



Pierrefitte sur Loire

Samedi 27 avril 2024

L'électricité solaire photovoltaïque : une énergie renouvelable sans limites ?

Pierre Viktorovitch, Directeur de Recherche CNRS émérite

Institut des Nanotechnologies de Lyon 

C'est quoi, l'Énergie?

- Du grec ancien ἐνέργεια / enérgeia :« force en action »
- Concept remontant à l'Antiquité
- S'est précisé depuis le XVIII^{ème} siècle

C'est quoi, l'Énergie?

L'énergie est une mesure de la
capacité d'un système à
engendrer un mouvement, à
modifier un état

C'est quoi, l'Énergie?

Energie et puissance

La puissance d'un système est l'énergie qu'il est capable de fournir par unité de temps

Exemple: un système de puissance 1 W fournit une énergie de 1 Wh en une heure

C'est quoi, l'Énergie?

Formes d'énergie: exemples

- Thermique: chaleur (mouvement désordonné)
- Mécanique: travail (mouvement ordonné)
- Physico-chimique
- Lumineuse
- Electrique
- Nucléaire

C'est quoi, l'Énergie?

Formes d'énergie: exemples

- Thermique: chaleur (mouvement désordonné)
- Mécanique: travail (mouvement ordonné)
- Physico-chimique
- Lumineuse
- Electrique
- Nucléaire

Transformations énergétiques

C'est quoi, l'Énergie?

*La mère de toutes les énergies est
nucléaire*

PLAN

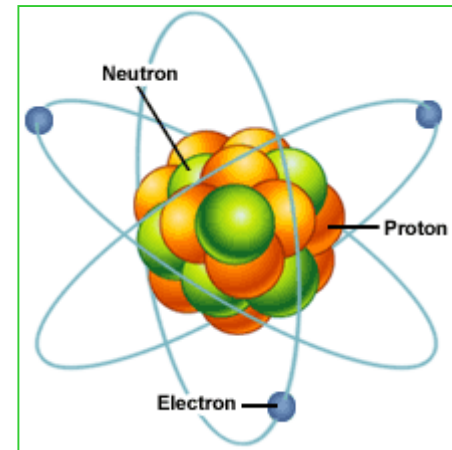
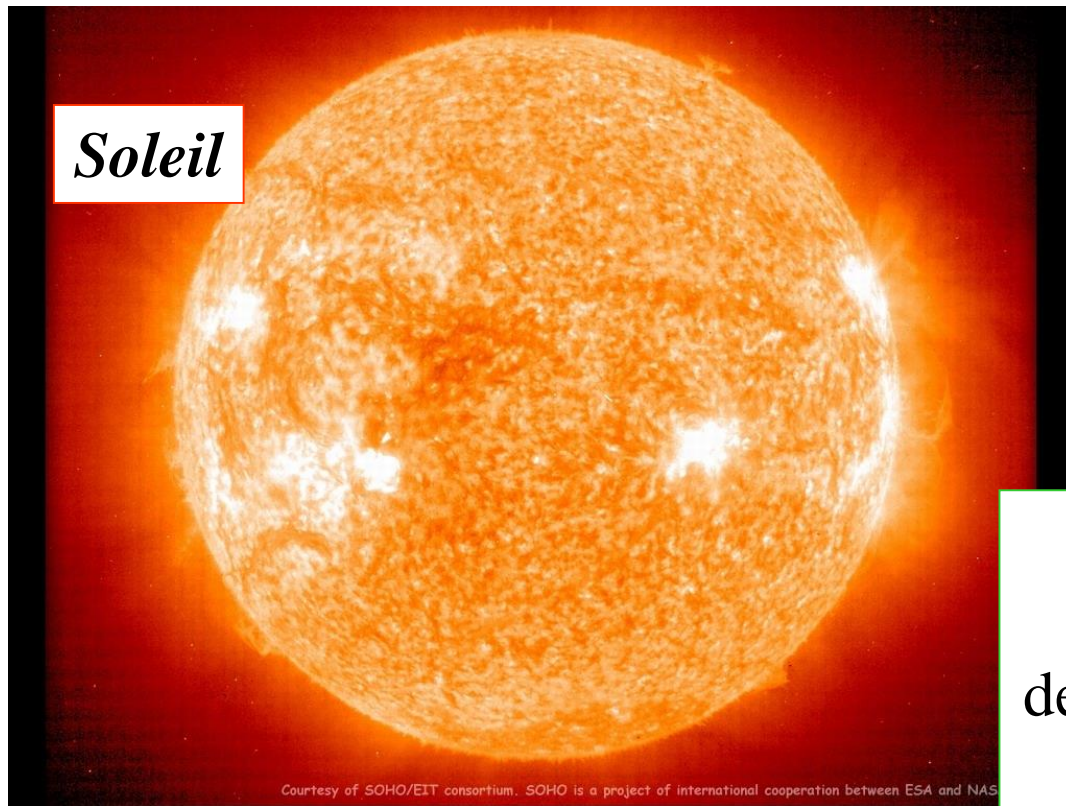
- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

La mère de toutes les énergies est nucléaire



Produite au cœur des étoiles
au cours de la formation
des atomes par des processus de
réaction nucléaire

118 atomes ou éléments de la matière: H, O, C, Fe, Cu etc...

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

La mère de toutes les énergies est nucléaire

Réaction nucléaire (physique nucléaire)
à ne pas confondre avec
réaction chimique (physique-chimie)

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

Le Soleil est
un formidable réservoir
d'Énergie Nucléaire

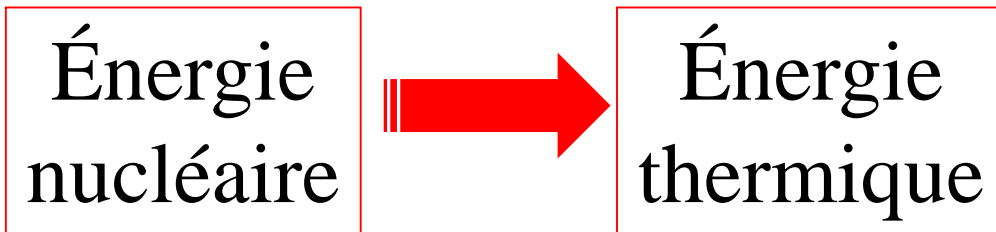
*Sous quelle forme l'énergie
nous provient-elle du soleil?*

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

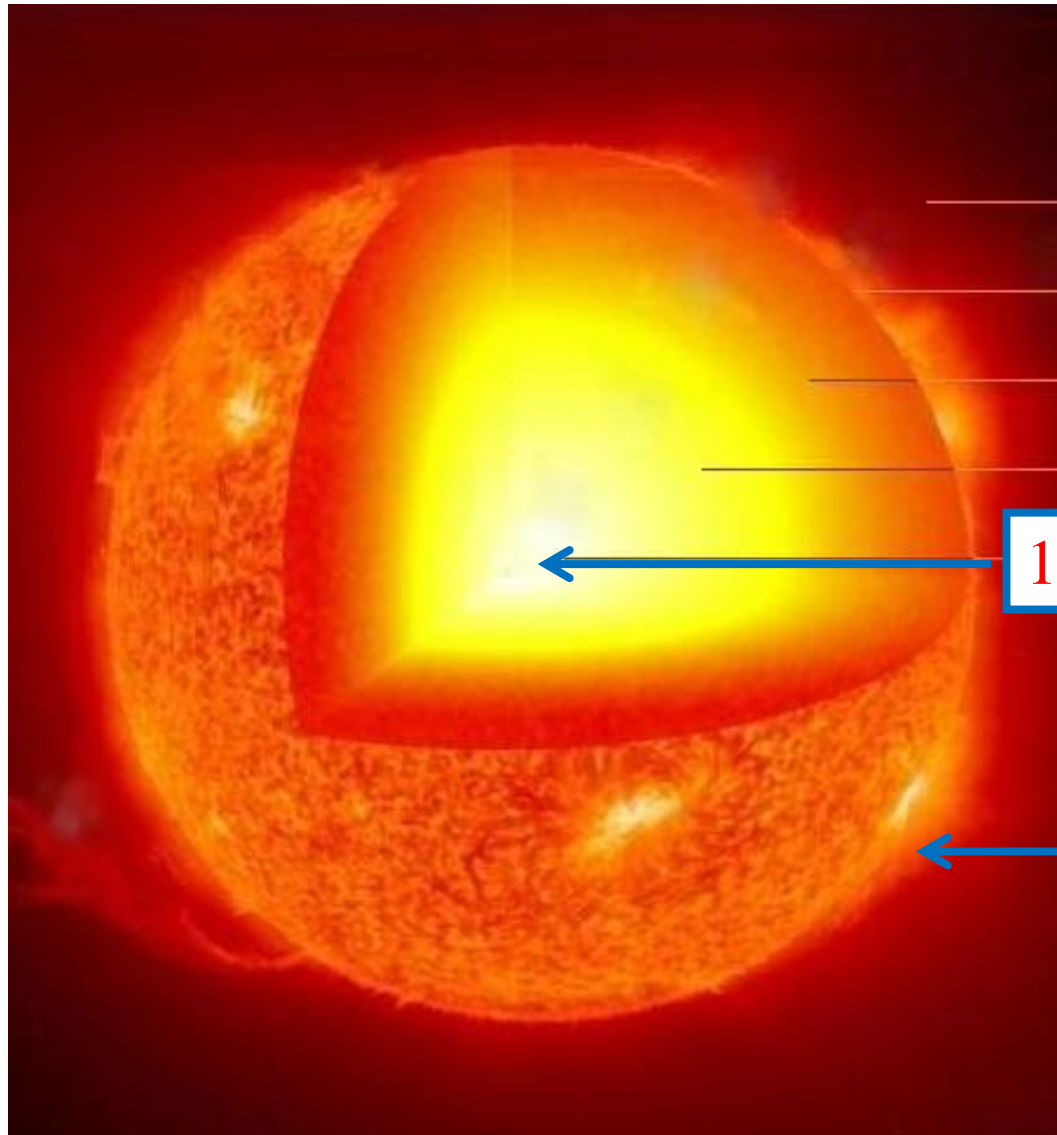
L'énergie solaire nucléaire nous parvient sur la terre après avoir subi des transformations successives

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

1^{ère} étape



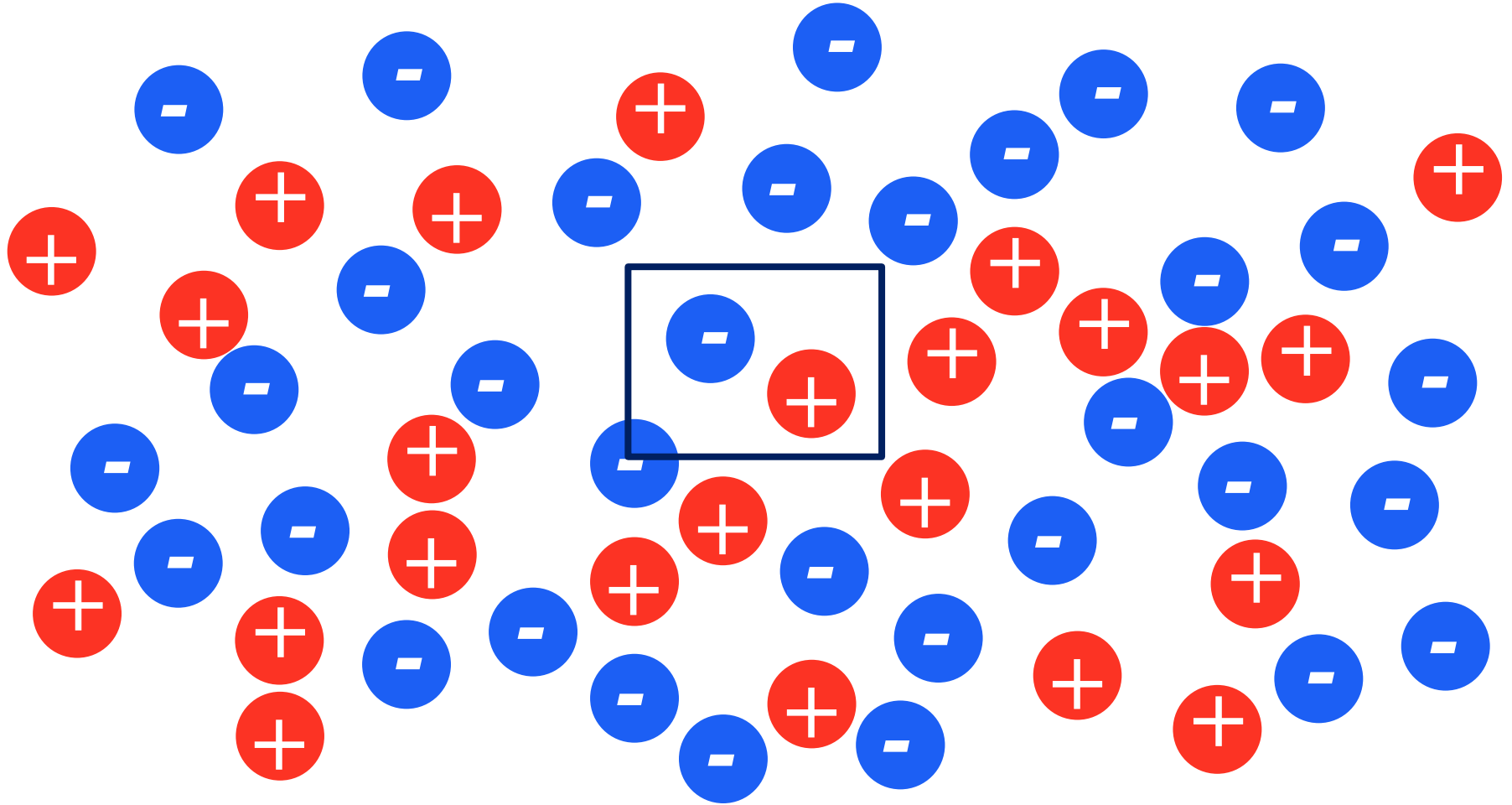
C'est quoi, l'Énergie Solaire?



15 Millions degrés

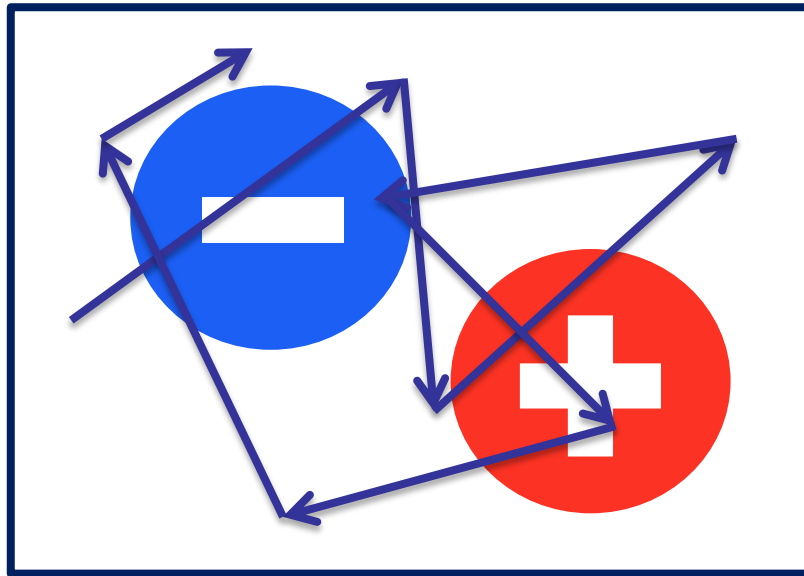
6000 degrés

C'est quoi, l'Énergie Solaire?



Le soleil est un plasma chaud

C'est quoi, l'Énergie Solaire?



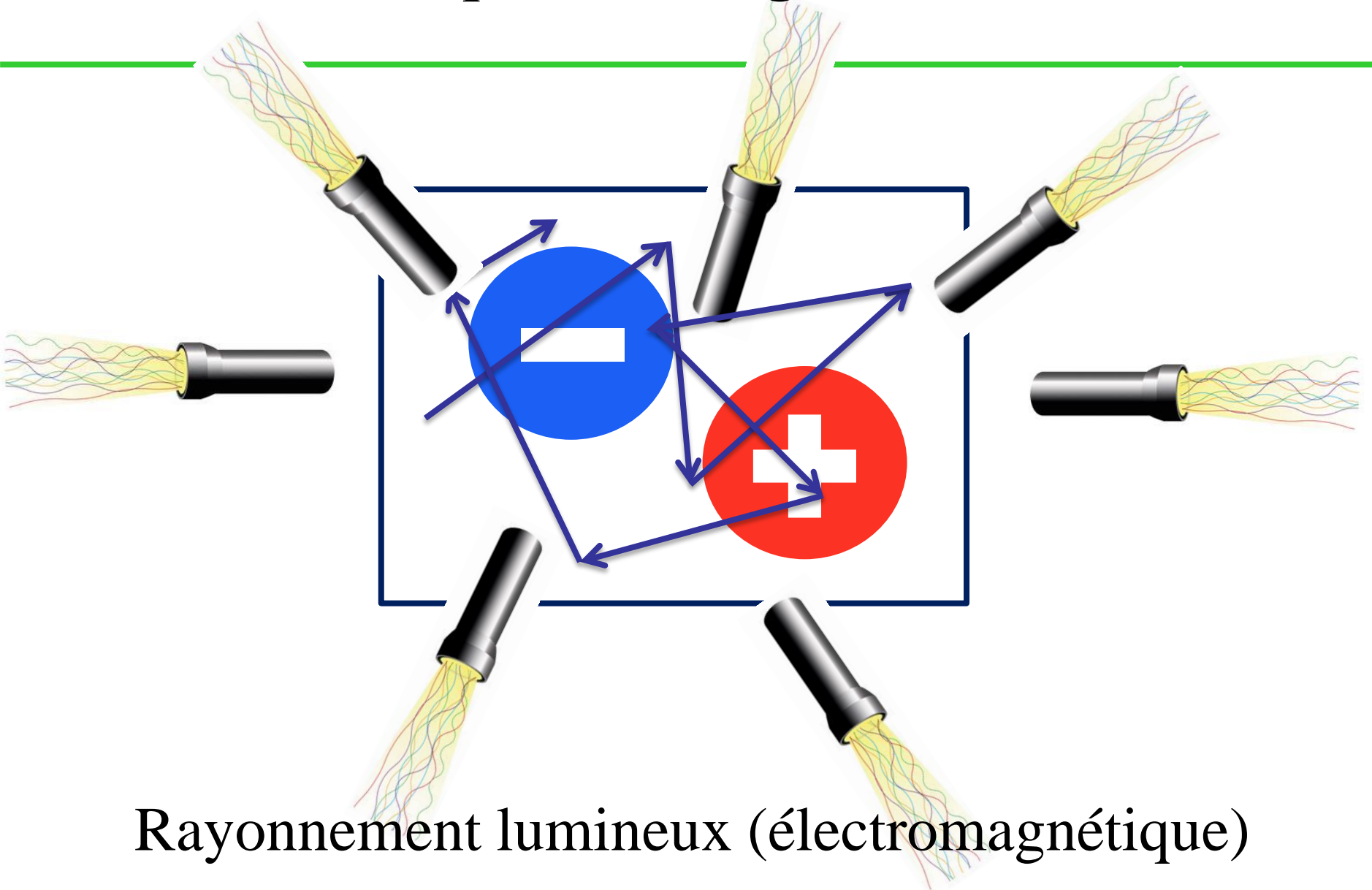
Atomes ionisés (chargés) en forte agitation « thermique »

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

2^{ème} étape

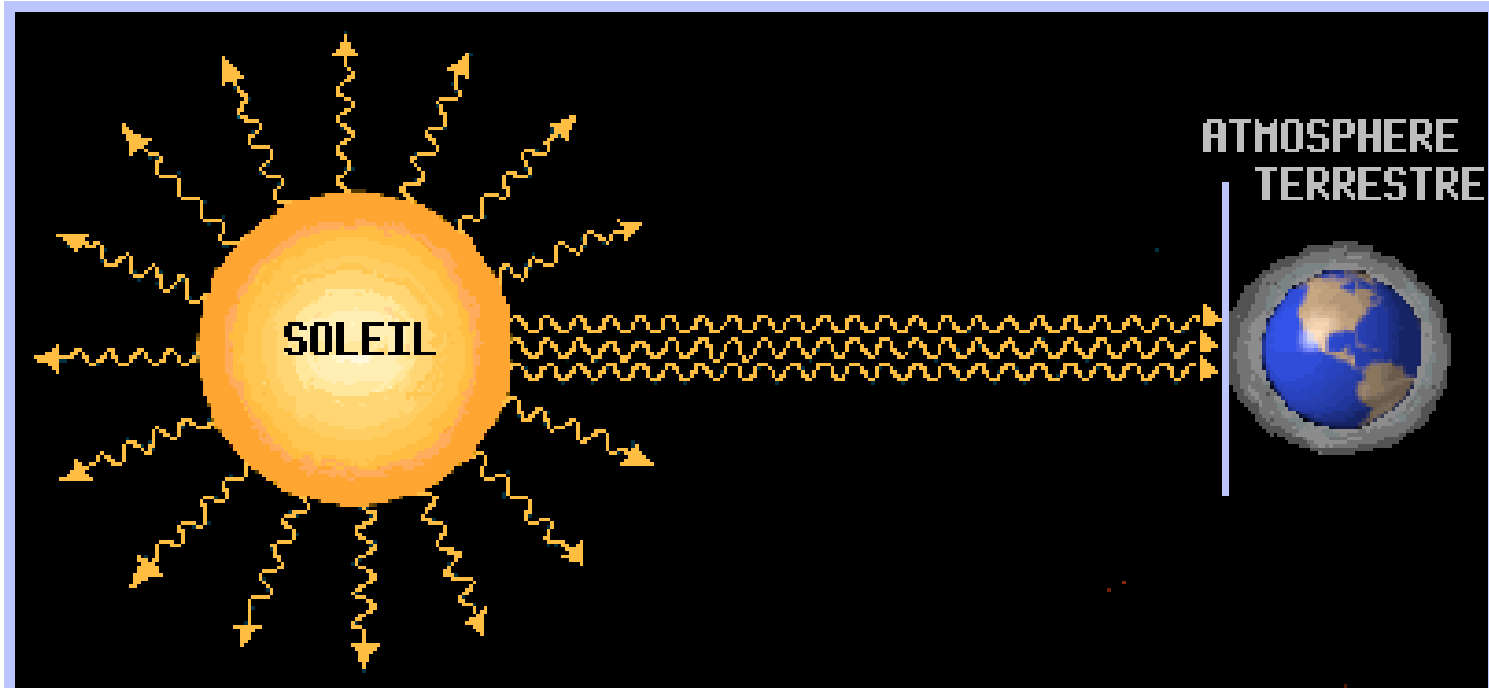


C'est quoi, l'Énergie Solaire?



Rayonnement lumineux (électromagnétique)

C'est quoi, l'Énergie Solaire?



L'énergie solaire est transmise au voisinage de la terre sous forme de **lumière**

C'est quoi, l'Énergie Solaire?



L'énergie solaire est transmise au voisinage de la terre sous forme de **lumière**

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

Mais, au fait, c'est quoi la **lumière**??

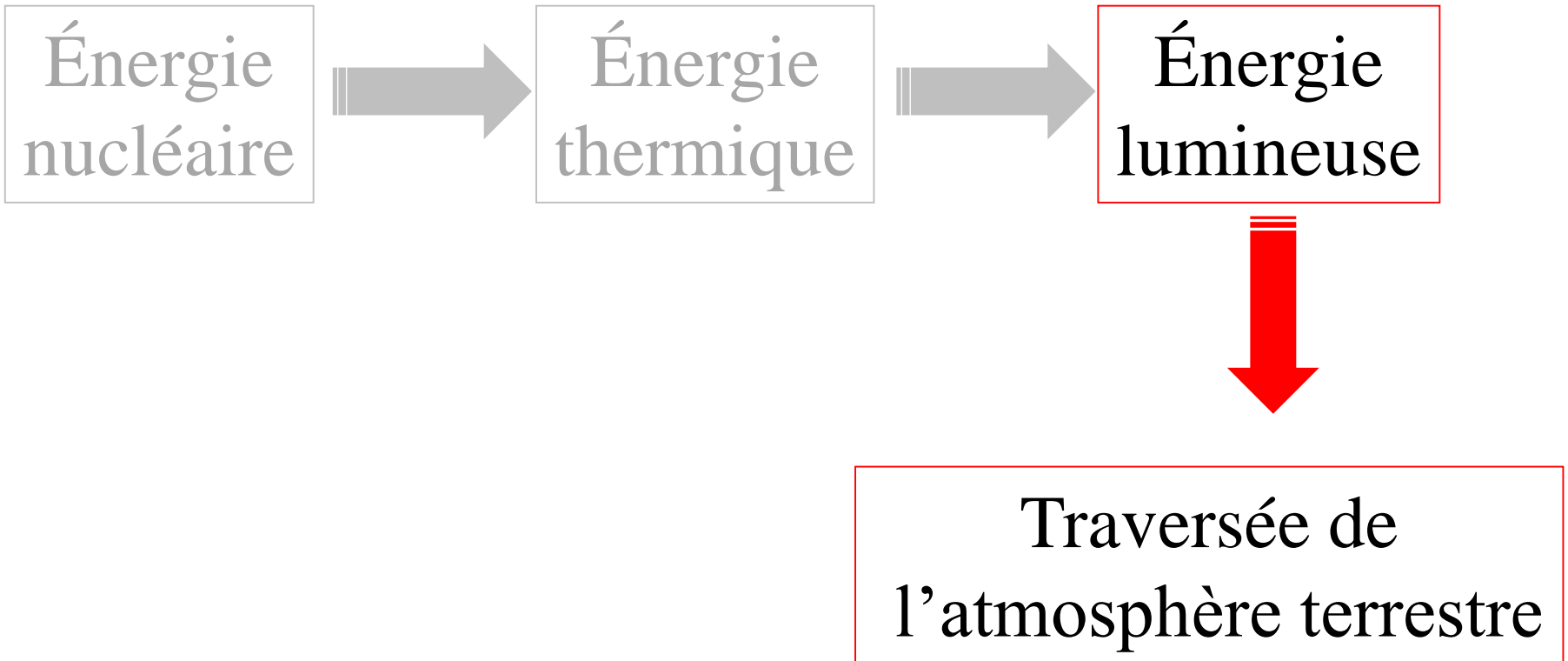
Hum...

