourne autour de la terre, et avec l'aide de deux rapporteurs on peut mesurer la hauteur et l'azimut du soleil, c'est à dire la position du soleil pour un instant précis. On réalise donc un diagramme solaire sans faire aucun calcul. De plus si on réalise une maison avec tout ce qui l'entoure (arbre, bâtiment...) à l'échelle de la maquette on pourra observer s'il existe des ombres pouvant diminuer fortement l'utilisation de l'énergie solaire que se soit par rapport au système passif ou actif.
(Voir annexe 4).

Expérience n°1 :

Avec l'aide d'un pyréliomètre qui est un instrument de mesure, on peut mesurer l'énergie du rayonnement direct au sol. Mais avant de l'installer il faut connaître l'angle α que fait les rayons du soleil avec le sol à un instant donné. Pour cela on utilise la première maquette, on règle celle ci pour la latitude 45°Nord, pour le mois de novembre et pour deux heures de l'après-midi, et avec les rapporteurs on mesure la hauteur du soleil et on obtient un angle α qui vaut 30°.

Il faut pour pouvoir prendre des mesures avec le pyréliomètre que les rayons du soleil soient perpendiculaires au morceau de cuivre qui se trouve dans celui ci. Pour cela il faut que l'angle que fait le soleil avec le sol soit le même que l'angle fait avec le dessous du pyréliomètre et le sol.

On obtient les mesures suivantes et les résultat suivants :

Temps (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T°C	21,7	23	23,8	24,3	24,9	25,5	26	26,5	27,1	27,7	28,2

Données : $m = 262 \text{ g}$ $S = 18,7 \text{ cm}^2$ $C = 385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$$Q = m \times C \times \Delta\theta$$

$$Q = 262.10^{-3} \times 385 \times (28,2 - 21,7)$$

$$Q = 655,66 \text{ J}$$

On peut à partir de ces résultats calculer une valeur approximative de l'énergie du rayonnement solaire reçue par le pyréliomètre.

$$E = Q / (3600 \times S)$$

$$E = 655,66 / (3600 \times 18,7. 10^{-4})$$

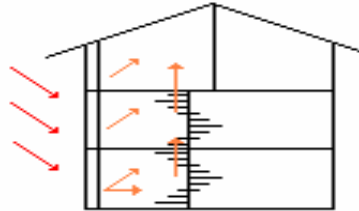
$$E = 97,4 \text{ Wh/m}^2 \text{ pour 10 minutes}$$

La marge d'erreur est très importante, cela peut s'expliquer par le fait que nous avons réalisé le pyréliomètre, de ce fait il est beaucoup plus simplifié donc moins perfectionné que ceux utilisés dans les stations de météorologie. Ce qui engendre un résultat beaucoup moins précis. De plus les résultats que nous possédons, concernent le rayonnement direct plus diffus, tandis que le pyréliomètre ne mesure que le rayonnement direct, cela diminue donc énormément la quantité d'énergie qui a été mesuré.

La dissipation de l'air chauffé par le système passif va se faire de manière naturelle par la circulation de l'air de la maison. Il va falloir en conséquence lors de la conception de cette structure favoriser au maximum une bonne ventilation de l'air.

Dans un premier temps, il faut que les pièces les plus fréquentées se situent derrière la serre afin que cette énergie calorifique se transmette directement dans celle-ci. Ensuite elle se dissipera vers les pièces plus froides.

Dans un deuxième temps, c'est l'escalier qui va permettre cette ventilation, en effet l'air chaud étant moins dense que l'air froid, elle monte. Par conséquent l'ouverture fait par l'escalier va permettre à cette masse d'air chaud de passer à l'étage supérieur et de ce fait chauffer celui-ci du bas vers le haut.



Sch 4: Circulation naturelle de l'air.

Le seul inconvénient que l'on peut trouver c'est que la quantité d'énergie reçue par ce procédé n'est pas suffisante. En effet les pièces se situant au fond de la maison, c'est à dire au Nord, ne seront pratiquement pas chauffées. Pour le dernier étage, il faudra isolé le mur séparant la chambre et le grenier afin d'éviter de chauffer inutilement une pièce qui n'a pas besoin de l'être.

Mais en été, on risque d'avoir une surchauffe de l'air dans la maison. La façon le plus efficace de se protéger de l'ensoleillement direct trop important, est de construire un écran extérieur procurant de l'ombre. Ces structures peuvent être permanentes, amovible ou saisonnières. Malgré ces précautions prisent, il se peut que l'air intérieur de la maison soit surchauffé, il s'agit alors de dissiper la chaleur excessive. Pour cela il suffit de créer une circulation d'air avec l'extérieur de la maison : quand il fait trop chaud, on ouvre les fenêtres de la serre qui donne sur l'extérieur, par conséquent l'échange se fera avec l'extérieur et non avec l'intérieur. On peut aussi, durant les grosses chaleurs, fermer les volets des fenêtres de la maison qui donnent sur la serre.

3- les avantages et les inconvénients du système passif :

Les avantages :

Le système passif est un système qui ne demande aucune installation coûteuse. Il faut juste tenir compte de plusieurs paramètres (disposition de la maison, des pièces, les espaces tampons, les ponts thermique...) pour réaliser une maison qui pourra utiliser au maximum cette énergie naturelle et non polluante. Le stockage peut être naturel (les murs) et donc l'utilisation de batterie est inutile, on élimine de ce fait une forme de pollution car les batteries contiennent des acides, du plomb et libère des gaz. De plus les résidants feront de grosses économies sur la consommation en chauffage.

Les inconvénients :

L'architecture est imposée. La forme de la maison, l'angle des murs et de la serre sont déterminées par un architecte. De ce fait les propriétaires n'ont pas le choix. Les économies faites ne se feront pas ressentir dans l'immédiat mais plusieurs années après car l'investissement fait pour la construire est très important car il faut une sur isolation et des matériaux bien précis. Le problème majeur est que la quantité d'énergie solaire varie selon l'heure, le mois et les saisons ; En effet, en hivers il se peut que durant plusieurs jours les

nuages masquent le rayonnement solaire. Par conséquent la quantité de chaleur sera insuffisante, il faudra donc pour combler cette absence utiliser un chauffage d'appoint qui fonctionnera durant une partie de la nuit et durant les périodes de grand froid.

4- Bilan énergétique du système passif :

	J	F	M	A	M	J	S	O	N	D
T ₁ (°C)	2,2	3,6	7,9	11	14,8	18,5	17,2	11,8	6,9	3,2
Q ₁ (J)	21360	19680	14520	10800	6240	1800	3360	9840	15720	20160
Q ₂ (Wh)	5,9	5,4	4	3	1,7	0,5	0,9	2,7	4,3	5,6
Q ₃ (Wh)	2176	1991,25	1475	1106,25	627	184,5	332	996	1586	2065
Q ₄ (Wh)	73.10 ⁴	67.10 ⁴	50.10 ⁴	37.10 ⁴	21.10 ⁴	61.10 ⁴	12.10 ⁴	34.10 ⁴	54.10 ⁴	69.10 ⁴
Q ₅ (Wh)	25.10 ⁵	23.10 ⁵	17.10 ⁵	12.10 ⁵	21.10 ⁴	38.10 ⁴	11.10 ⁵	38.10 ⁴	18.10 ⁵	23.10 ⁵

T₁: température en °C de l'air extérieur, moyenne mensuel.

