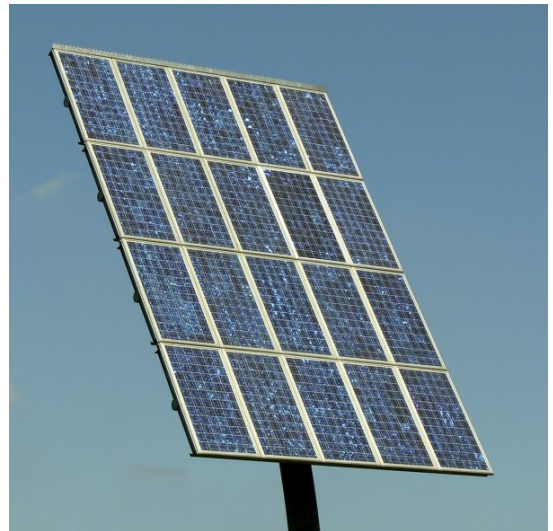
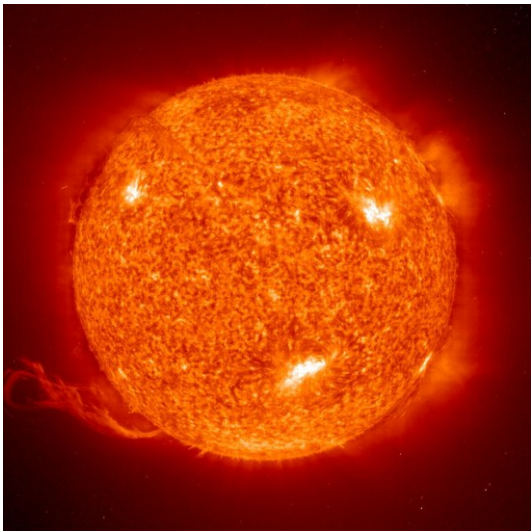


## L'énergie solaire

Comment exploiter au mieux l'énergie solaire ?  
Quels sont les enjeux liés à son utilisation?



## Sommaire:

### Introduction

#### I Point sur l'énergie solaire

##### A) Historique

- 1) Dès l'Antiquité
- 2) Au XVIII<sup>ème</sup> siècle
- 3) Au XIX<sup>ème</sup> siècle
- 4) A partir du XX<sup>ème</sup> siècle

##### B) Soleil et énergie solaire

- 1) Le Soleil
- 2) L'énergie solaire

#### II Le solaire chez les particuliers

##### A) L'énergie solaire passive

- 1) Capter l'énergie du Soleil ...
- 2) ... et la conserver

##### B) Transformer et réutiliser l'énergie solaire

- 1) Le solaire thermique
- 2) Le solaire photovoltaïque

#### III L'exploitation de l'énergie solaire dans les centrales solaires et les transports

##### A) Les centrales solaires

- 1) Les collecteurs paraboliques
- 2) Les centrales à tour
- 3) Les collecteurs cylindro-paraboliques
- 4) Les centrales photovoltaïques
- 5) Les projets d'exploitation de l'énergie solaire

## B) L'énergie solaire dans les transports et sur les satellites

- 1) Les voitures solaires
- 2) Les trains solaires
- 3) Les bateaux solaires
- 4) Les avions solaires

## **IV Les enjeux liés à l'utilisation de l'énergie solaire**

A) Etat de l'utilisation de l'énergie solaire

B) Rentabilité des différents moyens

- 1) Le photovoltaïque
- 2) Le chauffe-eau solaire
- 3) Les usines thermodynamiques

C) Une solution écologique

- 1) Un impact minime
- 2) Une construction polluante

**Conclusion**

**Expérience**

**Bibliographie**

## Introduction :

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoinrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants.

De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages. L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir. C'est pour cela que nous avons décidé de l'étudier plus en détail.

Mais comment exploiter au mieux cette énergie? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation?

# I Point sur l'énergie solaire :

## A) Historique :

L'utilisation de l'énergie solaire est un fait très ancien. L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur Terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. Le but de cette sous-partie est de montrer que l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire s'est faite en plusieurs phases.

### 1) Dès l'Antiquité :

Dans l'antiquité les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif, le skaphia, car pour eux seuls les rayons du Soleil étaient assez purs pour allumer cette flamme.

Le philosophe grec Socrate (-470; -399) a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver, tandis qu'en été, le soleil se retrouvait quasiment au dessus des toits laissant les maisons dans une extrême fraîcheur.

On raconte qu'Archimède (-287; -212) réussit à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en -212, grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis tous orientés sur le même point du navire. Mais ce fait a fait débat au cours des siècles, certains savants jugeant en effet cette histoire improbable. Aujourd'hui on est pourtant presque sûr que cette histoire est un mythe, si l'on en croit l'expérience réalisée par des étudiants du MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui ont réitéré l'expérience d'Archimède en 2005 et on réussit à enflammer en 10 minutes et à 30 mètres une reconstitution de bateau romain, qui cependant était sèche et immobile, ce qui a facilité l'enflamment.



Incendie de la flotte romaine lors du siège de Syracuse en -212

## 2) Au XVIII<sup>ème</sup> siècle :

Le Siècle des Lumières voit renaître l'intérêt pour le Soleil et les premières études et expériences sur son énergie.



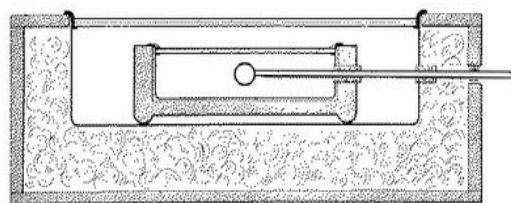
Un miroir ardent

En 1747, le botaniste Buffon met au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres. Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température. Ainsi, il parvient à enflammer du bois à une distance de 65 mètres, et de faire fondre de l'étain à 49 mètres, du plomb à 42 mètres, et de l'argent à 20 mètres.

Le célèbre chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) invente en 1774 un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux-ci soient pollués par les produits des combustibles. Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.



Le suisse Horace Bénédict de Saussure (1740; 1799) invente en 1767 le tout premier four solaire qu'il appelle "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C.



Coupe transversale d'une "boîte chaude" avec thermomètre

## 3) Au XIX<sup>ème</sup> siècle :

Le XIX<sup>ème</sup> est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique.

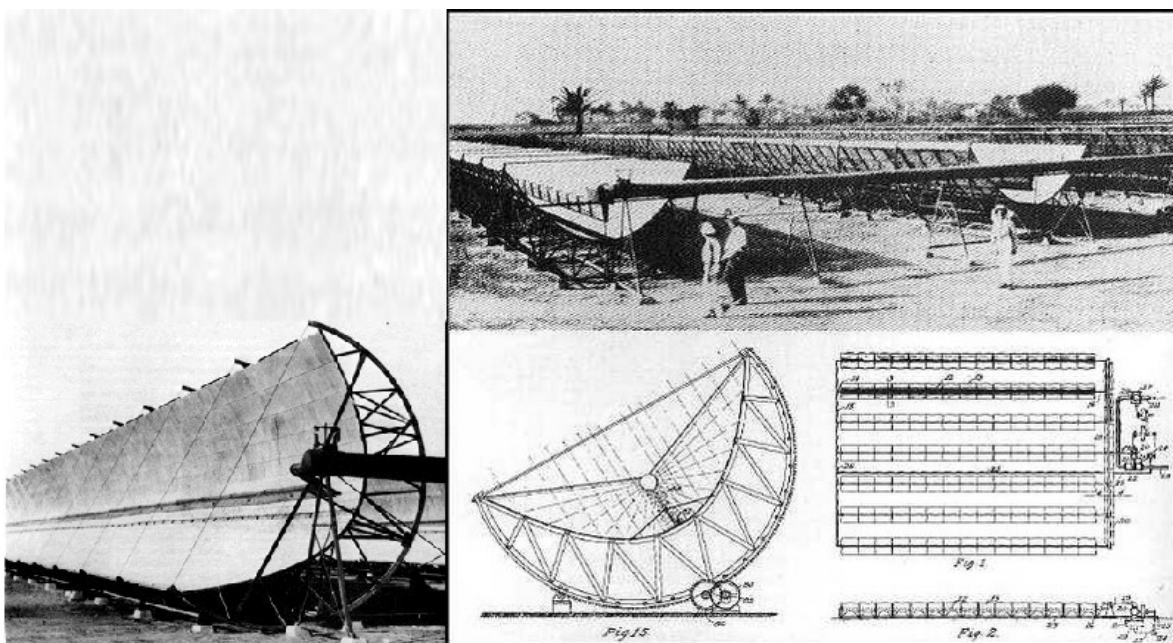
En 1839, le physicien Alexandre Edmond Becquerel découvre par hasard l'effet photovoltaïque. Une nouvelle voie de l'exploitation de l'énergie solaire s'ouvre alors. Il faudra attendre 1900 pour qu'Einstein explique cet effet et 1910 pour qu'il soit mis en évidence par Robert Andrew Millikan.

