

UNIVERSITE DE JIJEL
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Intitulé de la matière

Energies Renouvelables

Cours destiné aux:
Etudiants du Master1 Electrotechnique
Industrielle

Responsable de la matière:
Nassira FERKHA

- **Semestre : 01**
- **Intitulé de la matière : Energies renouvelables**
- **Unité d'Enseignement Découverte: UED1**

- **Objectifs de l'enseignement :**

Doter les étudiants des bases scientifiques leur permettant d'intégrer la communauté de la recherche scientifique dans le domaine des énergies renouvelables, des batteries et des capteurs associés à des applications d'ingénierie.

- **Connaissances préalables recommandées :**

Dispositifs et technologies de conversion de l'énergie .

- **Contenu de la matière :**

Chapitre 1: Introduction aux énergies renouvelables

Chapitre 2: Energie solaire (photovoltaïque et thermique)

Chapitre 3: Energie éolienne

Chapitre 4: Autres sources renouvelables: hydraulique, géothermique, biomasse ...

Chapitre 5: Stockage, pile à combustibles et hydrogène

- **Mode d'évaluation :**

Examen 100%

- **Références**

1. Sabonnadière Jean Claude. Nouvelles technologies de l'énergie 1: Les énergies renouvelables, Ed. Hermès.

2. Gide Paul. Le grand livre de l'éolien, Ed. Moniteur.

3. A. Labouret. Énergie Solaire photo voltaïque, Ed. Dunod.

4. Viollet Pierre Louis. Histoire de l'énergie hydraulique, Ed. Press ENP Chaussée.

5. Peser Felix A. Installations solaires thermiques: conception et mise en œuvre, Ed. Moniteur.

CHAPITRE I

INTRODUCTION AUX ÉNERGIES

RENOUVELABLES

I. INTRODUCTION AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

I.1. Introduction:

La vie sur terre ne serait pas possible sans eau, sans oxygène et sans énergie.

Aujourd'hui les énergies sont utilisées dans tous les domaines et à toutes les échelles: transport, électricité, chauffage... chaque individu les utilise dans la vie quotidienne.

La consommation d'énergie sous toutes les formes à travers le monde, notamment les énergies fossiles, a atteint son extrémité. Cette augmentation de la consommation de l'énergie est due principalement à la croissance démographique et la forte consommation qui l'accompagne (transport, l'électrification,...). Selon les experts, les échanges internationaux en énergie fossile occupent la part de lion par rapport à l'ensemble des autres échanges.

I.2. Définition d'une énergie:

Une énergie est principalement apportée par le soleil soit directement soit indirectement, ou d'énergie éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse... et bien sûr sous forme d'énergies fossiles.

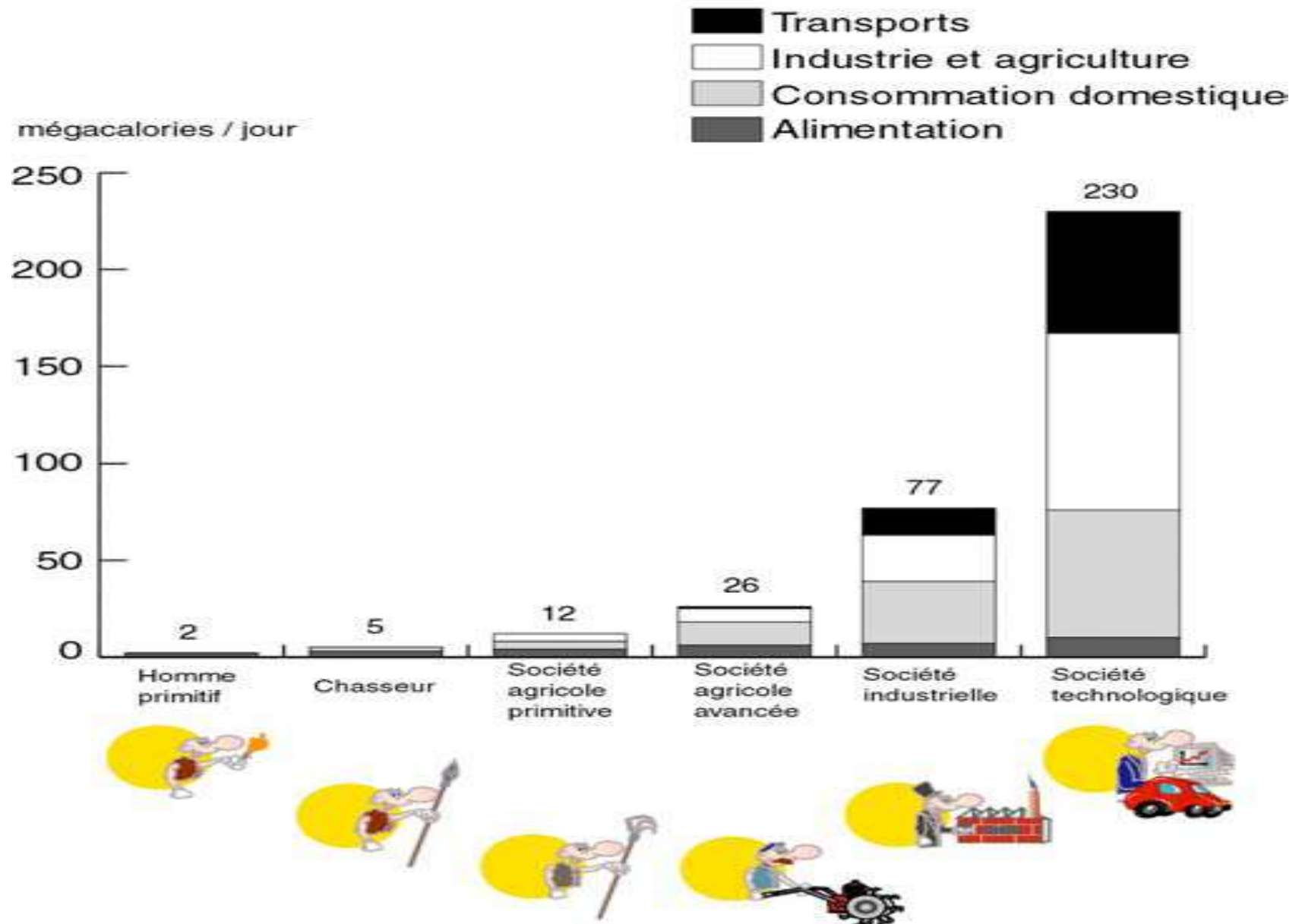
Dans ces différentes sources d'énergies, deux sortes se distinguent : les énergies dites non renouvelables et les énergies dites renouvelables. Ces énergies existent sous différentes formes. Cependant, les énergies les plus utilisées restent non renouvelables à l'image du pétrole ou même du charbon.

I.3. L'énergie dans notre société:

L'énergie est indispensable à la plupart de nos activités: transport, industrie, agriculture, usage domestique...

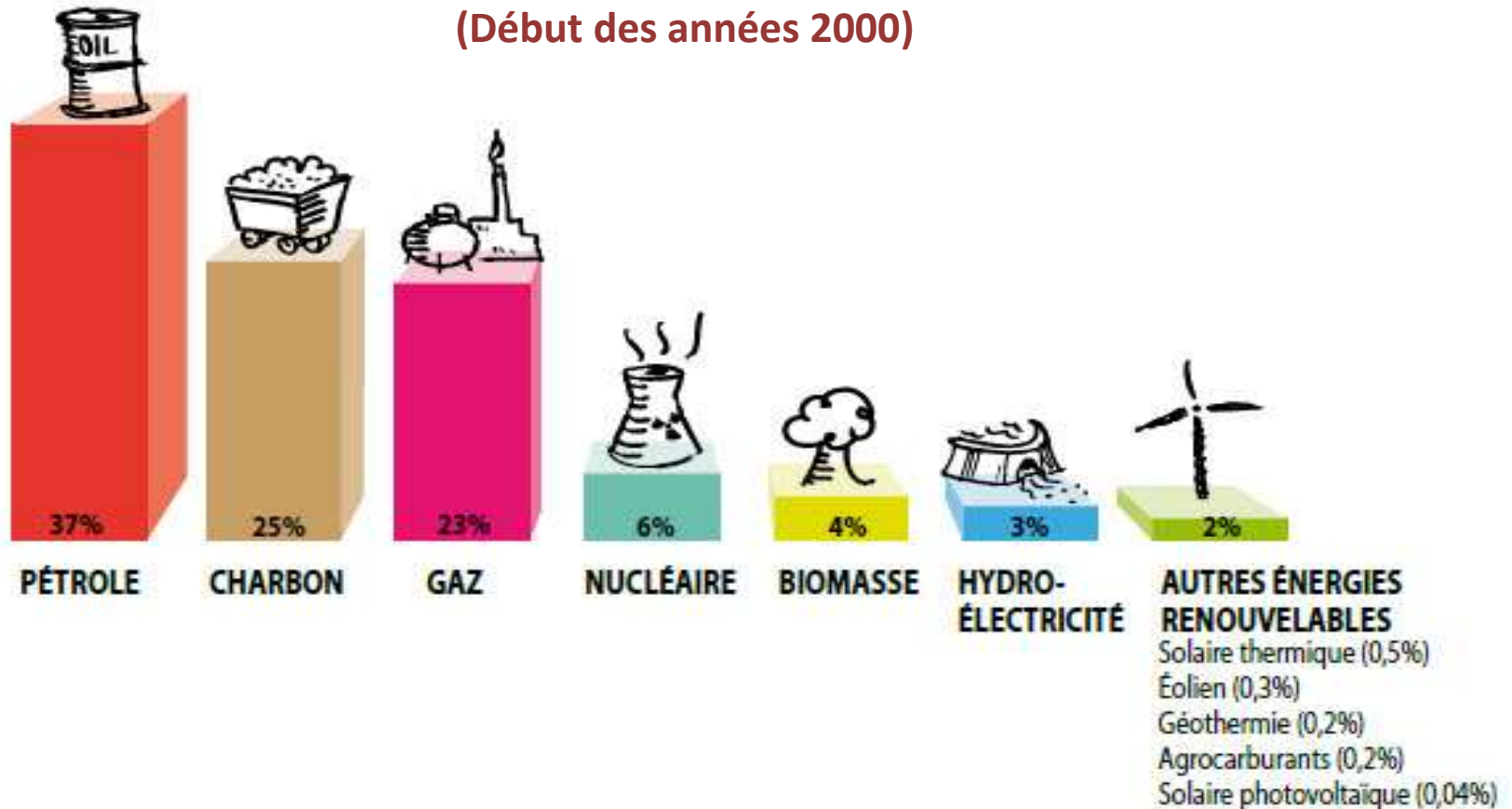
Depuis le début du siècle, nos besoins énergétiques ont été **multipliés par 13**. En moyenne aujourd'hui, la consommation mondiale en énergie **augmente de 2 à 2,5 % par an**.

Évolution du budget énergétique individuel au cours de l'histoire



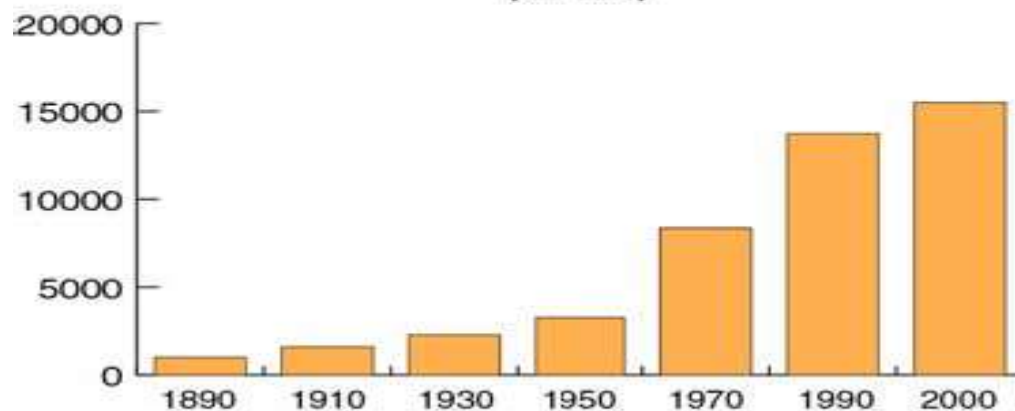
SOURCES D'ÉNERGIE UTILISÉES DANS LE MONDE

(Début des années 2000)

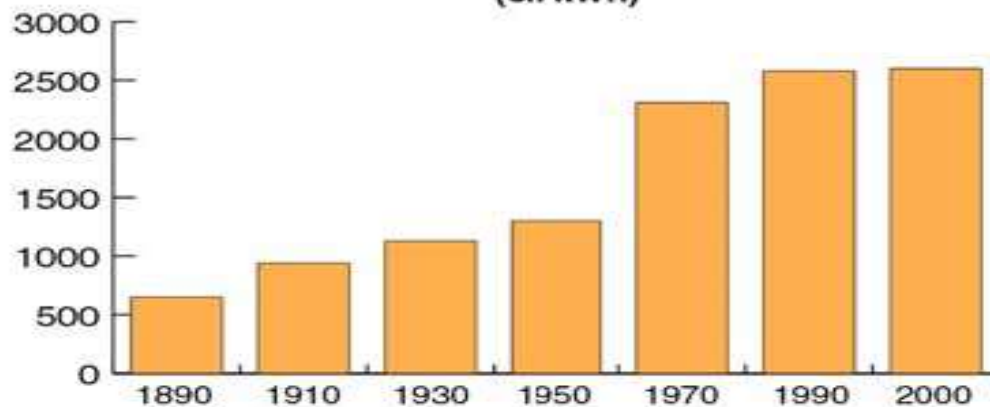


Aujourd'hui les différents gouvernements cherchent à accroître la part d'énergie d'origine renouvelable sur le marché de l'énergie afin de lutter pour la sauvegarde de l'environnement.

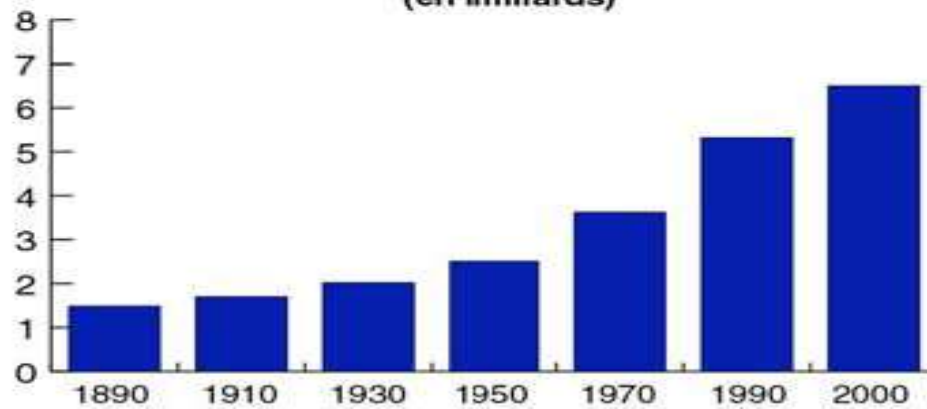
**Évolution de la consommation énergétique mondiale
(en TWh)**

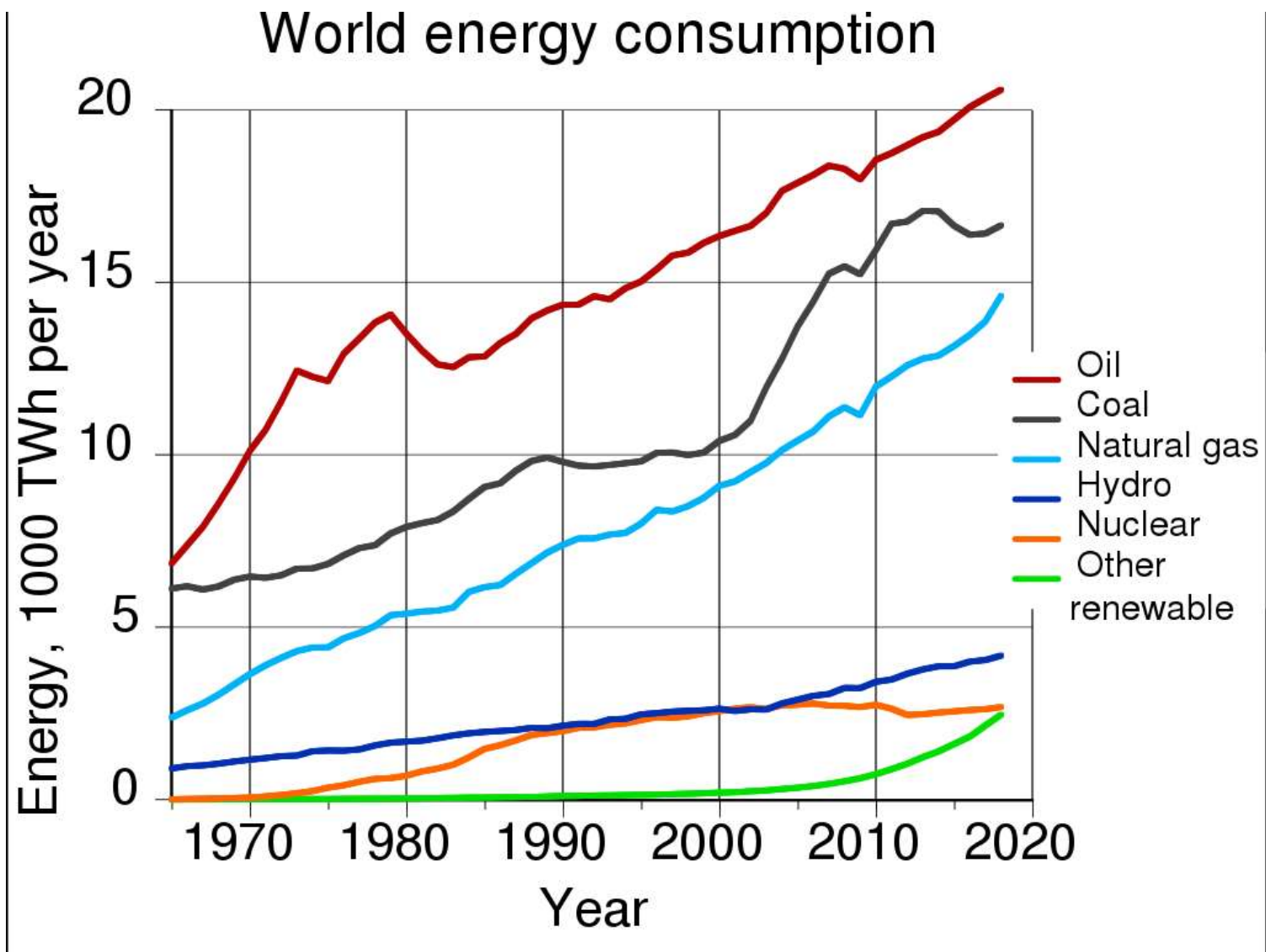


**Évolution de la consommation mondiale d'énergie par habitant
(en kWh)**



**Évolution de la population mondiale
(en milliards)**





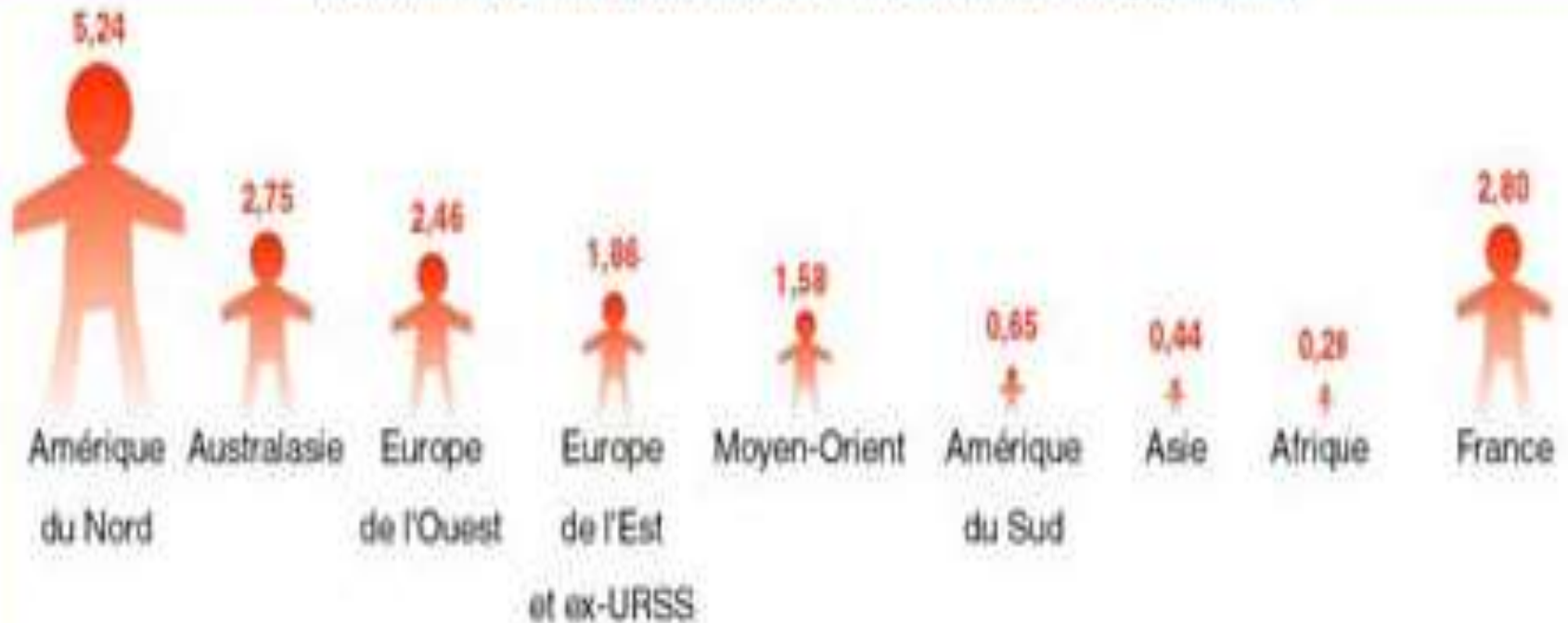
Consommation énergétique mondiale, en [térawatts-heures](#) (TWh), de 1965 à 2018 (pétrole, charbon, gaz naturel, hydraulique, nucléaire, autres renouvelables)

SI multiples for watt hour (Wh)

Submultiples		
Value	Symbol	Name
10^{-3}	mWh	milliwatt hour
10^{-6}	μWh	microwatt hour

Multiples		
Value	Symbol	Name
10^3	kWh	kilowatt hour
10^6	MWh	megawatt hour
10^9	GWh	gigawatt hour
10^{12}	TWh	terawatt hour
10^{15}	PWh	petawatt hour

CONSUMMATION FINALE D'ÉNERGIE PAR HABITANT EN 2000 (tep/habitant)



La tonne équivalent pétrole (tep): unité permettant de comparer l'énergie contenue dans des combustibles de natures différentes. Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ parfois arrondi à 42 GJ.

Une tep correspond à une masse de combustible contenant la même énergie calorifique d'une tonne de pétrole.