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

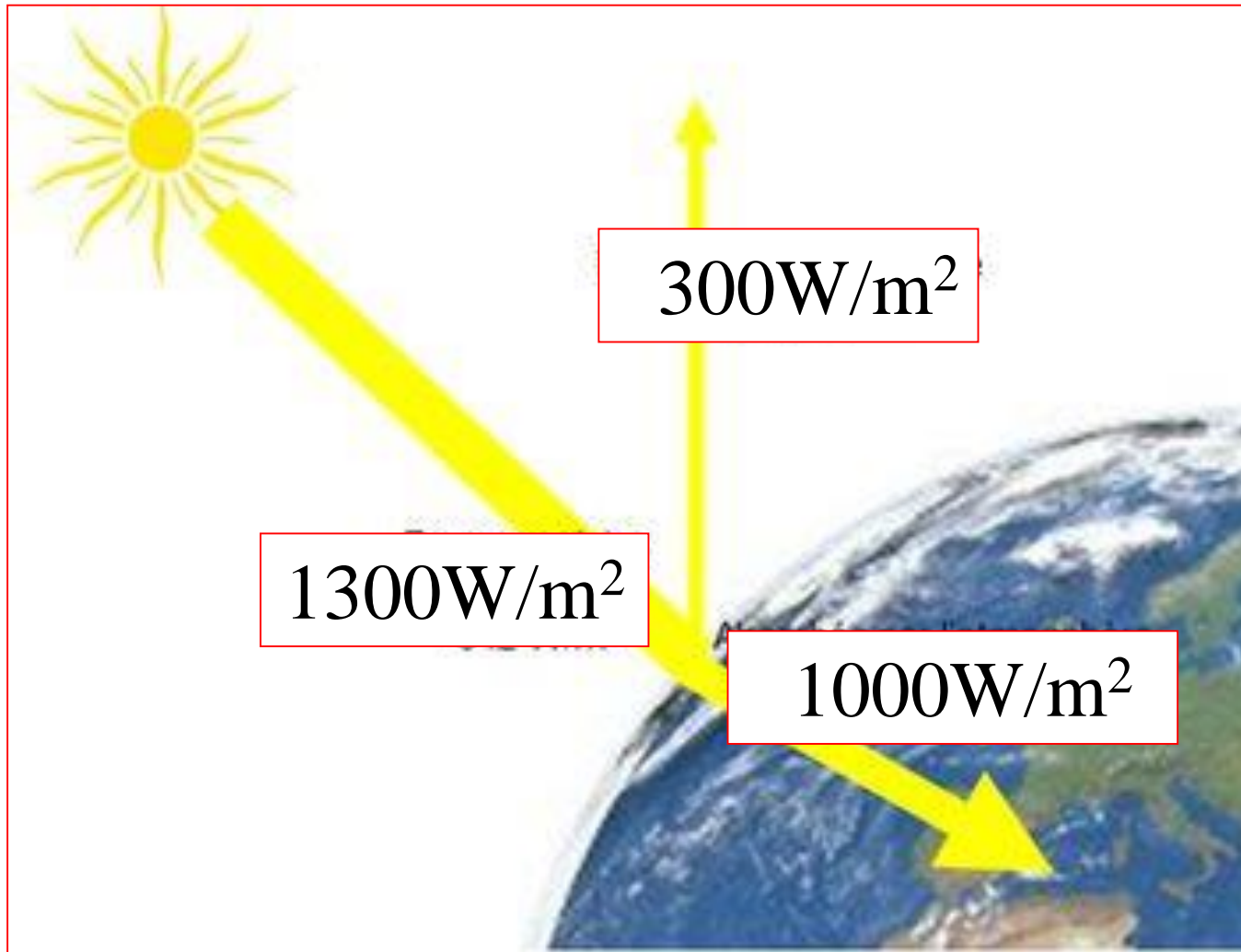
La lumière est une messagère,
un agent d'interaction...etc...

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

3^{ème} étape

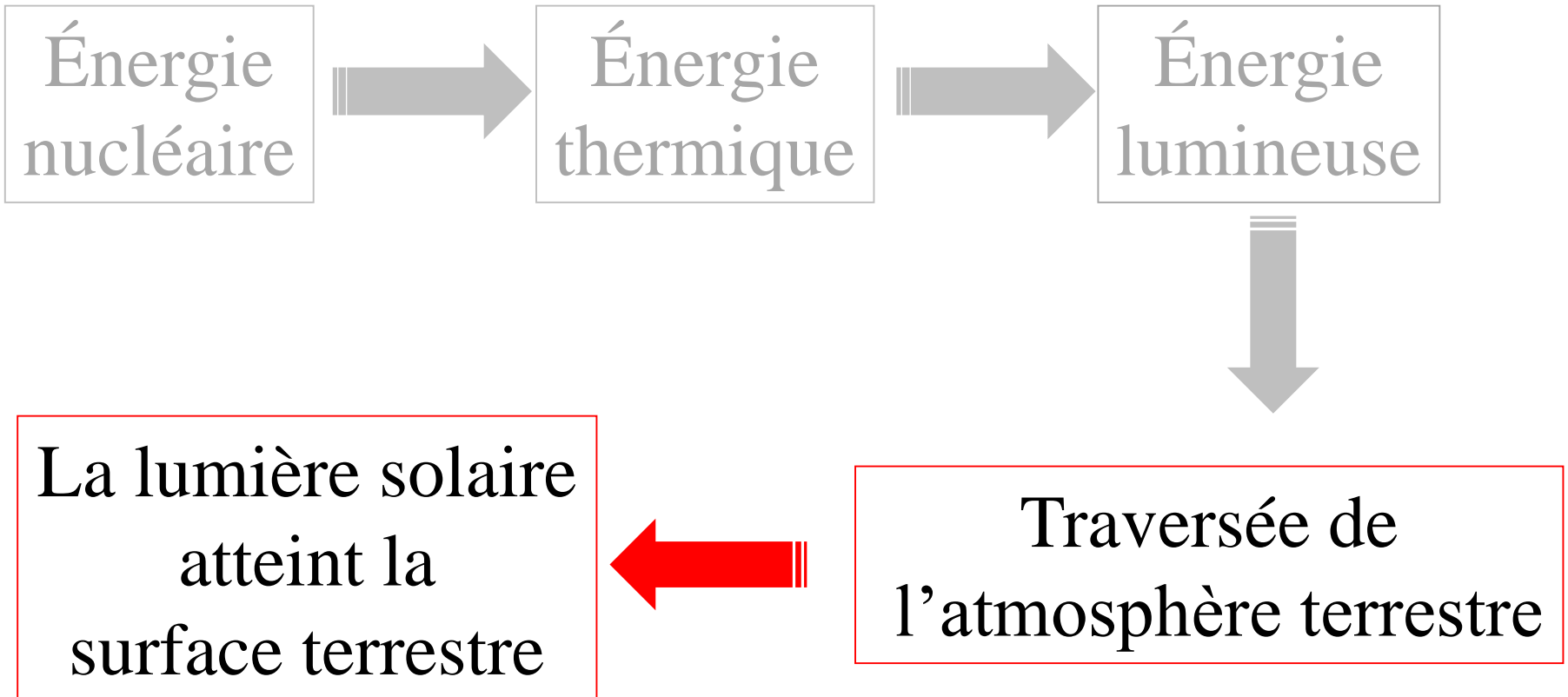


C'est quoi, l'Énergie Solaire?

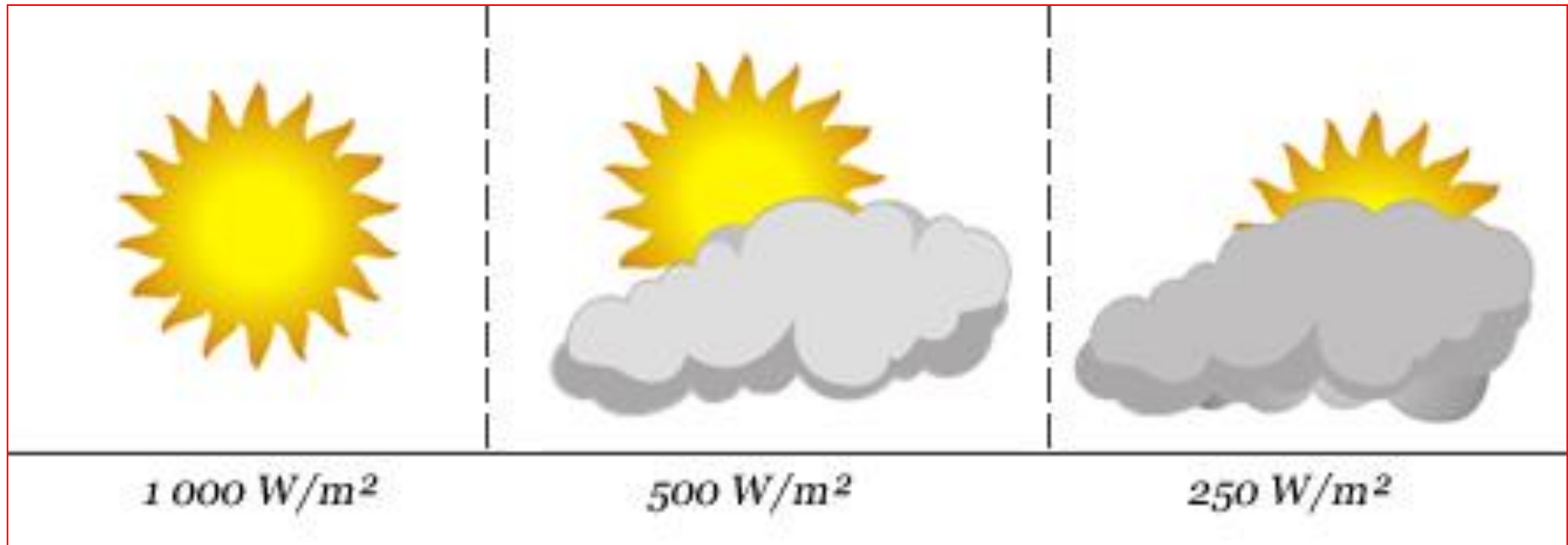


C'est quoi, l'Énergie Solaire?

4^{ème} et dernière étape du voyage



C'est quoi, l'Énergie Solaire?



Puissance lumineuse solaire à la surface de la terre

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

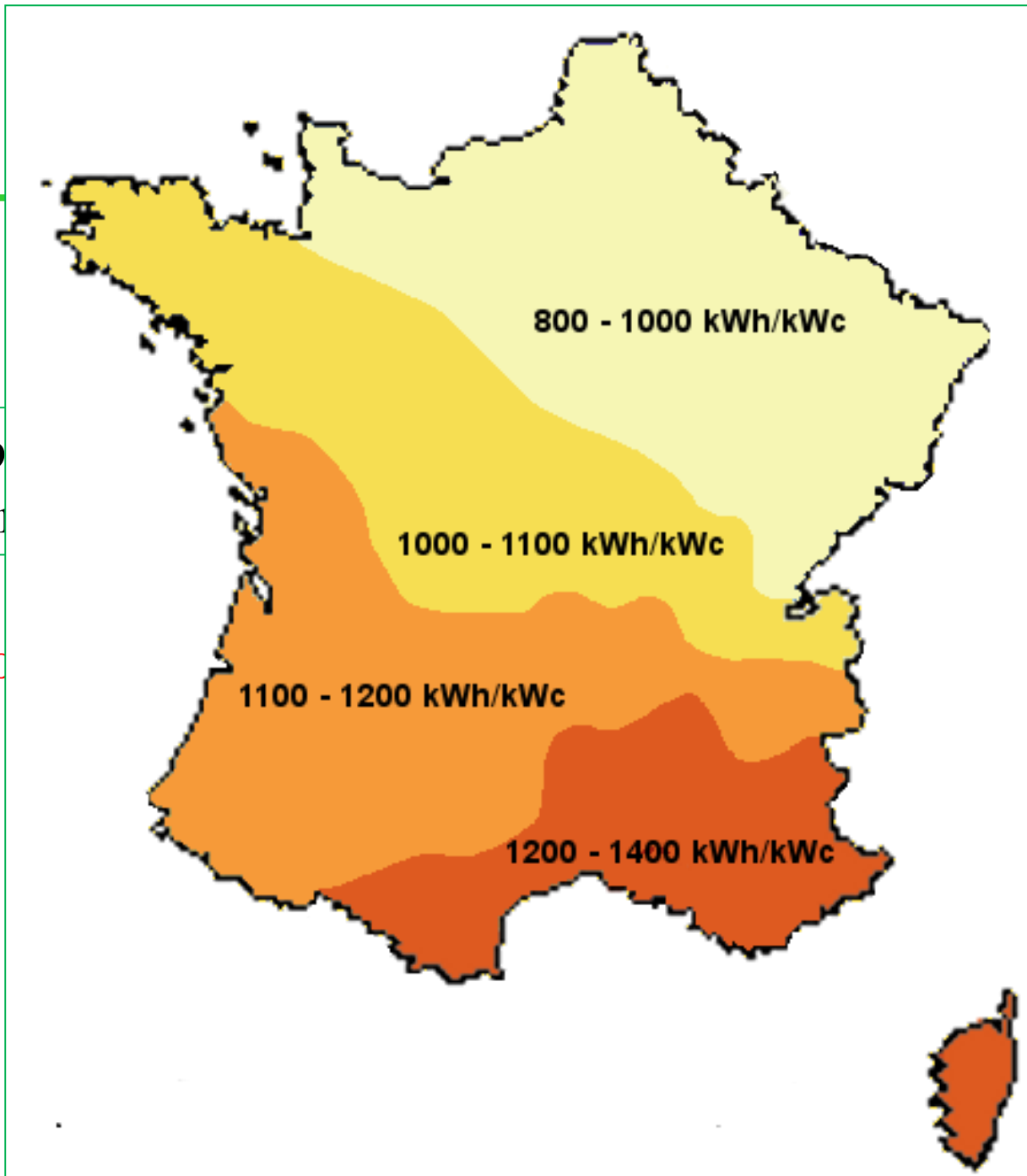
Encore quelques chiffres

Rappel : 1 Wh (Watt-Heure) = énergie fournie par une source d'énergie de puissance 1 W pendant 1 heure

- Energie solaire moyenne en France: 1000kWh/m²/an

Rapp
sou

- Energie so



C'est quoi, l'Énergie Solaire?

Encore quelques chiffres

Rappel : 1Wh (Watt-Heure) = énergie fournie par une source d'énergie de puissance 1W pendant 1 heure

- Energie solaire moyenne en France: 1000kWh/m²/an
- La terre reçoit du soleil en une heure l'énergie totale consommée mondialement en une année

C'est quoi, l'Énergie Solaire?

Encore quelques chiffres

Rappel : 1Wh (Watt-Heure) = énergie fournie par une source d'énergie de puissance 1W pendant 1 heure

- Énergie solaire moyenne en France: 1000kWh/m²/an.
- La terre reçoit du soleil en une heure l'énergie totale consommée mondialement en une année.
- Autrement dit: la terre reçoit du soleil 10 000 fois plus de puissance que la puissance totale consommée.

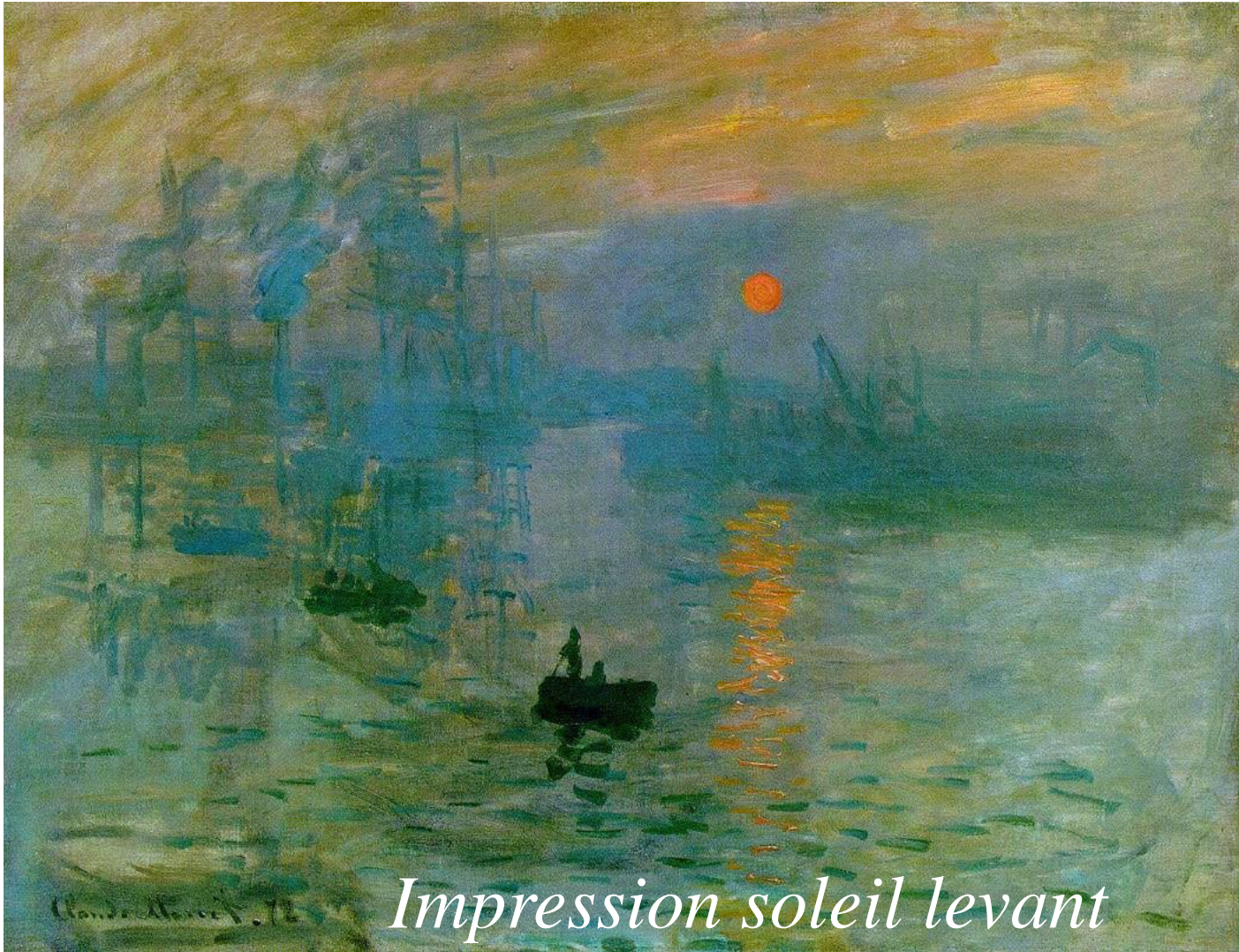
C'est quoi, l'Énergie Solaire?

Encore quelques chiffres

Consommation annuelle française d'énergie *électrique*
= environ un cinquante-millième de l'énergie solaire
lumineuse totale reçue annuellement par la France

*Mais ne pas oublier le rendement de conversion de
l'énergie lumineuse en l'énergie « utile »...*

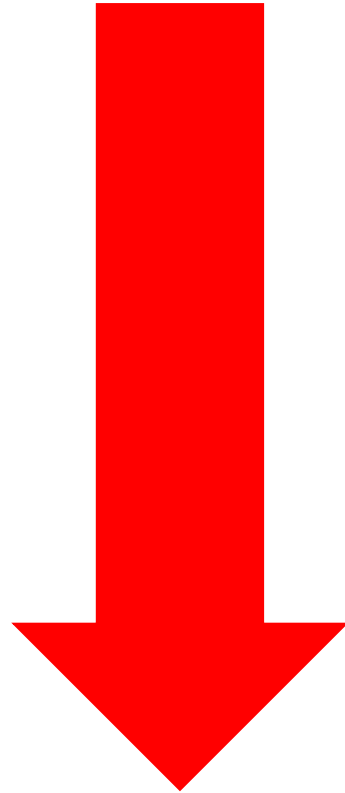
Toute forme d'énergie sur terre provient de l'énergie solaire lumineuse...



Impression soleil levant

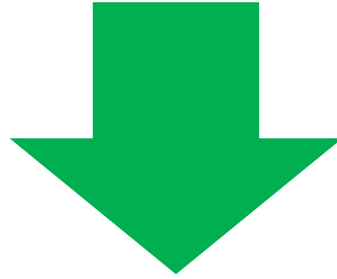
...mises à part l'énergie nucléaire et la géothermie

Énergie solaire lumineuse



Énergie électrique

Énergie solaire lumineuse

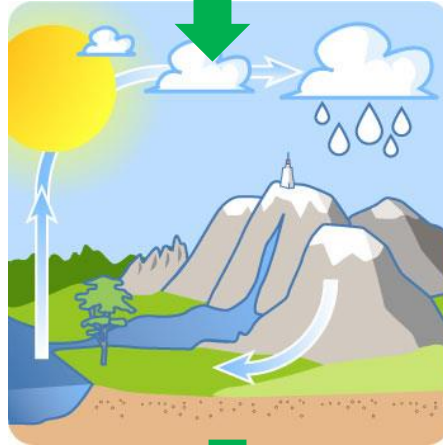
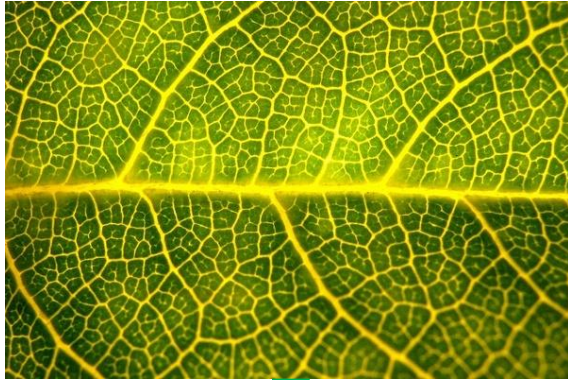


Procédés traditionnels:
étapes intermédiaires



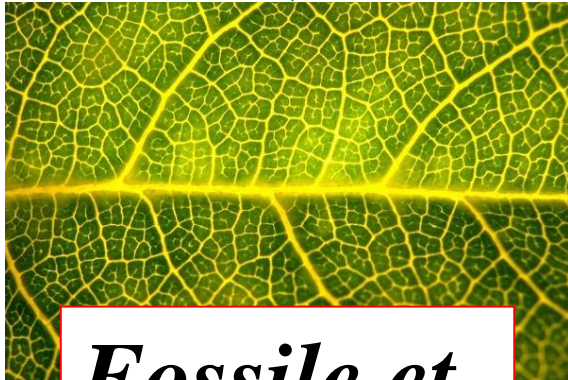
Énergie électrique

Énergie solaire lumineuse

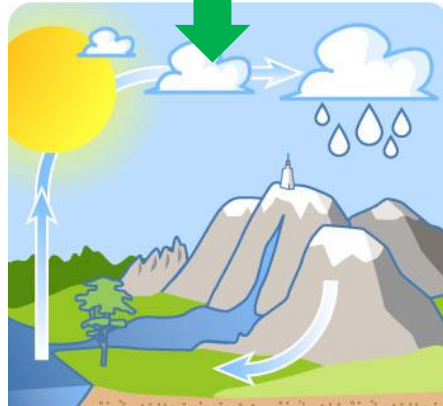


Énergie électrique

Énergie solaire lumineuse



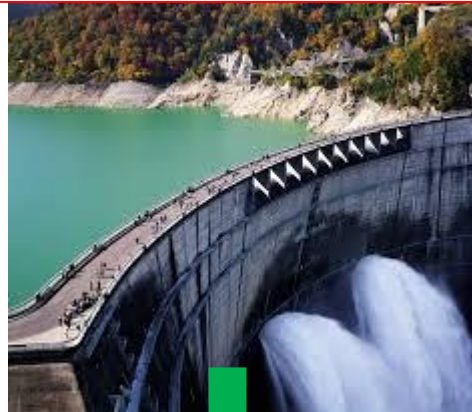
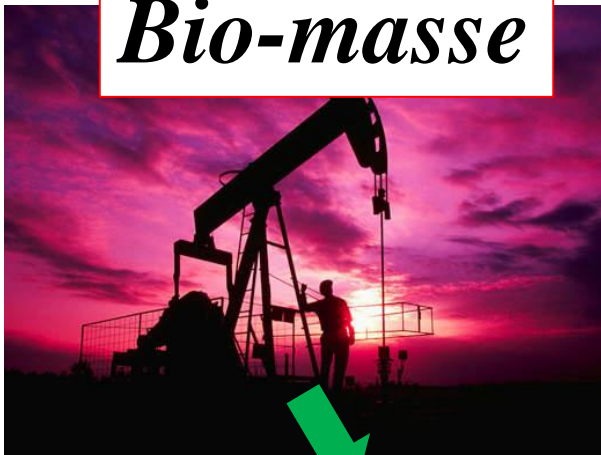
*Fossile et
Bio-masse*



