



L1 Sciences de la Matière

Énergies Renouvelables (ENR)

Unité d'Enseignement Découverte (S2)

Dr. S.E. BENTRIDI:

Email: s.bentridi@univ-dbkm.dz

2021/2022

Contenu du Programme

- Aperçu sur les ENR
- L'Énergie et ses formes
- Les (sources) énergies conventionnelles
- **Notions Clés actuelles sur l'énergie**
- Les différents types d'énergie renouvelable
- Les énergies du futur



Les différents types d'énergie renouvelable

- Notion de base physique :

La loi du rayonnement du corps noir:

Théorie Classique: Loi de Stephan-Boltzmann

$$P_{SB}(W) = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4; \quad \sigma = 5,76 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$$

Théorie Quantique: Loi de Planck

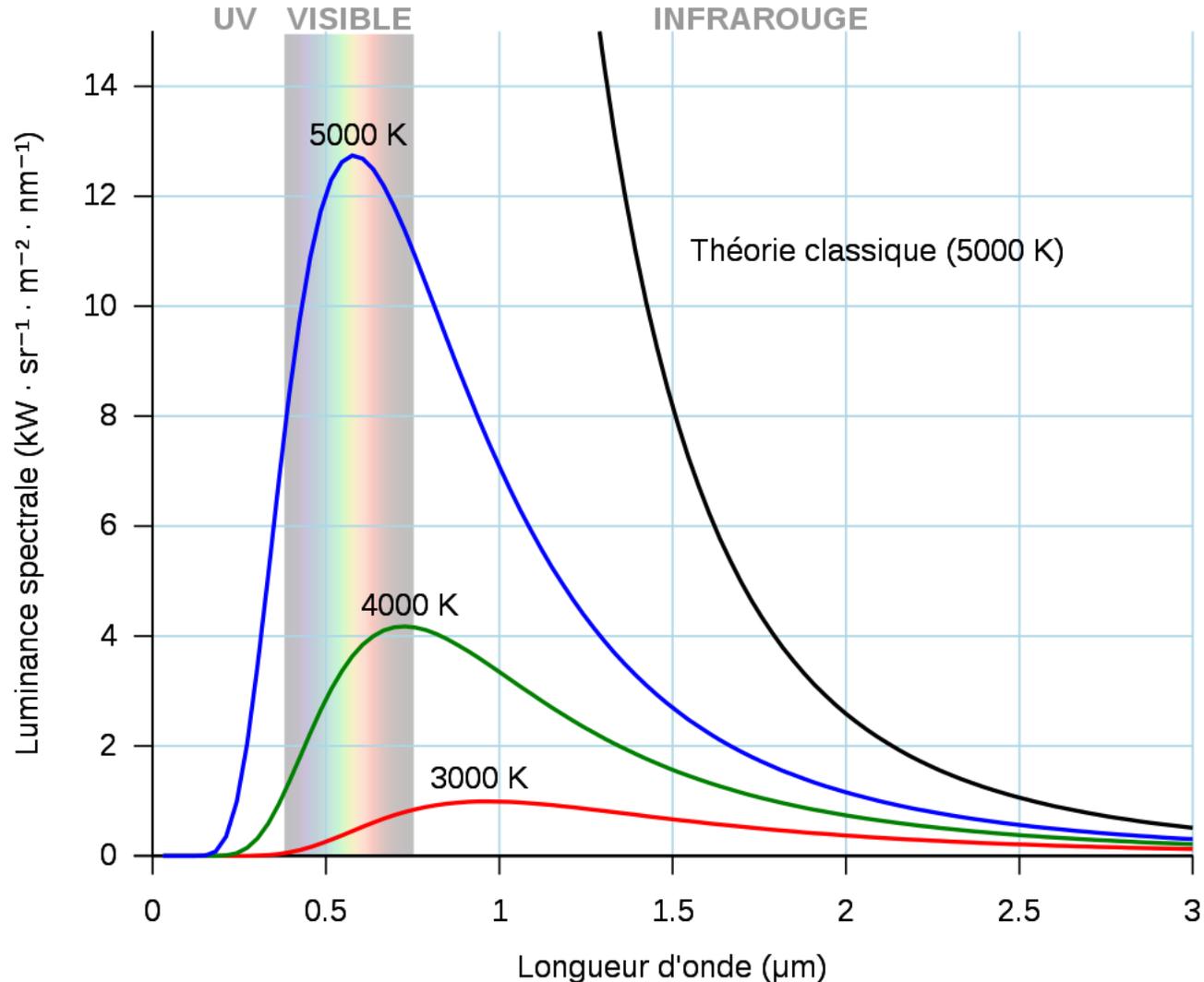
$$dP_{Pl} = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \epsilon(\omega) \cdot \frac{\omega^3}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} dA \cdot d\omega$$

La loi de Stefan-Boltzmann est une application de la loi de Planck:

$$P_{SB} \rightarrow \int dP_{Pl} dA \cdot d\omega$$

$$\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 \hbar^3 c^2} = 5,76 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$$

$$\lambda[m] = c[m/s]T[s] = \frac{c[m/s]}{f[Hz]} = \frac{2\pi c}{2\pi f} = \frac{2\pi c}{\omega}$$

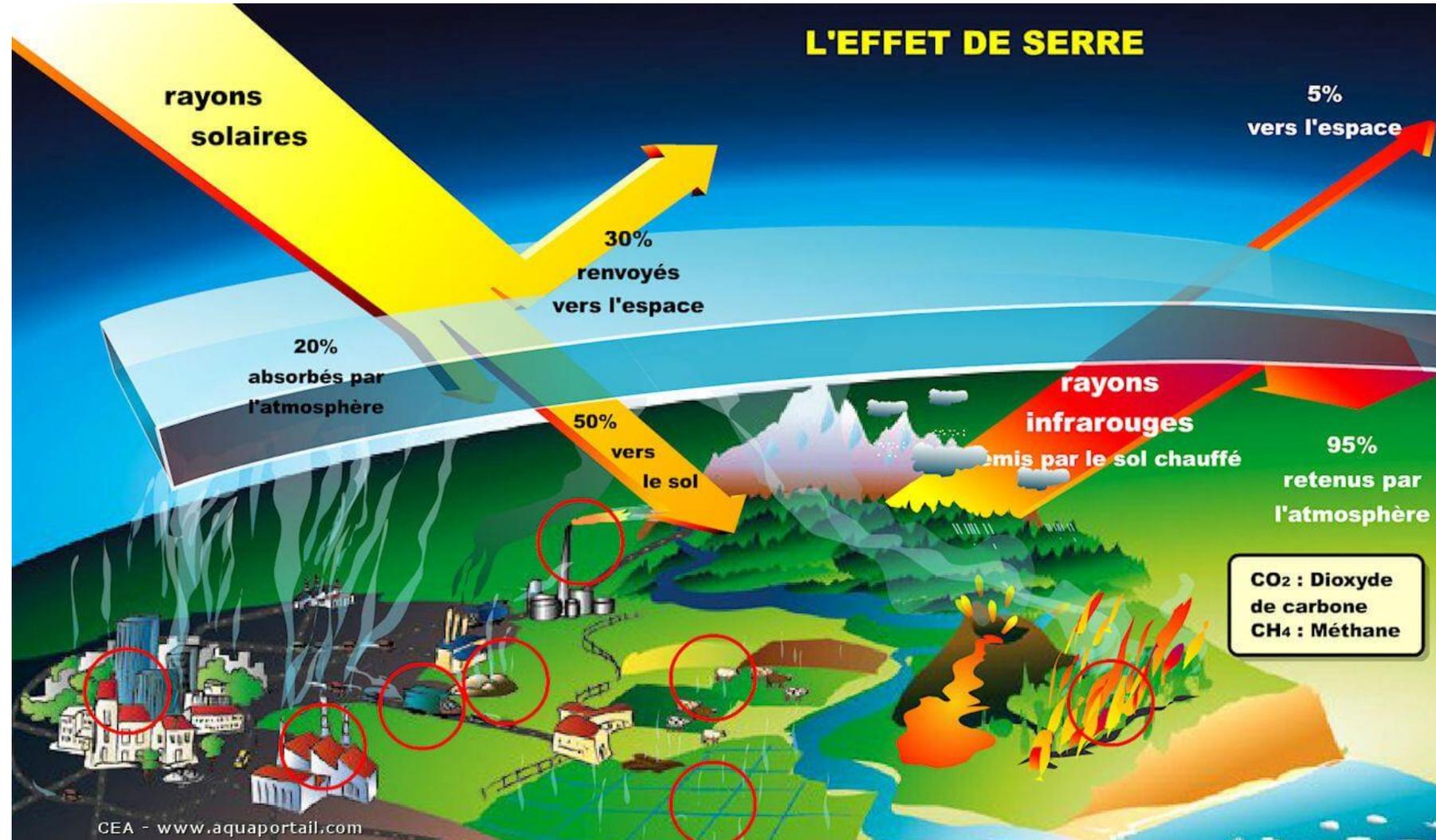


Notions Clés Actuelles sur l'énergie

• Effet de serre atmosphérique

C'est un phénomène physique régi par les échanges énergétiques entre la Terre et le Soleil au niveau de l'interface atmosphérique du globe terrestre.

Depuis le début des années 1980, cette notion est entrée dans le vocabulaire de vulgarisation pour attirer l'attention sur cet effet et son influence sur le climat.



Notions Clés Actuelles sur l'énergie

• Les gaz à effet de serre:

☐ Effet de serre naturellement présent dans l'atmosphère terrestre:

Il permet de porter la température moyenne à la surface de la terre à +15°C au lieu de -18°C en son absence

- La vapeur d'eau (H_2O): ~60% de l'effet de serre naturel
- Le dioxyde de carbone (CO_2): ~26% de l'effet d'origine anthropique
- Le méthane (CH_4) et Oxyde nitreux (N_2O): ~6%
- Ozone (O_3): ~ 8%



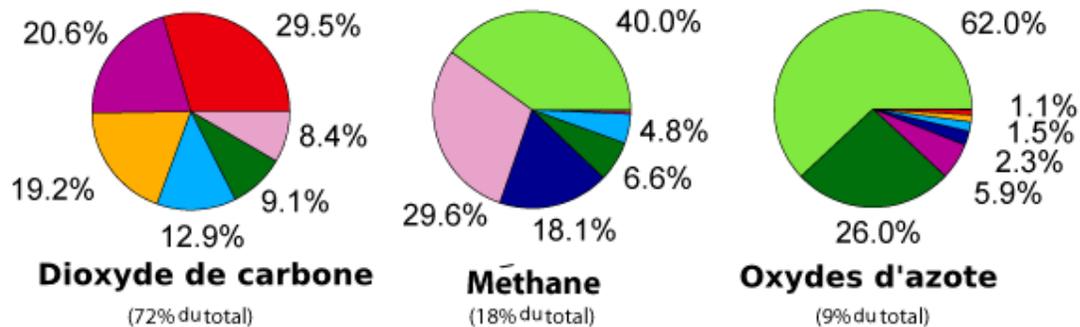
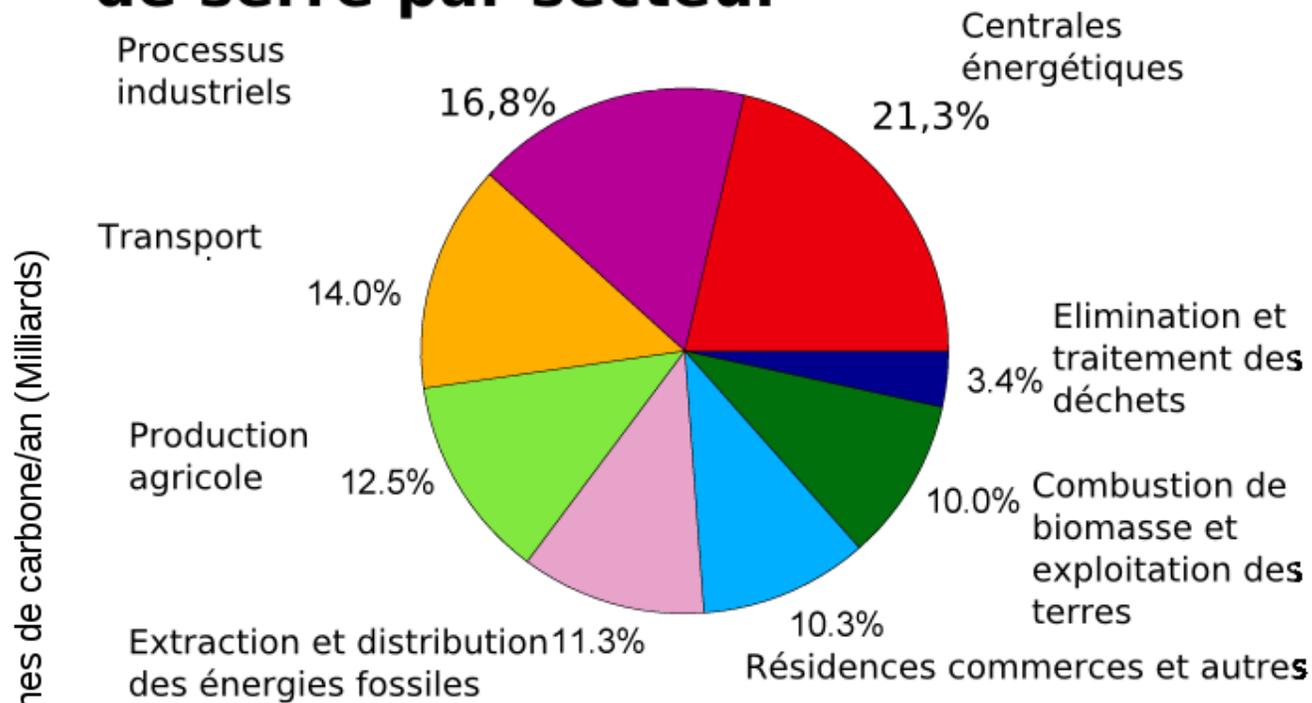
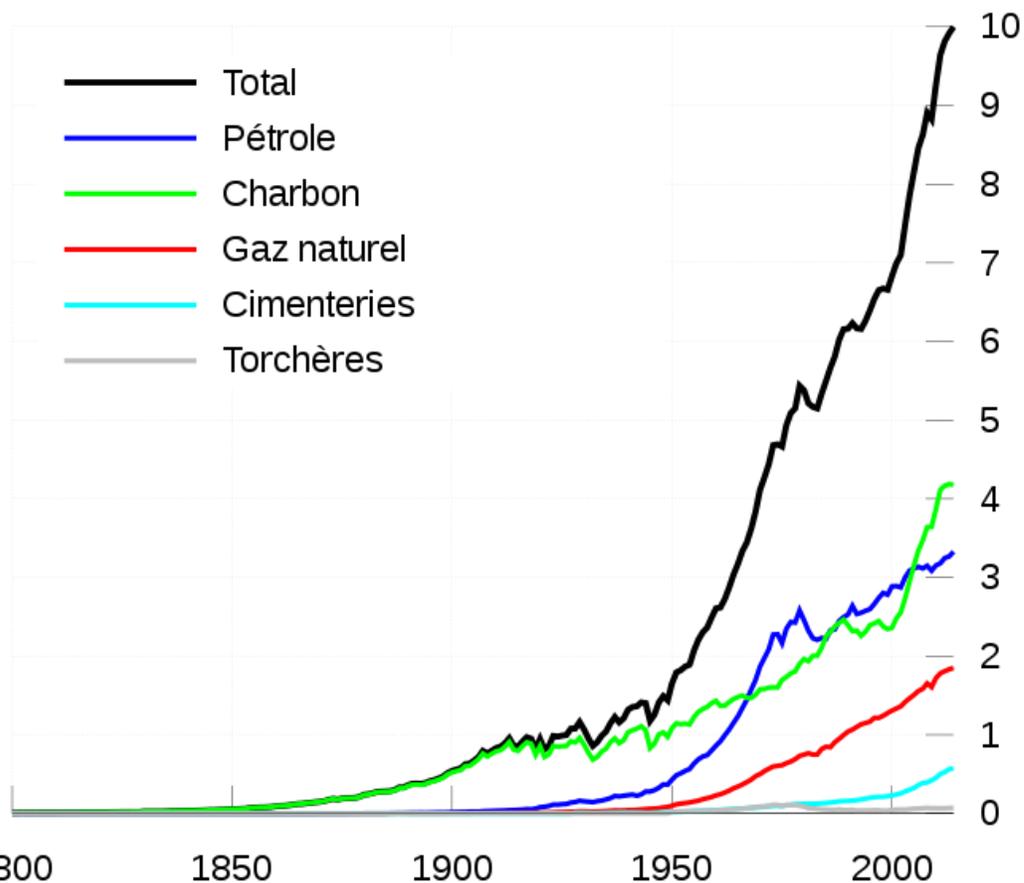
☐ Effet de serre artificiellement présents dans l'atmosphère terrestre:

En plus des émissions supplémentaires de la vapeur d'eau et le CO_2 qui sont dues à la production énergétique (centrales électriques) et industrie (Pétrolière et chimique), il existe d'autres gaz à effet de serre d'origine industrielle: Fréon (HCFC-22), CFC , HFC , CF_4 , SF_6

Notions Clés Actuelles sur l'énergie

- Les gaz à effet de serre:

Emissions annuelles de gaz à effet de serre par secteur

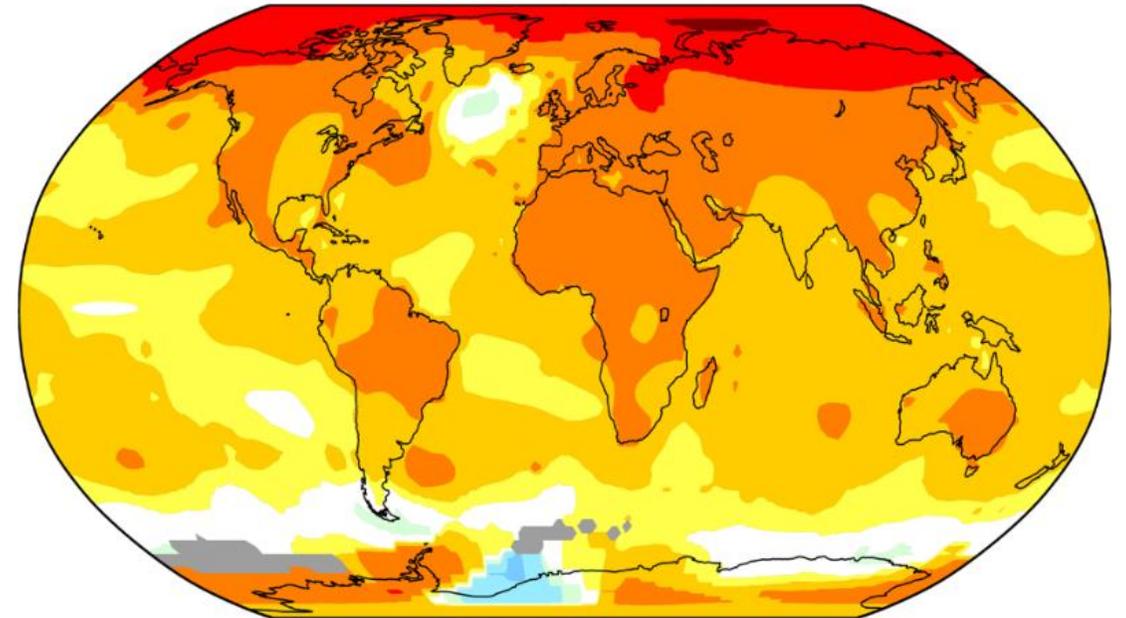


Notions Clés Actuelles sur l'énergie

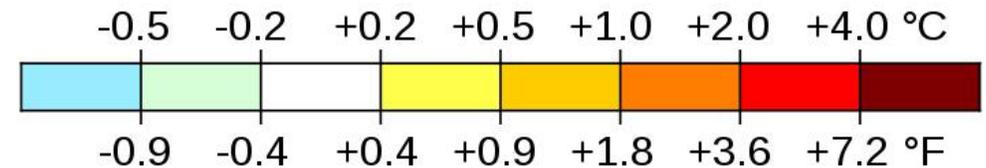
- **Réchauffement (Changement) climatique :**

Le réchauffement climatique est un phénomène global de transformation du climat caractérisé par une augmentation générale des températures moyennes (notamment liée aux activités humaines), et qui modifie durablement les équilibres météorologiques et les écosystèmes.

Changement de température lors des 50 dernières années



moyenne 2011-2020 vs référence 1951-1980

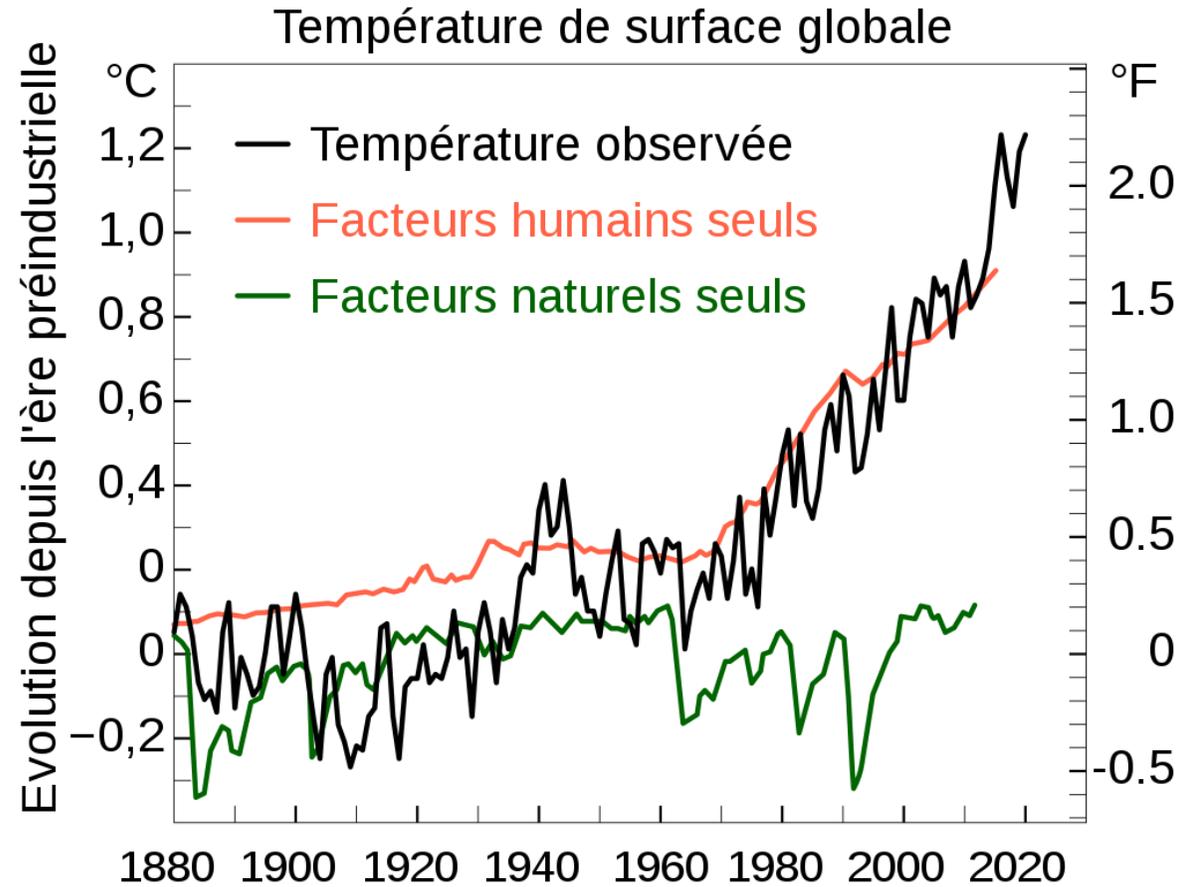


Notions Clés Actuelles sur l'énergie

- **Réchauffement (Changement) climatique :**

Le réchauffement climatique est un phénomène global de transformation du climat caractérisé par une augmentation générale des températures moyennes (notamment liée aux activités humaines), et qui modifie durablement les équilibres météorologiques et les écosystèmes.