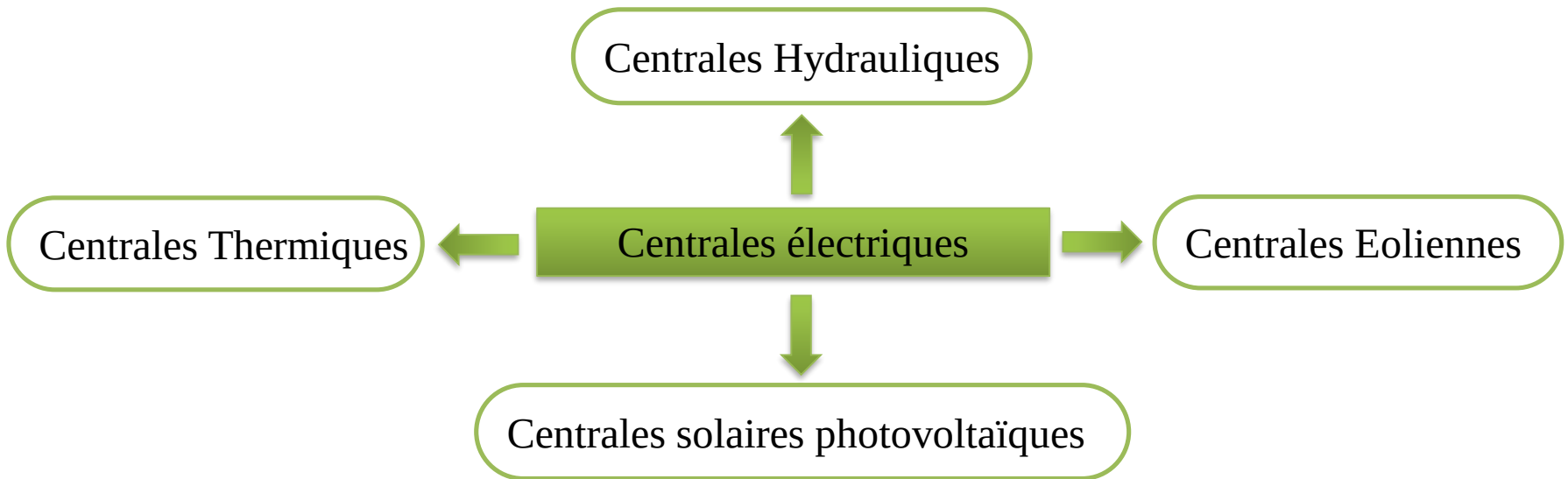
I.4. Intérêt des énergies renouvelables:

Actuellement les énergies primaires les plus utilisées sont d'origines fossiles(non renouvelable) comme le pétrole, le gaz , l'uranium, le charbon...Elle émettent une grande quantité de gaz à effet de serre responsable du changement climatique. Ce sont des sources en énergies épuisables. Chaque année leurs ressources sur la planète diminuent.

De nos jours les énergies renouvelables sont à la mode et s'inscrivent dans l'idée du développement durable et de préservation de l'environnement, ce sont des énergies inépuisables.

I.5. Production de l'énergie électrique:

La production de l'énergie électrique s'effectue par l'intermédiaire des centrales électriques



Ces centrales ont pour rôle de transformer l'énergie primaire en énergie électrique. L'énergie primaire peut être renouvelable ou non renouvelable. Dans cette matière on va s'intéresser seulement aux énergies renouvelables.

I.6. Energies renouvelables:

I.6.1. Définition:

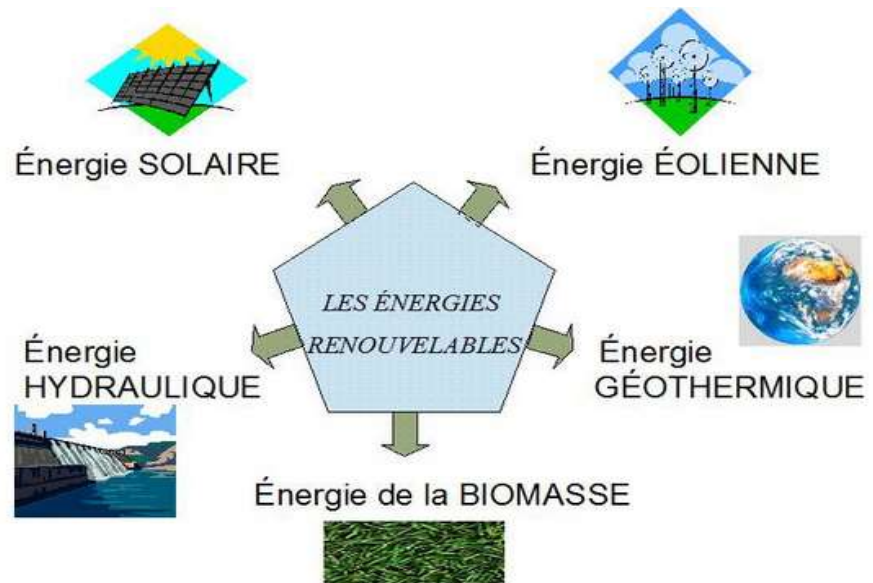
Les énergies sont dites renouvelables dans la mesure où elles sont capables de se renouveler assez rapidement.

D'une façon générale une énergie renouvelable est un mode de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités.

I.6.2. Types des énergies renouvelables:

Plusieurs types des énergies renouvelables existent. On peut les classer en cinq grandes familles:

- ☐ Énergie solaire,
- ☐ Énergie éolienne,
- ☐ Énergie hydraulique,
- ☐ Énergie géothermique,
- ☐ Énergie biomasse.



☐ Energie solaire:

C'est l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante

☐ Energie éolienne:

Elle correspond à l'énergie fournie par le vent

☐ Energie hydraulique:

C'est l'énergie fournie grâce à la force des chutes d'eau d'origine naturelle ou créées artificiellement à partir des retenues de barrages

☐ Energie géothermique:

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique

☐ Energie biomasse:

Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques

A ces types on peut ajouter une autre énergie renouvelable qui est très peu exploitée:

❖ Energie des mers ou énergie marine:

Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil

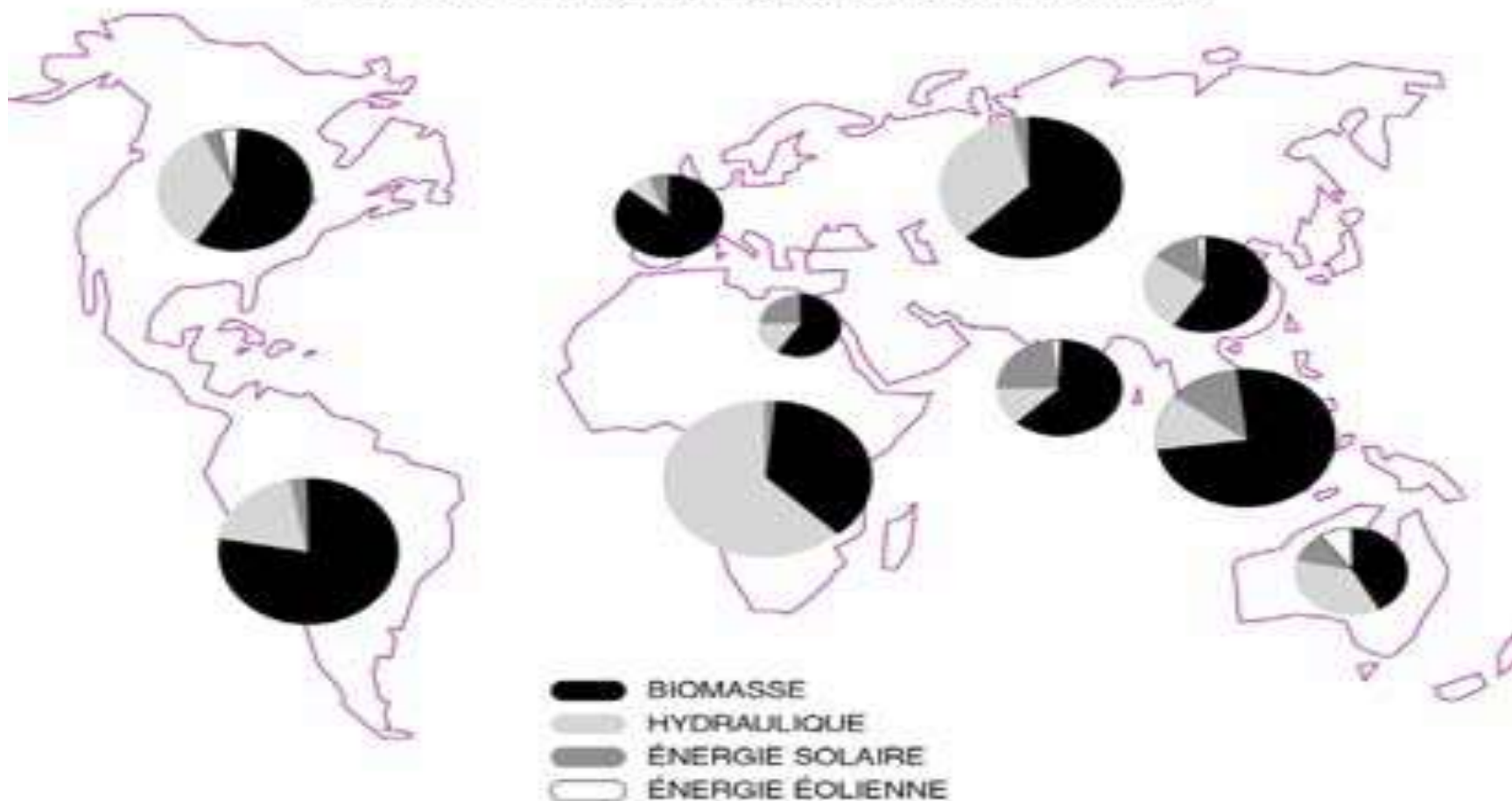
Il existe des **sources d'énergie naturelles** et des **sources artificielles**, c'est-à-dire créées par l'homme. Les premières sont appelées **sources d'énergie primaires** si elles produisent directement de l'énergie. Les autres sont appelées **énergies secondaires** car elles sont issues d'une transformation d'énergie.

Ainsi l'eau, le vent et le soleil sont des sources primaires tandis que la vapeur et l'électricité sont des sources secondaires.

Le soleil est à l'origine de la plupart des sources d'énergie présentes sur terre: chaleur, lumière, croissance des végétaux,

Les énergies renouvelables sont issues de **phénomènes naturels, réguliers ou constants** qui les rendent inépuisables. Elles sont également parfois appelées **énergies “vertes” ou “propres”** car elles émettent moins de CO₂ que les énergies issues de sources fossiles.

POTENTIEL DES ÉNERGIES RENOUVELABLES



En 2000, les énergies renouvelables (ENR) représentent 15 % des énergies utilisées dans le monde. C'est l'hydraulique et la biomasse (sans risque de déforestation) qui présentent le plus gros potentiel.

I.6.3 Energies renouvelables traditionnelles et nouvelles:

On fait parfois une distinction entre les renouvelables '**traditionnelles**' et les '**nouvelles**' ou '**modernes**'. Alors que le terme 'traditionnel' s'applique à l'utilisation de la biomasse, et ce principalement dans le cas de l'énergie domestique surtout dans les pays en développement, celui des énergies renouvelables 'nouvelles' regroupe les formes d'énergies renouvelables modernes et durables (solaire, éolienne, marine...)

I.6.4 Avantages des énergies renouvelables:

Les combustibles fossiles (ainsi que les combustibles nucléaires) ne sont pas éternels et ont démontré qu'ils sont à la source de nombreux problèmes environnementaux.

Il est clair qu'un jour les énergies renouvelables devront dominer le système énergétique mondial.

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages : elles

- ✓ sont disponibles dans le monde entier ;
- ✓ sont inépuisables ;
- ✓ sont écologiques et contribuent à la protection de l'environnement ;
- ✓ comportent peu de risques ;
- ✓ réduisent la dépendance vis-à-vis des importations d'énergie ;
- ✓ augmentent la création de valeur sur place et créent des emplois ;
- ✓ contribuent ainsi à la réduction de la pauvreté ; et
- ✓ assurent la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

I.6.5 Qu'est-ce qui nous empêche d'utiliser plus les sources d'énergie renouvelables?

→ Inconvénients:

- ✓ La principale raison est que, jusqu'à récemment, les coûts de production de ces énergies étaient beaucoup plus élevés que ceux des énergies fossiles.
- ✓ De plus, les sources d'énergie renouvelables ne sont pas constantes: imaginez par exemple que le vent tombe soudainement ou que des nuages couvrent le soleil.
- ✓ Une exploitation optimale de ces sources nécessiterait également la construction d'installations dans des zones reculées, dont le raccordement au réseau principal serait à la fois coûteux et difficile.

I.6.6 Avenir des énergies renouvelables ?

Malgré les points présentés ci-dessus, la situation évolue rapidement. Des **politiques mises en place** ont contribué à faire grimper la demande en sources d'énergie renouvelables dans le monde, entraînant une **diminution rapide** de leurs **coûts de production**. **Vu le prix du gaz et du pétrole et les initiatives prises par les gouvernements**, il ne fait aucun doute que les **sources d'énergie renouvelables ont un bel avenir** devant elles.

I.7. Energies renouvelables en Algérie :

Le recours aux énergies renouvelables est impératif pour un pays comme l'Algérie qui dispose d'un climat favorable pour le développement et l'expansion du secteur des énergies renouvelables surtout dans la production d'électricité. **L'Algérie dispose d'un potentiel énergétique très important, notamment l'énergie solaire.**

Le gisement solaire en Algérie est le plus important au niveau mondial, surtout dans le grands sud où toutes les applications solaires peuvent voir le jour .C'est pour cela que l'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique.

Chapitre II

Energie solaire

II.1. Introduction:

Jusqu'à présent le soleil reste la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre. L'énergie solaire est capturée par des panneaux solaires (capteurs), installés généralement sur les toits. Ces panneaux transforment cette énergie soit en **chaleur** (énergie solaire thermique) soit en **électricité** (énergie solaire photovoltaïque).



Panneaux solaires placés sur les toits

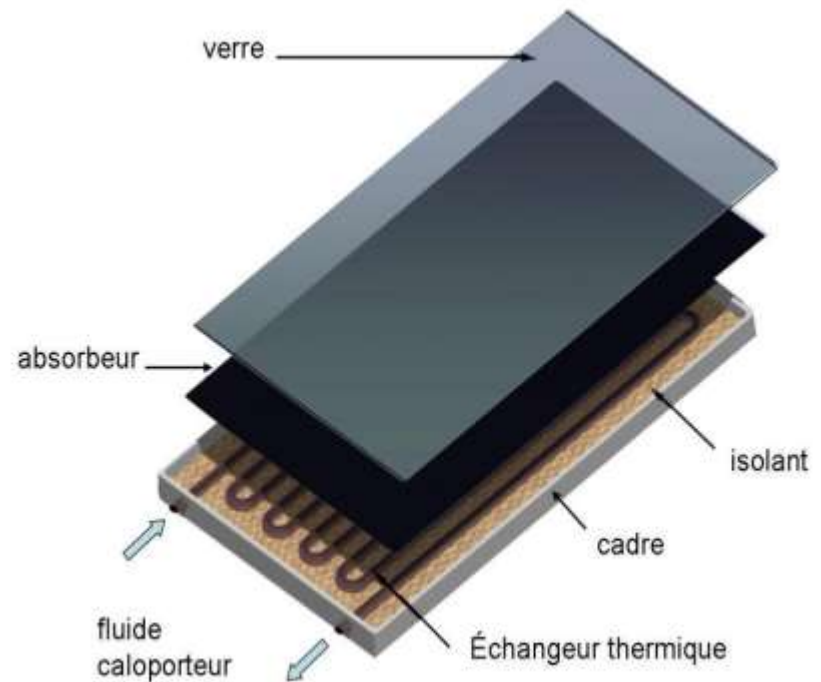
II.2. Types de l'énergie solaire:

II.2.1. Energie solaire thermique:

C'est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette énergie peut être utilisée directement (par exemple, pour chauffer un appartement) ou indirectement (pour chauffer de l'eau et le transformer en vapeur qui entraine une turbine et ainsi obtenir de l'énergie électrique). Dans ce cas on utilise des panneaux (capteurs) solaires thermiques.



Panneau solaire thermique à tubes



Panneau solaire thermique plan-vitré

II.2.2. Energie solaire photovoltaïque:

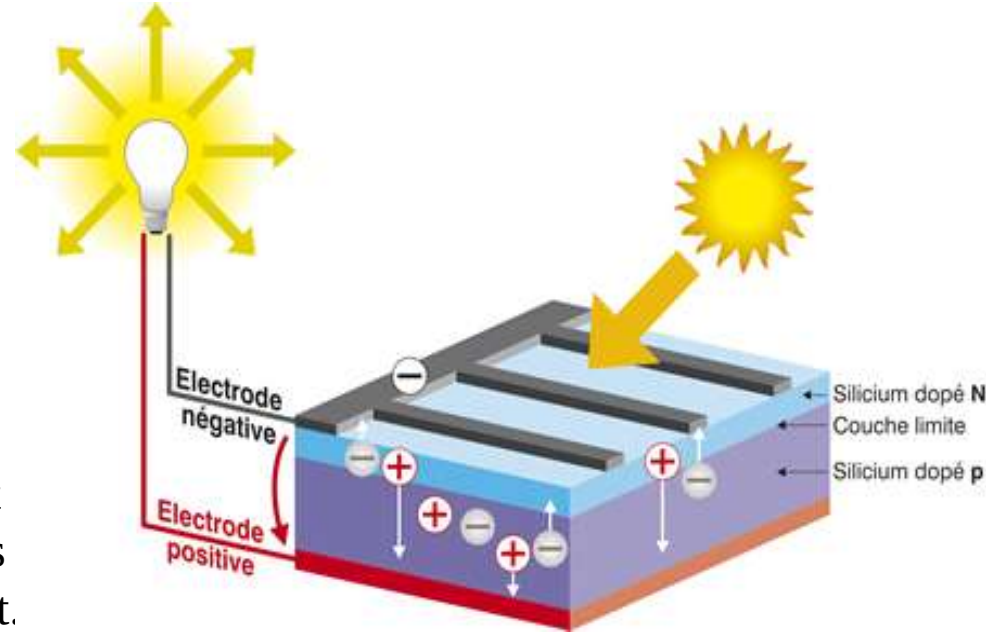
Le Photovoltaïque, C'est Quoi ?

- ✓ L'effet photovoltaïque est la capacité de certains matériaux à transformer l'énergie solaire (photons) en un courant électrique continu.
- ✓ Découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel.
- ✓ Première application créée en 1954
- ✓ Développement industriel à partir des années 1980.

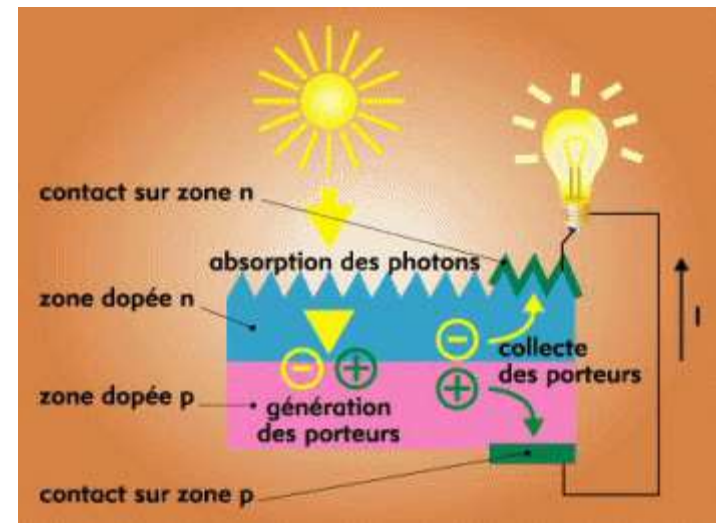
Une Cellule Photovoltaïque

C'est un **composant électronique** qui, exposé à la lumière (photons), génère une tension Électrique (volt) suivant l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un **courant continu** et la **tension** obtenue est de l'ordre de **0,5 V** par cellule. Les cellules photovoltaïques sont Constituées de semi-conducteurs généralement à base de silicium (Si). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre.

Un panneau photovoltaïque est un assemblage de plusieurs cellules (56, 60, 72...).

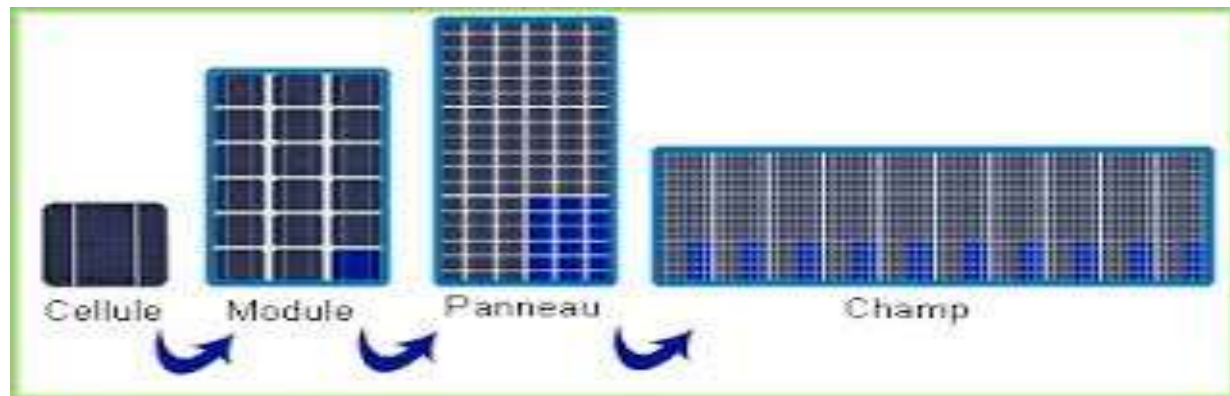


En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium. Ces électrons peuvent être mis en mouvement dans un circuit électrique extérieur et produire un courant électrique



Représentation générale d'une cellule photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques PV (noir ou bleu foncé) permettent de capter la lumière solaire et de produire de l'électricité en courant continu qui est ensuite transformée en courant alternatif par un onduleur. Les installations photovoltaïques sont destinées soit à produire de l'électricité pour un usage direct, soit à produire de l'électricité pour être revendue au réseau de distribution .