Hydraulique



Eolien



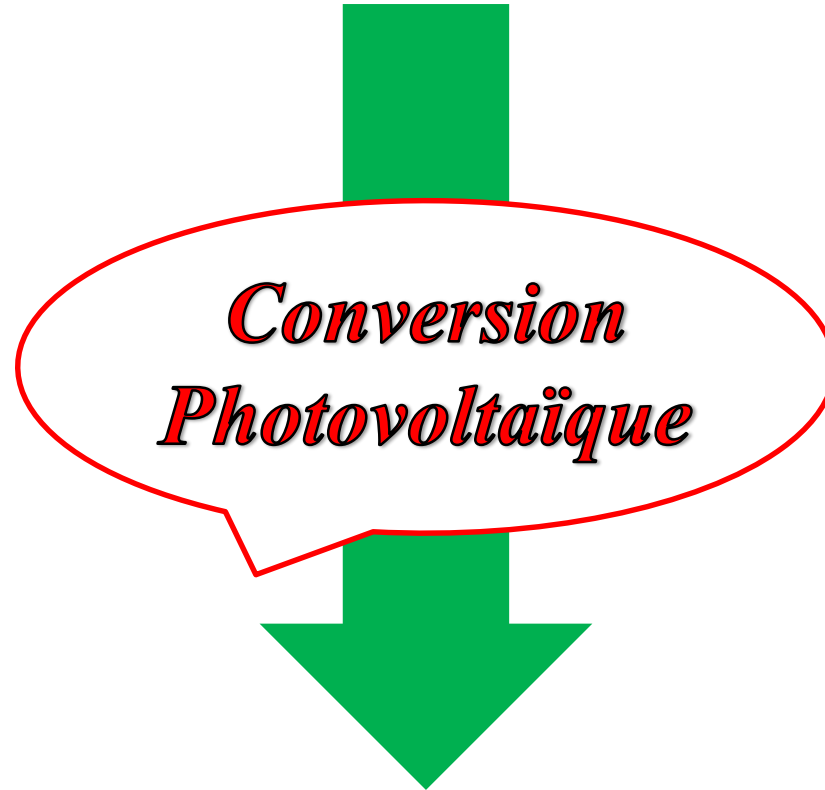
Énergie électrique

Énergie solaire lumineuse



Énergie électrique

Énergie solaire lumineuse



Énergie électrique

PLAN

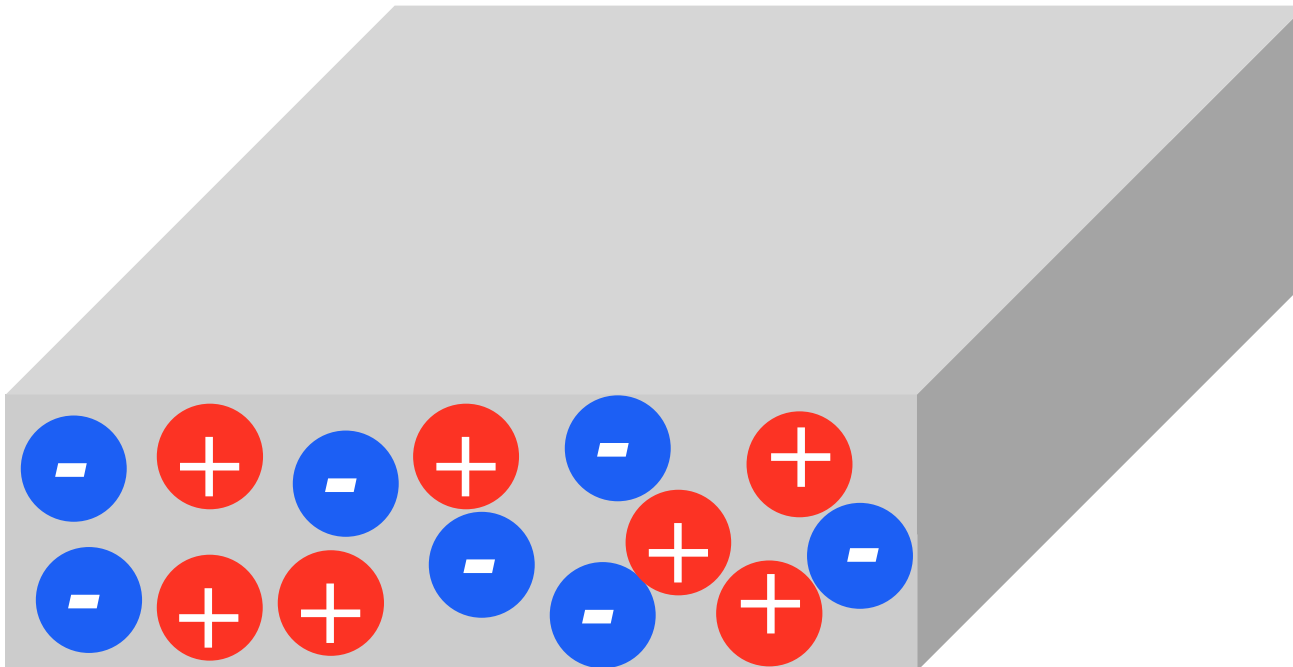
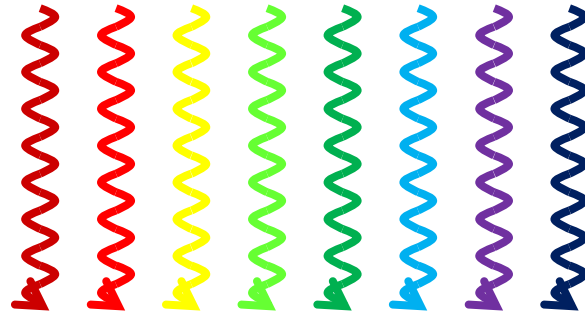
- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- **Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques**
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Conversion photovoltaïque: principes physiques

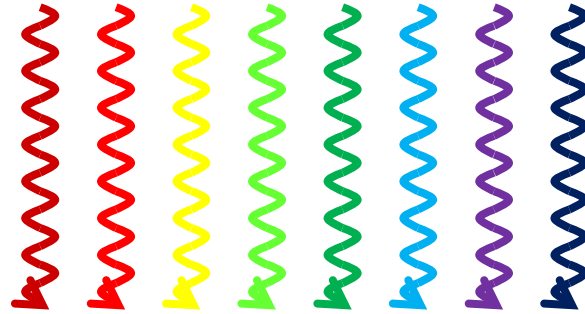
Un matériau Isolant, Semi-conducteur



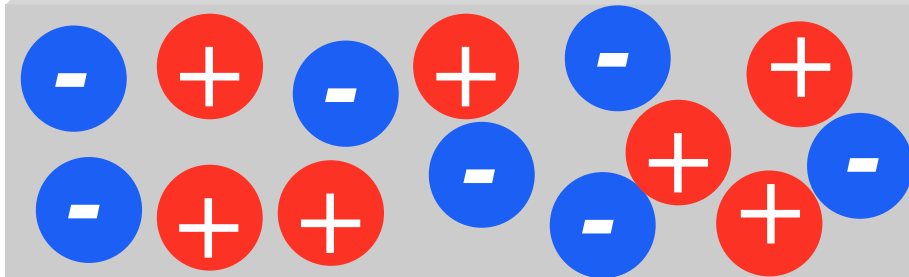
Conversion photovoltaïque: principes physiques



Conversion photovoltaïque: principes physiques

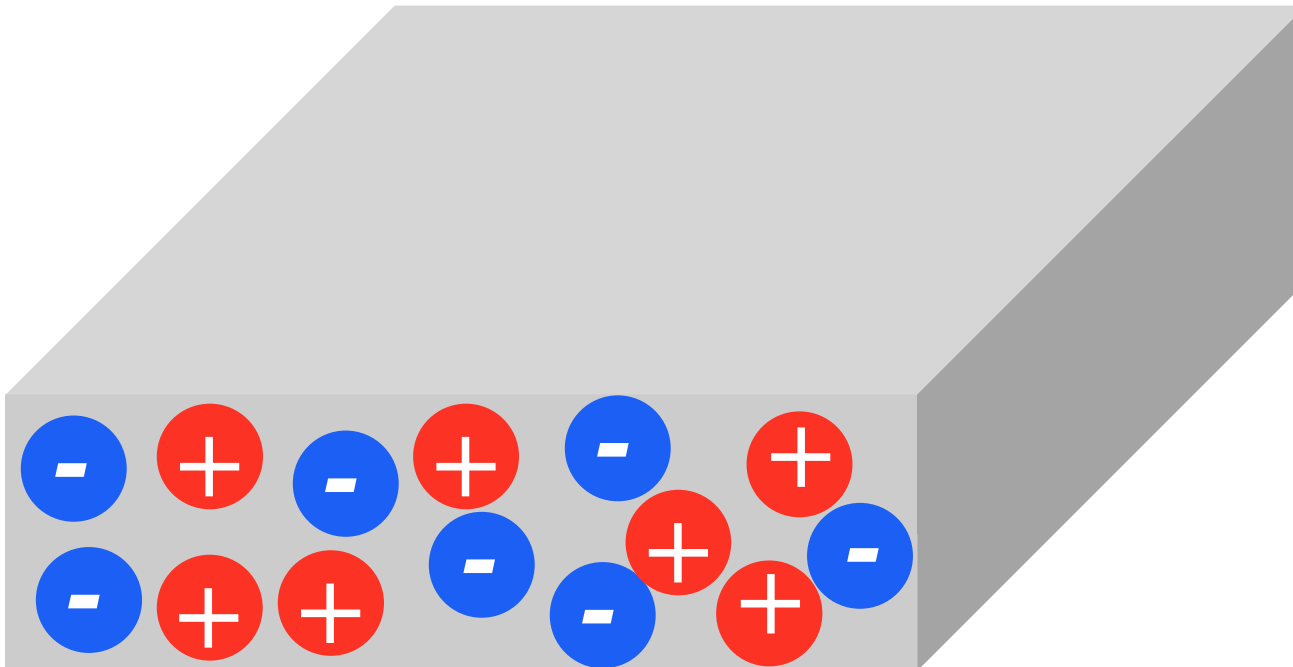


Effet Photoélectrique

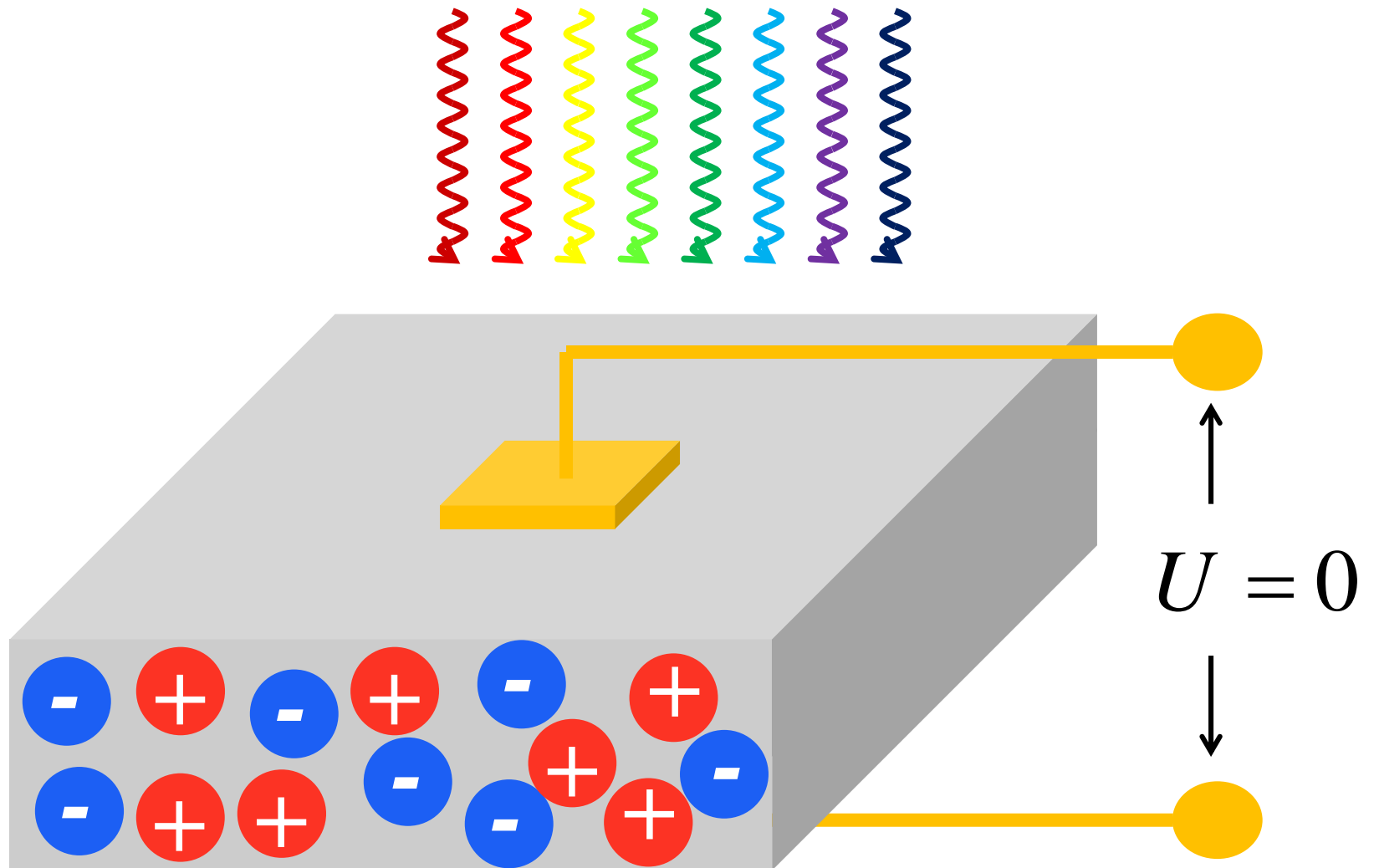


Conversion photovoltaïque: principes physiques

Le matériau devient conducteur électrique:
Photoconduction

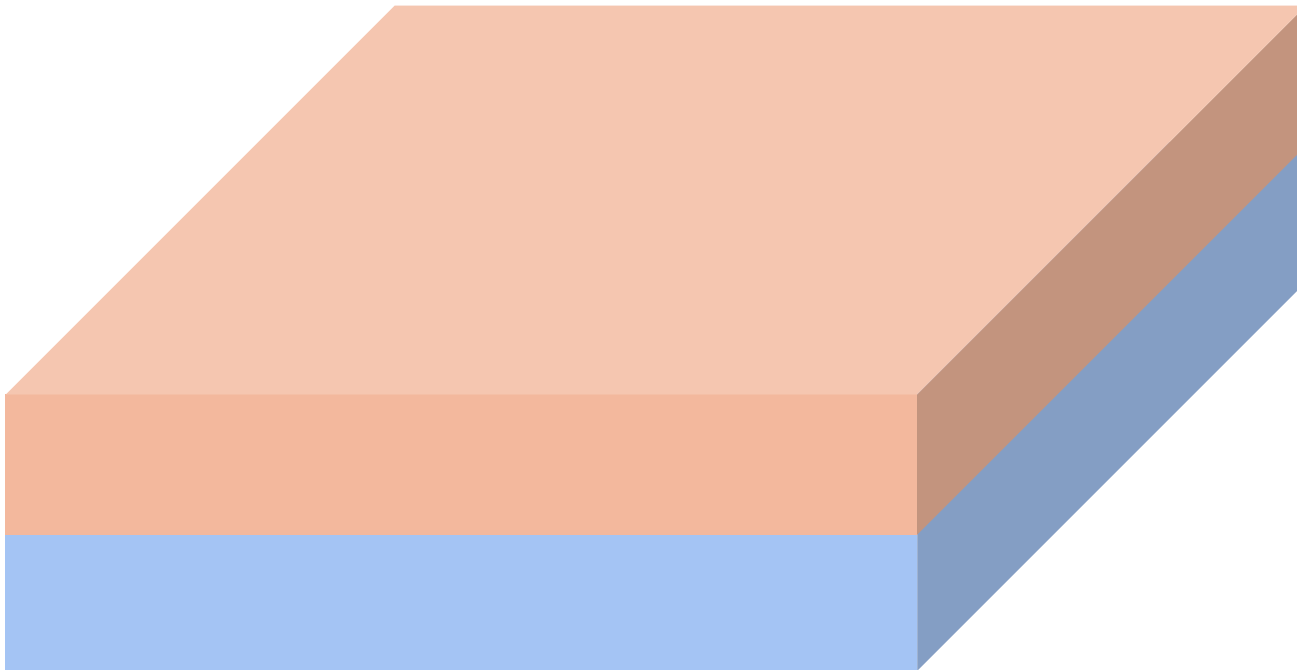


Conversion photovoltaïque: principes physiques

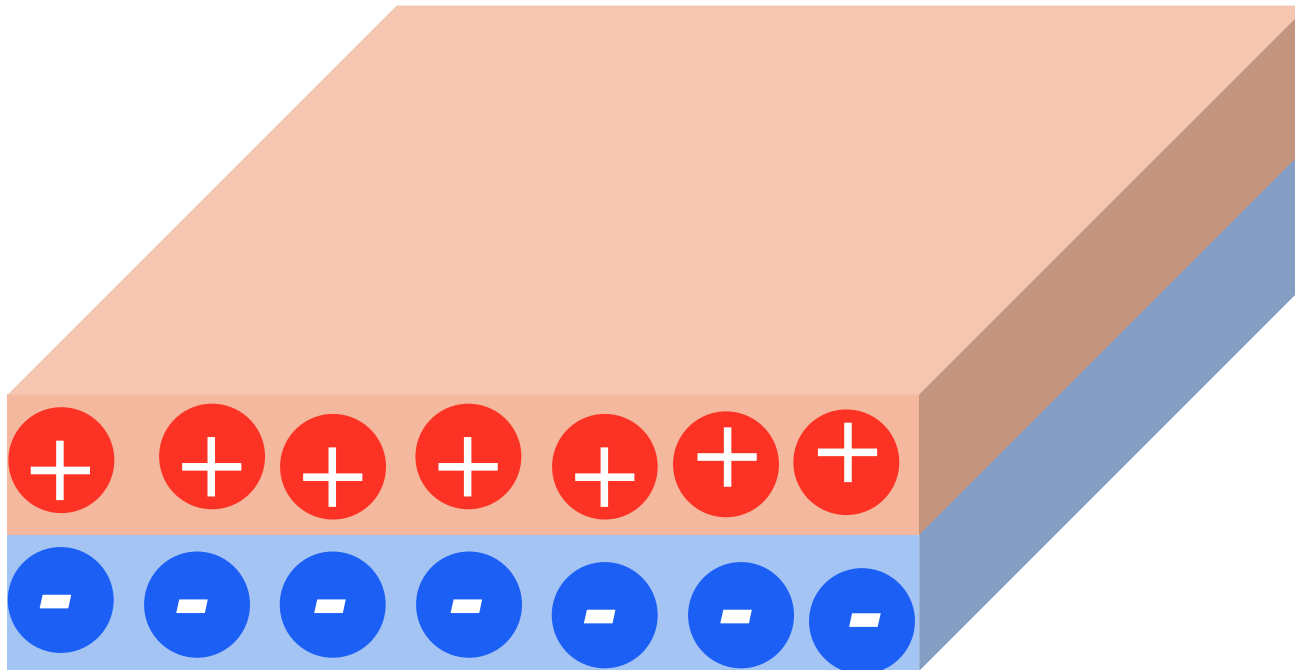
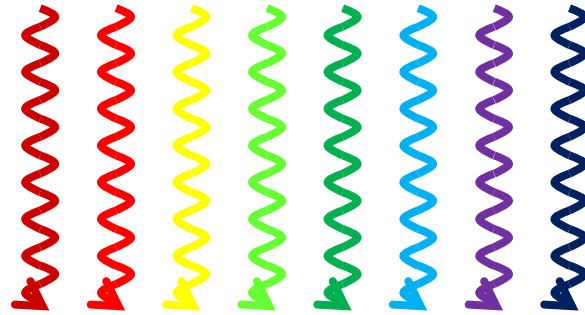


Conversion photovoltaïque: principes physiques

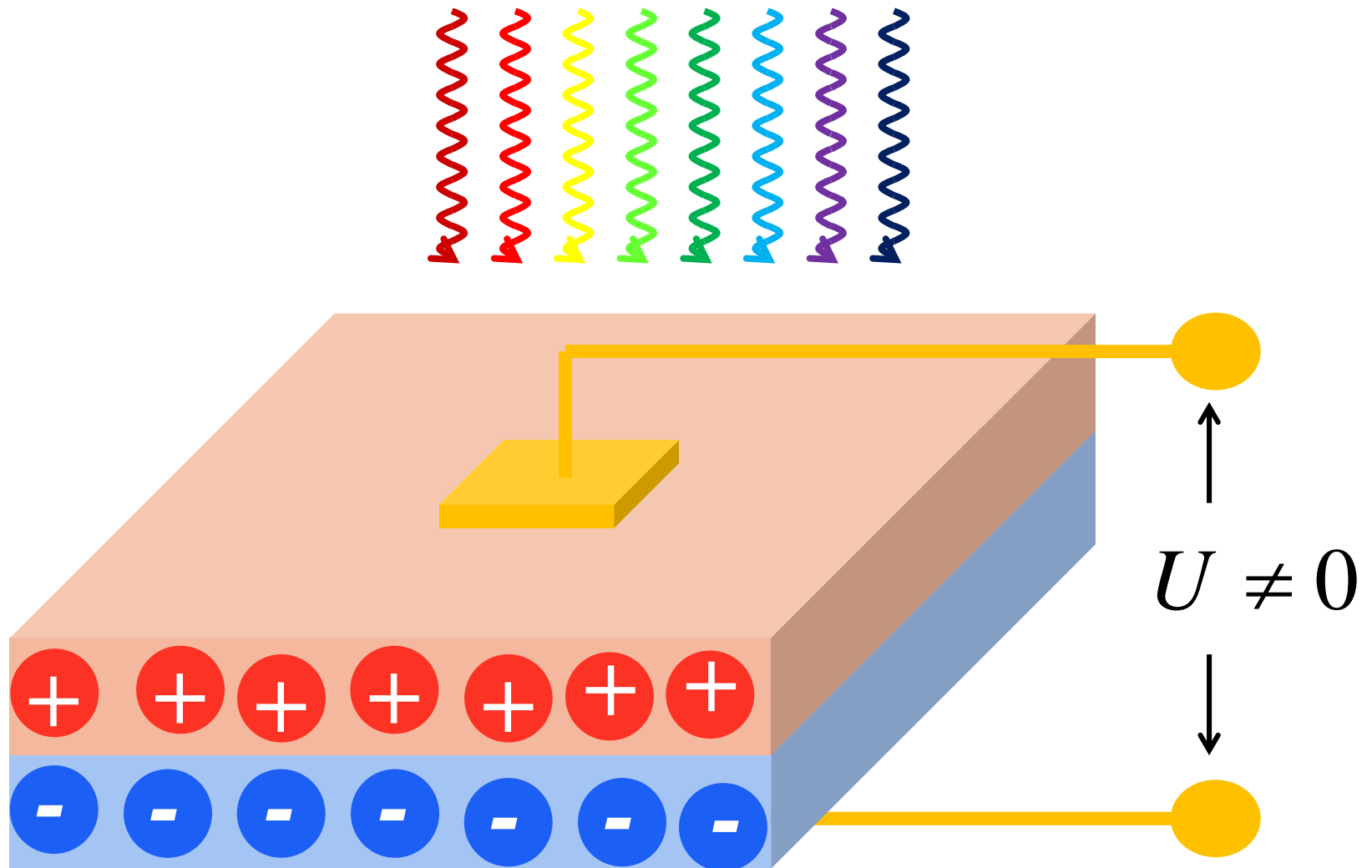
Deux matériaux Isolants, Semi-conducteurs



Conversion photovoltaïque: principes physiques



Conversion photovoltaïque: principes physiques



PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- **La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque**
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

