

## 10. Les énergies renouvelables

### *10.2 - Les technologies de captation et de conversion*

#### *Partie 1 – Énergie solaire*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Pierre-Luc Paradis, ing. Ph.D.

Tanguy Lunel, ing., M. Sc. A.

# Ressources didactiques

- Présentation
  - 10.2\_Les technologies - Solaire.PDF
- Vidéo
  - 10.2.1\_Solaire.MP4
- Documentation
  - Aucune
- Évaluation formative
  - Auto-évaluations (communes 10.1-10.3 et 10.4-10.6)
- Évaluation sommative
  - Quiz (communes 10.1-10.3 et 10.4-10.6, donc deux quiz)

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Les technologies de captation et de conversion
  - Ce long survol fait plus de 150 pages au total. Il fut donc scindé en 6 parties distinctes
    1. Énergie solaire
    2. Énergie éolienne
    3. Énergie géothermique
    4. Énergie biologique
    5. Énergie hydraulique
    6. Énergie océanique ou marine
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Les technologies de captation et de conversion
- Conclusion

**Rappel:** Si vous suivez cette présentation en direct sur le web (synchrone) et préférez poser une question par clavardage (chat), je vais y répondre lors des pauses prévues dans la présentation.

**MERCI!**

# Introduction et objectifs

- Cette série de présentations propose un tour d'horizon des différentes technologies de captation et de conversion d'énergies, qui sous certaines conditions, peuvent être renouvelables.
  - Les participants au cours, sont invités à suggérer des liens vers des sites proposant de nouvelles technologies.
  - Chaque année, des nouveautés apparaissent et mettre à jour cette série de présentations est notre responsabilité mais pour y arriver **nous avons besoin de vous !**

# Introduction et objectifs

- Cette présentation, déjà longue, ne couvre pas certains sujets liés à la captation et à la conversion des énergies renouvelables, les effets thermoélectriques, par exemple.
- Par ailleurs, les vecteurs de conversion que sont l'électricité, la chaleur et l'hydrogène sont discutés au module 4  
*M4: Vecteurs d'énergie*
- De plus, les différents et nombreux procédés de stockage, discutés dans *M17: Stockage d'énergie*, ne sont pas couverts par cette série de présentations.

# Plan de la présentation

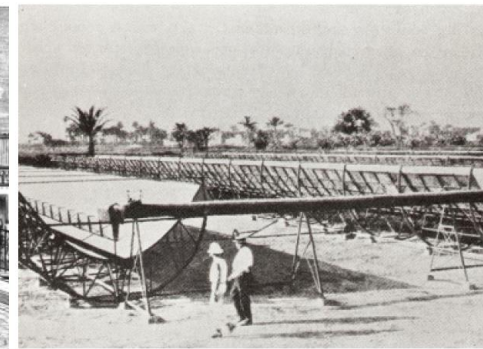
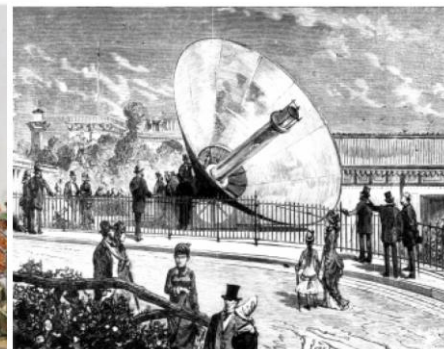
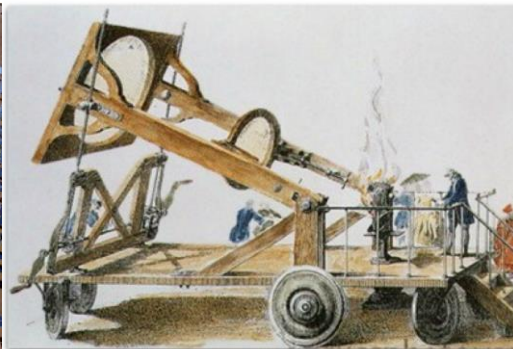
- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Les technologies de captation et de conversion***
  - L'énergie solaire
    - Histoire, le soleil, le rayonnement et la ressource
    - Photovoltaïque
    - Thermique passif
    - Thermique actif simple
    - Thermique avec concentrateur
    - Thermique hydrique (étangs solaires)
    - Thermique hydrique (océanique)
- Conclusion



# L'énergie solaire

- Histoire

- Une capsule est disponible pour présenter brièvement les principaux jalons de l'histoire du développement de l'énergie solaire





# L'énergie solaire

- Soleil, rayonnement et ressource solaire
  - Des capsules sont disponibles pour présenter brièvement les principaux éléments qui permettent ensuite d'aborder les technologies