En 1872, l'ingénieur suédois Charles Wilson construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m<sup>2</sup>, ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime.

En 1875, l'industriel allemand Werner von Siemens décrit le principe d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le principe photovoltaïque devant l'Académie des Sciences de Berlin.

Le professeur français Augustin Mouchot inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. En 1873, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4m<sup>2</sup> qu'il présente en 1875 à l'Académie des Sciences. En 1877, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20m<sup>2</sup> couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris de 1878. L'engin, d'une puissance d'un demi cheval (368 W), permet d'imprimer le journal de l'Exposition *Le Soleil* à raison de 500 exemplaires/heures. La machine eut un grand succès et fut primée. Augustin Mouchot avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait en 1869, *La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles*.

#### 4)A partir du XX<sup>ème</sup> siècle

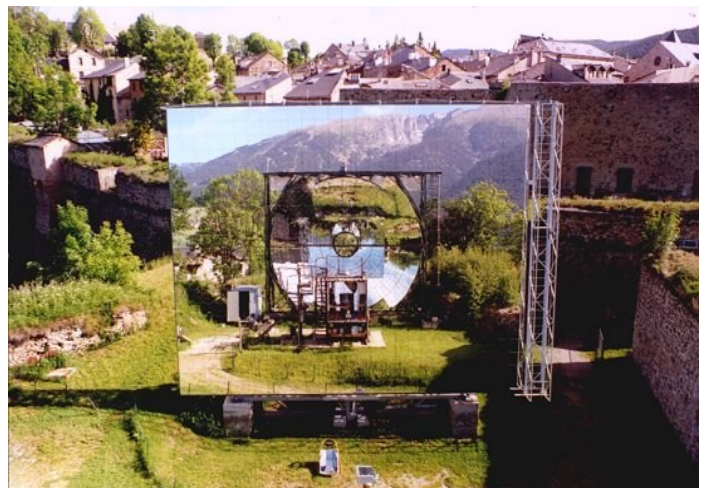


Plans et photos de la centrale thermique de Méadi en Egypte en 1913

Après 1900, toutes les technologies découvertes au siècle précédent sont améliorées. De nouvelles découvertes sont faites et dès 1970 le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent. Le physicien anglais Charles Vernon Boys (1855; 1944) est l'inventeur du capteur cylindro-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte, à Meadi, où on construisit en 1912 une centrale thermique qui fonctionnait sur le principe de Boys, permettant d'irriguer une grande surface de cultures. Cette centrale était composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long pour une ouverture de 4 mètres qui couplés à une pompe permirent de pomper plus de 2000 litres d'eau par minute à partir de 1913, irriguant 200 hectares de champs de coton. Des installations similaires à celle-ci furent prévues dans le Soudan anglais et dans les colonies africaines de l'empire Allemand, mais ces centrales restèrent à l'état de projet à cause du début de la seconde guerre mondiale.

A partir de 1920, aux Etats-Unis, des particuliers installent chez eux des chauffe-eau solaires, et des « Crystal House », maisons chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du Soleil, sont construites.

Le français Félix Trombe (1906; 1985) invente le premier four solaire à concentration: en 1944, lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA. Ces projecteurs très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques orientables au foyer duquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle. Trombe décide d'utiliser de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour.



*Le four de Mont-Louis* projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément.

Il est le directeur de la construction d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50 kW à Mont-Louis dans les pyrénées-Orientales. Puis il dirige celle du four solaire d'Odeillo d'une puissance de 1000 kW. C'est le plus puissant four solaire du monde. Il est utilisé par l'industrie.

Il faut attendre 1954 pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, des laboratoires de la Bell Telephone.



Mais la technologie mise au point est hors de prix: non seulement elle à un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre 1958 et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale. Le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, Vanguard 1, est donc lancé en 1958.

La première maison alimentée en électricité par des cellules photovoltaïques est construite en 1973. Puis le choc pétrolier de 1980 donne un grand élan aux technologies solaires devenant d'un coup moins chères. De nombreux projets de centrales thermiques solaires apparaissent dans le monde, comme la centrale Thémis en France dont la construction s'étale 1980 à 1982. En Australie, la 1<sup>ère</sup> voiture solaire parcourt 4000km. Indépendamment du pétrole, de nombreux petits appareils portatifs sont équipés de cellule photovoltaïque comme des calculatrices ou des montres.



*La première voiture solaire*

Mais avec le contre-choc pétrolier de 1986, de nombreux projets sont arrêtés et en France la centrale Themis est fermée.

Mais aujourd'hui, dans un contexte avéré de réchauffement climatique et de flambée des prix des énergies fossiles, l'énergie solaire est de nouveau propulsée sur le devant de la scène.

L'exploitation du solaire par l'homme s'est donc déroulée en 3 phases:

- La découverte (Antiquité), et redécouverte (XVIII<sup>ème</sup> siècle);
- L'expérimentation (XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècles);
- Le développement à grande échelle des moyens d'exploitation (XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles).

Et elle n'est pas un fait récent, contrairement à ce que nous avons souvent tendance à le penser.

## B) Soleil et énergie solaire :

### 1) Le Soleil

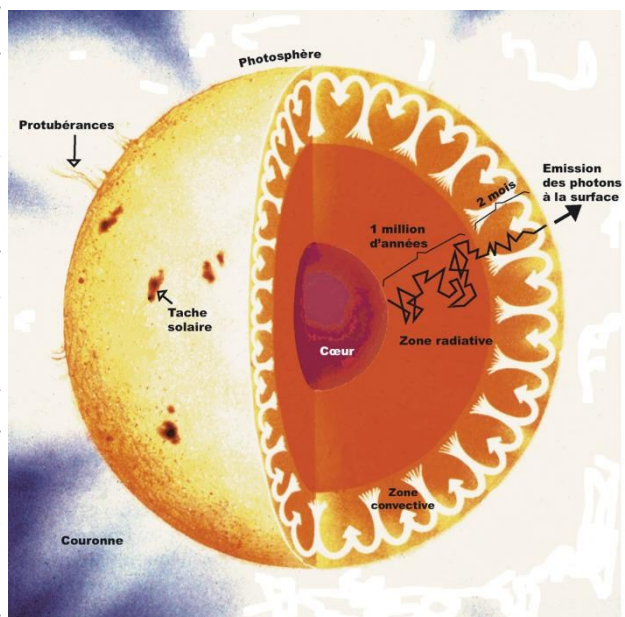
Le Soleil est une étoile, la seule du système solaire, et la plus proche de nous. La plus proche après elle est Proxima du Centaure, située à 4,2 année lumières du Soleil.

Carte d'identité du Soleil		
Âge	4,6 milliards d'années	
Diamètre équatorial	1 392 530 km	
Circonférence	4 372 544 km	
Distance par rapport à la Terre	149 598 000 km	
Composition (éléments/ pourcentage)	Hydrogène	73,46%
	Hélium	24,85%
	Oxygène	0,77%
	Carbone	0,29%
	Fer	0,16%
	Néon	0,12%
	Azote	0,09%
	Silicium	0,07%
	Magnésium	0,05%
	Soufre	0,04%
	Autres éléments	0,01%
Température	Noyau	15 000 000 K
	Zone radiative	1 500 000 K
	Zone de convection et photosphère	6 000 K
Densité (eau=1)	1,41	

Le noyau: il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à 150 000  $\text{k/m}^3$ . C'est là qu'est produite l'énergie solaire.

La zone radiative: elle s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du coeur vers la surface du Soleil.

La zone de convection: elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En



Coupe du Soleil et trajet des photons vers la surface

raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection: les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite.