La cellule solaire photovoltaïque

Bref historique

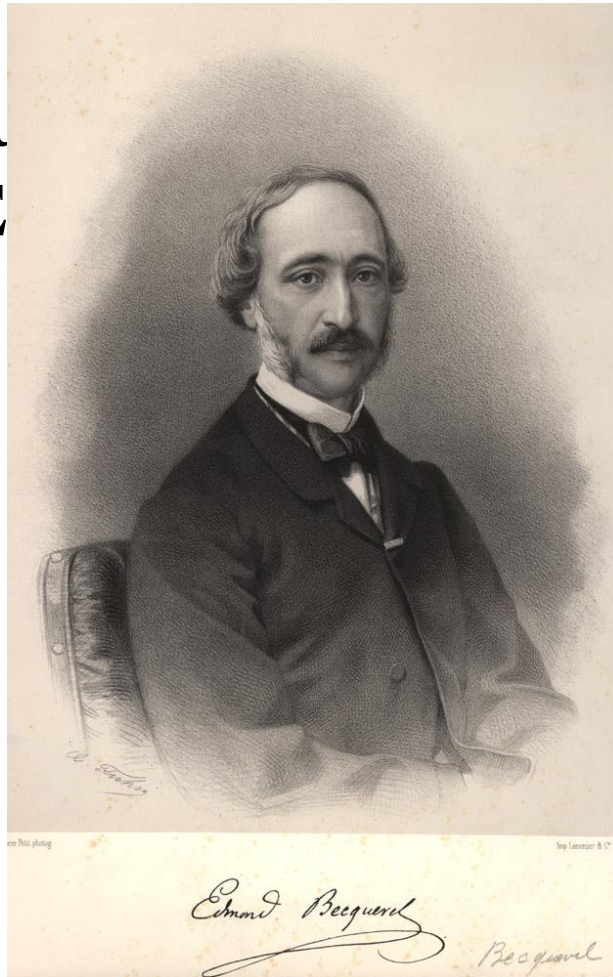
- Effet photovoltaïque démontré pour la première fois par le physicien français **Edmond Becquerel** en 1839 à 19 ans

La cellule solaire photovoltaïque

Bref historique

- Effet photovoltaïque découvert par le physicien français E

première fois par le
en 1839 à 19ans



La cellule solaire photovoltaïque

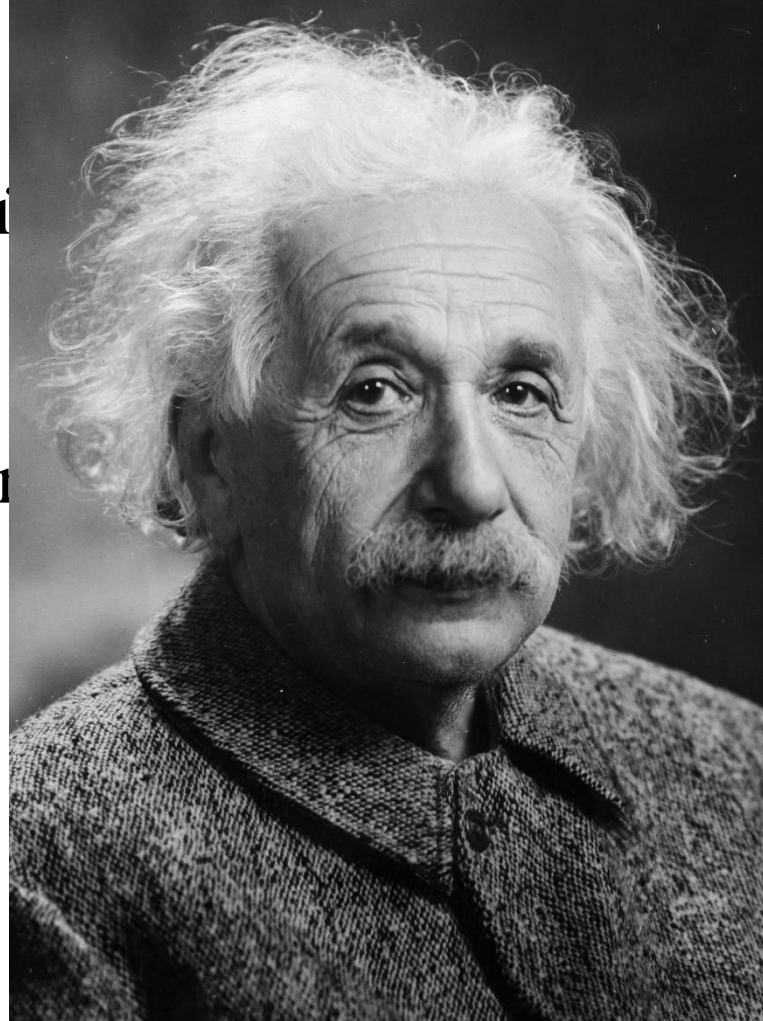
Bref historique

- Effet photovoltaïque démontré pour la première fois par le physicien français **Edmond Becquerel** en 1839 à 19ans
- Explication théorique: **Albert Einstein** en 1905

La cellule solaire photovoltaïque

Bref historique

- Effet photovoltaïque découvert par le physicien français
- Explication théorique



mière fois par le
1839 à 19ans

1905

La cellule solaire photovoltaïque

Bref historique

- Effet photovoltaïque démontré pour la première fois par le physicien français **Edmond Becquerel** en 1839 à 19ans
- Explication théorique: **Albert Einstein** en 1905
- 1^{ère} batterie solaire silicium démontrée par Daryl Chapin et Gerald Pearson (Laboratoires Bell) en 1954

La cellule solaire photovoltaïque

Bref historique (suite)

- 1^{ère} application spatiale en 1958 (satellite Vanguard 1):
coûts élevés
- Applications terrestres à partir des années 1970:
baisse des coûts

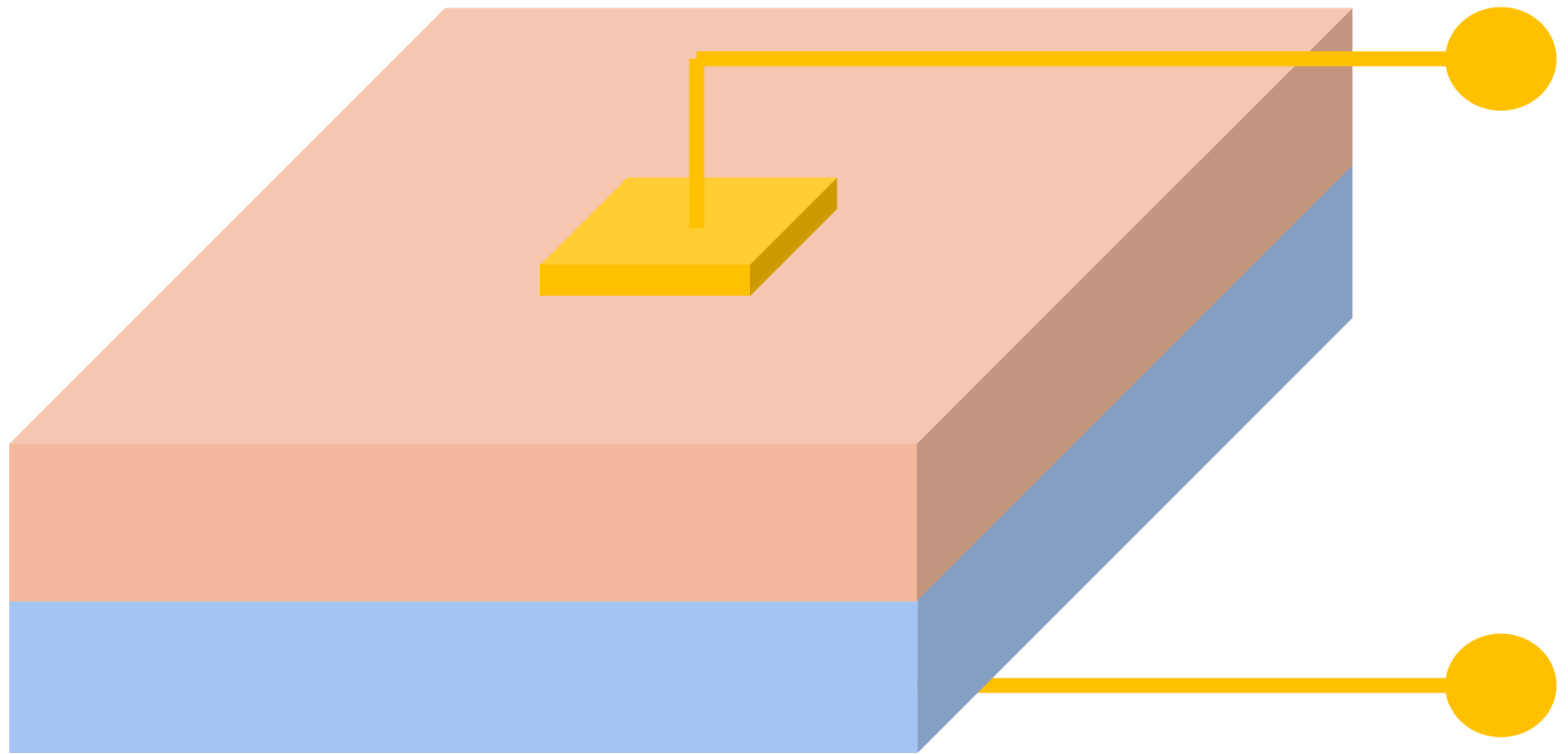
Depuis lors: un volume considérable de travaux de recherche et de développements industriels

Carrier collection efficiencies in amorphous hydrogenated silicon Schottky barrier solar cells

P. Viktorovitch, G. Moddel, J. Blake, and William Paul
*Division of Applied Sciences, Harvard University, Cambridge,
Massachusetts 02138*

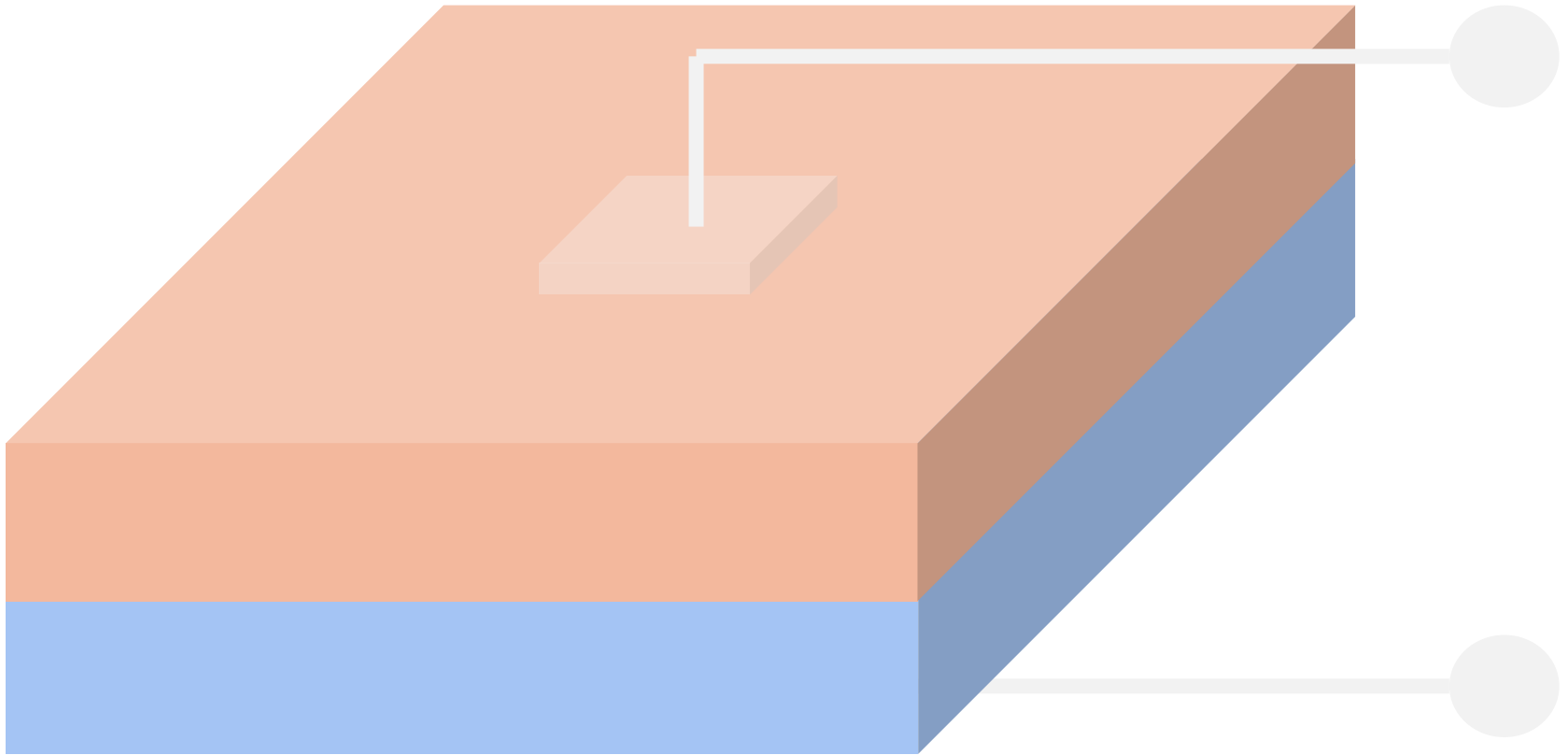
**Citation: Journal of Applied Physics 52, 6203 (1981);
doi: 10.1063/1.328559**

La cellule solaire photovoltaïque



La cellule solaire photovoltaïque

Le cœur, la partie active: matériau semiconducteur



La cellule solaire photovoltaïque

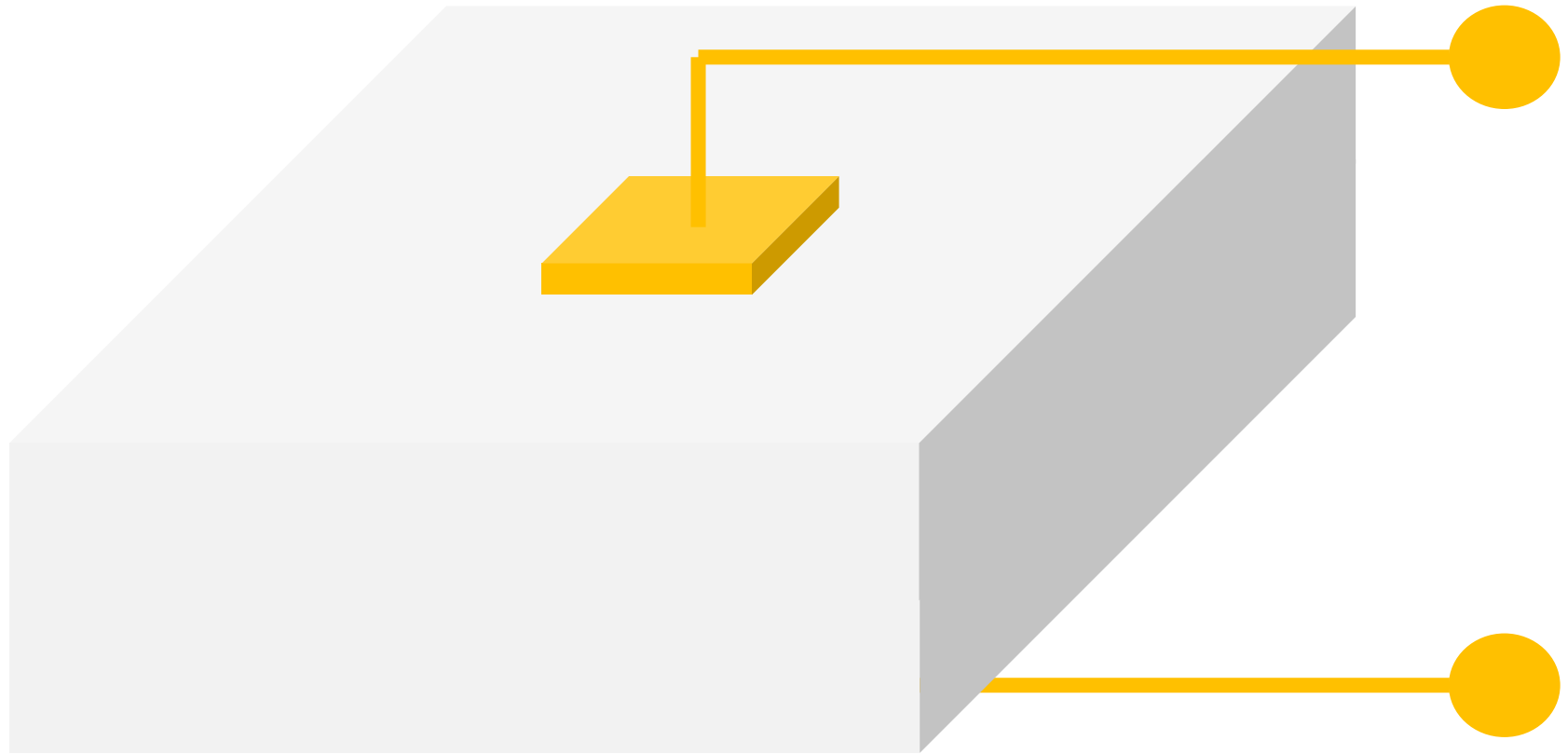
Le cœur, la partie active: matériau semiconducteur



- Le silicium (plus additifs P, B... de dopage): 95% du parc
- Les semiconducteurs composés: In, P, As, Al, Ga, Cd, Te, Cu, Se,...: cellules à haut rendement
- Les semiconducteurs organiques: molécules organiques (C, H, N)

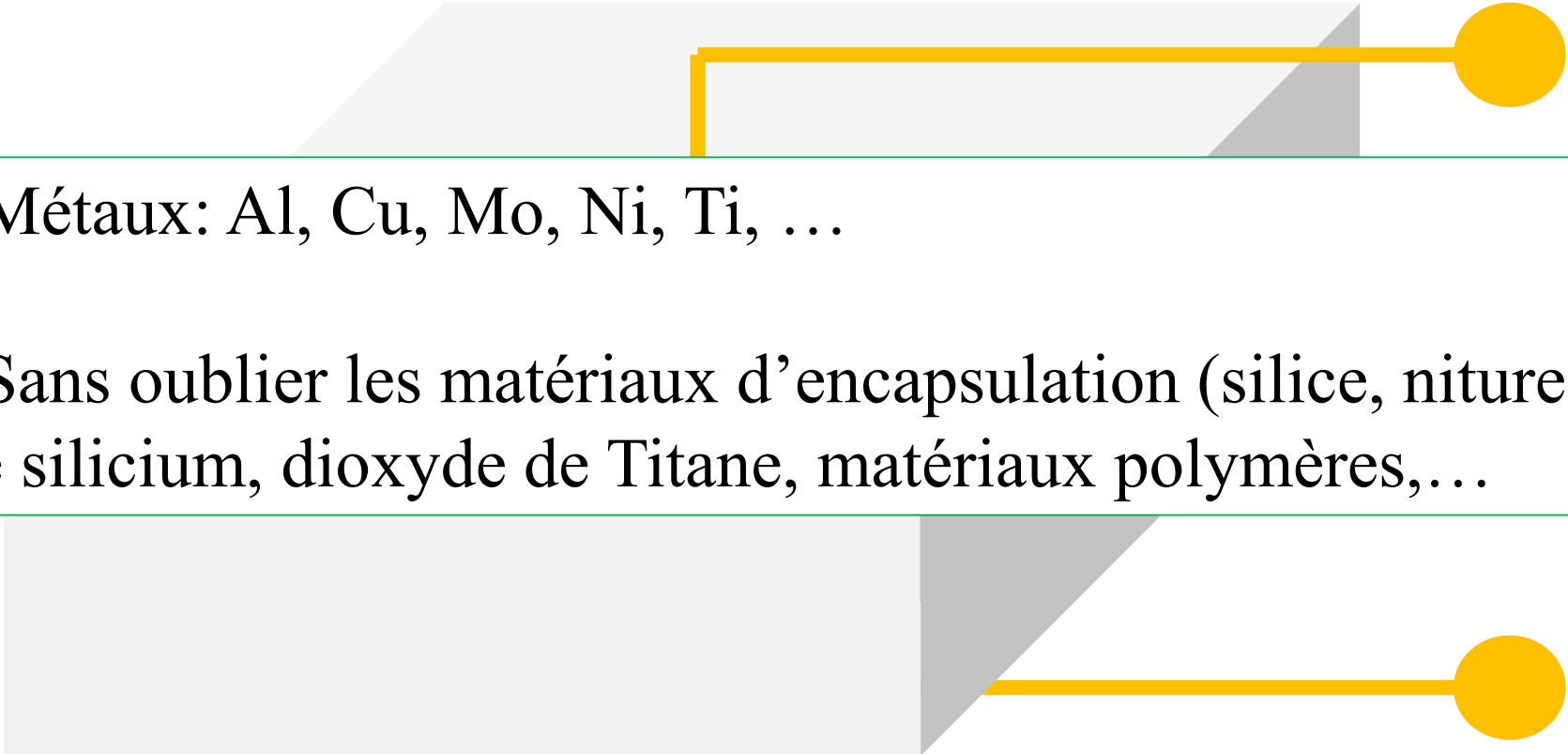
La cellule solaire photovoltaïque

Les électrodes de contact électrique



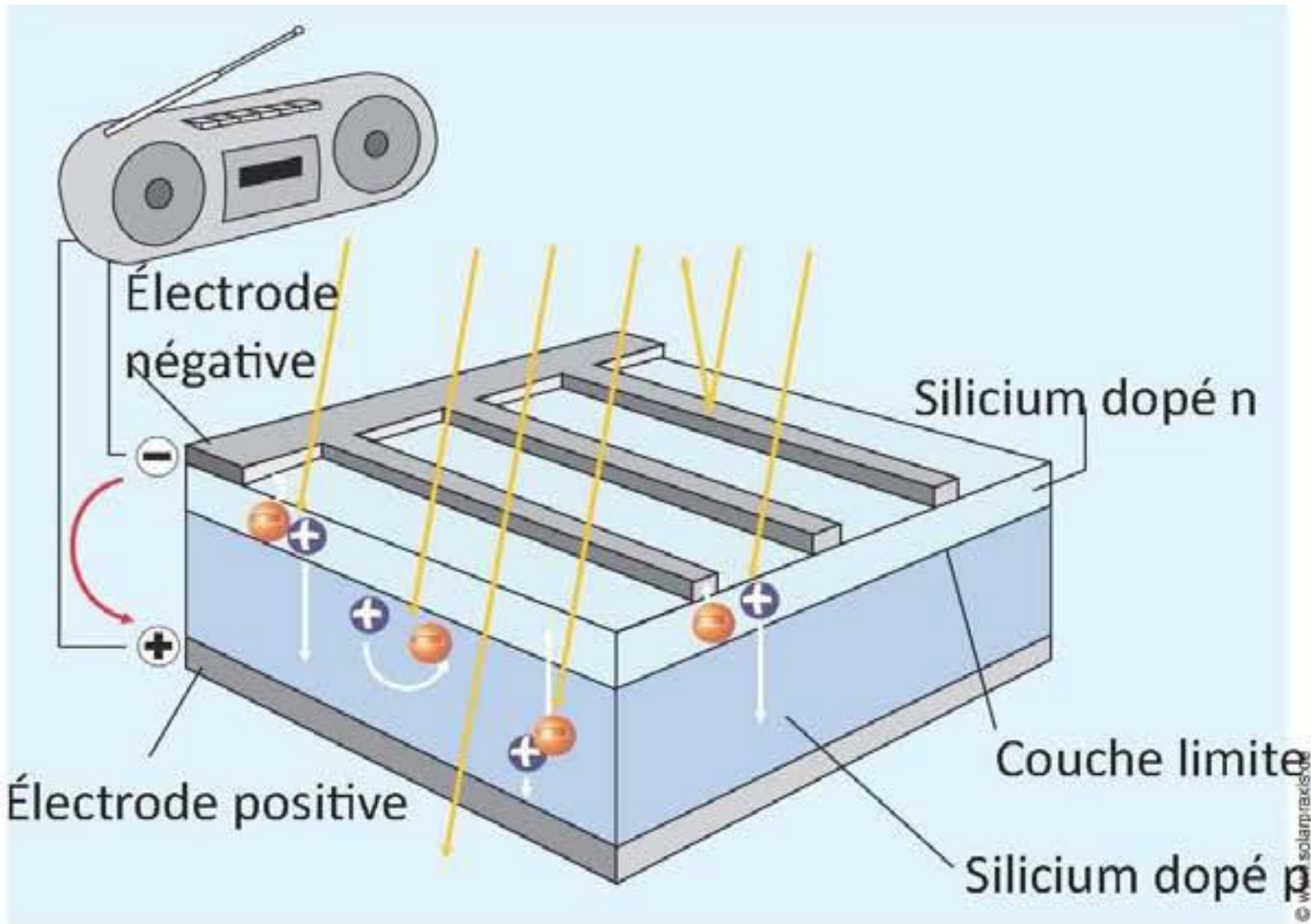
La cellule solaire photovoltaïque

Les électrodes de contact électrique

- 
- The diagram shows a cross-section of a solar cell. A central grey rectangular layer represents the semiconductor. On top and bottom surfaces, there are lighter grey trapezoidal regions representing contact electrodes. Yellow lines represent electrical connections extending from these electrodes to yellow circular terminals on the right side of the cell.
- Métaux: Al, Cu, Mo, Ni, Ti, ...
 - Sans oublier les matériaux d'encapsulation (silice, niture de silicium, dioxyde de Titane, matériaux polymères,...