Il comprend à la fois le réchauffement induit par les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine et les changements de régimes météorologiques à grande échelle qui en résultent.



Notions Clés Actuelles sur l'énergie

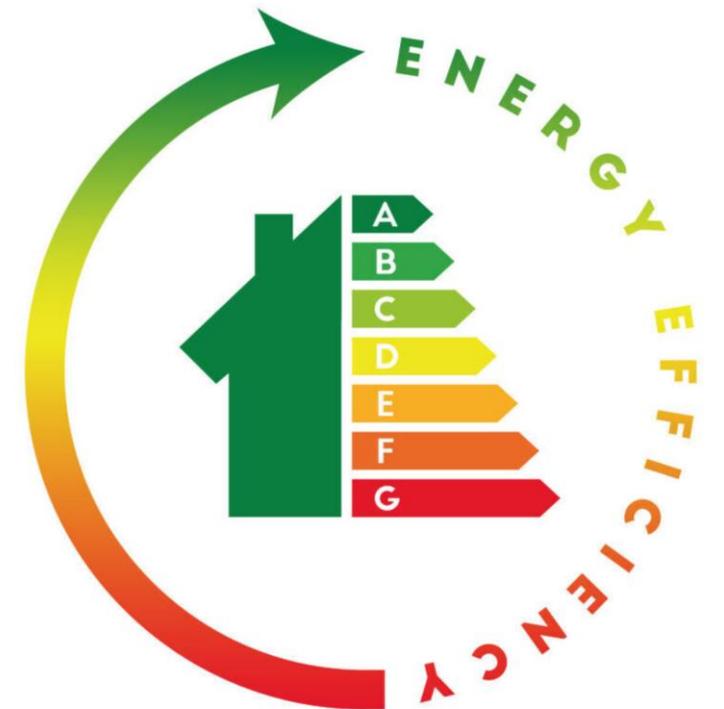
• Efficacité énergétique:

L'efficacité énergétique d'un système est le rapport énergétique : $\epsilon = \frac{E_{abs.}}{E_{prod.}}$.

Moins de perte il y a et meilleure est l'efficacité énergétique. L'efficacité énergétique est ainsi liée à la maximalisation du rendement. L'augmentation de l'efficacité énergétique permet ainsi de réduire les consommations d'énergie, à service rendu égal. En découle la diminution des coûts écologiques, économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie.

Les systèmes intégrant des critères et actions d'efficience énergétique se retrouvent principalement dans les secteurs suivants :

- le bâtiment (habitat pavillonnaire ou collectif, urbanisation, équipements...),
- le transport (véhicules particuliers, transports en commun, fret),
- l'industrie (biens et services)..



Notions Clés Actuelles sur l'énergie

- **Développement durable :**

Le développement durable est la notion qui définit le besoin de transition et de changement dont a besoin notre planète et ses habitants pour vivre dans un monde plus équitable, en bonne santé et en respectant l'environnement.

- Par **développement** on entend l'amélioration des performances (économiques, sociales etc...) d'une société.
- Le terme **durable** caractérise une chose qui tient dans la durée, qui est stable et résistant.

Le **développement durable** est un mode **d'organisation de la société** pour répondre le plus efficacement possible aux **besoins du présent** sans compromettre **la capacité des générations futures** de répondre aux leurs. Aujourd'hui, cette transition vers un modèle plus durable est nécessaire pour vivre dans un monde plus équitable et préserver notre planète et ses ressources naturelles.

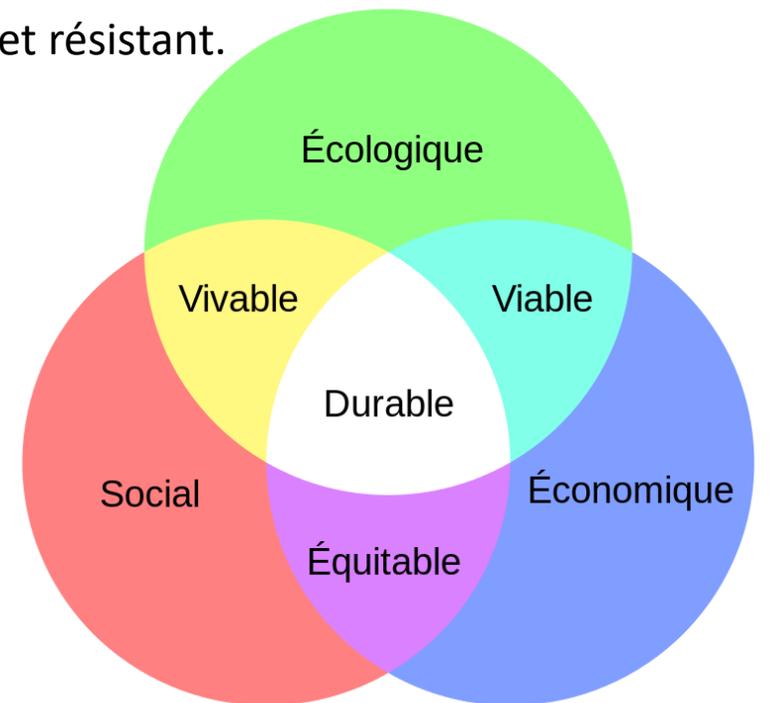


Diagramme de VENN

Notions Clés Actuelles sur l'énergie

• Transition énergétique :

La transition énergétique se définit par l'ensemble des changements que subissent les modèles de production, de distribution et de consommation d'énergie afin de rendre ces derniers plus écologiques.

L'objectif est de transformer un système énergétique reposant sur des énergies fossiles vers un système énergétique reposant sur des énergies renouvelables.

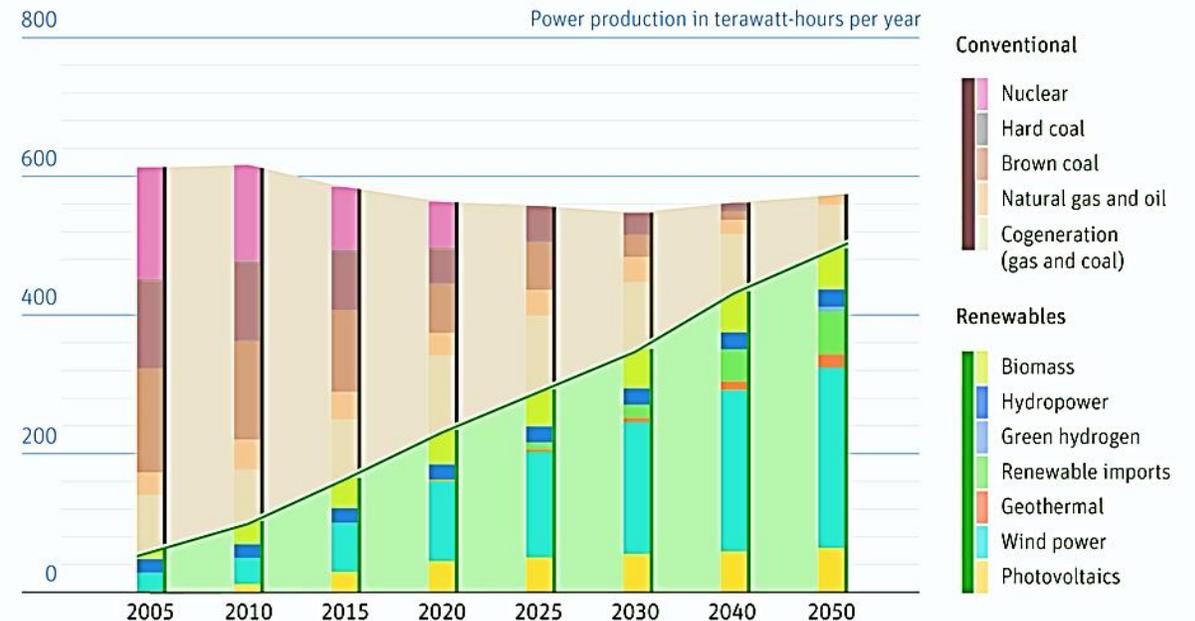
Concept apparu dans les années 80, la transition des énergies fossiles vers les énergies renouvelables répond à plusieurs enjeux :

- ✓ La réduction des émissions de CO₂ ;
- ✓ La raréfaction des énergies fossiles ;
- ✓ La sécurisation des systèmes énergétiques ;
- ✓ La diminution de la consommation énergétique ;
- ✓ La protection de la santé des populations.

Germany's plan: switch from coal and nuclear to renewables

Electricity generation in Germany 2005-2050, scenario

Source: DLR and Fraunhofer IWES



Notions Clés Actuelles sur l'énergie

• Energies propres (Vertes):

Elles produisent une quantité négligeable de déchets et de polluants. Elles ne proviennent pas de sources fossiles (ne rejette pas ou peu de CO₂, ne participe pas ou peu à l'effet de serre ou à la destruction de la couche d'ozone). Elles sont aujourd'hui au cœur des questions d'environnement.

Sur Terre, on compte de nombreuses sources énergies propres :

- L'énergie solaire (la plus emblématique des énergies propres),
- L'énergie géothermique,
- L'énergie éolienne,
- L'énergie marémotrice,
- L'énergie issue de la biomasse.

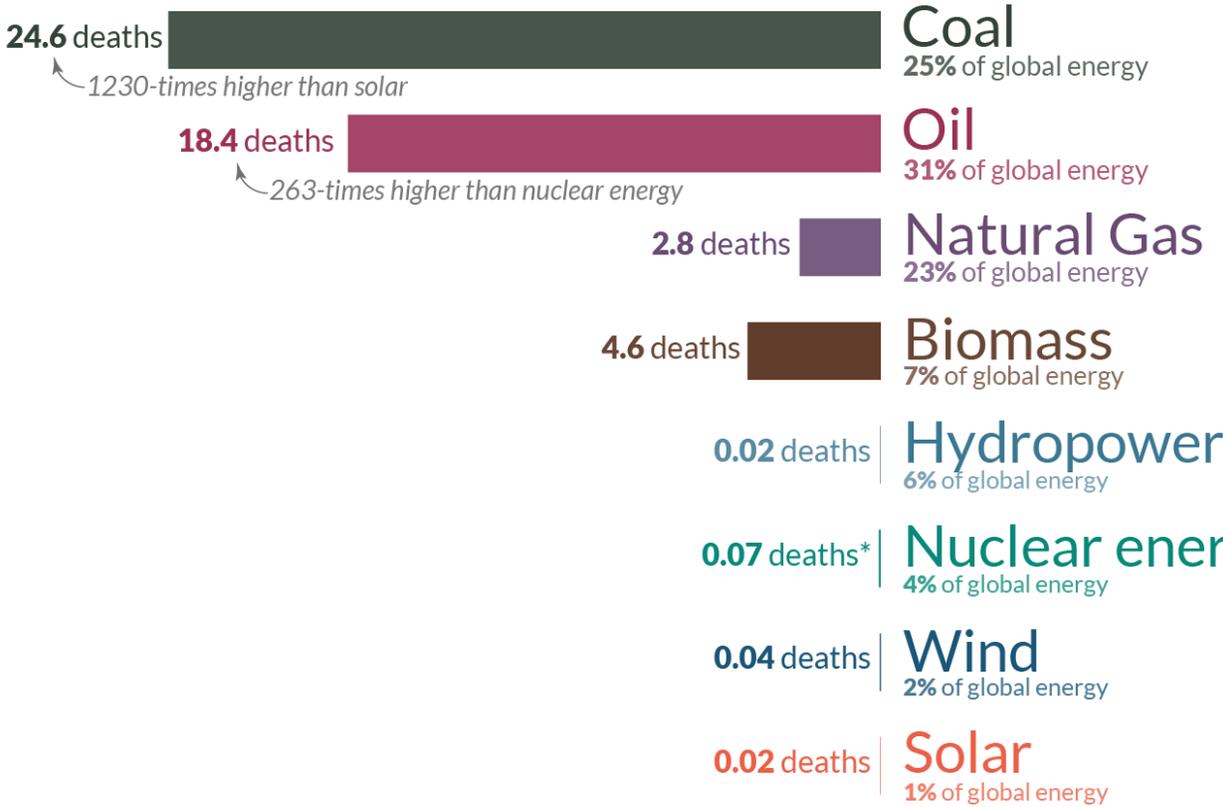
Les énergies renouvelables se distinguent par leur caractère inépuisable, comme l'énergie solaire. Une énergie propre produira peu ou pas de polluants, mais n'est pas nécessairement renouvelable.



What are the **safest** and **cleanest** sources of energy?

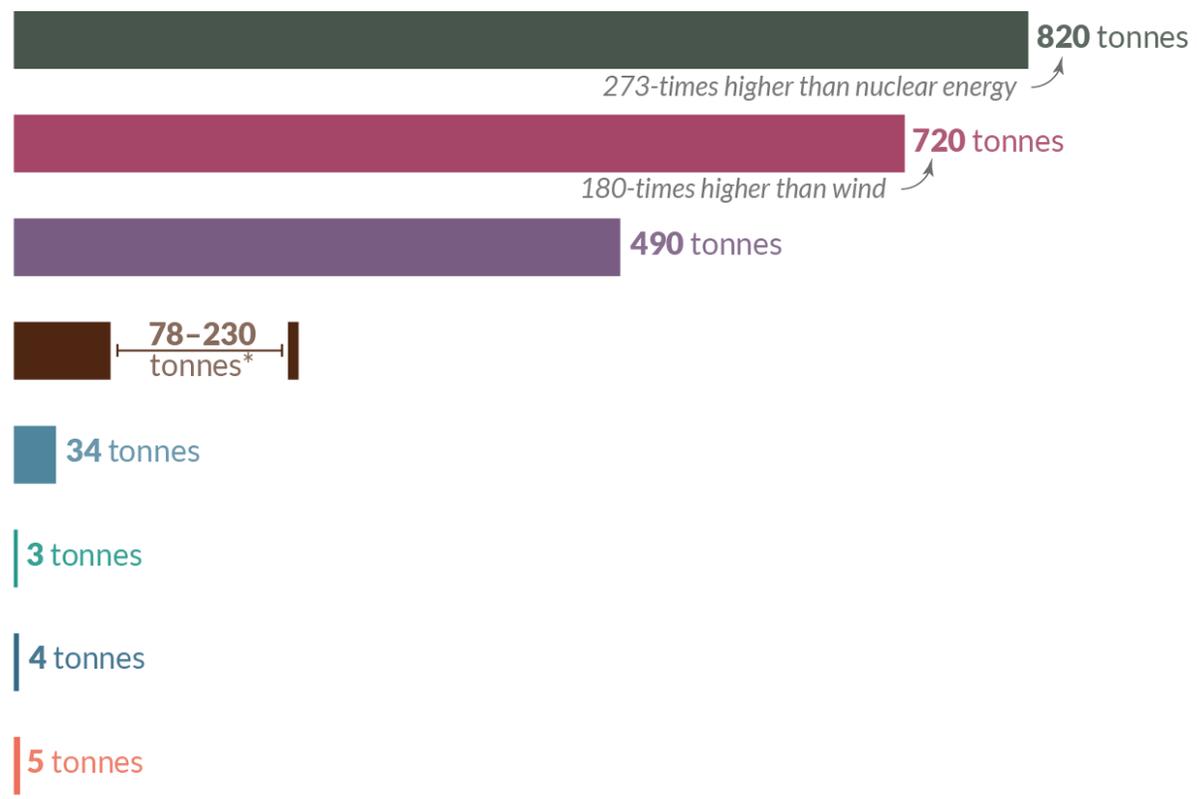
Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of energy production.
1 terawatt-hour is the annual energy consumption of 27,000 people in the EU.



Greenhouse gas emissions

Measured in emissions of CO₂-equivalents per gigawatt-hour of electricity over the lifecycle of the power plant.
1 gigawatt-hour is the annual electricity consumption of 160 people in the EU.



*Life-cycle emissions from biomass vary significantly depending on fuel (e.g. crop residues vs. forestry) and the treatment of biogenic sources.
 *The death rate for nuclear energy includes deaths from the Fukushima and Chernobyl disasters as well as the deaths from occupational accidents (largely mining and milling).
 Energy shares refer to 2019 and are shown in primary energy substitution equivalents to correct for inefficiencies of fossil fuel combustion. Traditional biomass is taken into account.
Data sources: Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in *The Lancet*, and Sovacool et al. (2016) in *Journal of Cleaner Production*;
 Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in *Nature*; Energy shares from BP (2019) and Smil (2017).
 OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world’s largest problems. Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Contenu du Programme

- Aperçu sur les ENR
- L'Énergie et ses formes
- Les (sources) énergies conventionnelles
- Notions Clés actuelles sur l'énergie
- **Les différents types d'énergie renouvelable**
- Les énergies du futur



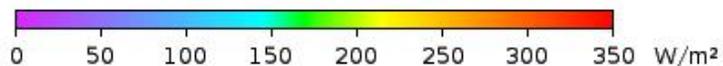
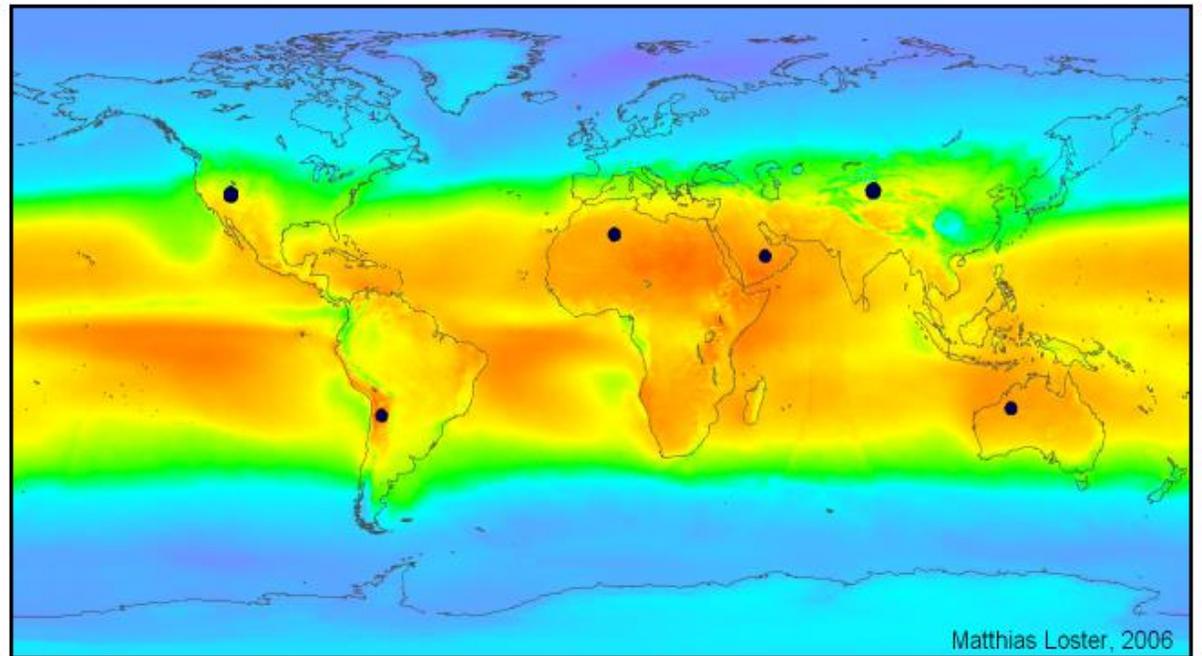
Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie solaire thermique :**

C'est la plus simple et basique forme d'utilisation de l'énergie solaire, utilisée depuis l'antiquité (surtout pour le séchage et le chauffage). Actuellement elle concerne les dispositifs plus sophistiqués visant à tirer un maximum de rendu depuis l'énergie des rayonnements solaires, reçus au niveau de la surface de la Terre.

On distinguera deux usages principaux de l'énergie solaire thermique:

- Usage direct: chauffe-eau, chauffage solaire, sécheuse solaire, four solaire...
- Usage indirect: Centrales solaires thermodynamiques (à base de concentrateurs solaires)

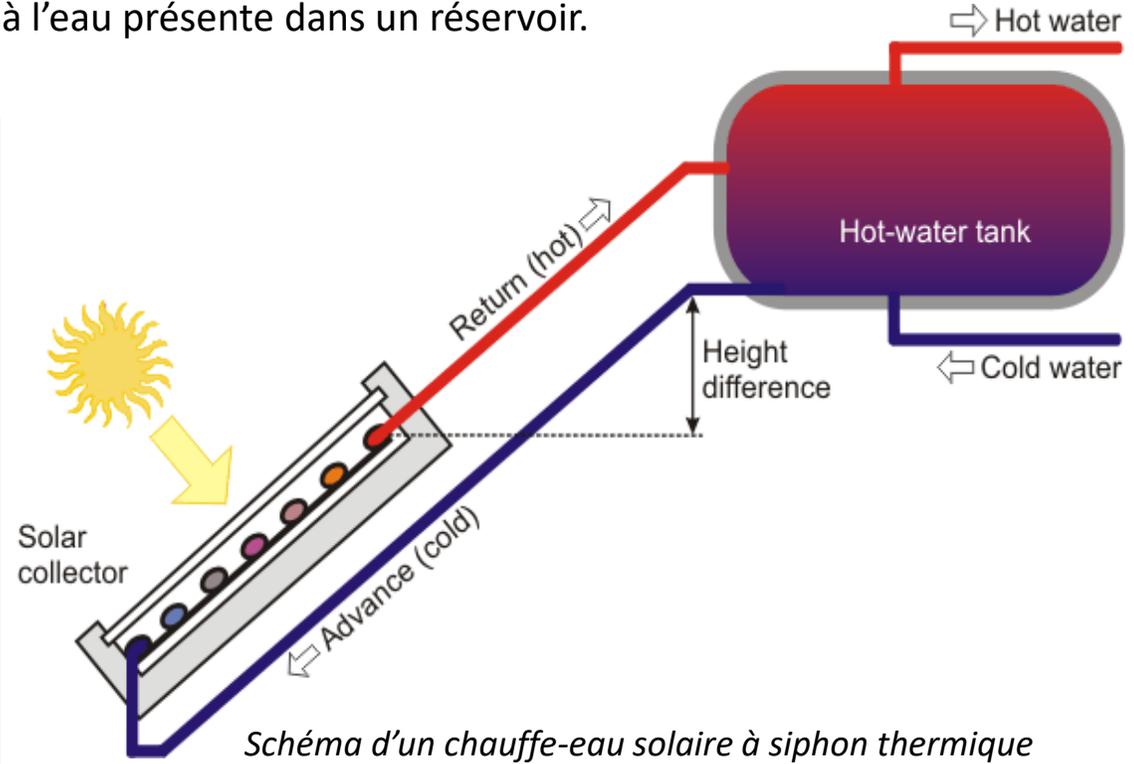
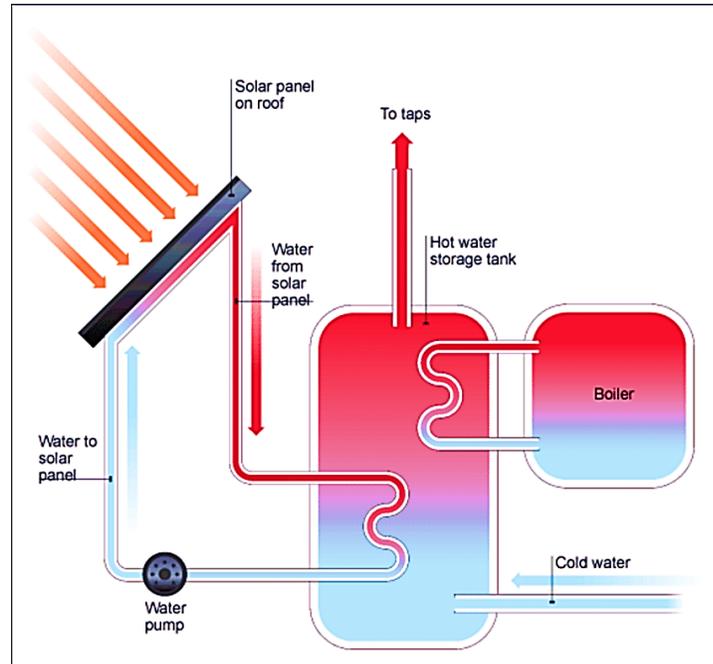
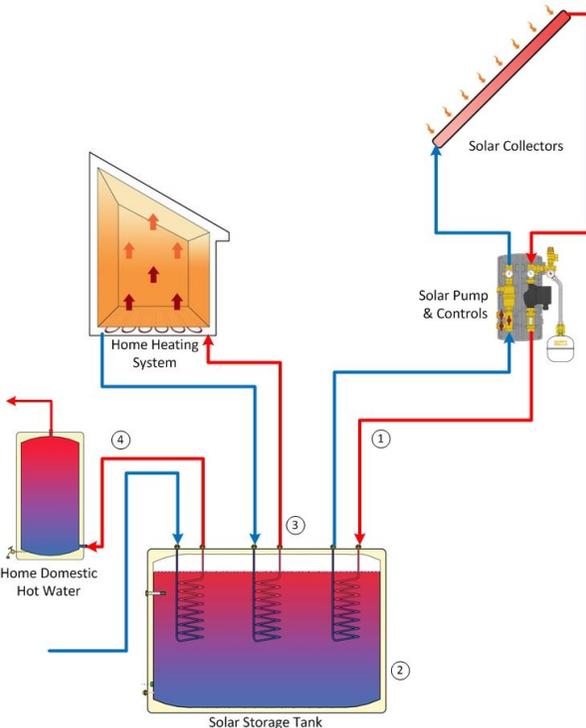