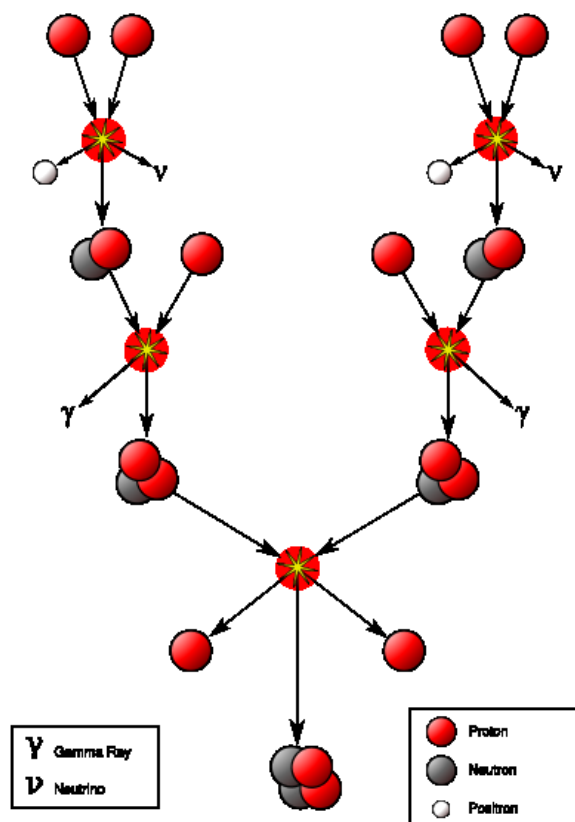
La photosphère: elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile. Une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil.

## 2) L'énergie solaire :

Le Soleil produit de l'énergie grâce aux réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son noyau, à cause de la chaleur et de la pression très élevées: les atomes d'hydrogène et leurs isotopes se heurtent violemment pour former de l'hélium4, libérant en même temps une énorme quantité d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique de basse longueur d'onde et de très haute fréquence: les rayons gamma. Ainsi, chaque seconde, le Soleil transforme 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et perd 4 millions de tonnes, expulsées dans l'espace sous forme de particule ou de rayonnement. Tous les atomes présents au coeur du Soleil peuvent fusionner. C'est ainsi que tous les éléments présents dans l'Univers ont été formés.

Après avoir été émis à la suite des réactions nucléaires à l'intérieur du noyau, les rayons gamma doivent, pour atteindre la surface, traverser la zone radiative du Soleil. Cependant, la zone radiative est opaque et très dense, et les rayons gamma sont absorbés par les atomes de cette zone et sont réémis sous forme de photons de moindre énergie, à leur tour absorbés et réémis, jusqu'à atteindre la surface du Soleil, en passant par la zone de convection et la chromosphère. Du coup, les photons produits à l'intérieur du noyau mettent parfois un temps estimé entre 20 000 et 50 millions d'années à atteindre la

surface du Soleil mais toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière y sont



*La fusion d'hydrogène en hélium4\**

représentées, ou presque. Puis, en 8 minutes en moyenne, à la vitesse de  $3.10^8$  m/s, les photons atteignent la Terre.

\*Deux atomes d'hydrogène fusionnent et libèrent un neutrino et un positron, formant un atome de deutérium, un isotope de l'hydrogène:  $2^1_1\text{H} \Rightarrow ^2_1\text{H} + e^+ + \nu$   
L'atome formé fusionne avec un atome d'hydrogène et libère un photon gamma, formant un atome d'hélium3, un isotope de l'hélium:  $^2_1\text{H} + ^1_1\text{H} \Rightarrow ^3_2\text{He} + \gamma$   
L'atome d'hélium3 fusionne avec un autre atome d'hélium3, formant deux atomes d'hydrogène et un atome d'hélium4:  $2^3_2\text{He} \Rightarrow 4^1_1\text{H} + ^4_2\text{He}$

On estime aujourd'hui que le Soleil va encore «vivre» pendant 6 milliards d'années. Tout ce temps, il continuera à produire de l'énergie. L'énergie solaire est donc une source infinie d'énergie.

### III L'exploitation de l'énergie solaire dans les centrales solaires et dans les transports



Ci-dessus : Collecteur parabolique allemand. Ci contre : la centrale à tour américaine SWE1



#### **A) Les centrales solaires**

Rappelons que la plupart des grandes centrales électriques (nucléaire, à charbon etc.) fonctionne selon le même principe : l'énergie thermique produite par une combustion (pétrole, charbon...) ou par fission nucléaire permet de transformer l'eau en vapeur ou de faire monter des gaz à très haute température et donc, selon la loi des gaz parfaits, à très haute pression. La différence de pression permet alors d'actionner des turbines ou des pistons ; ceux-là font ensuite tourner un générateur électrique qui crée donc du courant. Le rendement final est d'autant plus élevé que la chaleur fournie au départ est à haute température. Un projet ambitieux qu'ont eu les européens est de créer une usine sur ce principe sans utiliser de carburant. Après tout, c'est grâce au soleil qu'il fait une température vivable sur terre. Alors pourquoi ne pas se servir directement de cette chaleur pour faire évaporer de l'eau et actionner des turbines, la place de brûler du fioul cher et de plus en plus rare ?

Il a fallu attendre les années 70 et 80 avant la création des premières centrales solaires électriques expérimentales. Le principe est de concentrer les rayons solaires vers un unique point afin de créer de hautes températures et ainsi produire de l'électricité grâce à un système tel que décrit ci-dessus.

Les trois principaux types de centrales solaires thermiques se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires.

- Les collecteurs cylindro-paraboliques, qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé.
- Les centrales à tour, sortes de lampadaires entourés d'un champ de miroir orientables situés sur le sol (les héliostats) qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour où est installée une chaudière.
- Les collecteurs paraboliques qui ressemblent à nos antennes de TV, dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole.

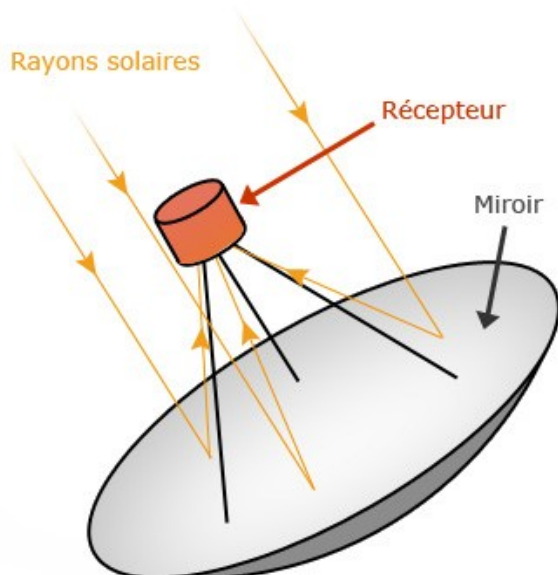
Il existe également plusieurs centrales photovoltaïques, composées d'un champ de panneaux solaires photovoltaïques dont le but est également de produire de l'électricité.

## 1. Les collecteurs paraboliques



Différents types de collecteurs paraboliques tout quatre expérimentés en Allemagne

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole. Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la



parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C.

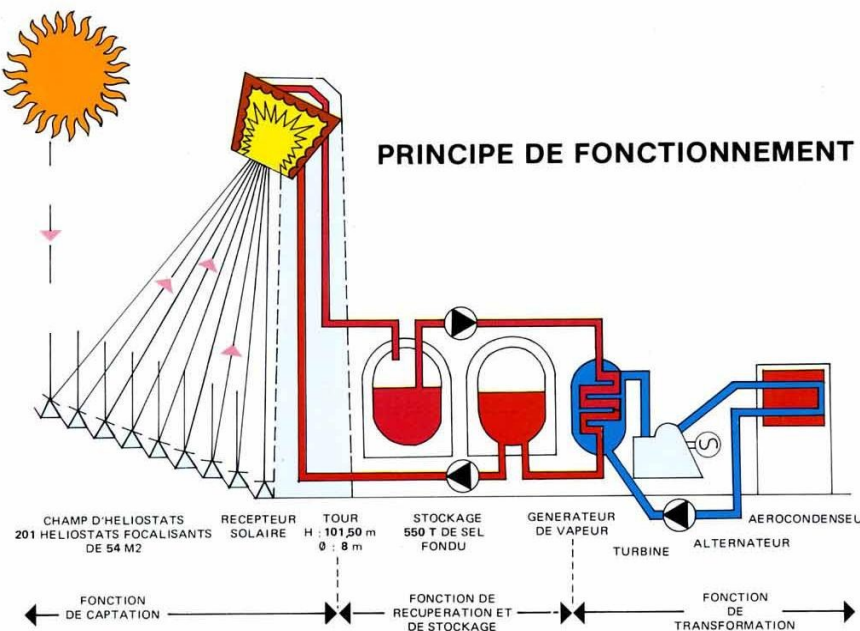
Ainsi, la chaleur du soleil fait travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité.