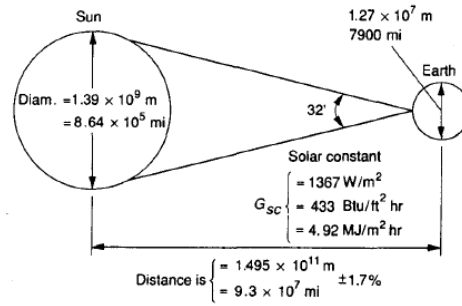
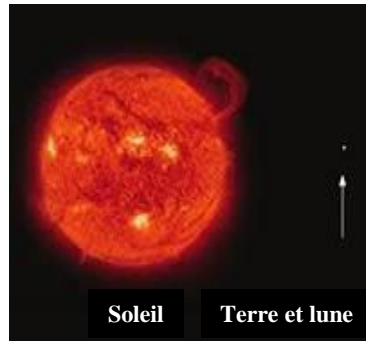
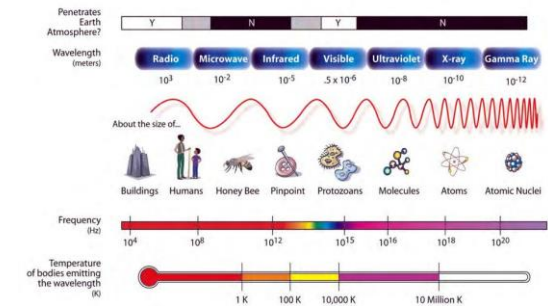
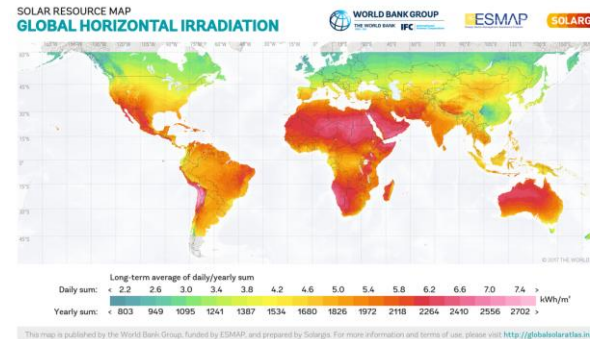
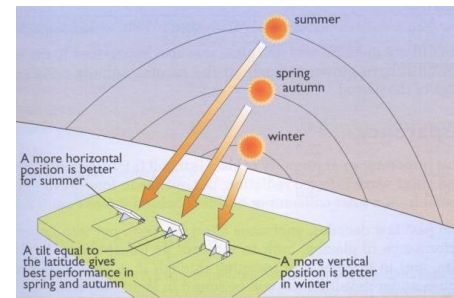
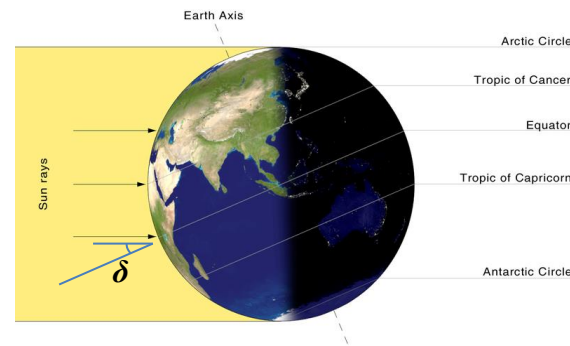
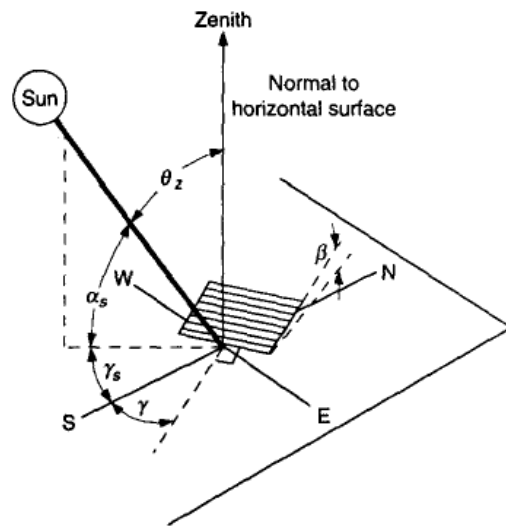


Figure 1.2.1 Sun-earth relationships.



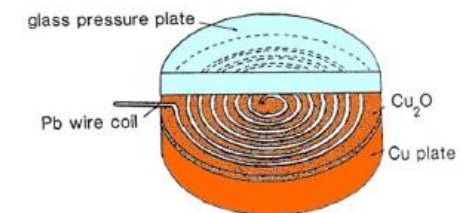
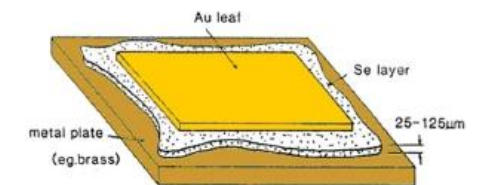
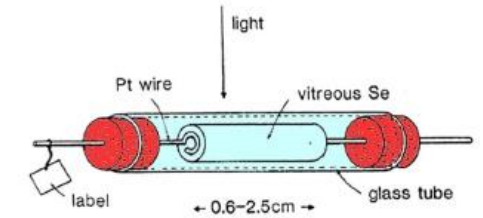
# L'énergie solaire

- Énergie solaire disponible
  - Une capsule a été élaborée, tant pour les projets PV que pour les projets thermiques ou thermodynamiques, elle concerne l'énergie qui percute une surface qu'elle que soit son orientation et sa localisation. Elle propose aussi des instruments de mesure solaire.



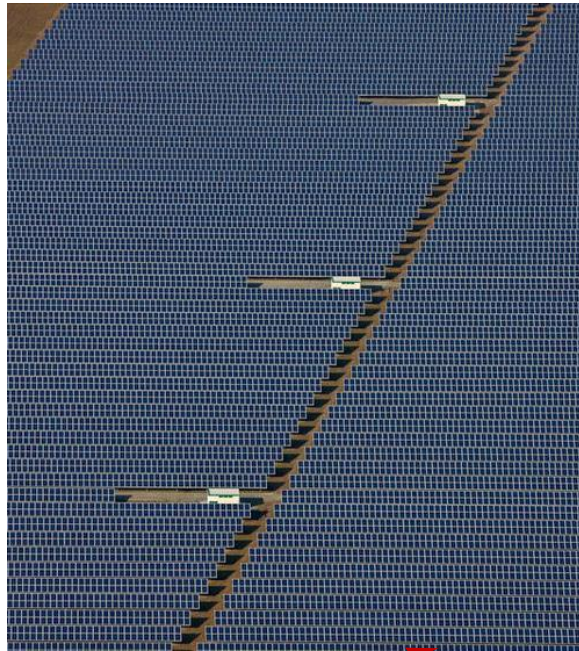
# L'énergie solaire

- Le photovoltaïque
  - Une conversion directe en électricité;
  - La production augmente exponentiellement;
  - Des composants très fiables;
  - Des pays pro-actifs. Chine et Inde;
  - L'Ontario en avance
  - Le Québec un grand potentiel