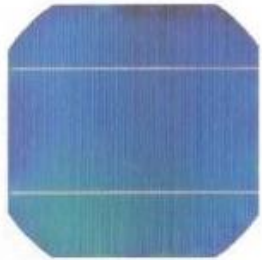
La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : 95% du parc

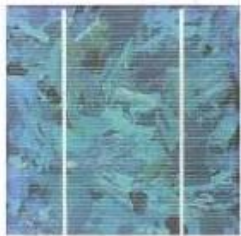


La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : 95% du parc



Silicium cristallin: rendement 20%



Silicium poly-cristallin: rendement 15%



Silicium amorphe: rendement 10%

Taille: 10 à 15cm

Épaisseur: 1 à 200 μ m

La cellule solaire photovoltaïque

Mais, au fait, c'est quoi le **rendement**?

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Energie électrique produite}}{\text{Energie lumineuse reçue}}$$

La cellule solaire photovoltaïque

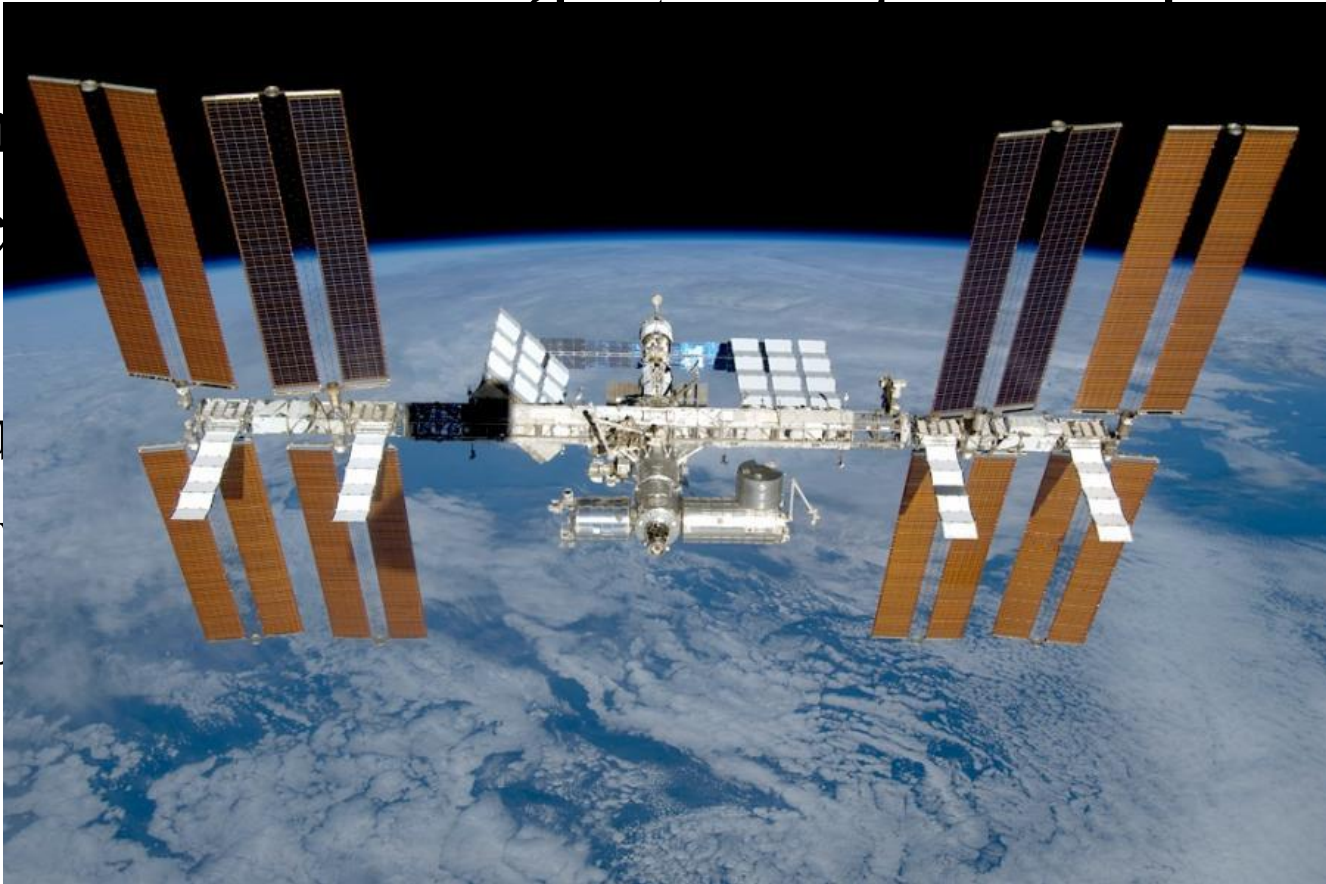
Le rendement est un paramètre clef

- Pour une puissance électrique fournie donnée, le nombre, ou la surface, ou le poids de cellules requis varie comme l'inverse du rendement
- Cellules solaires spatiales à haut rendement: $> 50\%$ (structures complexes multi-couches à base de semiconducteurs composés de coût élevé)

La cellule solaire photovoltaïque

Le rendement est un paramètre clef

- Pour le nombre varie c
- Cellu (struct semico



le
es requis
> 50%
e

La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : fabrication

Carrière de sable silice à Fontainebleau



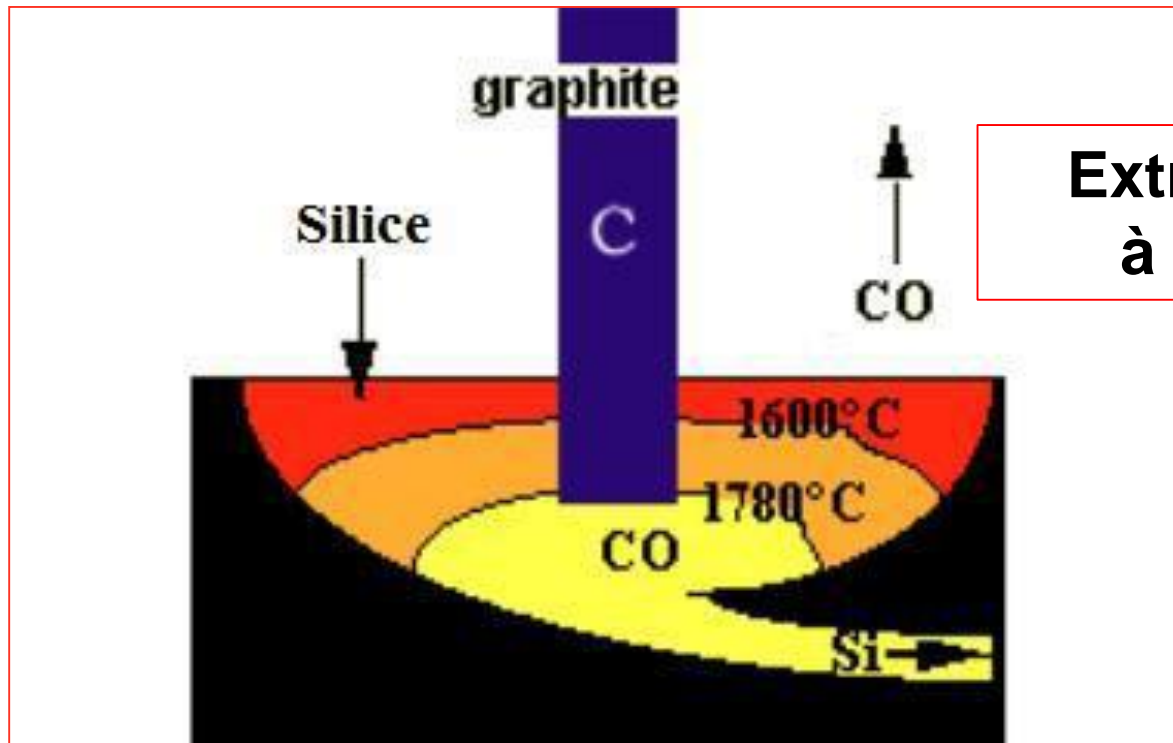
Matière première: le sable



Silice: SiO_2
Dioxyde de silicium

La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : fabrication



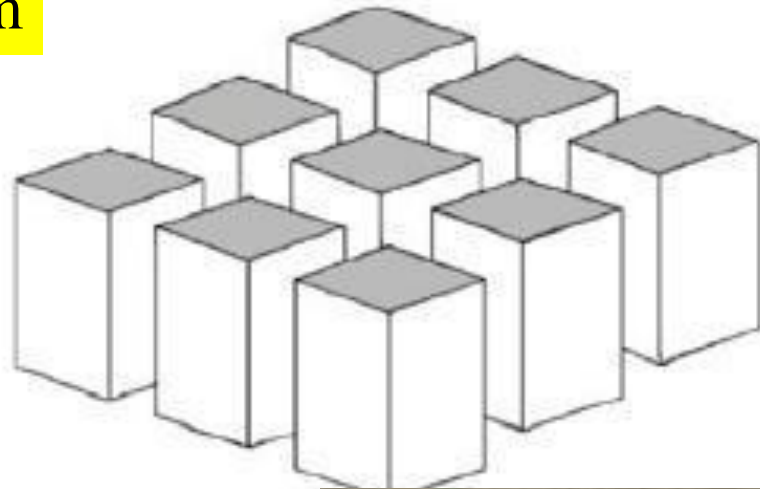
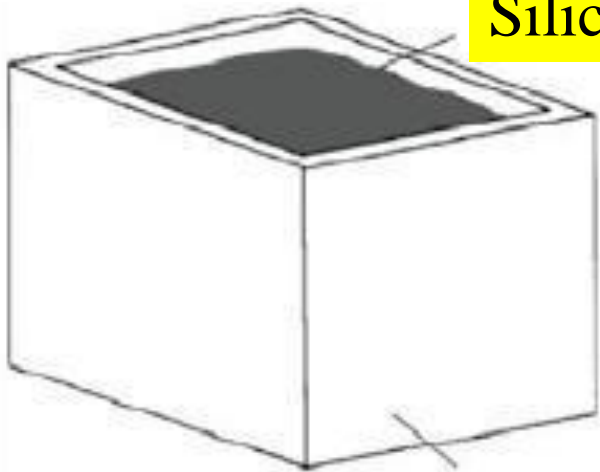
**Extraction du silicium
à partir de la silice**

Puissance du four jusqu'à 30 MW!

La cellule solaire photovoltaïque

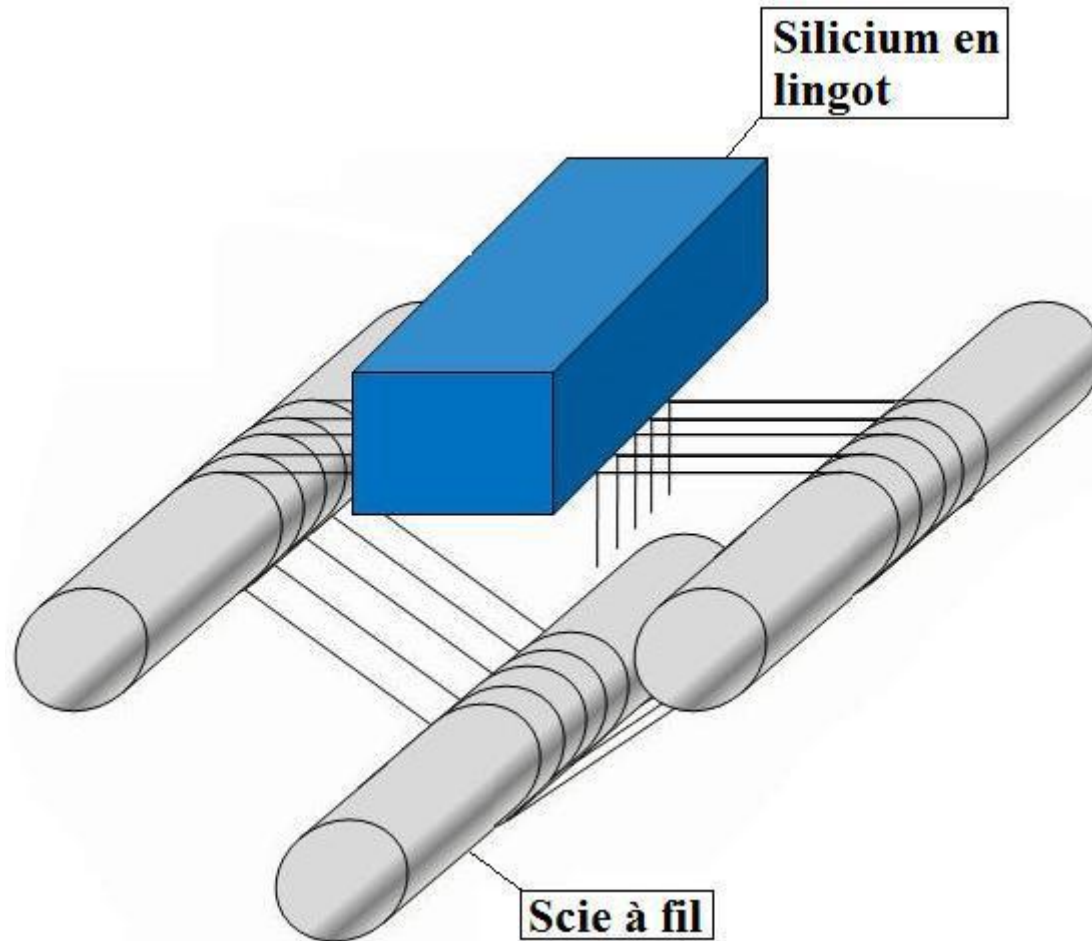
Cellules solaires silicium : fabrication

Silicium



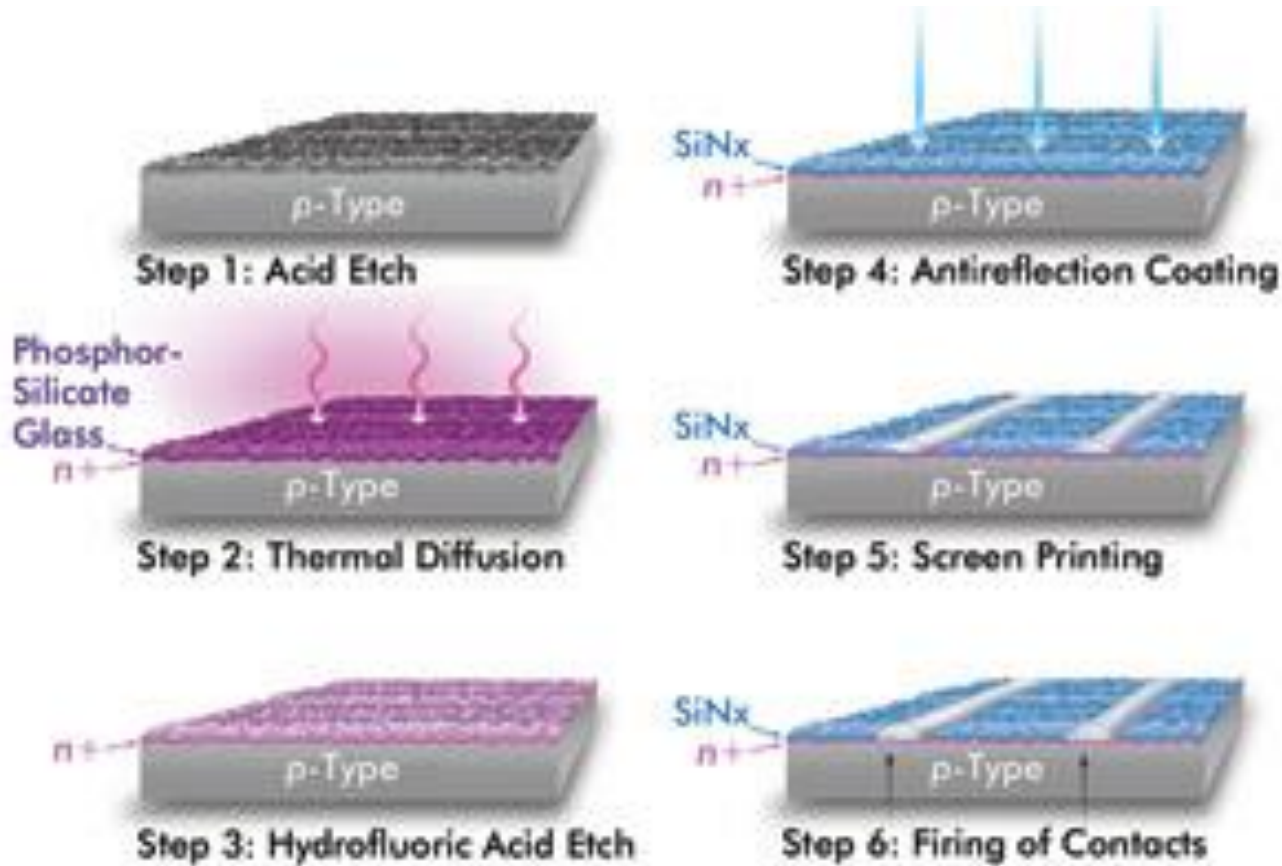
La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : fabrication



La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : fabrication



Technologie photo-lithographique

La cellule solaire photovoltaïque

Cellules solaires silicium : fabrication



Salle blanche

La cellule solaire photovoltaïque

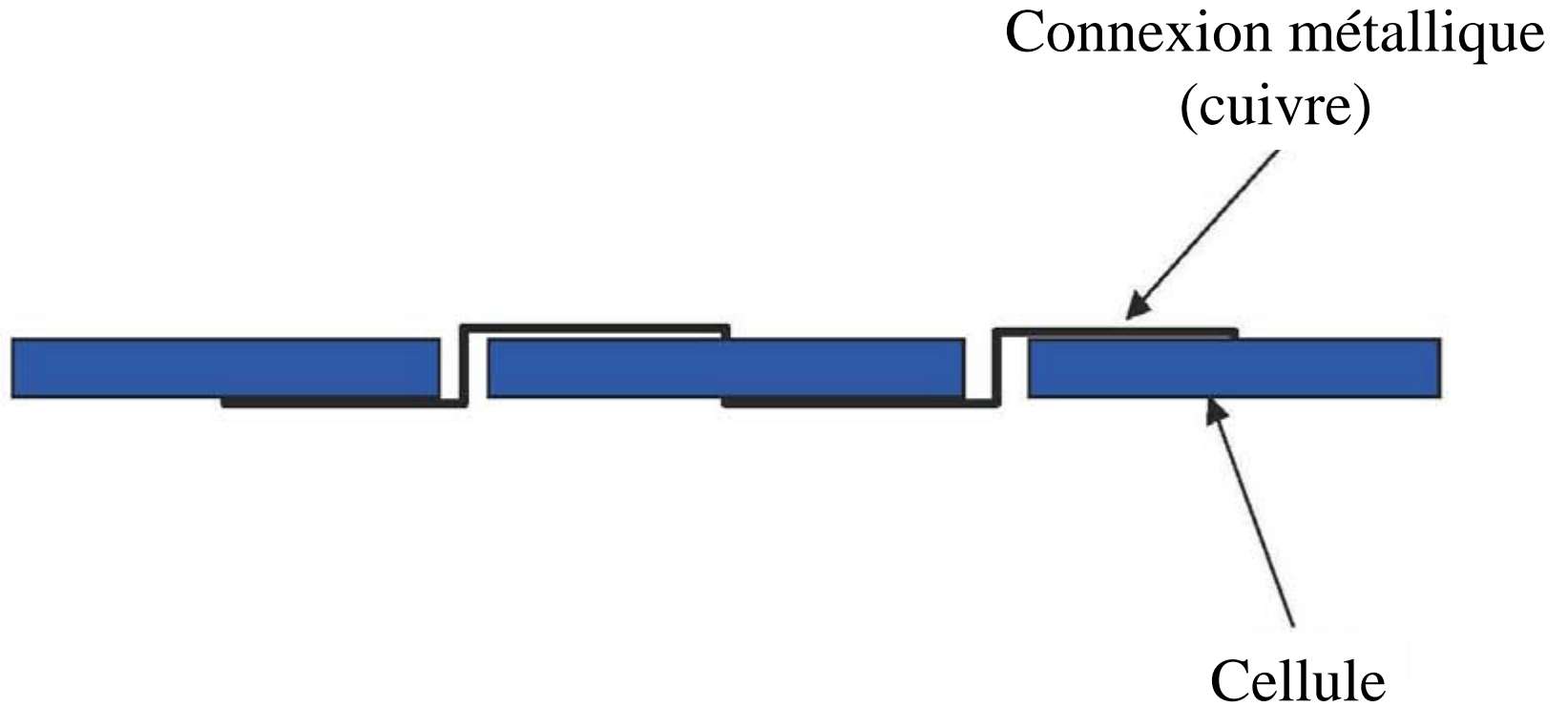
Production énergétique, électrique d'une cellule