Chaque capteur est en fait une mini-centrale, qui produit de l'électricité de manière autonome ; l'association de plusieurs

collecteurs paraboliques permet d'augmenter la puissance finale qui est de 15kW dans la plupart des cas.

De nombreuses centrales de ce genre existent un peu partout dans le monde, mais l'on retrouve presque jamais le même type de parabole d'une centrale à l'autre (comme en témoignent les 4 photographies ci-dessus); nous sommes donc encore en phase d'expérimentation mais nous avons déjà constaté que cette technologie n'est probablement pas la plus rentable.

## 2. Les centrales à tour



Le principe des centrales à tour est le suivant : des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C. Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité.



La centrale à tour Thémis (France)

On dénombre aujourd'hui dans le monde plusieurs dizaines de centrales à tour, et c'est pour le moment la manière la plus répandue de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.

Un exemple que nous avons tenu à traiter est celui de la centrale à tour Thémis.

La plus grande tour solaire au monde, SWE2, aux Etats-Unis

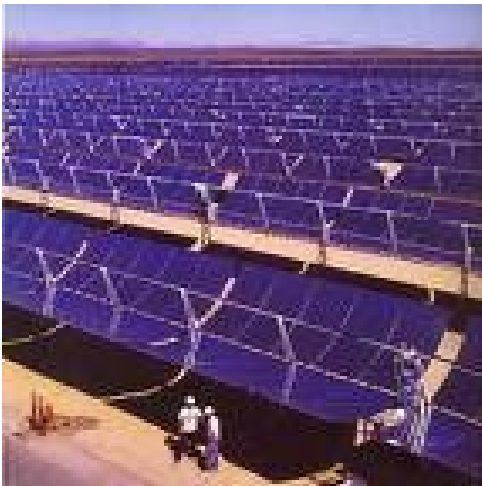


Exploitée par EDF de juin 1983 à septembre 1986 pour faire face au choc pétrolier, Thémis produisait du courant par un principe thermodynamique, grâce à la concentration d'énergie solaire sur une chaudière en haut d'une tour de 100m de hauteur à l'aide de 200 miroirs tournant avec le soleil. Après trois ans d'exploitation et plus de 400 millions de francs (60,9 millions d'euros) d'investissement, la centrale, jugée pas assez

rentable, est abandonnée. Le Conseil général, propriétaire du lieu, met alors le site à la disposition des chercheurs du CNRS, présents jusqu'en 2004.

Mais voilà que depuis quelques années la France a pris conscience de son retard dans le domaine du solaire, surtout par rapport à l'Allemagne, et a décidé de le rattraper en créant presque simultanément deux centrales solaires thermiques, Thémis et l'usine à collecteurs cylindro-paraboliques SOLENHA prévue pour 2009 (avant seules quelques centrales photovoltaïques étaient en activité en France). La centrale désaffectée est alors rénovée, et Thémis produit donc de l'électricité depuis début novembre. La centrale est composée, en plus de 200m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques, de 80 héliostats totalisant 4000m<sup>2</sup> de miroirs pour une puissance de 600 kW (consommation équivalente à 350 foyers). Une centaine d'autres héliostats seront rajoutés d'ici 2010.

### 3. Les collecteurs cylindro-paraboliques



La centrale SEGS (Californie)  
produisent de l'électricité.

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique). Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C. La chaleur ainsi récupérée produit de la vapeur via un échangeur, vapeur qui actionne des turbines et qui

Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur. Si ce n'est pas le cas, une partie annexe de la centrale prend le relais et produit de l'électricité en brûlant des carburants traditionnels (gaz, charbon...) une fois le soleil couché.





La plus grande centrale solaire de ce type est la centrale SEGS (Solar Electric Generating System), situé près de la ville de Lancaster en plein désert Californien. Cette usine est capable de fournir une puissance crête atteignant 150 MWc (mégawatt crête), soit environ 10% de la puissance d'une centrale nucléaire classique, mais sans les problèmes de déchets radioactifs. C'est à ce jour de très loin la plus puissante des centrales solaires, bien qu'elle

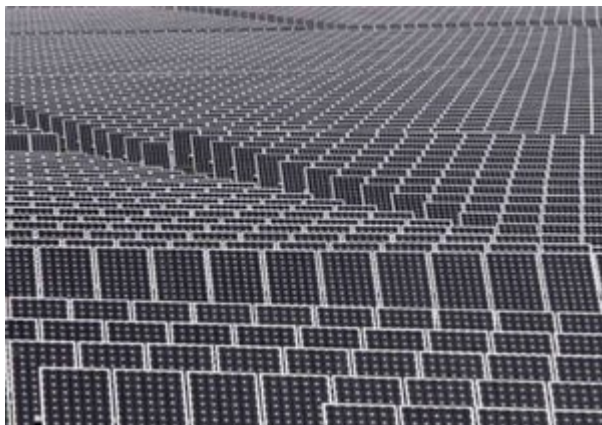
Vue aérienne de la centrale SEGS

doive ce résultat plus à ses dimensions qu'à son système. Pour vous donner une idée, la photo ci-contre est une vue aérienne représentant environ le quart de la centrale. Or chaque trait que l'on peut distinguer représente un tube caloporteur de 500 mètres de long. Assemblés d'un bout à l'autre, les tuyaux ont une longueur totale de 70 km.

Les collecteurs cylindro-paraboliques, grâce à leur relative simplicité et leur rendement économique très élevé par rapport à un coût assez faible, vont peut-être devenir le système de centrale solaire thermique du futur. En attendant, on en dénombre une petite dizaine seulement, uniquement aux Etats-Unis et en phase de construction en Espagne.

#### 4. Les centrales photovoltaïques

Le principe des centrales solaires photovoltaïques est extrêmement simple. Elles sont constituées d'un champ de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. L'énergie



est directement transformée en électricité dans les panneaux, et passe ensuite dans le réseau électrique vers la ville la plus proche.

Le Portugal construit depuis 2006 une immense centrale solaire photovoltaïque à Moura. Avec 350 000

Ci-contre une image de synthèse de la futur centrale Moura.

panneaux solaires installés sur 114 hectares et une capacité de production de 62 mégawatts, la centrale photovoltaïque sera la plus grande du monde. Elle sera six fois plus puissante que l'actuelle plus grande centrale « Bavaria Solarpark » en activité en Allemagne depuis 2004. BP Solar sera donc chargée de la construction de la centrale, qui sera terminée en principe en 2009 et dont le coût s'élèvera à 250 millions d'euros.

## 5. Les projets d'exploitation de l'énergie solaire

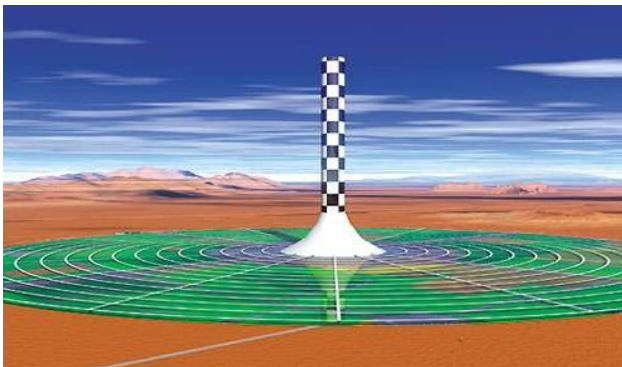
Il existe également d'autres systèmes assez surprenants voir incroyables pour créer de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

### Les Tours Solaires

La Tour Solaire, de 500 à 1000 mètres de hauteur, est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui fournit la même puissance qu'un petit réacteur nucléaire tout en étant plus sûr et plus propre.

Un projet de tour solaire, appelé Projet Buronga et prévu pour 2010, est actuellement développé en Australie par la société Enviromission.