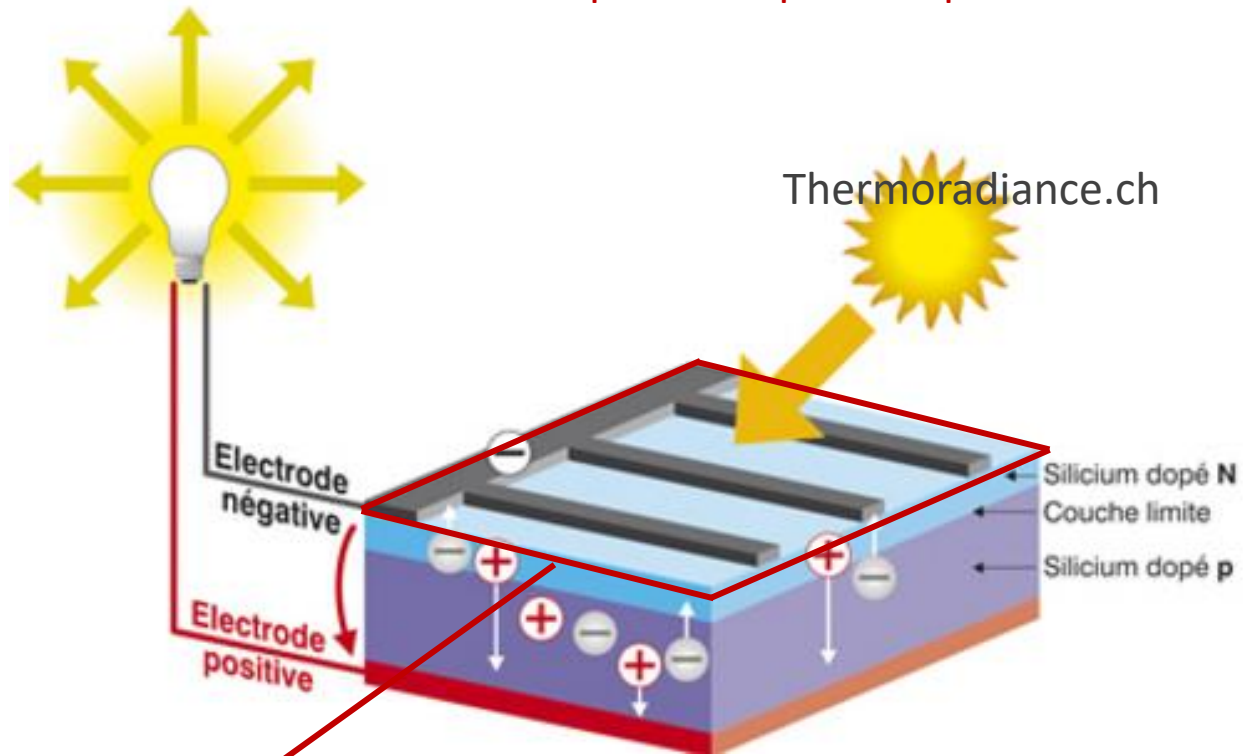


# L'énergie solaire

- Le photovoltaïque
  - Principe



Un collecteur est composé de plusieurs cellules  
Un champ est composé de plusieurs collecteurs



Solar panels in Germany -- by Klaus Leidorf

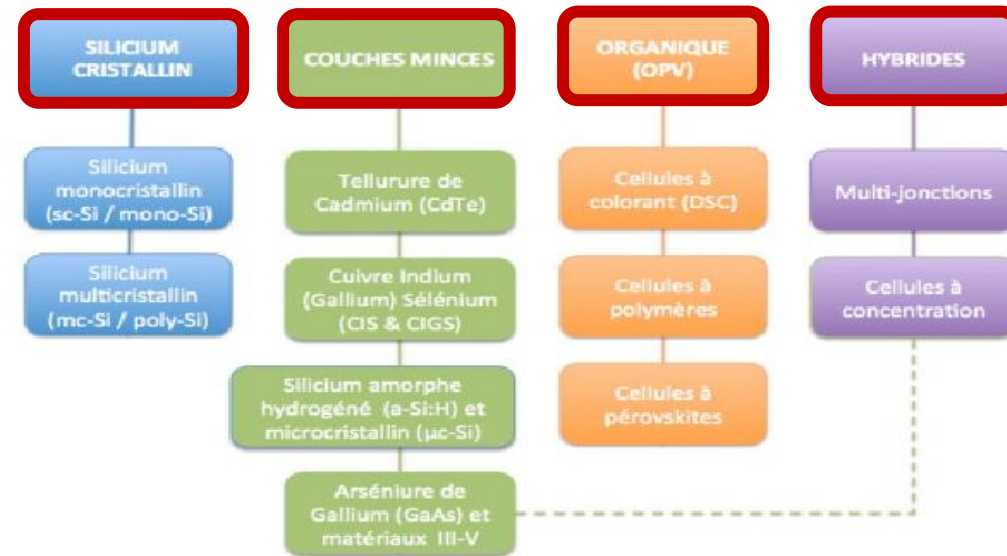
[http://www.facebook.com/photo.php?fbid=520300657994030&set=a.470634072960689.110387.214669701890462&type=1&relevant\\_count=1](http://www.facebook.com/photo.php?fbid=520300657994030&set=a.470634072960689.110387.214669701890462&type=1&relevant_count=1)

# L'énergie solaire

- Le photovoltaïque
  - Toutes les cellules sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs.
  - La plupart du temps, c'est le silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi :
    - le sulfure de cadmium (CdS),
    - le tellure de cadmium (CdTE),
    - des alliages de cuivre indium et sélénium (CIS)

# L'énergie solaire

- Le photovoltaïque
  - Différentes technologies



Classification des principales technologies de cellules solaires PV (source :Hespul)

# L'énergie solaire

- Le photovoltaïque

- Technologies actuellement en développement

- Le concentrateur RAWLEMON
    - Polymère acrylique de 99% transp.
    - Concentre 10 000 x la densité reçue
    - Suivi solaire requis
    - « On » dit que c'est commercialisé
    - Dans ENR811, on recommande la prudence!



- Les rayons qui frappent une hémisphère ne sont pas concentrés sans variation de l'indice de réfraction. Qu'en est-il avec de l'eau, est-ce suffisant?
      - Pour obtenir une concentration de 10 000, il faut que la surface qui intercepte le soleil soit .... 10 000 fois plus grande que la surface du capteur. Or, dans l'article on indique que la surface est divisée par ... 10.

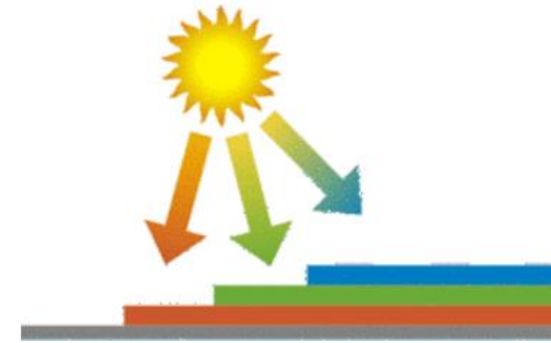
Rawlemon : à lire sur [Techniques de l'ingénieur](#)

# L'énergie solaire

- Le photovoltaïque

- Les **recherches**

- Cellules multicouches : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire). Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).
    - Cellules à concentration : utilisation de photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule.
    - Cellules organiques.





# L'énergie solaire

- Les défis de l'heure
  - Le contrôle de la qualité des systèmes
  - Les ensembles complets
  - De la formation
  - La technologie par films ou micro-couches
    - Silice (a-Si)
    - Cadmium (CdTe)
    - Cuivre (Cu-In-Se<sub>2</sub> et +)
  - Le prix, toujours le prix, mais depuis 2017, la situation a changée.