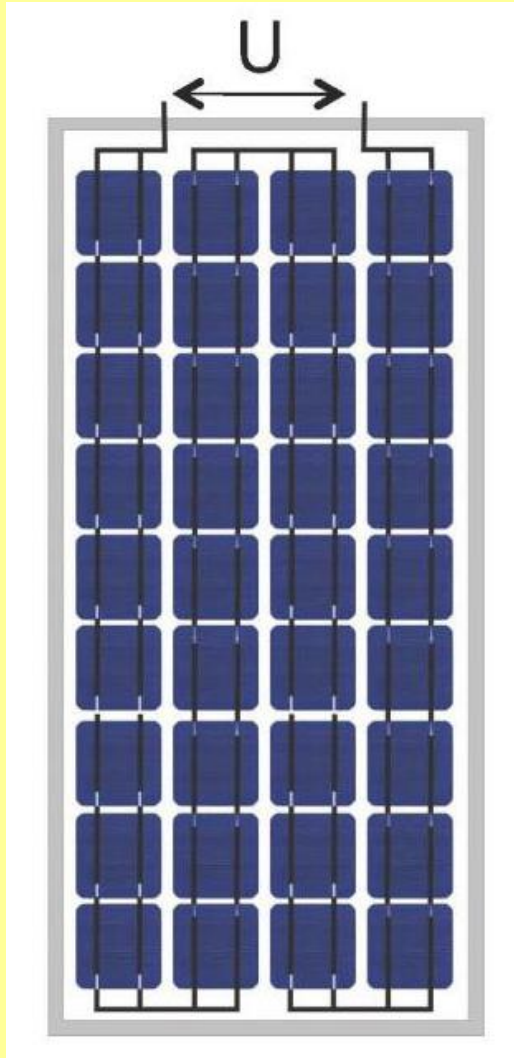
←————→
10-15 cm

- 3 à 4 ampères
- 0,8 Volt environ
- 3 W environ

Le panneau solaire photovoltaïque



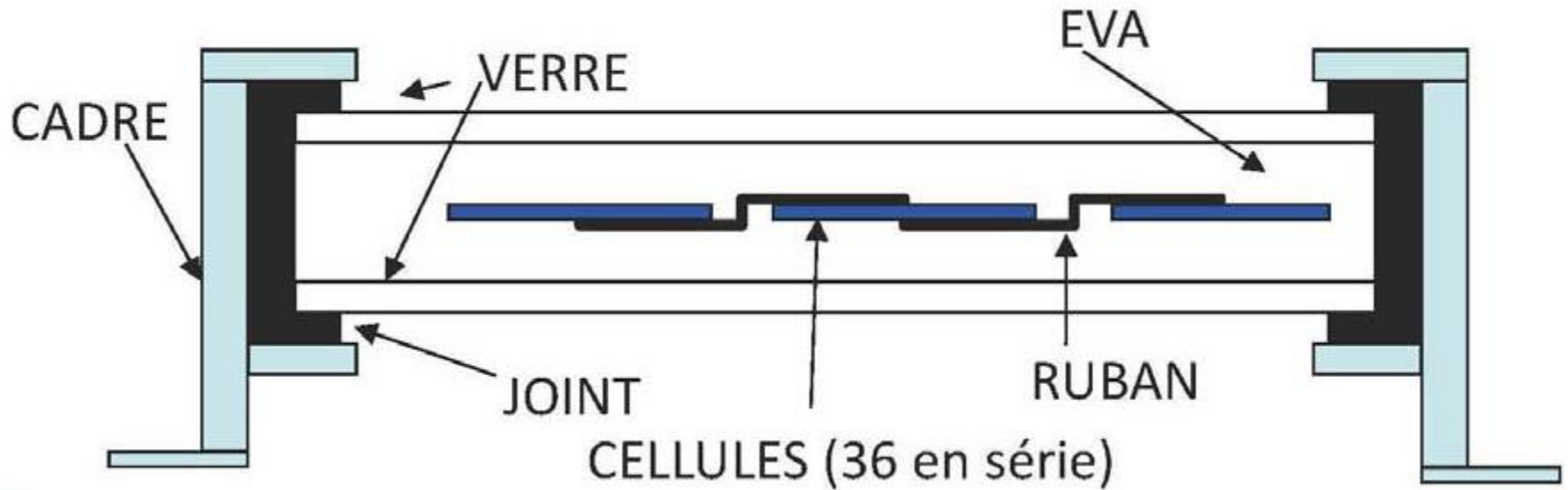
Le panneau solaire photovoltaïque



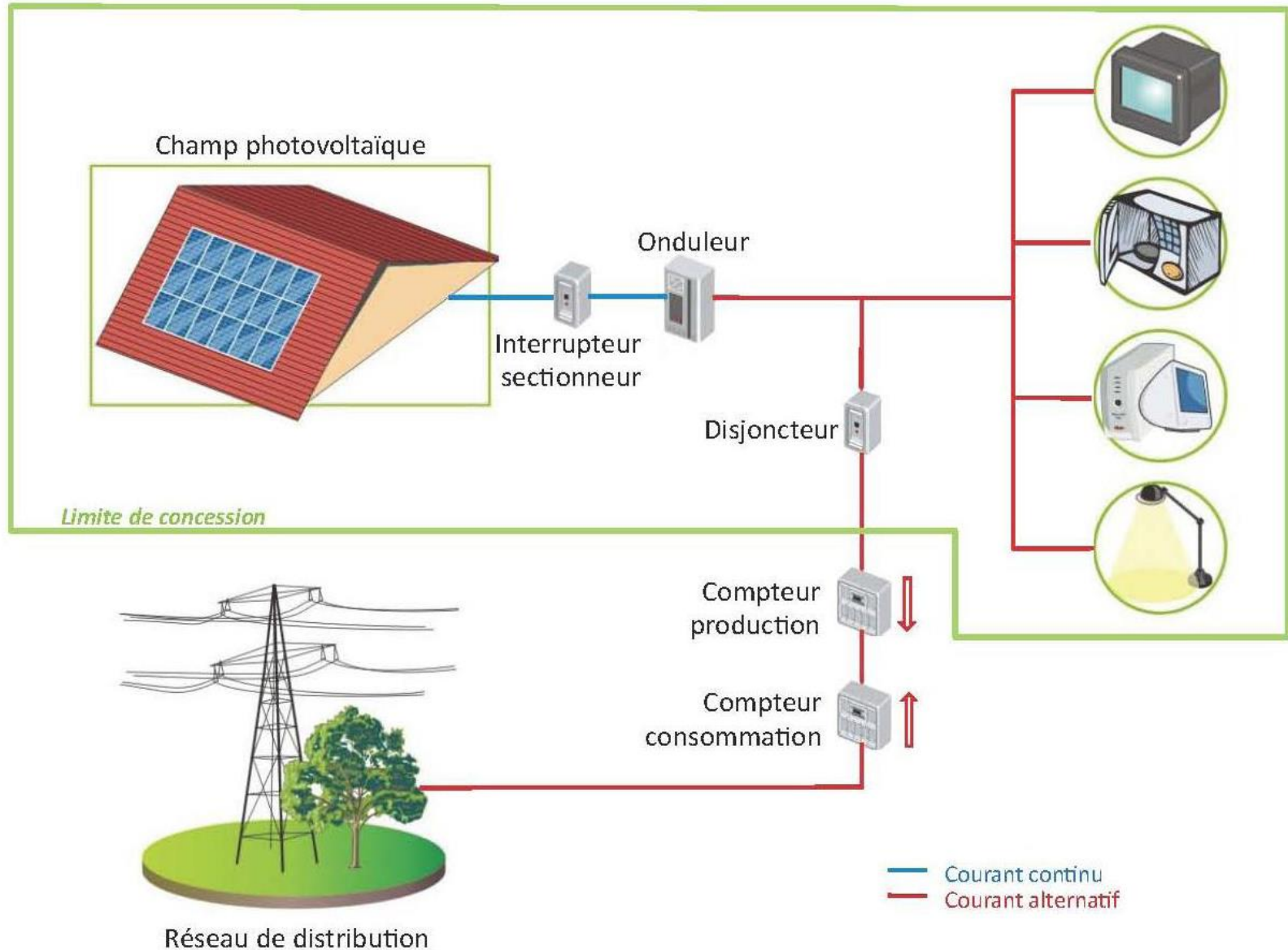
1m² environ

- 3 à 4 ampères
- 20-25 Volts
- 100W environ

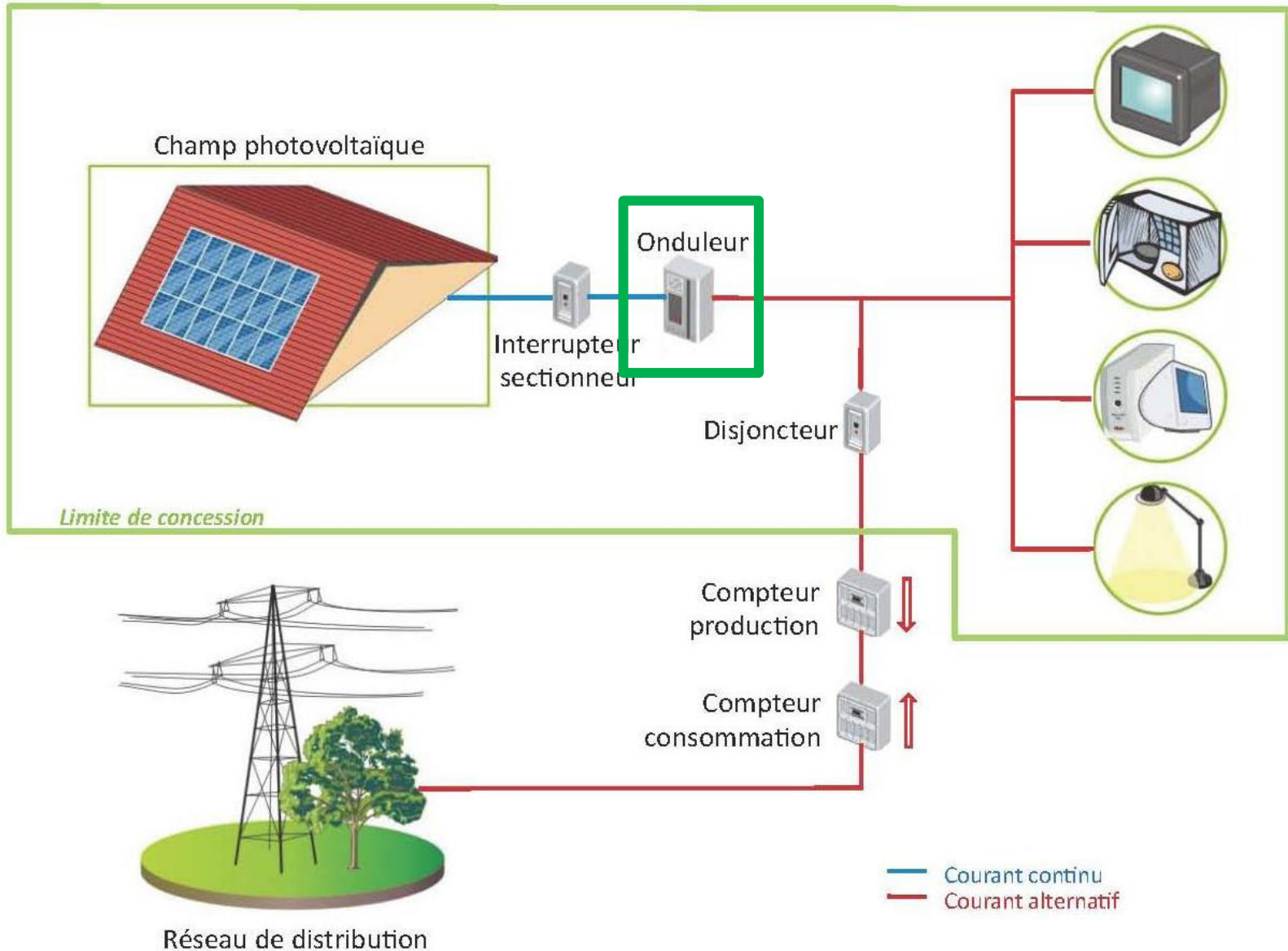
Le panneau solaire photovoltaïque



Le panneau solaire photovoltaïque



Le panneau solaire photovoltaïque



PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- **Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque**
- Données énergétiques
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Les enjeux de la recherche photovoltaïque

- Augmentation du rendement
- Réduction des coûts

Les enjeux de la recherche photovoltaïque

Nouveaux matériaux

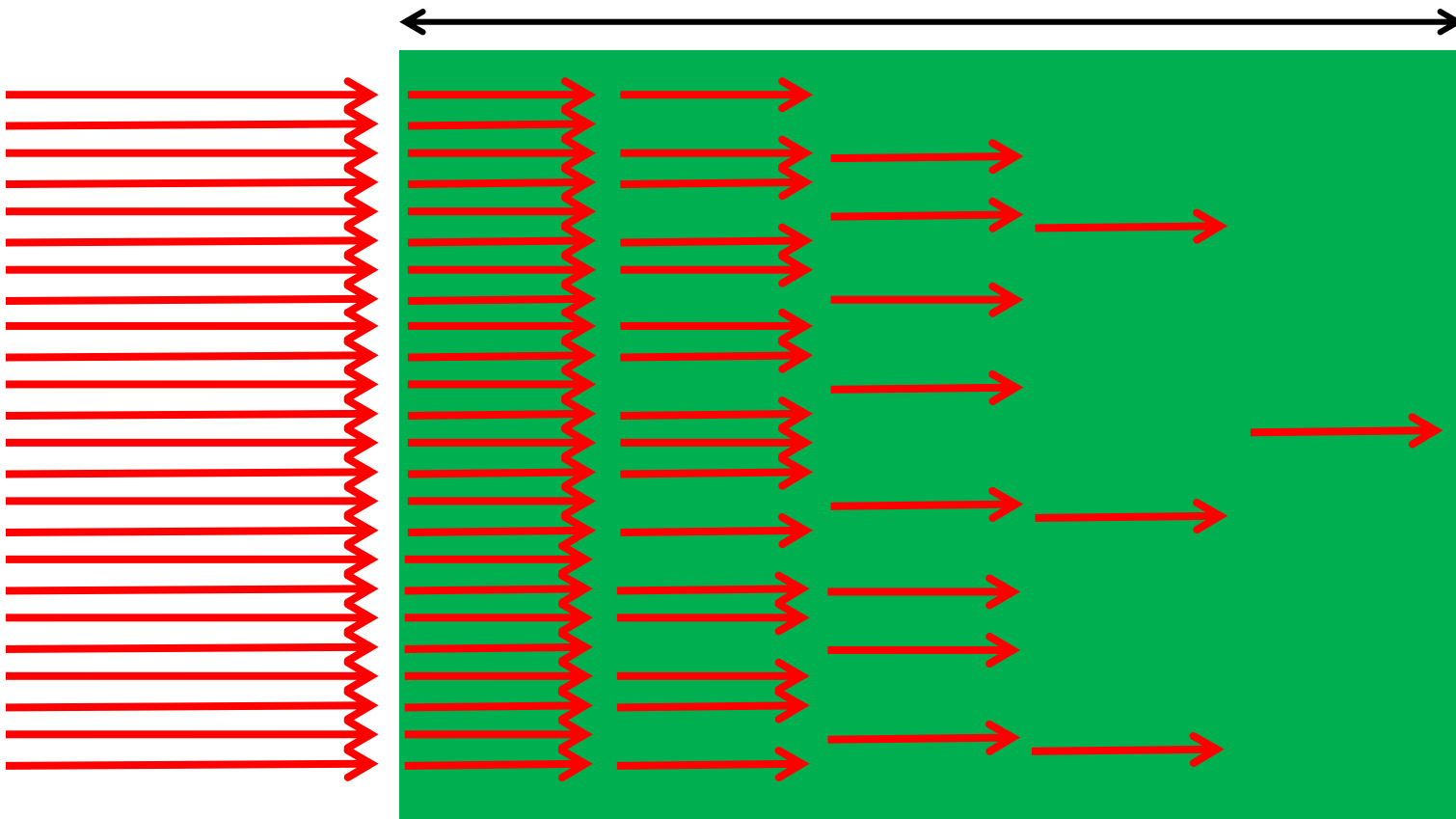
Le pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$): la fin du silicium?

- Abondant.
- Fabrication à très bas coût.
- Haut rendement.
- Mais: contient du plomb; problème de vieillissement.

Les enjeux de la recherche photovoltaïque

Minimiser la quantité de matériau semiconducteur

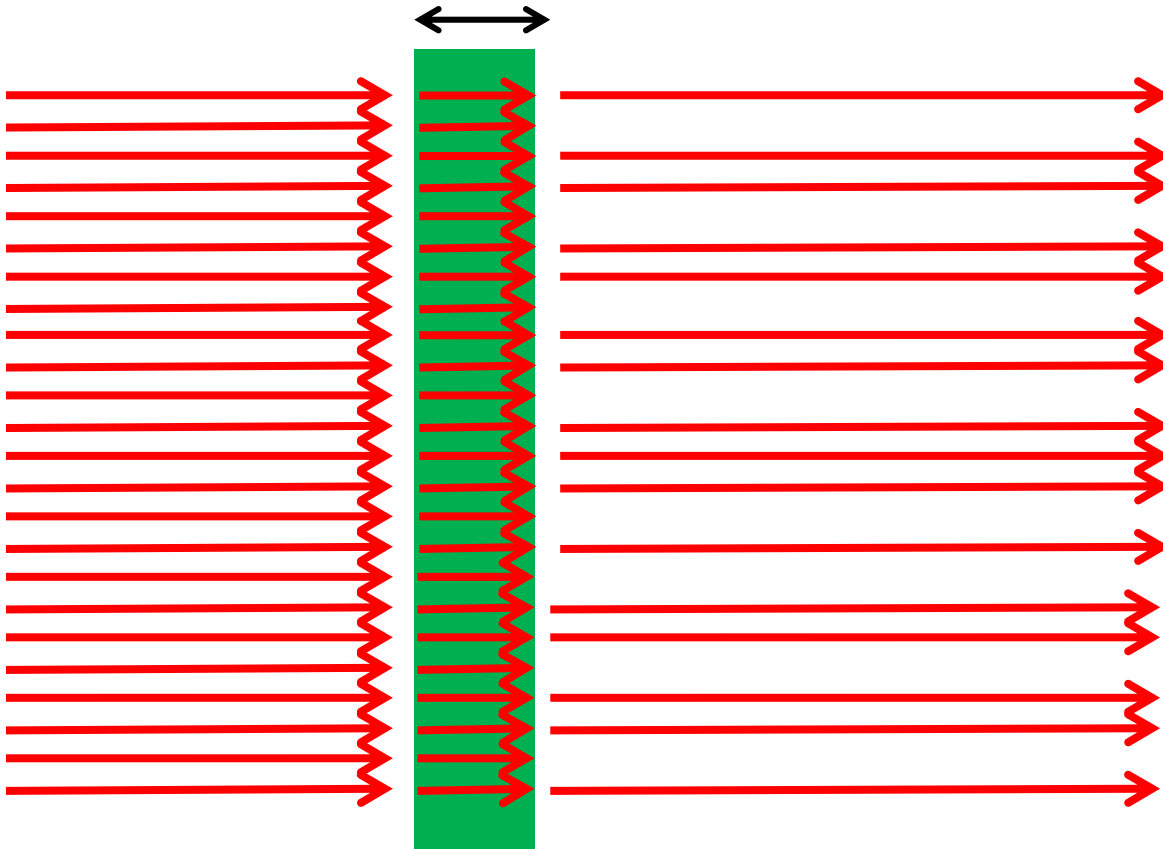
Cellule classique silicium: épaisseur 200 μm



Les enjeux de la recherche photovoltaïque

Minimiser la quantité de matériau semiconducteur

Cellule silicium mince: épaisseur $1\mu\text{m}$!

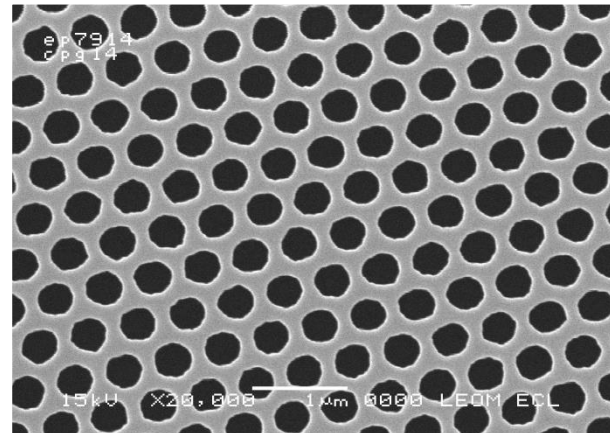
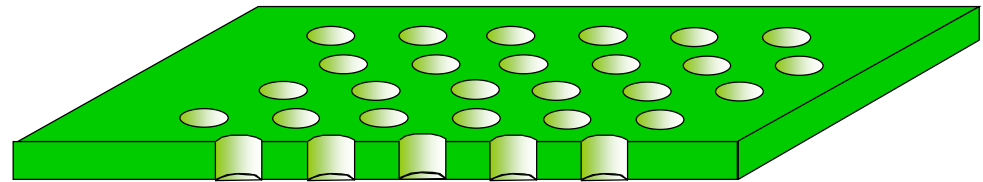
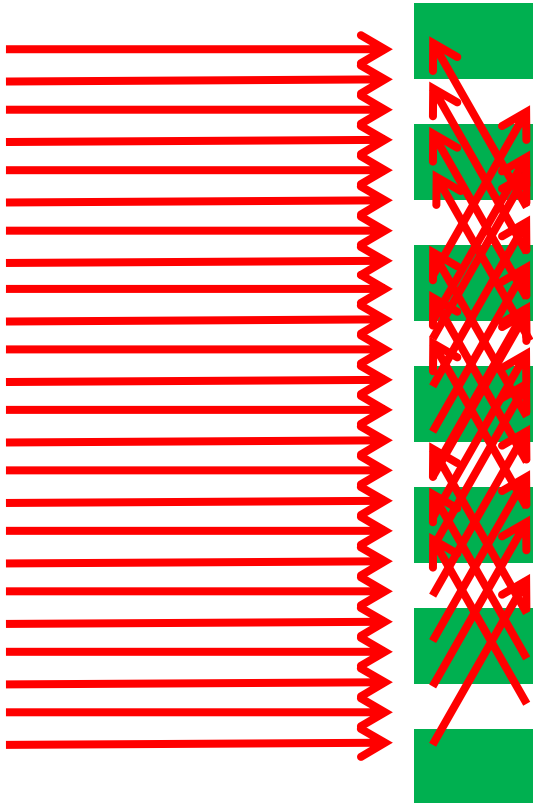


Les enjeux de la recherche photovoltaïque

Minimiser la quantité de matériau semiconducteur

Cellule silicium mince: épaisseur $1\mu\text{m}$!

Avec des trous de 1 dix-millème de millimètre!!



Les enjeux de la recherche photovoltaïque

Minimiser la quantité de matériau semiconducteur

Cellule silicium mince: épaisseur 1 μm !

Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells

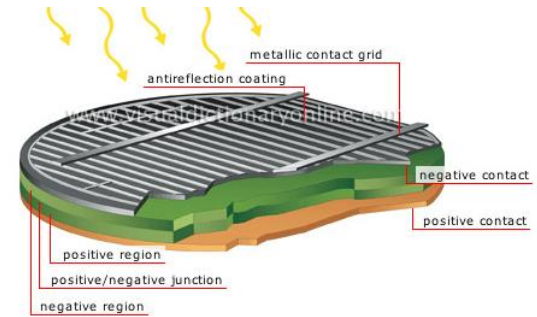
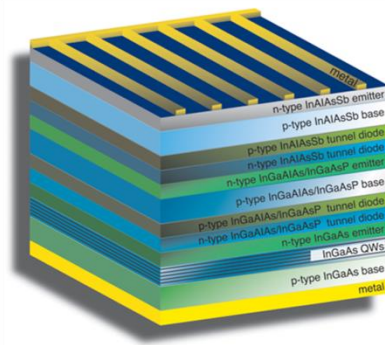
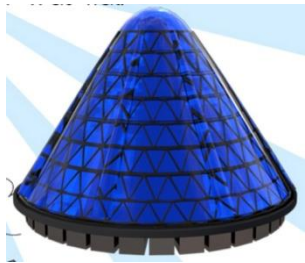
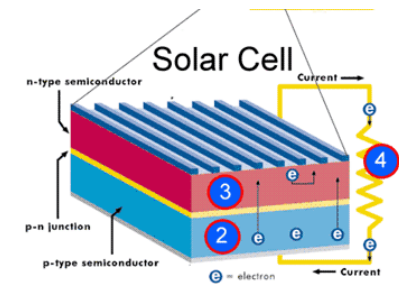
Yeonsang Park, Emmanuel Drouard, Ounsi El Daif,
Xavier Letartre, Pierre Viktorovitch, Alain Fave, Anne Kaminski,
Mustapha Lemiti, Christian Seassal

Université de Lyon, Institut des Nanotechnologies de Lyon

3 August 2009 / Vol. 17, No. 16 / OPTICS EXPRESS 14312

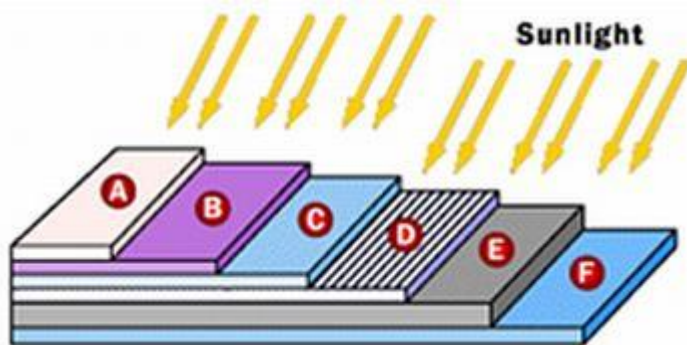
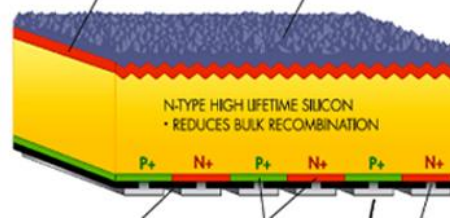
Les enjeux de la recherche photovoltaïque

*Optimiser la conception des cellules:
une myriade de travaux à travers le monde*



SunPower Solar Cell

Lightly doped front diffusion
• Reduces recombination loss
Texture + ARC



PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- **Données énergétiques**
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Production mondiale d'énergie

Très bref historique en quelques chiffres

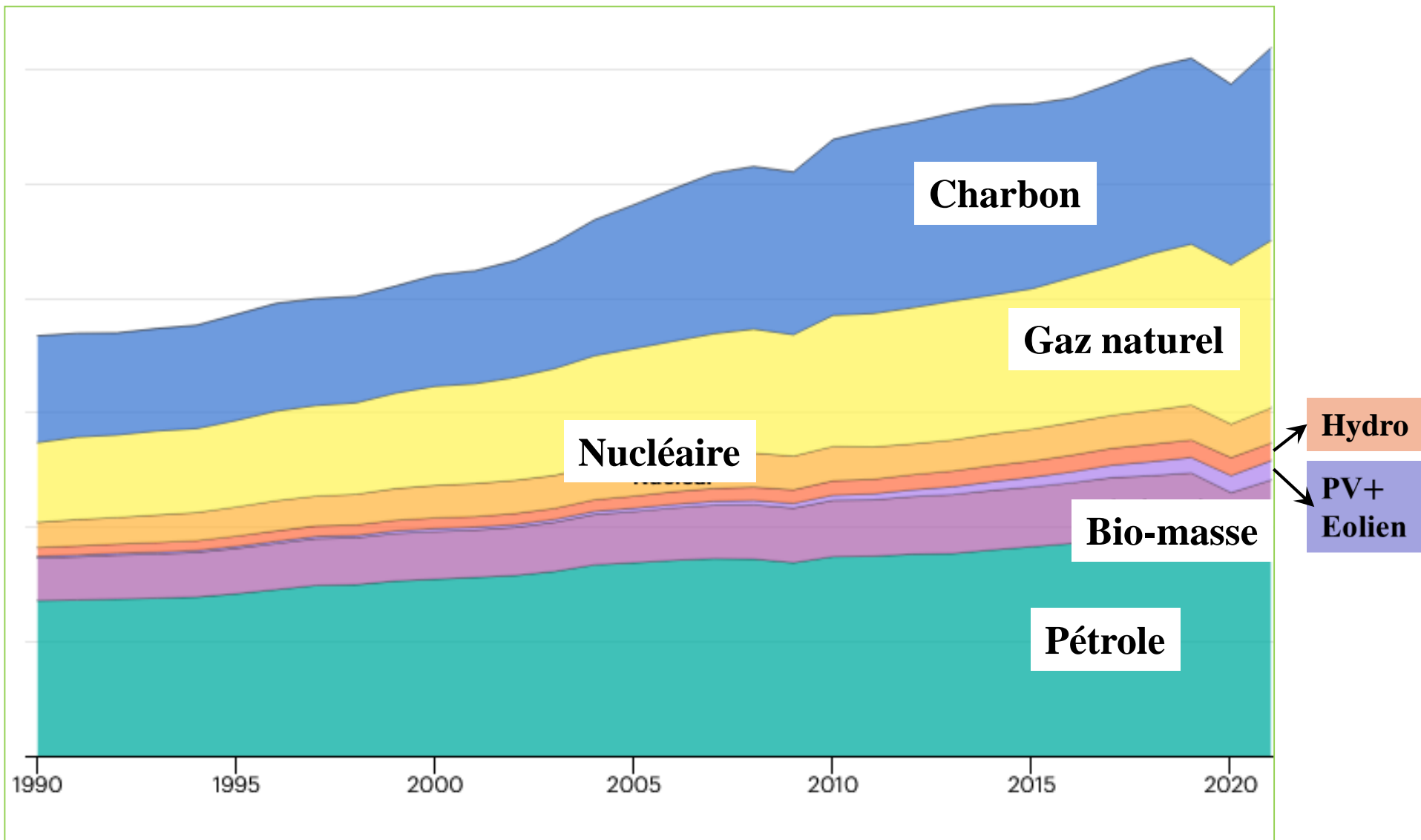
- Fin 19^{ème} siècle: la principale source de l'énergie produite au cœur de la 1^{ère} révolution industrielle était le bois (« renouvelable »?) avant d'être remplacée par le charbon.
- En 1860: 5000 kWh par personne et par an.
- En 2024: 25000 kWh par personne et par an.
- En 1860: 1 milliard de terriens de l'espèce humaine
- Aujourd'hui: 8 milliards de terriens de l'espèce humaine

