

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



QUESTIONS DE PHYSIQUE AUTOUR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE



© P.Avavian/CEA



© C.Dupont/CEA

Introduction : Définition de l'énergie solaire

I / Solaire Thermique

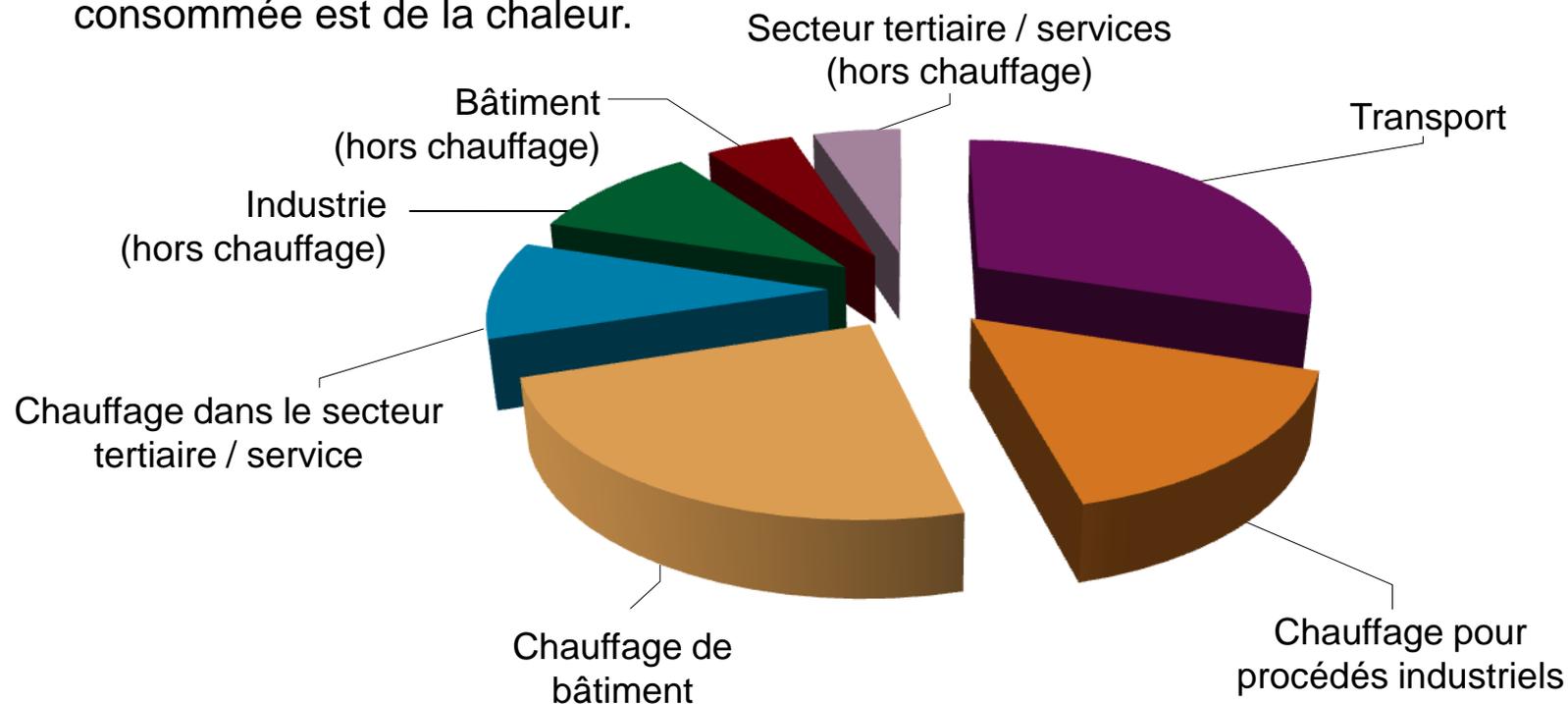
II / Solaire Thermodynamique

III / Solaire Photovoltaïque

Synthèse des 3 filières et de leurs applications

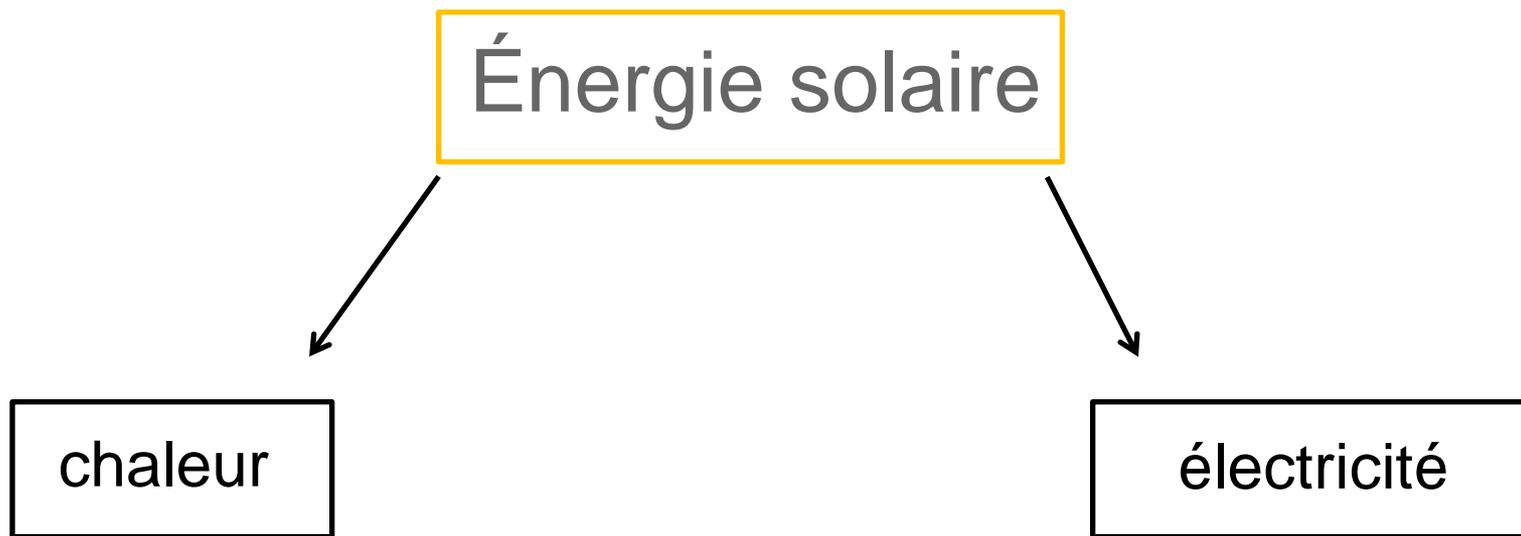
Les formes d'énergies et leur consommation par secteur en France (moyenne)

- L'énergie est consommée sous différentes formes : électricité, mais aussi chaleur ou combustibles (carburant, gaz...).
- Il ne faut pas confondre « énergie » et « électricité » : la moitié de l'énergie consommée est de la chaleur.

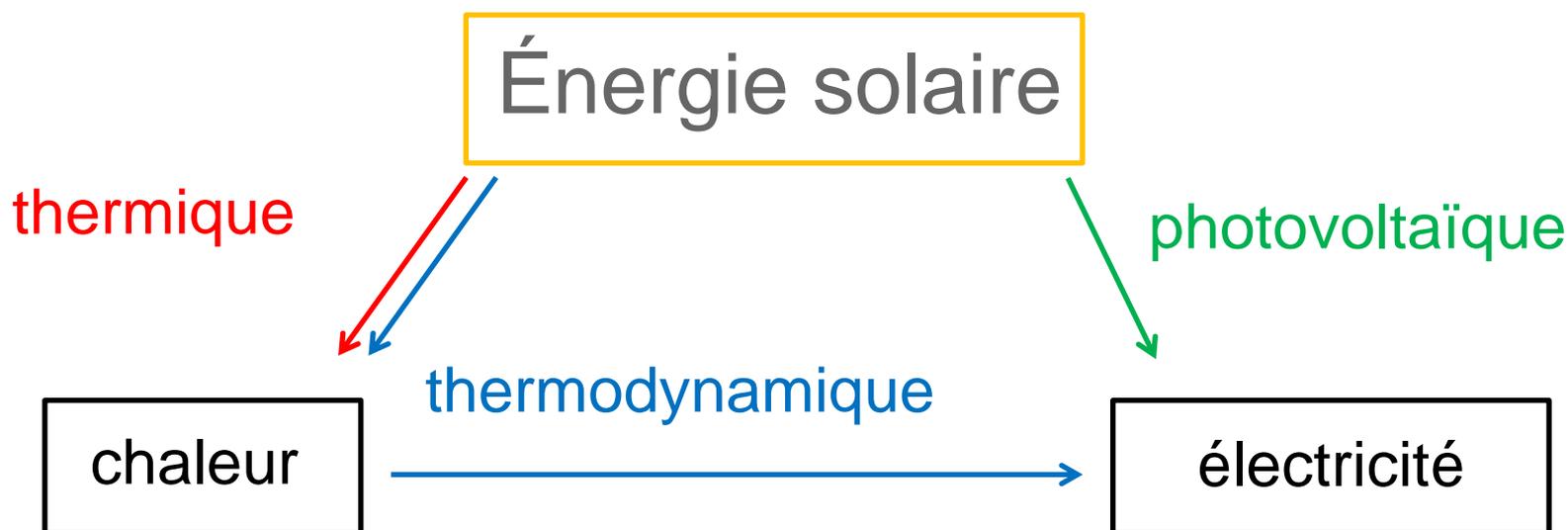


INTRODUCTION : L'ÉNERGIE SOLAIRE

- Les technologies actuelles permettent de convertir l'énergie solaire sous deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité.

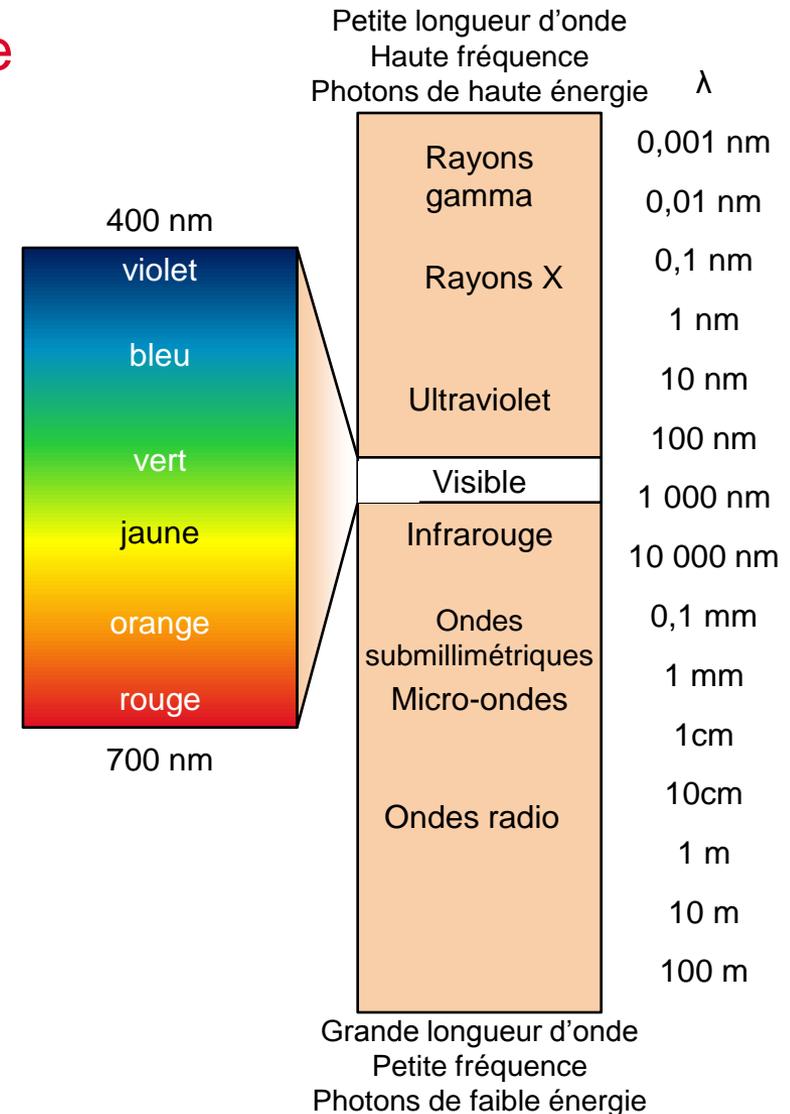


- Selon les besoins énergétiques et les conditions présentes, trois filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles.



Principes physiques : la lumière

- Le soleil émet des rayonnements principalement dans la partie « visible » du spectre (lumière, entre 400 et 700 nm).
Plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est grande.
- Cette énergie peut se transmettre sous forme de chaleur : l'énergie va exciter les atomes composant la matière, qui vont s'agiter et s'échauffer.
- Exposés aux rayons du soleil, les capteurs vont convertir l'énergie des photons, soit en énergie thermique, soit en énergie électrique.



Le rayonnement sur Terre

- Le rayonnement solaire qui parvient sur Terre en un an représente plus de 5 000 fois la consommation mondiale d'énergie, toutes formes et usages confondus. La durée de vie du Soleil est estimée à 5 milliards d'années, ce qui en fait une énergie durable.
- Près de 60% de l'énergie lumineuse arrivant vers la Terre atteint la surface du globe, qui en réfléchit une partie. Environ la moitié est absorbée par les continents et les océans.
- En moyenne, on peut estimer recevoir 1 000 Watts/h/m², à midi dans le sud de la France (équivalent de l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'une cafetière).