# L'énergie solaire

- Logiciels (freeware et logiciels libres) pour études de faisabilité
  - PV Watts NREL
  - System Advisor Model NREL
  - PVGIS
  - PVSYST
  - Climate consultant
  - RETscreen

# L'énergie solaire



ENR2020

- Quelle est l'irradiation moyenne quotidienne par unité de surface inclinée à  $45^\circ$  à Montréal (en kWh/m<sup>2</sup>/jour)?
  - Incrire le chiffre à deux décimales près sans unité. Ex: 1,11
- Quelle est alors la quantité d'énergie récupérée par un collecteur PV de 20,6 m<sup>2</sup> si son rendement de conversion est de 15,5% ? (en kWh/an)
  - Incrire un chiffre SANS décimale sans unité. Ex: 1234
- Quelle est la quantité d'énergie récupérée annuellement par une installation de 4 kW orientée de même manière et avec 14,08% de pertes (utilisez PVWatts)?
  - Incrire un chiffre SANS décimale sans unité. Ex:1234

# L'énergie solaire

- Quelle est la valeur de l'énergie annuelle générée au tarif domestique (D) marginal de Hydro-Québec?
- Si on vous propose un système de 4 kW complet à 5000\$ incluant tout. Quelle serait la PRI simple si on vous rachète selon la politique « net metering » ?

# L'énergie solaire

- Cours ENR889 - PV
- PV Systems Training Course
  - Leonardo Energy
  - Series of 26 seminars, 6 sections

<https://www.youtube.com/watch?v=hS2JxC0UDWw&list=PLUFRNkTrB5O-yZcsSyjJtohpXx831Y35g>

- EnergyX
  - TU Delft, entertaining

<https://www.youtube.com/watch?v=hXRZzgAGuw4>  
<https://www.youtube.com/watch?v=Zla5vDsiKbo>  
<https://www.youtube.com/watch?v=QAwEtVPkwL0>

# L'énergie solaire

- Et le MIT n'est pas en reste
  - MITOPENCOURSEWARE

<https://www.youtube.com/watch?v=qIJx2PRGKqw>

- electrical4u.com



<https://www.youtube.com/watch?v=ZYO83TkM0To>

# L'énergie solaire

- Le passif
  - Le séchage
    - Boues
    - Aliments
    - Matériaux
  - Le bâtiment
    - Fenêtres, masses, isolation
    - Surfaces exposées, orientation, matériau
    - Écrans
    - Cheminées
    - Etc

# L'énergie solaire

- Le passif dans le bâtiment (Wiki)
  - Dans la conception de bâtiments solaires passifs, les **fenêtres**, les **murs** et les **sols** sont conçus pour **collecter**, **stocker**, **réfléchir** et **distribuer** l'énergie solaire sous forme de chaleur en hiver et **rejeter** la chaleur solaire en été.
  - C'est ce qu'on appelle la conception solaire passive car, contrairement aux systèmes de chauffage solaire actifs, elle n'implique pas l'utilisation de dispositifs **mécaniques** et **électriques**.

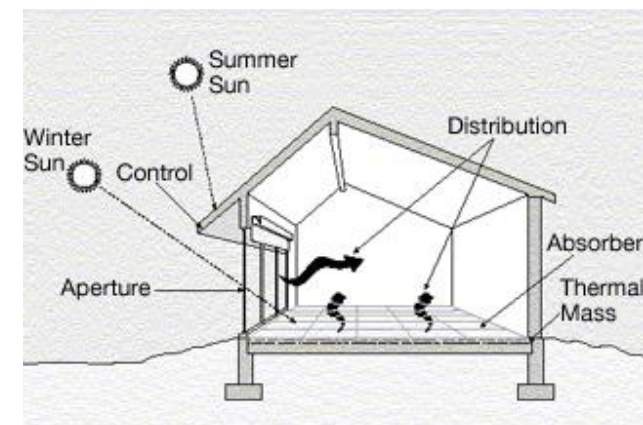
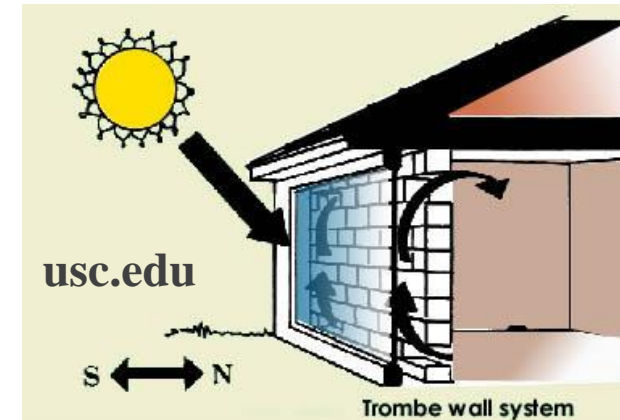


# L'énergie solaire

- Le passif dans le bâtiment (Wiki)
  - La clé pour concevoir un bâtiment solaire passif est de tirer le meilleur parti du climat local en effectuant **une analyse précise** du site.
  - Les éléments à prendre en compte comprennent l'**emplacement** et la taille des fenêtres, ainsi que le type de vitrage, l'isolation thermique, la masse thermique et l'ombrage.
  - Les techniques de conception solaire passive peuvent être appliquées plus facilement aux **nouveaux bâtiments**, mais les **bâtiments existants** peuvent être adaptés ou rénovés.

# L'énergie solaire

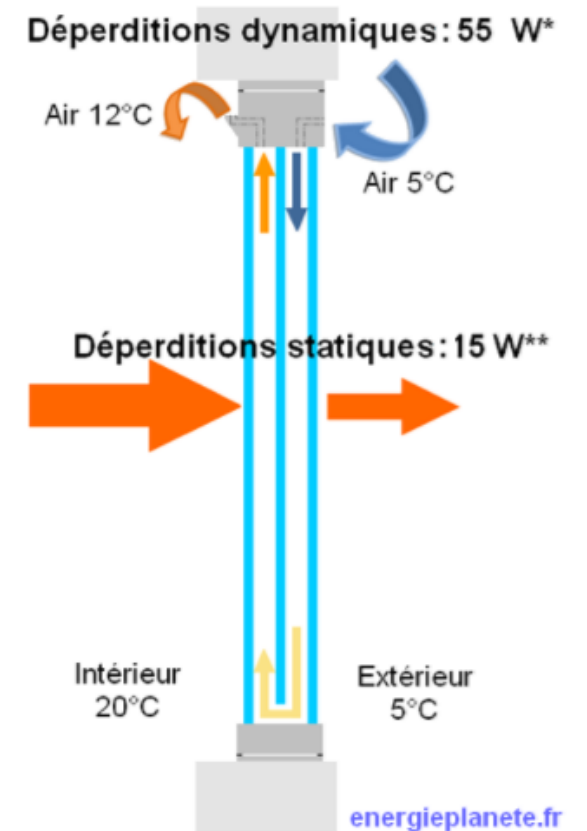
- Le passif dans le bâtiment
  - Mur Trombe
  - Orientation au Sud
  - Fenestration faible émissivité
  - Lumière naturelle (puits)
  - Toit vert
  - Cheminée solaire (ventilation)
  - Matériaux à changement de phase
  - Stockage sensible