Q₁: en Joule, énergie nécessaire pour avoir une température moyenne de 20°C pour un volume de 1m³.

Q₂: en Wh, énergie nécessaire pour avoir une température moyenne de 20°C pour un volume de 1m³.

Q₃: en Wh, énergie nécessaire pour avoir une température moyenne de 20°C pour un volume de 368,75m³ (volume total de la maison).

Q₄: en Wh, énergie stockée pour chauffer le béton à 20°C.

Q₅: en Wh, perte calorifique (énergie dissipée à travers l'isolant).

Toutes ces valeurs ont été calculées à partir des formules démontrées dans le III/ 1-.

	J	F	M	A	M	J	S	O	N	D
σ	0,23	0,34	0,50	0,51	0,53	0,56	0,53	0,4	0,24	0,18
H	24	33	45	56	65	67	56	45	33	24
Δt (h)	9	9	11	13	15	15	11	9	9	7
Q _R (Wh/m ²)	5581	7397	14286	18257	22431	23462	21106	8738	3804	381
Em ₁ (Wh/m ²)	1,06.10 ³	1,65.10 ³	3.10 ³	4,16.10 ³	5,35.10 ³	5,7.10 ³	4,3.10 ³	2,5.10 ³	1,43.10 ³	0,9.10 ³
Q _{RT} (Wh)	45.10 ⁴	59.10 ⁴	11.10 ⁵	15.10 ⁵	18.10 ⁵	19.10 ⁵	17.10 ⁵	7.10 ⁵	3.10 ⁵	3.10 ⁴
Q ₃ +Q ₄ +Q ₅	32.10 ⁵	30.10 ⁵	22.10 ⁵	16.10 ⁵	92.10 ⁴	27.10 ⁴	50.10 ⁴	14.10 ⁵	23.10 ⁵	30.10 ⁵
Q ₆ (Wh)	27,5.10 ⁵	24.10 ⁵	11.10 ⁵	1.10 ⁵	-88.10 ⁴	-16.10 ⁵	-12.10 ⁵	7.10 ⁵	20.10 ⁵	30.10 ⁵

σ: Coefficients moyens d'ensoleillement.

h : hauteur du soleil.

Δt : Durée de la journée en heure pour chaque mois et pour la latitude 46°N.

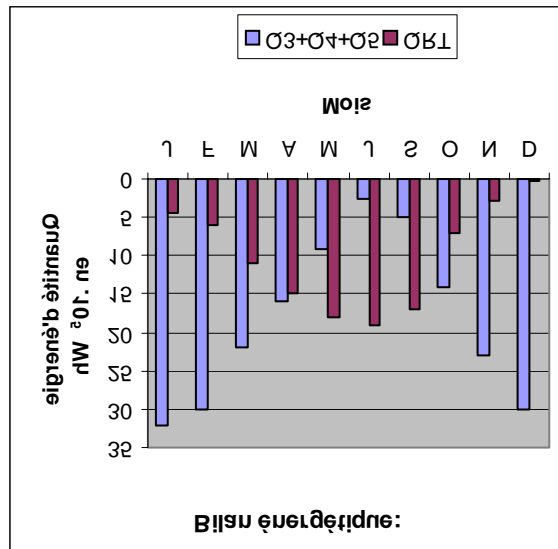
Q_R: Quantité d'énergie capter par la serre du système passif en Wh/m².

Em₁: Quantité d'énergie reçue par le rayonnement global en moyenne par mois en Wh/m² au sol.

Q_{RT}: Quantité d'énergie reçue par la totalité de la serre en Wh. Q_{RT} = Q_R × 80

Q₃+Q₄+Q₅: Quantité totale nécessaire pour chauffer la maison.

Q₆ = (Q₃+Q₄+Q₅)-Q_{RT}: quantité d'énergie qu'il faudra apporter par un autre système.



Calcul de l'énergie reçue sur une surface verticale orientée sud pour Lyon et pour le mois d'octobre :

Donnée : Latitude : 46 °N
 Hauteur du soleil à 12h : h : 33°
 Durée du jour : Δt : 9 heures
 Durée d'insolation : σ : 0.4

-rayonnement global enregistré pour une journée :

$$G_{OH} = 2.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$$

-Calcul de la composante diffuse sur le plan horizontal, elle représente 30% du rayonnement global pour une journée :

$$D_{OH} = G_{OH} \times 0,30 = 750 \text{ W/m}^2$$

-Calcul de la composante directe sur le plan horizontal :

$$S_{OH} = G_{OH} - D_{OH} = 1750 \text{ W/m}^2$$

-Calcul de la composante directe sur le plan vertical :

$$S_{OV} = S_{OH} \times \cos h / \sin h = 2695 \text{ W/m}^2$$

-Rayonnement global sur le plan vertical par jour :

$$G_{OV} = S_{OV} + D_{OH} = 3445 \text{ W/m}^2$$

-Rayonnement global dans des conditions moyennes :

$$G_V = G_{OV} \times (0,33 + 0,7\sigma) = 1525 \text{ W/m}^2$$

-Energie reçue pendant la journée :

$$Q_R = 2/\pi \cdot G_V \cdot \Delta t = 8738 \text{ Wh/m}^2$$

Conclusion:

On peut voir à l'aide du tableau récapitulatif des bilans énergétiques en moyenne par mois, que le système passif est largement suffisant pour les mois de mai, juin et septembre, en effet le signe moins du résultat obtenu par la soustraction entre la totalité d'énergie nécessaire et la quantité d'énergie apportée par la totalité de la serre traduit qu'il y a un apport d'énergie plus important qu'aux besoins. Ce sera donc durant ces trois mois plus les mois d'août et de

juillet, qu'il sera nécessaire de faire attention aux surchauffes. Pour les autres mois, l'emploi d'un chauffage complémentaire sera indispensable.

5- Le chauffage d'appoint : le système actif :

Bien qu'une partie de l'énergie nécessaire à la consommation du chauffage soit apportée par le rayonnement solaire au moyen du système passif, la partie restante de la consommation exige l'emploi d'un chauffage d'appoint.

Différentes solutions nous sont proposées :

- La cheminée,
- Le plancher chauffant,
- L'installation de radiateurs fonctionnant à l'électricité,
- ...

On va, dans un premier temps, utiliser le plancher chauffant qui fonctionnera à l'aide de capteurs héliothermiques. En effet le plancher chauffant est surtout employé pour distribuer une quantité d'énergie plus importante et pour une dispersion plus homogène de la chaleur dans la totalité des pièces, de plus il permet l'abaissement de la température de 2°C par rapport au système traditionnel pour la même sensation de confort.

Les capteurs héliothermiques sont des appareils destinés à transformer l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique utilisable, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur.

Les capteurs sont inclus dans un système composé d'une unité de stockage et d'un circuit de distribution d'énergie.