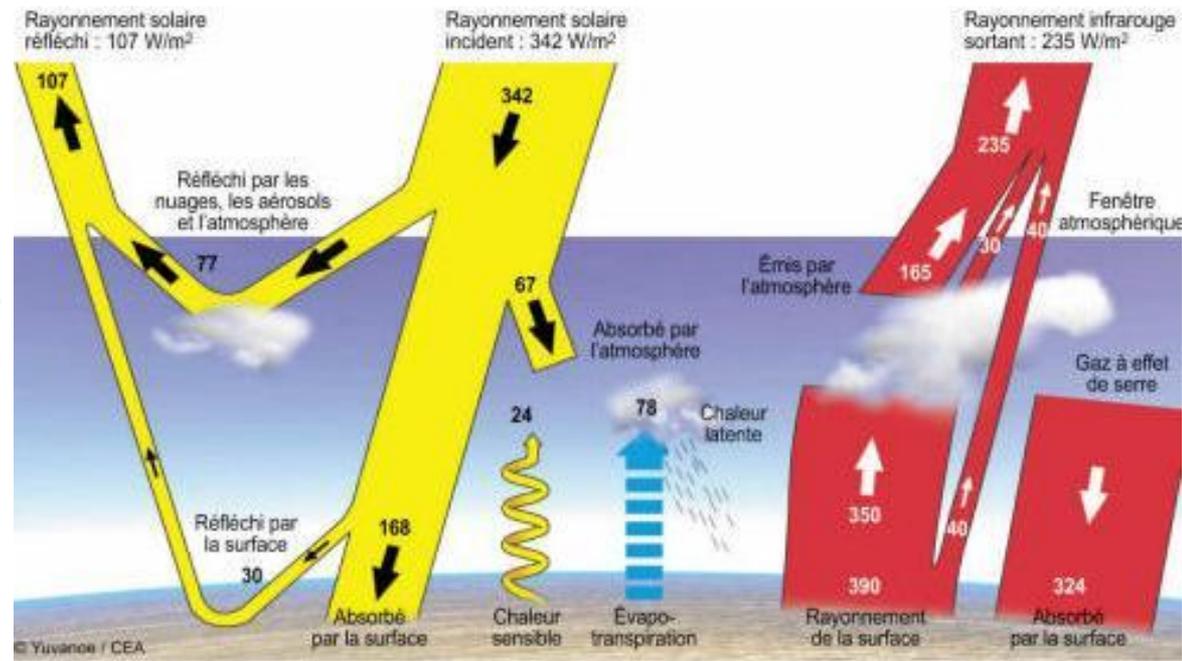
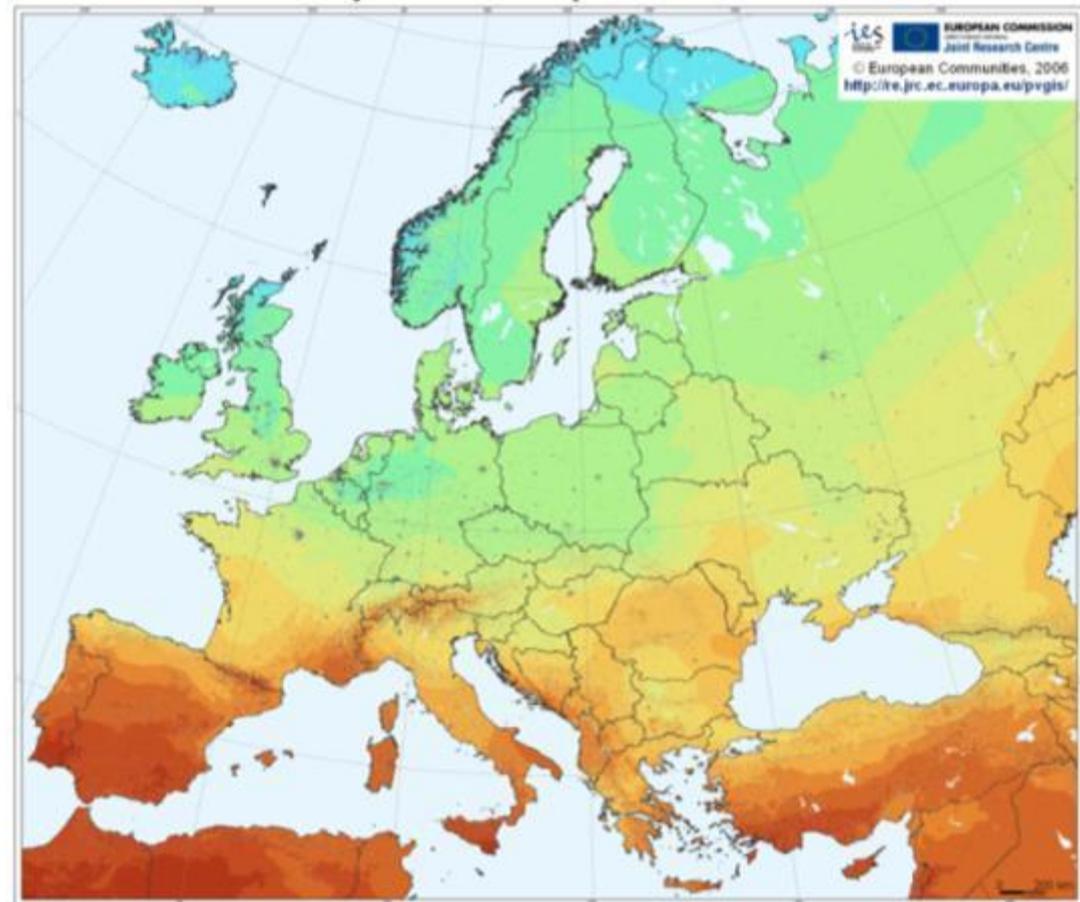


Schéma : Le rayonnement solaire atteignant la Terre (© Yuvanoel/ CEA)

Le « gisement solaire »

- Le rayonnement solaire n'est pas uniformément réparti sur la surface de la Terre.
- Le soleil est disponible partout, certaines régions étant plus propices à l'exploitation de son énergie, notamment selon la latitude à laquelle on se situe. En moyenne, n'importe quelle région de la Terre reçoit 6 mois d'ensoleillement, quelque soit la latitude.
- En Europe, l'ensoleillement peut varier d'un facteur 2, c'est-à-dire que la région la plus ensoleillée l'est 2 fois plus que la région la moins ensoleillée.



Ensoleillement global en kW/h/m²

<600 1000 1400 1800 2200>

Carte : L'ensoleillement annuel moyen en Europe. (PVGIS © European Communities, 2001 – 2008)

Le « gisement solaire » : variations dans le temps

- En plus d'une variabilité géographique, l'énergie solaire disponible varie dans le temps.
- **Variation saisonnière** : l'ensoleillement varie tout au long de l'année, au fil des saisons.
- **Variation journalière** : l'ensoleillement varie dans la journée, en fonction de l'heure (matin, midi, soir) et du climat (passage nuageux etc.).

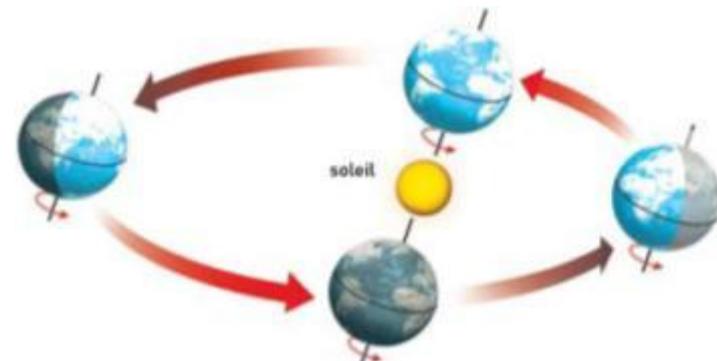


Schéma : Variation saisonnière de l'ensoleillement (© CEA)

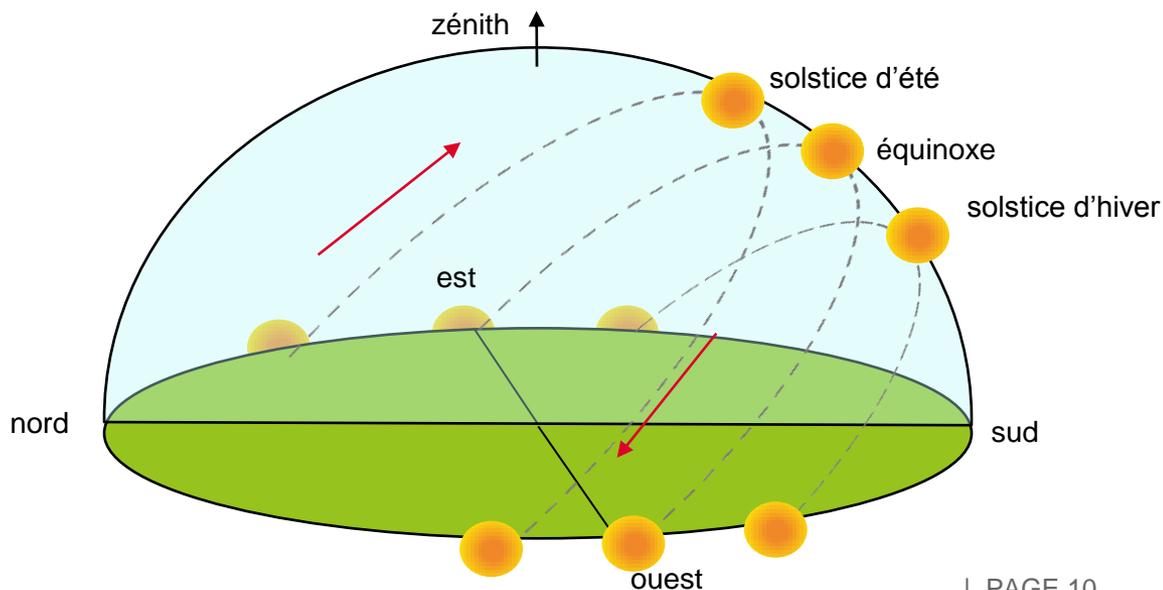


Schéma : Variation de l'ensoleillement au cours du temps (© CEA)

➔ Notion d'adéquation entre le besoin énergétique et la disponibilité de la ressource

I / SOLAIRE THERMIQUE : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

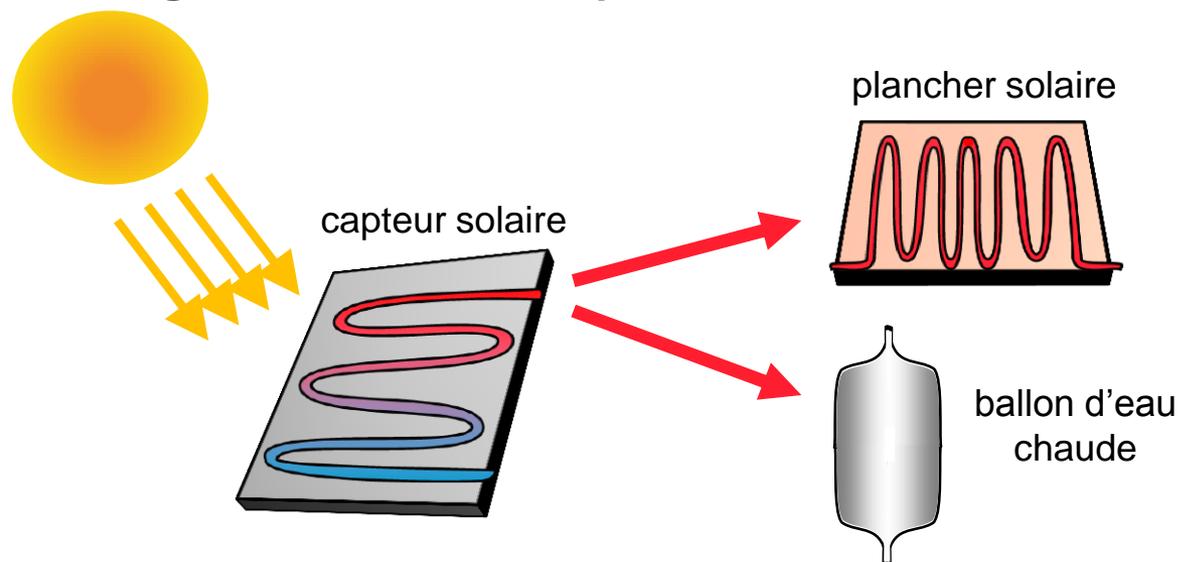
Rappels

- Rayons solaires = flux de photons
- Photons = particules énergétiques de la lumière
- Chaleur = énergie thermique liée à l'agitation des particules constitutives de la matière (atomes)
- **Chaleur solaire**
Les photons excitent des atomes en leur transmettant une part de leur énergie. Face à ce gain d'énergie, les atomes s'agitent et s'échauffent.

photons → agitation d'atomes → chaleur

Utiliser l'énergie solaire pour produire de la chaleur

- Cette chaleur va servir à augmenter la température d'un fluide caloporteur qui pourra être utilisé pour :
 - le chauffage d'un bâtiment,
 - la production d'eau chaude.
- **Principe de la chaîne de conversion / utilisation de l'énergie solaire : la technologie du solaire thermique**



Éléments constituant la chaîne de conversion : les capteurs

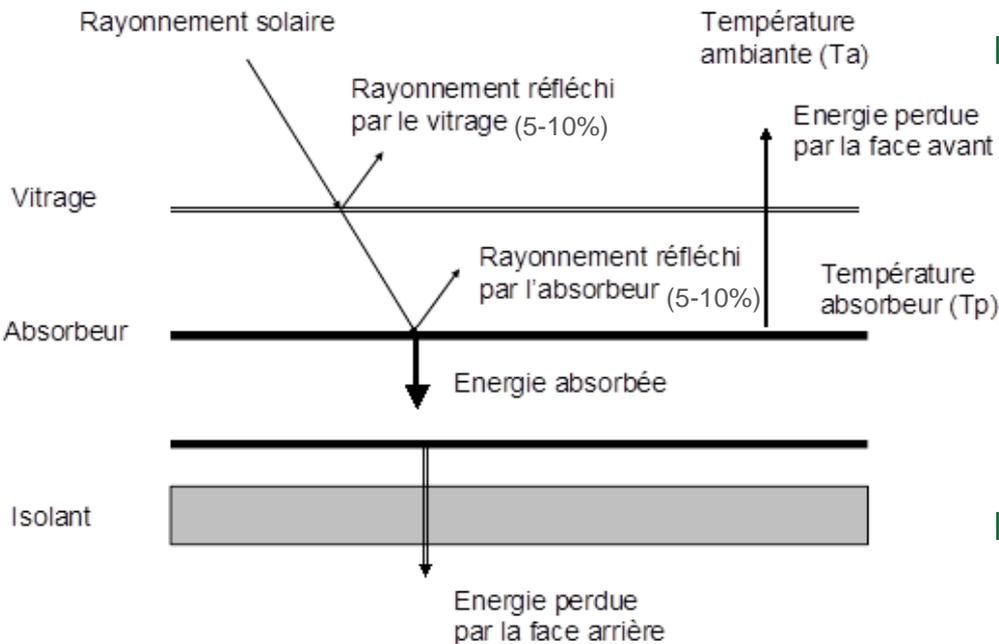


Schéma : Principe des capteurs thermiques (© CEA)

■ Rôles :

- Capter l'énergie solaire au travers d'une surface absorbante
- Transférer l'énergie dans un fluide
- Limiter les pertes thermiques

- Rendement moyen des technologies actuelles de capteurs : environ 60-70% de l'énergie reçue est transformée en chaleur.

- Plusieurs types de capteurs existent (plans, sans vitrage, à tubes sous vide). Leur utilisation dépendra de la quantité de chaleur qu'on souhaite produire, le type d'installation qu'ils doivent intégrer (centrales, maisons...), et la région dans laquelle on se trouve.

Les différentes technologies de capteurs existantes

- **Capteurs solaires sans vitrage** : les plus simples, qui atteignent les niveaux de températures les moins élevés, utilisés principalement pour le chauffage des piscines. Le chauffage des piscines est l'une des premières utilisations faites du solaire thermique dans certains pays.
- **Capteurs solaires plans** : ils sont composés d'un vitrage qui laisse traverser le rayonnement solaire, d'un absorbeur en cuivre ou aluminium, d'un collecteur constitué de tubes en cuivre dans lequel circule le fluide. Le tout est isolé thermiquement en face arrière. Ils sont principalement destinés à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage.
- **Capteurs solaires à tubes sous vide** : composés d'un ou plusieurs tubes en verre dans lesquels un vide est créé afin de limiter les pertes thermiques.