La hauteur envisagée de la tour (990 mètres) sera presque le double de celle du plus haut gratte-ciel jamais construit. Son diamètre à la base sera de 70 mètres,

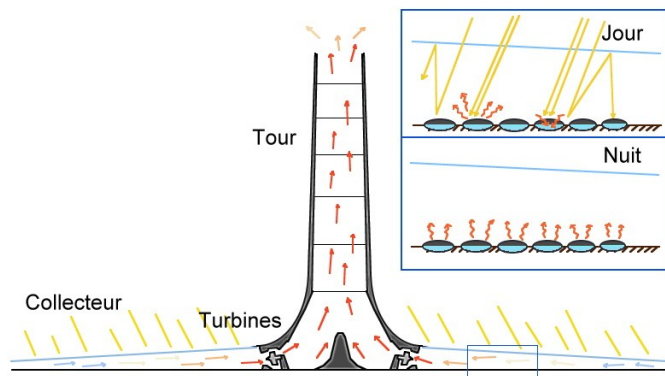


entouré d'une « serre » circulaire de 6 km de diamètre.

La tour pourrait produire environ 200 mégawatts soit six fois moins qu'une centrale nucléaire moderne, mais assez pour fournir en électricité environ 200.000 logements.

Image de synthèse de la futur tour Buronga

La tour n'est en fait qu'une cheminée. L'air, sous une serre gigantesque (le « collecteur ») placée tout autour de la cheminée centrale, est chauffé par le Soleil et dirigé vers le haut par convection, le déplacement de l'air permettant aux 32 turbines situées à l'embouchure de la cheminée de produire de l'électricité. Son fonctionnement se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève. En effet, le Soleil chauffe la plate-forme à la base (d'un diamètre de 7 kilomètres) ; la température extérieure est de 30° C au sol et atteint 70° C au pied de la cheminée.



La vitesse du flux d'air dans la structure est alors d'environ 15 mètres par seconde.

L'avantage principal de cette technologie est son prix assez faible d'exploitation (qui pourrait être réduit grâce à des

visites touristiques de l'usine et l'éventuelle plantation de tomates sous la serre), peu d'entretien, une mécanique simple, et bien sûr la gratuité des rayons du soleil. De plus, comme le sol emmagasine de la chaleur le jour pour la restituer la nuit, le système est totalement opérationnel 24 heures sur 24. Le seul point noir est l'investissement de départ d'environ 400 millions d'euros.

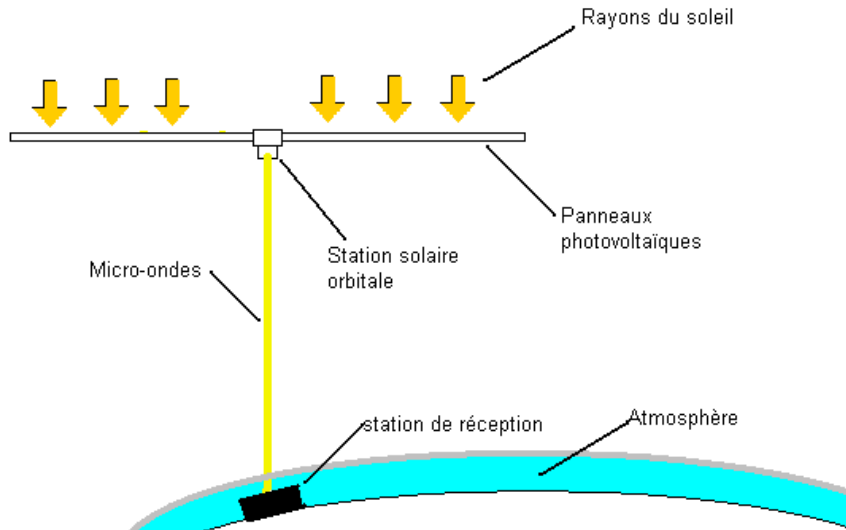
Pour le moment seul le projet en Australie est définitif, mais une tour similaire, bien qu'à plus petite échelle (la cheminée ne mesurera que 330m de haut), devra être construite avant 2012. Les années 2020 pourraient quand à elles voir l'apparition d'une dizaine d'autres cheminées solaires.

### Les satellites solaires

Un projet assez fou sur lequel nous sommes tombés au cours de nos recherches est le suivant : capter l'énergie solaire sur des satellites artificiels puis la renvoyer sur terre.

En effet, de nombreuses centrales solaires terrestres existent déjà à travers le monde. Toutefois, le rayonnement solaire est huit fois moins intense sur la surface terrestre que dans l'espace. Alors pourquoi donc ne pas le capter dans l'espace et propulser son énergie vers la Terre sous la forme de micro-ondes qui pourraient pénétrer l'atmosphère plus efficacement ? Telle est la question à laquelle une équipe de chercheurs la NASA tentent de répondre.

Ceux-ci ont proposé à cet effet de placer sur orbite d'énormes satellites dotés d'antennes et de panneaux photovoltaïques. Ces derniers capteraient le rayonnement solaire puis transmettraient l'électricité captée vers la terre sous forme de micro-ondes. Les stations de réception au sol transformeraient l'énergie transmise en électricité qui, contrairement à l'électricité produite par les stations solaires terrestres, alimenterait sans interruption le réseau électrique quelles que soient les saisons, les conditions météorologiques ou les zones géographiques. En effet, s'ils sont bien orientés, les satellites captent aussi bien le rayonnement solaire aux pôles qu'à l'équateur.



Toutefois, les frais de construction demeurent excessivement élevés, ce qui pour effet de décourager qui que ce soit d'investir dans ce domaine. Le coût le plus important a trait au transport du matériel et des dispositifs à bord de la navette spatiale : 20 000 dollars le kilogramme. Si l'on arrivait à diviser ces coûts par cent, ce système deviendrait rentable. Le développement de ce projet passe donc par la construction d'un lanceur réutilisable, qui pourrait très certainement ne pas voir le jour ces cinquante prochaines années.

## B) L'énergie solaire dans les transports et sur les satellites

L'énergie solaire, en plus de servir au chauffage chez les particuliers et à la production d'électricité, peut avoir deux autres utilisations :

- Un moyen de fournir de l'énergie aux satellites
- Un moyen de propulsion pour divers transports

En effet, tout satellite a besoin d'être autonome que se soit pour le contrôle thermique ou l'émission des différentes ondes radios. Pour cela une source d'énergie fournissant l'électricité à chacun de ses composants est indispensable. Les deux seuls moyens connus à ce jour sont les piles, dont la taille est limitée et rapidement épuisables, et les panneaux solaires photovoltaïques. Ces derniers se sont bien sûr imposés car leur espérance de vie est à peu près égale à celle des satellites et parce qu'ils permettent de générer de l'électricité grâce à l'inépuisable source d'énergie qu'est le rayonnement du soleil.

L'idée de faire fonctionner les transports, principale cause du réchauffement climatique dû à la quantité de gaz à effet de serre qu'ils rejettent, grâce à une énergie non polluante est née il y a quelques décennies. Depuis, la recherche se

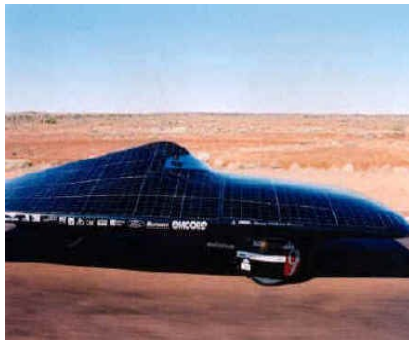
développe de plus en plus du côté de l'énergie solaire, mais seuls quelques prototypes ont vu le jour :

## 1. Les voitures solaires



Il existe déjà en vente quelques voitures recouvertes de panneaux photovoltaïques sur le toit ou sur le capot (voir la photographie ci-contre). Seulement l'énergie solaire captée ne sert qu'à alimenter la batterie ou permettre à la voiture de parcourir une dizaine de kilomètres grâce à l'énergie solaire accumulée dans une journée, la voiture fonctionnant le reste du temps à l'essence.

Un concours, le World Solar Challenge, réunit tous les ans en Australie des prototypes de voitures solaires créés par des étudiants de diverses



grandes universités dans le monde. L'équipe vainqueur est celle dont la voiture aura mis le moins de temps pour parcourir 3000km. Le record est battu presque à chaque fois d'une année sur l'autre tellement les progrès sont rapides. La voiture la plus rapide de l'édition 2007 a roulé pendant 33 heures à la vitesse moyenne de 102 km/h. Bien sûr la nuit les panneaux solaires ne fonctionnent pas, la voiture étant propulsée grâce à l'énergie stockée pendant la journée. Ces vitesses sont assez exceptionnelles, mais il faut néanmoins rappeler que la course a eu lieu en plein désert d'Australie (là où l'ensoleillement est l'un des plus forts au monde), que les voitures sont très larges et qu'elle ne peuvent contenir qu'une charge de 100kg maximum. La recherche se poursuit, mais de telles voitures n'arriveront en France sur le marché que dans 20 ou 30 ans pour les plus optimistes.