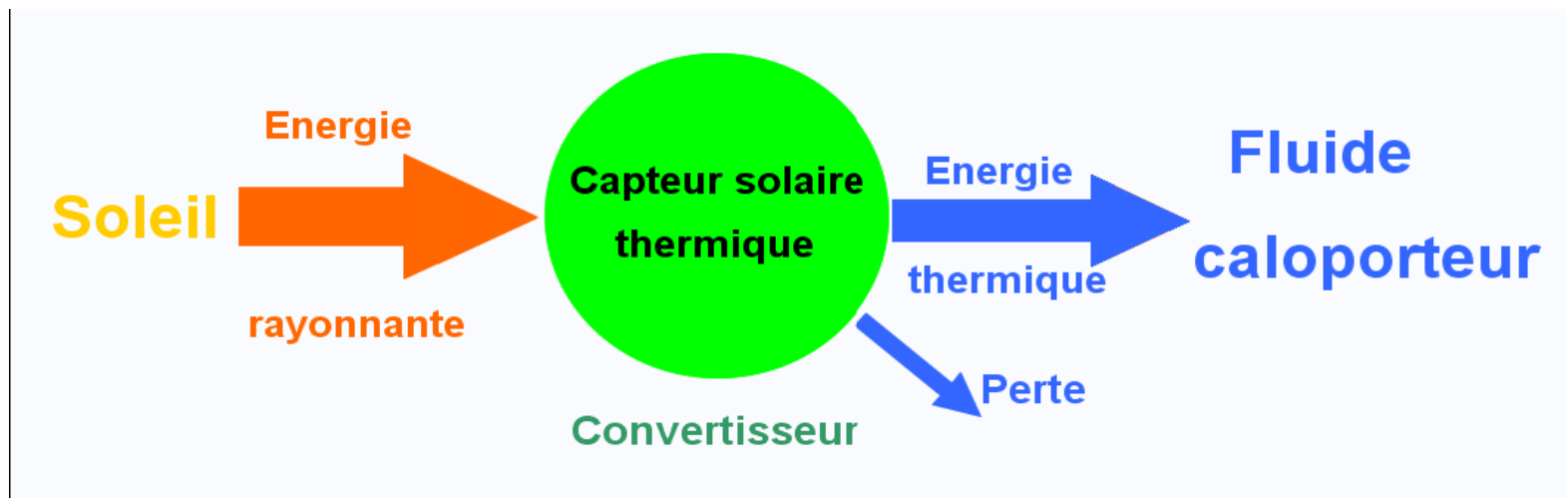
II.3. Exploitation de l'énergie solaire:

L'énergie solaire est une énergie renouvelable qui pourrait couvrir les besoins énergétiques de la planète. Elle présente par ailleurs **un caractère intermittent** (alternance jour-nuit, conditions climatiques) et **une difficulté de stockage**.

On peut exploiter l'énergie solaire par **cinq principales applications du rayonnement solaire**, soit le solaire thermique passif, le solaire thermique actif, le solaire thermodynamique, le solaire photovoltaïque et l'éclairage naturel.

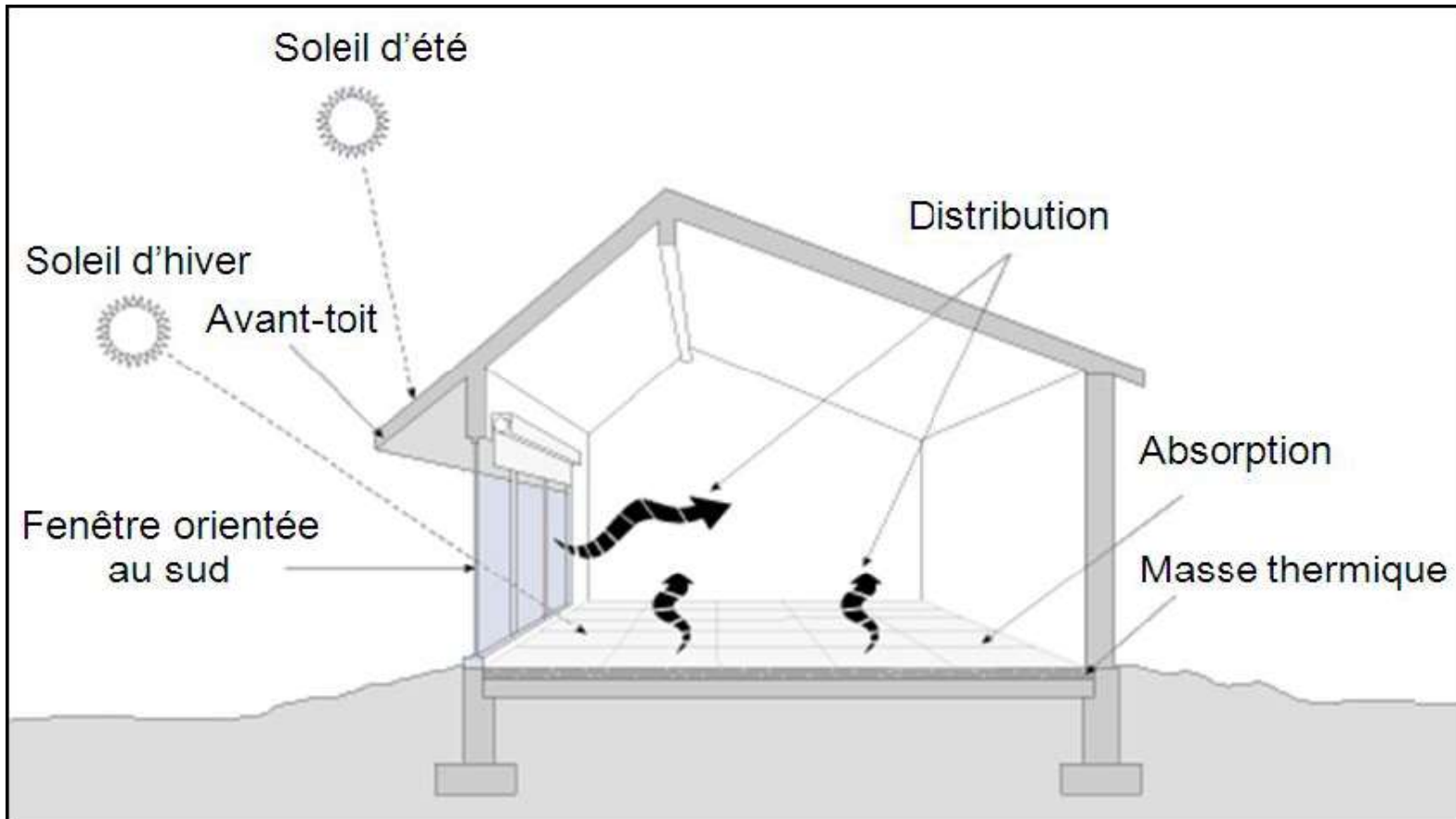
II.3. 1. Exploitation de l'énergie solaire pour le chauffage (transformation en énergie thermique):

-conversion thermique:



II.3. 1. 1. Le solaire thermique passif

Comme le nom l'indique, les techniques d'exploitation de cette forme d'énergie solaire ne font appel à aucun équipement mécanique ou électrique. Elles se produisent de façon passive (fenêtre, puits de lumière, véranda).



bâtiments solaires passifs:

Exemple de design d'une habitation solaire passive
au Québec-Canada

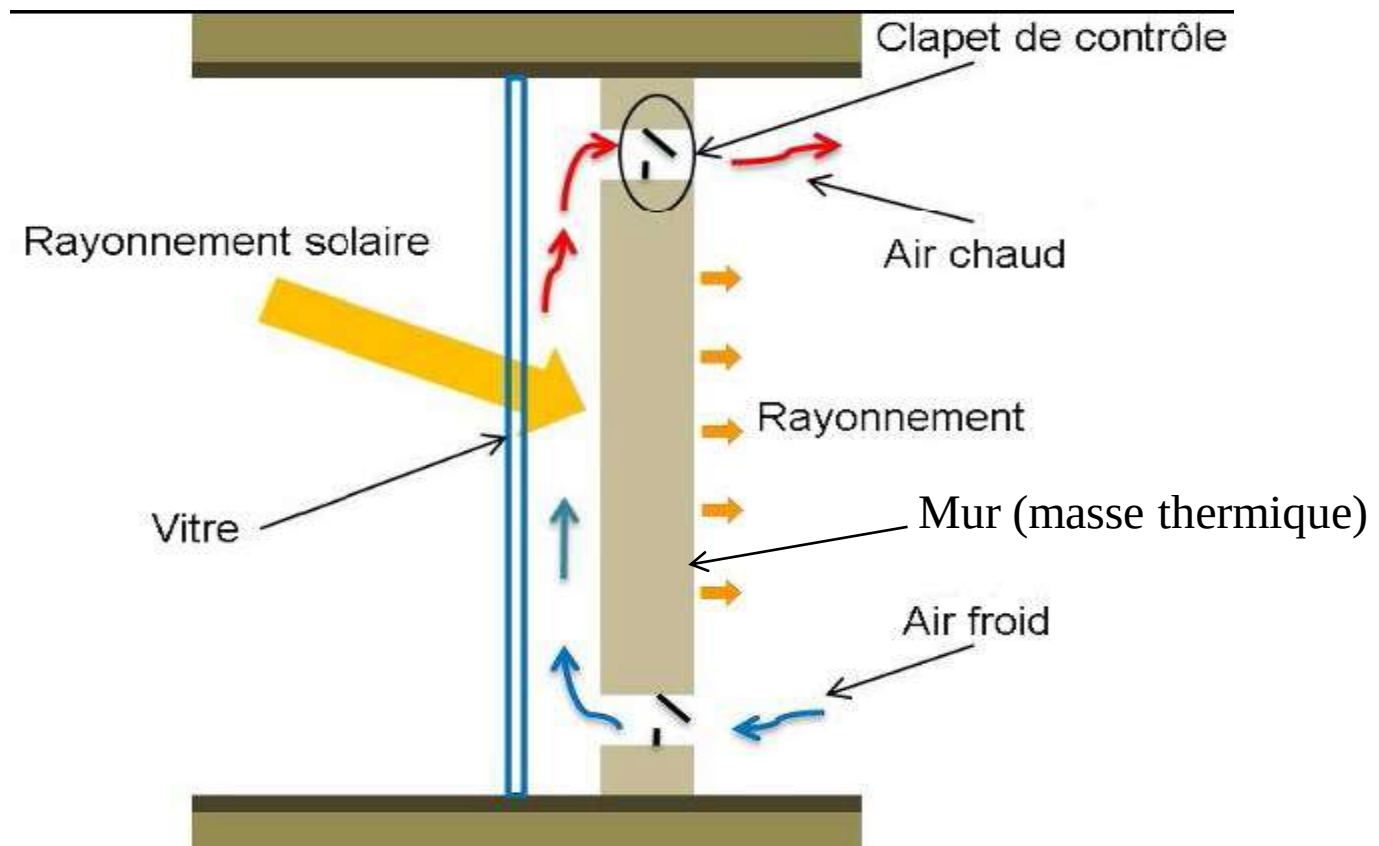


Schéma d'un mur Trombe
Exemple exploité au Québec-Canada

- La masse thermique emmagasine la chaleur durant la journée pour la relâcher graduellement lorsque le soleil disparaît.
- Il est préférable que les matériaux constituant la masse thermique aient une surface **foncée et dure**.
- Parmi les matières à forte inertie thermique on retrouve principalement: la pierre, l'argile (sous forme de briques, de céramique ou de terre compactée), le béton, le verre sous forme de bloc épais...

II.3. 1. 2. Le solaire thermique actif

Les technologies solaires actives visent à transmettre l'énergie thermique du rayonnement solaire à un fluide caloporteur par l'intermédiaire d'un équipement. La chaleur ainsi produite peut servir directement pour le chauffage des bâtiments ou pour générer de l'eau chaude domestique.

A. Système chauffe-eau solaire

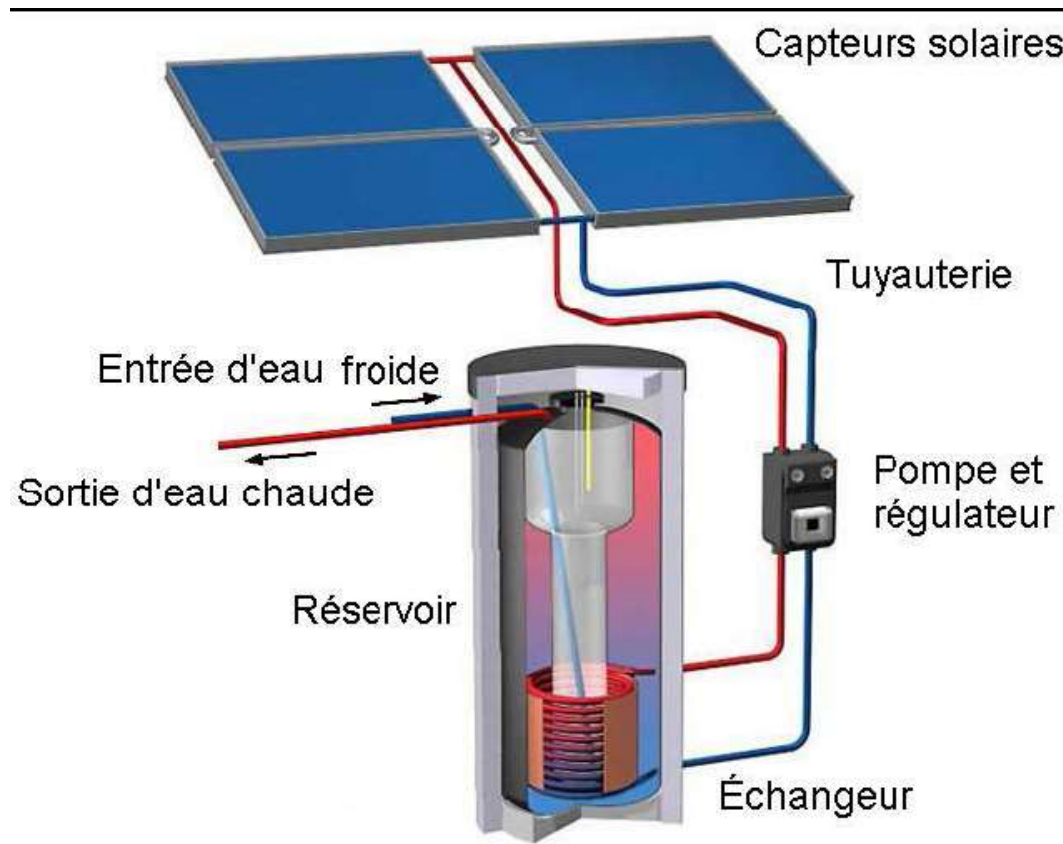
Un **chauffe-eau solaire** est un dispositif qui permet de **capter la lumière naturelle** et de l'utiliser ensuite pour réchauffer l'eau des sanitaires.

Ce système solaire thermique actif est en mesure de convertir en chaleur **jusqu'à 70 %** de l'énergie captée.

A.1. Constitution d'un Système chauffe-eau solaire

Il est généralement composé des éléments suivants : les **capteurs solaires**, la **tuyauterie isolée**, le **réservoir de stockage d'eau chaude** avec **échangeur de chaleur**, la **pompe** et le **régulateur**.

Les capteurs, qui absorbent l'énergie du rayonnement solaire sont souvent installés sur les toits, les murs ou sur un support.



Représentation générale d'un chauffe-eau solaire

A.2. Installation d'un Système chauffe-eau solaire

Pour installer le chauffe-eau, l'idéal est **une pente de toit orientée vers le Sud**, d'une **inclinaison de 45°** environ et surtout qui n'est masquée par aucun obstacle à la lumière (arbre, immeuble...).

Les toits entre **le Sud-Est** et le **Sud-Ouest** peuvent également convenir; on peut même installer le chauffe-eau dans le jardin, si l'emplacement s'y prête.

Les capteurs solaires thermiques représentent **une surface moyenne de 3 à 5 m²**, il est donc assez facile de trouver un emplacement approprié.

A.3. Types du chauffe-eau solaire

D'une manière générale, c'est la **surface des panneaux solaires**, la **capacité du ballon de stockage** (réservoir) et la **forme du chauffe-eau lui-même** qui diffèrent. Ce sont les principales caractéristiques qu'un propriétaire doit examiner pour choisir un chauffe-eau.

Il existe quatre types principaux du chauffe-eau solaire:

Les **chauffe-eau monobloc**, les **chauffe-eau à thermosiphon**, les **chauffe-eau à auto-vidange**, les **chauffe-eau à circulation forcée**. Ce sont les modèles les plus utilisés tant par les particuliers que les professionnels.

Chauffe-eau monobloc

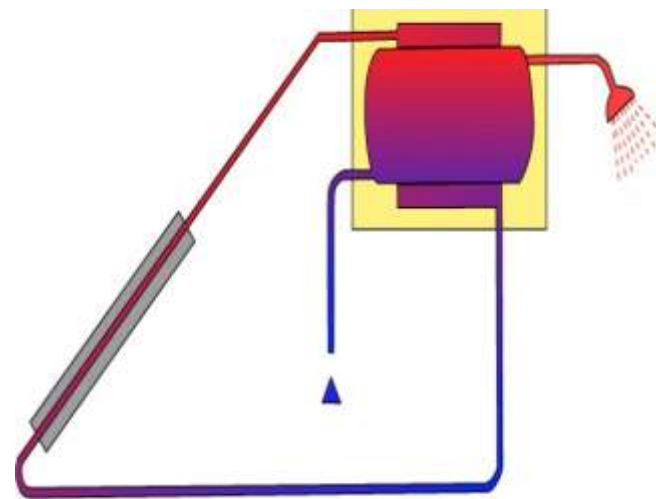
Ils sont les plus faciles à installer et comptent parmi les modèles les plus répandus. Cette appellation vient du fait que **le ballon est fixé en haut du panneau solaire (monobloc)**. Ce qui rend le modèle intéressant c'est que l'eau chaude sanitaire circule directement dans les panneaux. Ainsi, il ne requiert **pas de pompe**. C'est surtout **conseillé aux pays chauds**, comme la Grèce en Europe, l'Afrique...



Chauffe-eau à thermosiphon

Dans ce cas, le ballon est séparé des panneaux solaires. Ces panneaux solaires restent alors à un niveau plus bas que le ballon de stockage, ce qui permet à l'eau de circuler par **effet de thermosiphon** qui repose sur le principe selon lequel l'eau chauffée va devenir **plus légère que l'eau froide** et va rapidement monter dans le ballon. L'eau froide quant à elle, devient alors plus lourde et va descendre jusque dans le panneau solaire.

Il se peut que l'eau soit sensible au gel, ce qui fait qu'il est nettement conseillé pour les pays chauds.

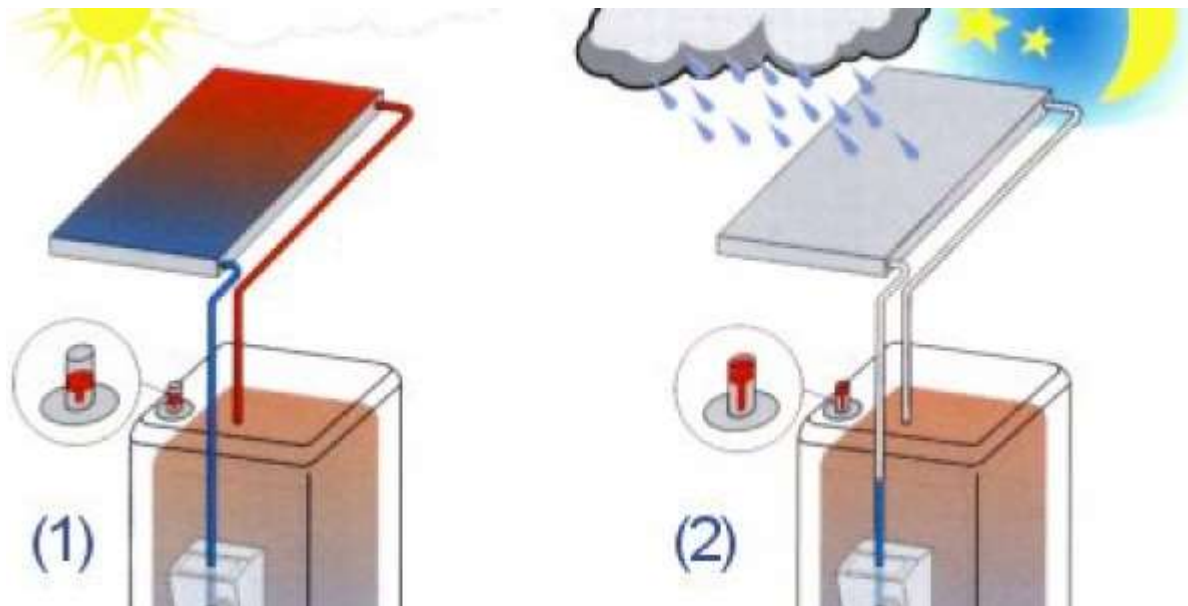


Installation à thermosiphon (indirect): le ballon de stockage est placé au dessus du capteur

Chauffe-eau à auto-vidange (Drainback)

Il se distingue des autres types par le fait que le circuit solaire se vidange automatiquement lorsqu'il ne fonctionne pas. Ce qui fait que lors des fortes périodes d'ensoleillement (en été), le système ne fonctionne pas fréquemment, ce qui réduit aussi les risques de surchauffe. Le cas est le même en hiver, lorsque les températures sont au plus basses et que les jours d'ensoleillements sont moindres. Le circuit solaire est vide et ne devrait pas craindre le gel.

Ce système améliore la durée de vie du dispositif et facilite l'entretien de celui-ci.



Chauffe-eau à circulation forcée

Le liquide qui circule dans les panneaux solaires est un fluide qui ne craint pas le gel (en général de l'eau glycolée) (même principe que le circuit de refroidissement des automobiles, on y mélange du Glycol (un alcool) antigel pour abaisser le point de solidification par le froid).

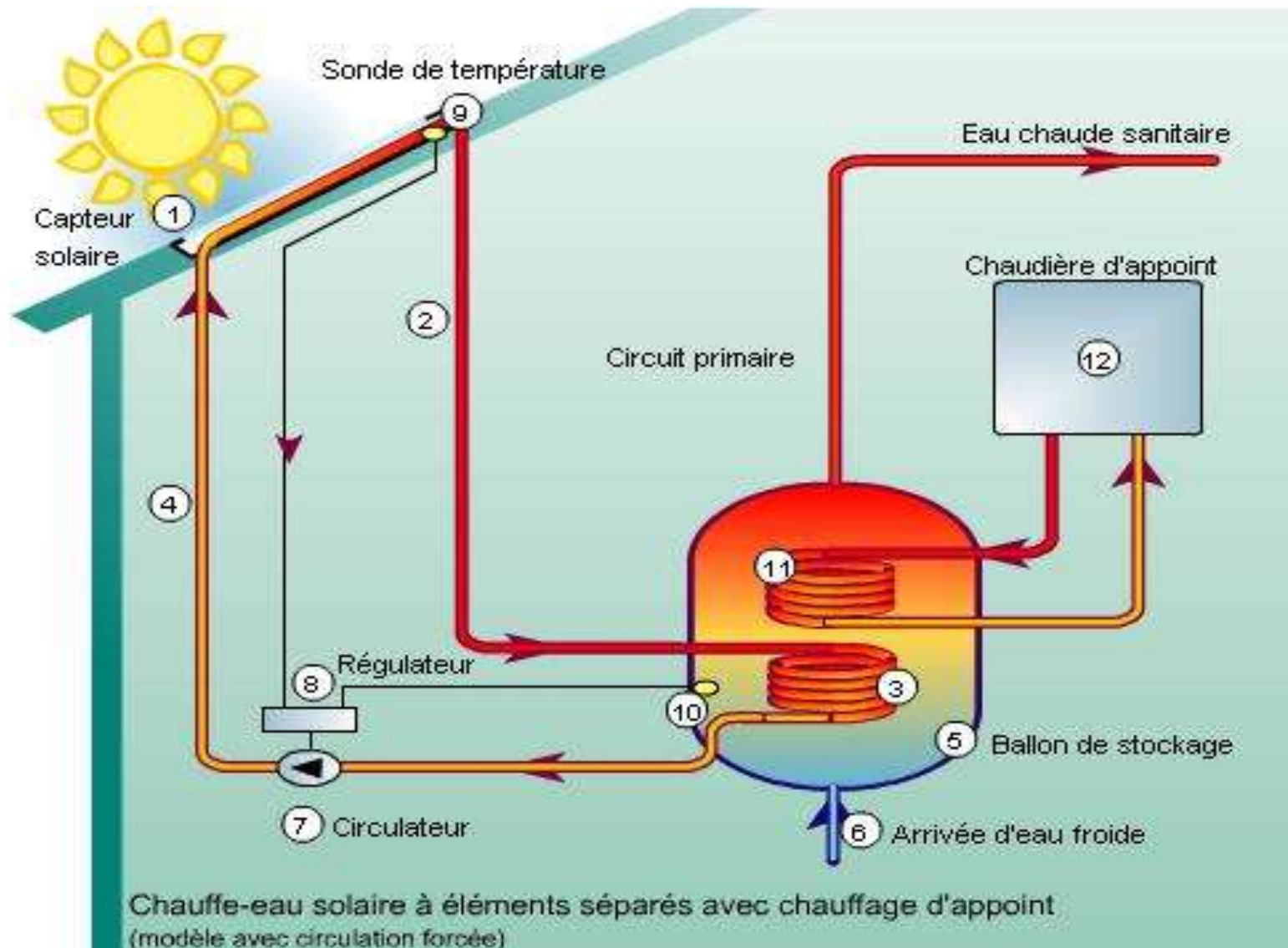
Comme ce liquide, qu'on appelle fluide caloporteur, est impropre à la consommation et ne doit pas être mélangé à l'eau chaude sanitaire, la chaleur est récupérée dans le ballon à travers un échangeur.