Photo : Panneau solaire pour le chauffage de piscine (© Giordano)



Photo : Capteurs solaires à tubes sous vide (© Viessmann)

Éléments constituant la chaîne de conversion : Le fluide caloporteur

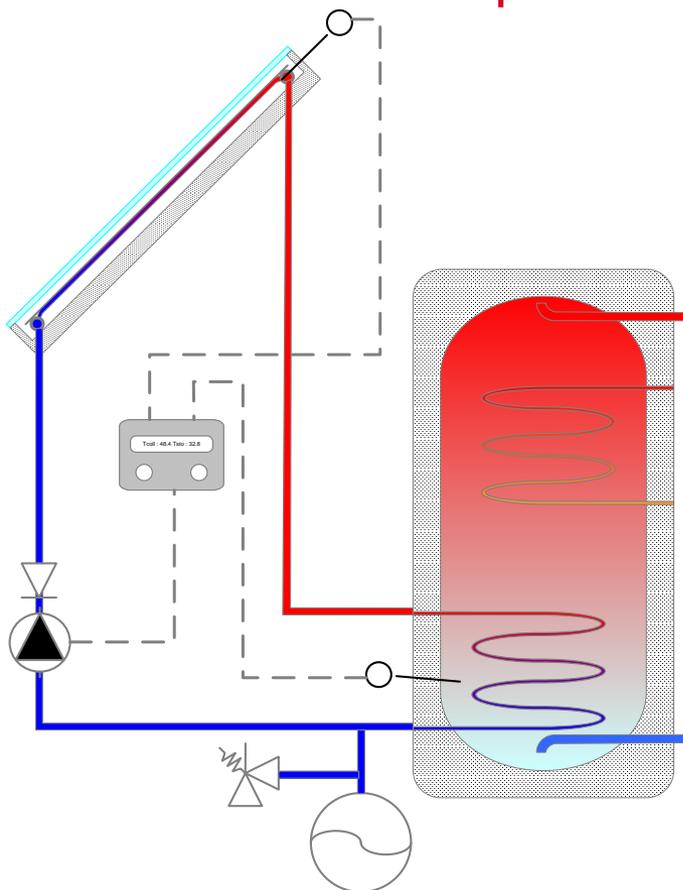


Schéma : Circuit du fluide caloporteur dans un système thermique
(© CEA)

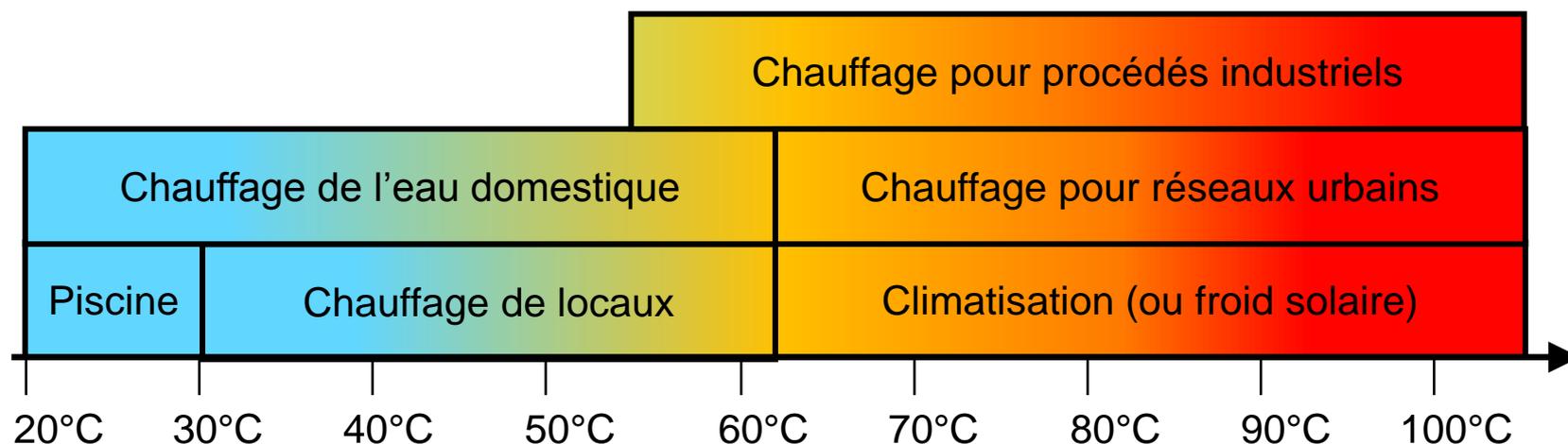
- Ce fluide va circuler dans les capteurs et récupérer l'énergie thermique collectée.
- Généralement, l'eau ou un fluide antigel sont utilisés. Dans certaines applications, l'air peut également être employé en tant que fluide caloporteur.
- Le fluide circule ensuite dans un réseau, acheminant la chaleur pour pouvoir l'utiliser ou la stocker.

Rappel :
fluide = matière déformable
(gaz, liquide...) ; ici, il s'agit
généralement de liquide.

I / SOLAIRE THERMIQUE : LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES

Différentes utilisations de la chaleur solaire

- La chaleur solaire a été captée, acheminée, et peut désormais être utilisée. Il existe 3 utilisations générales de l'énergie thermique, chaque utilisation nécessitant une gamme de température à atteindre :
 - **Utilisation 1 : Chauffage de l'eau sanitaire**
 - **Utilisation 2 : Chauffage de bâtiment**
 - **Utilisation 3 : Climatisation intérieure, ou « froid solaire »**



Utilisation 1 : Chauffage de l'eau sanitaire

■ Exemple : Le chauffe-eau solaire monobloc

Les capteurs sont dissociés du système de stockage. La circulation est naturelle : la différence de température suffit à la circulation du fluide (thermosiphon). Cette technologie est particulièrement adaptée aux climats peu froids.



Photo : chauffe-eau solaire monobloc
(© Giordano/Solaire Azur)

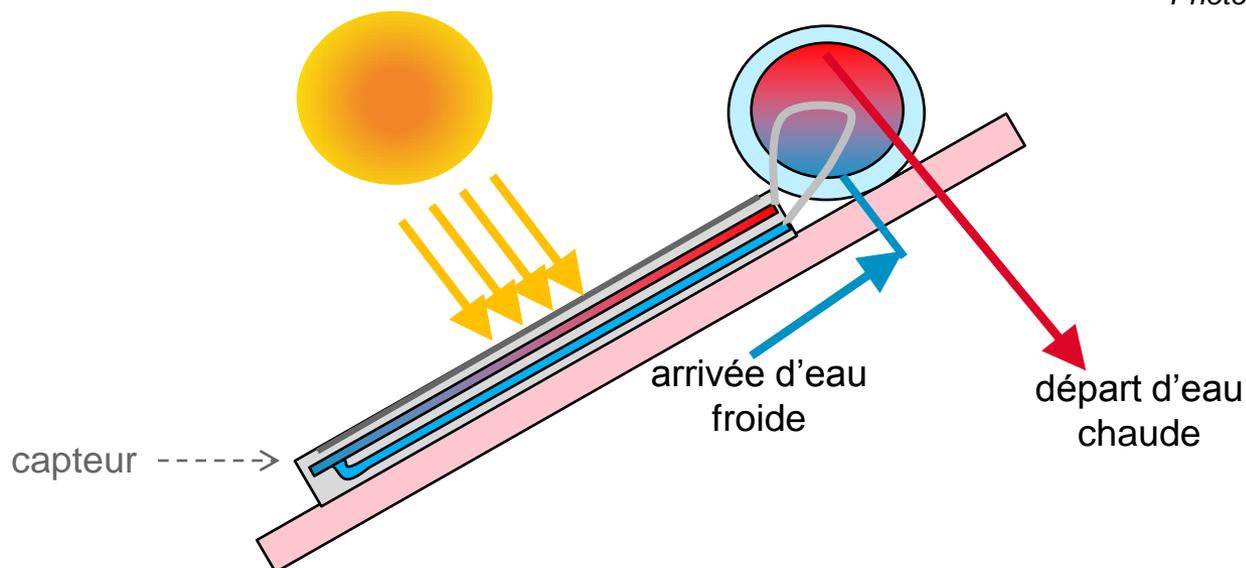


Schéma : Principe du chauffe-eau solaire monobloc (© CEA)

Utilisation 1 : Chauffage de l'eau sanitaire

- **Chauffe-eau à éléments séparés** : Les capteurs se situent toujours en toiture, mais cette fois-ci, l'élément de stockage est dissocié et placé à l'intérieur du bâtiment. Cette technologie est nécessaire lorsqu'il y a un risque de gel : un antigel est souvent ajouté au fluide caloporteur, et le ballon est placé à l'intérieur de l'habitat. La circulation de l'eau est alors forcée par un circulateur et un régulateur. L'installation peut être déclinée avec plusieurs éléments de stockage pour les installations collectives, ou un stockage centralisé.

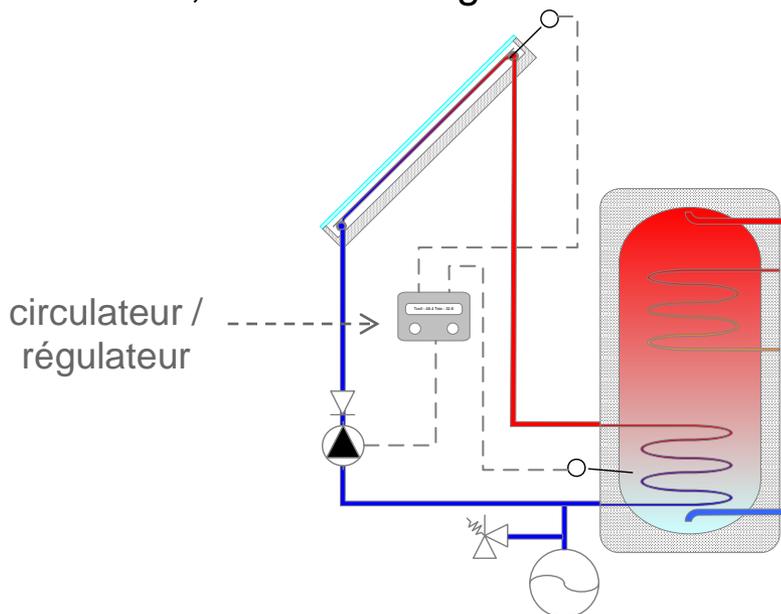


Schéma : Principe du chauffe-eau solaire à éléments séparés (© CEA)

Utilisation 2 : Le chauffage de bâtiment

La chaleur collectée, portée par le fluide caloporteur, va circuler à travers le bâtiment et diffuser peu à peu sa chaleur.

- **Le plancher solaire direct (PSD)** : Un réseau de tuyaux parcourt le plancher et diffuse peu à peu la chaleur dans le bâtiment. Le réseau de distribution peut aussi être relié à une chaudière. Le fluide caloporteur peut alors être stocké.

- **L'hydroaccumulation** : l'énergie solaire est stockée au fur et à mesure qu'elle arrive dans un ballon de stockage (de 0.5 à 1 m³), et peut être utilisée pour le chauffage de l'eau ou le chauffage domestique.

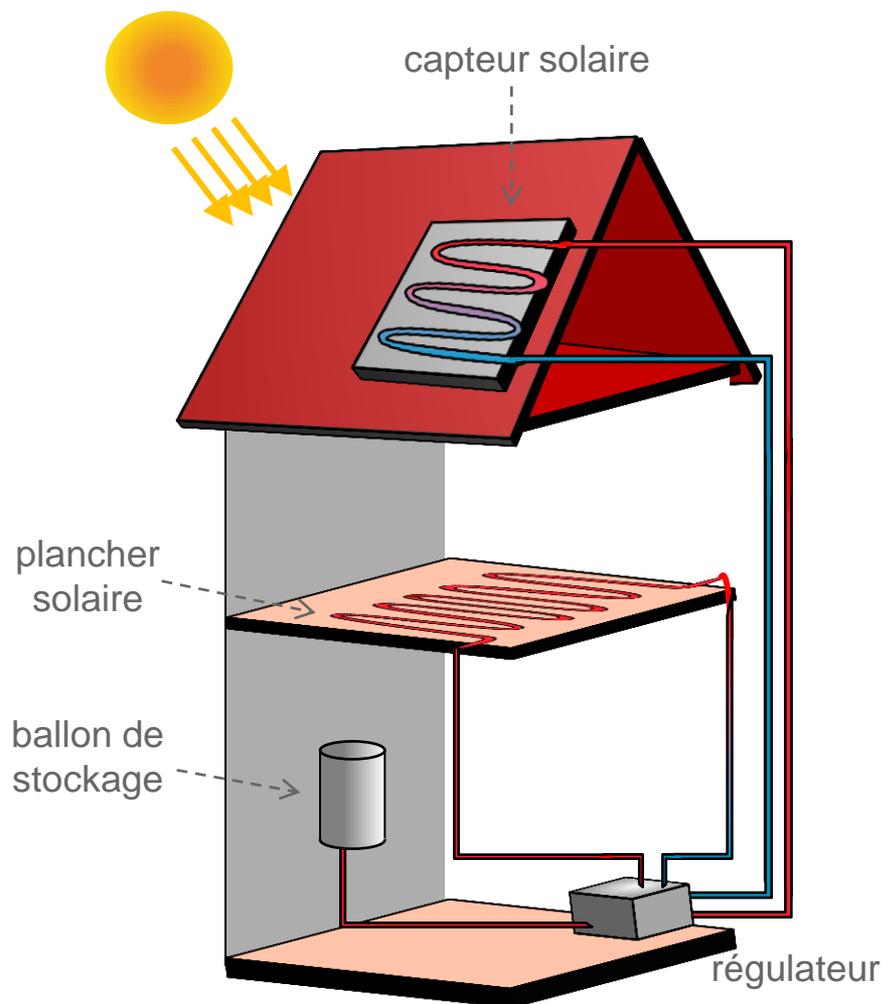


Schéma : Principe du chauffage de bâtiment par plancher solaire direct (PSD) ou hydroaccumulation (© CEA)

Utilisation 3 : La climatisation, ou « froid solaire »

La chaleur peut être utilisée indirectement pour produire du froid. On parle alors de « froid solaire ». La chaleur produite par les capteurs sert à entraîner une pompe thermique.

Notions générales :

- Pour s'évaporer, un fluide absorbe de la chaleur.

→ **refroidissement de la source**

- L'évaporation est produite par détente d'un fluide.

→ **cycle frigorifique : compression-détente**

- Apport d'énergie mécanique (cycle à compression) ou thermique (cycle à absorption)

Utilisation 3 : La climatisation, ou « froid solaire »

Dans un système de froid solaire : l'apport d'énergie est réalisé sous forme de chaleur par les capteurs solaires et la compression est assurée par une pompe thermique.