## 2. Les trains solaires

Du côté des trains et des TGV, plusieurs études ont été réalisées et il en est ressorti que la pose de panneaux solaires sur les trains serait inefficace et absolument pas rentable, principalement à cause de la puissance qu'ils

nécessitent (1MW pour le TGV), bien trop importante pour des panneaux photovoltaïques.

### 3. Les bateaux solaires

De nombreux bateaux dits « solaires », propulsés par des panneaux photovoltaïques alimentant un moteur électrique, sont en circulation depuis bientôt 20 ans. Ce sont bien sûr principalement des bateaux de croisières, car leur vitesse ne peut guère dépasser les 20km/h.



Le bateau solaire Sun21

bien servir un jour de source principale de traction des transports fluviaux, même si elle serait remplacée par un carburant en cas d'intempéries.

Le bateau solaire est idéal pour les voies navigables intérieures, et pour prendre la mer un système ingénieux consiste à équiper un tel bateau avec des voiles auxiliaires qui servent également à charger des batteries en inversant le système de propulsion en générateur. Le bateau solaire a donc de l'avenir, et l'énergie solaire pourrait très

La photographie ci-dessus est celle de l'arrivée du catamaran solaire Sun21 à New York après sa traversée de l'atlantique en mai 2007, avec pour seul mode de propulsion un moteur fonctionnant à l'aide de panneaux photovoltaïques.

### 4. Les avions solaires

Mis à part le décollage, de nombreux avions expérimentaux ont réussi à voler plusieurs heures uniquement grâce aux capteurs photovoltaïques placés le long de leurs ailes. Bien que le résultat soit impressionnant, il s'agissait à chaque fois de petits avions ayant un mode de vol très proche du planeur, et donc ne nécessitait presque pas d'énergie pour voler. Cependant depuis 2003 un projet, nommé Solar Impulse, tente de créer un prototype capable de faire

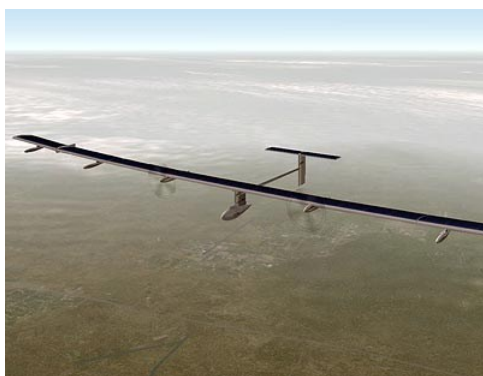


Image de synthèse du futur avion Solar Impulse

tour le monde. L'équipe, composée d'une quarantaine d'ingénieurs, prévoit son décollage pour mai 2011. L'appareil ne pourra contenir qu'une seule personne malgré ses dimensions gigantesques et

prévoit de faire le tour de l'équateur en 15 jours décomposé en 5 étapes (pour le repos du pilote).

Les caractéristiques de l'avion seront les suivantes :

- Altitude maximum : 12000 m
- Poids : de 1500 à 2000 kg
- Vitesse moyenne : 80 km/h
- Envergure : 80 m
- Poids des batteries : 450 kg
- Puissance des moteurs : 10 kW



Image de synthèse du même avion vu sous un autre angle

## IV) Les enjeux de l'utilisation de l'énergie solaire

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée. Cependant, devons nous vraiment développer cette énergie ?

Son point fort est qu'elle ne pollue pas mais n'oublions pas son le principal problème : elle est disponible uniquement le jour. Même si certains systèmes permettent de produire quelques heures après le coucher du soleil, le stockage électrique est encore trop peu efficace pour que le soleil puisse être utilisé comme unique source d'électricité.

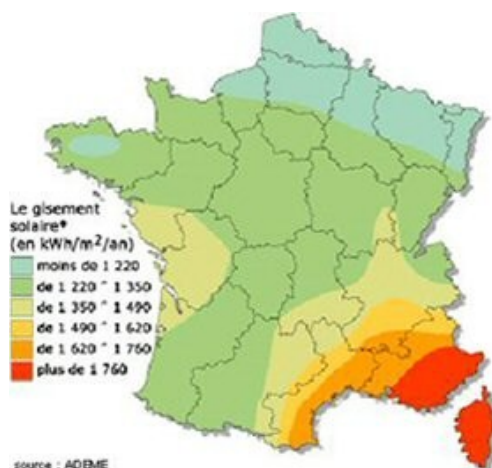
De plus, l'énergie solaire ne pourra jamais réellement servir aux transports (du moins dans un futur proche), qui sont la principale cause de pollution atmosphérique.

Notons que les systèmes passifs n'engagent que peu d'intérêt car en plus d'avoir toujours existé, ils ne nécessitent pas d'investissements massifs: seul un petit surcoût est nécessaire à la construction. Cependant, leur efficacité est moins importante que celle des systèmes actifs.

### A) Etat de l'utilisation de l'énergie solaire

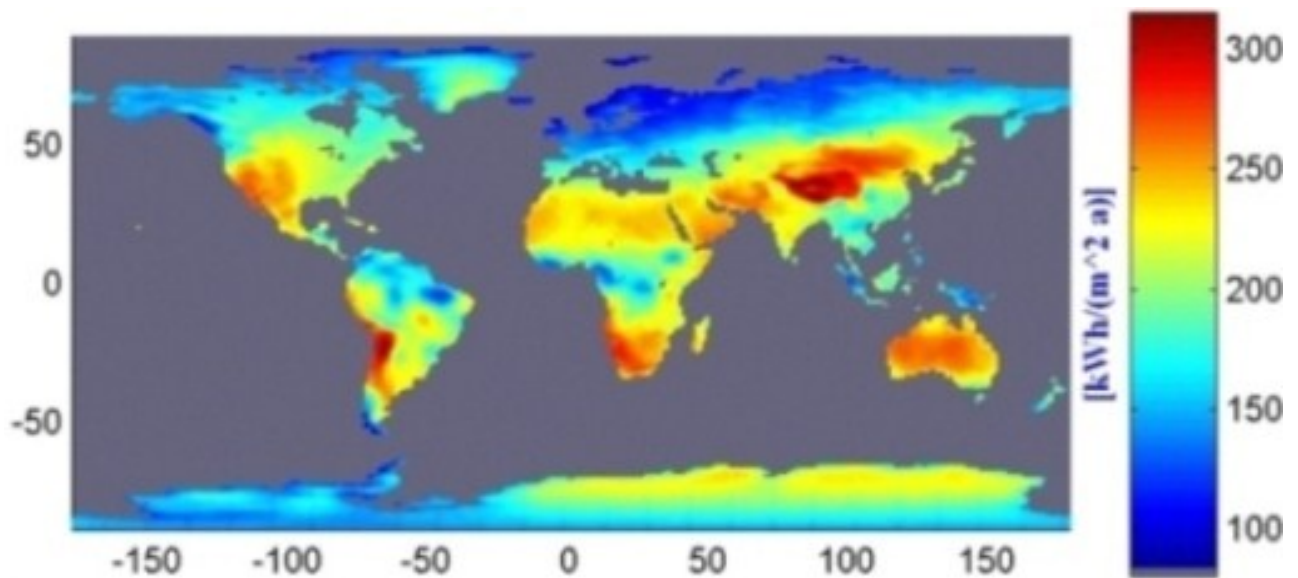
Les différentes méthodes de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire sont relativement peu répandues puisqu'elles ne représentent que 0,0018% de la production d'électricité mondiale. Cependant, le taux actuel de croissance de la part de solaire dans la production d'électricité est très fort: environ de 19% contre 1,5% pour l'hydraulique. On remarque que les pays dont la part d'électricité produite par le solaire est la plus forte ne sont pas les pays dont l'ensoleillement est le plus important: l'Allemagne et le Japon sont les pays qui produisent le plus d'électricité d'origine solaire. Nous en concluons donc que le facteur qui contribue le plus au développement de l'exploitation de l'énergie solaire est la richesse du pays et non son ensoleillement. Ce dernier facteur n'a cependant pas une influence nulle sur le développement de l'énergie solaire: on

constate sur la carte que les pays du scandinaves, l'Islande, les îles britanniques et le Danemark n'utilisent que très peu l'énergie solaire alors qu'il sont plus riches que des pays comme la Grèce.