On se trouve donc en présence de deux circuits :

- Un circuit qui réchauffe le fluide dans les panneaux.
- Un circuit qui transporte l'eau sanitaire aux robinets.

Une pompe assure le transfert du fluide entre les panneaux et l'échangeur.

Dans ce système, **la position du ballon par rapport aux panneaux n'a pas d'importance.**



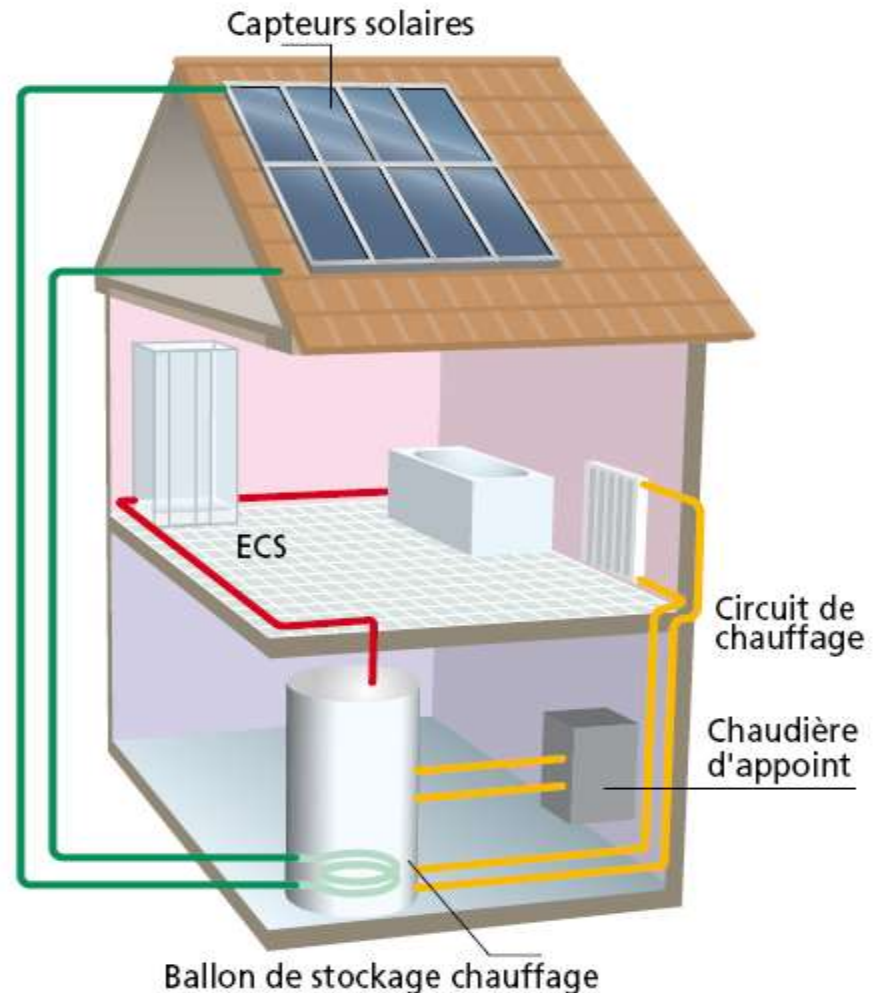
D'une façon générale, l'énergie solaire peut également être utilisée pour **le chauffage**, mais ne satisfera pas plus de **30 à 60 %** des besoins en chauffage d'un foyer.

Principe général du système solaire combiné

*En vert : circuit où circule
l'antigel.*

*En jaune : circuit où circule
l'eau de chauffage
(sans antigel).*

*En rouge : circuit d'eau chaude
sanitaire.*



Un système d'appoint sera nécessaire, surtout pour les périodes de l'année durant lesquelles l'ensoleillement est moindre.

II.3. 1. 3. Le solaire thermodynamique

Les centrales solaires thermodynamiques concentrent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à une température beaucoup plus élevée que celle atteinte par les systèmes présentés précédemment. En fait, l'énergie dégagée par les systèmes solaires thermodynamiques est suffisante pour actionner des turbines à vapeur et produire de l'électricité.

Il existe plusieurs types de centrales solaires thermodynamiques: à capteur parabolique (1), à capteurs cylindro-paraboliques (2), à effet cheminée (3), à miroirs de Fresnel (4) et à tour solaire ou à concentration solaire (5) .



à capteur parabolique



à capteurs cylindro-paraboliques



à effet cheminé



à miroirs de Fresnel



à tour solaire ou à concentration solaire



Différents types de collecteurs paraboliques tout quatre expérimentés en Allemagne



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

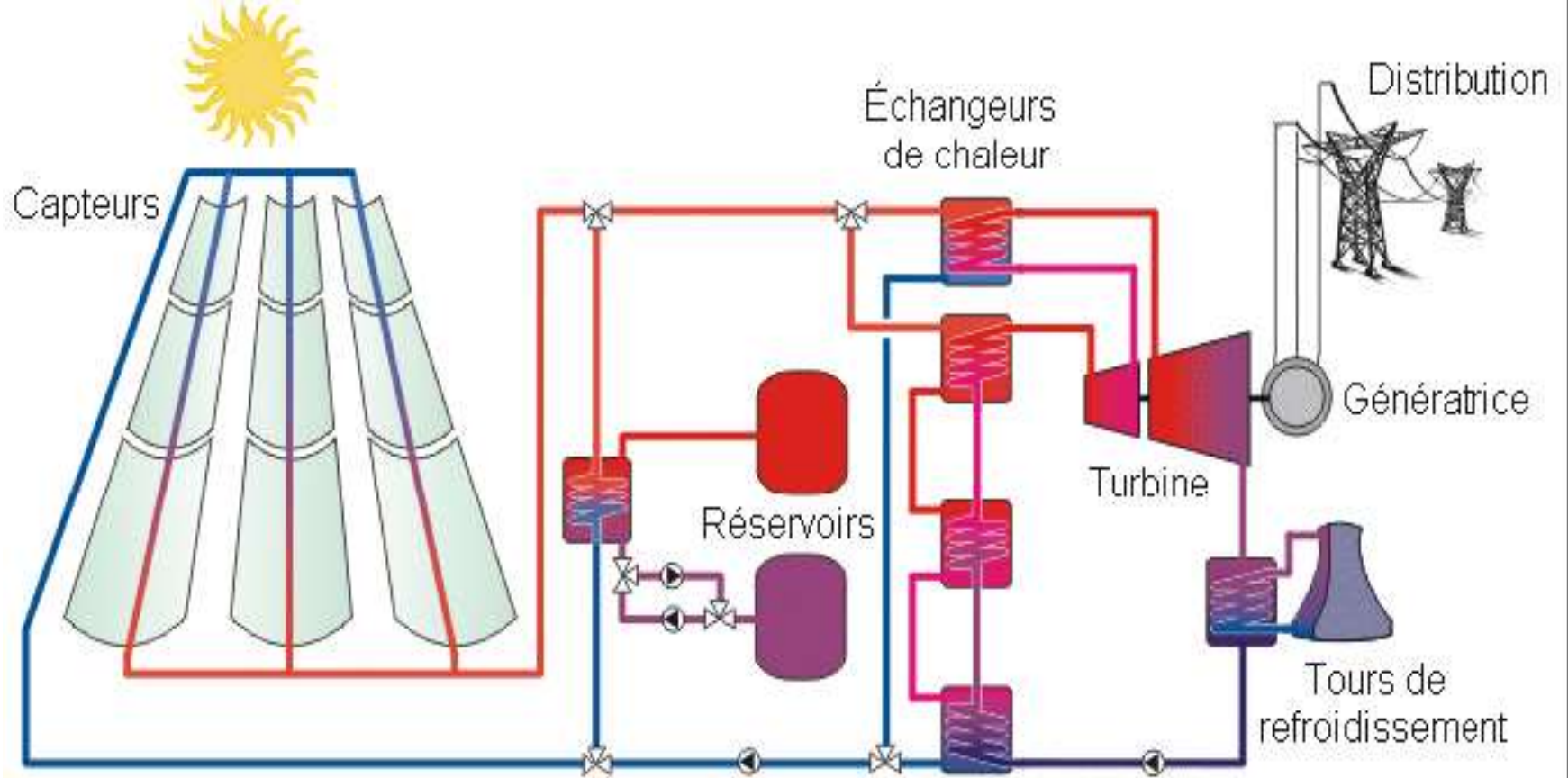
Solar Energy Generating Systems (SEGS) est une centrale solaire thermodynamique à **miroirs cylindro-paraboliques** située en **Californie, aux Etats-Unis**. Elle était à sa mise en service la plus grande installation de production d'énergie solaire au monde. Elle se compose de **neuf centrales solaires** dans le désert de Mojave, où l'ensoleillement est l'un des meilleurs disponibles aux États-Unis.

La **centrale solaire Noor** (محطة نور للطاقة الشمسية), est une centrale solaire thermodynamique entrée en service en Février 2016 près de Ouarzazate au Maroc. Avec 160 MW, la centrale devient la [7^e centrale solaire thermodynamique la plus grande au monde](#), après [5 centrales américaines](#) aux premiers rangs, puis la centrale [Solaben en Espagne](#).

Son extension, programmée en trois étapes, portera sa puissance à 580 MW, en faisant une des plus grandes centrales solaires au monde, avec [Solar Star](#) en [Californie](#)

Tout dépendant de la technologie utilisée, le point où se concentre le rayonnement peut atteindre des températures extrêmement élevées, **jusqu'à 1000 degrés Celsius**.

Certaines centrales sont capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur (certaines techniques utilisent des huiles, des sels fondus ou bien du métal fondu comme fluide caloporteur puisqu'ils conservent la chaleur pour des durées importantes). Si ce n'est pas le cas, **une partie annexe de la centrale prend le relais** et produit de l'électricité **en brûlant des carburants traditionnels** (gaz, charbon...) une fois le soleil couché.



Fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique

Dans le site ci-dessous vous allez trouver une liste des centrales solaires thermodynamiques dans le monde ainsi qu'une classification de ces centrales (dernière mise à jour le 13 Mars 2020)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_centrales_solaires_thermodynamiques

II.3. 2. Exploitation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité:

II.3. 2. 1. Centrales photovoltaïques

Elles sont constituées d'un champ de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. L'énergie est directement transformée en électricité dans les panneaux, et passe ensuite dans le réseau électrique.

Le photovoltaïque peut être utilisé pour **alimenter des endroits peu accessibles ou trop éloignés de tout réseau électrique**. De plus, il peut être **utile pour alimenter des équipements mobiles sans avoir à transporter de carburant tels que des équipements militaires (les systèmes de communication ont besoin d'électricité)**.

D'après les informations publiées le 14 Mai 2020, **la plus puissante centrale solaire photovoltaïque se trouve en Emirats arabes unis: Noor Abu Dhabi, émirat d'Abu Dhabi**.

L'Allemagne et le Japon sont les pays qui produisent le plus d'électricité d'origine solaire.

Le facteur qui contribue le plus au développement de l'exploitation de l'énergie solaire est la richesse du pays et non son ensoleillement .

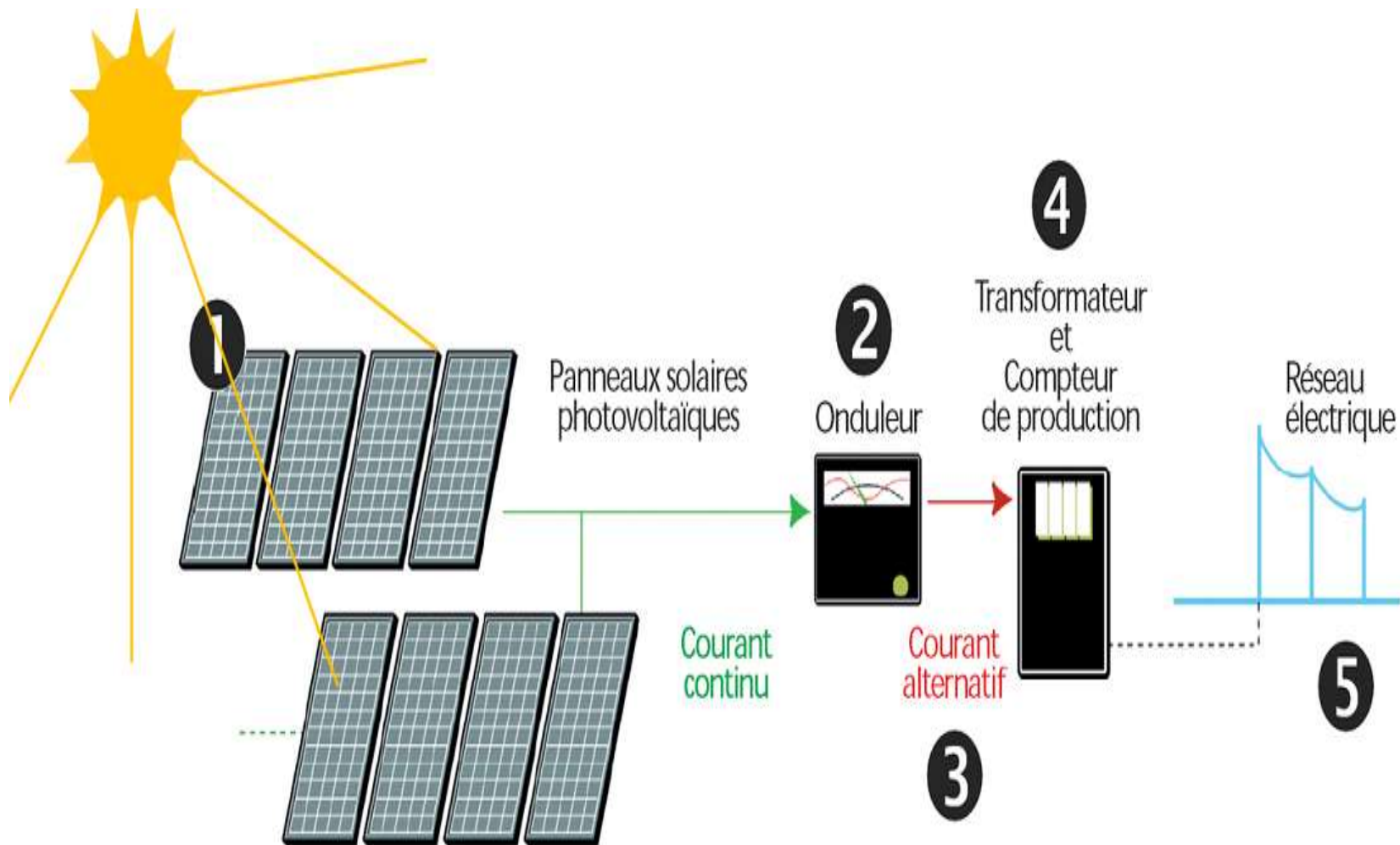
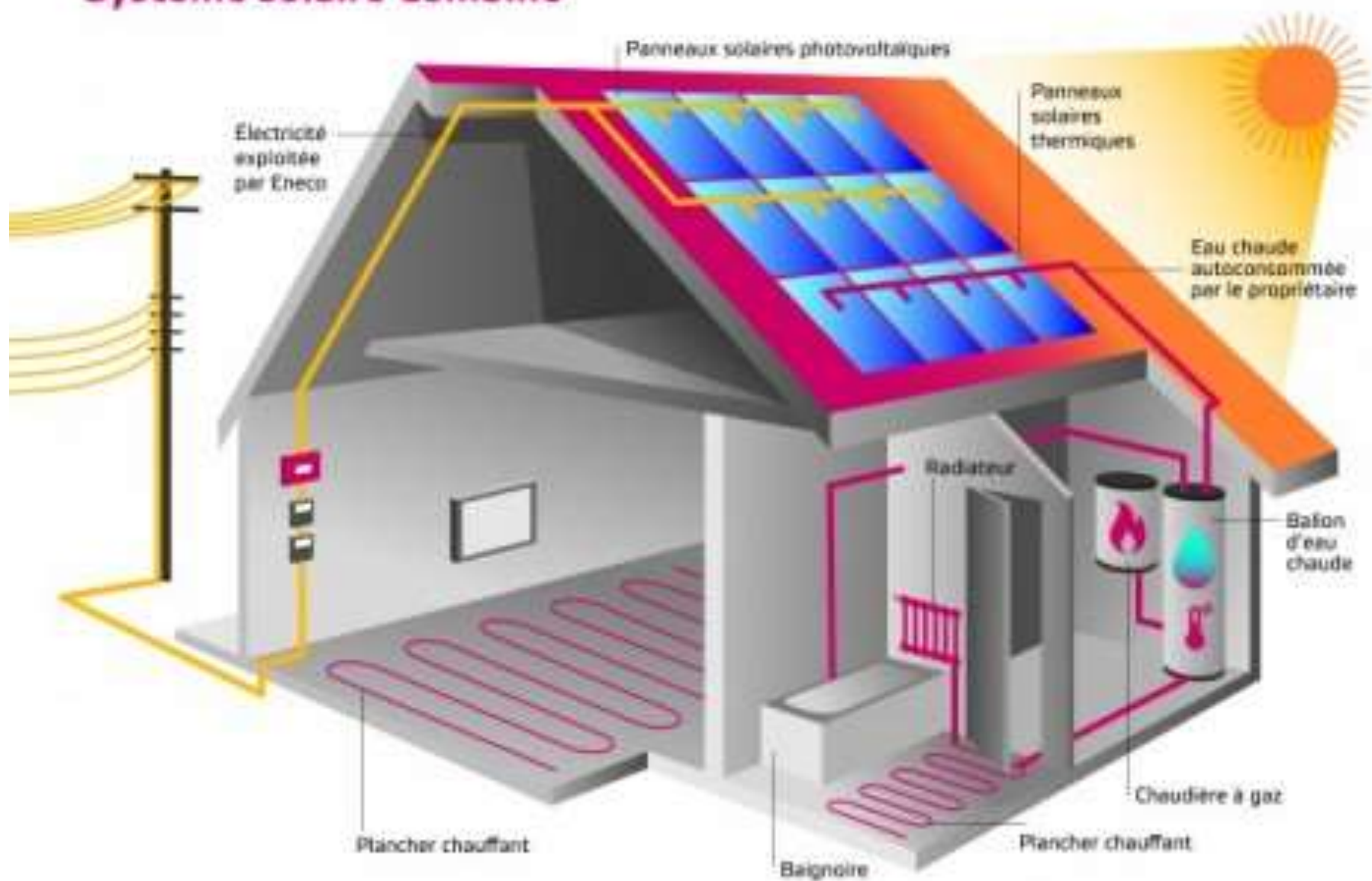


Schéma de principe d'une centrale solaire photovoltaïque

Système solaire Combiné



II.3. 2. 2. Exploitation de l'énergie solaire dans le transport

A. Les voitures solaires

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



Deux prototypes de voitures solaires mis au point par des universités américaines

B. Les trains solaires

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

C. Les bateaux solaires

De nombreux bateaux dits «solaires», **propulsés par des panneaux photovoltaïques alimentant un moteur électrique**, sont en circulation depuis plus de 20 ans. Ce sont **principalement des bateaux d'excursions** (leur vitesse ne peut pas dépasser les 20km/h: exemple, bateau solaire Sun21).

En juillet 2015, le "*Pikaia*" est le premier navire solaire, sous pavillon français, en exploitation commerciale maritime de transport de passagers propulsé par un moteur électrique de 10 kW.



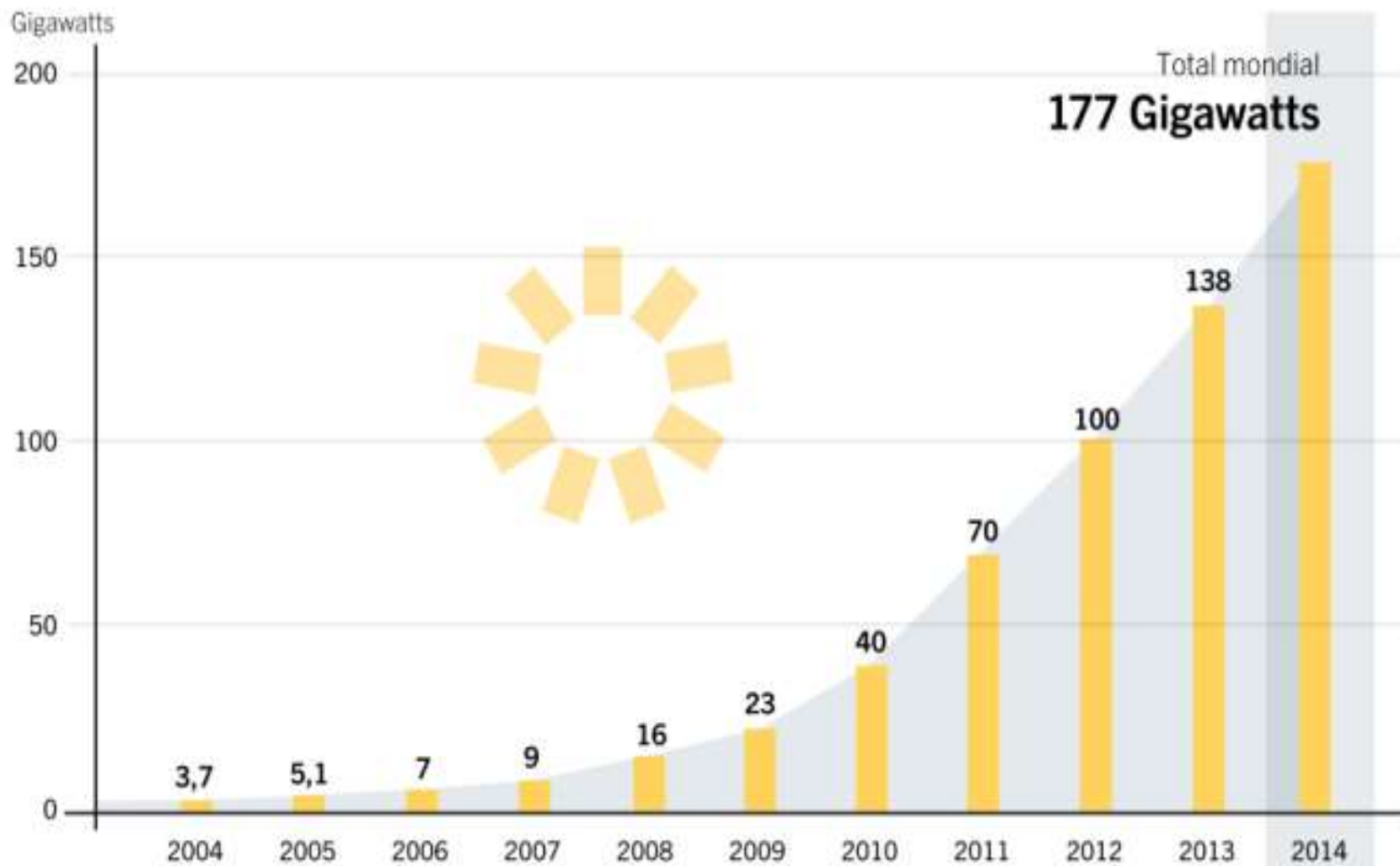
D. Les avions solaires

C'est des avions dont **la propulsion électrique est alimentée, complètement ou en partie, par l'énergie captée grâce à des panneaux photovoltaïques**. Disposés habituellement sur la surface de l'aile. **Un circuit électronique appelé MPPT, qui est connecté aux panneaux, assure une utilisation optimale de l'énergie** afin d'alimenter le moteur qui transforme cette énergie électrique en énergie mécanique au travers de l'hélice. Dans la majorité des cas, **une batterie est utilisée pour stocker l'énergie supplémentaire afin de pallier un manque de soleil**.