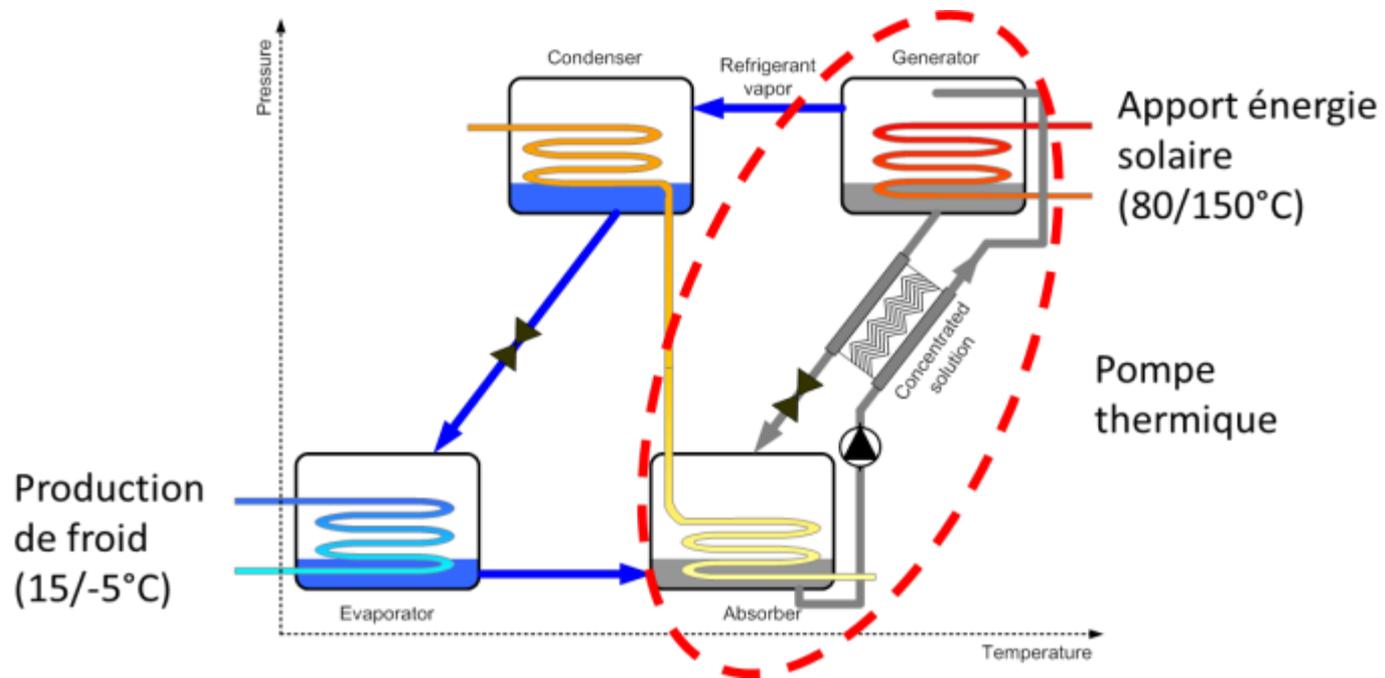
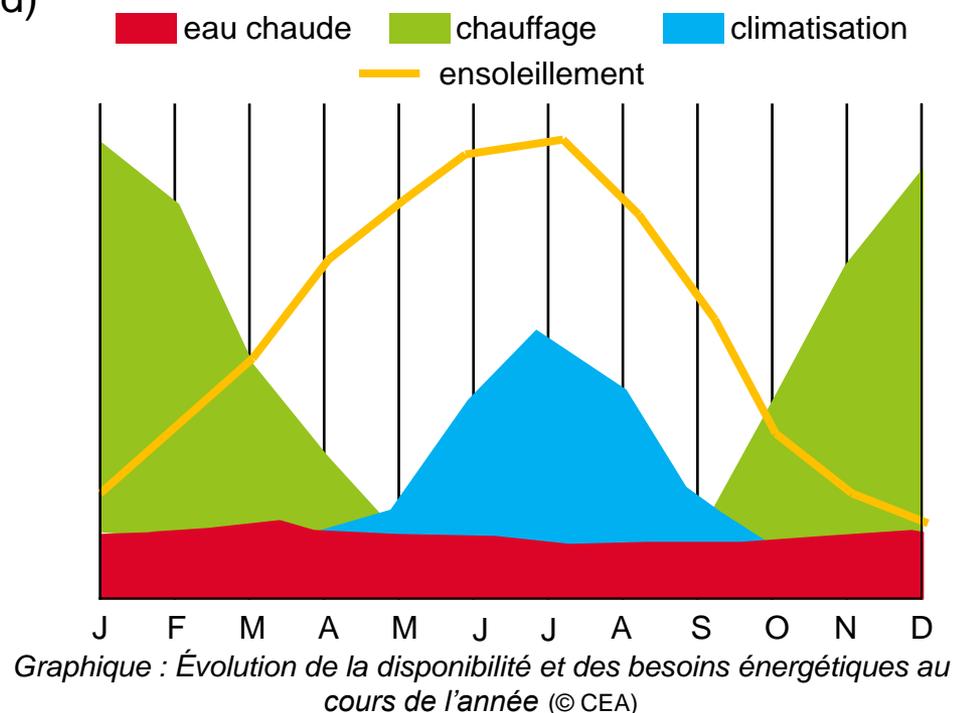


Schéma : Principe du froid solaire (© CEA)

Utilisation 3 : La climatisation, ou « froid solaire »

Principaux avantages :

- Cette technologie procure une climatisation sans émettre de CO₂.
- Adéquation entre disponibilité de l'énergie (ensoleillement) et besoins énergétiques (par temps chaud)



I / SOLAIRE THERMIQUE : LES ENJEUX

Trois défis principaux à relever

Pour favoriser le recours au solaire thermique, les chercheurs développent les technologies selon 3 axes :

- **Augmentation des performances**

exemple : développer des traitements de surface pour les capteurs

- **Réduction des coûts**

exemple : développer des installations urbaines plutôt que seulement domestiques
(mutualisation d'équipements)

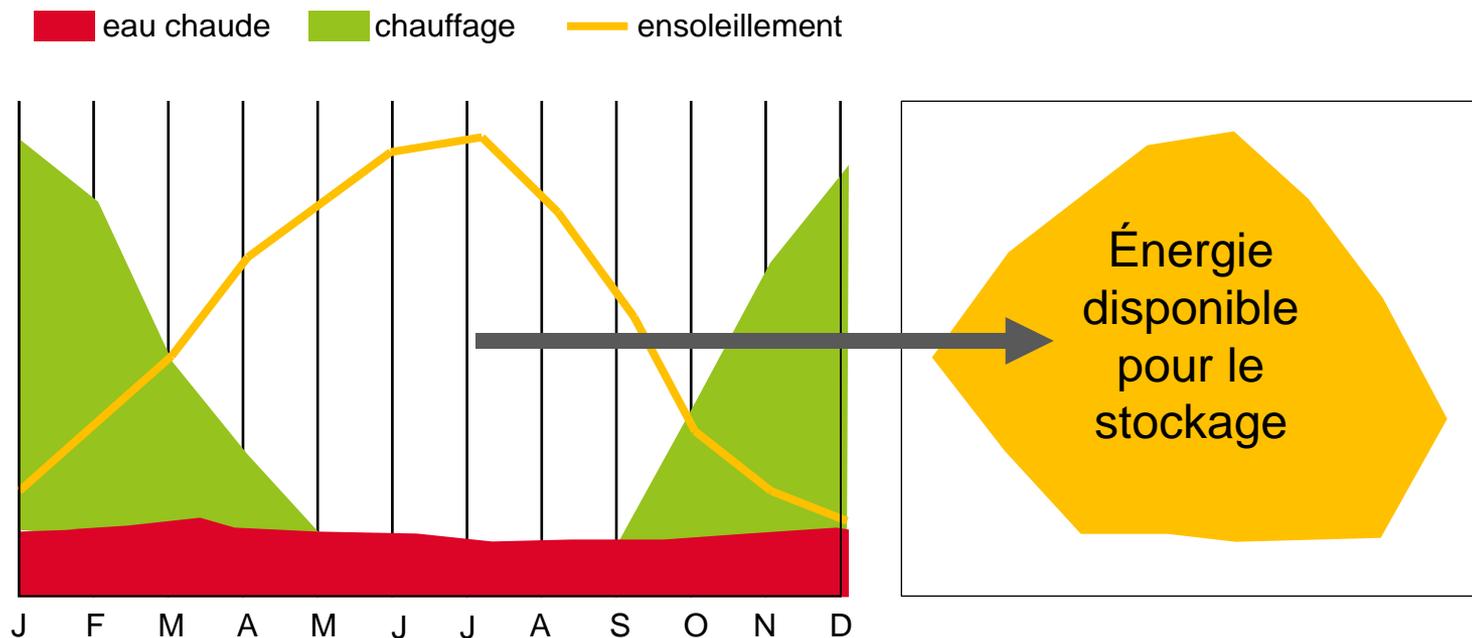
- **Intégration de nouvelles fonctions**

exemple : développer des capteurs pouvant également servir d'isolants pour le bâtiment

L'enjeu de l'adéquation ressource énergétique / besoins

Plus largement, les technologies exploitant le solaire doivent faire face à **l'intermittence** de leur source énergétique.

(cf variation saisonnière / journalière de l'ensoleillement)



Graphique : Enjeu de l'adéquation entre disponibilité du gisement solaire et besoins énergétiques (© CEA)

L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE : ENJEUX

L'enjeu de l'adéquation ressource énergétique / besoins : Le stockage

- Stockage = déphasage entre la ressource et les besoins énergétiques
Objectif : stocker la chaleur excédentaire en été pour la restituer en hiver par exemple.
- **Le stockage thermochimique** : l'énergie thermique n'est pas stockée sous forme de chaleur, mais grâce à une réaction chimique (réaction endo/exothermique réversible).

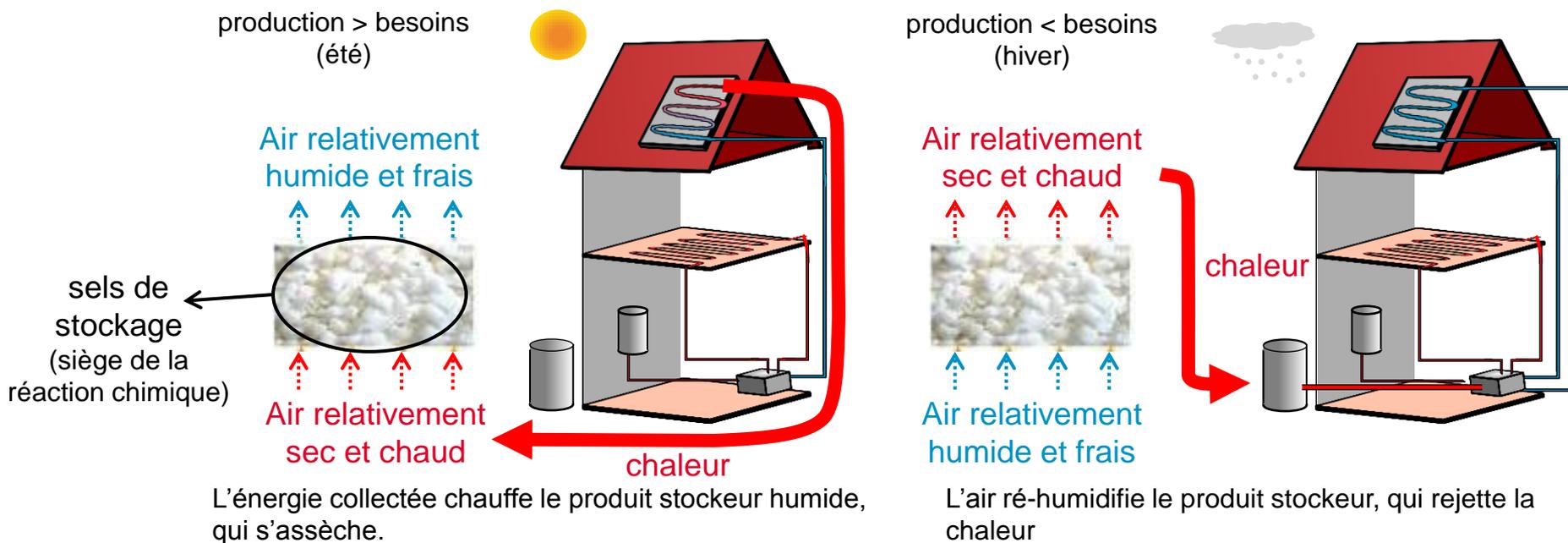
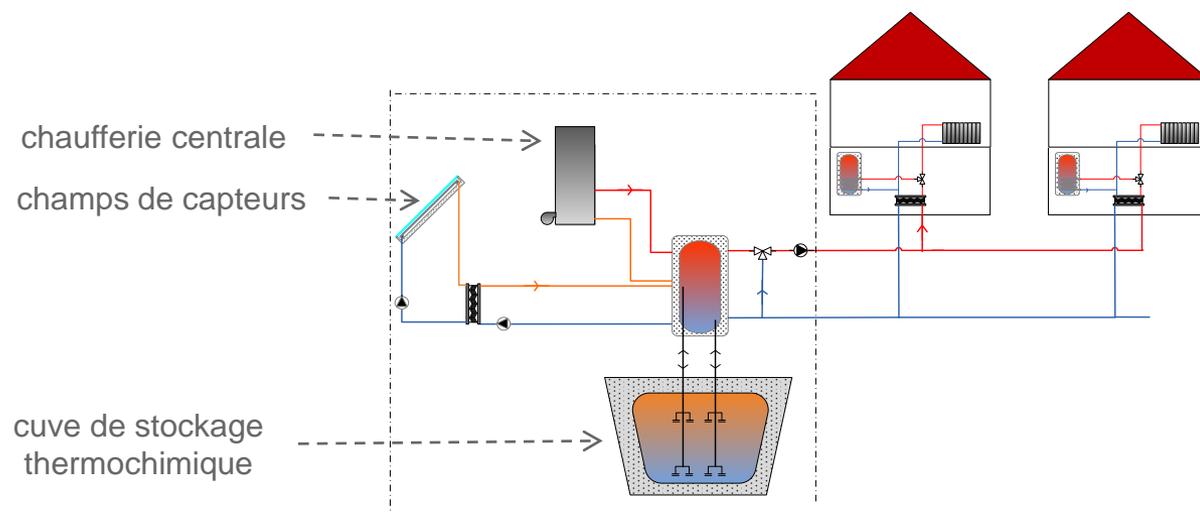


Schéma : Principe du stockage thermochimique (© CEA)

Exemple de recherches sur l'intégration des systèmes thermiques : les réseaux de chaleur

- Mettre en réseau des installations permet de réduire les coûts. En imaginant des applications du solaire thermique à grande échelle (de l'échelle de la maison à celle du quartier ou d'une ville par exemple), il est possible d'augmenter l'intérêt économique de cette filière énergétique.
- Cet effet de taille trouverait également son intérêt au fil du temps, pour l'entretien et l'amélioration des réseaux au fur et à mesure des avancées technologiques.

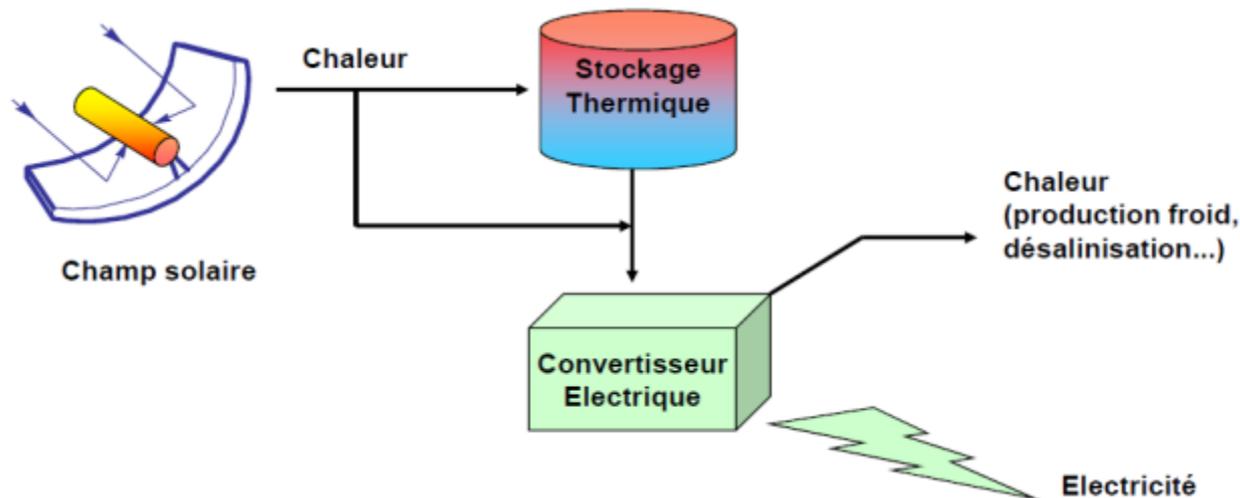


- Ce type de réseaux représente environ 5 % des équipements en France (25% à Paris).