$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$

Les différents types d'énergie renouvelable

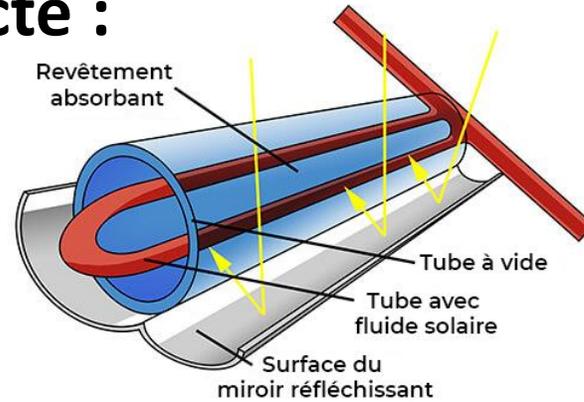
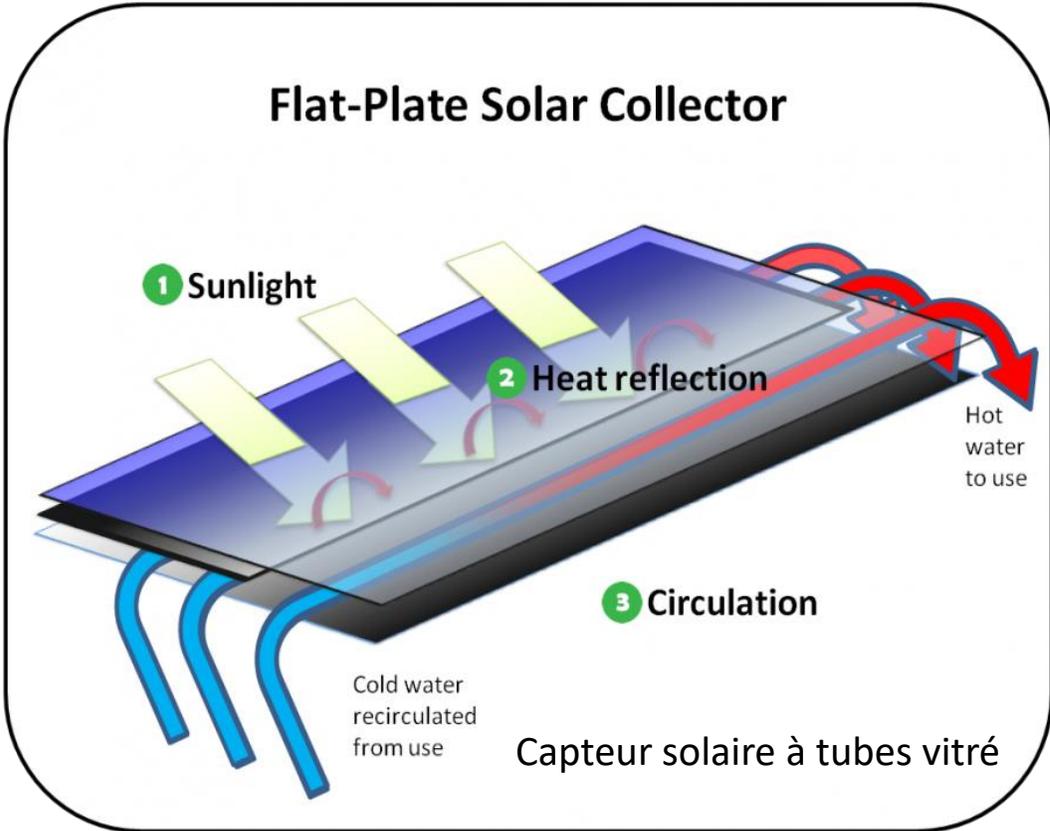
• L'énergie solaire thermique directe :

Son principe consiste à transformer directement l'énergie solaire (rayonnement) en réchauffant de l'eau et ce pour un usage pratique directe: Chauffage ou usage domestique (Bain/douche...). Elle consiste à faire circuler un fluide caloporteur (eau ou solution antigel) dans une tuyauterie d'un collecteur de radiations solaires (peint en noir et souvent sous vitrage à vide pour une meilleure rétention de la chaleur des rayonnements solaires). Ensuite, via un échangeur de chaleur (un serpentin en cuivre) cette chaleur est transférée à l'eau présente dans un réservoir.



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie solaire thermique directe :



Capteur solaire à tubes à vide



Capteur solaire à tubes non vitré

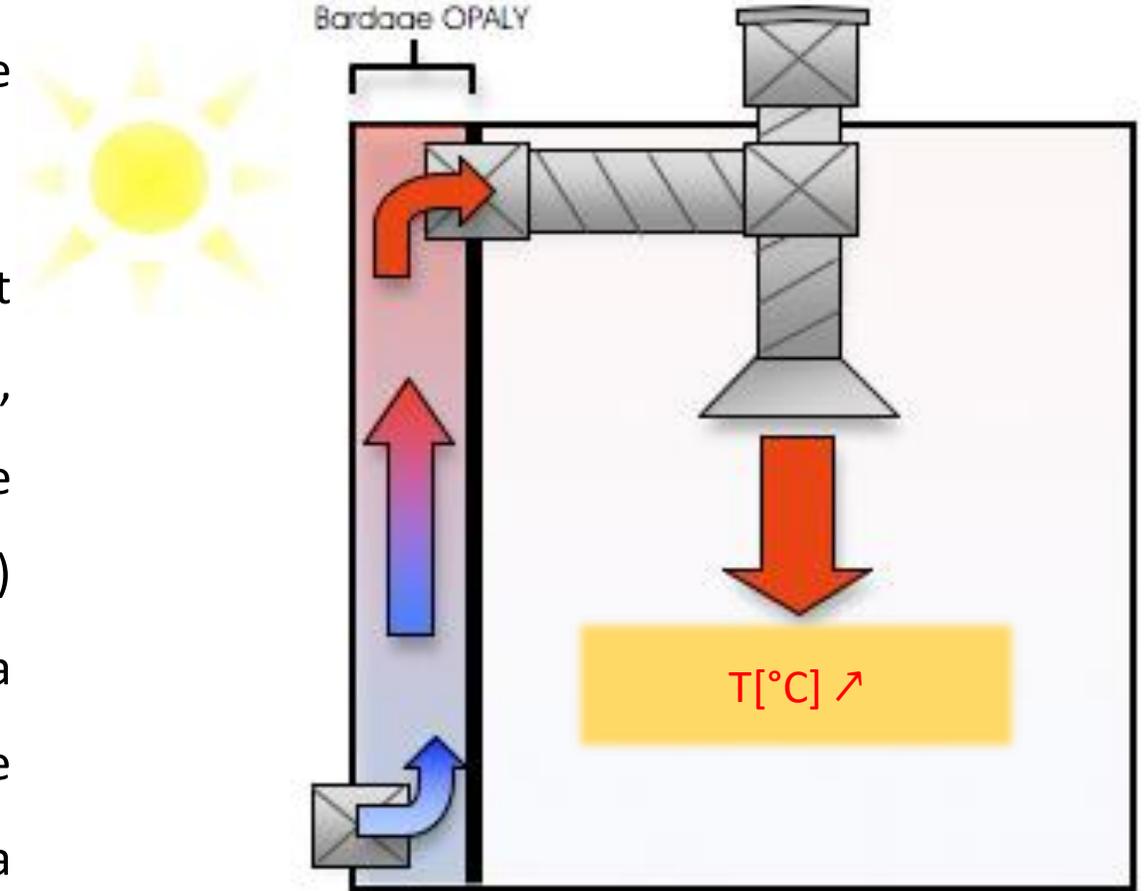


Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie solaire thermique directe :**

On peut également utiliser le même principe du chauffage solaire sur l'air pour l'utiliser dans le chauffage d'un bâtiment (Aérothermie)

Dans ce cas, un mur plein (brique-pleine, béton, ...) est peint en couleur sombre face au sud (hémisphère nord), équipé d'un vitrage (simple ou double) avec ouverture basse (de l'extérieur) et haute (vers l'intérieur) permettra de faire circuler de l'air chaud pour chauffer la maçonnerie durant l'ensoleillement ensuite restituée cette chaleur d'une manière douce durant la nuit ou la période d'un ciel couvert.

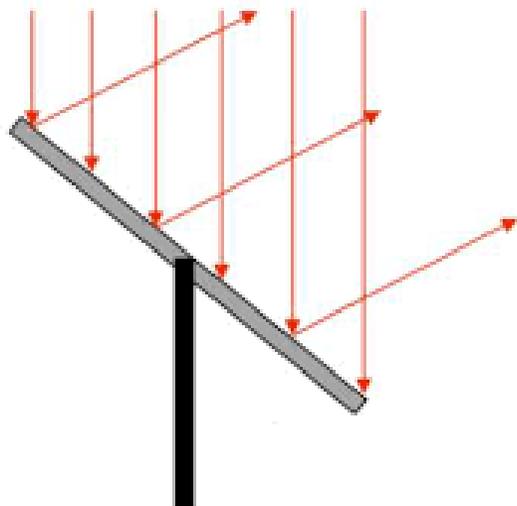
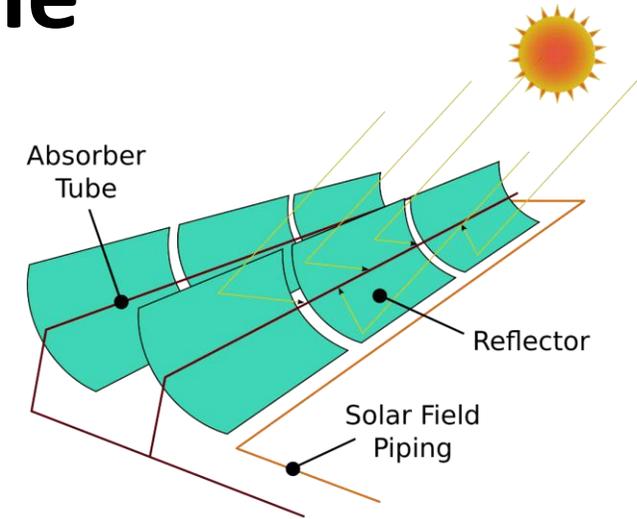


Les différents types d'énergie renouvelable

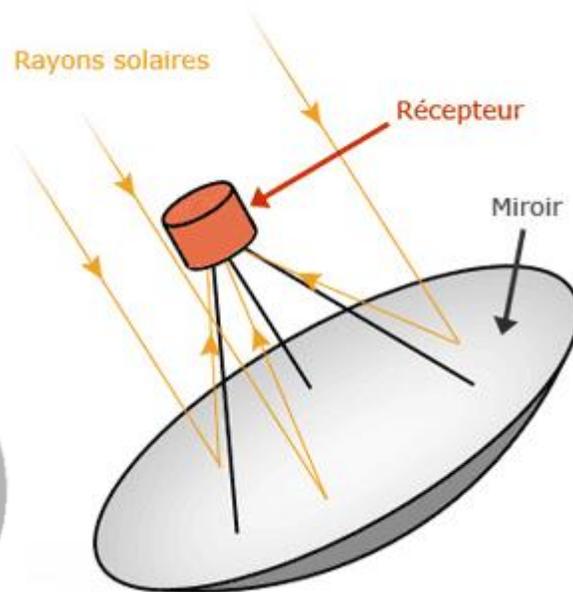
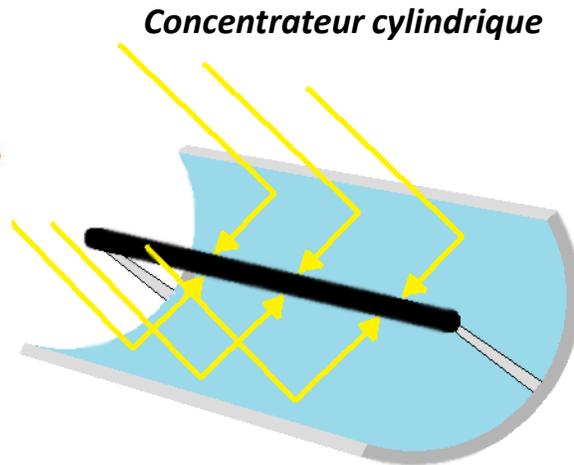
- **L'énergie solaire thermique indirecte :**

Dans ce cas, on utilise le principe de concentration géométrique des rayonnements solaire, pour obtenir un maximum de puissance énergétique du rayonnement collecté sur une zone (surface) réduite.

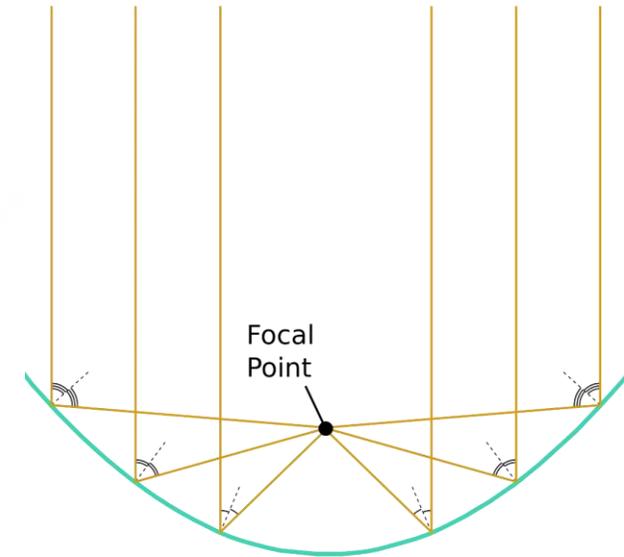
Différent types de concentrateur solaire sont utilisés, selon leur géométrie et leur utilisation.



Héliostat(concentrateur plan/miroir)



Concentrateur parabolique



Les différents types d'énergie renouvelable

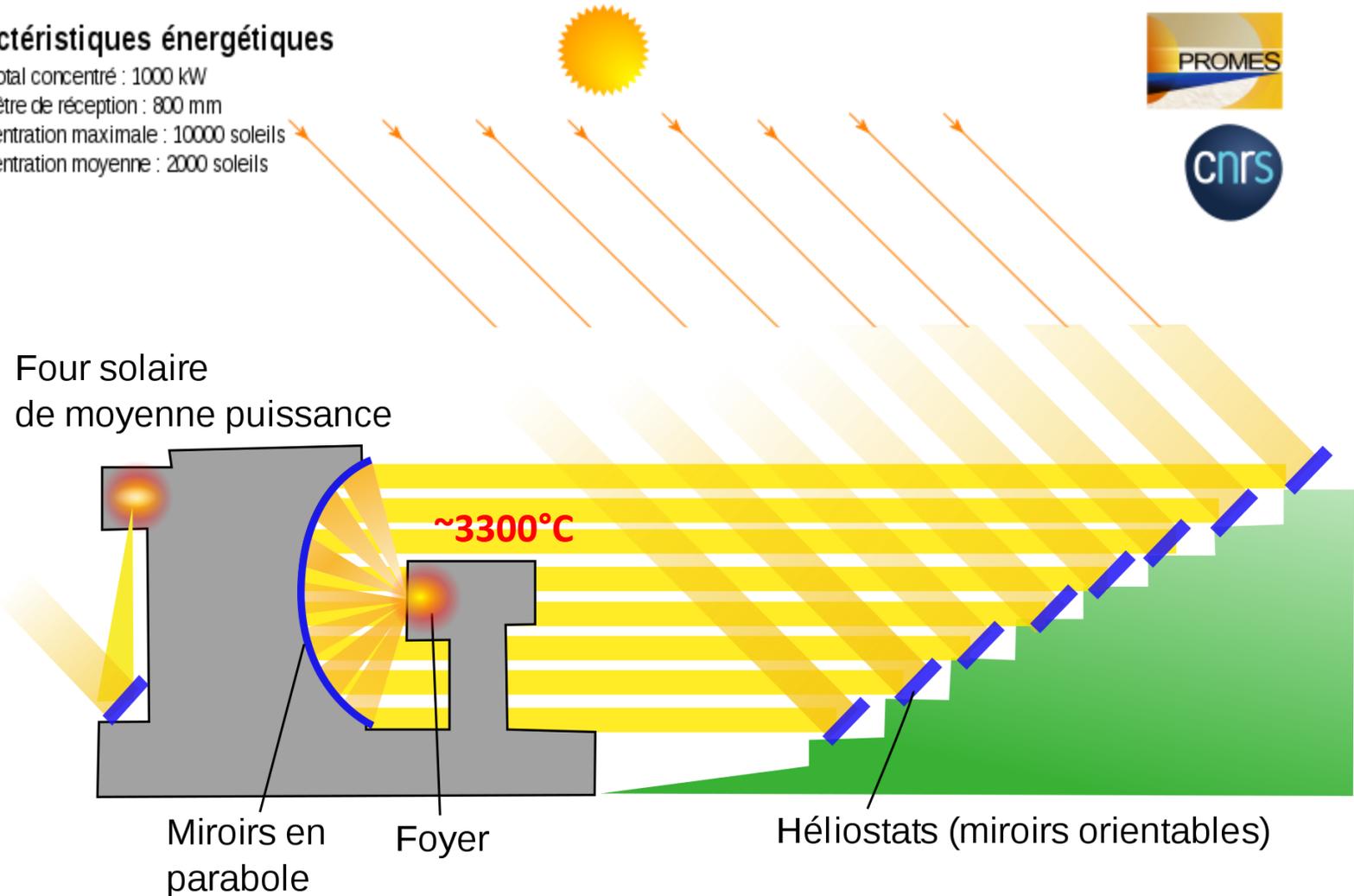
• L'énergie solaire thermique indirecte :

Caractéristiques énergétiques

- Flux total concentré : 1000 kW
- Diamètre de réception : 800 mm
- Concentration maximale : 10000 soleils
- Concentration moyenne : 2000 soleils



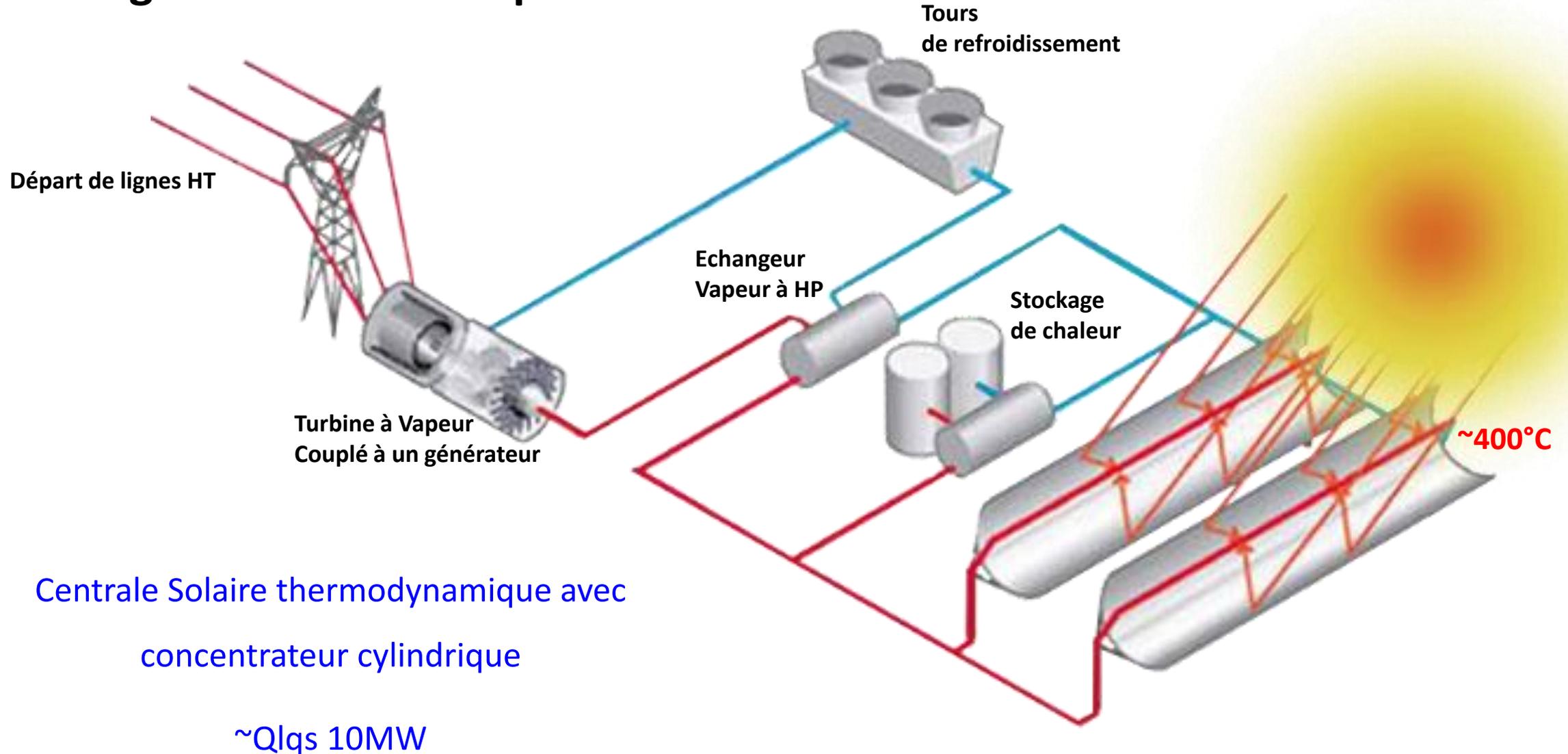
**Four solaire d'Odeillo (France)
1962-2017**