*Énergie solaire reçue à la surface en France*





Average Potential Electricity Production with Photovoltaics (1983 - 1992)

Met data: ECMWF and NCEP

© Czech ISET, Vng. Mgrh. 2001



On remarque sur ce graphique que l'énergie solaire n'arrive pas sur Terre de manière homogène. L'électricité ne se transportant pas facilement sur de grande distance, il serait irréaliste de vouloir produire toute l'électricité mondiale dans quelques déserts.

## B) Rentabilité des différents moyens

### 1) Le photovoltaïque

Le photovoltaïque revient cher aux particuliers. Cependant, l'investissement initial est fortement subventionné: d'un prix d'environ 10 €/Wc TTC, le montant n'est plus que de 5 €/Wc après subvention. Et cela avec une durée de vie qui peut aller jusqu'à 35 ans (en les entretenant régulièrement). De plus, EDF est obligé par la loi de racheter l'électricité produite en surplus à un prix très fort: 0,55€/kWh pour des panneaux solaires intégrés à la toiture. Or le prix de vente de l'électricité E.D.F. est de 0,1085 €/kW.h. Il y a donc une perte de 0,4415 €/kW.h subie par E.D.F. et donc qui est payée par l'Etat. Malgré toutes ces aides, la période de retour d'investissement est dans le meilleur des cas (région au sud de la France, TVA réduite, 50% de l'investissement déduit des impôts, prix de rachat de l'électricité extrêmement fort) de 8,5 ans. Dans des circonstances climatiques moins exceptionnelles mais avec subvention, il est de 19,6 ans, ce qui est plutôt faible compte tenu de la courte durée de vie des

installations qui ne dépassent pas 35 ans en théorie. Sans aucune subvention et en vendant son électricité au prix actuellement payé par les clients d'E.D.F., cette durée serait de plus de 76 ans soit plus de deux fois plus longtemps que la durée de vie maximale.

Les usines photovoltaïques ne sont pas beaucoup plus rentables : certaines études affirment qu'avec 3 500 euros, on peut extraire 70 barils de pétrole (dans le cas où il n'y a pas de taxes ni de bénéfices), soit 1100MWh (les usines thermiques ayant une efficacité d'environ 30% cela correspondra à 330 MWh d'électricité injectée sur le réseau) alors qu'avec cette même somme, on peut acheter 1m<sup>2</sup> de panneau photovoltaïque qui produit 60Mwh sur 30ans, durée de vie moyenne de celui-ci. Cela revient donc 5,5 fois plus cher ! De plus, le prix du silicium ne fait qu'augmenter, tout comme le prix des métaux: cela est dû à la hausse du prix du pétrole. Cela veut peut être dire que la baisse du prix du photovoltaïque risque de ralentir. De plus une autre cause importante de réduction de coûts est la délocalisation en Chine de la production de cellules photovoltaïques. Or une fois l'industrie complètement délocalisée en Chine, il est impossible de faire redescendre le prix de la main d'œuvre. On peut donc en conclure qu'il n'est pas encore assez rentable de développer le photovoltaïque relié au réseau malgré le fait qu'il permette de valoriser des surfaces non utilisées: les toits.



*Projet pharaonique d'usine solaire en Allemagne*

Cependant, le photovoltaïque n'a pas de surface minimale pour produire de l'électricité. En conséquent, il peut être utilisé pour alimenter des endroits en autarcie car peu accessibles ou trop éloignés de tout réseau électrique. Cela pourrait donc être la meilleure solution de développement de nombreux villages isolés d'Afrique. De plus, le photovoltaïque peut être utile pour

alimenter des équipements mobiles sans avoir à transporter de carburant tels que des équipements militaires

(les systèmes de communication ont besoin d'électricité). Le photovoltaïque est aussi le principal procédé de production électricité dans l'espace.

## 2) Le chauffe-eau solaire

L'achat d'un chauffe-eau solaire pour une famille de quatre personnes est d'environ 6 575€. Bien que l'investissement soit à moitié déductible des impôts. En considérant que le système permet d'économiser à peu près 400€/an, l'investissement est amorti sur un peu plus de 16 ans. Cependant entre 2004 et 2006, le prix de l'investissement a augmenté de 13% certainement en raison de l'augmentation de la demande. Les installations étant elles aussi déductible à 50% des impôts, l'installation d'un chauffe-eau solaire peut être intéressante dans le cas de la construction d'une maison neuve qui n'a pas encore de chauffe-eau : l'amortissement se fait alors sur 7 ans (ce qui peut être considéré comme très convenable en comparaison aux panneaux photovoltaïques). Le chauffe-eau solaire est donc un système qu'il faut développer car il est rentable aussi bien sur le plan financier qu'environnemental.

### 3) Les usines thermodynamiques

L'investissement nécessaire à la construction de telles usines est énorme (environ 6.7€/W) mais reste moins cher que le photovoltaïque pour une durée de vie bien supérieure. Cependant, la construction de ces usines nécessite des surfaces énormes, ce qui fait qu'elles ne peuvent être disposées quasiment que dans des déserts. Le coût de l'électricité produite par les centrales thermiques solaires est d'environ 80€/MWh (frais d'assurance et de maintenance compris). Cette valeur est à comparer avec le coût des autres énergies: le gaz: 35€/MWh; le charbon: 33,7€/MWh; le nucléaire: 28,4€/MWh. Son prix reste tout de même plus faible que celui des usines photovoltaïques qui est d'environ 100 €/MWh et au prix de rachat au particuliers qui est, rappelons-le, de 550€/MWh. Cependant, les usines solaires thermiques sont actuellement presque toutes expérimentales, et leurs coûts est donc plus fort que si cette technologie se répandait. De plus, tous les moyens de convertir l'énergie solaire en chaleur n'ont pas encore été explorés et il reste encore beaucoup de place à l'innovation afin de faire baisser les coûts et augmenter les rendements.

## C) Une solution écologique ?

### 1) Un impact minime

L'exploitation de l'énergie solaire ne dégage presque aucune pollution, son impact environnemental en utilisation est donc très faible. Contrairement à d'autres moyens de produire de l'électricité, le solaire n'a pas besoin d'eau pour fonctionner, ce qui représente un avantage énorme dans les endroits où cette

ressource manque comme les déserts secs qui ont aussi l'avantage d'avoir de grandes surfaces utilisables et un ensoleillement très fort. De plus, l'utilisation de l'énergie solaire ne dégage aucun gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets radioactifs. La non rentabilité économique de l'énergie solaire est clairement compensée par ces bienfaits environnementaux.

## 2) Une construction polluante

L'impact environnemental de fonctionnement très faible mais pas nulle contrairement à certaines idées courantes: un entretien est nécessaire pour ne pas voir la durée de vie tomber à 10 ans. Or cet entretien ne peut pas avoir un impact nul: par exemple, un agent qui effectue un nettoyage utilise des produits de nettoyage et doit bien se rendre sur le lieu d'intervention en véhicule; de plus, des panneaux solaires en plein désert se recouvrent de sable et demandent d'énormes quantités d'eau en nettoyage. De plus, la fabrication des équipements solaires est énergétivore: la purification du silicium (peut-être n'en aura-t-on plus besoin à l'avenir) nécessite de grandes quantités d'électricité pour atteindre la température de purification d'environ 2000°C. De plus, les équipements sont majoritairement produits en Chine et utilisés dans les pays riches: un transport (le plus souvent maritime) est donc nécessaire à son acheminement vers son lieu de consommation, ce qui consomme des énergies fossiles. Cependant, aucune donnée fiable concernant l'énergie utilisée pour leur construction n'est à attendre: les enjeux économiques sont bien trop importants et les constructeurs tentent de cacher ces dépenses énergétiques qui pourraient décrédibiliser l'aspect écologique de cette énergie; perdant son seul atout, les ventes chuteraient alors très rapidement.

De plus, La production d'électricité représente 24% des émissions totales de CO<sub>2</sub> et les dépenses liées au chauffage des habitations 8% donc même si toutes les habitations du monde étaient autosuffisantes pour le chauffage et toute l'électricité produite grâce au solaire, seule 32% des émissions de dioxyde de carbone pourrait être supprimées.