II / SOLAIRE THERMODYNAMIQUE : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Utiliser l'énergie solaire pour produire de la chaleur, *PUIS* de l'électricité

- La chaleur produite va être convertie en énergie mécanique pour produire de l'électricité. (à noter : température beaucoup plus élevée que dans les systèmes thermiques - entre 100 et 1 500 °C, contre 20 à 100°C pour le thermique)
- Principe de la chaîne de conversion / utilisation de l'énergie solaire : la technologie du solaire thermodynamique



Utiliser l'énergie solaire pour produire de la chaleur, *PUIS* de l'électricité

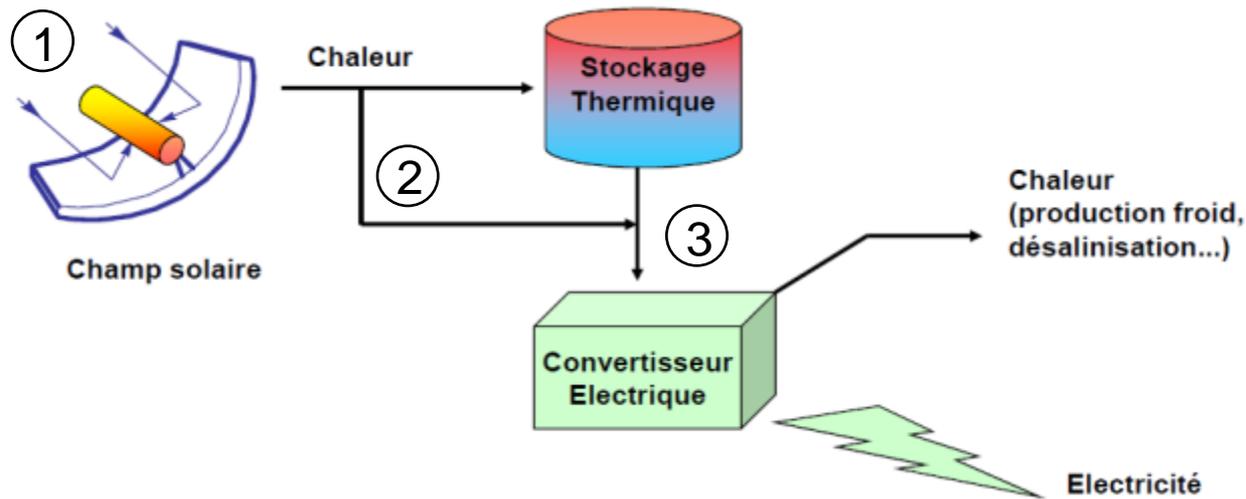


Schéma : Principe général des technologies solaires thermodynamiques (© CEA/Ines)

La production d'électricité via la technologie solaire thermodynamique peut se découper en trois étapes :

- 1 - concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur et absorption sur les parois du récepteur : transformation de l'énergie en chaleur
- 2 - transport et éventuellement stockage de cette chaleur
- 3 - transfert à un cycle thermodynamique associé à un alternateur : production d'électricité

II / SOLAIRE THERMODYNAMIQUE : LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES

Les différents types de centrales thermodynamiques

Il existe plusieurs types de centrales, combinant différentes technologies.

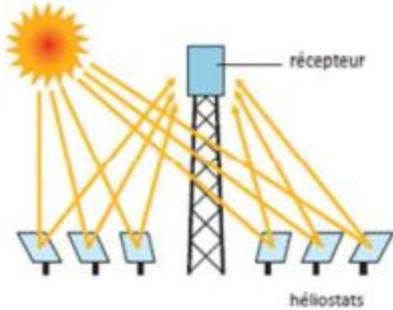
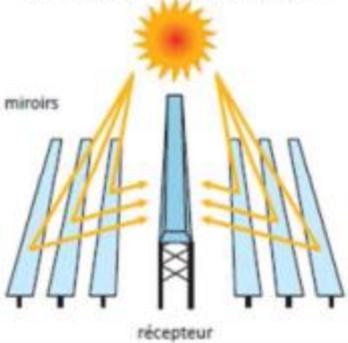
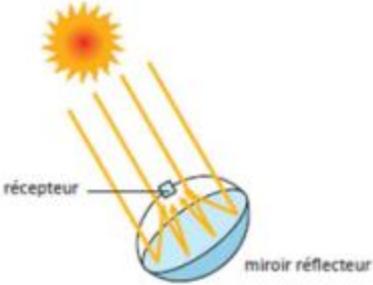
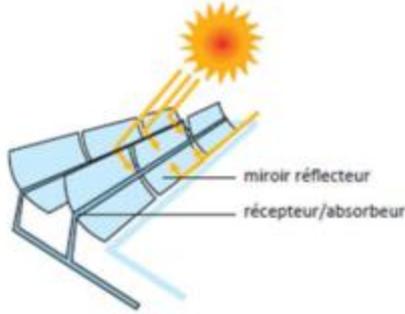
	Concentration ponctuelle	Concentration linéaire
Fixes	<p>Centrales à tour</p> 	<p>Collecteurs Fresnel linéaires</p> 
Mobiles	<p>Collecteurs paraboliques</p> 	<p>Collecteurs cylindro-paraboliques</p> 

Tableau : Les quatre principales technologies de centrales solaires thermodynamiques (© OECD/International Energy Agency - IEA 2010)

Les différents types de centrales : la centrale à tour



Photo : Plateforme solaire Abengoa, à Séville (Espagne) (© Abengoa)



Photo : Récepteur à cavité d'une tour solaire
(© CNIM)

Puissance :	Grandes centrales
Température de fonctionnement :	300°C – 1000°C
Réflecteurs :	Héliostats (suivi 2 axes)
Récepteurs :	Central
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, air

Les différents types de centrales : le collecteur Fresnel

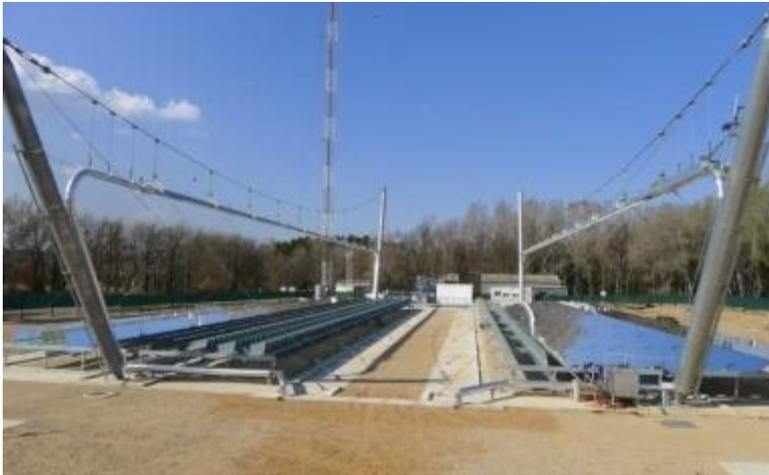


Photo : Centrale solaire à collecteurs de Fresnel (© CEA/Ines)



Photo : Récepteur absorbeur (© CEA/Ines)

Puissance :	Moyennes et grandes centrales
Température de fonctionnement :	200°C – 450°C
Réflecteurs :	Linéaire (<i>suivi 1 axe</i>)
Récepteurs :	Linéaire fixe
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, huile

L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE : TECHNOLOGIES

Les différents types de centrales : le collecteur cylindro-parabolique



Photo : Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques (© Schott Solar)

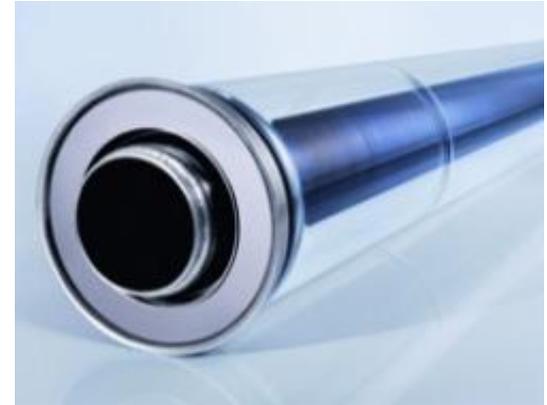


Photo : Tube sous vide (© Schott Solar)

Puissance :	Moyennes et grandes centrales
Température de fonctionnement	200°C – 500°C
Réflecteurs :	Parabolique (<i>suivi 1 axe</i>)
Récepteurs :	Linéaire mobile
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, huile, air

Les différents types de centrales : le collecteur parabolique



Photo : Collecteur parabolique (© Warden - licence cc by-sa 3.0)

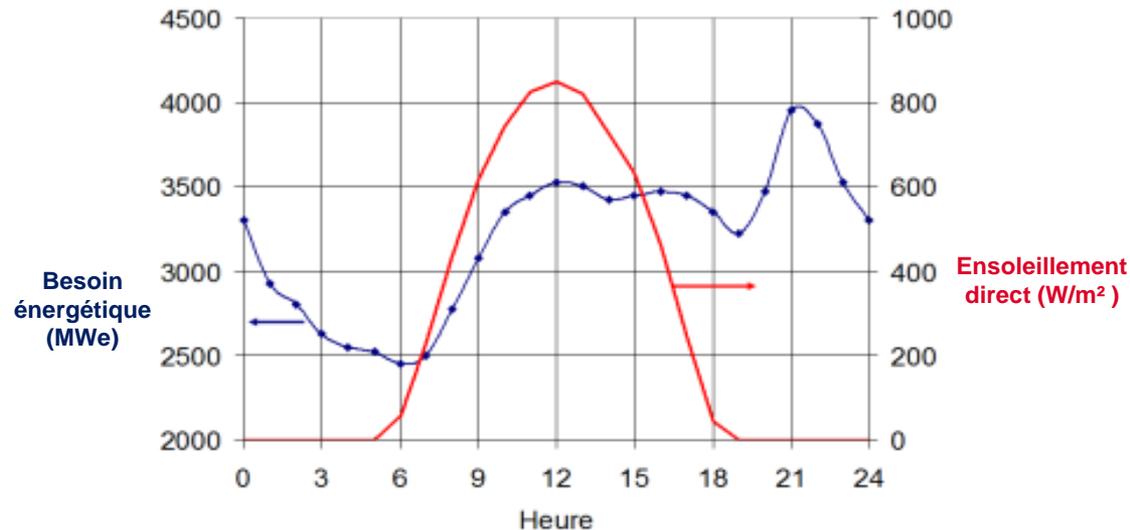
Puissance :	Petites centrales
Température de fonctionnement :	300°C – 1000°C
Réflecteurs :	Parabole (<i>suivi 2 axes</i>)
Récepteur :	Central et mobile
Fluides caloporteurs :	Air

Le stockage de l'énergie thermique

- **Objectif** : ajuster la production à la consommation
- **Principe** : stocker l'excédent d'énergie thermique du milieu de journée pour produire de l'électricité en fin de journée
- Le stockage de l'énergie thermique est efficace et peu coûteux.



Photo : Cuves de stockage thermique
(© Solar Millennium AG)



Graphique : Courbes comparatives des ressources / besoins énergétiques en Tunisie (© CEA/Ines)

II / SOLAIRE THERMODYNAMIQUE : LES ENJEUX

Les défis majeurs à relever

- **Dépendance à un fort ensoleillement direct** : cette technologie reste réservée à certaines régions uniquement (ensoleillement direct = temps sec et sans nuage).
- **Réduire le coût de l'énergie produite**
 - Augmentation des performances (atteindre des températures plus hautes)
 - Industrialisation (produire en série)
- **Augmenter la valeur de l'énergie produite avec...**
 - plus de disponibilité : stockage de chaleur
 - une meilleure prévision des besoins et ressources (à court et moyen termes)
 - une réduction de l'impact environnemental
 - une multi-génération (froid, dessalement, chimie, biomasse...)

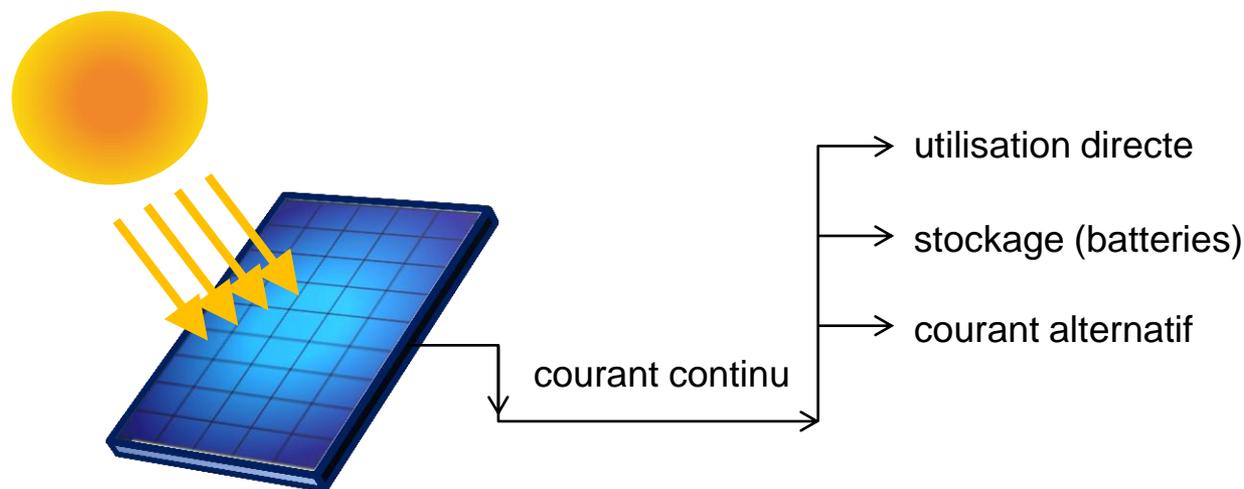
Approche de la désalinisation de l'eau de mer

- **Produire de l'eau douce à partir d'eau de mer ou d'eau saumâtre**
- **Les technologies :**
 - Par filtration (osmose inverse) : consommation d'énergie électrique (pompage)
 - Par voie thermique (évaporation/condensation) : consommation d'énergie thermique (évaporation)
- **Le couplage centrale solaire thermodynamique / dessalement**
 - Récupérer les rejets thermiques du cycle (50°C)
 - Utilisation comme source chaude pour le cycle de dessalement : développer des technologies fonctionnant à basse température (inférieure à 50°C)

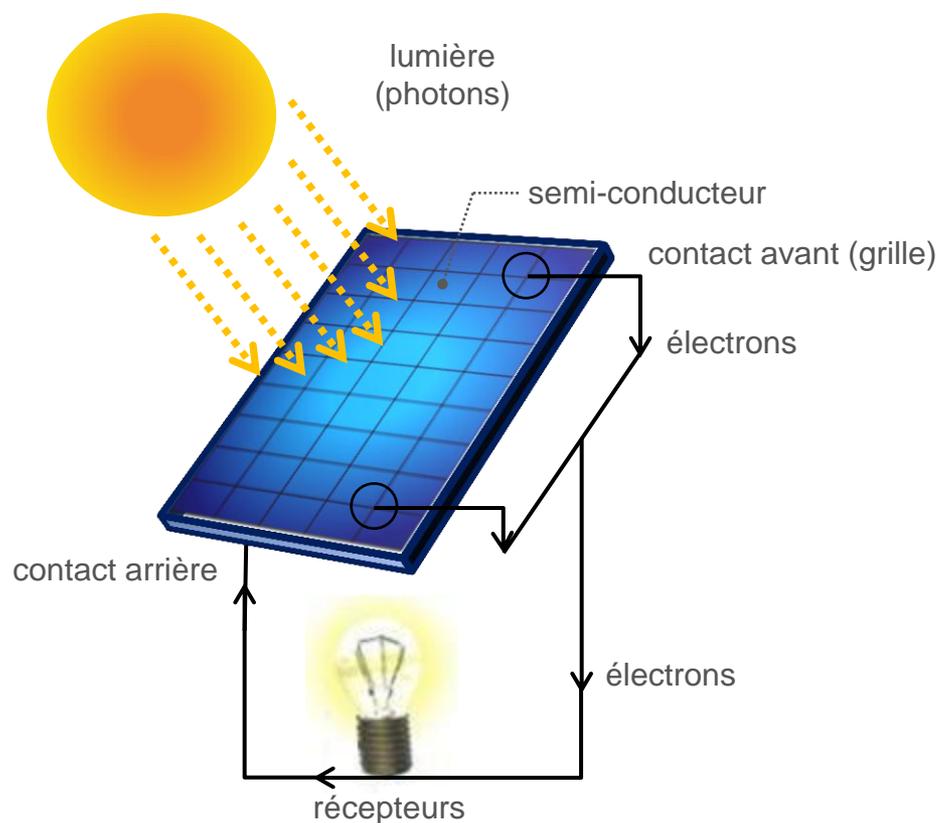
III / SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Utiliser l'énergie solaire pour produire de l'électricité

- Les panneaux photovoltaïques permettent de convertir l'énergie solaire directement en électricité.
- **Principe de la chaîne de conversion et d'utilisation de l'énergie solaire : la technologie du solaire photovoltaïque**



Éléments constituant la chaîne de conversion : la cellule photovoltaïque



- Les panneaux photovoltaïques sont un assemblage de cellules photovoltaïques composées d'un matériau semi-conducteur impliqué dans la conversion de l'énergie solaire en électricité.
- Le silicium est le matériau le plus utilisé à ce jour (plus de 80% des cas).