Four solaire de 1 Mégawatt

Les différents types d'énergie renouvelable

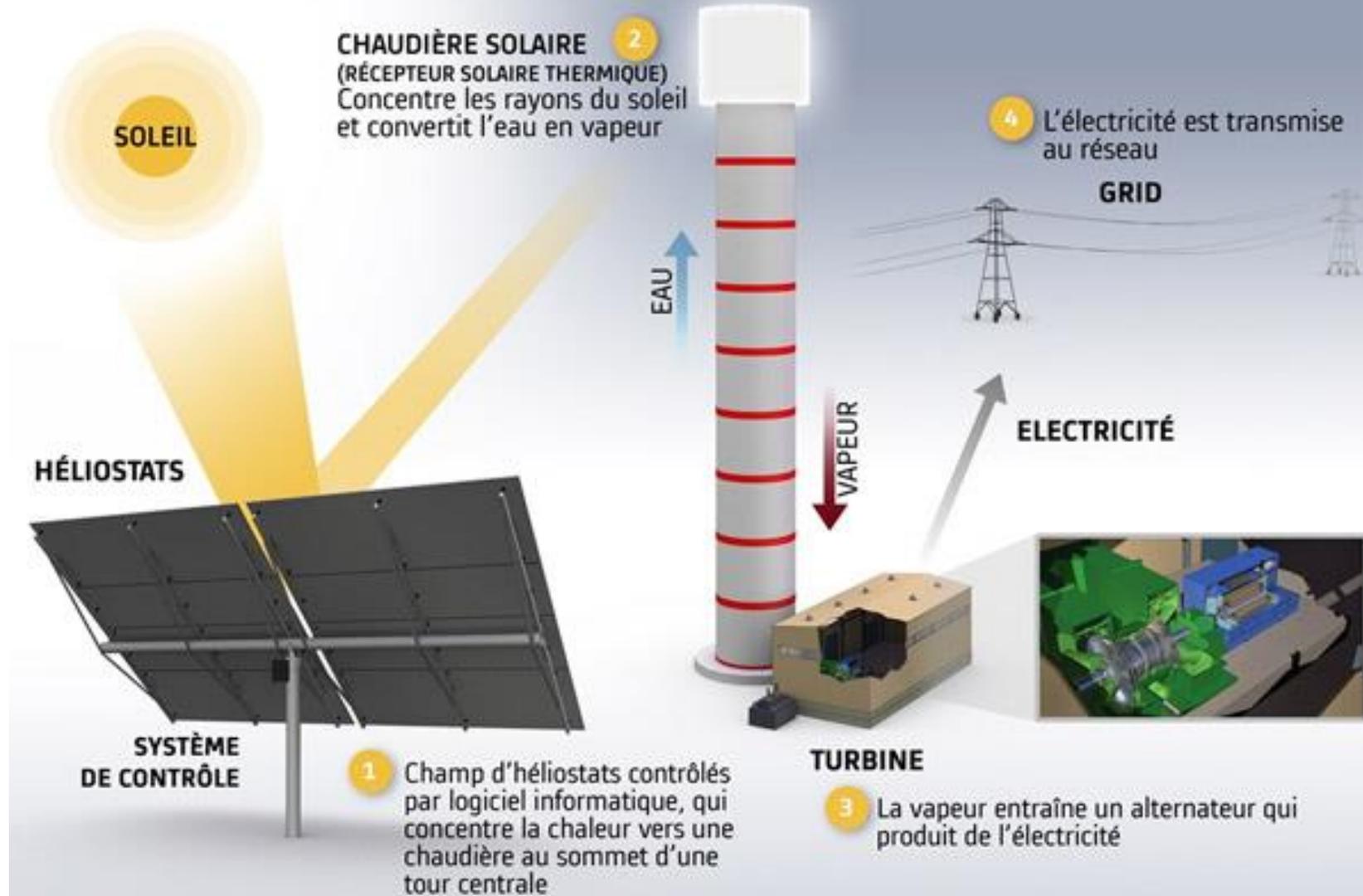
- L'énergie solaire thermique indirecte :



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie solaire thermique indirecte :

Centrale solaire thermodynamique
à tour
~Qlqs 100MW



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie solaire thermique indirecte :

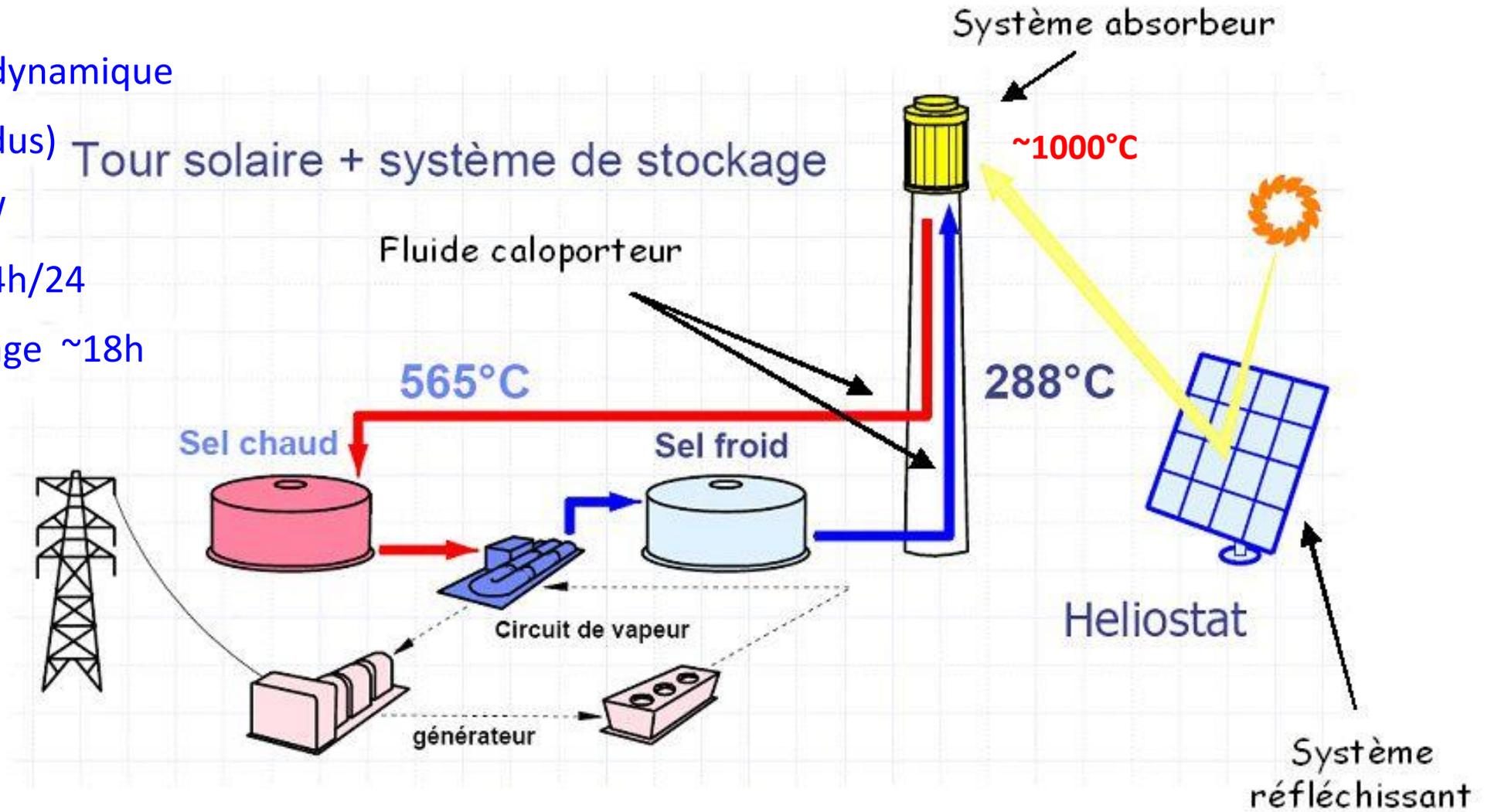
Centrale solaire thermodynamique

à tour (à sels fondus)

~Qlqs 100MW

Fonctionnement 24h/24

Une capacité de stockage ~18h



Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie solaire photovoltaïque :**

Le solaire photovoltaïque est basé sur l'effet photo-électrique (découvert en 1839 par Becquerel, compris en 1887 par Hertz et expliqué en 1905 par Einstein). C'est l'absorption d'un photon (dans le domaine visible) par un électron faiblement lié (matériau conducteur ou semi-conducteur) qui permettra à ce dernier de s'échapper et devenir un électron libre de conduction (courant électrique).

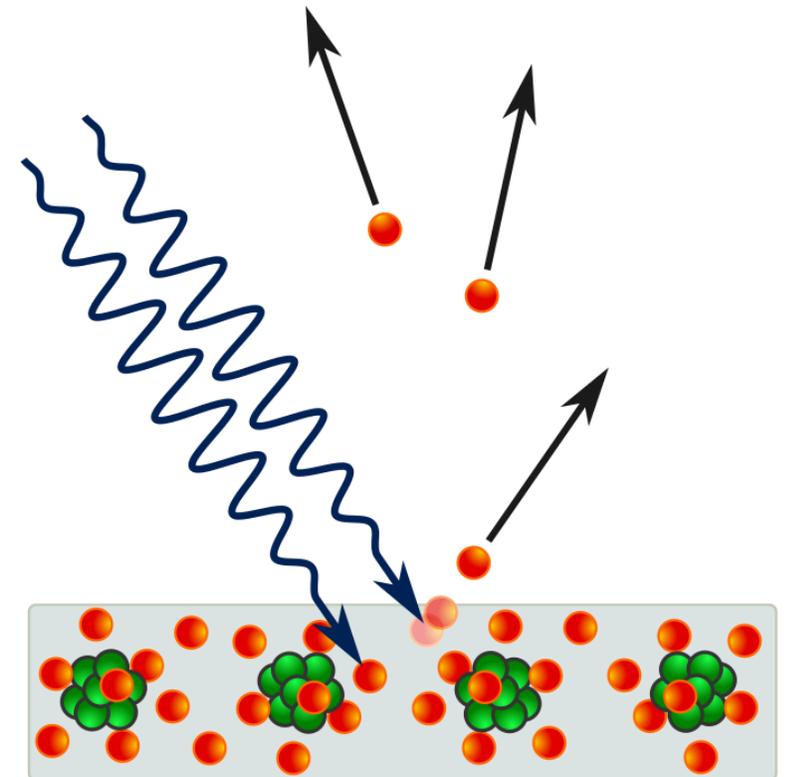
Ce phénomène se traduit par la fameuse loi d'Einstein sur l'effet photoélectrique:

$$E_{ph} = h\nu = W_{ext} + T_{e-}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$$

W_{ext} : travail d'extraction de l'électron (énergie de liaison) ~ qlqs eV

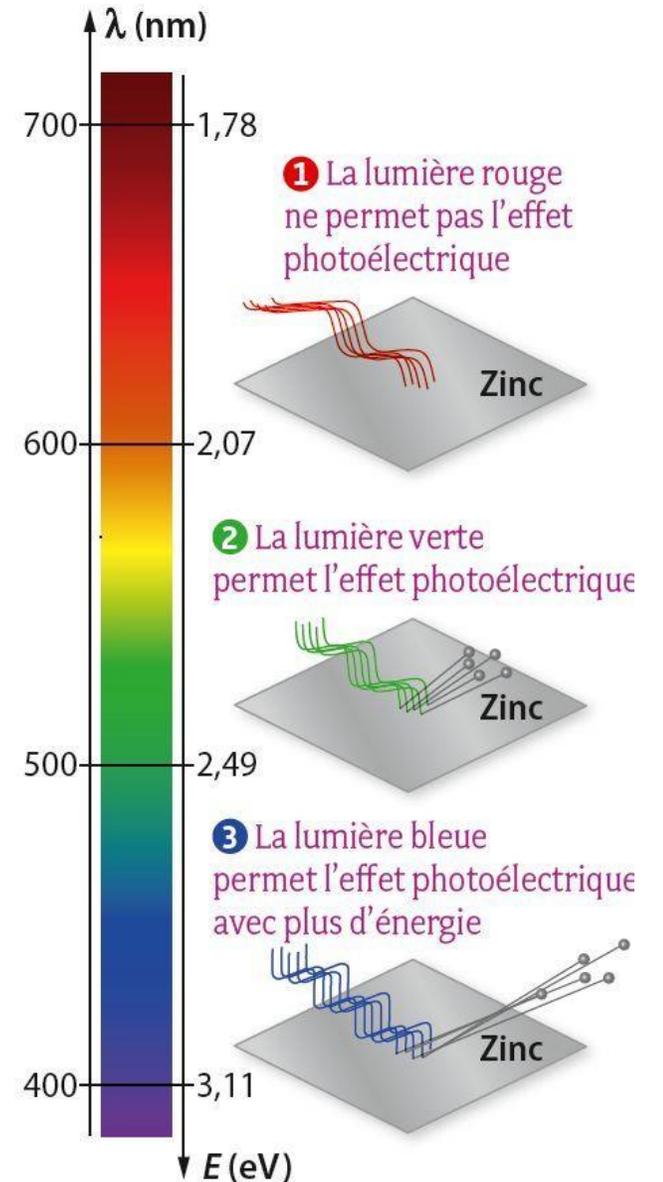
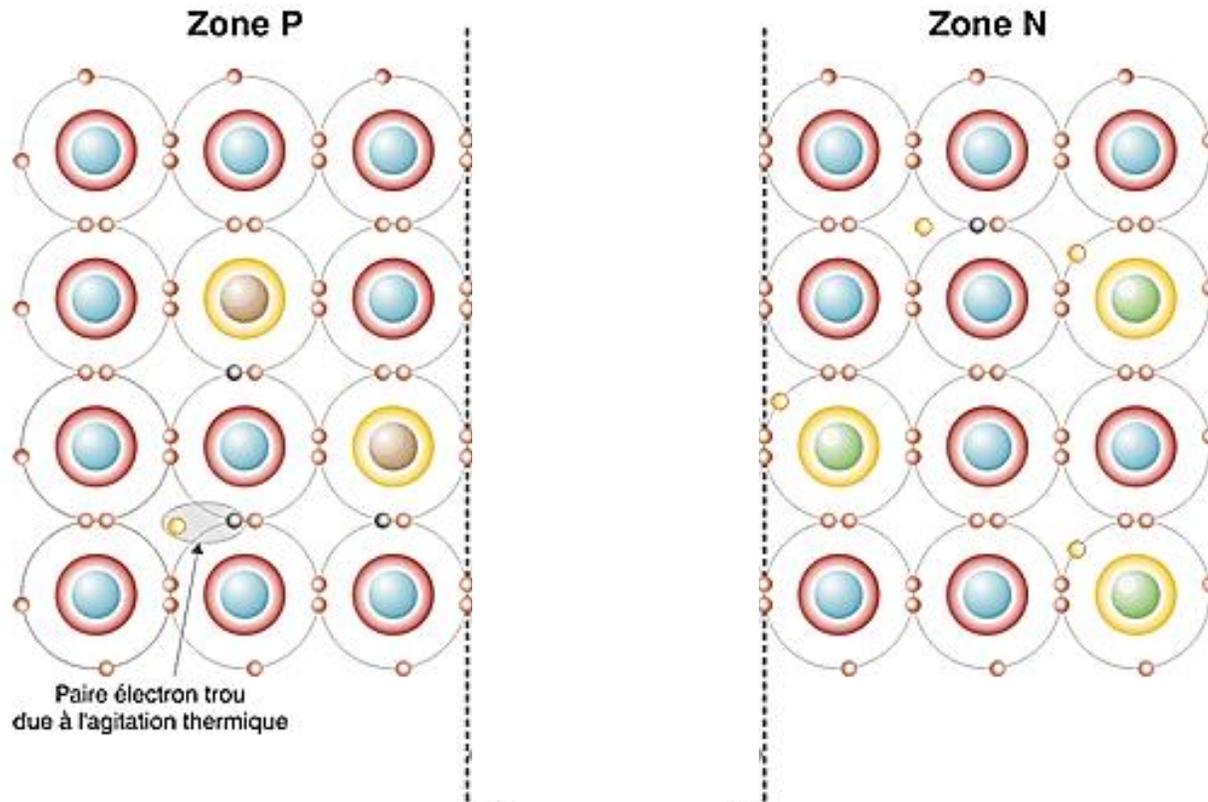
T_{e-} : énergie cinétique de l'électron arraché



Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie solaire photovoltaïque :

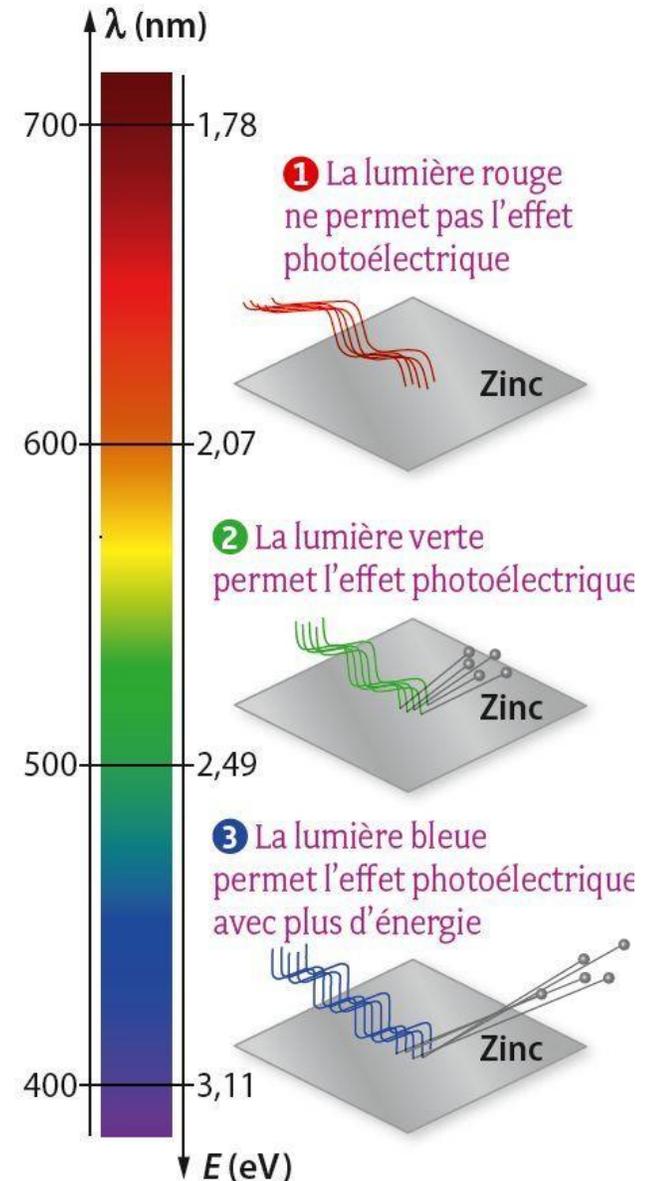
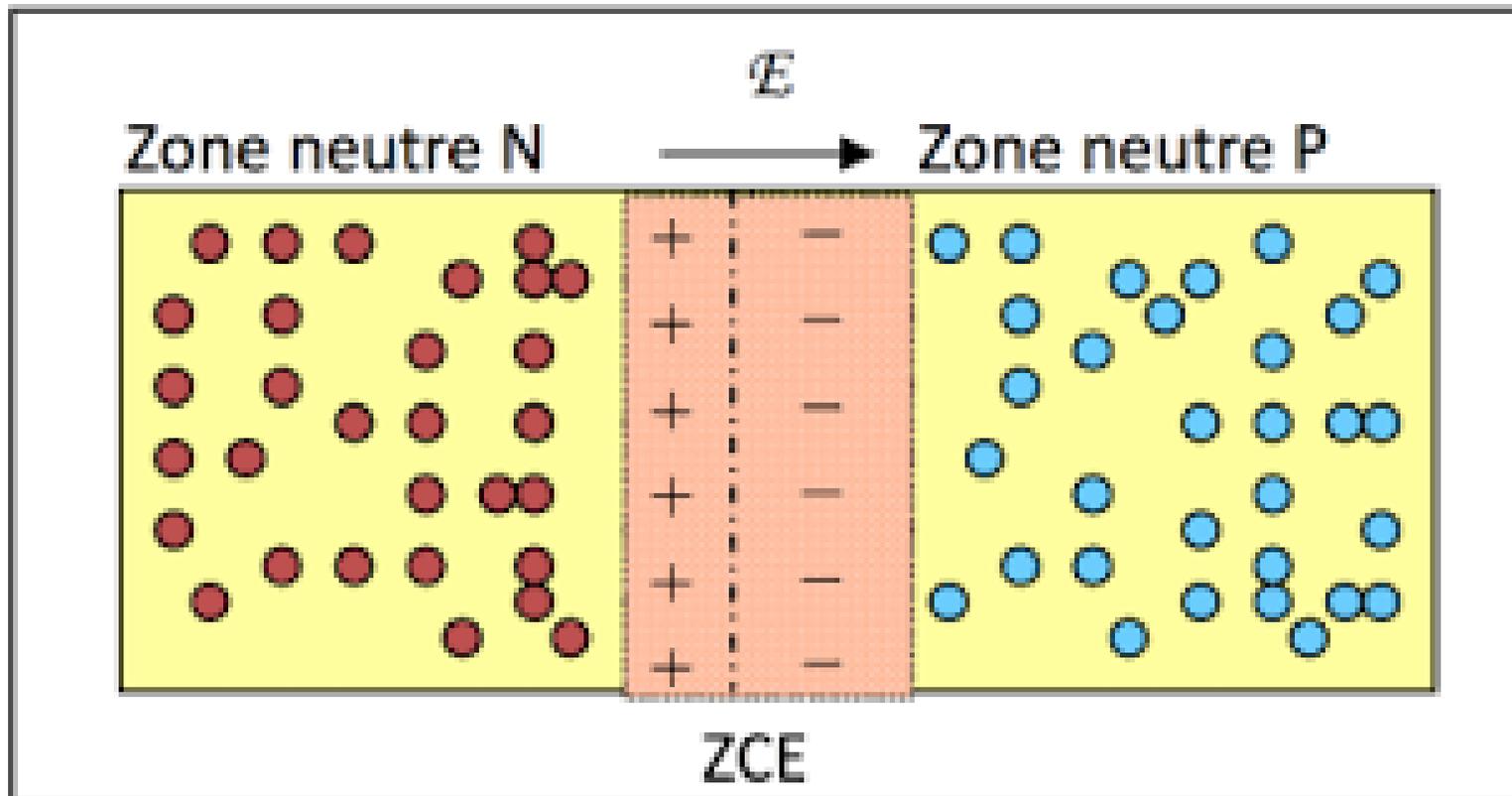
L'effet Photoélectrique dépend de l'énergie du rayonnement et du matériau irradié. Pour un meilleur contrôle de l'effet on utilise les matériaux semi-conducteurs comme le Silicium.