Avion solaire Helios ([NASA](#))





Evolution des capacités mondiales de solaire photovoltaïque

II.3. 3. Exploitation de l'énergie solaire pour la réfrigération: **Systèmes de réfrigération solaire**

II.3. 3. 1. Introduction

Après le choc pétrolier de 1973, beaucoup d'états ont pris conscience de l'importance qu'il y avait à **développer les énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire**. Ceci a entraîné **l'évolution des systèmes de réfrigération fonctionnant grâce à l'énergie solaire** (qui sont des **consommateurs important d'énergie**).

Ces systèmes sont **particulièrement adaptés aux régions où l'ensoleillement est élevé et où il n'y a pas de possibilité d'être raccordé à un réseau électrique**.

Les systèmes de réfrigération solaire **ont été généralement utilisés pour faire prolonger la chaîne de production du froid aux secteurs ruraux** surtout dans le domaine médical (**conservation des vaccins**).

II.3. 3. 2. Principe de la production classique du froid:

Pour faire du froid, le **principe le plus répandu est de détendre un fluide que l'on a au début comprimé grâce à un compresseur** (réfrigérateur à condensation) **ou en élevant sa température** (réfrigérateur à absorption).

1- Réfrigérateur solaire à condensation:

C'est le fonctionnement classique du réfrigérateur de la maison où **le fluide frigorigène aura été élevé en pression par un compresseur**. Ce réfrigérateur est une **cuve isolée thermiquement** équipée des éléments suivants :

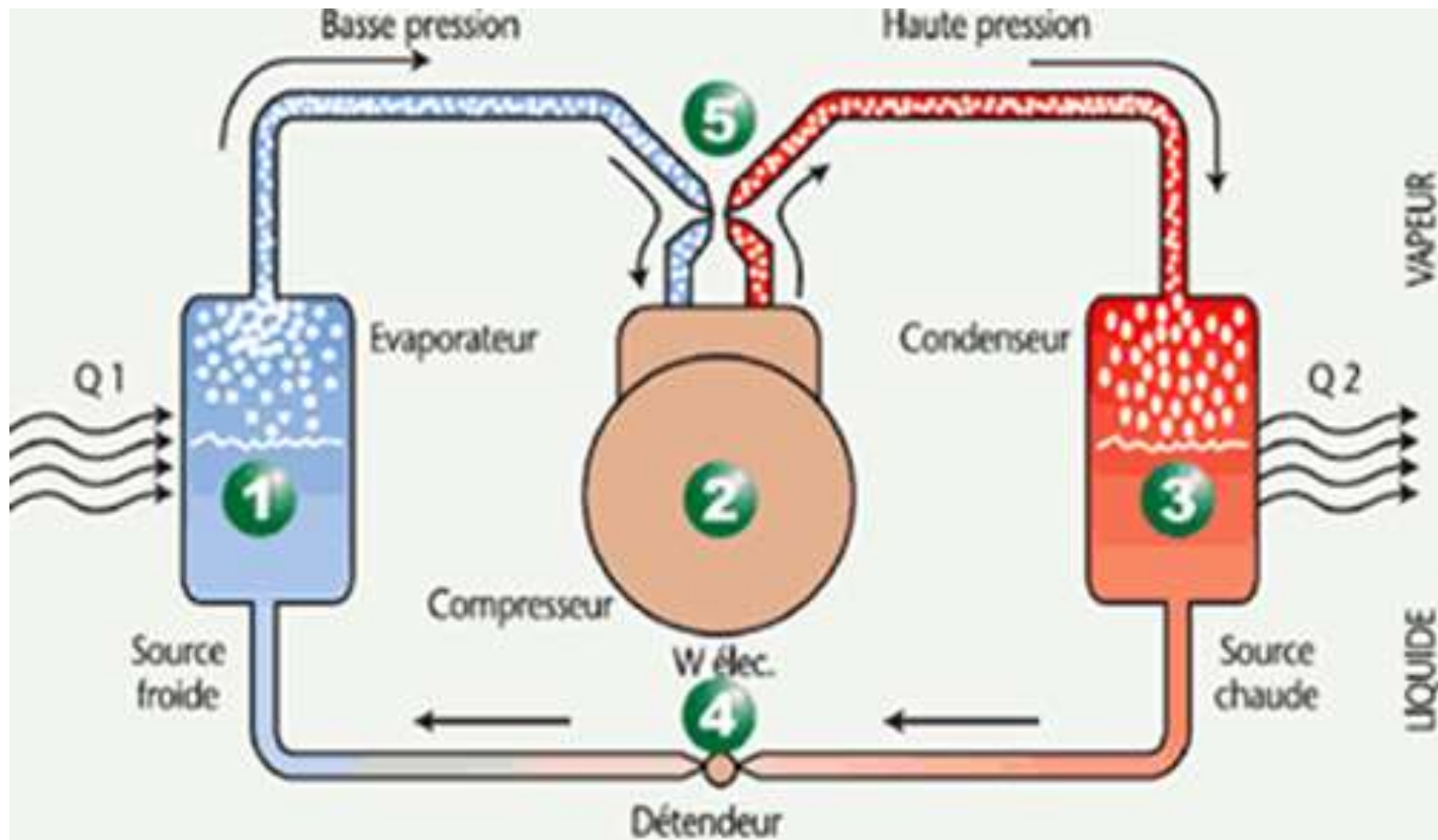
À l'extérieur de la cuve:

- un réservoir de liquide frigorigène (à forte capacité réfrigérante) ;
- un compresseur qui est en fait un moteur électrique travaillant comme une pompe à pression (mais comme toute mise en pression élève la température, le fluide comprimé est chaud) ;
- un condenseur qui est un radiateur dans lequel circule le fluide comprimé afin qu'il perde sa chaleur mais conserve sa pression.

À l'intérieur de la cuve :

un détendeur dans lequel le fluide est détendu. **La détente** (perte de pression) **crée alors le froid** qui est conservé dans la cuve isolée.

Un réfrigérateur solaire à condensation a comme particularité que son moteur électrique (compresseur) est conçu pour fonctionner avec peu d'énergie afin de pouvoir être alimenté par l'énergie solaire.



Schémas de principe d'un réfrigérateur à condensation

2- Réfrigérateur solaire à absorption

Dans ce cas, **le fluide frigorigène est "fabriqué" en chauffant un mélange d'eau et d'ammoniac**. Une fois que l'eau aura été séparée de l'ammoniac, le fluide restant sera d'une pression élevée qu'il suffit ensuite de détendre afin d'obtenir du froid. Ce **réfrigérateur est une cuve isolée thermiquement** équipée des éléments suivants :

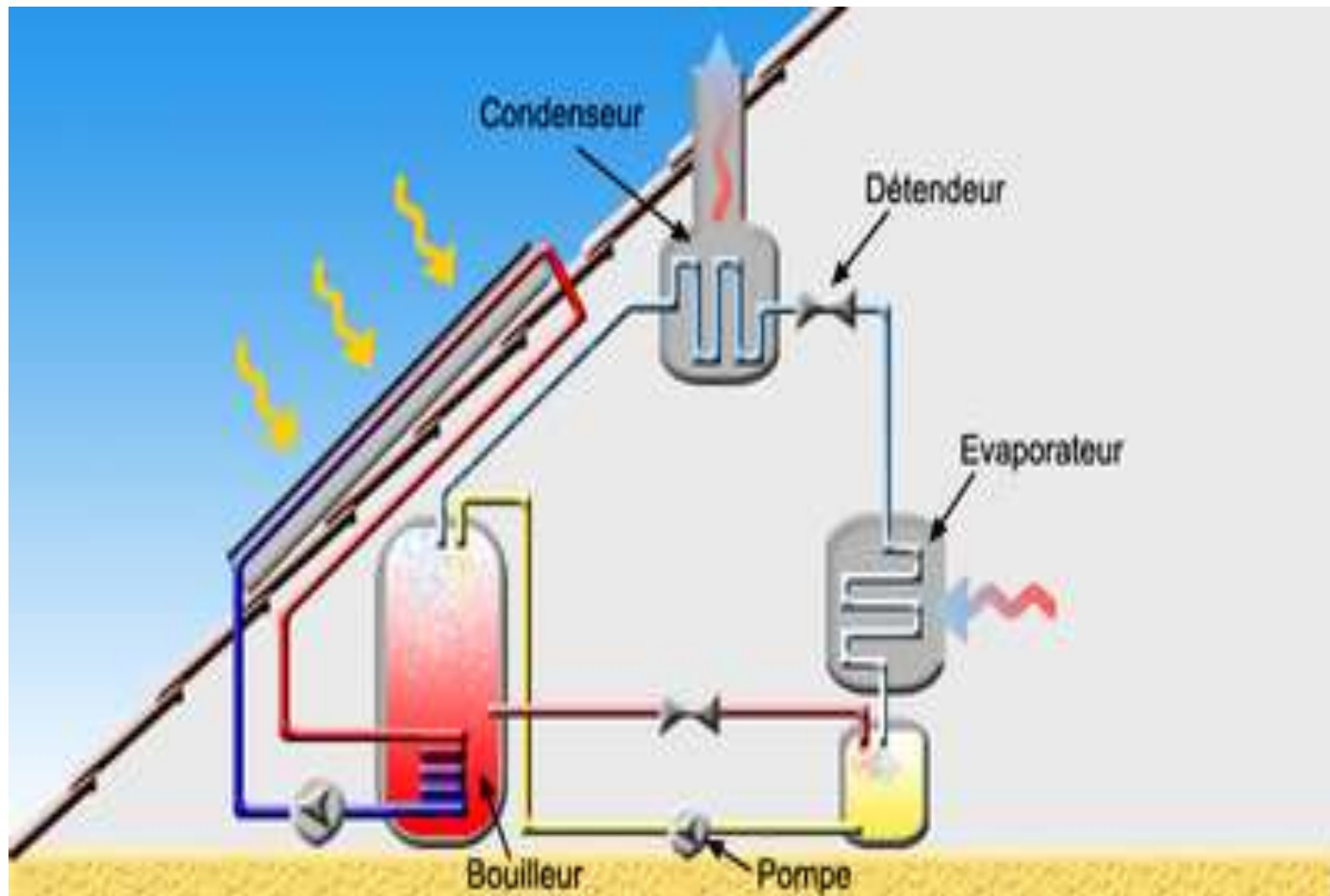
À l'extérieur de la cuve:

- un absorbeur qui fabrique le mélange eau/ammoniac,
- un **bouilleur** dans lequel le mélange eau/ammoniac est chauffé ,
- un séparateur-condenseur qui est un radiateur dans lequel circule l'eau qui va être séparée de l'ammoniac afin de perdre sa chaleur mais d'élever sa pression.

À l'intérieur de la cuve:

un détendeur-évaporateur dans lequel le fluide est détendu. **La détente** (perte de pression) **crée alors le froid** qui est conservé dans la cuve isolée.

Un réfrigérateur solaire à absorption a comme particularité que le bouilleur est remplacé par un panneau solaire thermique où la chaleur est produite uniquement par l'énergie solaire.



Schémas de principe d'un réfrigérateur solaire à absorption

L'Europe, l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient ont lancé le projet Desertec. Initialement, ce projet de plusieurs centaines de milliards de dollars a visé à répondre aux besoins des pays producteurs d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient et à couvrir jusqu'à presque **20 %** de la demande d'électricité en Europe.

Les États entourant la mer Méditerranée seront tous reliés par un réseau interconnecté alimenté, entre autres, par des centrales thermodynamiques situées en Afrique du Nord.

L'objectif est d'exploiter l'énergie solaire équivalente à **1,5 million de barils de pétrole** que reçoit annuellement chaque kilomètre carré de désert.

En fait, les besoins actuels en énergie de la planète entière pourraient être satisfaits si seulement **0,3 % des 40 millions de kilomètres carrés de déserts** de la planète étaient recouverts de centrales solaires.

Chapitre III

Energie éolienne

III.1. Introduction:

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. L'origine du terme « éolien » provient du nom du **personnage légendaire Éole**, connu en **Grèce** ancien comme le **maître des Vents**.

L'énergie cinétique du vent captée sur les pales va être transformé en énergie mécanique. Cette dernière peut être utilisé directement (pomper de l'eau, faire tourner la meule d'un moulin...) ou bien transformé en énergie électrique en couplant l'éolienne avec une génératrice.

La quantité de l'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes off shore) où la présence du vent est plus régulière.

III.2. Types des éoliennes:

Il existe deux grands types d'éoliennes: Eolienne à **axe vertical** et Eolienne à **axe horizontal**.



Eoliennes **On shore**



Eoliennes **Off shore**

Eoliennes à axes horizontaux

On shore: terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents

Off shore: littéralement pas sur le sol, donc sur la mer

Moins gênantes (éloignés des habitants), difficiles à installer donc coûteuses.



Rotor hélicoïdal



Rotor Darrieus



Rotor Darrieus H

Eoliennes à axes verticaux de type Darrieus

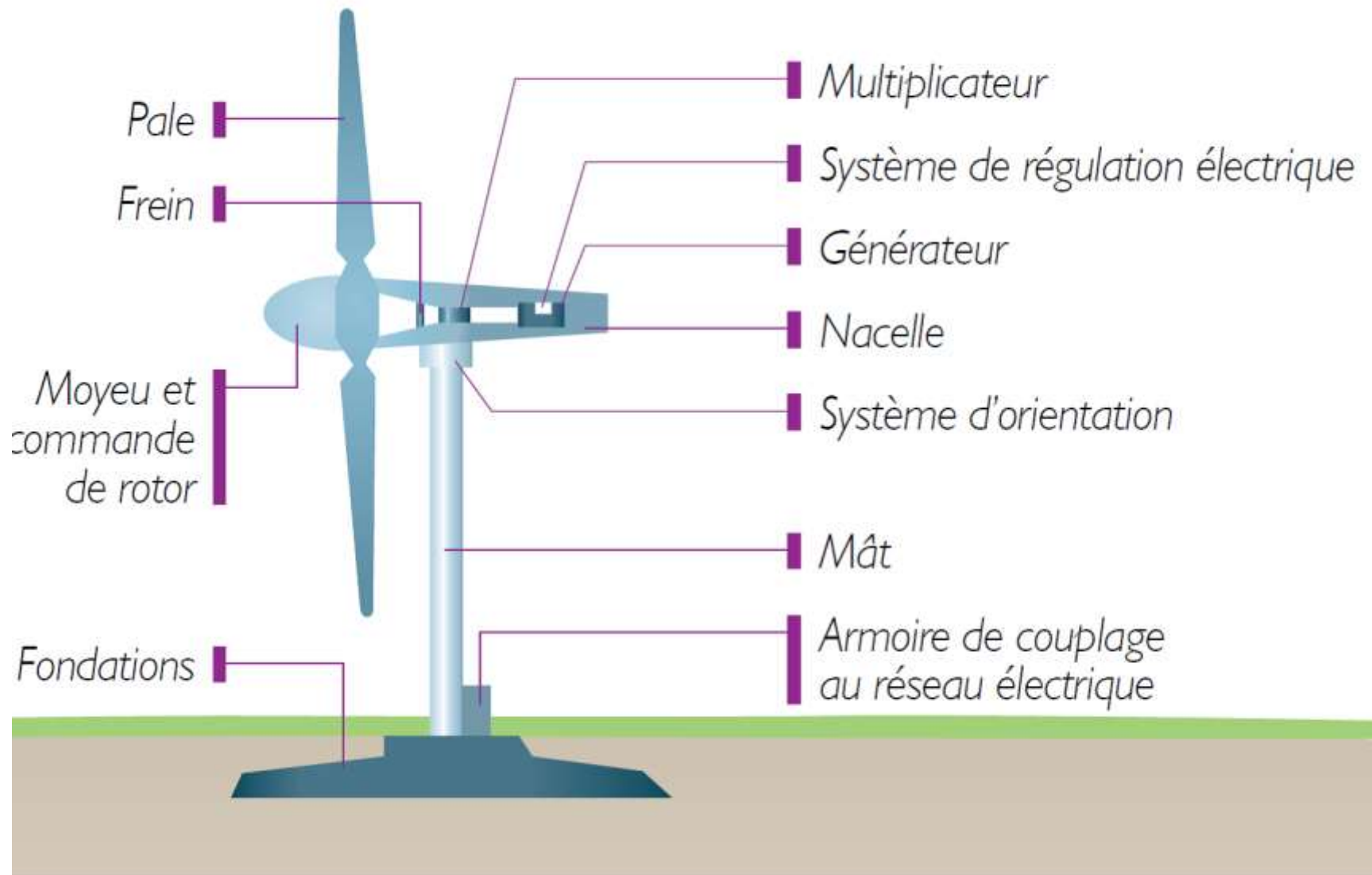
Rendement plus faible que les éoliennes classiques, moins d'encombrement, générateur pouvant être installé au sol, intégrables aux bâtiments.



Eolienne à axe vertical de type Savonius intégrée sur une
toiture en Allemagne

Fonctionne avec toutes les directions du vent, capte des vents puissants, faible rendement

III.3. Structure générale d'une éolienne à axe horizontal:



Structure générale d'une éolienne

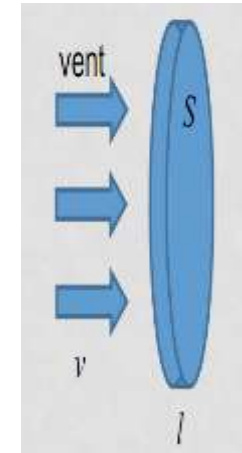
La puissance du vent est donnée par l'expression ci-dessous:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

S : section de la surface traversée par le vent,

v : vitesse instantanée du vent en m/s,

ρ : Masse volumique de l'air (du vent) en kg/m³



On ne peut jamais capter toute l'énergie du vent (sinon il n'y aurait plus de vent derrière les pales de l'hélice).

Un scientifique allemand, **Albert Betz**, a montré que le maximum de la puissance récupérable est égal à **16/27** (environ **59%**) de la puissance théoriquement récupérable.

La **puissance maximale récupérable** est donc donnée par:

$$P_{max} = 0,59 \left(\frac{1}{2} \rho S v^3 \right)$$

La **puissance en sortie de la génératrice** est donnée par:

$$P_{gén\acute{e}} = \left(\frac{1}{2} \rho S v^3 \right) C_p$$

C_p : coefficient de performance (0,4 pour les éoliennes actuelles)

La production de cette énergie ne présente pas de déchets par contre elle est dépendante du vent

III.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

III.4.1. Les avantages de l'énergie éolienne:

- ✓ L'énergie éolienne est renouvelable, elle n'est pas polluante.
- ✓ Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole.
- ✓ Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- ✓ Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques importants tout comme à des besoins domestiques limités, selon leur taille.

III.4.2. Les problèmes qui se posent avec l'énergie éolienne:

- ✓ L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- ✓ C'est une source d'énergie intermittente.
- ✓ Les éoliennes peuvent provoquer des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- ✓ Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers).

III.5. Exploitation de l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne peut être exploitée sous deux formes:

III.5. 1. Energie Eolienne Mécanique:

La **conversion en énergie mécanique** s'effectue à **partir de machines mécaniques, appelées éoliennes multipales**. L'application principale de cette forme d'énergie est le **pompage d'eau pour l'alimentation des populations rurales en eau potable** (buvable) ou **l'irrigation (arrosage) dans les sites isolés**. Elles démarrent à des vitesses de vent faibles de l'ordre de 3 à 4 m/s.

III.5. 2. Energie Eolienne Electrique:

La conversion électrique de la force du vent est la **production de l'électricité par l'intermédiaire de machines appelées aérogénérateurs**, dont la puissance varie de quelques W à quelques MW par machine.

Parmi ses applications :

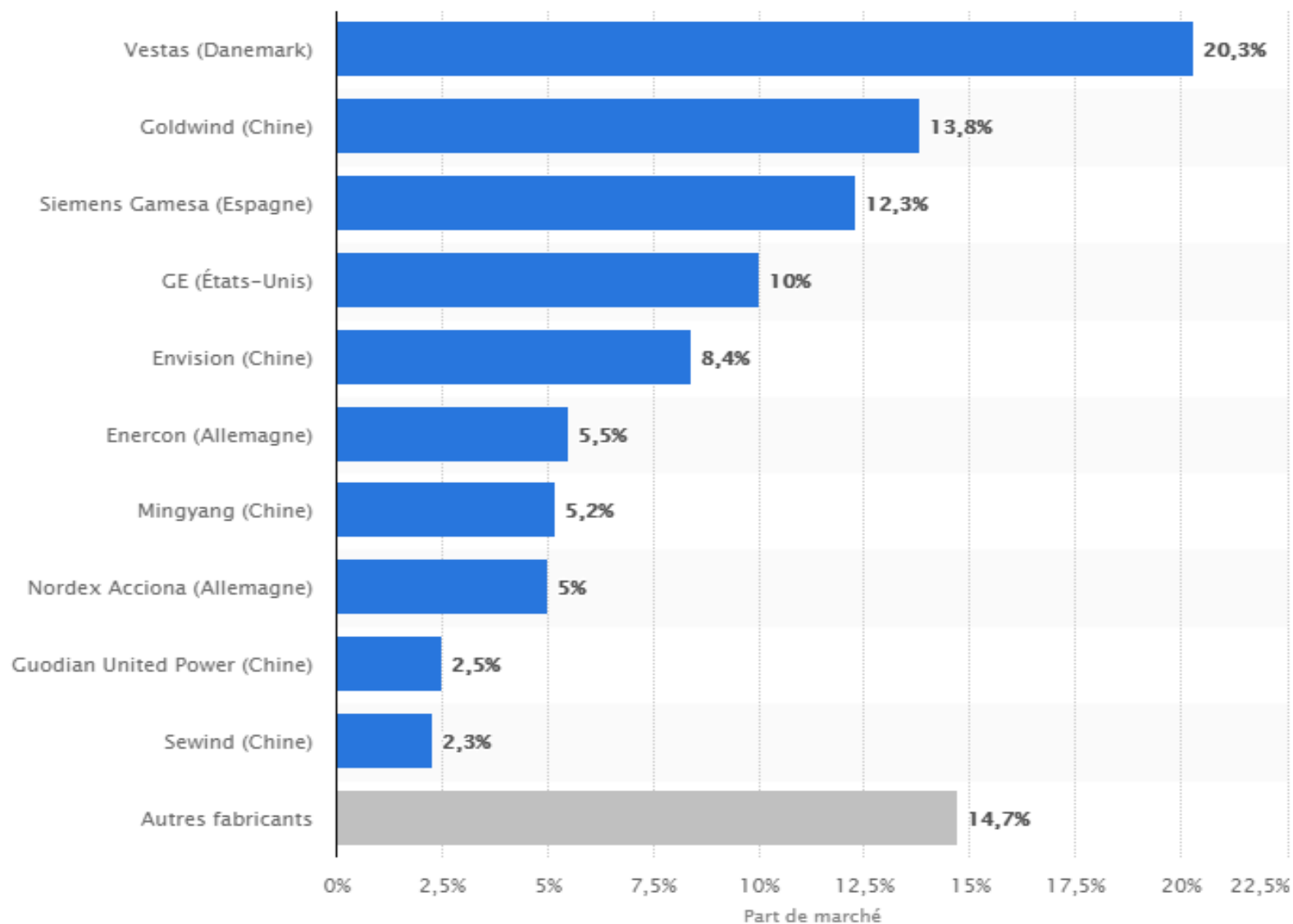
- Eclairage domestique
- La réfrigération et l'alimentation de divers appareils électriques
- Production d'électricité en connexion avec le réseau électrique (parcs éoliens)

On distingue par ailleurs deux typologies d'installations:

Industrielles : les grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique ;
Domestiques: des petites éoliennes installées chez les particuliers.