Wikipedia.org

# L'énergie solaire

- Le passif dans le bâtiment
  - La récupération de l'énergie thermique par la fenestration
  - La fenêtre pariétodynamique utilise une partie de la chaleur qui la traverse (de l'intérieur vers l'extérieur, elle aurait donc été perdue) pour réchauffer l'air qui entre.



# L'énergie solaire

- Les avantages du bâtiment passif
  - Les maisons solaires passives à gain direct sont les plus faciles à mettre en œuvre.
  - L'approche de base est extrêmement simple : orientez-vous vers le sud, ajoutez des fenêtres, isolez et modifiez.
  - Les gains de confort et de réduction des coûts de chauffage sont immédiats.
  - Les conceptions ont un faible impact environnemental, surtout si les matériaux les plus verts sont utilisés.
  - Les exigences de gain direct s'intègrent bien dans une multitude de styles architecturaux.
  - Les maisons solaires passives sont généralement esthétiques.
  - Le vitrage solaire peut être placé à l'avant, sur les côtés ou à l'arrière de la maison, selon celui qui fait face au soleil.

# L'énergie solaire

- Les avantages du bâtiment passif
  - Les maisons solaires passives ont tendance à avoir des intérieurs clairs et aérés, lumineux et joyeux.
  - Les conceptions à gain direct reçoivent beaucoup de lumière du jour, réduisant les factures d'électricité et offrant un environnement de vie et de travail agréable.
  - Les maisons à gain direct avec des conceptions ouvertes peuvent être plus petites que les maisons traditionnelles.
  - Le vitrage solaire supplémentaire donne souvent des vues exceptionnelles sur la beauté naturelle.
  - L'infiltration d'air réduite dans les maisons solaires passives signifie qu'elles n'induisent pas de courants d'air.
  - Avec une masse thermique appropriée, les maisons solaires sont confortables et chaudes, maintenant des températures stables tout au long de l'année avec peu ou pas de chauffage supplémentaire.

# L'énergie solaire

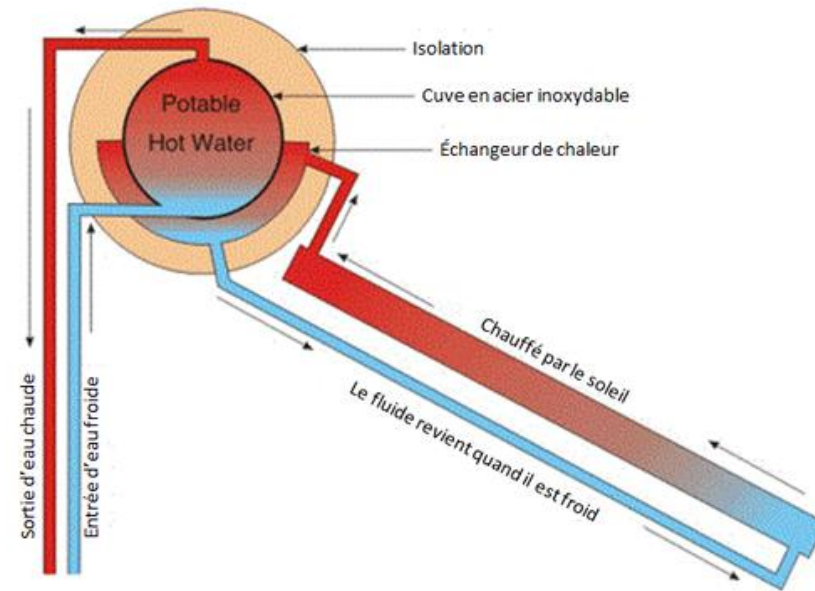
- Les inconvénients du bâtiment passif
  - Les conceptions de maisons solaires passives à gain direct sont les plus faciles à complètement rater.
  - L'approche de base cache beaucoup de complexités et beaucoup d'équilibrage minutieux - il y a beaucoup de choses qui peuvent mener à un échec, très facilement.
  - Le survitrage provoque une surchauffe de la maison.
  - Trop de vitrage solaire peut aussi rendre la maison très froide la nuit et par temps nuageux.
  - Une masse thermique trop faible provoque également une surchauffe de la maison.

# L'énergie solaire

- Les inconvénients du bâtiment passif
  - La lumière du jour supplémentaire peut causer de graves problèmes d'éblouissement à moins que l'on ne prenne soin de créer des zones sans soleil.
  - La lumière supplémentaire peut également provoquer la décoloration des meubles, bien que les progrès modernes en matière de protection UV réduisent l'effet.
  - La grande quantité de vitrage solaire peut entraîner des problèmes d'intimité à moins que les fenêtres ne soient soigneusement ombragées.
  - Le vitrage solaire peut se transformer en dissipateur thermique s'il n'est pas correctement isolé, ou si les volets isolés sont fastidieux à faire fonctionner chaque nuit.

# L'énergie solaire

- Collecteur solaire hydronique ou chauffe-eau solaire passif
  - Système à thermosiphon