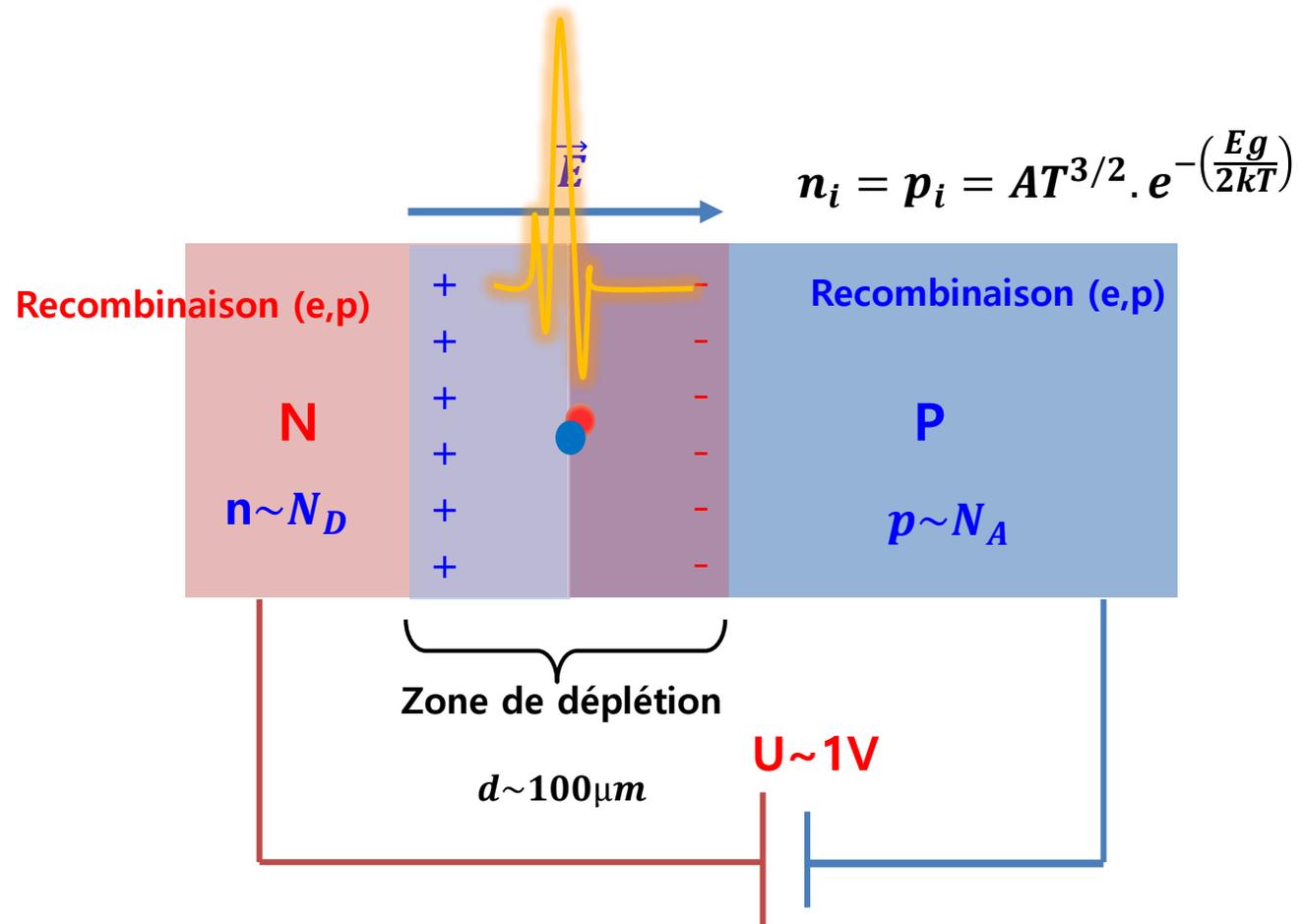
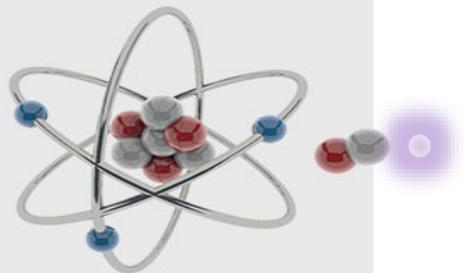


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie solaire photovoltaïque :

L'effet Photoélectrique dépend de l'énergie du rayonnement et du matériau irradié. Pour un meilleur contrôle de l'effet on utilise les matériaux semi-conducteurs comme le Silicium.





Les différents types d'énergie renouvelable

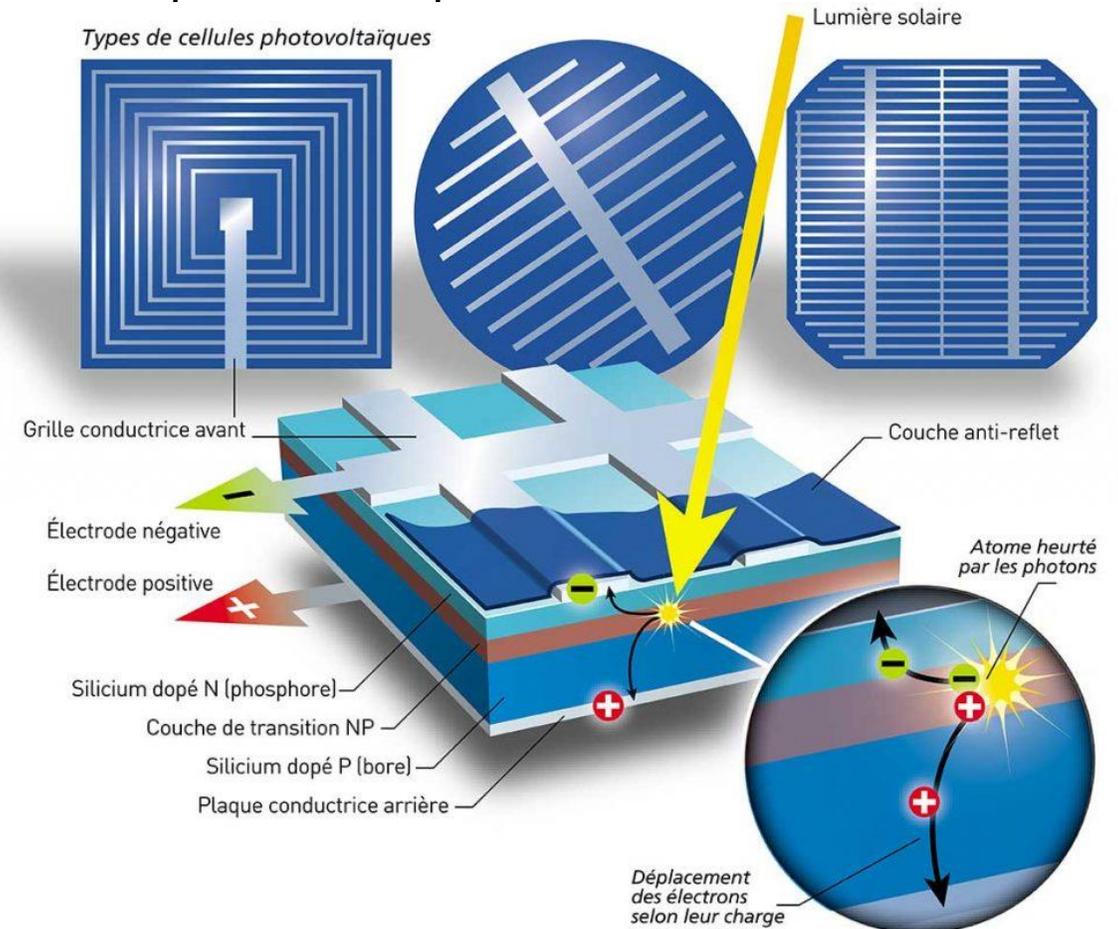
• L'énergie solaire photovoltaïque :

Le silicium est utilisé pour son caractère semi-conducteur et son coût très peu élevé (abondance dans la nature: sable) pour fabriquer ainsi les éléments d'une cellule photovoltaïque faite d'une succession de couches semi-conductrices N-P.

Le tout est revêtu par un vitrage ainsi qu'un revêtement pour réduire la réflexion des rayonnements vers l'extérieur de la cellule.

Une cellule PV est caractérisée par:

- Son rendement (transformation de l'énergie solaire en énergie électrique): $8 \leq \eta \leq 25\%$
- La puissance générée en Watts par m^2

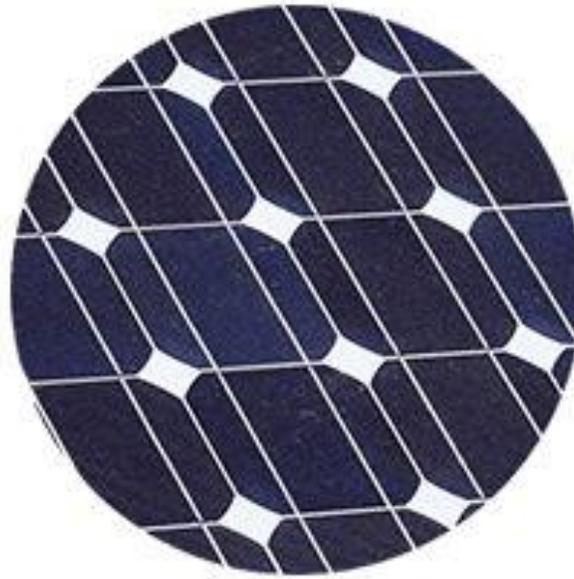


Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie solaire photovoltaïque :

Le rendement des cellules PV est tributaire de la technologie utilisée dans la fabrication de l'élément principal, à savoir le matériau semi-conducteur (en Silicium).

On fera note de deux types principaux de rendement relativement élevé.



Monocrystallin

$\eta \sim 25\%$

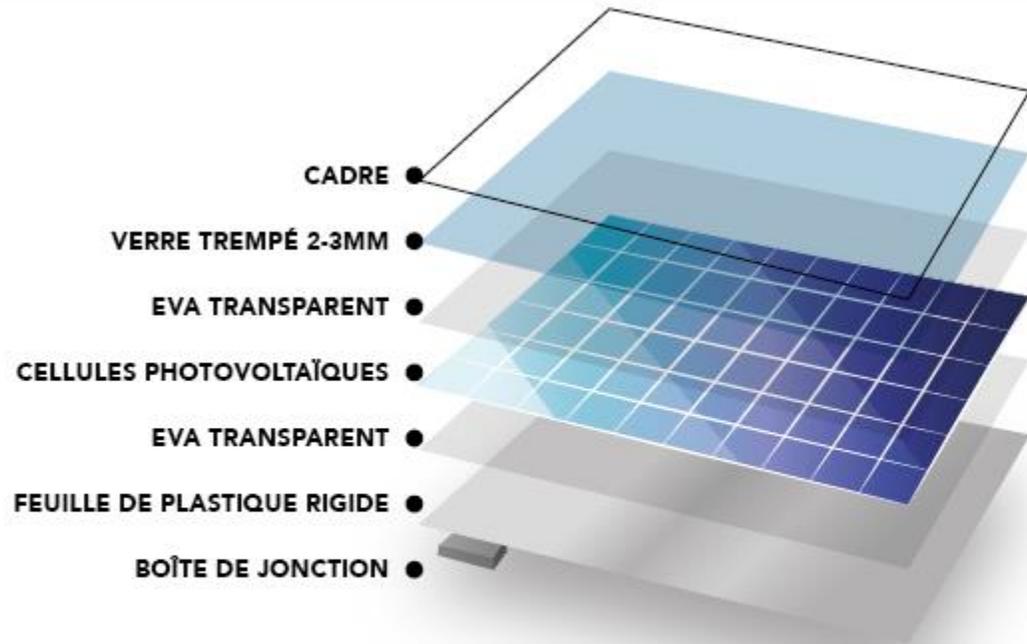


Polycristallin

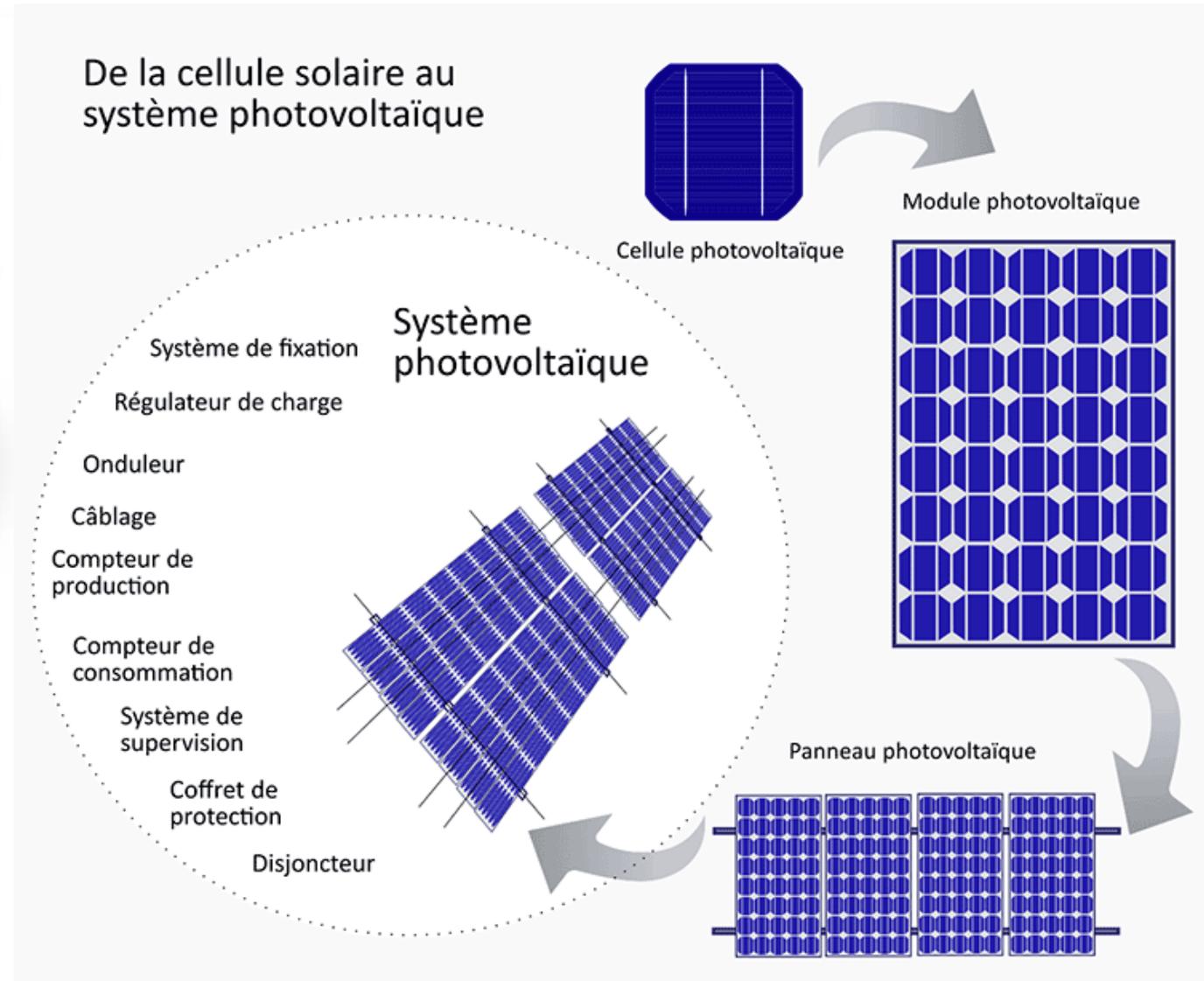
$14 \leq \eta \leq 18\%$

Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie solaire photovoltaïque :



La puissance nominale (théorique maximale) d'un panneau photovoltaïque est estimé pour $1m^2$ comme une surface de référence. Elle est généralement autour de $200W/m^2$



Les différents types d'énergie renouvelable

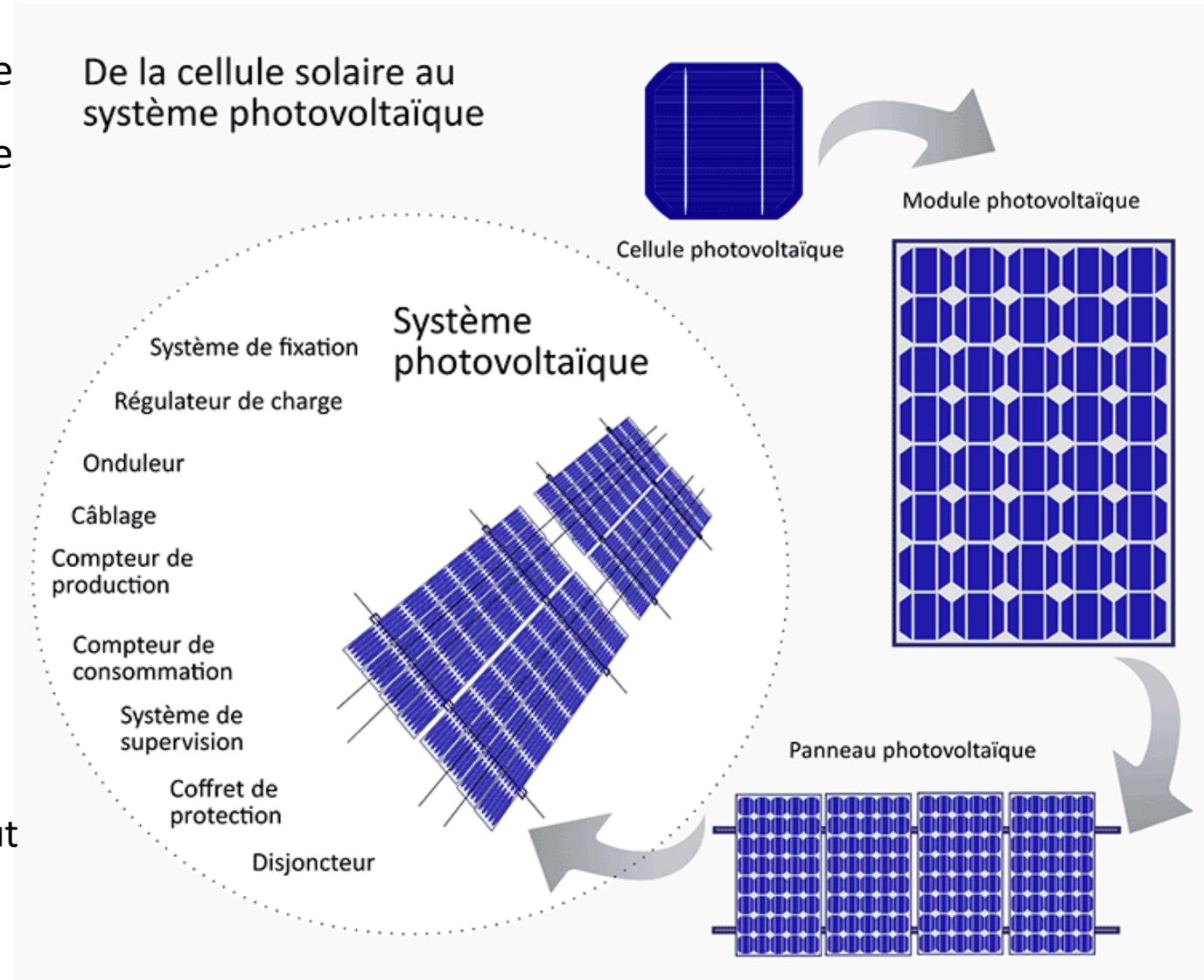
• L'énergie solaire photovoltaïque :

On utilise également la puissance en Watt-crête (Wc) ou kW-c qui représente la puissance maximale obtenue sous les conditions de labo.:

- Ensoleillement de $1000W/m^2$
- Température ambiante de $25^{\circ}C$
- Orientation Sud (hémisphère nord)
- Inclinaison de 30°
- Absence d'ombrage

Cette puissance n'est jamais atteinte en réalité!!!

Selon la zone d'installation (ensoleillement), **1kWc** peut produire entre **900** et **1400kWh**



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie solaire photovoltaïque :



Les Centrales PV peuvent produire une puissance crête allant de $5MWc$ ($\sim 6ha$) jusqu'à $1200MWc$ ($8km^2$)

$P(kWc)$	Panneaux	$S(m^2)$	Min(kWh)	Max(kWh)
3	8	15,2	2700	4200
6	16	30,5	5400	8400
9	24	45,6	8100	12600



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie éolienne:

C'est l'énergie qui consiste à transformer l'énergie dynamique naturelle de l'air (vent) en mécanique pour tourner un générateur électrique et produire de l'énergie électrique renouvelable.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(Avt\rho_{air})v^2 = \frac{1}{2}At\rho_{air}v^3$$

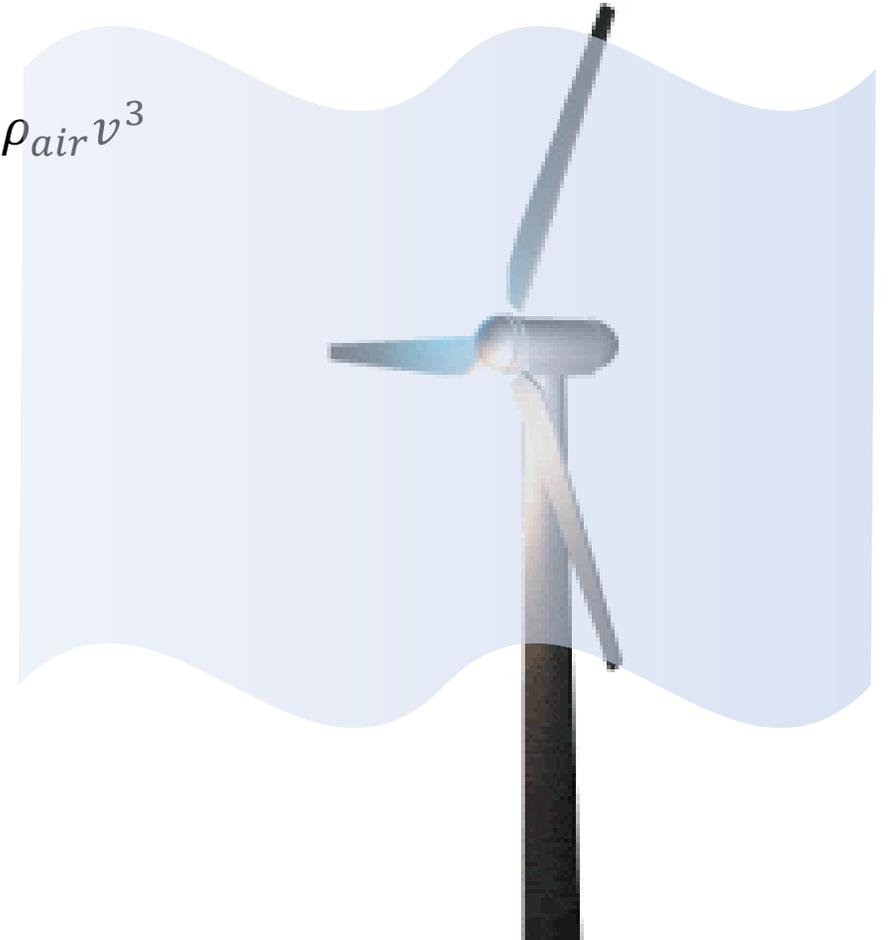
$$P_{éol.} = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2}A\rho_{air}v^3$$

A: Aire de la surface frappée par le vent

t: le temps durant lequel le vent agit sur la surface *A*

ρ_{air} : la densité de l'air

v: la vitesse du vent

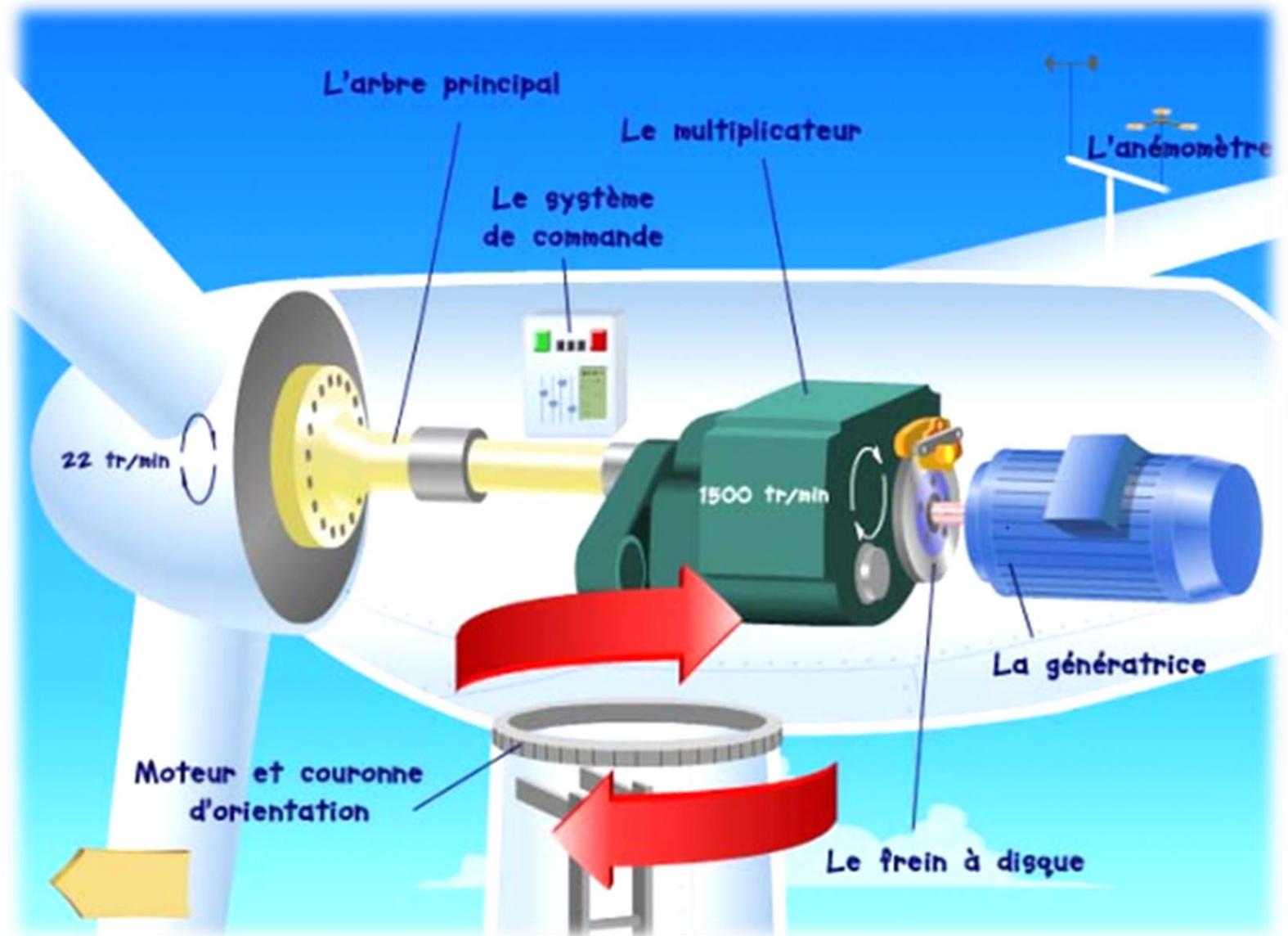


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie éolienne:

Le principe de fonctionnement d'une éolienne consiste à profiter au maximum de la force du vent (orientation azimutale) pour produire de l'énergie électrique via une génératrice installé dans le corps de l'éolienne soulevé à une hauteur optimale.