Le fonctionnement thermique d'un capteur solaire est le suivant : La surface absorbante absorbe l'énergie solaire, qu'elle transmet par l'intermédiaire de surfaces d'échanges à un fluide caloporteur. Le capteur solaire est aussi le siège de déperdition énergétique, en effet les surfaces chaudes échangent de la chaleur avec l'environnement par rayonnement et convection naturelle et/ou forcée.

Il existe deux formes différentes de capteurs héliothermiques : les concentrateurs qui sont utilisés pour obtenir de très hautes températures, ils emploient des lentilles ou des miroirs concaves (des miroirs employés en héliotechnique pour la concentration) pour augmenter la quantité d'énergie reçue ; et les insolateurs qui eux permet d'obtenir des très basses températures. C'est l'insolateur qui sera utilisé dans notre maison.

Il existe deux grands types d'insolateurs :

-L'insolateur à air : Pour 1m³ d'air la quantité d'énergie absorbée est de 0,34 Wh/°C. L'air chaud délivré par un capteur solaire à air avec double vitrage est d'environ 30 à 50°C au-dessus de la température de l'air fourni. L'air qui est le fluide caloporteur de cet insolateur peut s'écouler soit au-dessus, soit au-dessous, soit à la fois au-dessus et au-dessous de l'absorbeur.

-L'insolateur à eau : Pour 1m³ d'eau la quantité d'énergie recueillie est de 1160 Wh/°C. Dans ce type de capteur, le niveau de température de l'eau à la sortie oscillera au alentour de 35 à 60°C.

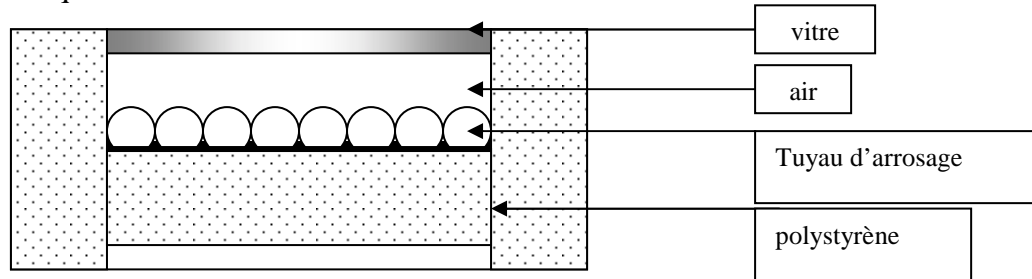
Comme l'insolateur à eau est celui qui capte le plus d'énergie, c'est celui là que l'on choisira.

Il existe maintenant trois sortes d'insolateur à eau :

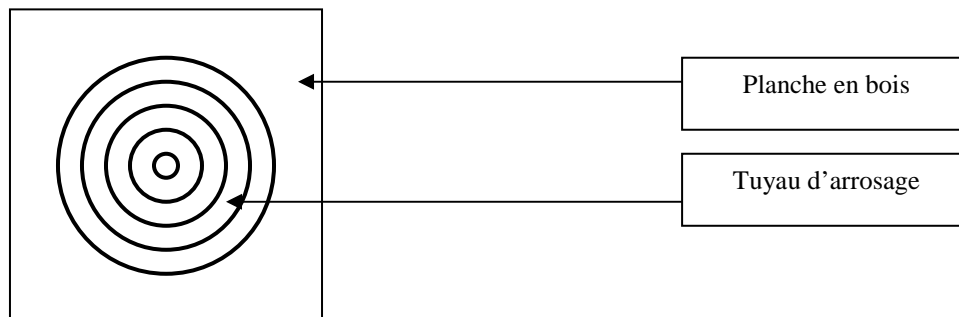
- insolateur à bassin : il permet de procurer de l'eau chaude pour le bain.
- insolateur à ruissellement : il assure le chauffage dans une maison.
- insolateur à lame ou à tube : il produit de l'eau chaude pour usage domestique.

Dans notre cas c'est donc le capteur à ruissellement qui nous est le plus approprié. Parmi toutes les solutions que nous avons trouvées pour réaliser nous même notre insolateur, une seule a retenu notre attention car elle est assez facile à fabriquer et elle a un coup de revient très peu élevé.

Maquette n°2 : L'insolateur :



Sch 5 : Coupe transversale d'un insolateur :



Sch 6 : Vu de dessus d'un insolateur :

L'insolateur est constitué d'un tuyau d'arrosage enroulé sur une planche de bois. Dans le tuyau circule de l'eau qui joue le rôle du fluide caloporteur. L'isolant utilisé est du polystyrène dans lequel on place la planche avec le tuyau enroulé comme le montre la coupe de dessus de l'insolateur. On place ensuite sur le dessus une vitre. De plus l'angle que fait l'insolateur avec l'horizontale est de 60°. Ce choix a été décidé à partir du graphique de l'annexe 5.

L'énergie solaire est captée par effet de serre, en effet le rayonnement solaire arrive devant la couverture transparente qui sera une plaque de verre, et pratiquement l'intégralité de ce rayonnement peut atteindre l'absorbeur qui étant peint en noir peut à son tour absorber toute l'énergie qui est ensuite transmise à l'eau sous forme d'énergie calorifique. L'absorbeur va s'échauffer et sa température va augmenter de 40 à 100°C selon le débit de l'eau (plus le débit est important moins la température augmente). Le rayonnement émis par l'absorbeur a des longueurs d'ondes comprises entre 4 à 70 μm c'est à dire des infrarouges. Quand ce rayonnement essaie de s'évacuer du capteur, il se trouve arrêté par la plaque de verre, car si le verre est transparent pour le rayonnement solaire il est opaque pour le rayonnement infrarouge. La vitre par conséquent absorbe ce nouveau rayonnement, sa température s'élève (entre 30 à 50°C) et à son tour elle produit son propre rayonnement qui se diffuse sur la totalité de sa surface et des deux cotés de celle-ci. L'absorbeur reçoit donc le rayonnement solaire augmenté de la moitié du rayonnement de la vitre. (voir annexe 6)

Pour maximiser la quantité d'énergie captée il faut que le tuyau d'arrosage soit de couleur foncée, en effet les couleurs foncée et surtout le noir permettent d'absorber une plus

grande partie d'énergie car elles ont un meilleur coefficient d'absorption. Si on veut le repeindre en noir, il faut utiliser une peinture mate afin d'éviter les réflexions, en une fine couche car la peinture est un très mauvais conducteur de chaleur. Comme dans notre cas le tuyau est de couleur vert foncé, nous avons préféré le laisser tel quel et ne pas le repeindre en noir.

Pour augmenter le rendement de ce capteur plan il faut penser au problème de l'étanchéité :

- l'air humide peut en se condensant sur la vitre, la rendre moins transparente et par conséquent diminuer la quantité de rayonnement traversant la vitre. Un insolateur humide démarrera plus tard dans la matinée et s'arrêtera plus tôt dans la soirée.

- la poussière et la saleté entreront dans le capteur et pourront se déposer sur la vitre avec la condensation, la transparence de la vitre en sera donc diminuée et engendrera les mêmes conséquences que l'air humide.

- l'humidité peut altérer la capacité de l'isolant.

Pour remédier au problème de l'étanchéité on peut utiliser du mastic et éviter le contact de l'eau et de l'isolant en y interposant une autre plaque de métal. Le tout sera placé dans une coque en fibre de verre. Les entrées et les sorties de l'eau dans le capteur plan seront réalisées avec des tuyaux en caoutchouc du type «durite ».