En conclusion, à l'heure actuelle, le solaire est rentable uniquement dans le cas d'alimentation électrique des lieux isolés (satellite, village isolé,...) et ne pourrait se développer nulle part ailleurs sans les nombreuses subventions qui sont actuellement mises en place par beaucoup de pays développés. La chute des prix attendue n'aura peut être pas lieu compte tenu que le prix des matières premières est lié aux prix du pétrole. Cependant, les capitaux investis dans la recherche sont énormes et on peut donc s'attendre à des résultats : baisse des prix, hausse des rendements... En attendant, l'achat de modules solaires par les

particuliers, les Etats et les entreprises semble plus liés à un engouement passager plutôt qu'à un souci d'indépendance énergétique ou environnemental : l'électricité d'origine nucléaire coûte encore largement moins chère que des installations qui ont une durée de vie si courte que l'on ne peut pas être sûr que l'énergie utilisée pour leur construction soit inférieure à l'énergie produite durant leur durée de vie. De plus, les Etats, c'est-à-dire les contribuables, payent une grande partie de ces installations mais ce financement pourrait vite être remis en cause au même titre que celui des éoliennes ou des biocarburants.

Cependant, des sacrifices économiques seront certainement nécessaires pour sauver la planète d'un grand danger de notre temps : le réchauffement climatique.

Après toutes les recherches effectuées, nous en arriveront à la conclusion que le solaire n'est certainement pas l'énergie d'aujourd'hui. En effet, elle est actuellement trop peu efficace par rapport à son coût et on ne peut même pas vérifier ses bienfaits écologiques. Peut-être est-elle celle de demain: seule la recherche pourra augmenter suffisamment les rendements pour que cette solution soit envisageable. Elle ne sera sûrement pas celle d'après demain: une fois la fusion nucléaire contrôlée, le solaire n'aura plus aucune place dans les réseaux électriques et ne sera réservée qu'aux lieux non joignables à un réseau électrique.

## Partie expérience :

### La route solaire

#### 1) Comment l'idée est elle venue ?

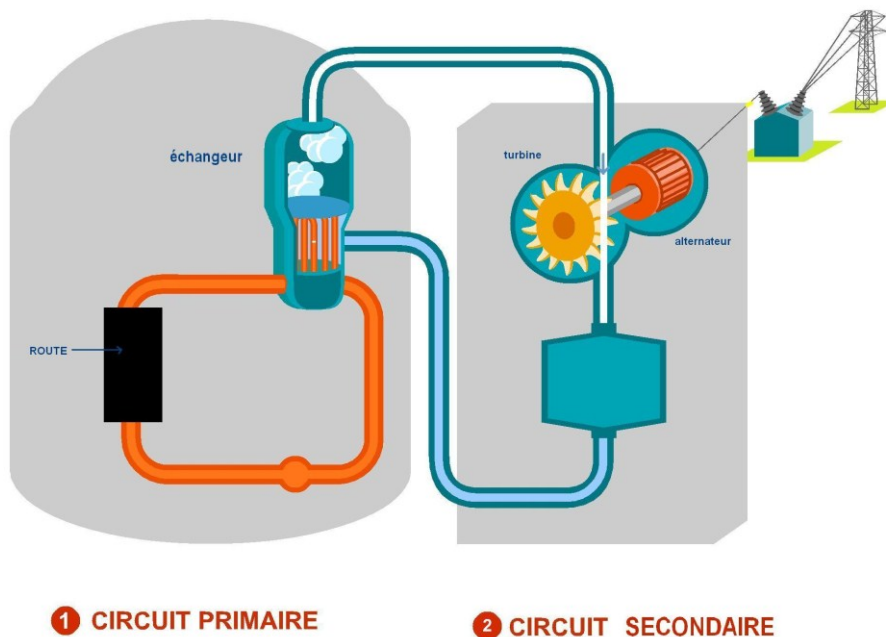
Une surface noire absorbe une grande partie du spectre électromagnétique et l'énergie est convertie en chaleur. Or quelle est la surface noire généralement exposée au soleil la plus fréquente ? Les routes. De plus, il est extrêmement facile de couler des tuyaux dans le goudron.

## 2) fonctionnement théorique

Le soleil chauffe la route, la route chauffe l'eau qui circule dans les tuyaux. L'eau chaude fait ensuite évaporer un liquide (ou détend un gaz) qui fait tourner une turbine entraînant un alternateur.

Le fonctionnement paraît très simple mais il faut encore trouver un liquide qui s'évapore à la température obtenue. De plus, l'eau n'est pas forcément le meilleur liquide caloporteur et il y a un risque de gel en hiver.

## SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE LA ROUTE SOLAIRE



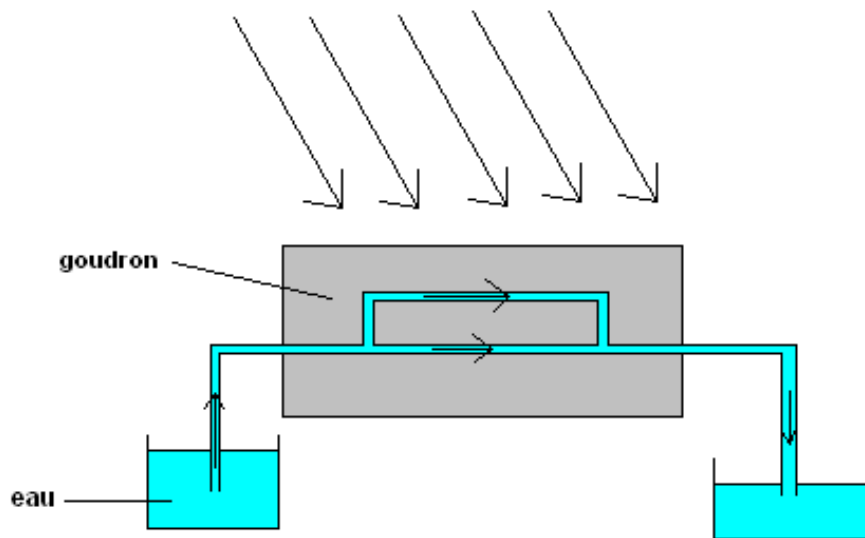
## 3) expérimentation

Les moyens disponibles pour notre expérience ne nous permettent pas de poser l'expérience jusqu'à produire de l'électricité en effet, il faudrait pour cela des conduits étanches tenant à la pression. Nous nous contenterons donc de mettre en évidence la différence de température à l'entrée et à la sortie de la route.



### schéma de l'expérience

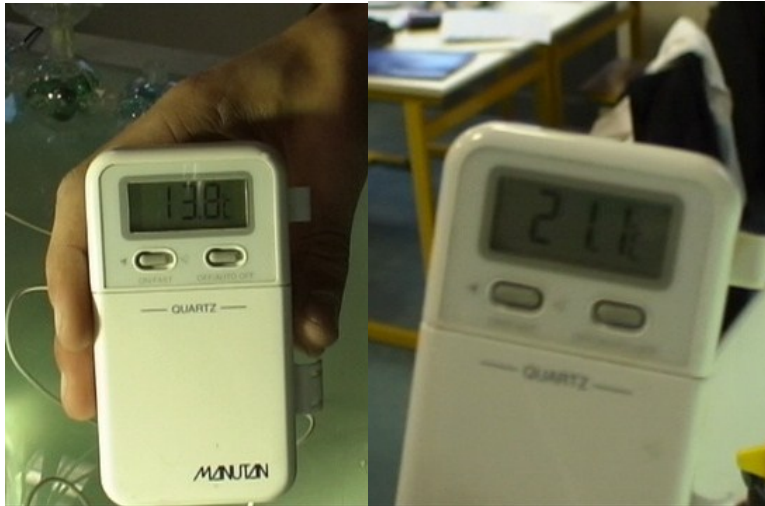
rayons solaires



### 4) résultats

Nous avons pu observer une différence de température entre l'eau d'entrée et de sortie de plus de 7°C. Ce résultat n'est pas mauvais mais pourrait être fortement augmenté en utilisant un échangeur thermique métallique avec une plus grande surface d'échange en effet, la température du bitume est montée

jusqu'à 50°C pour une eau qui avait comme température de sortie 20°C. Nous avons aussi pu observer que 15 minutes après la fin de l'éclairage, le goudron était encore à 40°C ; l'utilisation peut donc se prolonger après le coucher du soleil.



### 5) conclusion

Vu les résultats obtenus, il semble difficile de produire de l'électricité avec les routes solaires (difficile mais possible). Cependant, une bonne application serait l'alimentation des habitations en eau chaude pour le chauffage mais aussi l'eau chaude sanitaire.