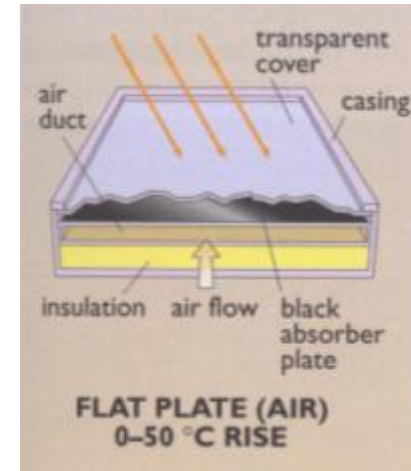
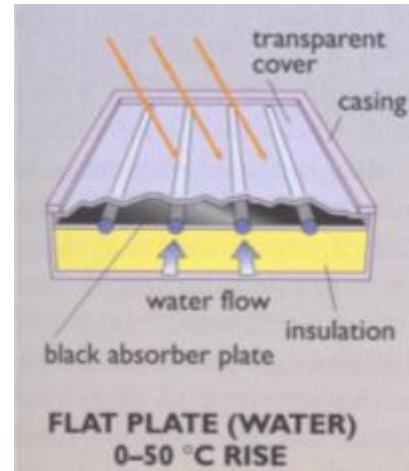
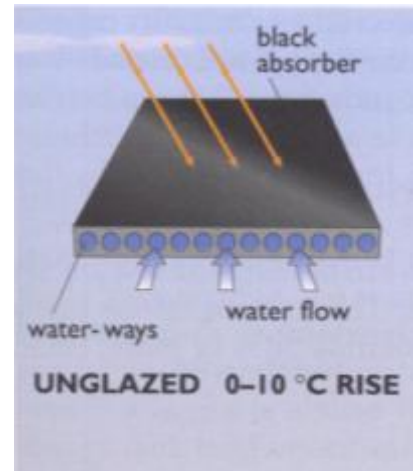
# L'énergie solaire

- Le passif
  - La récupération de l'énergie thermique par des murs d'habitation récupérateurs;
    - Récupération active
    - Récupération passive
      - Sensible
      - Latente



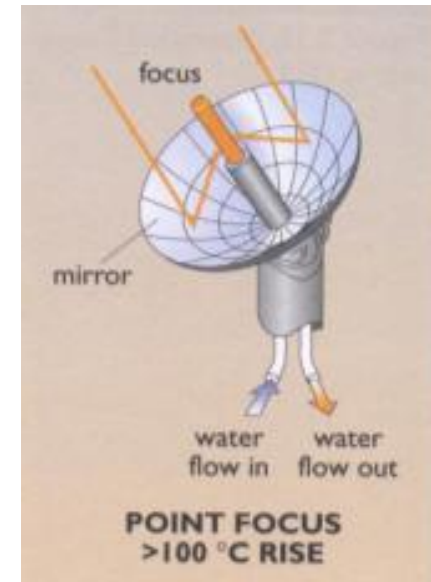
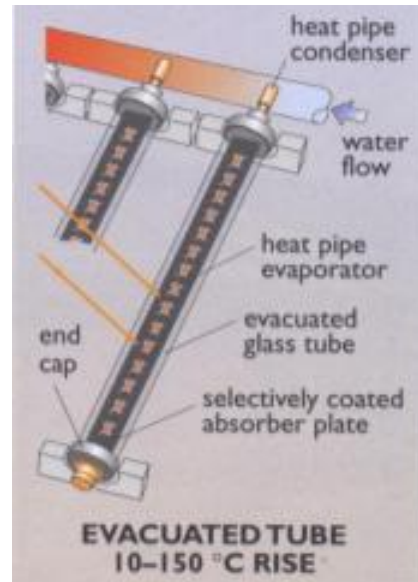
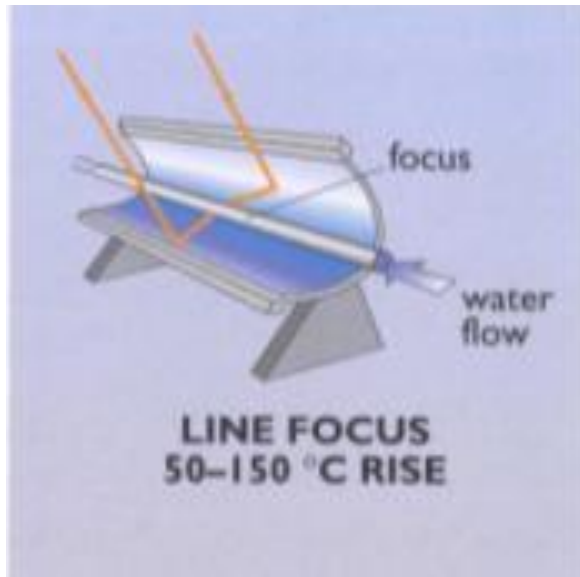
# L'énergie solaire

- Le thermique actif
  - Les capteurs plats



# L'énergie solaire

- Le thermique actif
  - Les capteurs avec concentrateurs



**Les collecteurs à tubes sous vide sont parfois dotés de concentrateurs, parfois non. Mais la plaque réfléchissante sous les tubes récupère l'énergie qui passe entre les tubes.**

# L'énergie solaire

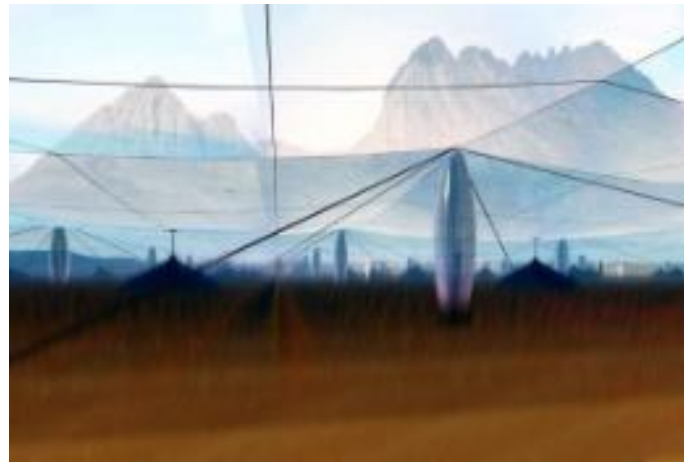
- Les tours solaires thermiques
  - Produisent de l'électricité sans passer par un caloporteur qui change de phase, et sans turbine à vapeur.