L' « effet photovoltaïque » : le semi-conducteur silicium

- Un semi-conducteur est un matériau solide isolant (= qui ne laisse pas passer les électrons) qui peut devenir conducteur (= qui laisse passer les électrons) sous certaines conditions.
- Pour que ses électrons circulent, il faut qu'ils aient été excités, c'est-à-dire transférés d'un état de faible énergie dans un état de forte énergie, en créant par la même occasion lors de ce transfert un « vide » (manque d'électron, ou « trou »).
- Les photons peuvent créer cette excitation. Les charges générées sont alors mobiles, mais leur mouvement est aléatoire.

→ En orientant leur mouvement, on peut créer un courant électrique.

→ Pour cela, il faut au préalable appliquer un champ électrique amené par une jonction PN.

L' « effet photovoltaïque » : le semi-conducteur silicium

- Les cellules photovoltaïques sont constituées d'une zone N et d'une zone P.

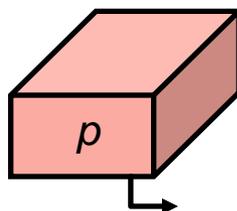
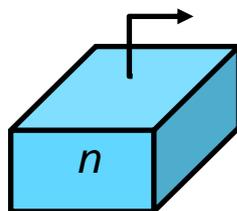
- Couche de type n :**

Phosphore à 5 électrons périphériques = la couche contient des électrons supplémentaires.
(couche « négative »)

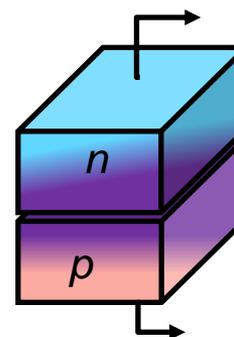
- Couche de type p :**

Bore à 3 électrons périphériques = la couche contient des électrons déficitaires, ou « trous ».
(couche « positive »)

Avant le contact



Après le contact



} Jonction électronique

Schéma : Principe de la jonction PN
(© CEA)

- Lorsque ces deux zones sont mises en contact, on appelle cela une jonction PN où se crée naturellement un champ électrique. Ce champ électrique va permettre d'orienter le mouvement des électrons dans le matériau.

L' « effet photovoltaïque » : la jonction PN

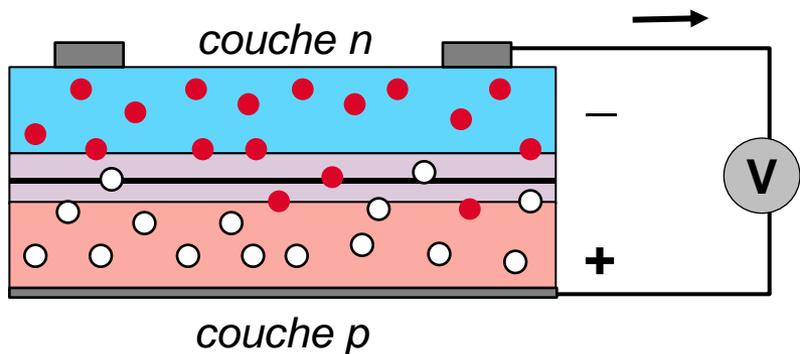


Schéma : Circuit électrique induit par la cellule photovoltaïque (© CEA)

- L'énergie apportée par les photons, particules de la lumière, va permettre d'arracher les électrons surnuméraires de la zone N pour combler les trous de la zone P. Ceci va créer un flux d'électrons à l'origine d'un courant électrique.

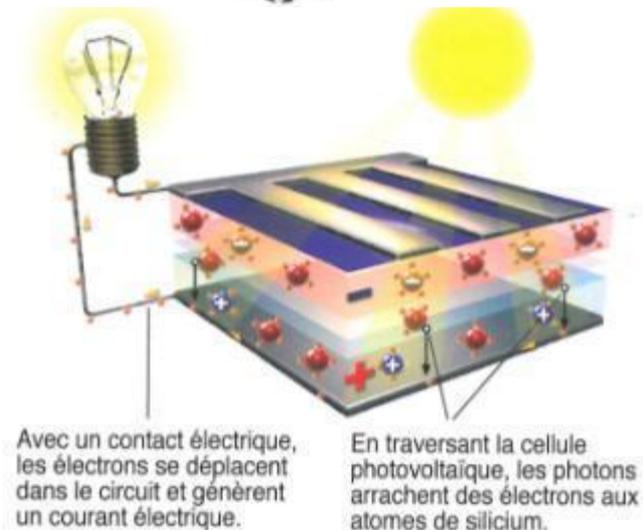
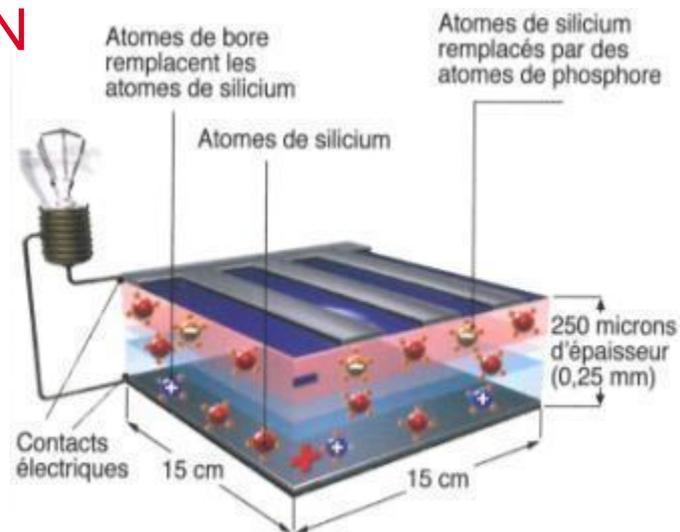
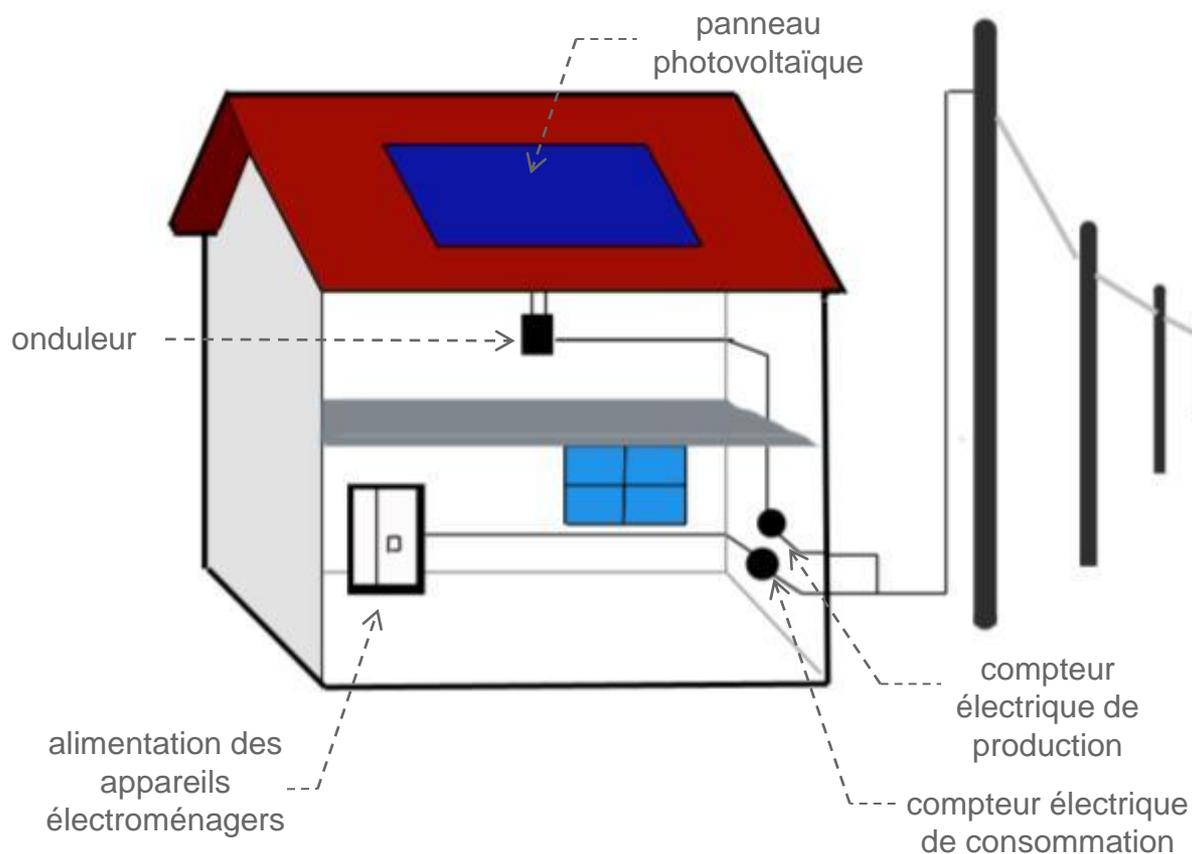


Schéma : L' « effet photovoltaïque » à l'échelle de la cellule de silicium (© CEA/Ines)

Éléments constituant la chaîne d'utilisation : la distribution



- Le système permet de produire de l'électricité en courant continu.
- Un onduleur placé sur ce circuit peut transformer ensuite le courant continu en courant alternatif et l'injecter sur le réseau ERDF.
- Il peut aussi être directement utilisé par le particulier.
- Ou bien stockée dans des batteries.

Les types d'installations photovoltaïques et leurs applications

Les installations photovoltaïques, selon les besoins, peuvent se décliner sous plusieurs formes :

■ pour une production locale d'électricité

installations résidentielles



Photo : Panneaux photovoltaïques en toiture de maison (©GenSun SAS, www.gensun.fr)

bâtiments industriels et commerciaux



Photo : Panneaux photovoltaïques en toiture d'entrepôt (© Réalisation AJ Construction)

■ pour une production centralisée

les centrales solaires



Photo : Plateforme Myrte (©S.Aude/Ballaioide Photo)



Photo : Centrale solaire de Montesquieu (©Exosun)

Les types d'installations photovoltaïques et leurs applications

Au-delà du secteur du bâtiment, les technologies photovoltaïques peuvent être utilisées dans d'autres secteurs :

■ le transport



Photo : Parking solaire pour véhicules électriques (© P.Avavian/CEA)



Photo : L'avion Solar Impulse (© Solar Impulse/Jean Revillard)

■ les applications nomades...



Photo : Chargeur solaire pour portables (© www.ecoclicot.com)



Photo : Sac à dos équipé de cellules photovoltaïques (© Eqwergy)

III / SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES

Les différentes formes du silicium

- **Le silicium monocristallin** est constitué d'un seul cristal de grande dimension. Il offre un meilleur rendement (entre 15% et 22%) mais est plus cher à produire. Il représente 31% du marché.
- **Le silicium polycristallin** est constitué de multiples petits cristaux. Il offre un bon rendement (14% à 18%) et peut être produit à meilleur coût. Il représente 57% du marché.
- **Le silicium quasi-mono, ou « mono-like »** vise à combiner les deux avantages, de meilleur rendement et moindre coût. Cette technologie est encore en développement.
- Pour chacun de ces matériaux, les cellules développées ont une épaisseur de 100 à 200 μm .



*Photo : Panneaux photovoltaïques...
... à gauche : à base de silicium multicristallin
... à droite : à base de silicium monocristallin
(©C.Dupont/CEA)*

Les différentes formes du silicium

- **Le silicium amorphe** ne présente pas une organisation atomique sous forme de cristal. Il possède un rendement divisé par deux par rapport à celui du cristallin (environ 8%), ce qui nécessite plus de surface pour la même puissance installée.
- 1 à 3 μm d'épaisseur suffisent pour absorber le rayonnement solaire.
- Le prix au m^2 de module est plus faible mais cet avantage disparaît souvent au niveau « système » puisqu'il y a plus de modules à installer pour une même puissance.
- Il présente l'avantage de pouvoir être utilisé dans des modules souples.

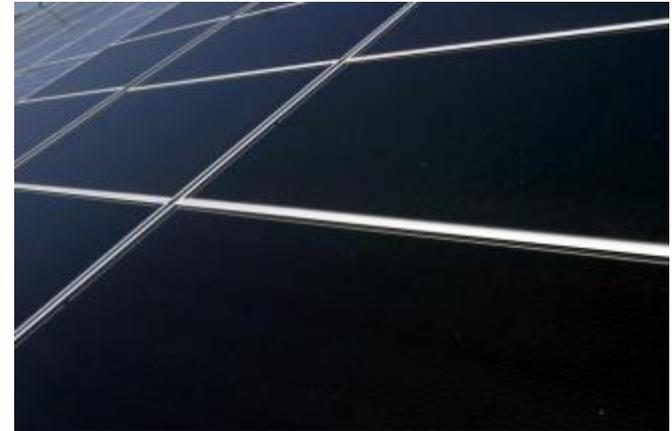


Photo : Module photovoltaïque
(©C.Dupont/CEA)

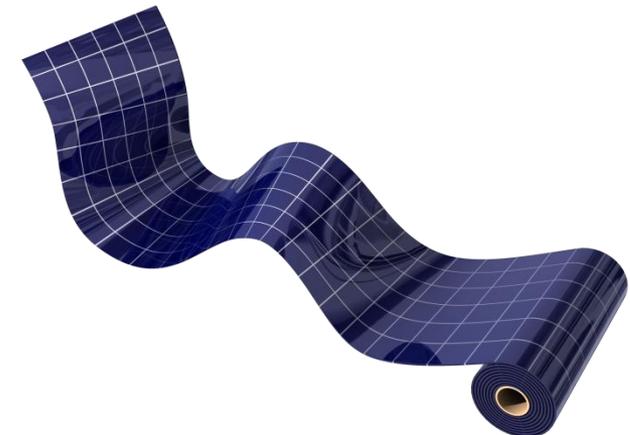


Photo : Panneau photovoltaïque
souple (©Micel Films)

Les autres technologies à couches minces

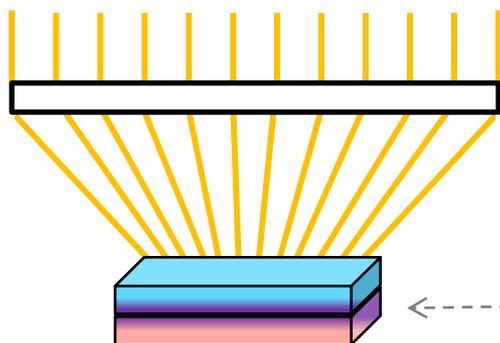
- Développer des matériaux permettant d'absorber le rayonnement solaire sur une faible épaisseur (généralement 1 à 3 μm)
- **But** : Simplification et accélération des procédés de fabrication
- Flexibilité et conformabilité du matériel : les cellules à couche mince permettraient d'envisager d'autres types d'applications (installation sur stores, objets portables...)
- De multiples technologies, selon les matériaux employés :
 - Tellure de Cadmium
 - Alliages de Cuivre, Indium, Soufre, Sélénium, Gallium, Germanium...
 - Matériaux organiques
- **MAIS** :
 - Rendements variables de 3 à 20 % au niveau des laboratoires, très rarement supérieurs à 12% au niveau industriel et commercial
 - Durées de vie et stabilité des performances encore à prouver

Les technologies à concentration optique

- Un des axes de travail sur les technologies photovoltaïques vise à concentrer les rayons du soleil sur une surface plus réduite de cellules photovoltaïques.