III.6. Les entreprises du secteur éolien:

Les principaux fabricants d'éoliennes en 2018 étaient:

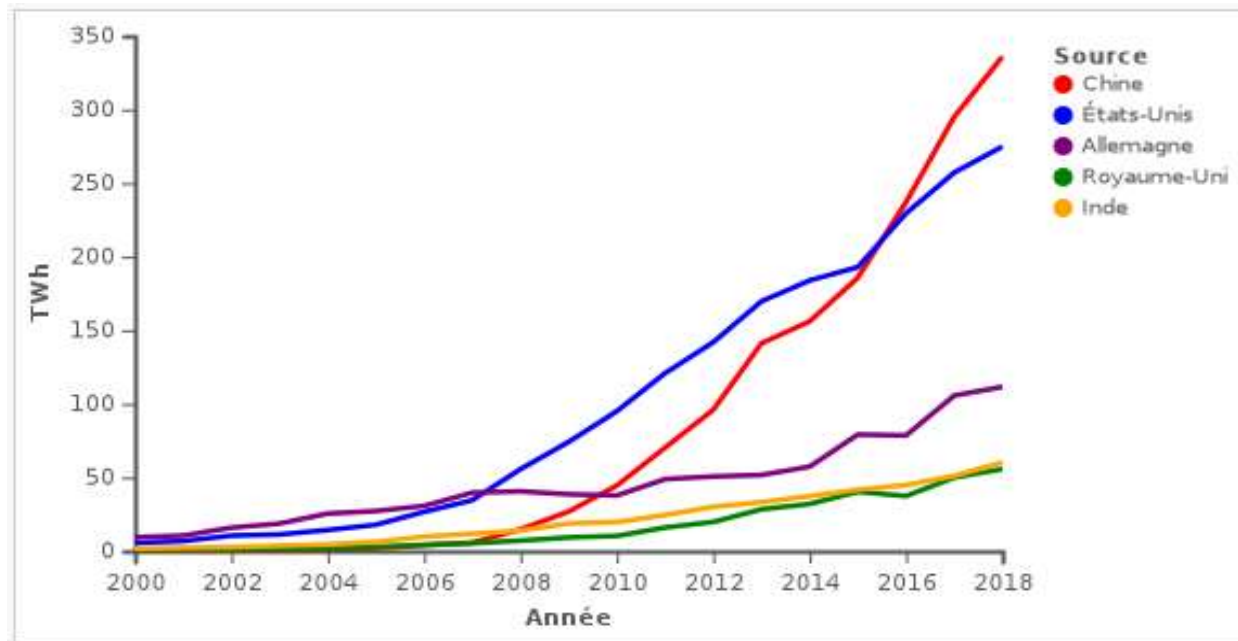


III.7. Les pays disposants des plus importantes capacités éoliennes:

Ce sont **la Chine** et **les États-Unis** qui disposent des plus grands parcs éoliens dans le monde, avec respectivement **145,1 GW** et **74,5 GW** installés à **fin 2015**. Suit ensuite **l'Allemagne**, leader européen de l'éolien (et mondial jusqu'en 2007) avec **44,9 GW** installés.

L'Europe a longtemps dominé le marché mondial de l'énergie éolienne mais dispose aussitôt (à l'avenir) d'un parc éolien équivalent à celui de la Chine en matière de puissance installée.

En France, environ 1 GW éolien est raccordé chaque année au réseau électrique (10,3 GW de puissance installée à fin 2015).



Production d'électricité éolienne des cinq pays leaders

III.8. Exploitation de l'énergie éolienne en Algérie:

La plus grande éolienne de pompage a été installée en **1953 à Adrar** (voir figure) par les **services de la colonisation** et de l'hydraulique. Montée sur un **mât de 25 mètres de hauteur**, cette machine à **trois pales de 15 mètres de diamètre** a fonctionné pendant près de **10 ans**.

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une **première ferme éolienne de 10 MW** de puissance a été implantée **à Adrar depuis 2012**.

Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, essaye **d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW** à moyen terme, pour atteindre **1700 MW à l'horizon 2030**.



Eolienne d'Adrar

Chapitre IV

Autres sources renouvelables

IV.2. Energie hydraulique:

IV.2.1. Introduction:

L'énergie hydraulique est **utilisée depuis des siècles pour produire de l'énergie mécanique**. L'hydroélectricité commence à se développer dans les années 1880 (invention en France de la turbine en 1827), et les turbines électriques ont quasi complètement remplacé les usages mécaniques à la fin du XIXe siècle en Europe.

IV.2.2. Principe de production et exploitation:

Depuis des siècles, l'Humanité utilise la force de l'eau qui coule pour remplacer celle des bras. Le principe du moulin à eau consiste à poser une roue sur une rivière. En tournant, elle actionne un mécanisme qui produit un mouvement régulier. Ceci pour moudre des céréales, pomper de l'eau, scier du bois et bien d'autres usages encore.

L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité, appelée **hydroélectricité**, dans les centrales hydraulique, **grâce à la force des chutes d'eau d'origine naturelle ou créées artificiellement** à partir des retenues de barrage. Cette énergie se transforme en énergie mécanique à l'aide d'une turbine. Cette dernière est accouplée mécaniquement à un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

L'énergie produite dépend de deux facteurs: la **hauteur de la chute d'eau** et le **débit de l'eau**.

La construction de chaque centrale hydraulique dépend des caractéristiques de l'endroit où elle va être construite: conditions géographiques, géologiques, climatiques, caractéristique du cours d'eau,...

La puissance, fournie à l'alternateur sur son arbre est donnée par cette expression:

$$P = \rho Q g h$$

où:

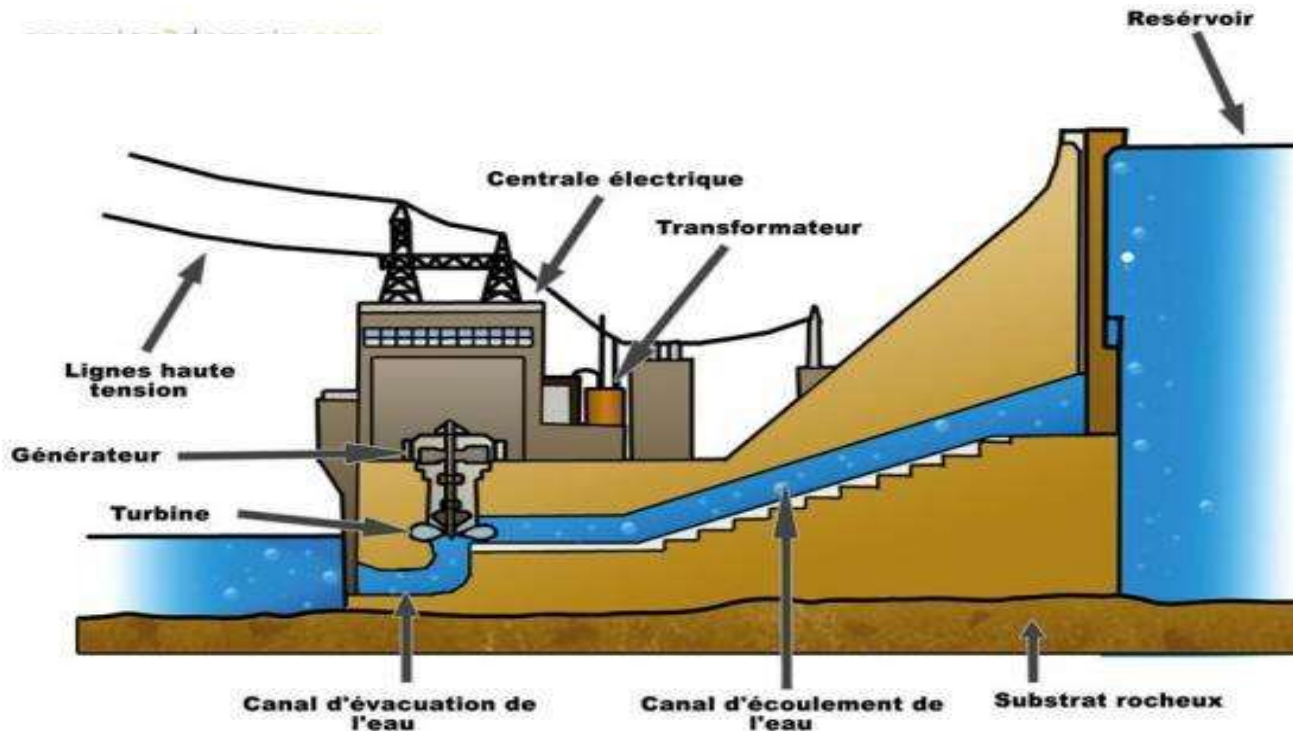
Q: Débit de l'eau (en m³/s)

g = 10 m/s²,

ρ= masse volumique de l'eau (soit 1000 kg/m³),

h = $Z_A - Z_B$ (en mètres).

Z_A , **Z_B**: Altitudes supérieure et inférieure de l'eau respectivement.



Centrale hydraulique

IV.2.3. Types des centrales hydrauliques:

Il y a trois types de centrales hydrauliques:

1-Les centrales au fil de l'eau:

elle ne comporte pas de barrage et donc pas de retenue d'eau. La puissance fournie par la centrale, proportionnelle au débit instantané du fleuve, fluctue donc au cours de l'année en fonction du climat. Cette technologie est utilisée sur les grands fleuves.

2-Les centrales à accumulation:

la présence d'une retenue d'eau permet de moduler la production en fonction de la demande. Cette technologie est la plus utilisée aujourd'hui

3-Les centrales de pompage-turbinage:

ces centrales pompent l'eau depuis un bassin inférieur, vers des lacs de retenue situés plus en altitude et la réutilisent afin de produire de l'électricité. Elles ne produisent ainsi pas d'énergie supplémentaire mais permettent d'augmenter la puissance disponible.

On peut également classer les centrales hydrauliques en fonction de leur hauteur de chute. On distingue ainsi:

1- Les centrales de haute chute:

Les **hauteurs de chute** sont de **500 à 2000 mètres**, mais les débits moyens ne sont que de quelques dizaines de m^3/s . A l'arrivée, la vitesse de l'eau est très élevée. Les turbines adoptées sont de type **PELTON**.

2- Les centrales de moyenne chute:

Les **hauteurs de chute** sont de l'ordre de **100 mètres** et les débits moyens au moins de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Les turbines utilisées sont de type **FRANCIS** à axe vertical.

3- Les centrales de basse chute:

Les **hauteurs de chute** sont de l'ordre de la **dizaine de mètres** et les débits moyens de plusieurs centaines de m^3/s . Les turbines utilisées sont de type **KAPLAN**, à axe vertical.



Turbine de type **PELTON**



Turbine de type **FRANCIS**



Turbine de type **KAPLAN**

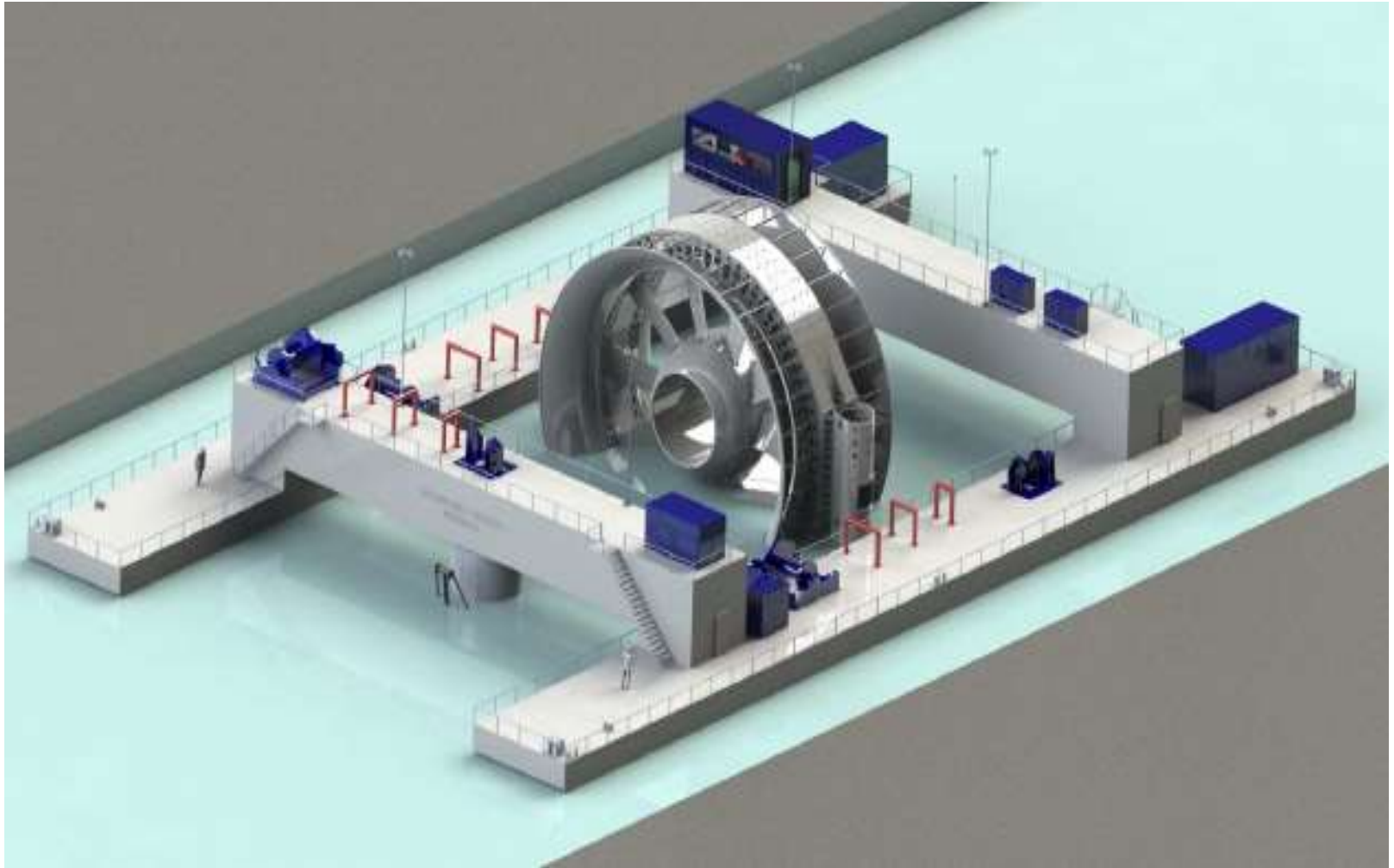


**Vue aérienne du barrage de
Ste Croix du Verdon en
France**

**L'hydrolienne de Paimpol-
Bréhat: Projet qui a été lancé
par EDF en France**



**Pour mieux comprendre la structure de cette
hydrolienne voici une infographie**





Barrage des trois-Gorges en Chine:
barrage hydroélectrique
le plus puissant du
monde qui est couplé à
une centrale
hydroélectrique de 22500
(MW)

**Une des turbines Francis du barrage
des Trois-Gorges**



IV.2.4. Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique:

IV.2.4.1. Avantages:

- ✓ Energie naturelle non polluante (elle ne rejette pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère),
- ✓ Les sources de cette énergie sont disponibles,
- ✓ Plus de régularité pour produire de l'énergie (par rapport au vent par exemple),
- ✓ Flexible. Il est en effet facile d'ajuster le débit d'eau à la production de l'électricité voulue,
- ✓ Installation résistante (durée de vie élevée).

IV.2.4.2. Inconvénients:

- ✓ Bouversements dans certains écosystèmes, notamment pour les poissons,
- ✓ L'installation de centrales hydroélectriques peut obliger certaines populations à migrer vers un autre lieu. Elle peut aussi réquisitionner des surfaces agricoles,
- ✓ Dépend des conditions météo.

En théorie, la capacité de production hydroélectrique techniquement envisageable pourrait assurer les **trois quarts de la consommation d'électricité mondiale actuelle**. Mais dans la pratique, l'énergie hydraulique progresse bien plus lentement que les autres énergies renouvelables. Sur la longue durée (**1990-2014**), le solaire photovoltaïque et l'éolien ont augmenté respectivement à un rythme annuel moyen de **46,2 %** et **24,3 %**, alors que l'hydraulique a cru en moyenne de **2,5 %** chaque année.

En Algérie, la production hydroélectrique a fortement diminué en 2010, après avoir atteint un pic de production en 2009.

Actuellement, seuls deux barrages produisent de l'électricité en Algérie. Il s'agit du **Barrage d'Ighil Emda à Kherrata (Bejaia)** et du **Barrage Erraguen à Jijel**.

D'après les informations publiées le 10 Juillet 2014, le gouvernement a décidé de fermer à terme les centrales hydroélectriques du pays et de consacrer les deux barrages produisant de l'électricité à l'irrigation et à l'alimentation de la population en eau potable.

Cette décision a été motivée par le fait que le niveau de production des centrales hydroélectriques reste «insignifiant», en contribuant très peu au bilan énergétique de l'Algérie.

IV.2. Energie biomasse:

IV.2.1.Introduction:

On appelle les énergies biomasses tous les matériaux d'origine biologique employés comme combustible pour la production de chaleur, d'électricité, de gaz et de carburant.

Le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

IV.2.2.Types de la biomasse:

➤ Il existe trois familles pour la biomasse :

La biomasse lignocellulosique, (ou lignine) comprenant principalement le bois, les résidus verts, ainsi que la paille. Leur utilisation est faite à partir d'une combustion, ou conversions thermochimiques.

La biomasse à glucide, utilisant la canne à sucre, les céréales et les betteraves sucrières. On favorise ces constituants par une méthanisation (C'est un processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène), ou encore par distillation.

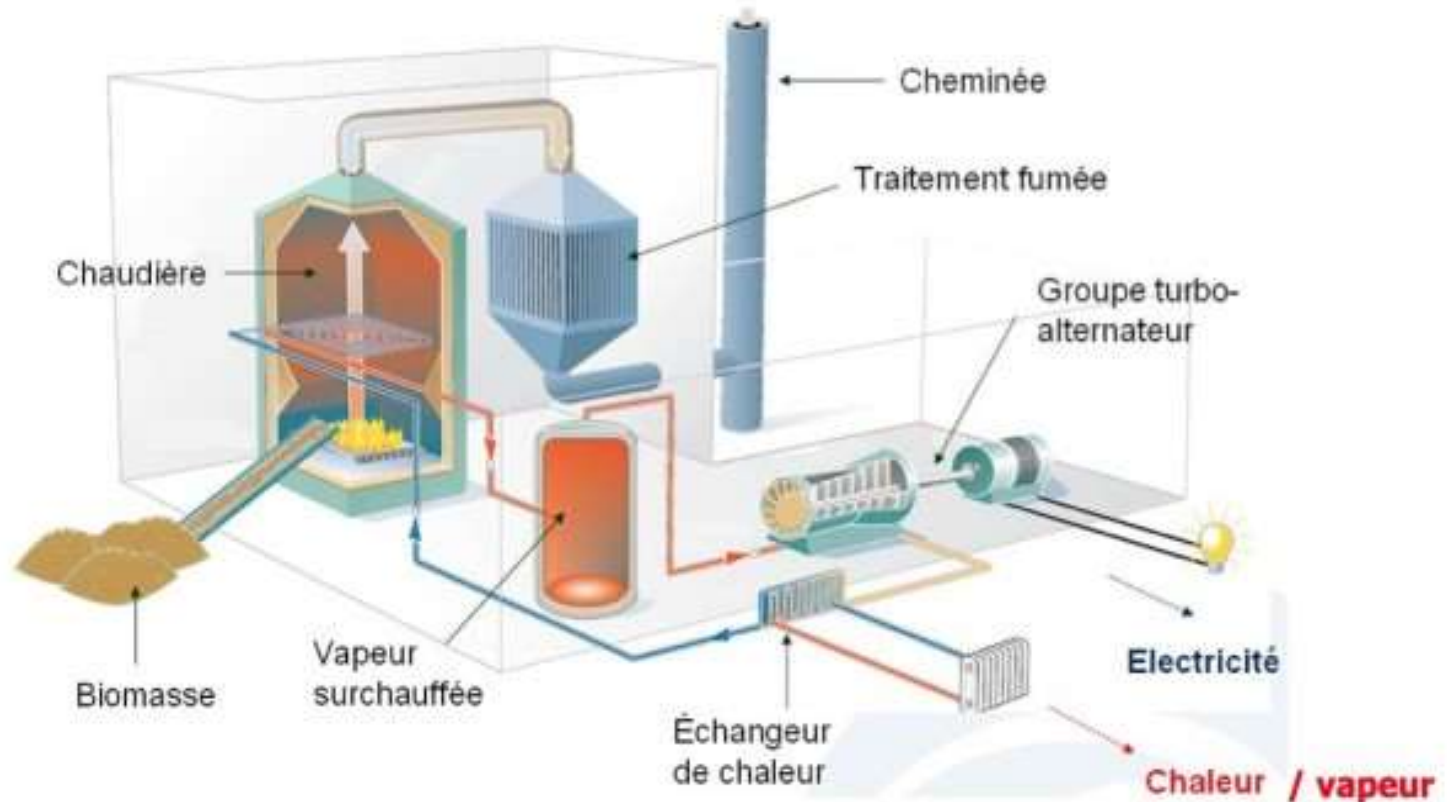
La biomasse oléagineuse, qui est riche en lipide. Ses composants sont le colza, ainsi que le palmier à huile. Cette catégorie de biomasse est appelée "Biocarburants". Ces carburants sont récoltés suite à de nouvelles transformations chimiques, et en ressort sous deux formes : Les esters d'huile végétale, et sous la forme de l'éthanol.