On peut : soit monter les capteurs en série, dans ce cas l'eau passera d'un capteur à l'autre et sa température augmentera à chaque fois ; soit en parallèle, la température sera moins élevée que par un montage en série mais la quantité d'eau chauffée sera plus importante. Dans notre cas, le montage en parallèle est le plus intéressant.

Expérience n°2 :

Durant une journée complète on a exposé notre insolateur au rayon solaire.

Cette expérience est réalisée à Belmont D'Azergue, le mercredi 31 octobre 2001.

Deux gros problèmes ont été rencontrés lors de l'expérience :

- La météo : matinée ensoleillée, arrivée de nuages en début d'après midi, et arrivée de gros nuages noirs au alentour de 17h00.

Le lieu géographique : en effet le sud du terrain est composé d'arbres de tailles très importantes, ce qui empêchait aux rayons solaires de passer. Les arbres agissent donc comme des masques à l'insolateur.

On obtient les résultats suivants :

Heure	7h30	8h30	9h30	10h30	11h30	12h30	13h30	14h30	15h30	16h30	17h30	18h30
T°C	16,2	14,8	16,4	22,6	24,1	26,8	29,7	26,5	26,1	24,8	23,9	22,6

Données: m = 346 g S = 6,93.10⁻⁴ m² C = 4180 J.kg.°C

$$Q = m \times C \times \Delta\theta$$

$$Q = 346.10^{-3} \times 4180 \times (29,7 - 16,2)$$

$$Q = 19524,78 \text{ J}$$

On peut donc calculer à partir de ce résultat la quantité d'énergie solaire qu'a reçue cet insolateur.

$$E = Q / (3600 \times S)$$

$$E = 19524,78 / (3600 \times 6,93. 10^{-4})$$

$$E = 7826,2 \text{ Wh/m}^2$$

Le transfert de cette chaleur se fera différemment qu'avec le système passif. Ici après avoir recueilli l'énergie par l'intermédiaire des capteurs plans, on stocke l'eau chauffée dans un réservoir qui se trouve dans le grenier sous les panneaux afin de limiter les pertes de chaleur par l'intermédiaire des tuyaux reliant cette unité de stockage et les panneaux solaires. Ensuite toujours par un réseau de tuyaux, l'eau chaude est en temps voulu distribuée dans le plancher chauffant qui à son tour libère cette chaleur afin de réchauffer la pièce.

6- Avantages et inconvénients du système actif :

Le système actif possède de nombreux bienfaits : il utilise l'énergie solaire, donc une énergie propre. Mais à l'inverse de la serre, son apport calorifique est réalisé en fonction des besoins de consommation, l'énergie calorifique est captée durant la journée et redistribuée durant la nuit. Mais cela nécessite donc un moyen de stockage : la chaleur, recueillie par de l'eau, est directement stockée par celle-ci dans un réservoir réalisé dans des matériaux isolants afin d'éviter les pertes calorifiques lors de son stockage. Cela permet d'éviter toutes sortes de pollutions. Mais durant les grands froids il faut mélanger à l'eau un antigel, car durant la nuit le capteur ne fonctionne pas, l'eau stagne dans cet insolateur et risque de geler. Le grand inconvénient de ce système est son coût de revient, en effet l'installation de ce système peut revenir très cher, on peut le diminuer en fabriquant soit même son insolateur mais il sera de moins bonne qualité et moins performant que si on l'achète à une entreprise spécialisée dans ce domaine. De plus, comme la serre, le capteur plan est sujet à des variations d'énergie qui sont dues à la nébulosité.

7- Bilan énergétique du système actif :

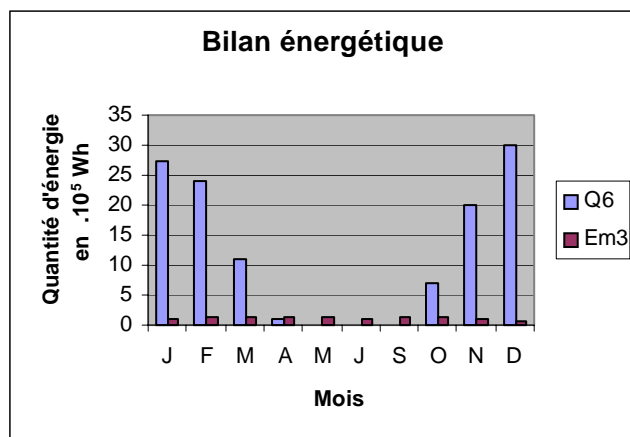
	J	F	M	A	M	J	S	O	N	D
Q_6 (Wh)	$27,5 \cdot 10^5$	$24 \cdot 10^5$	$11 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$-88 \cdot 10^4$	$-16 \cdot 10^5$	$-12 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^5$	$30 \cdot 10^5$
Em_2 (Wh/m ²)	5178	6117	6694	6413	5938	5742	6694	6117	5178	4368
Em_3 (Wh)	$1 \cdot 10^5$	$12 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Q_7	$26,5 \cdot 10^5$	$23 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$	$-3 \cdot 10^4$	$-10 \cdot 10^5$	$-27 \cdot 10^5$	$-13 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$19 \cdot 10^5$	$29 \cdot 10^5$

Q_6 : en Wh : quantité d'énergie qu'il reste à apporter.

Em_2 : en Wh/m² : quantité d'énergie reçue par un m² de capteurs pour un angle de 60°.

Em_3 : en Wh : quantité d'énergie reçue par 20m² de capteurs

Q_7 : en Wh : quantité d'énergie qu'il faut apporter par un autre système de chauffage d'appoint.



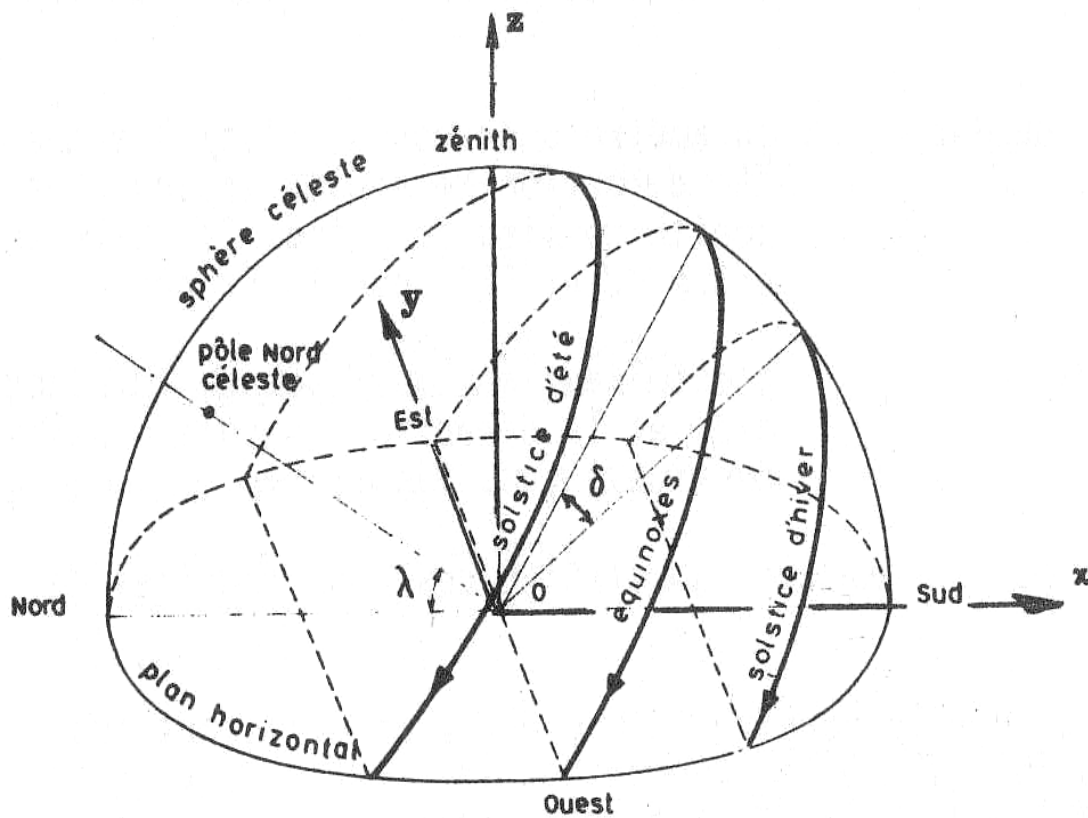
Conclusion :

