

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued*  
*Faculté de Technologie*



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي  
كلية التكنولوجيا

**Département : de génie des procédés et pétrochimie**

**قسم: هندسة الطرائق والبتروكيمياء**

# Cours énergies renouvelables

présenté par: Dr. M.T. OUCIF KHALED

Niveau: 1<sup>er</sup> Année master génie chimique

1. Introduction
2. L'énergie éolienne
3. L'énergie solaire thermique
4. L'énergie solaire photovoltaïque
5. L'énergie hydraulique
6. L'énergie géothermique

# Introduction

## 1 Les énergies non renouvelables

---

Les énergies fossiles sont issues de la matière vivante, végétale ou animale. Elles comprennent le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Leur utilisation, en tant que combustible, s'est véritablement développée au cours du 19ème siècle à une époque où les besoins en énergie ont fortement augmenté avec les débuts de la «Révolution industrielle».

Faciles à transporter et à stocker, les énergies fossiles présentent néanmoins quelques inconvénients:

- **coût très fluctuant** (soumis aux aléas du marché et au contexte géopolitique).
- émission de **gaz à effet de serre** : ce sont des gaz présents dans l'atmosphère, empêchant une partie de l'énergie solaire reçue par la Terre de repartir dans l'espace, ce qui permet de maintenir

une température moyenne de 15°C autour de la planète. Depuis le début de l'ère industrielle, l'émission de ces gaz a augmenté dans l'atmosphère et pourrait, selon les experts internationaux, conduire à un réchauffement planétaire de 1,4°C à 5,8°C d'ici 2100 (*responsables du réchauffement climatique*) ;

- **diminution des réserves** mondiales et concentration de celles-ci dans des zones géopolitiques perturbées.

L'Uranium 235 utilisé pour la production d'énergie nucléaire est également une ressource non-renouvelable.

Actuellement, notre société exploite comme source d'énergie :

→ **Le charbon** qui est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants.

Le charbon représente encore à ce jour le quart de l'énergie primaire mondiale. Il est surtout utilisé dans les centrales thermiques de production d'électricité et pour le chauffage. La croissance de sa production est plus lente que celle du pétrole ou du gaz naturel (+1,6%/an).

C'est aujourd'hui la principale réserve d'énergie fossile.

Malheureusement, l'**émission de gaz à effet de serre** due au charbon est le **double en volume de celle liée au gaz naturel**, à production d'énergie égale. Basculer du gaz et du pétrole vers le charbon n'est pas une solution vis-à-vis de l'effet de serre.

→ **Le pétrole** qui est la première source d'énergie mondiale. Formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers, le pétrole fournit près de la moitié de la demande totale en énergie primaire. Il est maintenant admis qu'aujourd'hui, l'homme a consommé plus de pétrole qu'il ne pourra en extraire dans l'avenir. Pour l'avenir et malgré la crise actuelle, le coût va inexorablement monter et ceci pour trois raisons principales :

- L'économie mondiale progresse sous l'action des pays émergents tels que la Chine et l'Inde. Les **consommations d'énergie progressent** au moins au même rythme. L'offre stagnante et l'augmentation de la demande du pétrole vont aboutir à une augmentation du prix.
- Les **réserves pétrolières annoncées** par certains pays sont **douteuses**.

→ **Le gaz** qui s'est formé en même temps que le pétrole. Issu de la transformation naturelle durant des millions d'années de matières organiques, le gaz provient de couches géologiques du sous-sol où il se trouve soit seul, soit en association avec du pétrole.

Aujourd'hui, le gaz représente près de 23% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

→ **L'uranium 235** est utilisé dans les centrales nucléaires où il dégage de l'énergie par « fission ». Les centrales nucléaires belges fournissent environ 55 % de la consommation d'électricité du pays.

Son utilisation reste un choix de société, un choix politique au sens réel du terme et peut présenter des inconvénients notamment :

- Production de déchets radioactifs (pour l'énergie nucléaire) dont les solutions de traitement ne sont pas aujourd'hui prouvées et acceptées (note : l'énergie nucléaire produit peu de gaz à effet de serre).

Au rythme actuel de notre consommation, les réserves d'énergie d'origine fossile vont fondre comme neige au soleil et les prévisionnistes estiment les durées de vie des réserves mondiales à :

<b>Durées de vie des réserves mondiales d'énergie</b>			
Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Uranium 235
130 ans	40 ans	70 ans	70 ans

## 2 Les énergies renouvelables

---

Les énergies renouvelables constituent historiquement les premières sources d'énergies utilisées par les hommes.