➤ Il existe deux façons d'utiliser la biomasse : Soit **convertir directement la biomasse en énergie** sous forme de chaleur ou d'électricité. Soit **convertir la biomasse en biocarburants liquides** ou en **biogaz combustible**.

Ceci dépend de la nature de la ressource de biomasse.

Les centrales à biomasse fonctionnent grâce aux déchets forestiers, agricole ou encore aux ordures ménagères. Dans ce cas, on peut produire de l'énergie par combustion dans une chaudière.

Structure générale d'une centrale à biomasse





Transport de la biomasse (bois dans ce cas) vers les silos de stockage



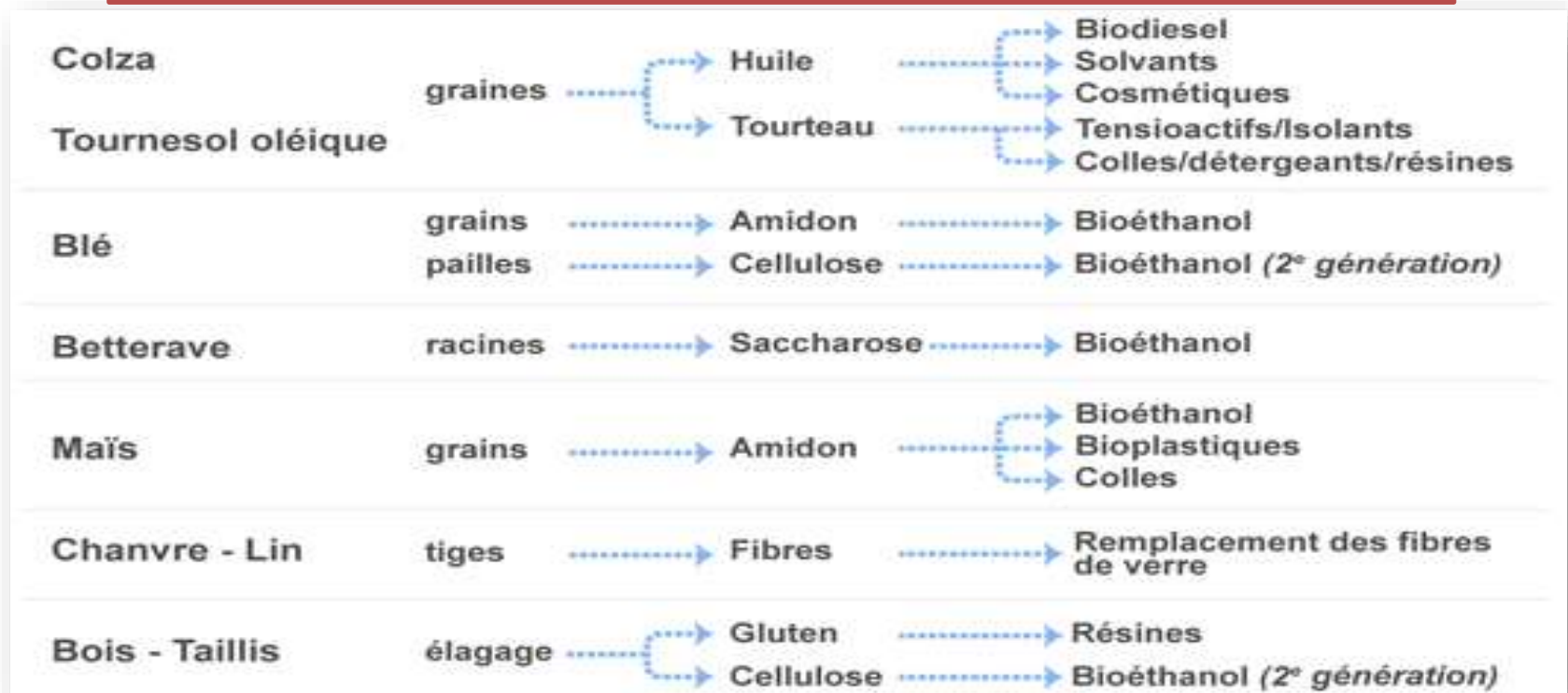
Stockage de la biomasse (déchets forestiers ou agricole)

IV.2.3. Exploitation de l'énergie à biomasse:

L'énergie à biomasse peut être exploitée de plusieurs manières:

- Pour le chauffage,
- Pour produire de l'électricité,
- Dans le transport → utilisation des biocarburants,
- Pour concevoir des produits → "bio-plastique", table, armoire...

Voies d'exploitation de la biomasse



Remarque: Ce tableau n'est pas inclut dans le contrôle



Centrale à biomasse en France

Jusqu'au 2013, la plus puissante **centrale de biogaz** est **Finlandaise**. Elle était d'une capacité de **140 MW**, cette dernière est essentiellement **alimentée à partir de résidus de la forêt**. Plusieurs camions devraient quotidiennement y amener de la biomasse provenant des sites de stockage situés aux alentours.

IV.1.4. Avantages et inconvénients de la biomasse:

IV.1.4.1. Avantages

- Biodégradable rapidement,
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques,
- La biomasse est disponible partout,
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

IV.1.4.2. Inconvénients

- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement,
- Dégage du CO₂,
- Leur rendement énergétique est assez faible,

En 2011, l'Algérie s'est dotée d'un programme ambitieux de développement d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Tandis que cette première version n'accordait que très peu de place à la bioénergie, une version actualisée de ce programme a vu le jour **en février 2015** introduisant cette filière.

IV.3. Energie géothermique:

IV.3.1. Introduction:

Le mot **Géothermie**, vient du grec « **gé** » qui signifie terre et « **thermos** » chaud.

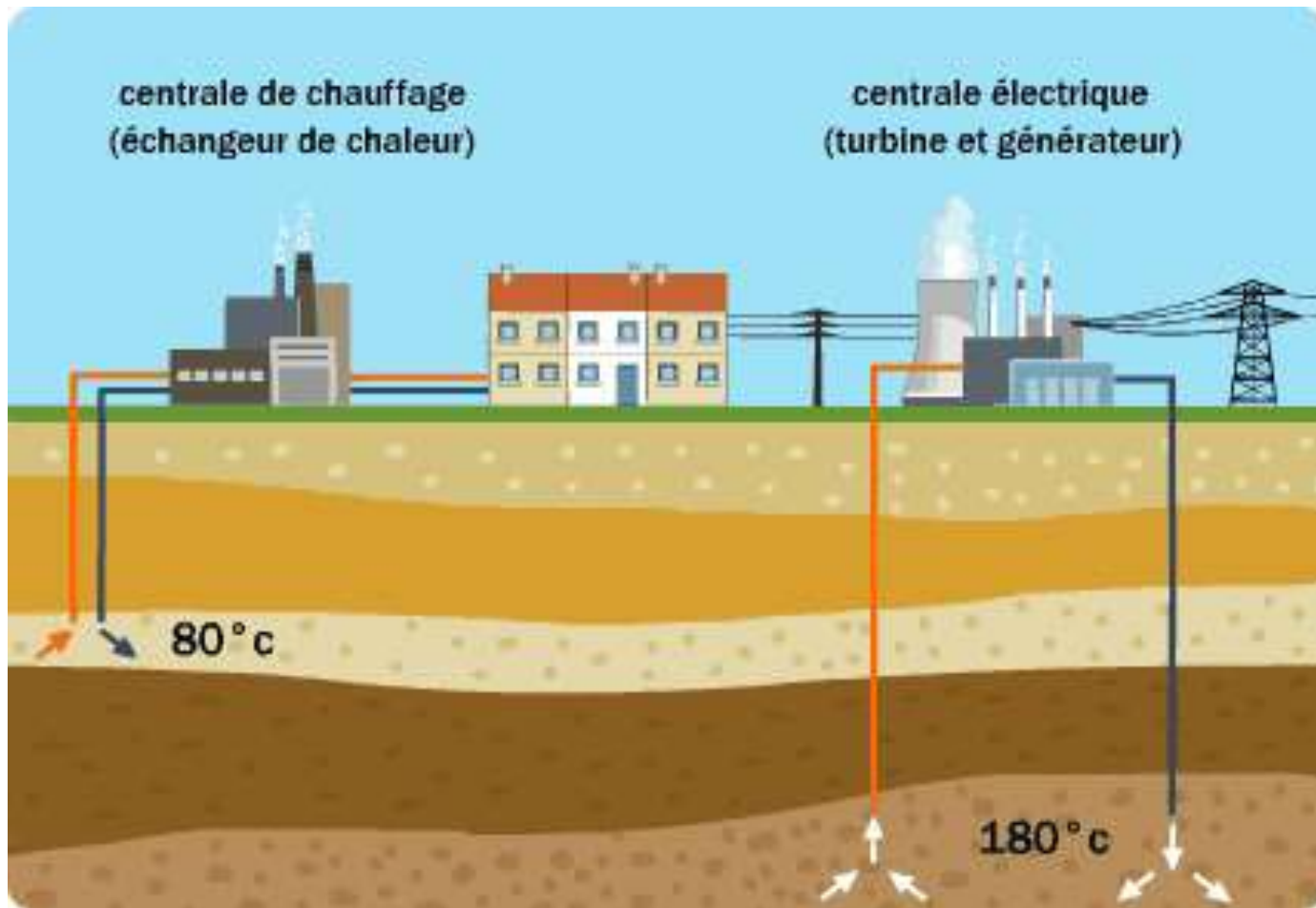
Dans les couches profondes, la chaleur de la terre est produite par la **radioactivité naturelle des roches** qui constituent la croûte terrestre. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

IV.3.2. Principe et différents modes d'exploitation :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser. Il existe **deux modes d'exploitation de la chaleur du sous-sol** : la production de chaleur et la production d'électricité.

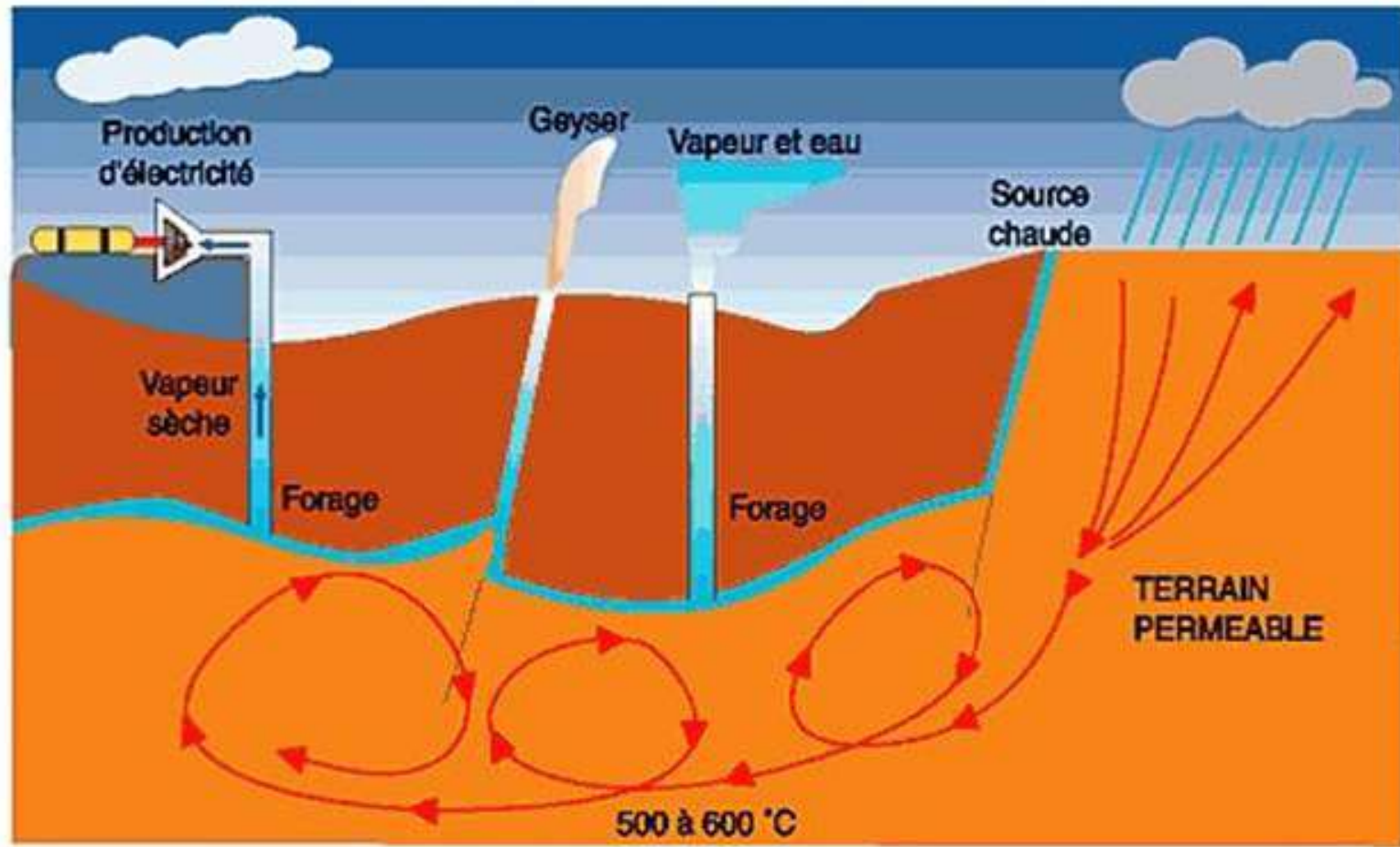
□ Avec la **géothermie à très basse** (température inférieure à 30° C) et **basse énergie** (température entre 30 et 90° C), on récupère la chaleur du sous-sol pour l'exploiter directement ou grâce à des pompes à chaleur. Elle servira à **chauffer** des maisons, des immeubles, des piscines...

□ Avec la **géothermie à haute énergie** (températures supérieures à 150° C), on exploite des zones naturellement plus chaudes où la vapeur d'eau, extraite du sous-sol, alimente des turbines pour **produire de l'électricité**.



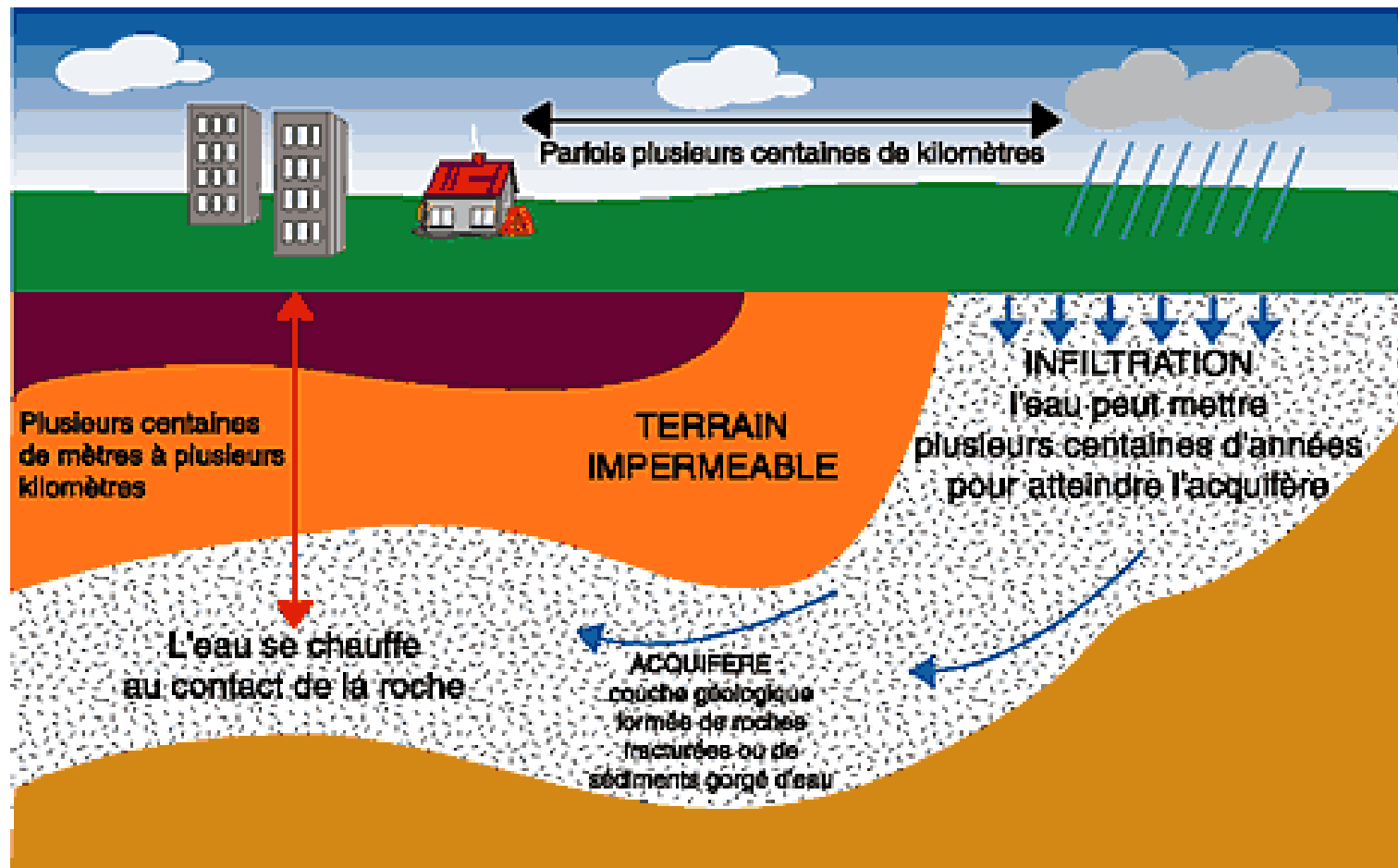
Exploitation de l'énergie géothermique

GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE



Géothermie à haute énergie

GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE



Géothermie à basse énergie

La géothermie très basse énergie exploite des réservoirs situés à moins de 100 mètres et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C

IV.3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique:

IV.3.3. 1. Avantages

- ✓ Après son utilisation elle ne laisse aucun déchets,
- ✓ Elle n'a pas besoins d'un espace de stockage ni de conduit d'évacuation
- ✓ Beaucoup d'énergie pour peu de place,
- ✓ Disponible à domicile pour les particuliers,

IV.3.3.2. Inconvénients

- ✓ Il faut accorder le type de géothermie avec le terrain. En effet si l'on dispose d'un captage horizontal sur un terrain non approprié cela peut provoquer des abaissements de terrain,
- ✓ Si la terre est trop faible en calories, l'installation géothermique pourra empêcher les plantations de pousser

Chapitre V

Stockage, pile à combustibles à hydrogène

V.1. Introduction

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès.

Bien que toutes les énergies renouvelables aient leurs avantages et leurs inconvénients, leur stockage a été le principal défi pour tirer le meilleur parti de ces sources d'énergie alternatives. **La technologie de stockage des énergies renouvelables sera reconnue à sa juste valeur dès lors qu'elle sera capable d'offrir un moyen rentable de collecter les énergies renouvelables** et de les utiliser lorsque cela s'avère nécessaire.

V.2. Stockage de l'énergie

V.2.1. Définition

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie produite pour une utilisation ultérieure. L'idée est d'assurer l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie, de réduire les pertes et ainsi d'optimiser les coûts.

V.2.2. Les énergies renouvelables peuvent-elles être stockées?

Les énergies fossiles (charbon, gaz et pétrole) sont stockées naturellement dans des réservoirs, une fois extraites, elles peuvent facilement être transformées ou transportées d'un point de vue technique. Le stockage pour les énergies intermittentes concerne principalement le stockage de l'électricité et celui de la chaleur. Il s'avère plus complexe (nécessite des systèmes spécifiques), à cause de la dépendance de leur production à des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène. Cependant, l'électricité est généralement transformée en énergie mécanique, thermique ou chimique pour être stocké. Contrairement, le stockage de la chaleur est généralement effectué sous sa forme originale.

V.2.3. Pourquoi le stockage des énergies renouvelables?

L'un des inconvénients majeurs des énergies renouvelables en général est son intermittence due au caractère intermittent (vent, soleil). C'est pourquoi les systèmes de stockage auront un rôle important dans le développement de ces énergies dans la venir.

L'électricité produite, par les panneaux solaires ou les éoliennes, dans les périodes de faible consommation ou de surproduction peut être stockée pour être restituée ensuite pendant les périodes où la production ne couvre pas la demande « production faible ou demande forte »

V.2.4. Natures de stockage des énergies renouvelables

Il faut distinguer deux systèmes de stockage:

- ❑ **le stockage stationnaire de l'électricité:** le stockage de l'électricité permet d'assurer l'équilibre entre production et consommation d'électricité sur les réseaux, et en particulier de **pallier la variabilité de la production des énergies renouvelables**. Le stockage permet, par exemple, de garder l'énergie produite en excédent à certaines périodes, pendant une journée très ensoleillée, pour la restituer en soirée. Le stockage permet aussi d'apporter l'énergie nécessaire lors de pics de consommation ou encore lors de défaillances du système d'approvisionnement. Ces systèmes de stockage sont de capacités variables (de quelques kW à plusieurs GW).
- ❑ **le stockage embarqué pour les applications mobiles** (batteries pour les véhicules, batteries de téléphone, etc.) : ces systèmes sont de plus petite capacité, de l'ordre du kWh.

On différencie aussi le stockage en fonction de sa capacité. le stockage est dit:

- ✓ de faible capacité lorsque celle-ci est de l'ordre du kWh,
- ✓ de forte capacité si elle est supérieure à 10 MWh.

V.3. Techniques du stockage de l'électricité

V.3.1. Stockage direct

Le stockage direct de l'électricité est réussi par l'utilisation de grands condensateurs, dont la capacité se mesure à l'échelle du microfarad, qui ont des capacités de stockage limitées et dont les coûts sont plus ou moins élevés.

Une autre piste du stockage direct de l'électricité est le stockage par les supercondensateurs (des condensateurs fabriqués à base des matériaux supraconducteurs). Cependant, ceux-ci requièrent des températures d'utilisation proches du zéro absolu dont le maintien est techniquement aussi difficile que coûteux. Ils peuvent donc représenter un complément intéressant des batteries. La combinaison batterie/supercondensateur peut s'avérer particulièrement efficace dans le cas des véhicules hybrides.

V.3.2. Stockage indirect

La plupart du temps, l'énergie électrique n'est pas stockable directement. Celle-ci est transformée en une autre forme d'énergie qui sera stockée, puis récupérée et retransformée en électricité lors de son utilisation.

V.3.2.1. Mode de stockage mécanique

A. Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Ce système, lié à l'énergie hydroélectrique, **fonctionne sur le principe de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes et est souvent couplé avec un barrage**. Lorsque l'électricité est produite en excès, l'eau du bassin inférieur est pompée via une conduite forcée vers le bassin supérieur, qui devient un réceptacle d'énergie potentielle. Lorsque le besoin se fait ressentir, une partie du réservoir supérieur est vidée et, par gravité, l'eau passe dans une turbine qui produit l'électricité. C'est un système réversible qui associe pompe et turbine.

La STEP nécessite néanmoins des installations conséquentes et un contexte géographique spécifique avec un dénivelé entre les deux réserves d'eau.