Manzanares, Espagne, 1981-89, 194 m, 50kW

# L'énergie solaire

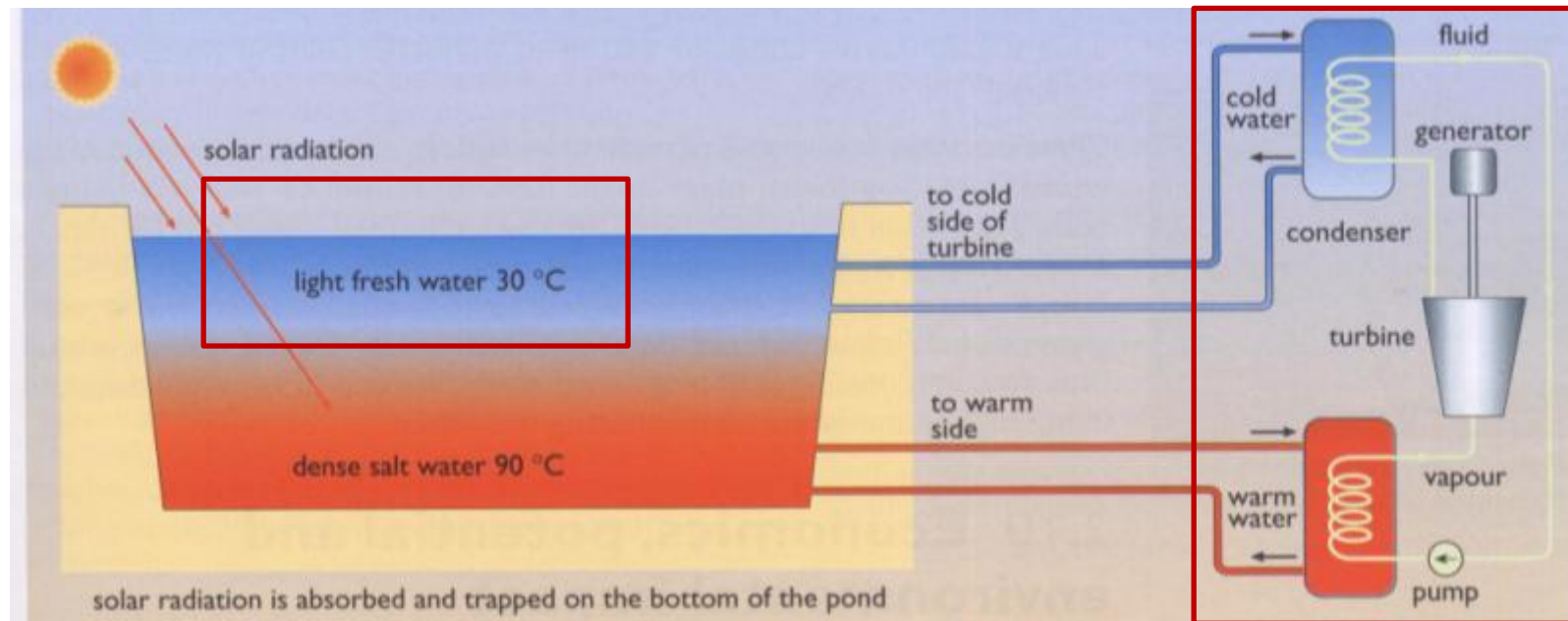
- Les montagnes solaires thermiques
  - La montagne solaire est un système de production d'électricité dérivé du concept de tour solaire, développé par le bureau d'étude Elioth.



Projet Elioth, 2005 (eliOTH.com)

# L'énergie solaire

- Les étangs solaires : principe de fonctionnement

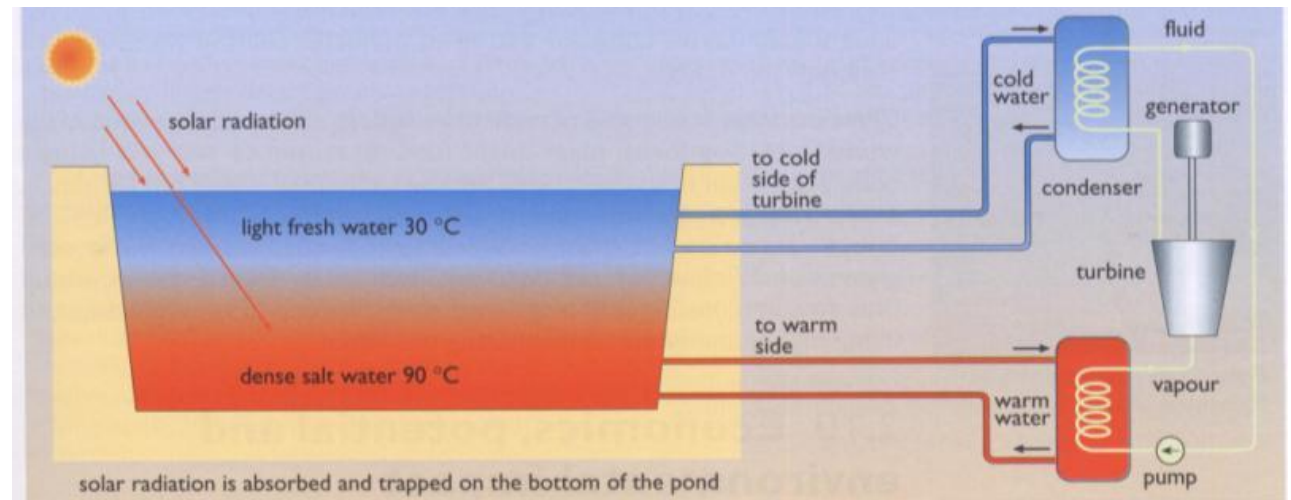


# L'énergie solaire



ENR2020

- Les étangs solaires : quel est votre estimé du rendement total d'un tel système de production électrique?
  - A. 1%
  - B. 5%
  - C. 10%
  - D. 20%
  - E. 33%
  - F. Plus de 33%



# L'énergie solaire

- Les étangs solaires

- Quel est le rendement maximal théorique d'un étang solaire pour lequel  $T_h = 90^\circ\text{C}$  et  $T_c = 30^\circ\text{C}$ ?
- Quel est d'après vous le rendement réel d'une telle installation? ;
- Et si ce rendement est bas, qu'est-ce qui justifie son implantation?