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau; ces énergies, par définition, se renouvellent naturellement après avoir été consommées et sont donc inépuisables (au moins sur des très grandes échelles de temps).

Aujourd'hui, elles servent surtout à la production d'électricité mais participent également à la production de chaleur.

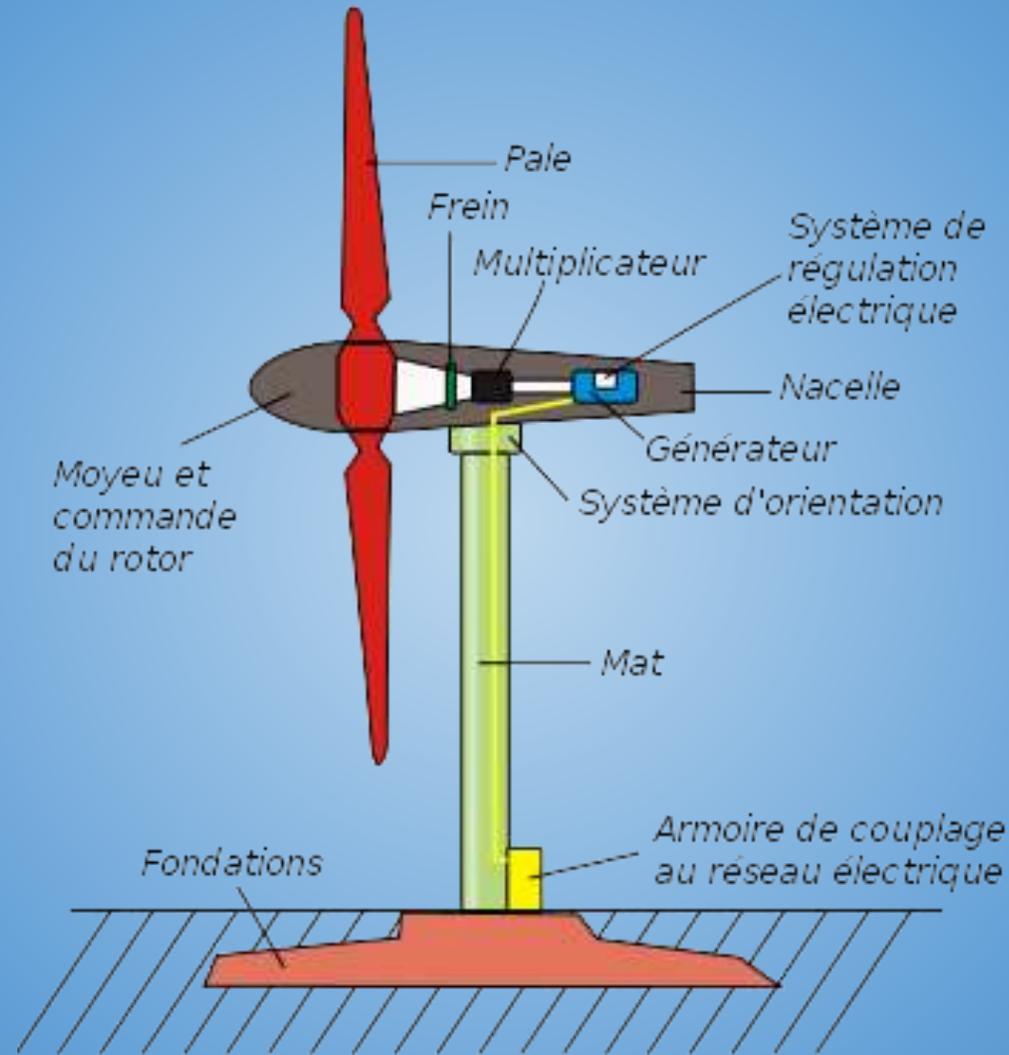
## L'énergie éolienne

Les éoliennes produisent de l'électricité grâce au vent, avec leurs pales et grâce à cela on peut éclairer.



Energie	Avantages	Inconvénients
Eolienne	<ul style="list-style-type: none"><li>-Pas de pollution ni de rejet de gaz à effet de serre.</li><li>-Technologie maîtrisée.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- occupe une surface importante.</li><li>- ne peut être installée que sur des sites limités.</li><li>- coûte cher à installer.</li></ul>

# Composants d'une éolienne



- **Le mât :**

Permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour l'exposition au vent souhaitée.

Abrite une partie des composants électriques

Peut être en acier ou en béton

Le coût augmente avec la hauteur : en général, h légèrement supérieur au rayon des pales.



- **Le rotor :**

Composé de plusieurs pales et du nez de l'éolienne.  
Relié à la nacelle par le moyeu.