Les STEP peuvent être associées à de grandes installations d'énergies renouvelables; notamment pour réguler et lisser la production de grosses fermes éoliennes via le creusement de bassins artificiels.

Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, ce type de stockage représente près de 99 % des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde à fin 2011, avec une capacité totale d'environ 140 GW assurée par presque 400 STEP. Cependant, les études prospectives prévoient que la capacité mondiale des STEP devrait être de l'ordre de 400 GW à l'horizon 2050.

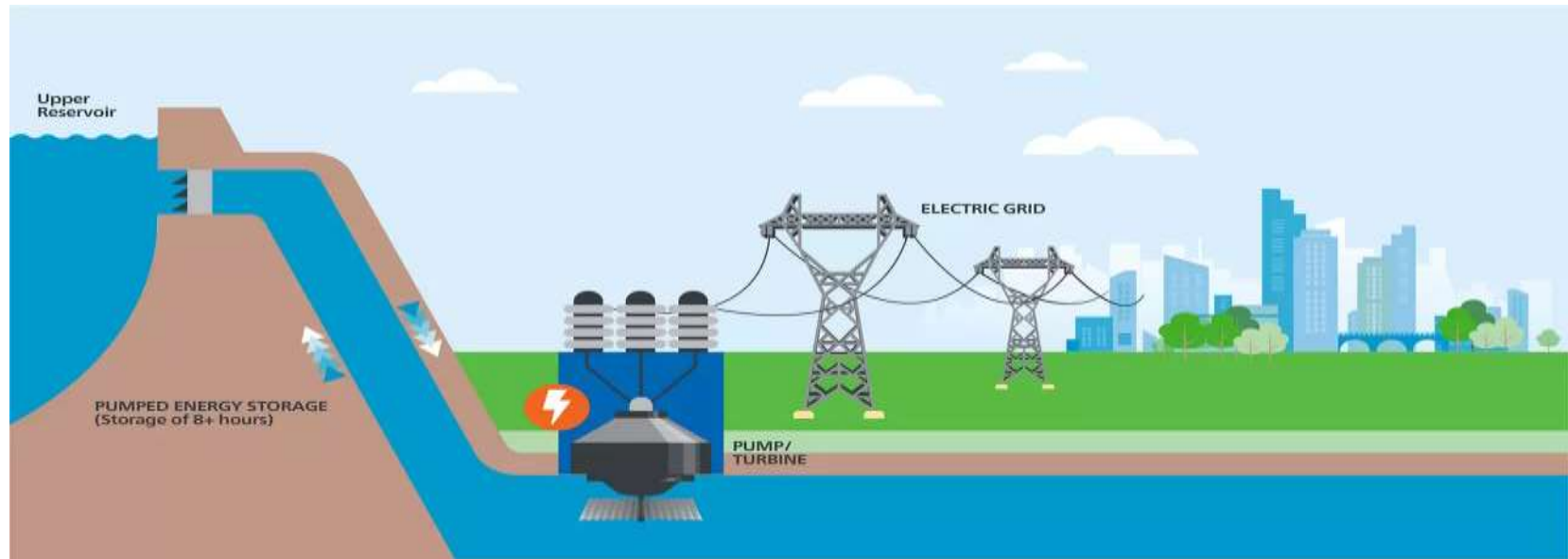


Schéma de principe du pompage et du stockage hydraulique

La centrale STEP de l'île d'El Hierro (Canaries, Espagne) représente un meilleur exemple de cette technique. Elle est constituée de 5 éoliennes (11,2 MW), de deux bassins« bassin inférieur de 50000 m³ et bassin supérieur 700 mètres plus haut de 550000 m³» de turbines hydrauliques (11,3 MW) pour le pompage et le turbinage. Les éoliennes et les turbines peuvent produire de l'électricité simultanément pour gérer les pics de consommation.

B. Stations de stockage par air comprimé (Compressed Air Energy Storage CAES)

Le stockage d'énergie par air comprimé existe industriellement depuis 1978 (centrale de Huntorf en Allemagne).

Les stations de stockage par air comprimé sont conçues, tout simplement, pour stocker de l'air comprimé « sous forme de pression dans des cavités souterraines au lieu du pompage de l'eau », grâce à un compresseur, en heure creuse. Cet air est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité, pour le délivrer en heure de pointe.

Aujourd'hui, deux installations liées à des cavités salines sont en fonctionnement, une à Huntorf (Allemagne) de 290 MW fonctionne depuis 1978 et la seconde à McIntosh en Alabama (Etats- Unis) de 110 MW fonctionne depuis 1991.

Le rendement des CAES est malheureusement réduit (inférieur à 50%) car la chaleur des gaz post- compression est perdue. Afin d'en améliorer la performance, des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur (stockage adiabatique).

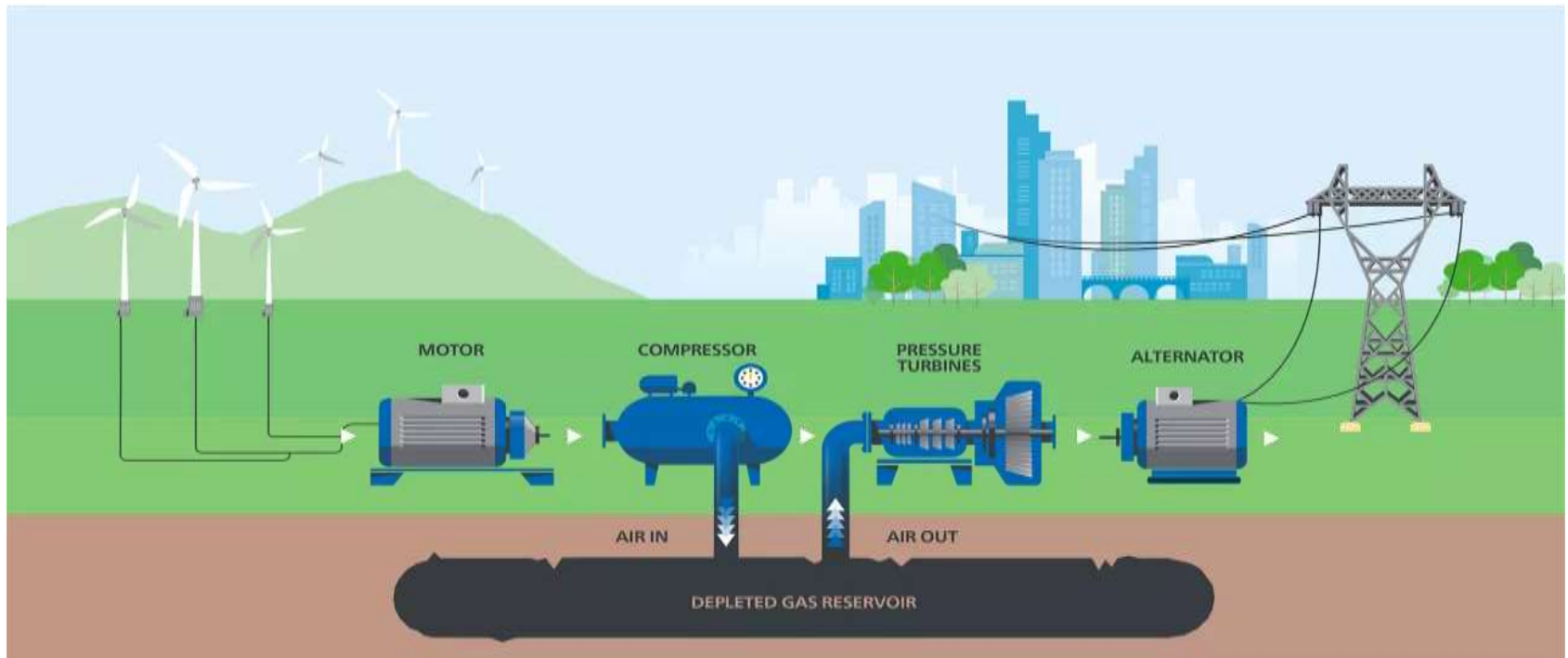


Schéma de principe du stockage d'air comprimé

Un concept plus évolué qui permet de stocker à la fois de l'air comprimé et de la chaleur est en cours de développement: l'***Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)***.

Un processus est dit adiabatique s'il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur.

C. CAES adiabatiques avancées AA-CAES « Advanced Adiabatic CAES »

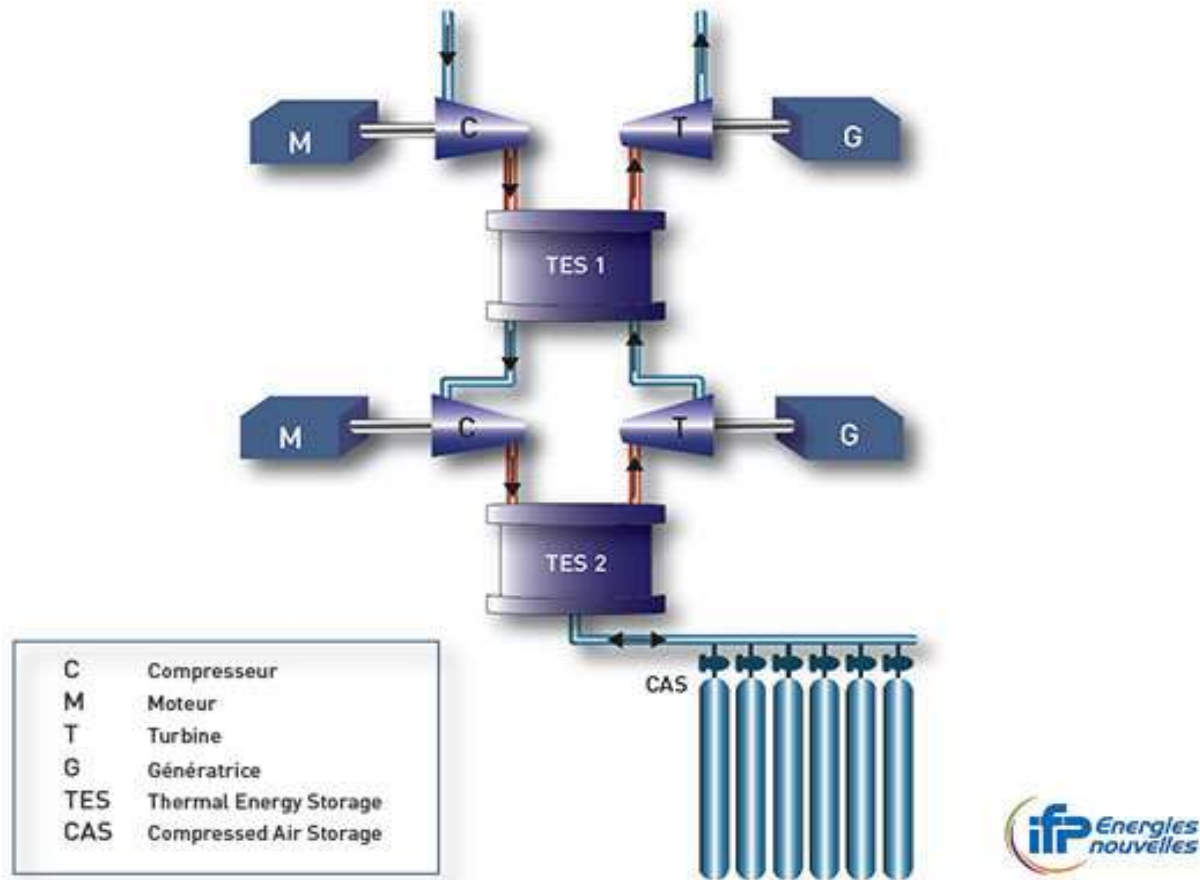
Le système CAES adiabatique a été étudié à l'université technique de Clausthal en Allemagne, dont le principe est d'éviter la perte de chaleur, mais il n'existe pas un réservoir capable de supporter à la fois une forte pression et une forte température, cependant, ce système n'est jamais expérimenté.

Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose deux réservoirs, un réservoir permettant de stocker l'air comprimé (semblable aux réservoirs des CAES conventionnels) et d'un système de stockage thermique récupérant la chaleur de l'air comprimé. En phase de déstockage, cette chaleur est restituée à l'air comprimé avant le passage dans la turbine. Les CAES adiabatiques avancées atteignent grâce à ce système une efficacité de l'ordre de 70%.

Les stations AA-CAES nécessitent encore un effort de recherche pour diminuer les coûts du stockage thermique.

La plus grande station CAES dans le monde est en construction à Ohio « Etats-Unis », de puissance 0.8 à 2,7 GW avec 16h de stockage et une pression de l'ordre de 55 à 110 bars et un réservoir de profondeur de 670 m.

Stockage d'Énergie par Air Comprimé - Adiabatique Avancé



D. Volants d'inertie

Leur principe permet de stocker l'énergie sous forme de rotation mécanique. L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson isolé, qui permet de convertir l'énergie électrique (dans le cas de surplus de production) en une énergie cinétique. Cette énergie cinétique conservée peut être ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur (principe de la dynamo).

Inconvénient: Temps de stockage limité « environ 15 minutes ».

Les deux plus grandes installations de volants inerties sont aux États-Unis, d'une puissance de 20 MW chacune.

Note: le stockage d'énergie par volant d'inertie ne permet pas d'obtenir une durée importante de stockage comme les STEP ou les CAES. Néanmoins, il est utile pour la régulation et l'optimisation énergétique d'un système.

V.3.2.2. Mode de stockage thermique

Le stockage thermique concerne principalement le chauffage et la climatisation des bâtiments, qui représentent près de 50 % de la consommation énergétique en Europe.

Le développement du stockage thermique est lié directement au développement des fermes solaires thermodynamiques. Le stockage de cette chaleur solaire thermodynamique permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives « le jour/l'été » par rapport aux périodes de plus grandes demandes « le soir/l'hiver ».

L'agence internationale des énergies renouvelables estime que le stockage thermique d'énergie pourrait atteindre 800 GWh de capacité installée d'ici 2030.

Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être par chaleur sensible ou par chaleur latente.

A. Stockage par chaleur sensible

L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie sous forme de chaleur. C'est le cas, par exemple, d'une pierre posée près d'une cheminée, une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut être déplacée et céder sa chaleur. Ce principe est le même, pour les chauffe-eau solaires: ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite. Les matériaux privilégiés sont l'eau, l'huile, la roche ou encore le béton.

B. Stockage par chaleur latente

Ce mode de stockage est basé sur les matériaux à changement de phase « MCP », ces matériaux stockent de l'énergie lorsqu'ils changent leur état (par exemple solide-liquide). La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Plusieurs types de ces matériaux (organiques 'acides gras et paraffines (graisse)' ou inorganiques 'sels hydratés' » servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil, pour tempérer les bâtiments.

Il n'existe pas à ce jour d'installations de stockage de grandes capacités basées sur ce principe mais de nombreux projets sont en cours.

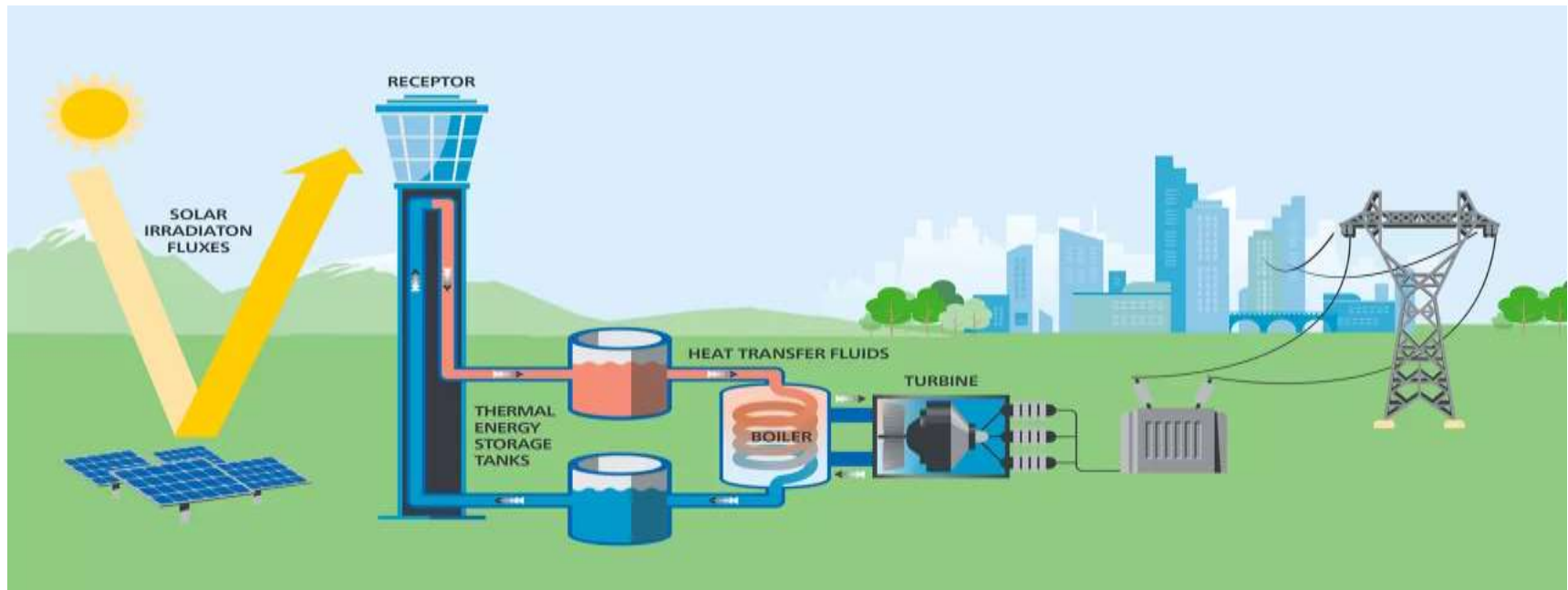


Schéma de principe du stockage par chaleur latente

V.3.2.3. Mode de stockage chimique

Ce mode de stockage d'électricité repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Il concerne principalement les batteries et le vecteur hydrogène.

A. Batteries: stockage électrochimique

Dans ce cas, le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes. Les composants chimiques peuvent être différents d'une technologie à une autre, créant ainsi une grande variété de batteries.

Les batteries utilisées pour le stockage massif à ce jour, ce sont surtout les batteries à flux, qui font l'objet de la majorité des études. L'utilisation des batteries au plomb, au sodium ou au lithium-ion se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Elles peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge.

La mise en parallèle de plusieurs batteries peut permettre d'accéder à de grandes puissances et capacités de stockage.

Batteries à flux

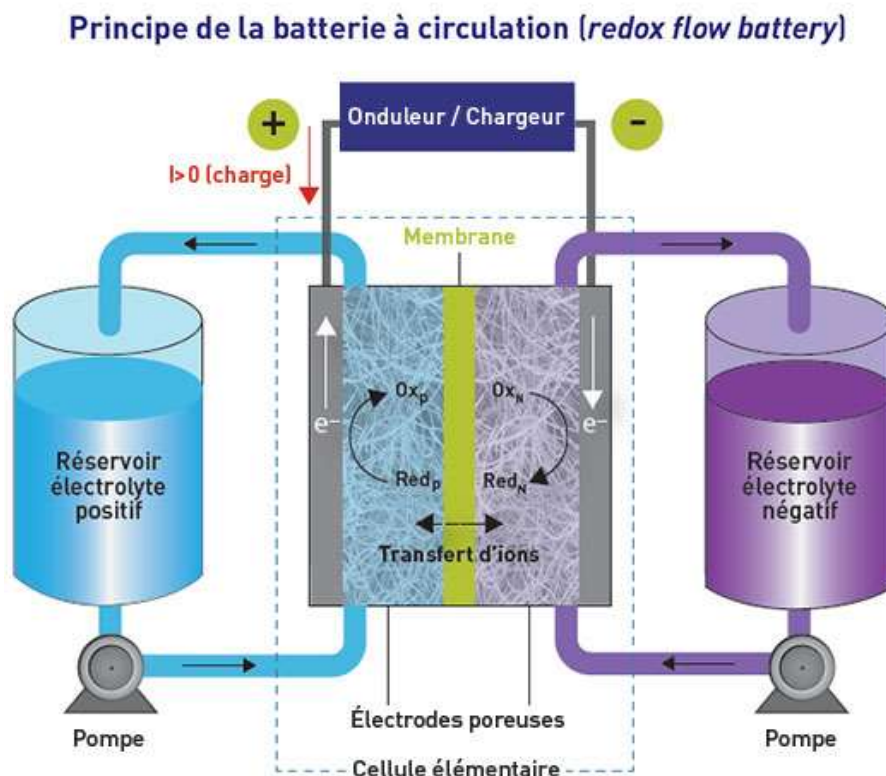
Ces batteries permettent le stockage de l'énergie dans des liquides. Elles sont rechargeables, permettent le stockage des couples électrochimiques (électrolytes) à l'extérieur de la cellule de réaction, dans des réservoirs séparés par une membrane, à l'état liquide. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions.

❑ Avantages principaux

- Longue durée de vie (plus de 10 000 cycles)
- Pas de risque d'explosion
- Idéale pour le **stockage stationnaire** des énergies renouvelables

❑ Inconvénients

- Plus volumineuse que les batteries lithium
- Coût initial encore élevé



Batteries Zn-Br

Ces batteries sont fondées sur le couple zinc/brome « $\text{Zn}^{+}/\text{Br}^{-}$ ». Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés, on peut citer à titre d'exemple un système de 400 kWh réalisé à Akron « Michigan » USA, quelques installations commerciales sont aujourd'hui opérationnelles.

Batteries lithium-ion "avancées"

Le fonctionnement de la batterie lithium-ion repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple, le système le plus important, à ce jour, qui se trouve à Zhangbei « Chine » en 2011, de capacité de 20 à 36 MW sur 4 à 6 h avec une production éolienne de 100 MW et une production solaire de 40 MW.

B. Vecteur hydrogène

L'hydrogène ne représente pas une source d'énergie directe comme l'énergie éolienne à titre d'exemple, mais un vecteur énergétique. Il ne se trouve pas sous forme pure dans la nature, mais doit être extrait de l'eau « H_2O » par électrolyse. Le gaz d'hydrogène peut être directement utilisé « comme combustible » ou bien stocké et converti de nouveau en électricité « par une pile à combustible ».

Le principe de la pile à combustible, est de convertir l'énergie chimique en énergie électrique à partir de l'hydrogène qui sera utilisé comme carburant. Cette pile ne rejette que de l'eau, donc ne pollue pas.

L'électrolyse de la pile exige des métaux rares et précieux en plus les difficultés d'industrialisation augmentent le prix du dispositif, qui reste trop élevé et entraîne des problèmes de stockage. Le rendement global est moins de 50% et leur durée de vie s'avère insuffisante dans le cadre d'applications couplées au réseau électrique.

L'électrolyse, qui consiste à décomposer la molécule d'eau en hydrogène et en dioxygène, nécessite de l'électricité (rentable si la production d'électricité présente elle-même un coût peu élevé). L'hydrogène a la faculté de **restituer de l'énergie**, ce qui en fait une forme particulièrement intéressante de stockage.

La **plateforme expérimentale Myrte** installée en Corse (Ile en France) illustre ce principe : elle est constituée d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560 kW reliée à un électrolyseur qui convertit l'électricité en hydrogène pendant les heures creuses; cette énergie est ensuite restituée via une pile à combustible qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité pendant les heures de forte consommation.