On constate que l'apport d'énergie calorifique est supérieur au besoin pour les mois d'avril, mai, juin et septembre. Malgré l'apport d'énergie calorifique par le capteur solaire, qui sera distribuée par le plancher chauffant, la quantité nécessaire à la consommation en chauffage reste insuffisante pour les périodes de grands froids. Il est donc indispensable d'utiliser en parallèle au planché chauffant un autre chauffage d'appoint qui dans notre cas sera la cheminée, plus précisément la cheminée en stéatite car pour 2h de fonctionnement la chaleur sera libérée durant 12h. (voir annexe 7)

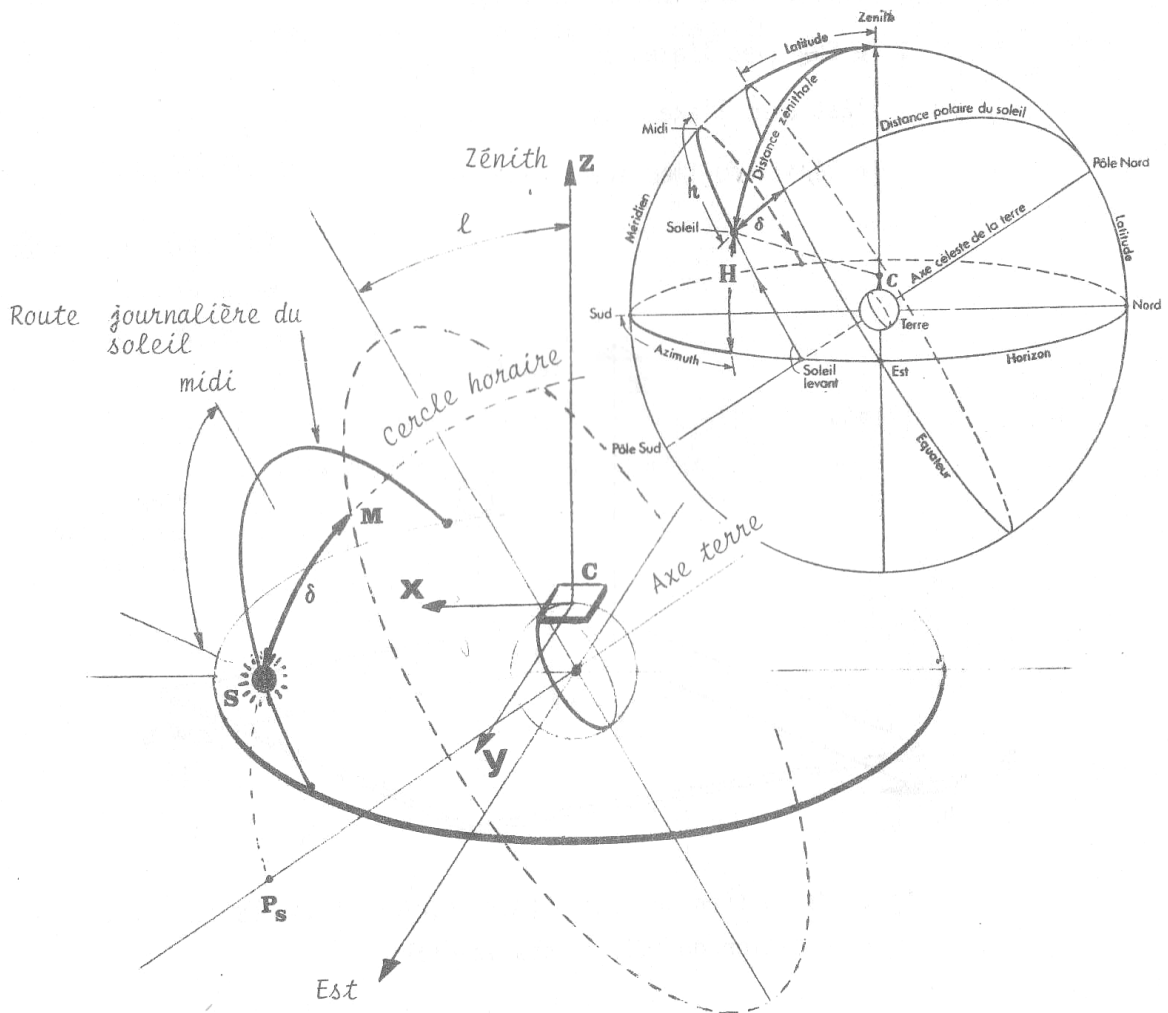
IV/ Conclusion générale sur l'énergie solaire :

Si on prend bien en compte les différents paramètres, on pourra utiliser de manière très précise l'énergie solaire, c'est à dire optimiser la quantité de chaleur que l'on peut capter. On peut donc, avec le système passif en complémentarité avec le système actif plus un autre chauffage d'appoint s'il est nécessaire, apporter la quantité d'énergie nécessaire à la consommation d'une maison en chauffage pour avoir un très bon confort.

Le problème majeur que peut nous apporter l'énergie solaire au cours de la réalisation de ce dossier c'est qu'elle est très vaste et que l'on peut avoir tendance à dévier du sujet. Au début, l'énergie solaire était prévue pour combler les besoins en chauffage ainsi que pour l'eau chaude. Mais nous nous sommes rendu compte au cours de l'achèvement de ce projet, que l'apport thermique par cette source d'énergie renouvelable est quelque chose de très complexe et de très exigeant, et qui demande une plus grande part de travail, nous avons donc décidé de laisser de côté la partie sur le chauffage solaire de l'eau sanitaire.