Photovoltaïque basse concentration :

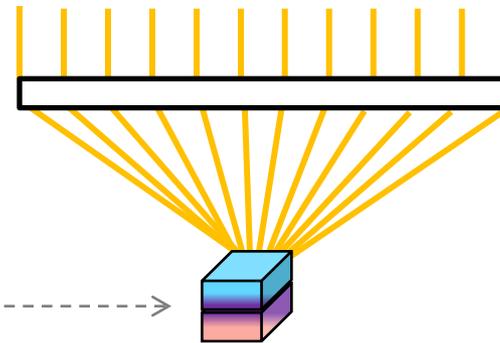
- énergie reçue < 100 soleils



<----- rayons ----->
<- « concentrateur » ->

Photovoltaïque haute concentration :

- énergie reçue > 100 soleils



<----- cellules photovoltaïques ----->

Schéma : Principe des technologies photovoltaïques à basse et haute concentration (© CEA)

➔ Réduction de la surface des cellules photovoltaïques = quantité de matériau nécessaire réduite, coûts réduits et possibilité d'usage de matériaux plus complexes et performants

NB : la surface de l'installation photovoltaïque totale reste la même. Ici, c'est la taille des cellules qui diminue, mais il faut compter la surface du « concentrateur ».

Les technologies à concentration optique

Le recours aux technologies de concentration des rayons solaires mobilise un ensemble de systèmes différents :

- **Un système optique** pour concentrer les rayons du soleil
- **Un système motorisé de suivi du soleil**, déplaçant les modules en suivant la course du soleil durant la journée (pour optimiser l'exposition des panneaux)
- **Un système de dissipation de chaleur / refroidissement des capteurs.**



Photo : Une installation photovoltaïque à concentration
(© CEA)

- En effet, l'inconvénient d'une forte concentration est le risque de surchauffe des cellules photovoltaïques. Leur fonctionnement et durée de vie sont diminués si elles sont soumises à de trop fortes chaleurs.
- Globalement, la température d'une cellule ne doit pas dépasser environ 100°C.

III / SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : LES ENJEUX

Fabrication des modules en silicium



Photo : pierre de silice (© CEA-COULON)

*purification
+cristallisation*

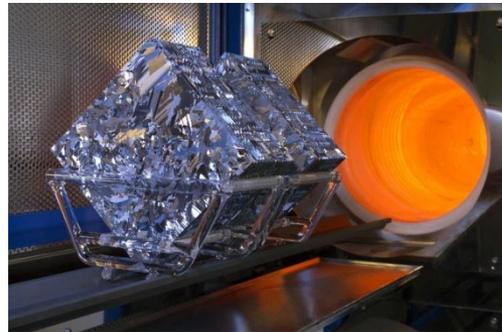


Photo : bloc de silicium passé au four (© D.Michon/Artechnique-CEA)

briquetage



Photo : bloc de silicium (© CEA-COULON)

wafering



Photo : plaque de silicium (© D.Michon/Artechnique-CEA)

*dopage
+antireflet
+métallisation*



Photo : cellule photovoltaïque (© A.Gonin/CEA)

assemblage



Photo : panneaux photovoltaïques (© E.De Lavergne/CEA)

Un panneau rembourse l'énergie consommée en 1 à 3 années d'exposition au soleil. Les seules émissions de CO₂ liées à la filière photovoltaïque sont liées à la fabrication des panneaux.

Les trois défis principaux du solaire photovoltaïque



- Réduire les coûts de fabrication en travaillant sur les matériaux
- Augmenter le rendement énergétique des cellules photovoltaïques
- Gérer les variations de la production énergétique

Photo : Panneaux photovoltaïques
(© C.Dupont/CEA)

Réduction des coûts : la fabrication des cellules photovoltaïques

- Diminution des coûts des matériaux, notamment du silicium purifié
- Simplification des procédés de fabrication : l'augmentation de la cadence (cristallisation), la réduction du taux de casse (sciage), du nombre d'étapes et diminution des pertes de matière au cours de la fabrication.
- Augmentation du rendement de conversion des cellules

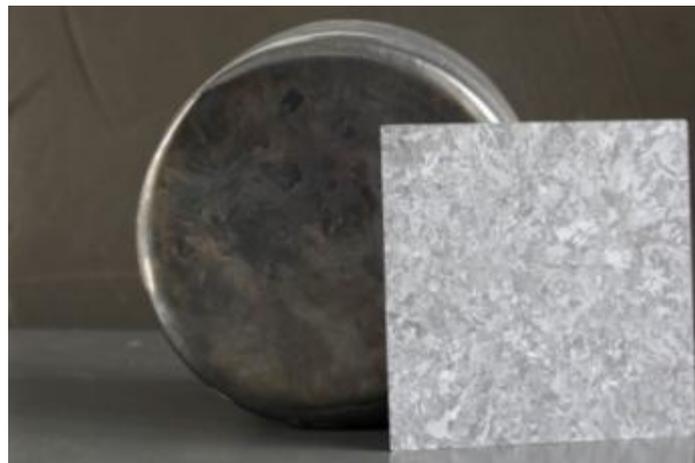


Photo : Lingot et plaquette de silicium cristallin
(© P.Dumas/CEA)

Rendement énergétique : les cellules à hétérojonction

L'hétérojonction consiste en la jonction de deux semi-conducteurs différents.

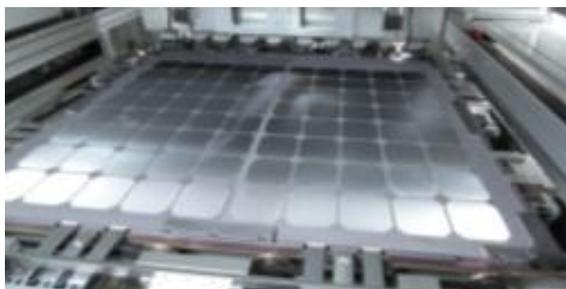


Photo : plaque de cellules © CEA

La technologie hétérojonction est considérée aujourd'hui dans le monde comme une des seules technologies permettant de combiner une réduction du prix et une augmentation du rendement de manière continue dans le temps.

Hétérojonction :

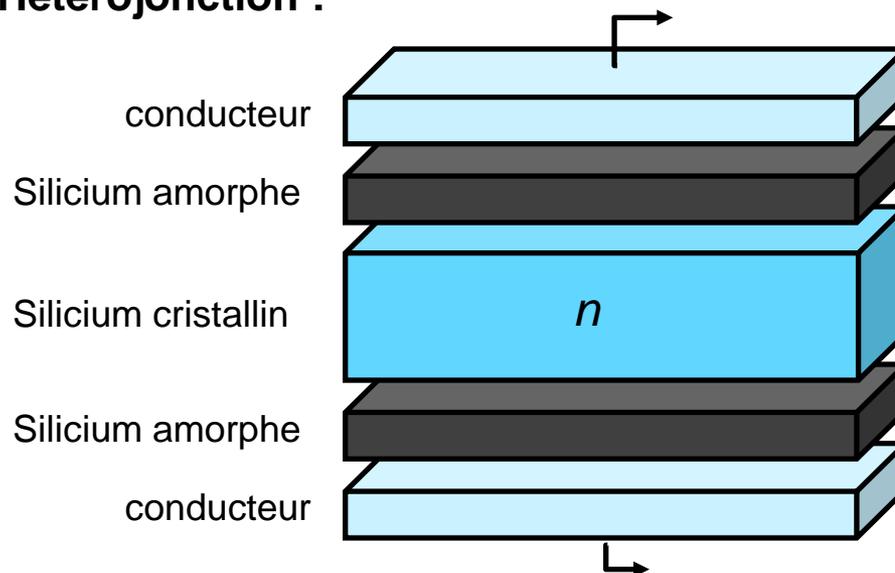
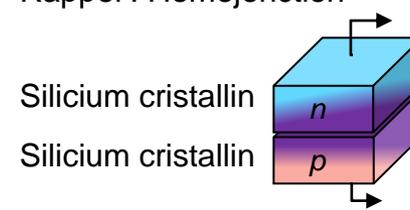


Schéma : Cellule photovoltaïque à hétérojonction (© CEA)

Rappel : Homojonction



Rendement énergétique : les cellules organiques

- Le développement d'une technologie sur substrat souple et compatible avec les procédés d'impression permettrait de diversifier les applications possibles du photovoltaïque. Cette technologie complètera l'offre silicium en apportant aux cellules des propriétés de souplesse et de transparence, ainsi qu'une réduction des coûts considérable.
- L'objectif principal des recherches actuelles concerne la durée de vie des cellules (passer de 2 à 5 ans de fonctionnement) plutôt que le rendement énergétique, au vue de son utilisation : équipement de téléphones portables, films transparents, peinture...

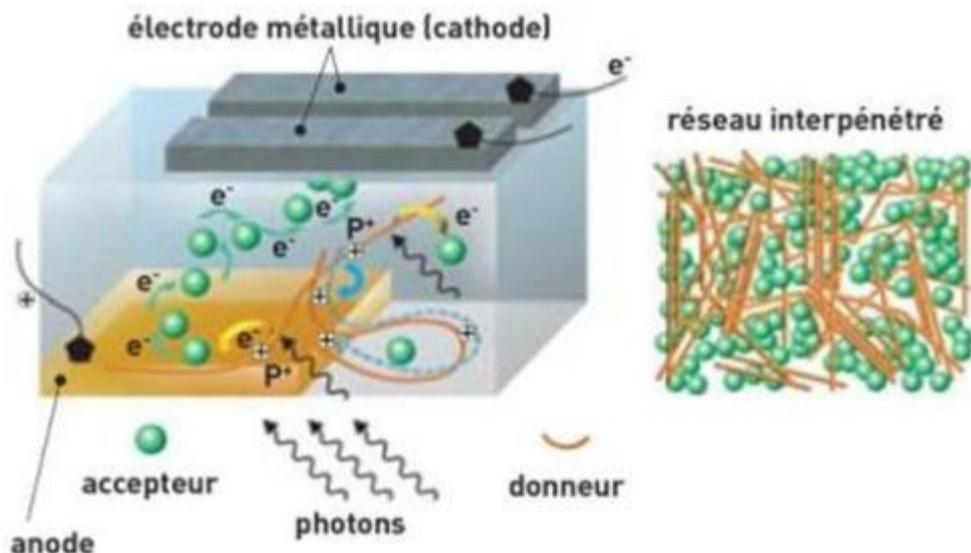


Photo : Cellule photovoltaïque organique (© P.Avavian/CEA)

Rendement (%)

État des lieux sur le rendement énergétique photovoltaïque

Concentration multi-jonction

- ▼ triple-jonction
- ▲ double-jonction
- Simple-jonction (GaAs)
 - △ monocristallin
 - ▲ concentrateur
 - ▽ cristallin à couche mince

Silicium cristallin

- monocristallin
- polycristallin
- ◆ couche mince
- hétérostructure (silicone)

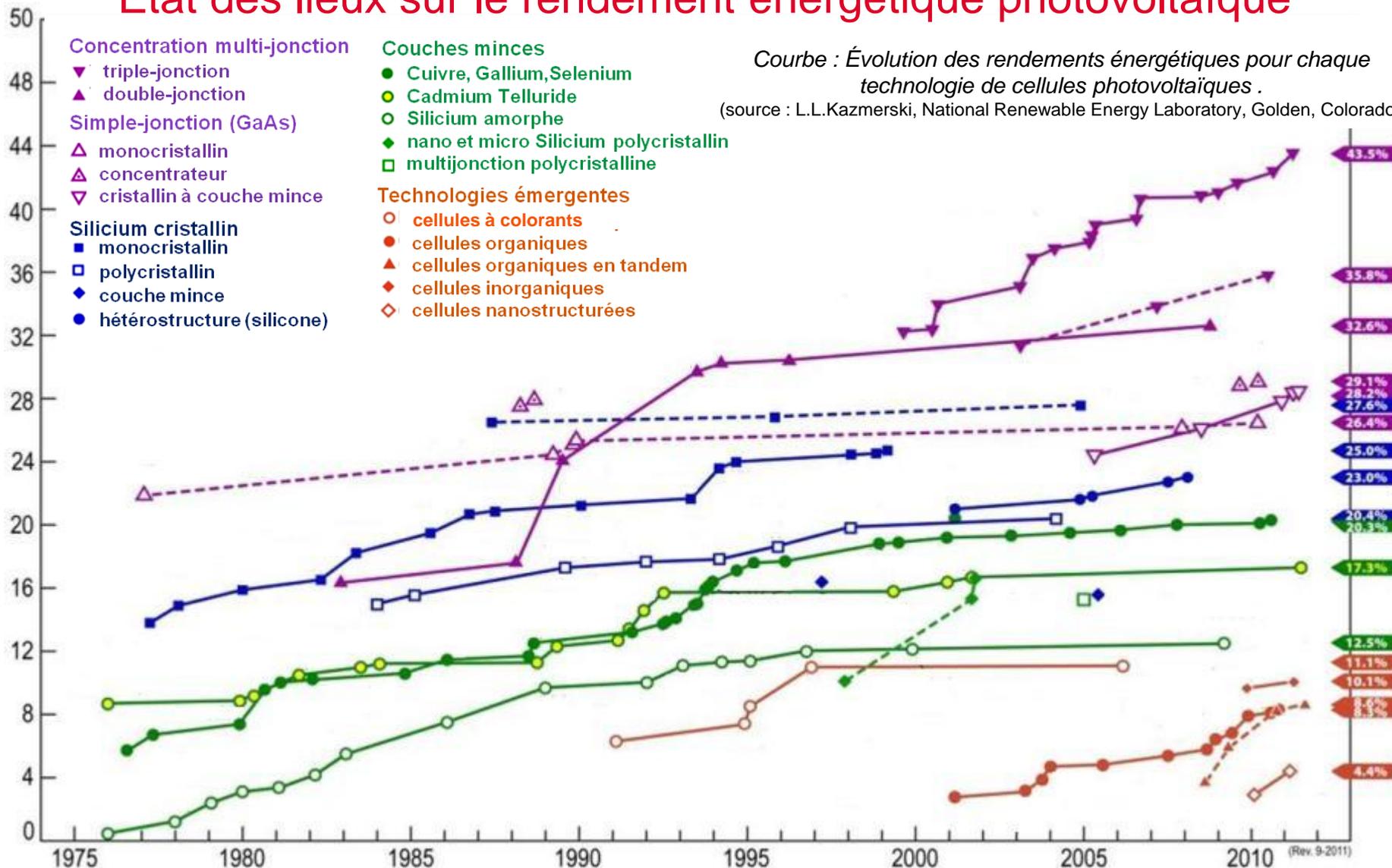
Couches minces

- Cuivre, Gallium, Sélénium
- Cadmium Telluride
- Silicium amorphe
- ◆ nano et micro Silicium polycristallin
- multijonction polycristalline