Production mondiale d'énergie

Très bref historique en quelques chiffres

Production annuelle d'énergie $\times 40$ depuis 1860

Production mondiale d'énergie par source 1990-2021



Production mondiale d'énergie par source 1990-2021

Observations, en bref

- Croissance continue de la production totale d'énergie
- Depuis l'arrivée du charbon, les nouvelles sources d'énergie se sont *rajoutées* aux anciennes
- Croissance continue des productions fossiles
- Emergence récente de « nouvelles » sources: Eolien et **Photovoltaïque**

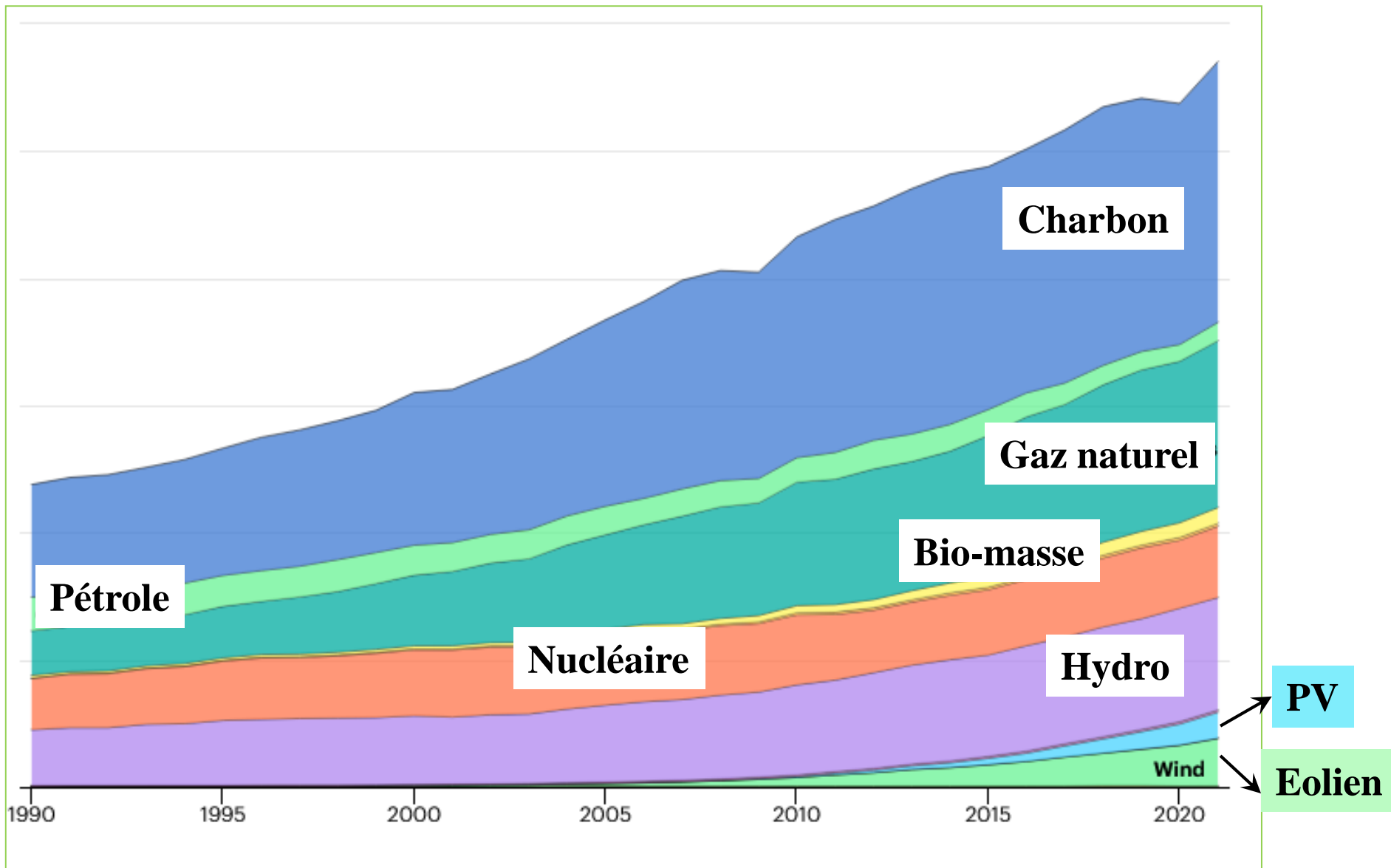
L'énergie électrique

Consommation mondiale

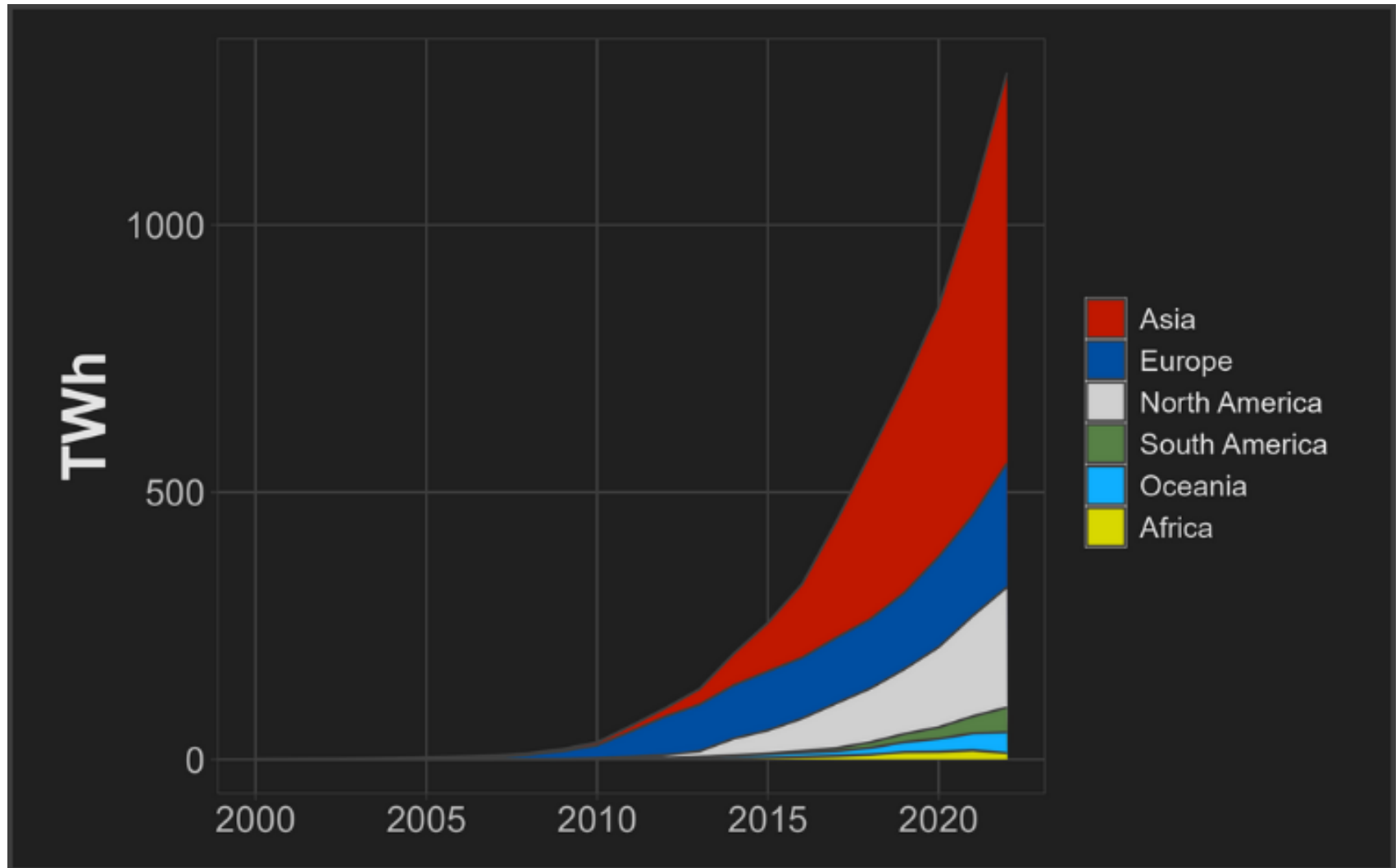
1910	2000	2022
1	500	1000

- Aujourd'hui: **20%** de la consommation totale
- Projection 2050: **50%**

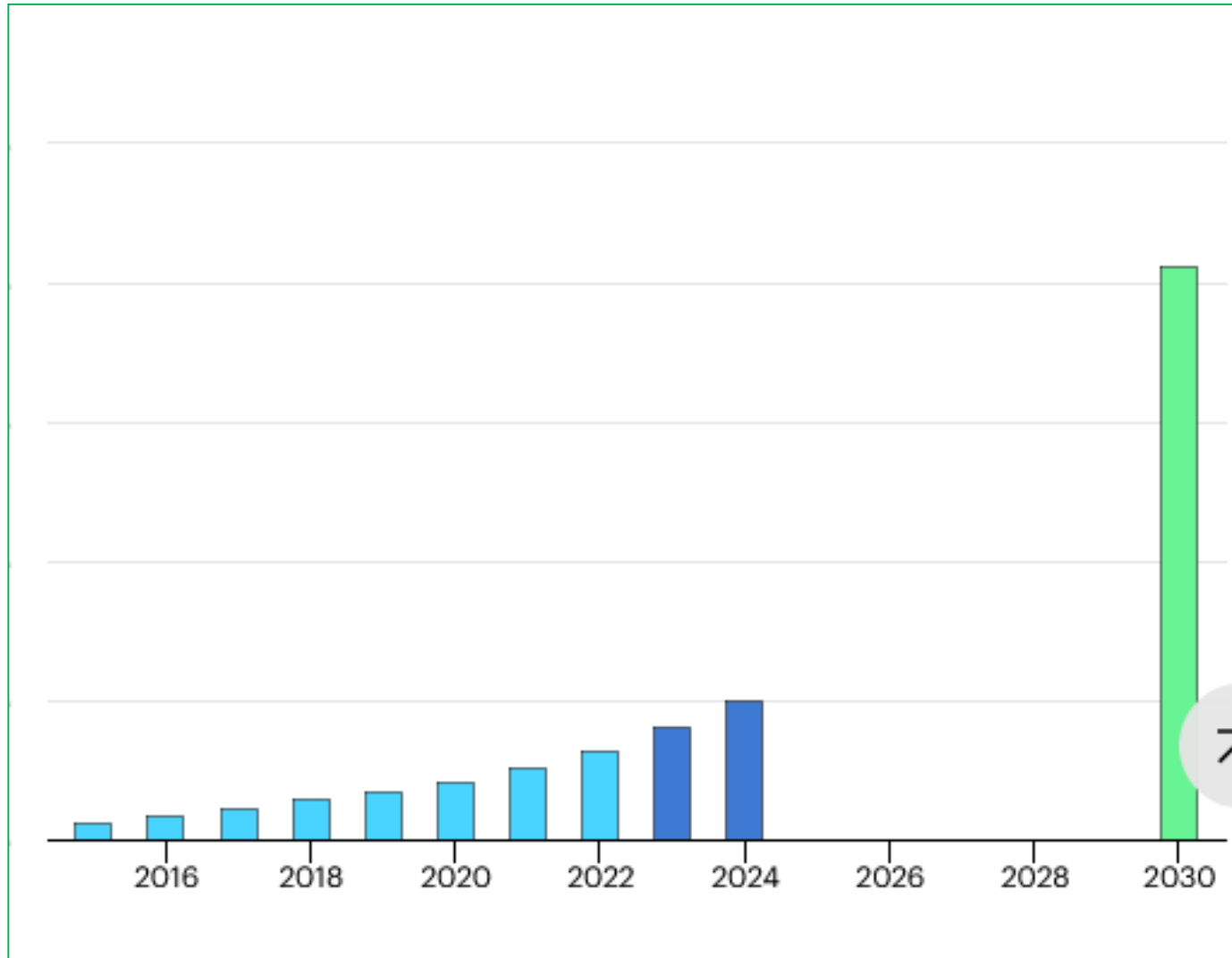
Production mondiale d'énergie électrique par source 1990-2021



Emergence et croissance du photovoltaïque



Emergence et croissance du photovoltaïque



Production mondiale d'énergie électrique: la part du photovoltaïque

2006	2022	2030	2050
~0%	2%	11%	29%

En 2050 l'énergie photovoltaïque devrait couvrir environ 15% de la production d'énergie mondiale dans le scénario NZE (*Net Zero Emission*)

4 fois le nucléaire, près de 3 fois l'hydroélectrique...

Classement des pays producteurs d'énergie photovoltaïque

	Country	Gen (TWh)
	World	1310.02
1	 China	427.72
2	 United States	205.08
3	 Japan	102.40
4	 India	95.16
5	 Germany	60.01

6	 Australia	38.84
7	 Spain	32.83
8	 South Korea	29.09
9	 Italy	27.73
10	 Brazil	26.48
11	 Vietnam	26.37
12	 France	20.05
13	 Netherlands	17.29
14	 Turkey	15.84
15	 Chile	14.52
16	 United Kingdom	13.92

PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- **Données économiques**
- Contraintes techniques et environnementales
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Le coût de l'énergie: une comptabilité complexe

3 postes de coût principaux :

- La matière première: en principe disponible et gratuite; coût imposé par son appropriation, notamment dans le cas des énergies fossiles.
- La production et la distribution de l'énergie: coût de l'extraction de la matière première, de sa conversion en énergie disponible pour l'utilisateur.
- La nature: coût de la dette environnementale, non prise en compte et à la charge des générations futures.

Les coûts de production de l'énergie solaire PV

Historique: ce qu'on doit retenir

- Baisse continue des prix de production des panneaux PV
- Années 80-90: gadgeterie
- A partir de 2005 environ: démarrage de la production massive
- Aujourd'hui: coûts du PV et du nucléaire du même ordre (facteur 10 au moins en 2005)

Par exemple: évolution du prix des cellules solaires silicium



Les coûts de production de l'énergie solaire PV

Historique: ce qu'on doit retenir (suite)

- Baisse continue des prix de production des panneaux PV
- Années 80-90: production limitée à des applications de niches (par exemple gadgeterie, spatial)
- A partir de 2005 environ: démarrage de la production massive d'énergie.
- Aujourd'hui: coûts du PV et du nucléaire du même ordre (facteur 10 au moins en 2005)

Les coûts de production de l'énergie solaire PV

Historique: ce qu'on doit retenir (suite)

- Baisse continue des prix de production des panneaux PV
- Années 80-90: production limitée à des applications de niches (par exemple gadgeterie, spatial)
- A partir de 2005 environ: démarrage de la production massive d'énergie.
- Aujourd'hui: coûts du PV et du nucléaire du même ordre (facteur 10 au moins en 2005)

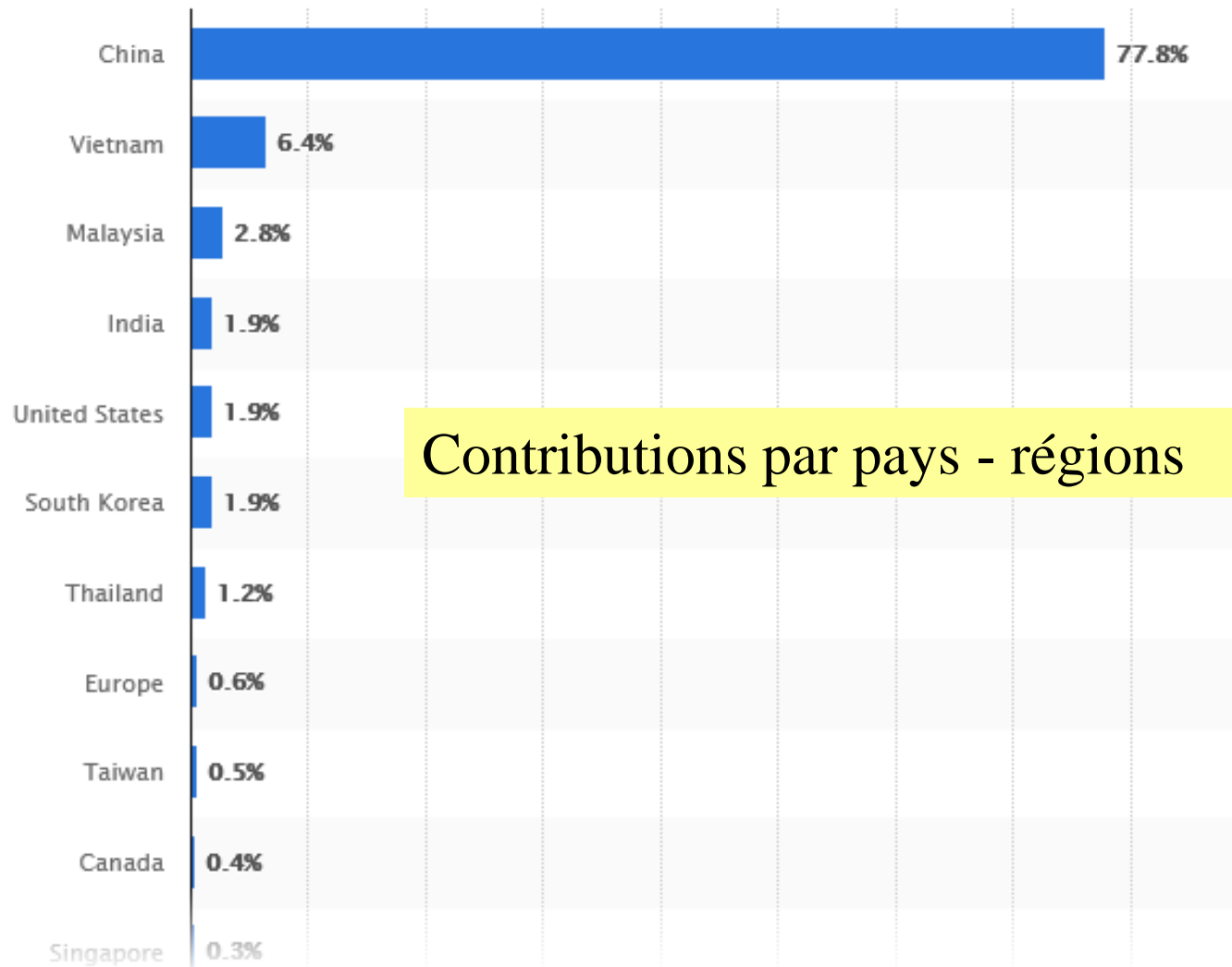
Les coûts de production de l'énergie solaire PV

Historique: ce qu'on doit retenir (suite)

- Baisse continue des prix de production des panneaux PV
- Années 80-90: production limitée à des applications de niches (par exemple gadgeterie, spatial)
- A partir de 2005 environ: démarrage de la production massive d'énergie.
- Aujourd'hui: coûts du PV et du nucléaire du même ordre (facteur 10 au moins en 2005)

L'industrie photovoltaïque

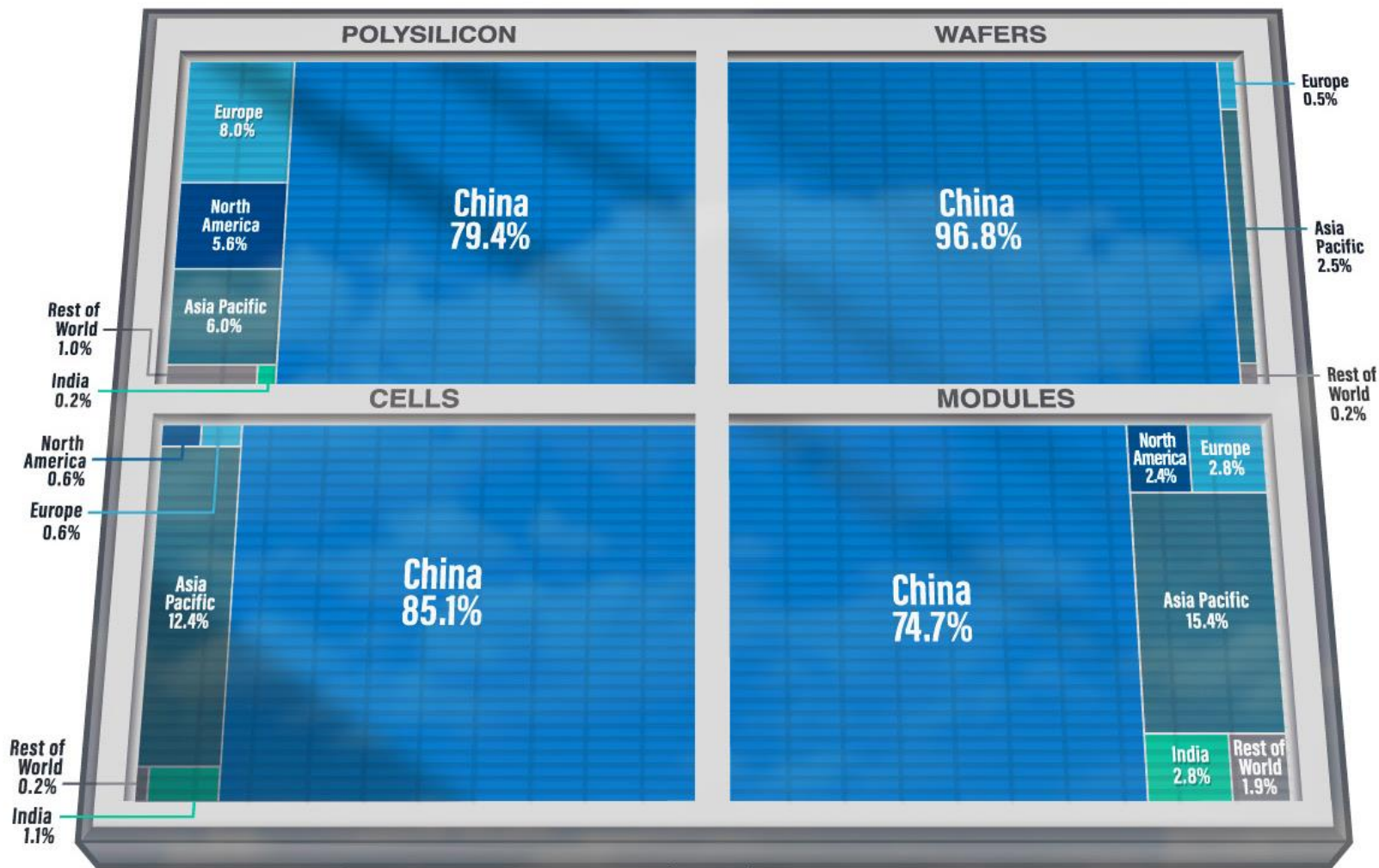
Quels sont les principaux producteurs de panneaux PV



L'industrie photovoltaïque

Données
2021

Contributions par pays - régions



L'industrie photovoltaïque

Top 10 des producteurs de modules solaires PV mondiaux

- 1) LONGi Solar Technology Co, Ltd (Xi'an, **Chine**)
- 2) JinkoSolar Holding Co., Ltd. (Shanghai, **Chine**)
- 3) Trina Solar Co., Ltd (Changzhou, **Chine**)
- 4) Canadian Solar Inc. (**Guelph, Canada**)
- 5) Hanwha Solutions Corporation (**Séoul, Corée du Sud**)
- 6) Risen Energy Co., Ltd. (Ningbo, **Chine**)
- 7) First Solar Inc. (**Tempe, États-Unis**)
- 8) Wuxi Suntech Power Co., Ltd. (Wuxi, **Chine**)
- 9) JA SOLAR Technology Co.,Ltd. (Pékin, **Chine**)
- 10) Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd (**South San Francisco, USA**)

L'industrie photovoltaïque

Quid de l'Europe: projet Alliance et la Chine

- Objectif : 30 GW « installés » durant l'année 2025
- Chine: 400 GW durant l'année 2022

L'industrie photovoltaïque

Quid de l'Europe: projet Alliance et les Etats Unis

La menace de l'IRA (Inflation Reduction Act): protection et subvention massive l'industrie américaine, notamment de production d'énergies vertes (40 milliards de dollars par an sur 10 ans, voté en décembre 2023).