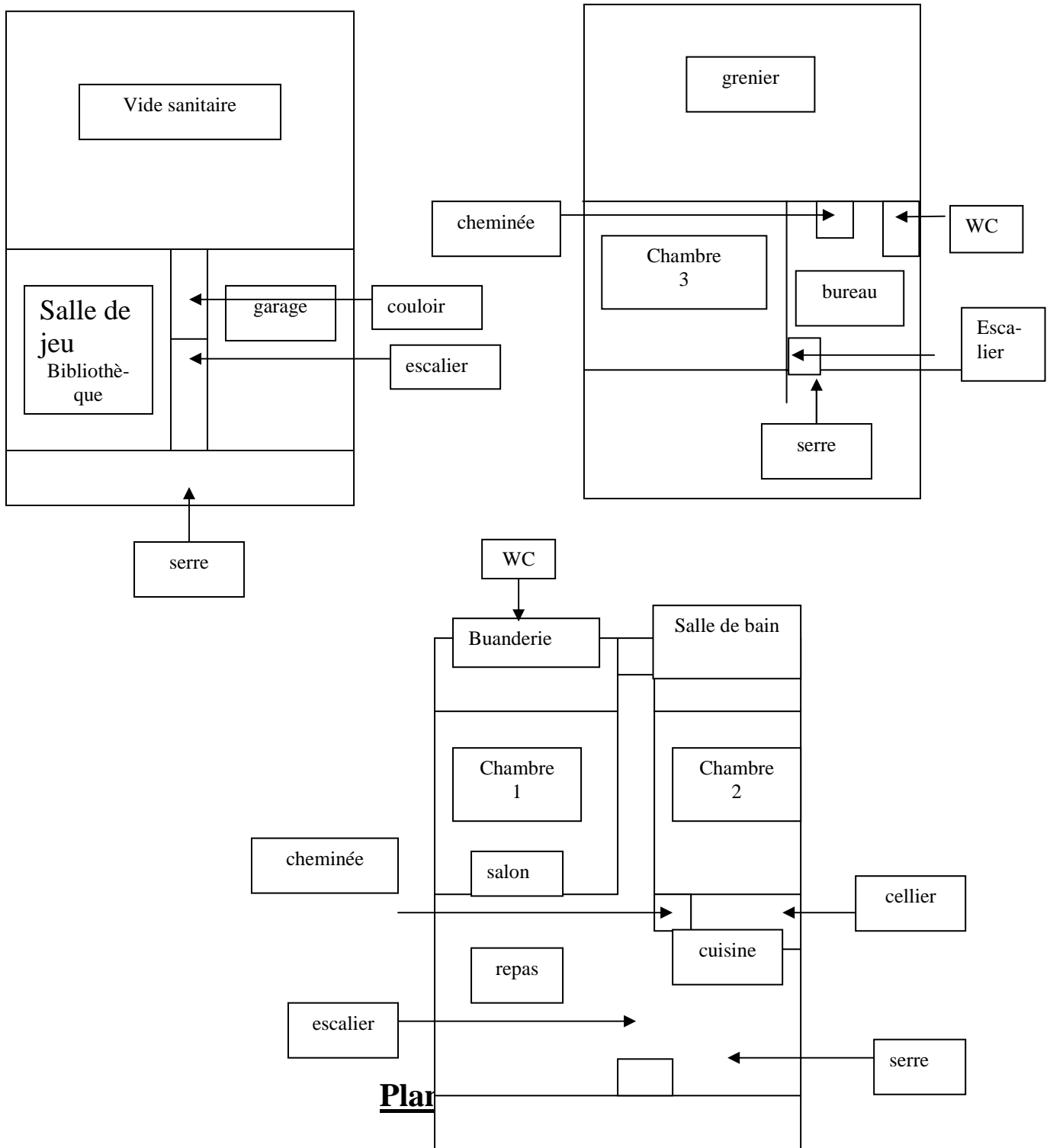


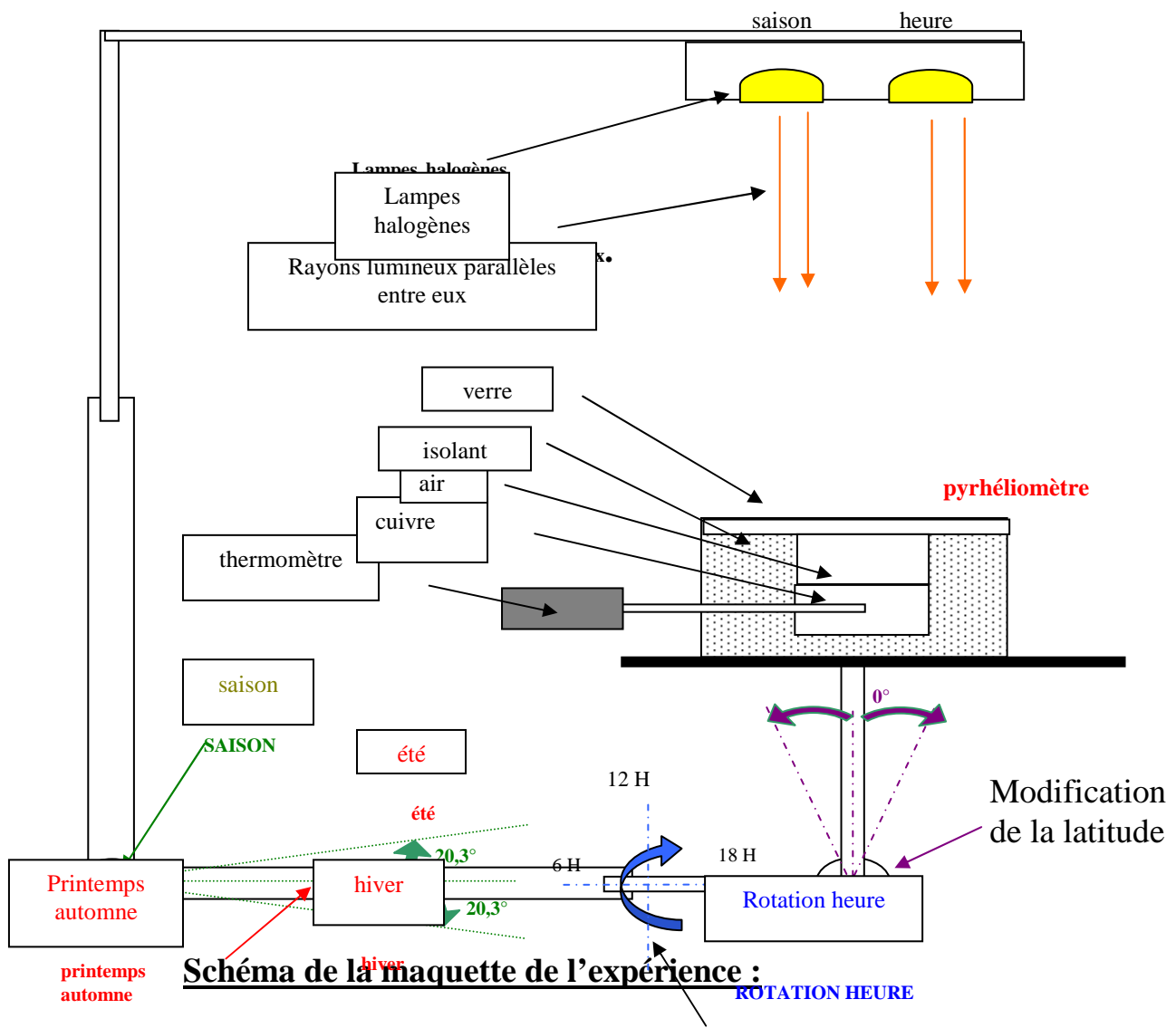
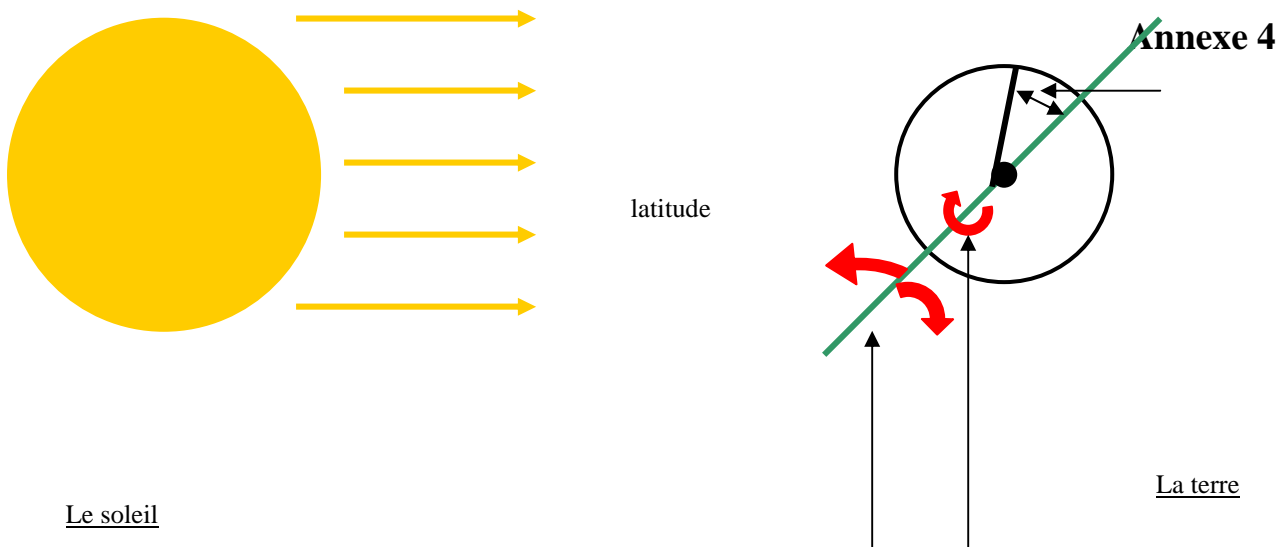
Déclinaison et trajectoires extrémales du soleil