Technologies émergentes

- cellules à colorants
- cellules organiques
- ▲ cellules organiques en tandem
- ◆ cellules inorganiques
- ◇ cellules nanostructurées

Courbe : Évolution des rendements énergétiques pour chaque technologie de cellules photovoltaïques .
(source : L.L.Kazmerski, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado)



Rendement énergétique : les cellules innovantes

Utilisation de nanomatériaux pour franchir la limite intrinsèque des cellules standards :

- 1 / par une architecture de dispositif différente
exemple : multi-jonction de couches en série
- 2 / par une transformation du spectre lumineux incident
exemple : matériaux optiques à up et down-conversion

Rendement énergétique : les cellules innovantes 1

Utilisation de nanomatériaux pour franchir la limite intrinsèque des cellules standards :

- 1 / par une architecture de dispositif différente

Exemple d'une cellule constituée de multi-jonctions de couches en série

- Principe : empilement de cellules, améliorant la captation de l'énergie solaire, mais augmentant aussi les coûts

- Chaque couleur correspond à un matériau, par exemple :

 : Gallium - Phosphore

 : Arséniure de Gallium

 : Arséniure de Gallium, Aluminium

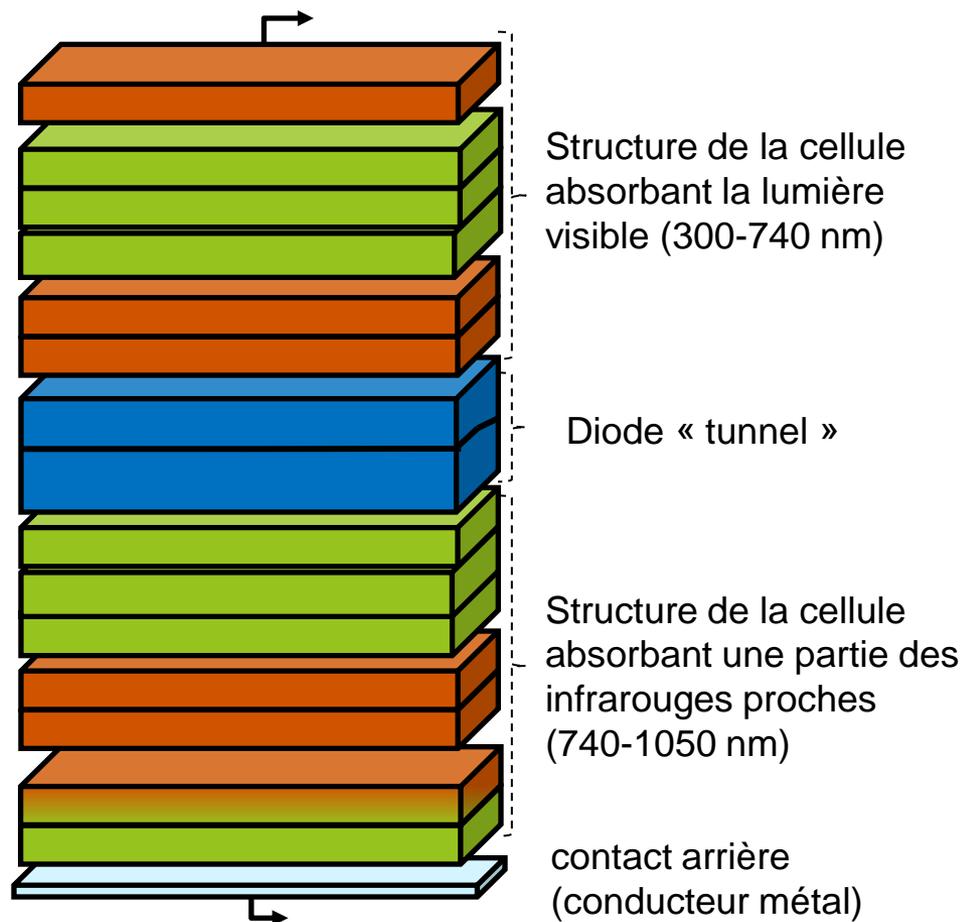


Schéma : Cellule photovoltaïque multi-jonctions (© CEA)

Rendement énergétique : les cellules innovantes 2

Utilisation de nanomatériaux pour franchir la limite intrinsèque des cellules standard :

- 1 / par une architecture de dispositif différente
- 2 / par une transformation du spectre lumineux incident
Exemple : le principe des matériaux optiques à up et down-conversion

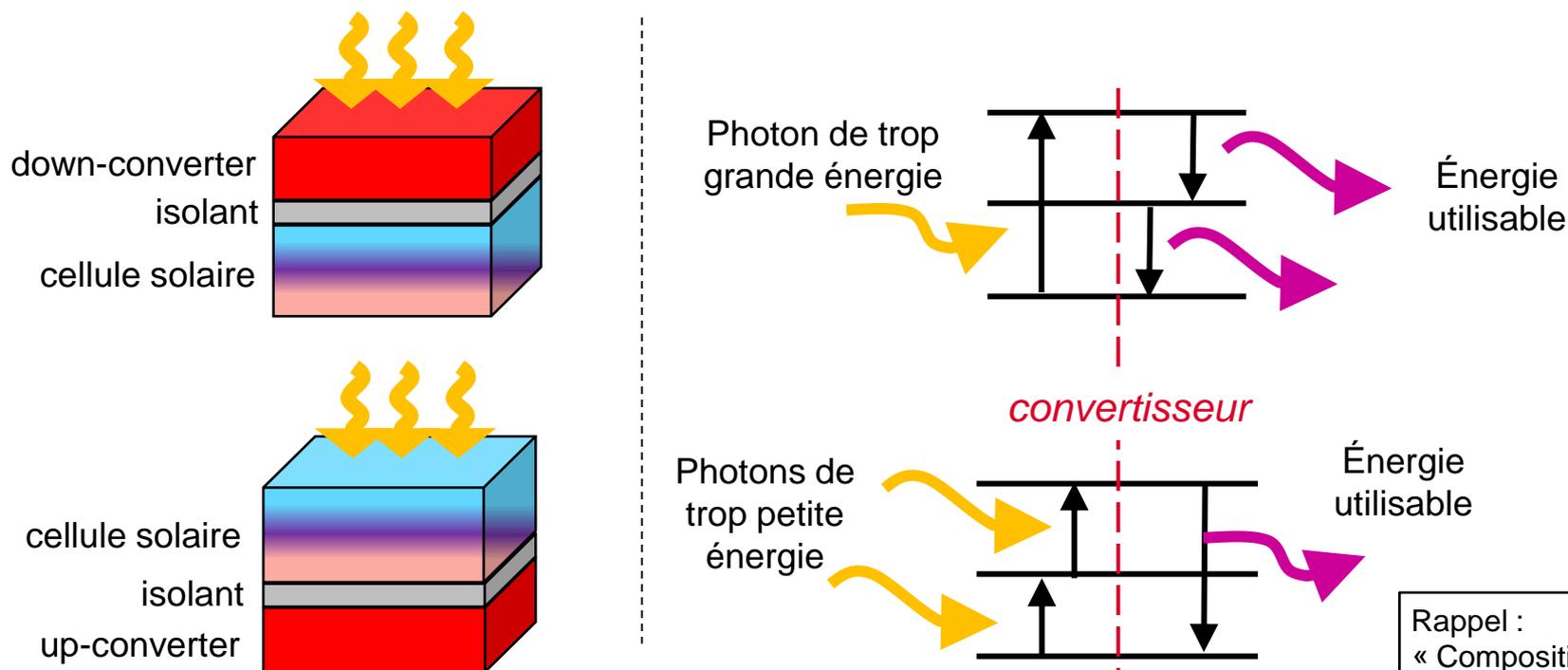


Schéma : Principe des matériaux optiques à up et down-conversion (© CEA)

Rappel :
« Composition du spectre lumineux », voir schéma p.7

Rendement énergétique : les cellules innovantes du futur

Utilisation de nanomatériaux pour franchir la limite intrinsèque des cellules standard :

- 1 / par une architecture de dispositif différente
exemple : multi-jonction de couches en série
- 2 / par une transformation du spectre lumineux incident
exemple : matériaux optiques à up et down-conversion
- **Autre exemple : développer des surfaces pour optimiser la captation de la lumière**

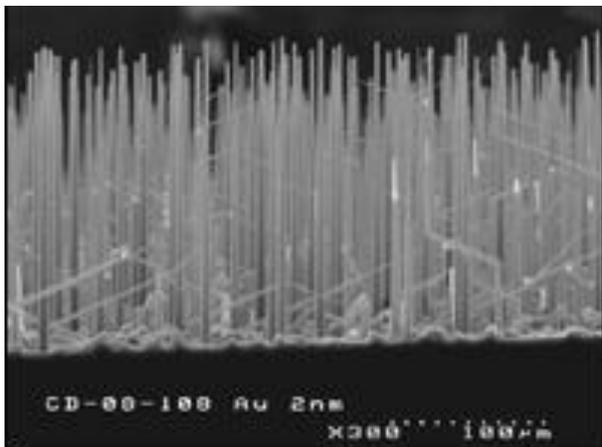


Photo : Nanofils de silicium (© CEA)

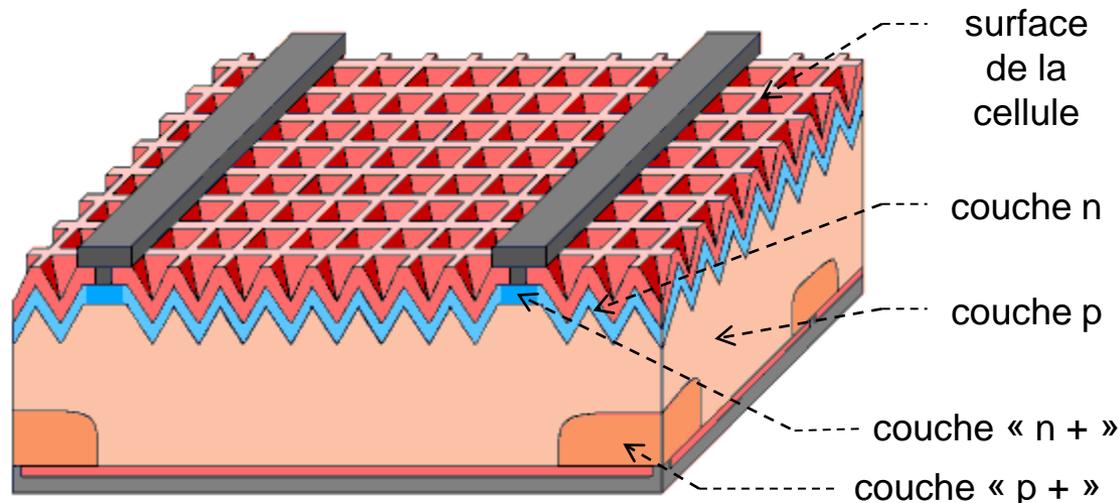
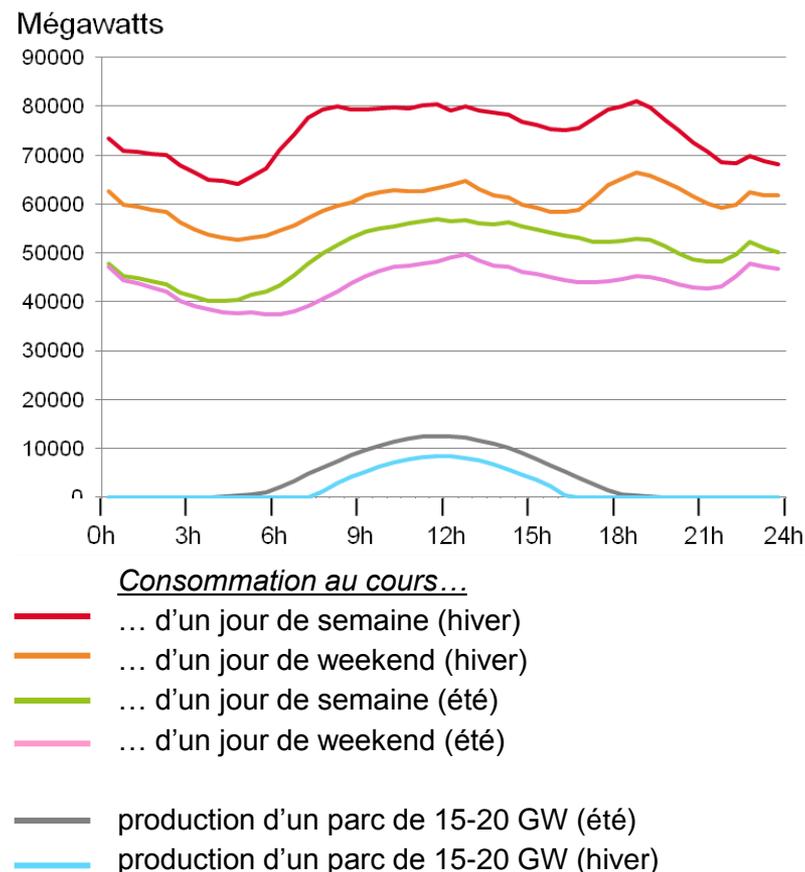


Schéma : Cellule photovoltaïque dont la surface est composée de nanopyramides inversées, pour piéger les photons (© CEA)

Les trois défis principaux du solaire photovoltaïque

- Bonne adéquation avec les profils des besoins diurnes, été comme hiver
- Gestion des variations de production :
 - prédiction de la production (10 min à 48 heures)
 - foisonnement spatial (plusieurs installations atténuent les variations)
 - gestion de la demande
- Utilisation de systèmes de stockage pour la garantie de la production :
 - batteries
 - pile-à-combustible



Courbe : Variations des besoins énergétiques et de la production photovoltaïque au cours du temps (© CEA)

Exemple de systèmes de stockage

Les systèmes de stockage peuvent être de plusieurs typologies :

■ **Chimique** : parc de batteries



*Photos : batteries pour le stockage de l'énergie (© CEA)
à gauche : batteries électrochimiques ; à droite : batterie redox*

■ **Hydrogène** : couplage avec une pile à combustible
(exemple de la plateforme Myrte en Corse)



Photo : La plateforme Myrte, installée près d'Ajaccio (Corse), qui réunit l'université de Corse, Helion-Areva et le CEA. (©S.Aude/Ballaoido Photo)

SYNTHÈSE DES 3 FILIÈRES

L'énergie solaire...

- Une énergie relativement universelle : disponible partout dans le monde, mais dans des quantités variables
- Pour chaque besoin : une ou plusieurs technologies spécifiques.
- Les différentes filières technologiques du solaire se complètent selon les usages.
- L'optimisation des systèmes passent par une approche globale de la production et de la consommation.
- Technologies modulaires :
 - la surface de captation est proportionnelle aux besoins.
 - les prix de reviens par Watt sont constants sur la gamme 1 kW-100 MG.
- Le coût de cette énergie est essentiellement déterminé par l'investissement initial, et reste stable du fait de la permanence de la ressource et de la quasi-absence de consommables (carburants etc.).

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 64 50 20 11 |

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775
685 019

DCOM
Service Information Médias