Réponse de l'Europe à l'IRA, votée en novembre 2023, le NZIA (« Net-Zero Industry Act »).

L'industrie photovoltaïque

France: Photowatt

<https://www.photowatt.com/fr/presentation-photowatt/>

- Entreprise créée en 1984
- Intégrée à EDF en 2012
- Aujourd'hui: capacité 200MW annuel
- La Chine pour rappel: 2000 fois plus en 2022



L'industrie photovoltaïque

France: la petite histoire

- La première entreprise mondiale (?): créée en 1981

<https://www.solems.com/societe>

- Créée par Ionel Solomon
(CNRS-Polytechnique)



- Production de modules PV sur mesure

PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- Données économiques
- **Contraintes techniques et environnementales**
- Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Contraintes techniques

La production d'énergie photovoltaïque est fluctuante

- Fluctuations saisonnières
- Cycle jour-nuit
- Fluctuations climatiques aléatoires

Contraintes techniques

La production d'énergie photovoltaïque est fluctuante

Conséquences:

- Faible **facteur de charge**

Energie produite en 1 an = **12%** énergie produite à pleine puissance
(**80%** pour la production d'énergie nucléaire et **20%** pour l'éolien)

- Production mal adaptée à la consommation

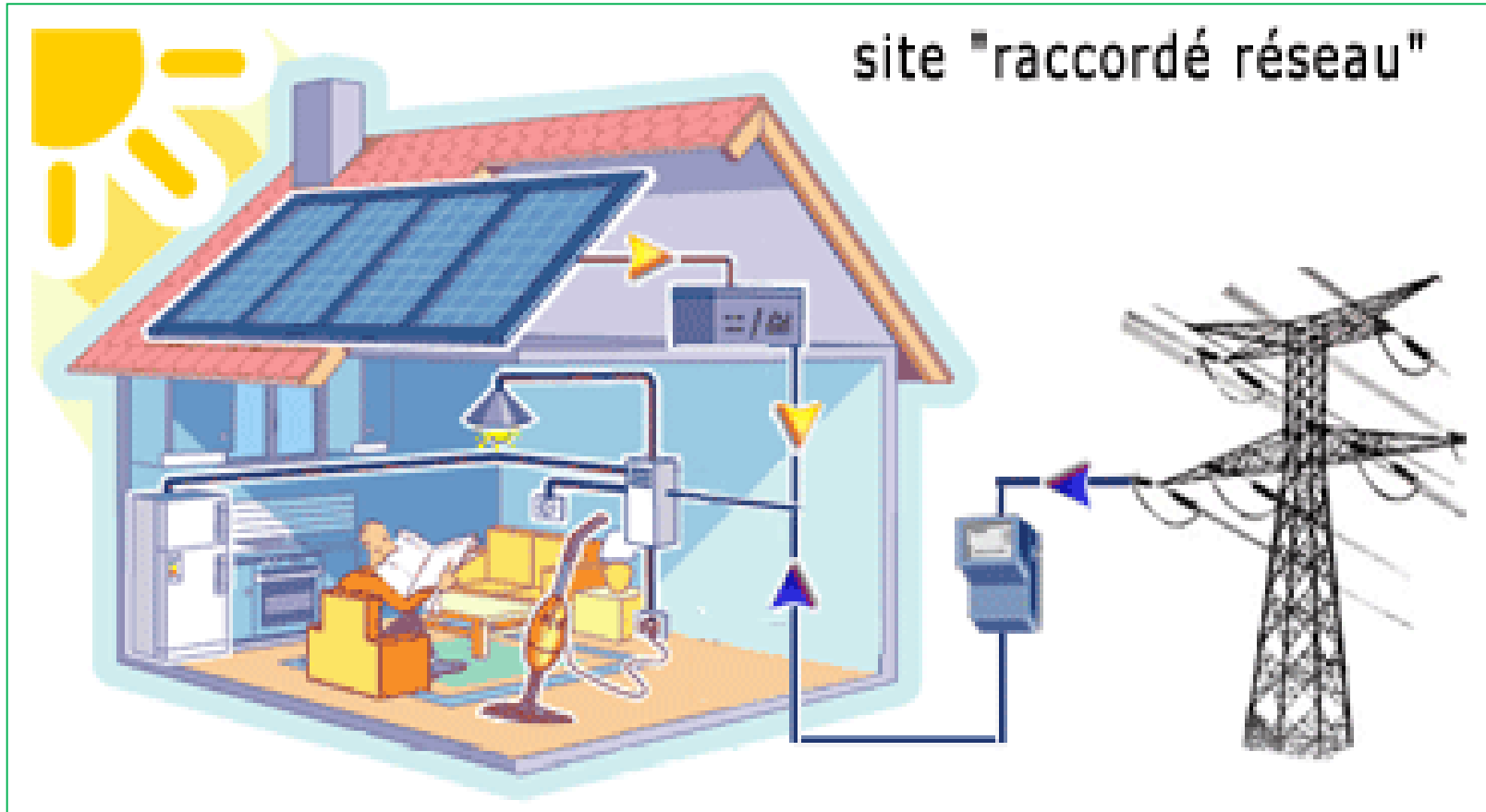
Contraintes techniques

La production d'énergie photovoltaïque est fluctuante

Solutions:

- **Raccordement au réseau**
- **Stockage**

- **Raccordement au réseau: « lissage » des fluctuations**



Photovoltaïque très complémentaire de l'éolien
(par exemple alternance été-hiver)

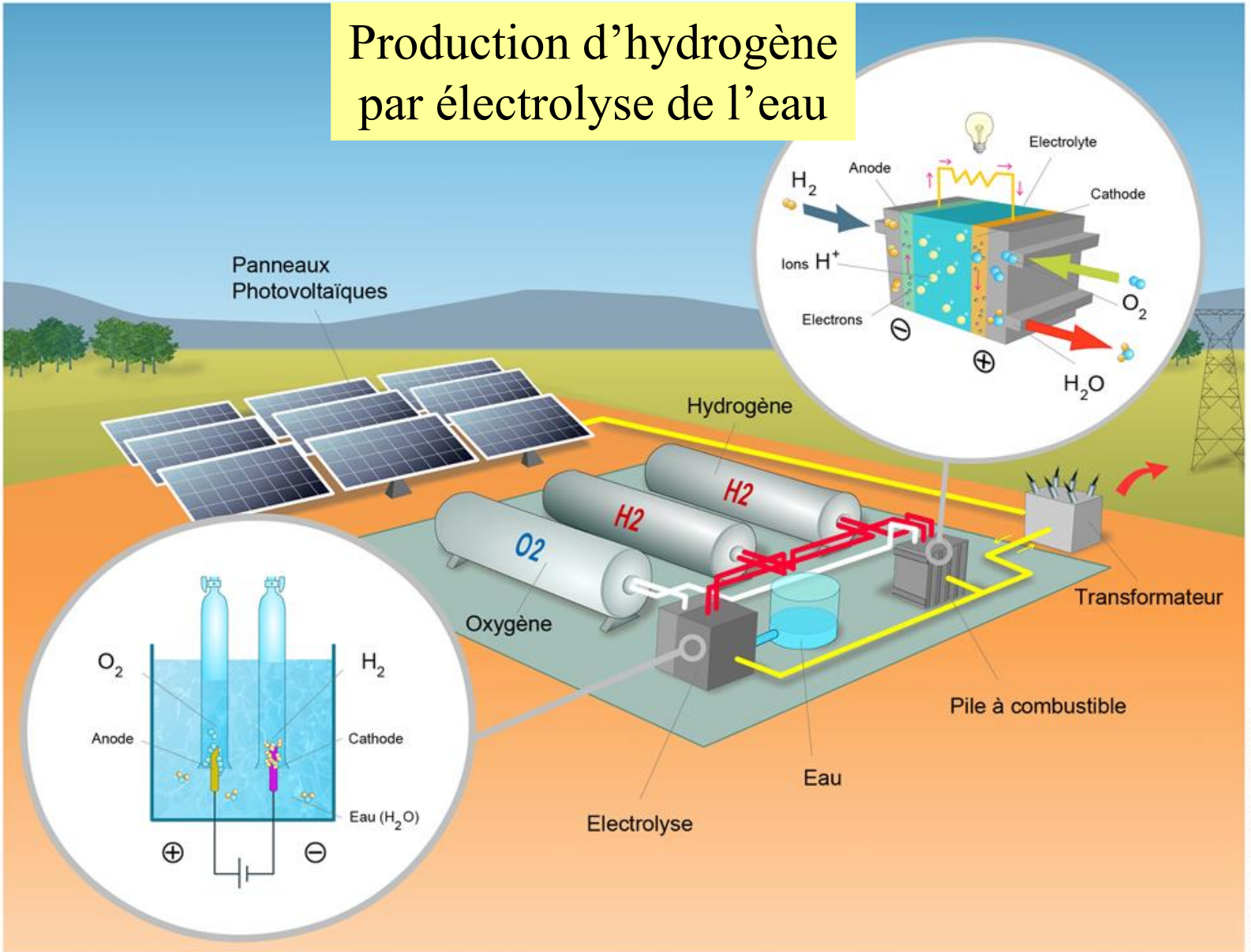
- **Stockage**

Batteries lithium



• Stockage

Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

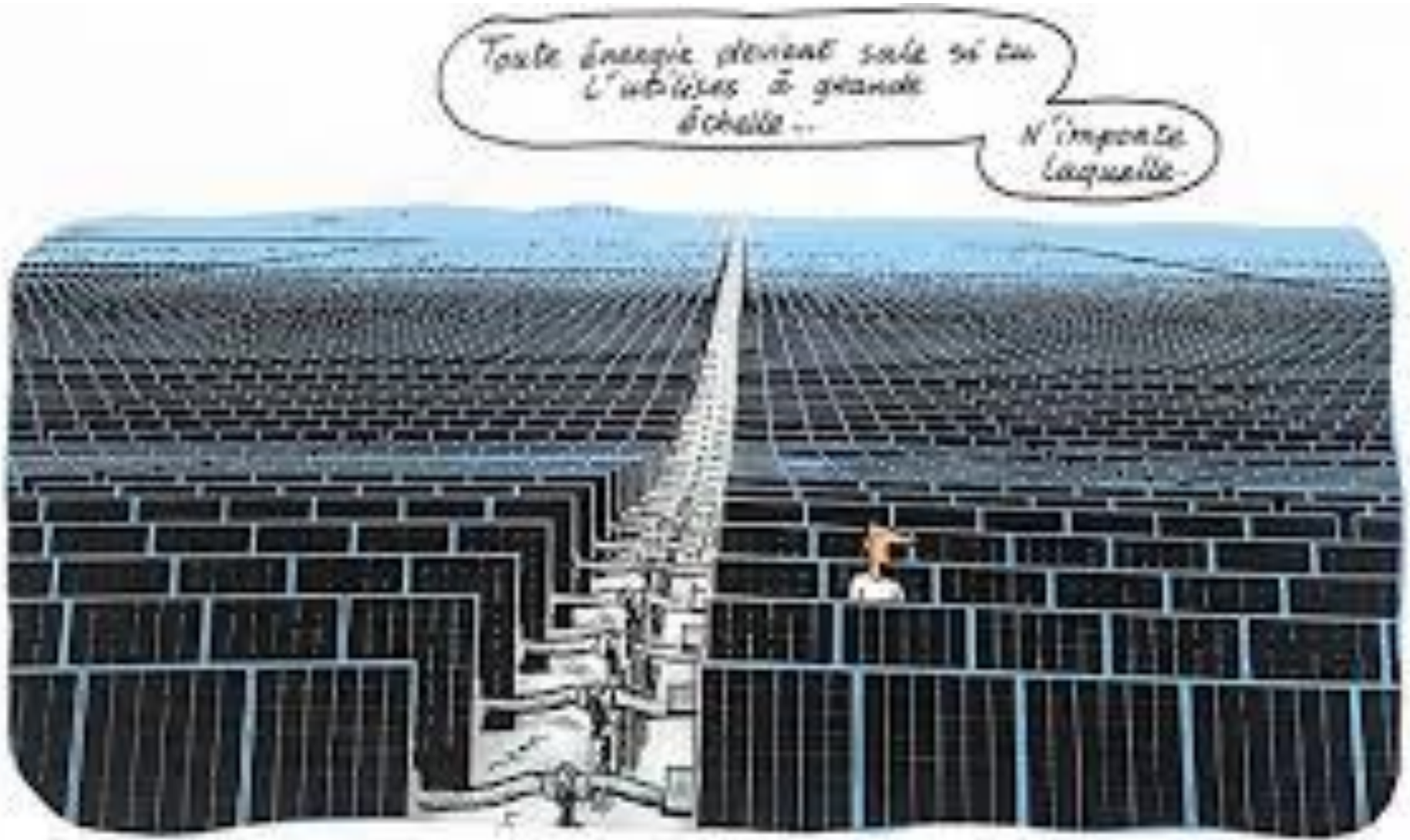


Contraintes techniques et environnementales

Emprise au sol

- 7500 à 10000 km² de panneaux solaires nécessaires à l'horizon 2050 pour atteindre les objectifs fixés *dans le scénario NZE (Net Zero Emission)*, soit environ 3 à 4% de la surface agricole totale, où environ 20% des sols artificialisés en 2022 (si la France suit la tendance mondiale).
- Taux d'emprise environ 70 fois supérieur au nucléaire (mais n'oublions pas trop vite la zone interdite de **1300 km²** autour de Fukushima)

Impact environnemental



Impact environnemental

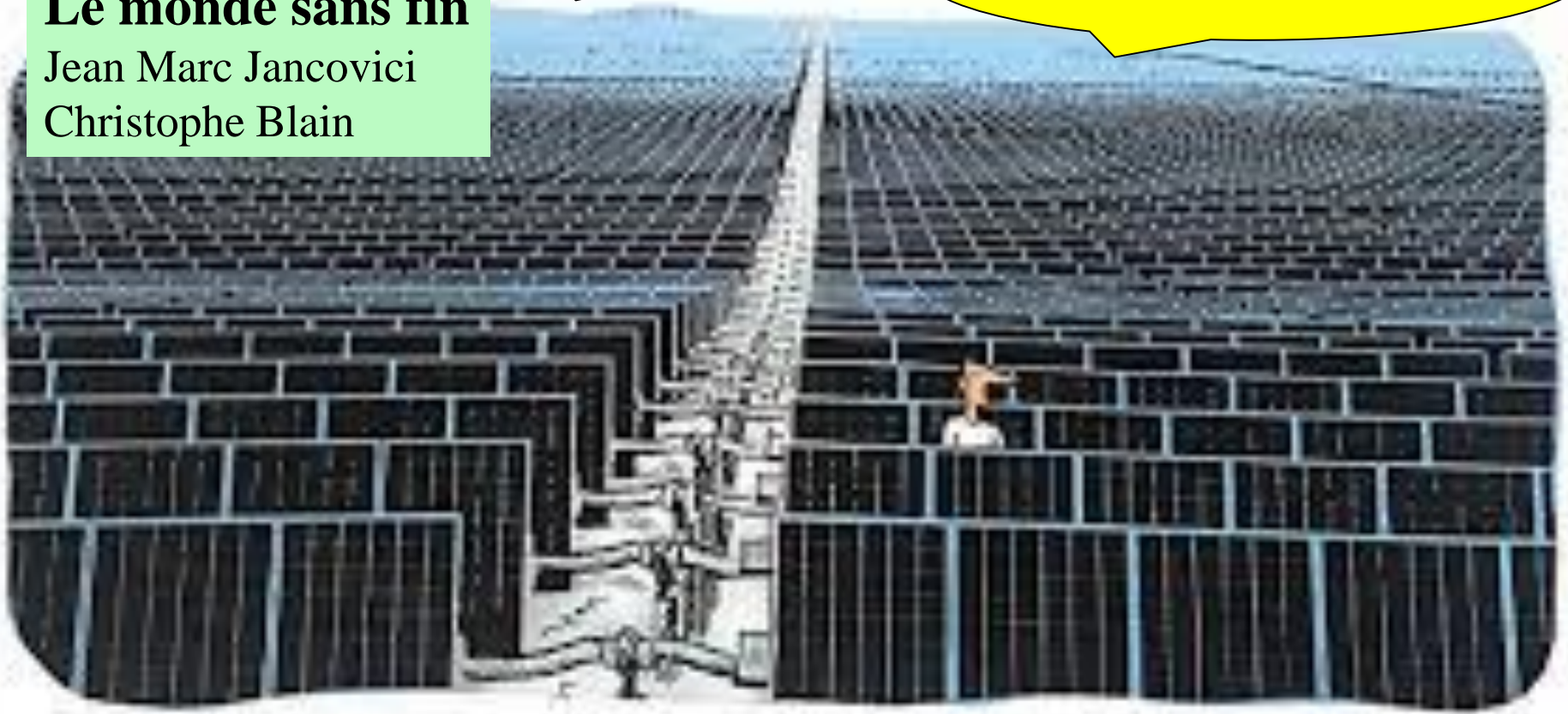
*Toute énergie est sale si tu
l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.

Le monde sans fin

Jean Marc Jancovici

Christophe Blain



Impact environnemental

*Toute énergie est sale si tu
l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.

Ferme photovoltaïque
intensive



Impact environnemental

*Toute énergie est sale si tu
l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.



Ferme photovoltaïque
intensive

Giga-usine de batteries lithium
Durée de vie 20 ans

Impact environnemental

*Toute énergie est sale si tu
l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.

Ferme éolienne
intensive



Impact environnemental de l'activité humaine

Parenthèse

*Toute **production** est sale si tu l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.



Gaz de schistes aux US

Extraction minière



Lignite

Impact environnemental de l'activité humaine

Parenthèse

*Toute **production** est sale si tu l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.



Betterave



Maïs

Agriculture intensive



Huile de palme



Serres en Espagne

Impact environnemental de l'activité humaine

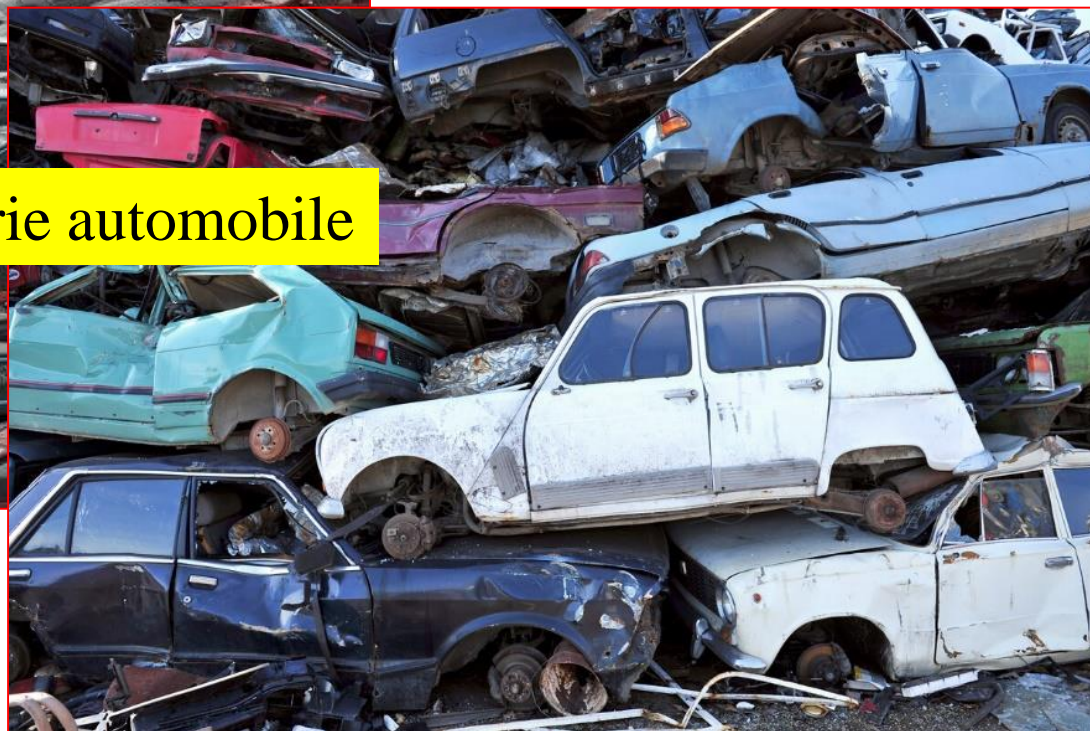
Parenthèse

*Toute **production** est sale si tu l'utilises à grande échelle...*

N'importe laquelle.



Industrie automobile



PLAN

- Définitions: c'est quoi l'Énergie?
- C'est quoi l'Énergie Solaire?
- Conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire lumineuse: principes physiques
- La cellule solaire photovoltaïque, le panneau photovoltaïque
- Les enjeux de la recherche dans le solaire photovoltaïque
- Données énergétiques
- Données économiques
- Contraintes techniques et environnementales
- **Epilogue: quel futur énergétique pour la France?**

Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

- La consommation totale d'énergie en France devrait décroître d'environ 40% d'ici 2050
- La consommation d'énergie électrique devrait croître d'environ 25% d'ici 2050, et sa part passer de 27% à 55%.

Tendance similaire au niveau mondial: décroissance de l'énergie totale consommée de 23%; doublement de l'énergie électrique consommée; augmentation de sa part de 20% à 53%.

Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Stratégie française énergie climat : discours de Belfort d'Emmanuel Macron (10 février 2022)

Inspiration: travaux de RTE (Réseau de Transport d'Électricité) et de l'AIE (Agence Internationale de l'énergie)

Ce que dit ce discours, en très bref:

- Décarbonation totale horizon 2050
- Efficacité énergétique
- Sobriété, tout en continuant à produire d'avantage
- Electrification de nos pratiques

*Comment? Deux piliers 50 / 50 de production électrique
Energies renouvelables / Nucléaire à l'horizon 2050*

« La seule trajectoire raisonnable possible »

Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Stratégie française énergie climat : discours de Belfort d'Emmanuel Macron (10 février 2022)

Ce que *ne dit pas* ce discours:

- Le rapport de RTE (février 2022), « Futurs énergétiques 2050 » pour la France, propose au gouvernement 6 scénarios possibles pour la transition énergétique en fonction du taux de nucléarisation, du plus faible au plus élevé.
- Le gouvernement a choisi le scénario le plus nucléarisé
- Le choix politique du gouvernement français place la France dans une situation singulière sur la scène mondiale

Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Stratégie française énergie climat : discours de Belfort d'Emmanuel Macron (10 février 2022)

Un dernier chiffrage, pour la route:

Mix électrique 2022	Nucléaire	Renouvelables	Photovoltaïque
Monde	9%	30%	Environ 4%
France	74%	22%	Environ 4%

Mix électrique 2050	Nucléaire	Renouvelables	Photovoltaïque
Monde	8%	89%	Environ 41%
France (Nucléaire ⁺⁺⁺)	50%	50%	Environ 13%
France (Nucléaire ⁻⁻⁻)	0%	100%	Environ 36%

Epilogue: quel futur énergétique pour la France?

Stratégie française énergie climat : discours de Belfort d'Emmanuel Macron (10 février 2022)

Un dernier chiffrage, pour la route:

Mix électrique 2022	Nucléaire	Renouvelables	Photovoltaïque
Monde	9%	30%	Environ 4%
France	74%	22%	Environ 4%

Mix électrique 2050	Nucléaire	Renouvelables	Photovoltaïque
Monde	8%	89%	Environ 41%
France (Nucléaire+++)	50%	50%	Environ 13%
France (Nucléaire--)	0%	100%	Environ 36%



Références

- Agence Internationale de l'énergie:
World Energy Outlook 2023
(<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>)
- Syndicat des énergies renouvelables
<https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/>
- La stratégie française du climat (2023)
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/23242_Strategie-energie-climat.pdf
- BD "Le Monde sans fin", Jean-Marc Jancovici et Christophe Blain, 2021
- « Futurs énergétiques 2050 » de RTE (Réseau de Transport d'Électricité) : 02/2022
- *Références scientifiques (du 19^{ème} au 21^{ème} siècle): sur demande!*

ANNEXE

Contraintes techniques et environnementales

Durée de vie et temps de retour énergétique

Années	Durée de vie	Temps de retour énergétique
Panneaux photovoltaïques	Au moins 30	En moyenne 1,5 en France
Nucléaire classique	60	Inférieur à 1 (en principe)

Contraintes techniques et environnementales

Recyclage



- Taux de recyclage: environ 90%
- Silicium réutilisable 4 fois

<https://www.greenpeace.fr/impact-environnemental-solaire/>

<https://fne.asso.fr/dossiers/photovoltaique-definition-enjeux-et-impacts>

Contraintes techniques et environnementales

Disponibilité des matières premières: panneaux

Objectif NZE à l'horizon 2050: quantités cumulées

- 300 millions tonnes acier
(environ 9 fois la consommation annuelle française actuelle)
- 190 millions de tonnes de verre
(environ 30 fois la consommation annuelle française actuelle)
- Terres rares (groupe de métaux en « ium »)

Sans objet

Opinion personnelle

« On » ne s'en sortira pas en conservant le paradigme qui gouverne l'économie mondiale, fondé sur le profit et la compétition...

Il faudra alors produire / consommer pour vivre et non pas vivre pour produire / consommer...

...et jeter aux oubliettes le couple productivisme / consumérisme