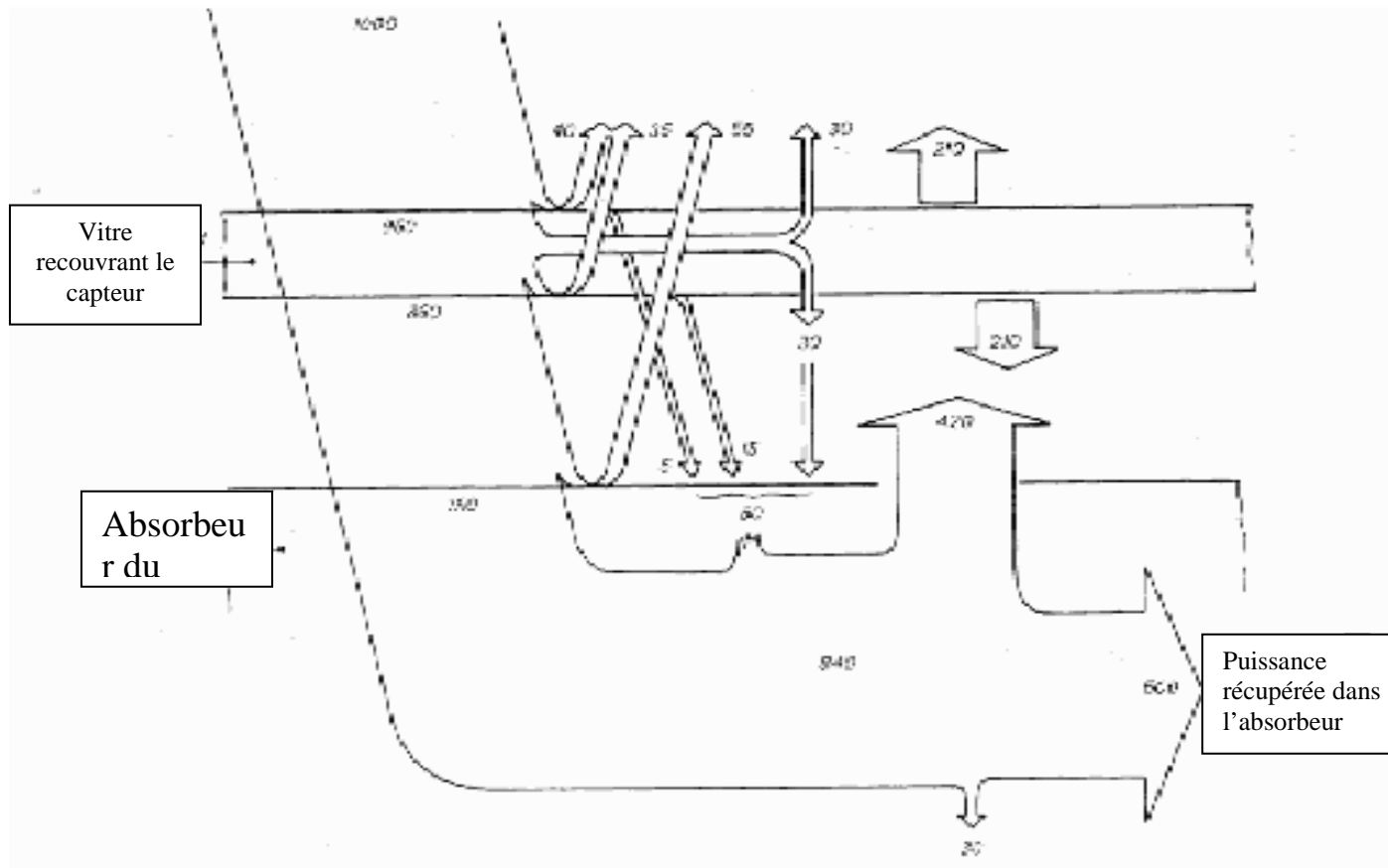
Définition des paramètres célestes

Annexe 3



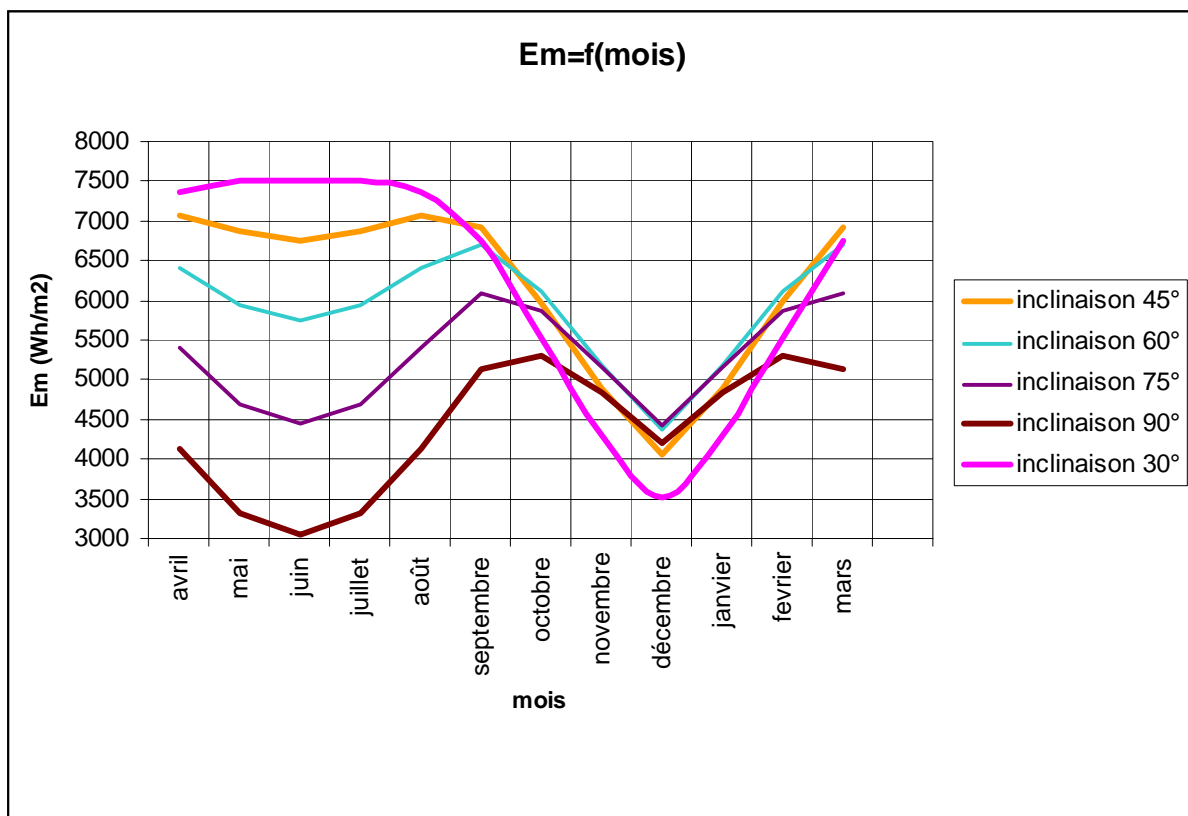


Annexe 5



Répartition de l'énergie incidente frappant un capteur :

	inclinaisons en degrés				
mois	30	45	60	75	90
avril	7362	7066	6413	5412	4125
mai	7515	6871	5938	4699	3323
juin	7514	6760	5742	4439	3056
juillet	7515	6871	5938	4699	3323
août	7362	7066	6417	5412	4125
septembre	6757	6924	6694	6080	5122
octobre	5524	5955	6117	5878	5292
novembre	4290	4877	5178	5169	4850
décembre	3511	4059	4368	4415	4193
janvier	4290	4877	5178	5169	4850
fevrier	5524	5995	6117	5878	5292
mars	6757	6924	6694	6080	5122
	Em en Wh/m2				



Valeur de l'énergie solaire reçue par m² de capteur pour un angle donné.

La stéatite

Composition :

Talc :	40 à 50 %
Magnésite :	40 à 50 %
Chlorite :	5 à 8 %

Caractéristiques :

Poids :	2980 kg/m ³
R. Compr. :	25 MN/m ²
Réflexion et traction	
-parallèle aux strates :	16,8 MN/m ²
-perpendiculaire aux strates :	15,7 MN/m ²
Dureté :	2 à 3 Mohs
Traitement surface :	4 Mohs
Coefficient de dilatation	
pour t° > 500°C :	0,0017 % °C
Point fusion :	+ 16300 à 1640°C
Chal. Spécif. :	0,98 kJ/kg °C
Conductibilité thermique :	6,4 W/mK

CONCLUSION

Ainsi notre projet, basé sur des énergies non polluantes, pourrait- être utilisé par tout particulier possédant un terrain suffisamment grand. Mais pour cela, il faut pouvoir le financer car les installations ont un coût élevé. Evidemment sur long terme, la mise en marche de ce projet est amorti. De plus les instances européennes fournissent de nombreuses subventions pour l'installation de l'énergie solaire, les énergies éolienne et hydraulique n'étant subventionnées que par certaines régions.

Ce projet nous a permis de nous offrir de nouvelles ouvertures. Ainsi nous avons pu participer à un salon sur les énergies renouvelables où nous avons trouvé de nombreux renseignements sur le sujet. Nous avons aussi rencontré différentes personnes qui nous ont aidé dans nos démarche : Mr Tillier, un écologiste pour l'association Vivre Vert Villeurbanne ; Mr Goy, un architecte spécialisé dans l'énergie solaire et Mr Allary, professeur de mathématiques possédant une maison bioclimatique.