**Rendement maximal théorique d'un cycle de Carnot**

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$



# L'énergie solaire

- Les étangs solaires : exemples



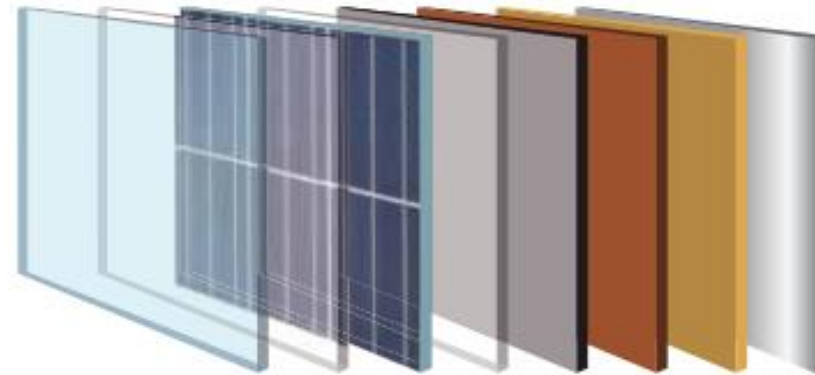
# L'énergie solaire

- Étang solaire en Israël (1955-1988, 5MW, 21ha) **2%** de rendement



# L'énergie solaire

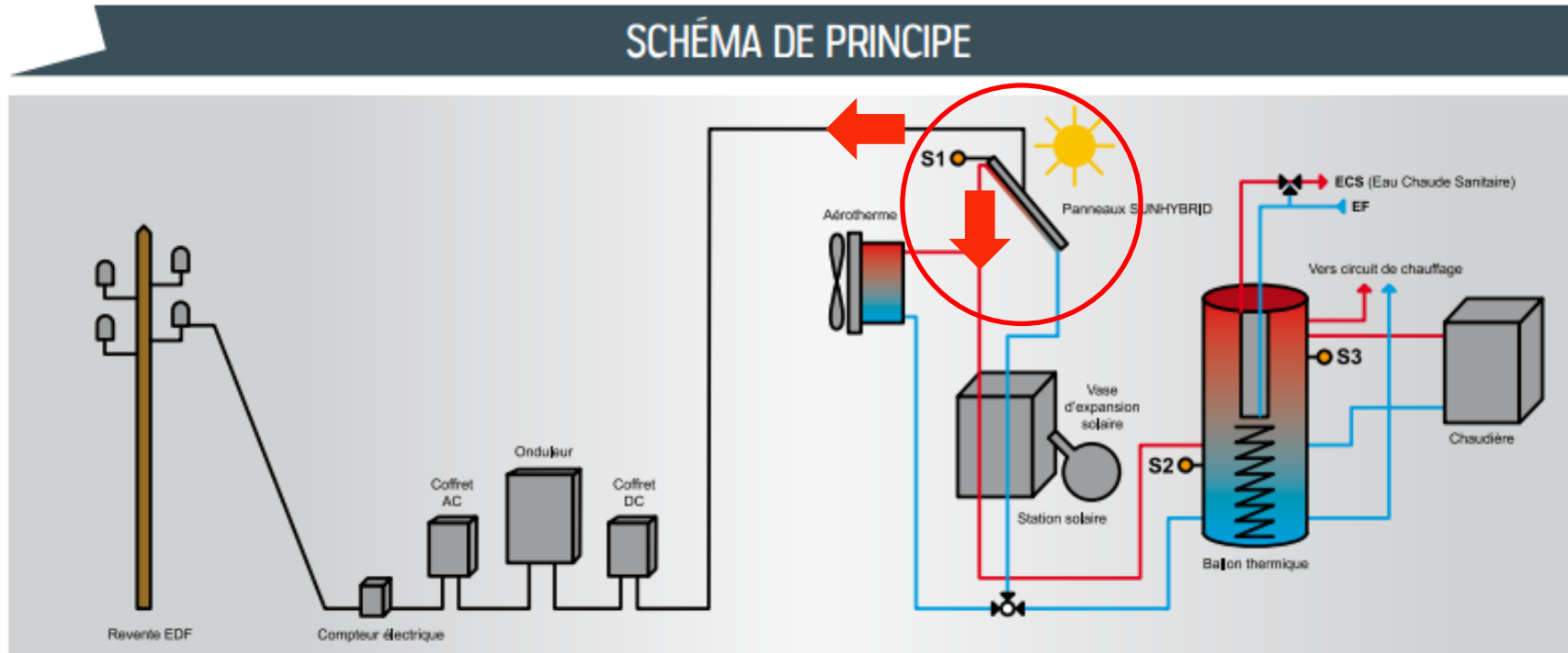
- Le PV-T (photovoltaïque – thermique)



1. Verre trempé qualité solaire
2. EVA
3. Cellules
4. EVA
5. Backsheet
6. Absorbeur + collecteur cuivre
7. Laine de roche
8. PSE + Aluminium

# L'énergie solaire

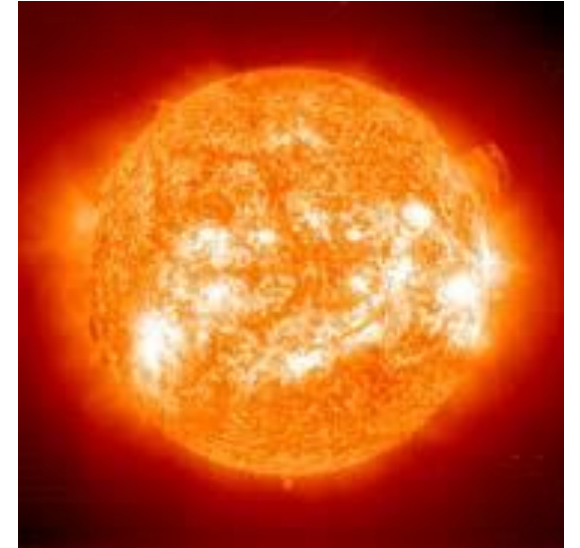
- Le PV-T



Modules PV/T SUNHYBRID

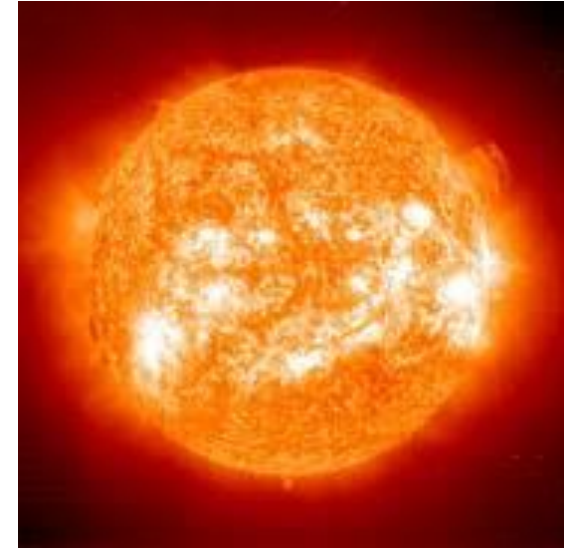
# L'énergie solaire

- Les défis de l'heure en thermique
  - Le stockage d'énergie solaire
  - Les ensembles complets standardisés
  - La concentration d'énergie



# L'énergie solaire

- Les autres capsules de formation en solaire
  - Histoire de l'énergie solaire
  - Soleil et rayonnement solaire
  - Énergie solaire disponible
  - Collecteurs PV
  - Collecteurs thermiques aérauliques
  - Collecteurs thermiques hydroniques
  - Collecteurs thermiques thermodynamiques
  - Convertisseurs résidentiels dans M4 - Vecteurs d'énergie



**A venir, le bâtiment solaire... dans M19 – Énergie et bâtiments**



**Merci de votre attention !**

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

## Période de questions