On utilise également un multiplicateur de vitesse (mécanique) pour régulariser la rotation de la génératrice électrique.



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie éolienne:

Eolienne domestique
 $P \sim 0,1 - 36kW$
 $h \leq 36m$



Moyenne à Grande Eolienne
 $P \sim 36kW - 2MW$
 $36 \leq h \leq 120m$



Mais !!!

Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie éolienne:

Le problème majeur des éoliennes est que leur production est intermittente, à cause du caractère aléatoire des conditions météorologiques.

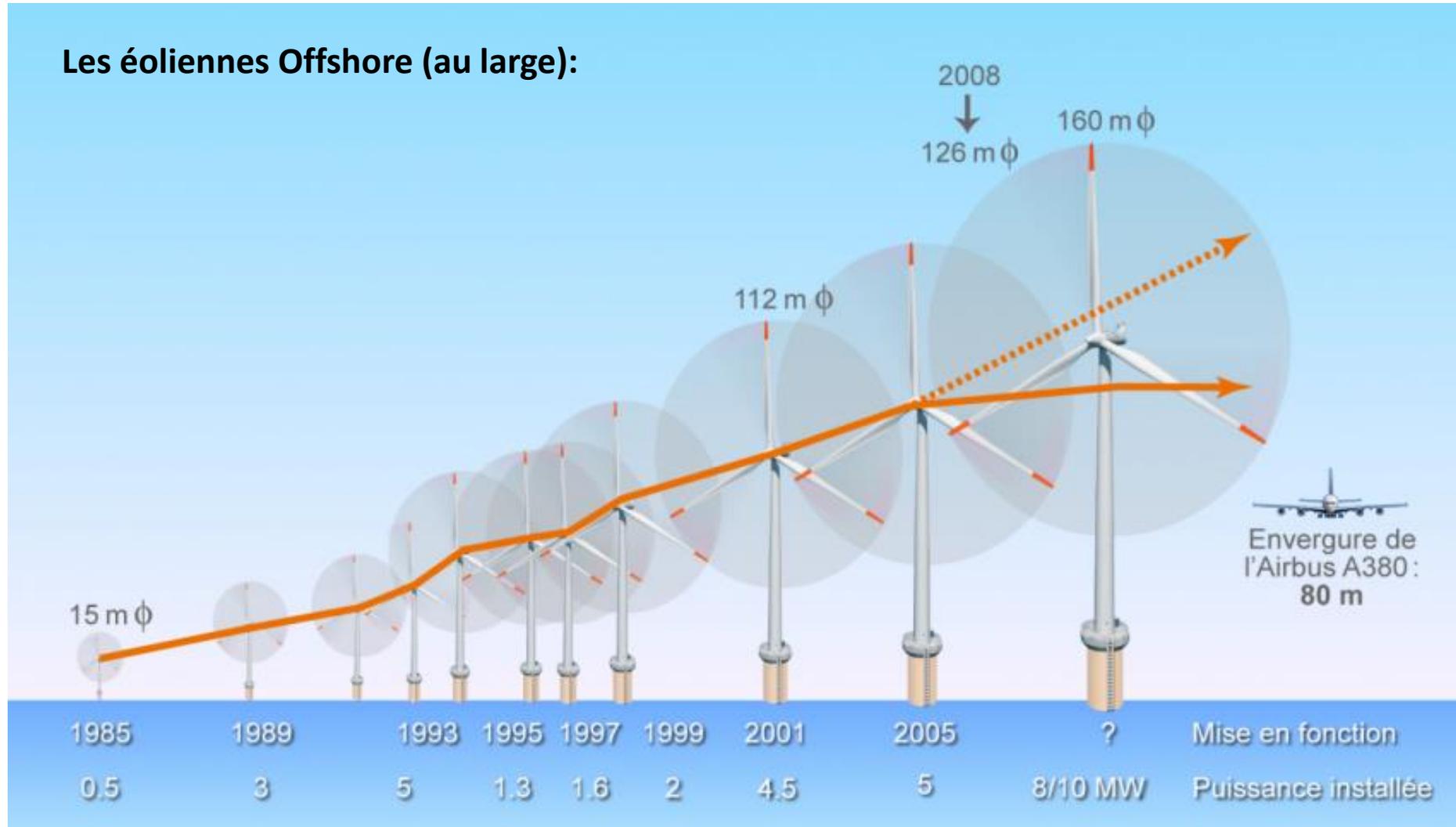
Pour cette raison, il est souvent nécessaire d'installer les éoliennes avec une deuxième source d'énergie régulière (conventionnelle) ou bien prévoir un système de stockage d'énergie pour prévenir les périodes de faible ventilation.



Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie éolienne:

- Construites en mer
- À plus de 10km de la côte
- Un vent plus régulier et plus puissant
- Une puissance supérieure qu'au sol
- Connectées via un câble sous-marin
- Production : vent $\geq 10\text{km/h}$

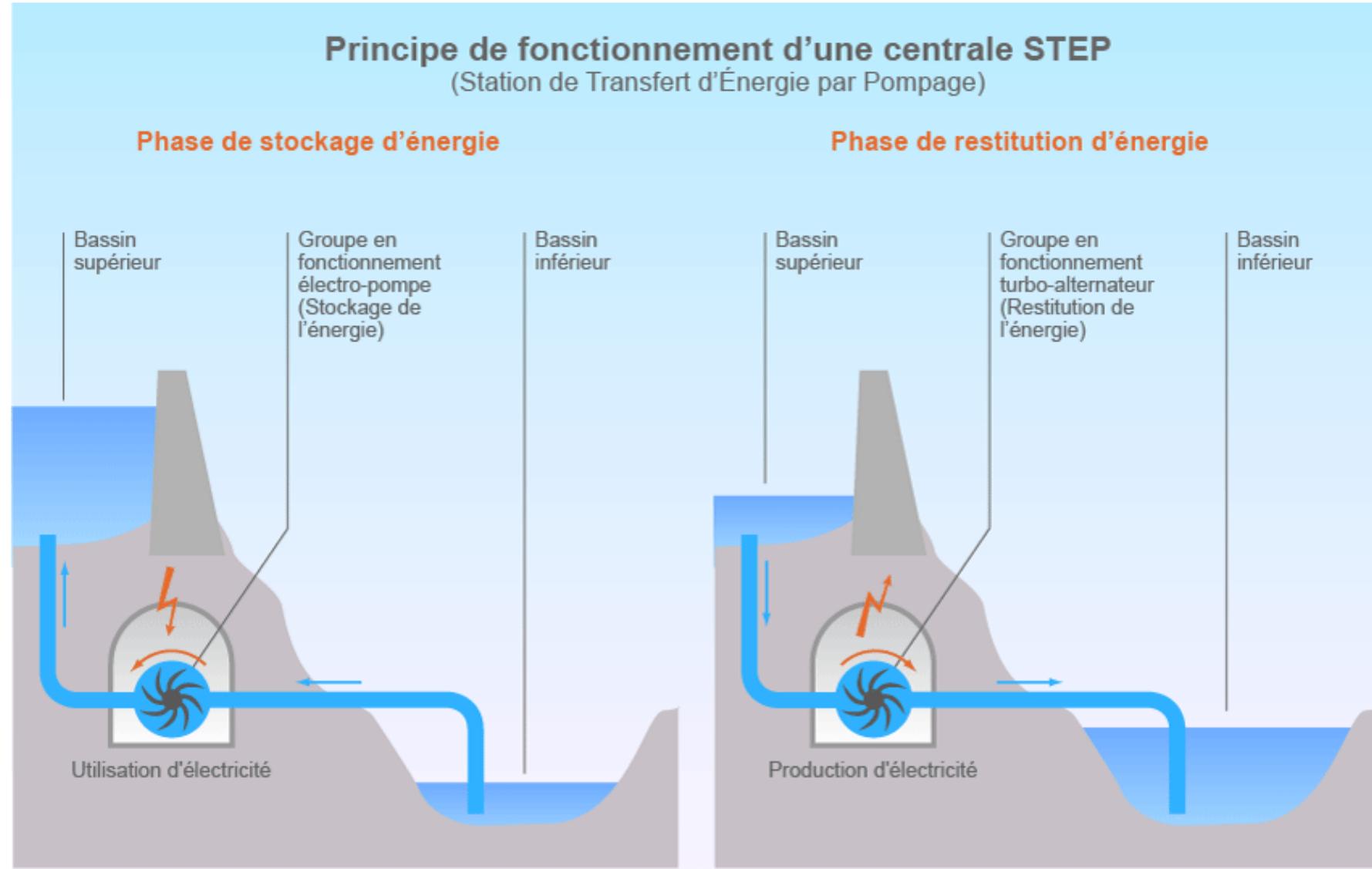


Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie éolienne:**

Stockage de l'énergie des éoliennes:

Stockage par pompage et turbinage, qui consiste à utiliser l'excédent de production en électricité pour pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur (énergie potentielle), pour ensuite l'utiliser pour le turbinage durant la période de faible production des éoliennes, comme une énergie hydro-électrique

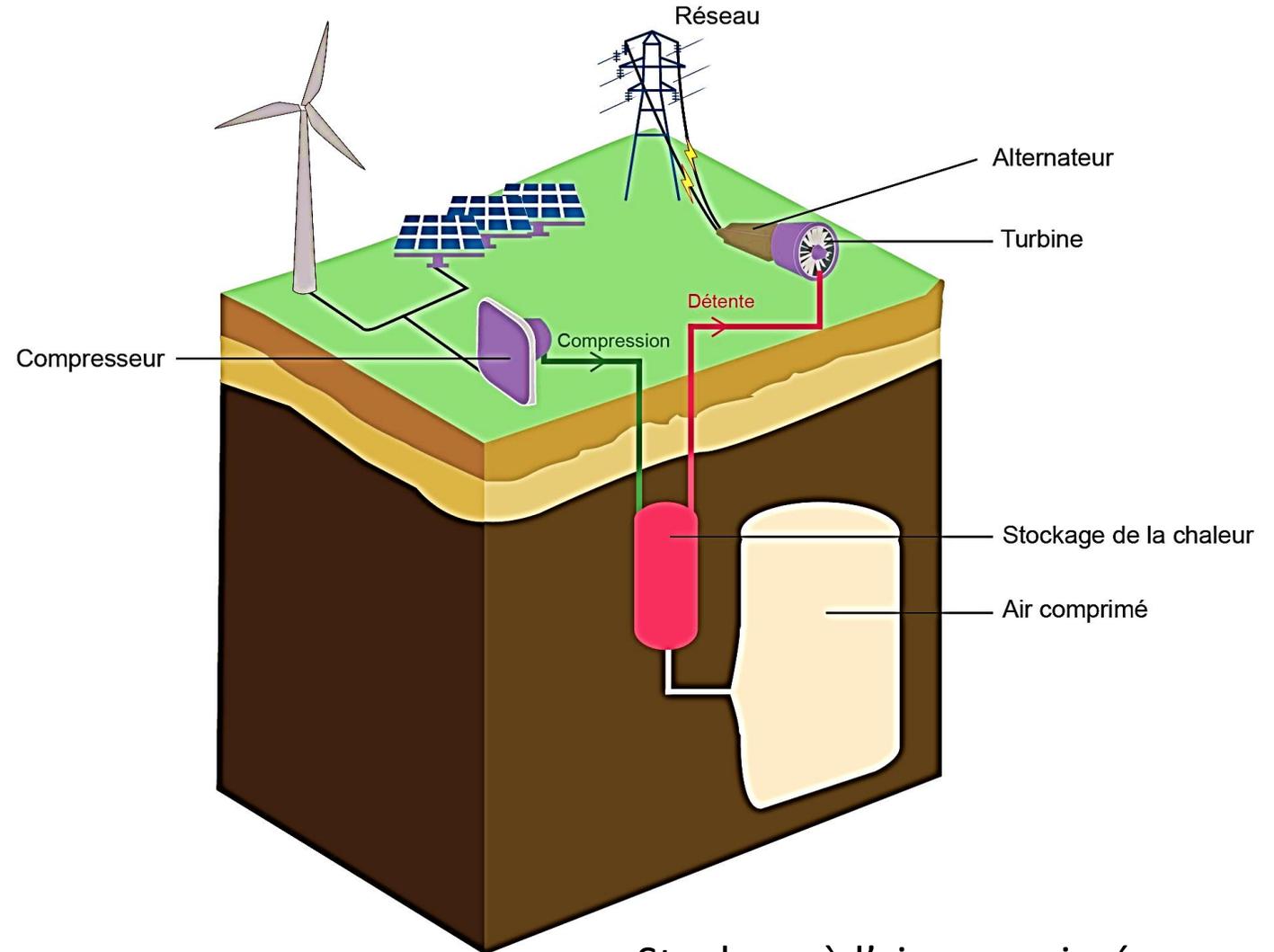


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie éolienne:

Stockage de l'énergie des éoliennes

Stockage à l'air comprimé, qui consiste à utiliser l'excédent de production en électricité pour compresser de l'air dans des cavités géologiques ou artificielles à très haute pression, cette pression sera restituée en flux dynamique durant la période de faible production des éoliennes, appliqué sur des turbines à vapeur/gaz



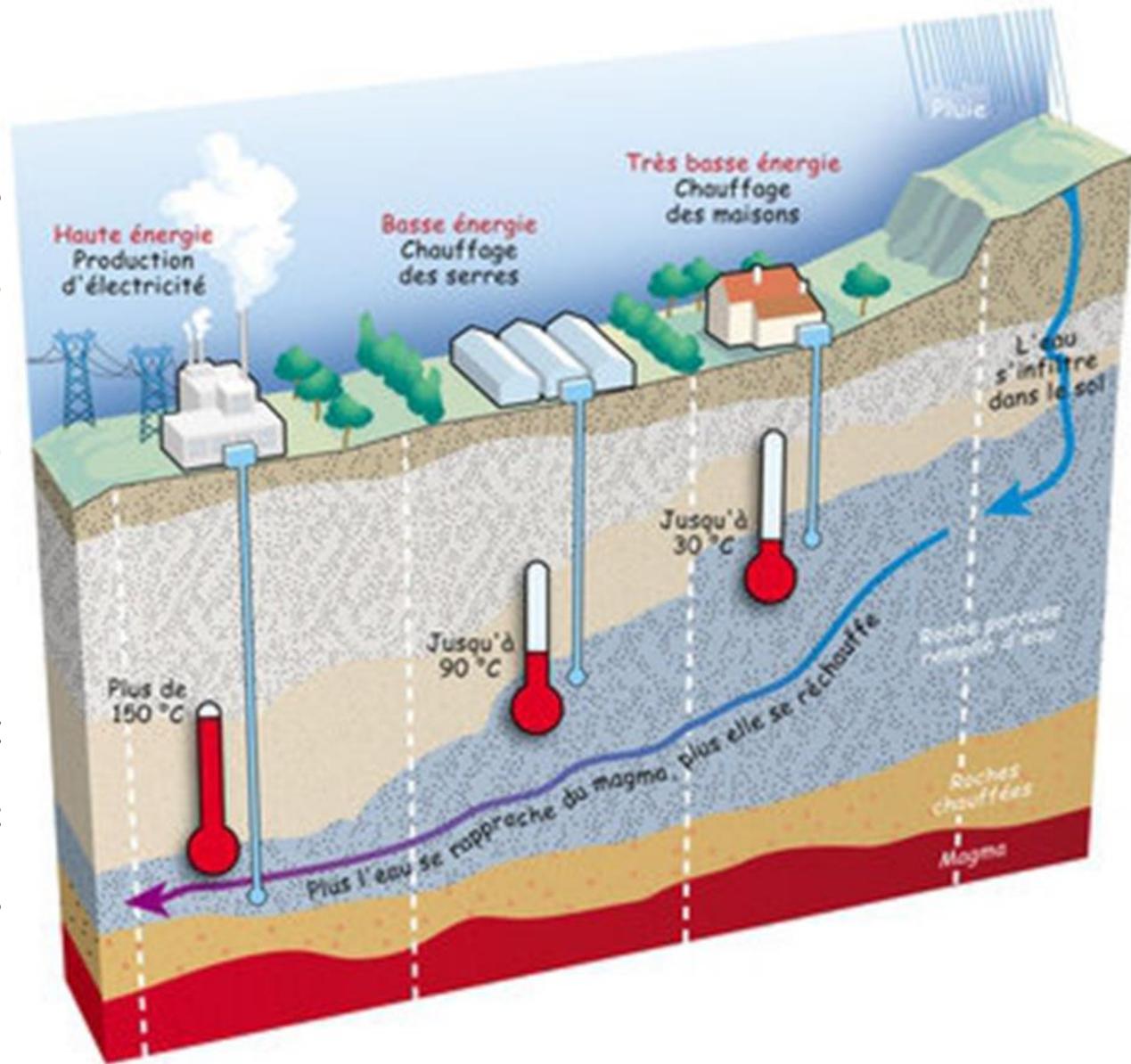
Stockage à l'air comprimé

Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie Géothermique:

La chaleur emmagasinée dans le sous-sol (Enthalpie) de la planète Terre est estimé aux environs de 10^{31} joules. Cette chaleur migre naturellement, vers la surface, par conduction à un débit de $44,2 TW$. En grande partie cette chaleur est produite par l'énergie déposée des rayonnements de désintégration radioactive (U, K, Th, ...) à hauteur de $30 TW$.

La majeure partie de cette chaleur est diffuse et représente un faible flux thermique $\sim 0,1W/m^2$, avec un gradient thermique entre 25 et $30 \text{ }^\circ C/km$ (Loin des sources chaudes et les limites tectoniques)

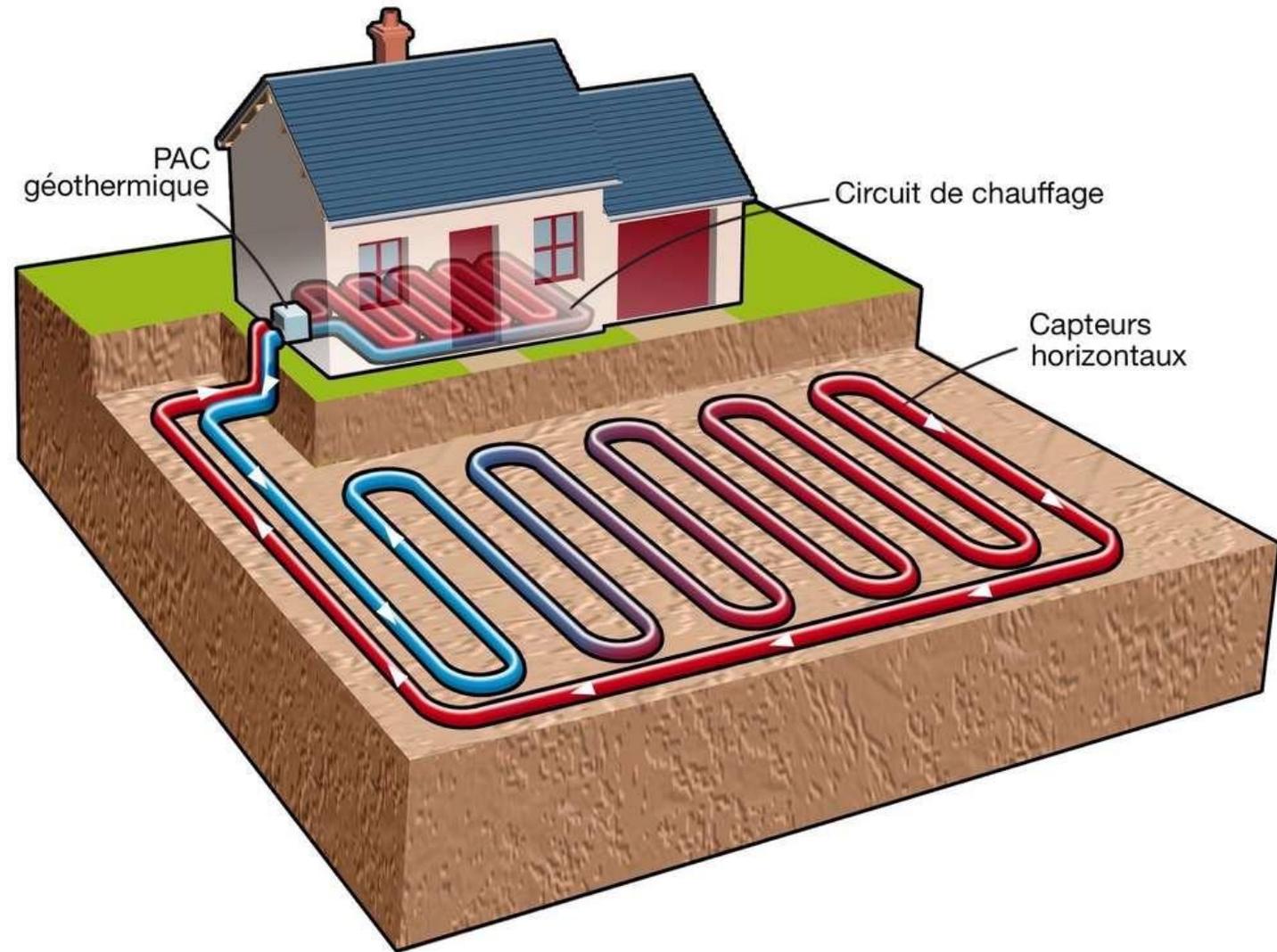


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie Géothermique:

Pour un usage particuliers (chauffage essentiellement) un réseau géothermique horizontal est installé à une profondeur d'environ 1m. Une pompe à chaleur (PAC) de petite puissance est nécessaire dans ce cas.