BIBLIOGRAPHIE

A/ Energie hydraulique

IREM Ecowatt

L'ADEME

Mr Tillier, écologiste pour Vivre Vert Villeurbanne

B/ Energie éolienne

Internet : <http://l'énergie.éolienne.htm>

<http://le.rotor.de.Savonius.htm>

<http://les.éoliennes>

L'ADEME

Mr Tillier, écologiste pour Vivre Vert Villeurbanne

C/ Energie solaire

APERRE : <http://users.skynet.be/apere/fr/bioclimate.htm>

Robert Chareyre: La maison autonome n°1 et n°2.

Donald Watson : le livre des maisons solaires.

Que sais-je n°3240 : Jacques Vernier : les énergies renouvelables.

Que sais-je n°1294 : Benjamin Dessus : L'énergie solaire.

J.R. Vaillant : Utilisations et promesses de l'énergie solaire.

M.Chateauminois, D.Mandineau, D.Roux : Calcul d'installations solaires à eau.

Ch. Chauliaguet, P. Baratçabal, J.P Batellier: L'énergie solaire dans le bâtiment.

R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz: Le rayonnement solaire: conversion thermique et applications.

Documentation obtenue au Salon des Energies Renouvelables lieu à Eurexpo à Lyon entre le 28 février et le 3 mars 2001.

REMERCIEMENTS

A M. Goy , architecte, pour nous avoir reçues pour répondre à nos questions et pour nous avoir prêté de la documentation :

G. Aymard, G. Bonnefond, M. Goy, J.L Vernier, P.Depecker: Concours d'architecture: Maison solaire à Veynes.

P. Depecker, G. Aymard, M. Goy: Energie solaire et habitat.

A M. Tillier, écologiste « Vivre Vert à Villeurbanne. », pour nous avoir rencontrées et nous avoir présentées une habitation fonctionnant à l'énergie solaire (système actif).

A M. Allary, professeur de mathématiques au Lycée Charlie Chaplin de Décines, pour nous avoir fait visiter sa maison utilisant le système passif et pour nous avoir mis en contact avec M. Goy, réalisateur de cette demeure.