Il permet ainsi d'exploiter le gradient thermique en provenance du sous-sol profond pour maintenir une température ambiante constante dans les localités privées (autour de 18°)

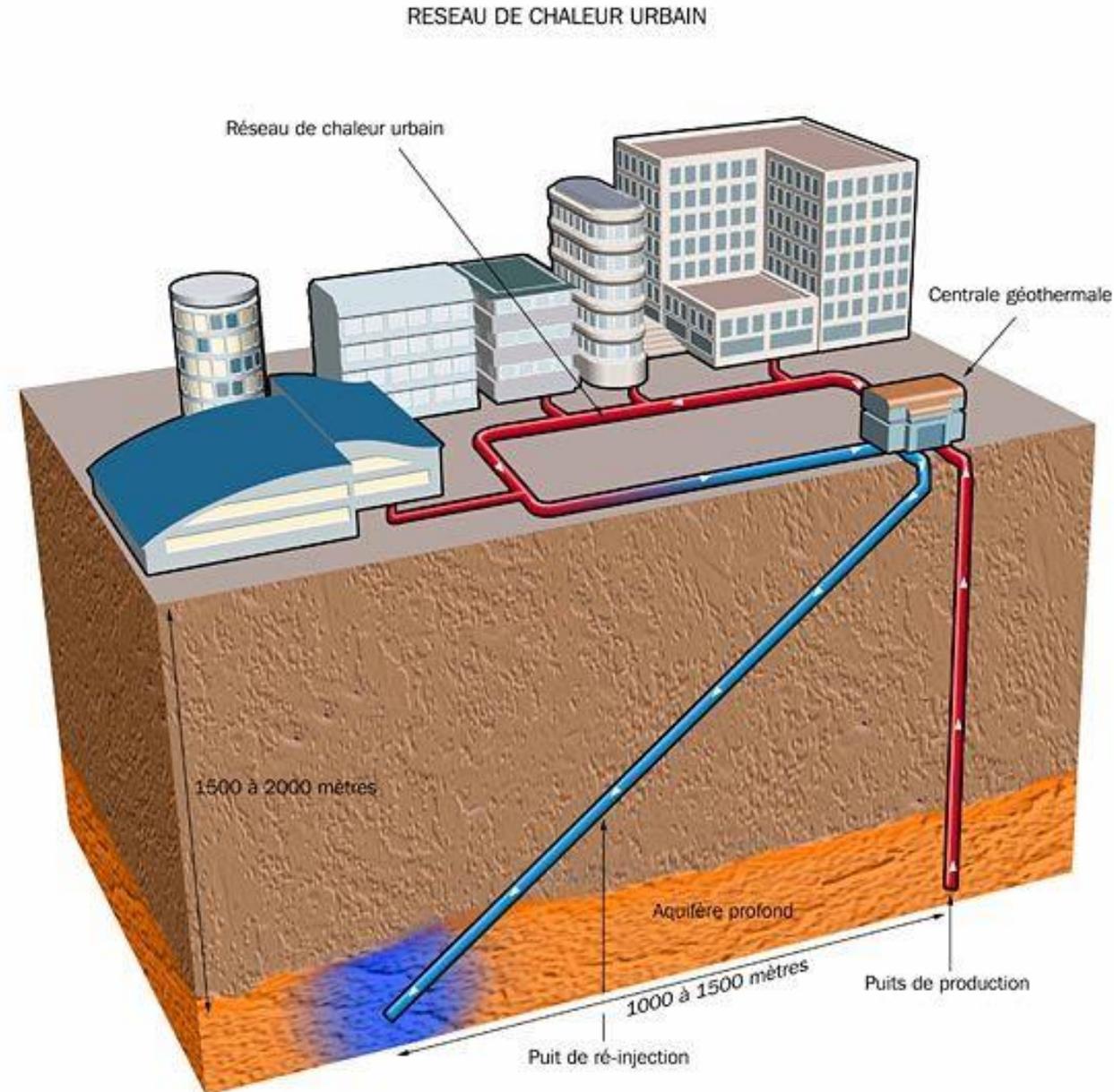


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie Géothermique:

Pour un usage plus importants, il est possible d'installer un réseau géothermique vertical à une profondeur d'environ 100m. Dans ce cas, une centrale géothermique de puissance moyenne à grande est nécessaire.

Dans ce cas il est possible d'assurer le chauffage pour un ensemble de locaux (administratifs, bâtiments, structures communes)

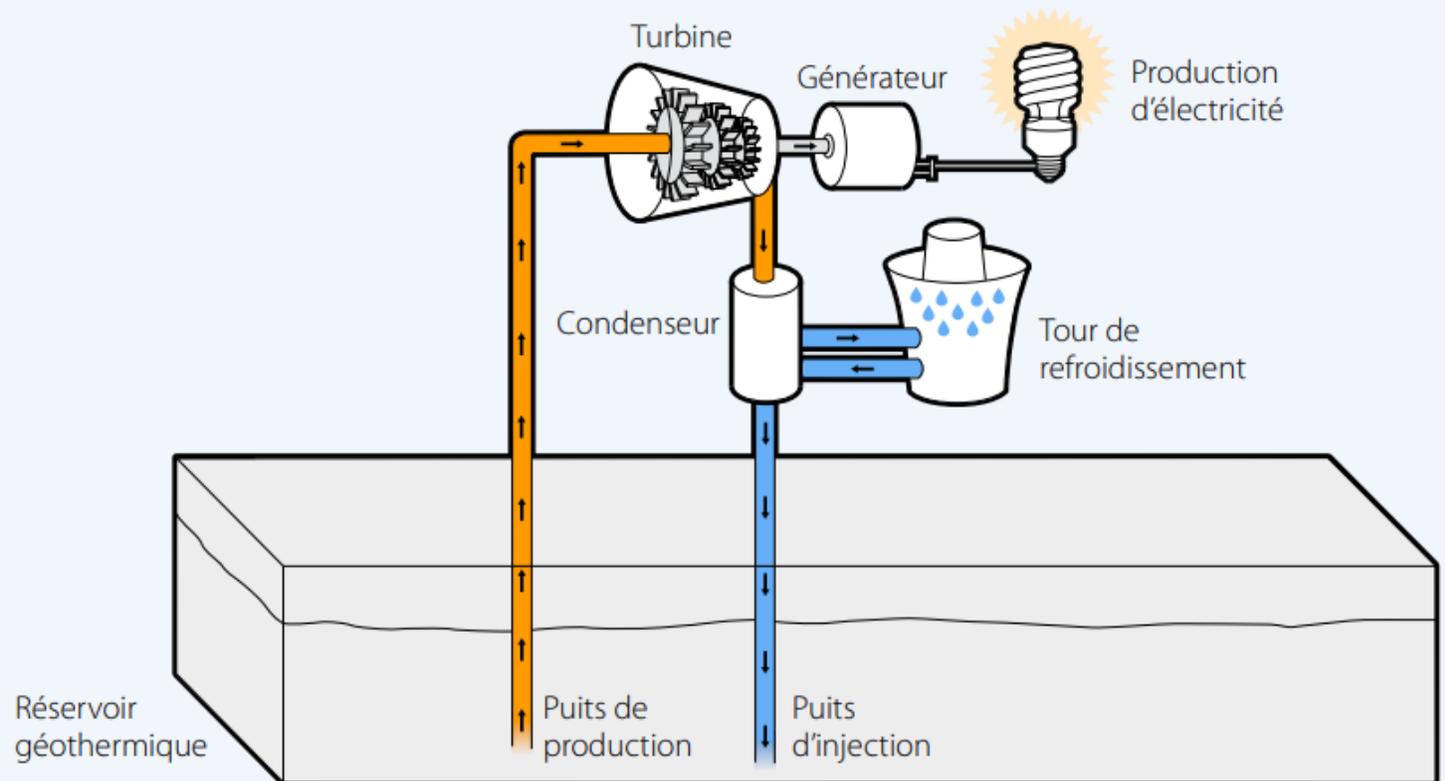


Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie Géothermique:**

Le fluide géothermal se présente sous forme de vapeur sèche pressurisée et surchauffée à une température pouvant aller de 180 à plus de 350 °C. Il fait tourner la turbine d'une centrale fonctionnant selon le cycle de Rankine, tandis que l'eau refroidie résultante est injectée dans le réservoir géothermique.

CENTRALE GÉOTHERMIQUE À VAPEUR SÈCHE

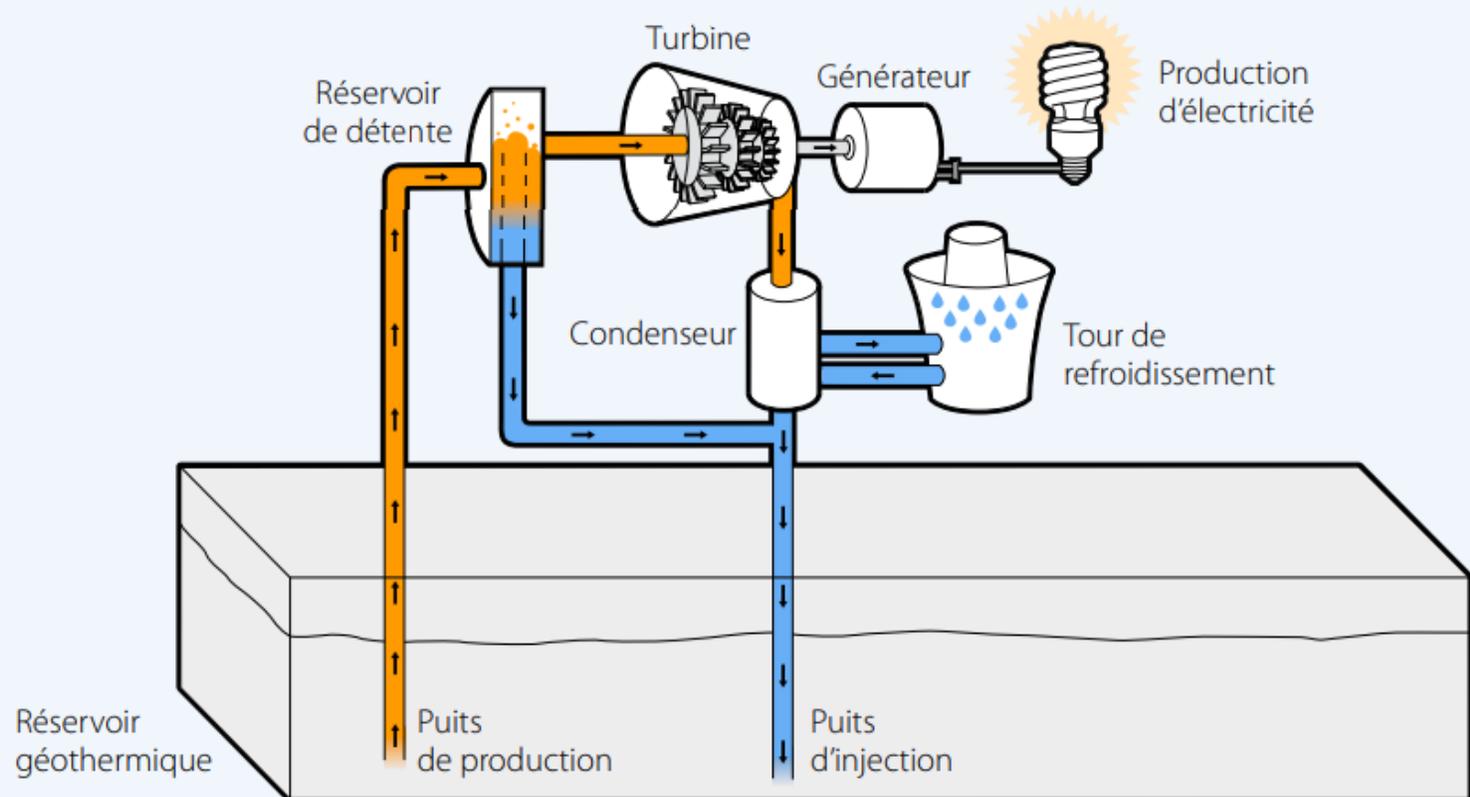


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie Géothermique:

Le fluide géothermal se présente sous forme de vapeur humide (mélange d'eau et de vapeur) pressurisée à une température supérieure à 180 °C. La vapeur saturée sèche, séparée de la vapeur humide dans un ou deux réservoirs de détente, fait tourner la turbine d'une centrale fonctionnant selon le cycle de Rankine. L'eau refroidie résultante est injectée dans le réservoir géothermique. Il s'agit d'une centrale géothermique à simple ou double détente.

CENTRALE GÉOTHERMIQUE À VAPEUR HUMIDE

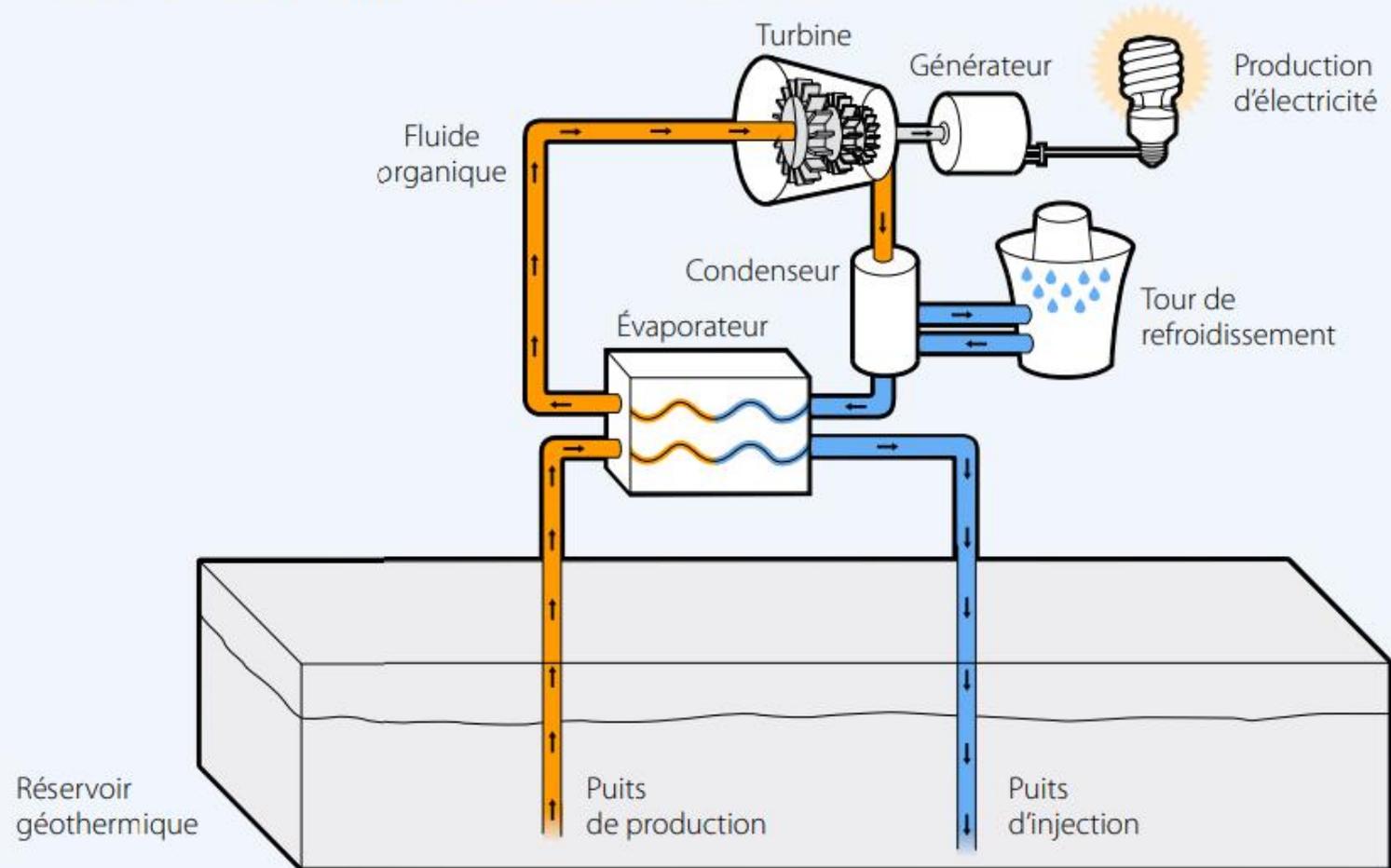


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie Géothermique:

Le fluide géothermal se présente sous forme d'eau chaude pressurisée à une température pouvant aller de 125 à 180 °C. Pour convertir efficacement en électricité la chaleur récupérée à ce niveau de température, il faut que la centrale géothermique soit à cycle binaire.

CENTRALE GÉOTHERMIQUE HYDROTHERMALE

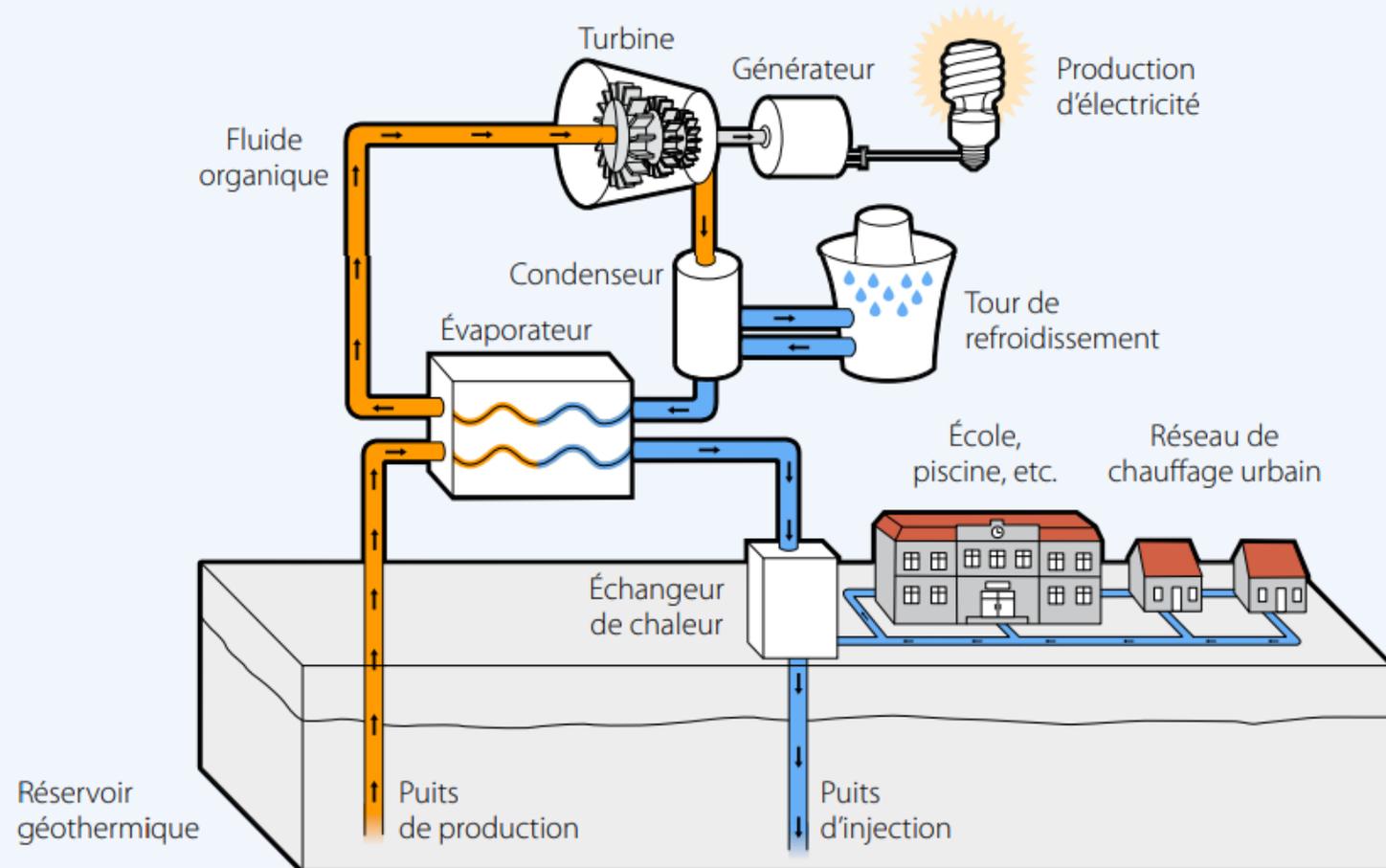


Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie Géothermique:

Le fluide géothermal se présente sous forme de liquide réchauffé au contact de roches chaudes à une température supérieure à 150 °C. Pour accéder à l'énergie thermique des roches chaudes, il faut procéder par fracturation hydraulique, soit créer des fissures dans la roche par injection d'eau sous haute pression, afin de permettre au fluide de circuler dans le réservoir géothermique. Une partie du fluide géothermal pourrait être utilisée comme source de chaleur dans des systèmes géothermiques de chauffage urbain ou industriel.

CENTRALE DE GÉOTHERMIE PROFONDE STIMULÉE SGS



Les différents types d'énergie renouvelable

- L'énergie Géothermique:



2019			
Pays	Production (TWh)	Part prod. mondiale	Part prod. élec. du pays
États-Unis	18,36	20,2 %	0,42 %
Indonésie	14,10	15,5 %	4,8 %
Philippines	10,69	11,7 %	10,1 %
Turquie	8,95	9,8 %	2,9 %
Nouvelle-Zélande	8,04	8,8 %	17,9 %
Italie	6,07	6,7 %	2,1 %
Islande	6,02	6,6 %	30,9 %
Mexique	5,35	5,9 %	1,6 %
Kenya	4,88	5,4 %	45,5 %
Japon	2,83	3,1 %	0,27 %
Costa Rica	1,51	1,7 %	13,2 %
Salvador	1,47	1,6 %	24,3 %
Nicaragua	0,78	0,9 %	17,0 %
Russie	0,43	0,5 %	0,04 %
Guatemala	0,31	0,3 %	2,3 %
Honduras	0,30	0,3 %	2,8 %
Chili	0,20	0,2 %	0,2 %
Allemagne	0,20	0,2 %	0,03 %
France	0,13	0,14 %	0,02 %
Chine	0,12	0,14 %	0,002 %
Total mondial	91,09	100 %	0,34 %

Source : Agence internationale de l'énergie²¹

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

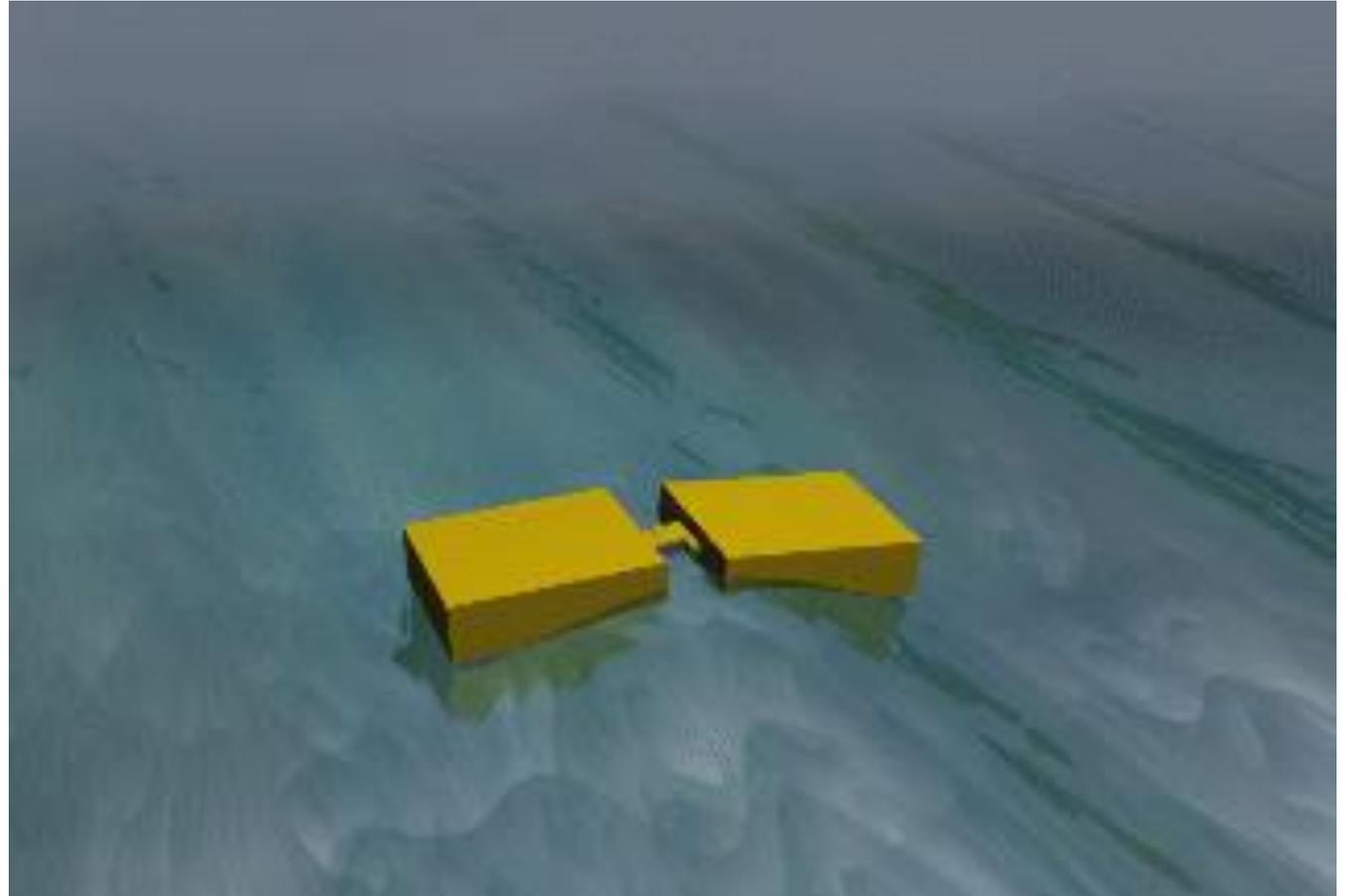
Elle consiste à exploiter le mouvement de la masse d'eau en mer (près des côtes) soit en surface (vagues) soit en profondeur (houle), pour la transférer via des systèmes hydrauliques à des générateurs d'électricité.



Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

Système composé d'une suite de longs flotteurs qui s'alignent dans le sens du vent perpendiculairement aux vagues et dont la tête est ancrée au fond sous-marin par un câble. Les vagues créent une oscillation de la chaîne. Cette oscillation est exploitée aux articulations pour comprimer un fluide hydraulique qui entraîne à son tour une turbine. Il s'agit du procédé le plus connu exploitant l'énergie houlomotrice.

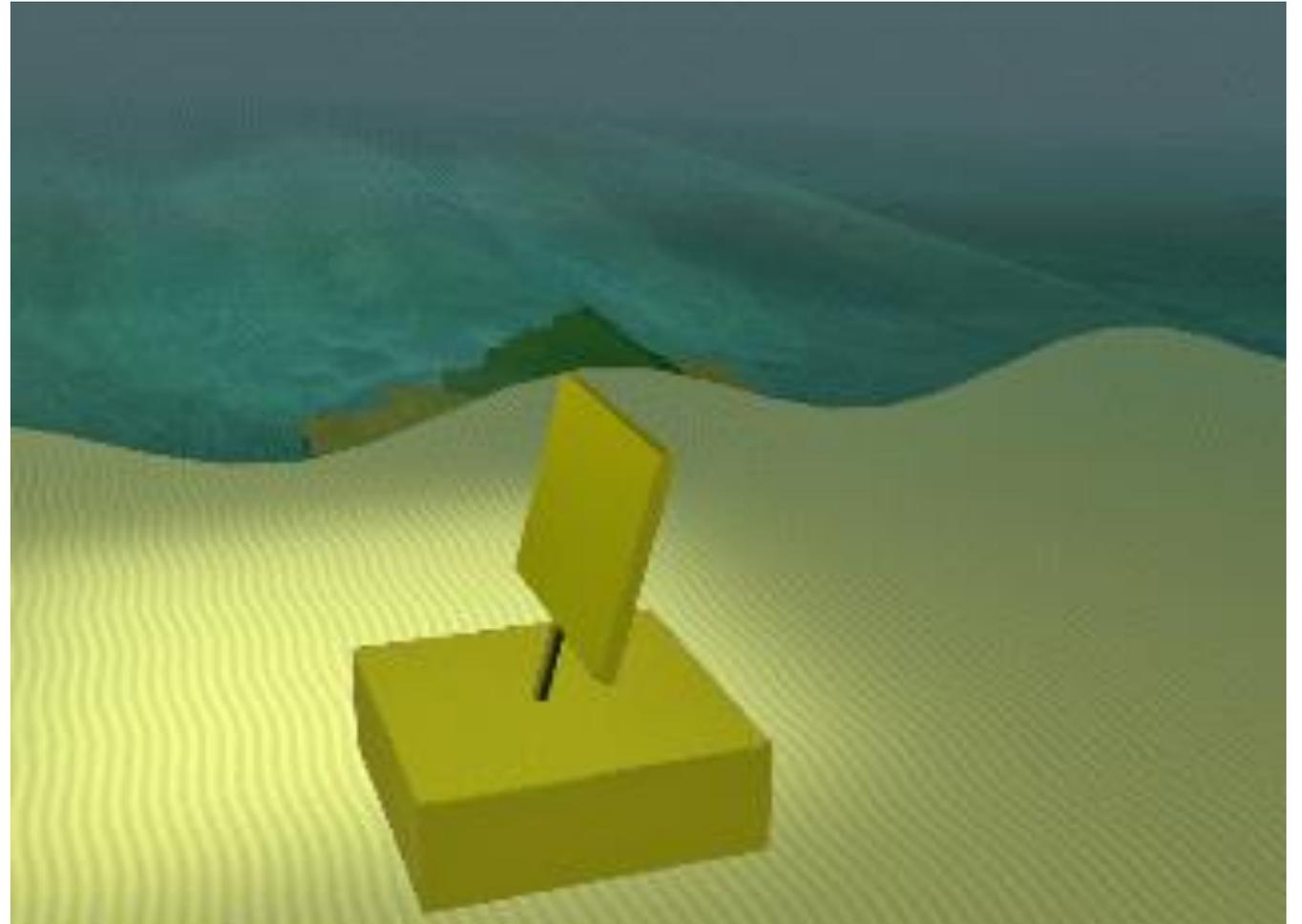


La chaîne flottante articulée (ou « serpent de mer »)

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

Système pivotant entraîné par le mouvement orbital de l'eau au passage des vagues. Ces oscillations permettent d'actionner des pompes pour comprimer et turbiner un fluide hydraulique.

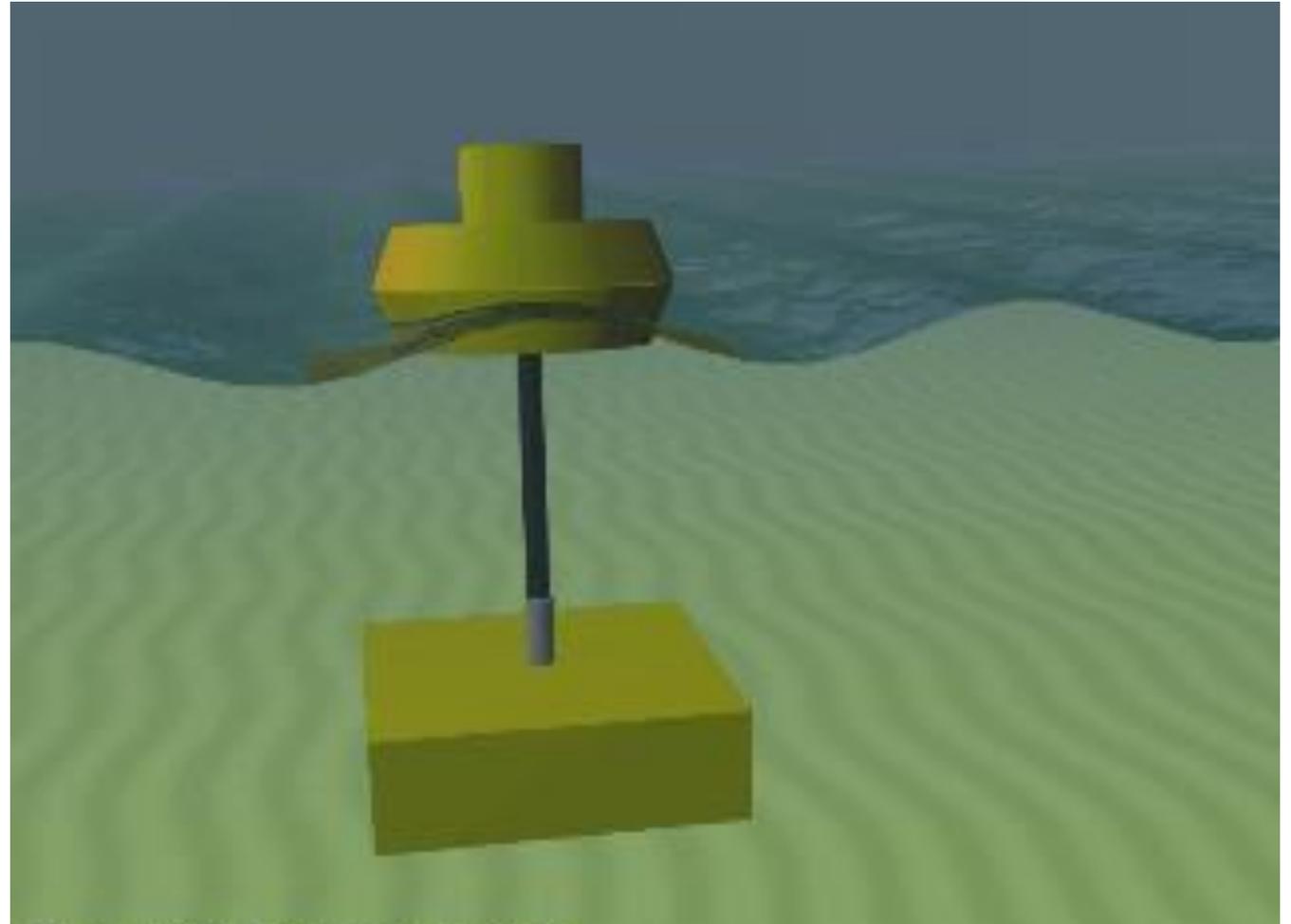


La paroi oscillante immergée

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

Structure flottante mise en place à la surface de la mer et transformant tous les mouvements horizontaux ou verticaux en déplacements de masselottes (éléments utilisant la force centrifuge pour créer un travail). L'énergie liée aux masselottes en mouvement est utilisée pour actionner une pompe et mettre sous pression un fluide hydraulique qui permet ensuite de faire tourner une turbine entraînant à son tour un alternateur. Une variante possible consiste à utiliser directement le déplacement pour entraîner l'alternateur.

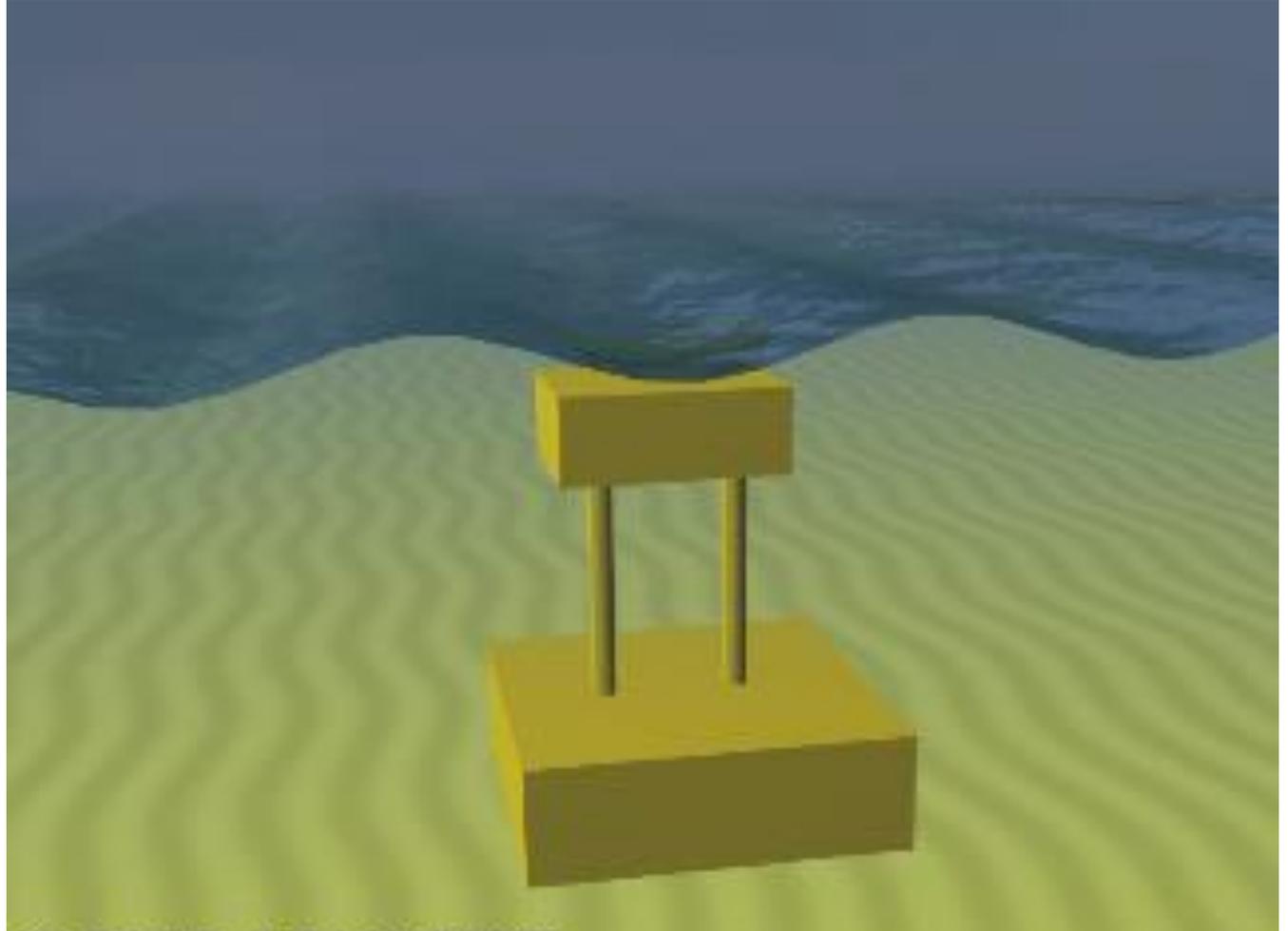


La colonne à oscillation verticale

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

Système ancré au fond marin qui utilise le mouvement orbital des vagues pour comprimer un fluide hydraulique. Le capteur le plus simple à utiliser est un ballon. Il est possible de constituer un réseau de capteurs et recueillir le fluide comprimé à terre où il est turbiné pour produire de l'électricité.

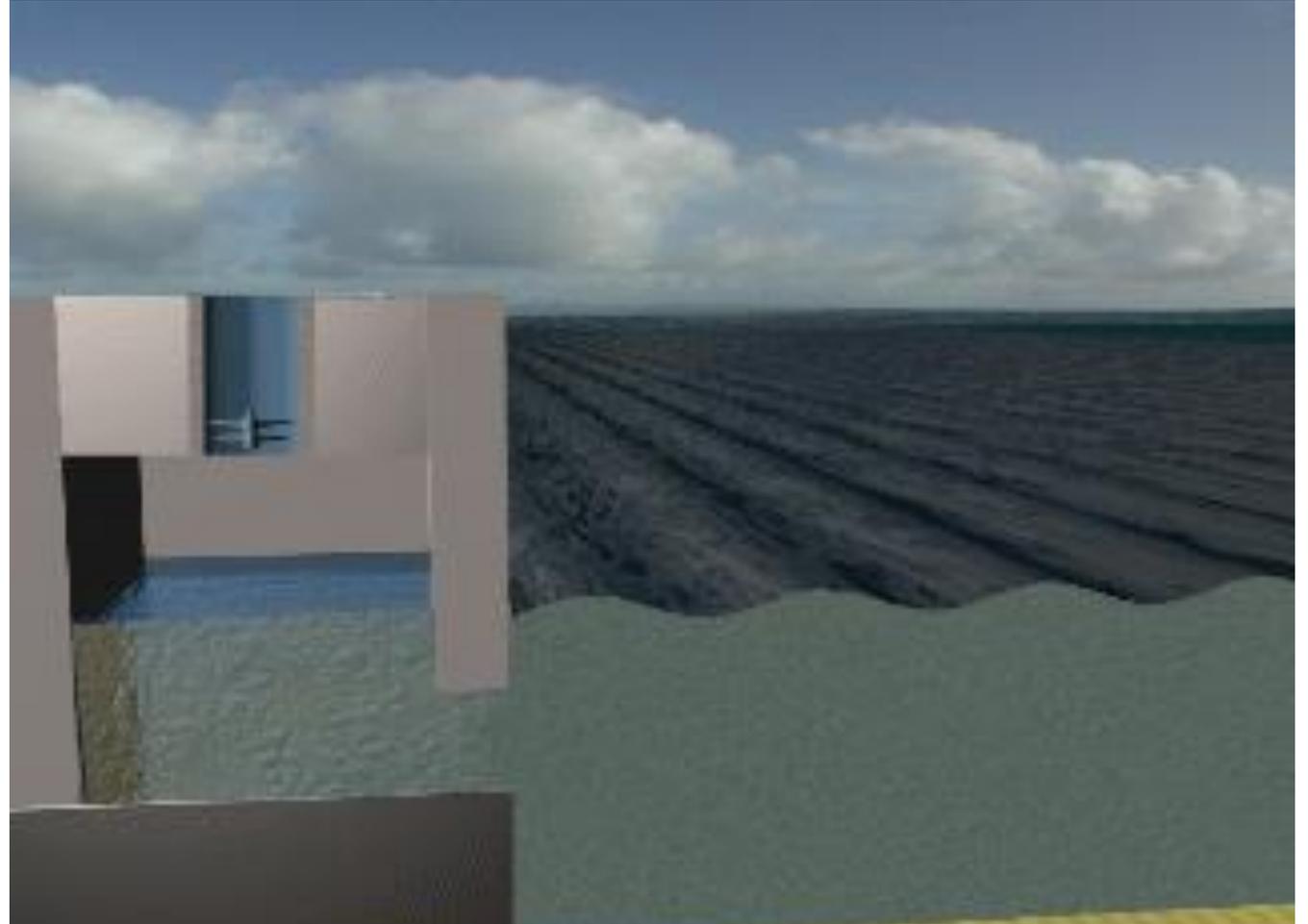


Le capteur de pression immergé

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

Structure flottante en acier ou en béton, ouverte à la base et fermée sur le dessus. Les vagues font monter et descendre le niveau de l'eau dans la colonne. Cela a pour effet de comprimer et de décompresser alternativement de l'air emprisonné dans la partie supérieure de la colonne. L'air active alors une turbine bidirectionnelle pour produire de l'électricité. Ce système peut être installé au large ou sur le rivage.

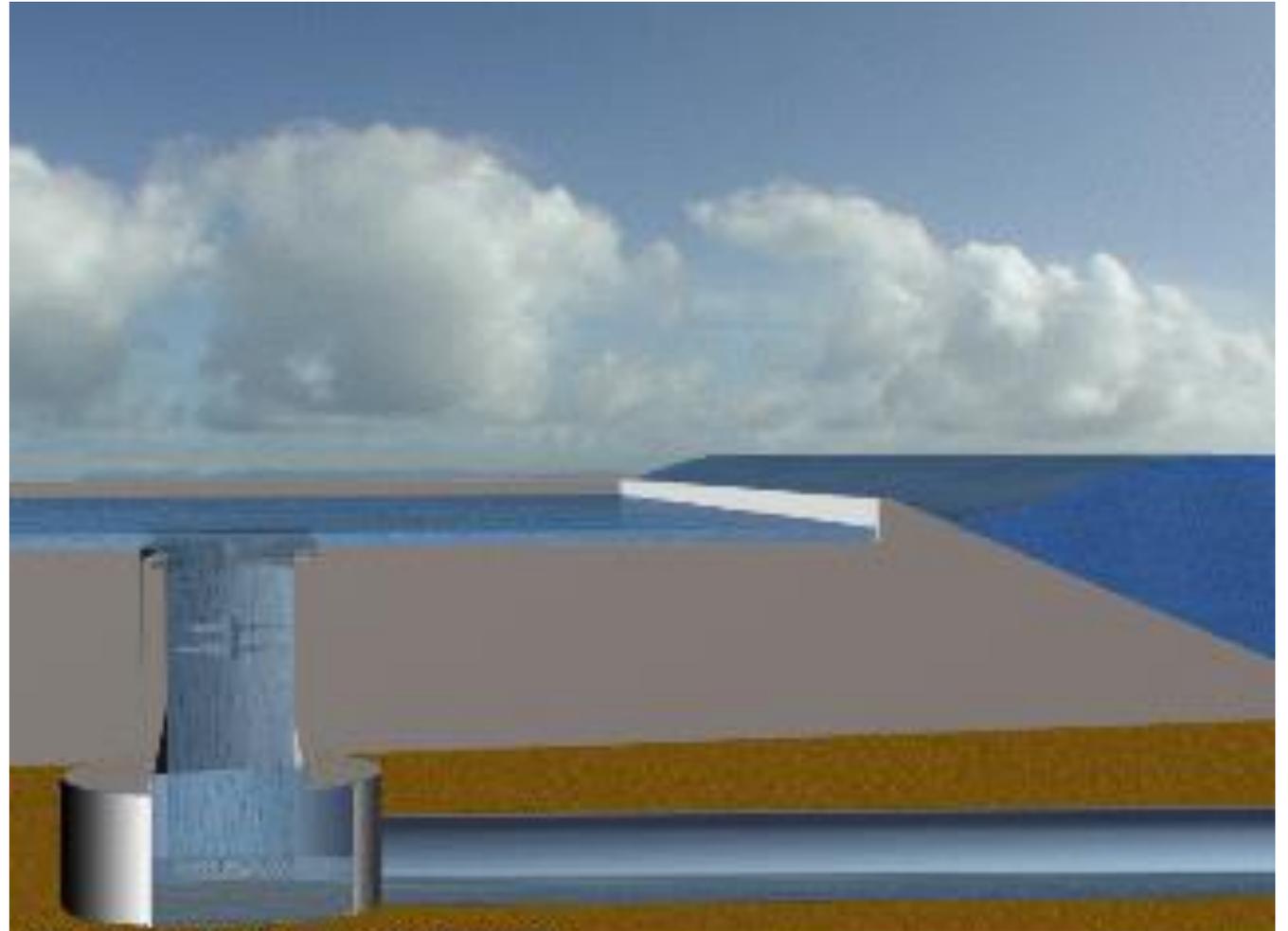


La colonne d'eau

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie houlomotrice :**

Système à franchissement qui retient l'eau des crêtes de vagues, créant une surpression dans le réservoir. Le volume d'eau piégée est turbiné.



Le piège à déferlement

Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie biomasse (bio-carburant) :**

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse..



Les différents types d'énergie renouvelable

- **L'énergie biomasse (bio-carburant) :**

- La biomasse par combustion**

Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco...).



Les différents types d'énergie renouvelable

• L'énergie biomasse (bio-carburant) :

La biomasse par méthanisation

Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz est ensuite brûlé. Ce biogaz est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons...