**Les pales** = élément très important  
Durée de vie et rendement de  
la machine en dépendent.

*Moyeu lors de son assemblage avec  
l'arbre*



- **Longueur de pale** : en fonction de la puissance désirée. Fixe également la fréquence de rotation maximale, prend en compte le travail en fatigue et les risques de vibrations.

Pour  $\lambda < 3$ , diamètre  $< 8\text{m}$

Pour  $\lambda > 3$ , le diamètre peut être supérieur à 30 m.



- **Largeur** : Pale large  $\rightarrow$  meilleur couple de démarrage  
Pale fine  $\rightarrow$  vitesse de rotation plus élevée  
 $\rightarrow$  Compromis entre les 2.

- **Les matériaux :**

Doivent être légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et d'usinage simple.

### Divers matériaux utilisés

- **Bois** : sensible à l'érosion et déformable. Petites pales
- **Lamellé-collé** : empilement de lamelles de bois. Pales < 5 m de longueur
- **Alliages d'aluminium**. Pales < 20 m
- **Matériaux composites** : adaptable à toutes les formes et permet la recherche des caractéristiques mécaniques souhaitées.



- **Le profil des pales :**

Choisi en fonction du couple désiré.

Pour les machines à grande puissance ( $>100$  kW), elles sont vrillées et prennent la forme d'un hélice.

Les différents profils ont en général été étudiés pour l'aviation.

- **Le nombre de pales :**

- **Marche lente** : 20 à 40 ailettes.

Couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre.

Rendement faible

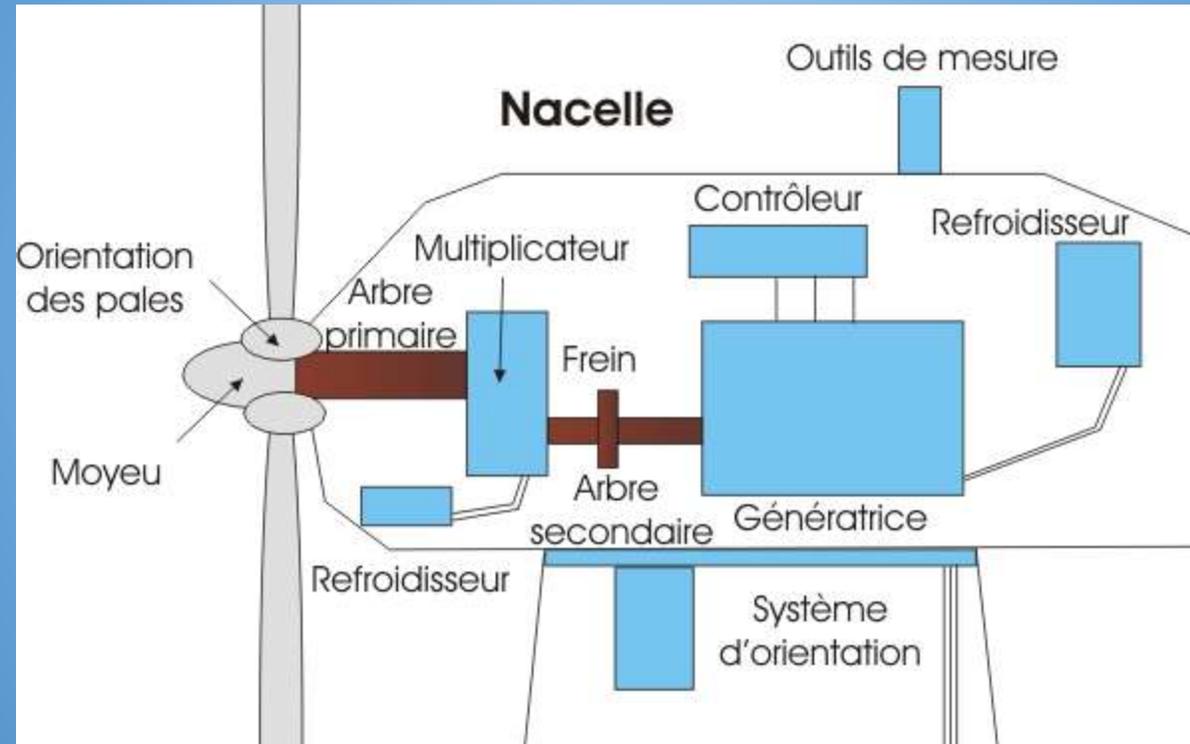
- **Marche rapide** : 2 ou 3 pales

3 pales : moins de risque de vibration, bruit et fatigue plus faibles

2 pales : plus économique et plus simple.



- La nacelle :



- **Choix des sites d'implantation**

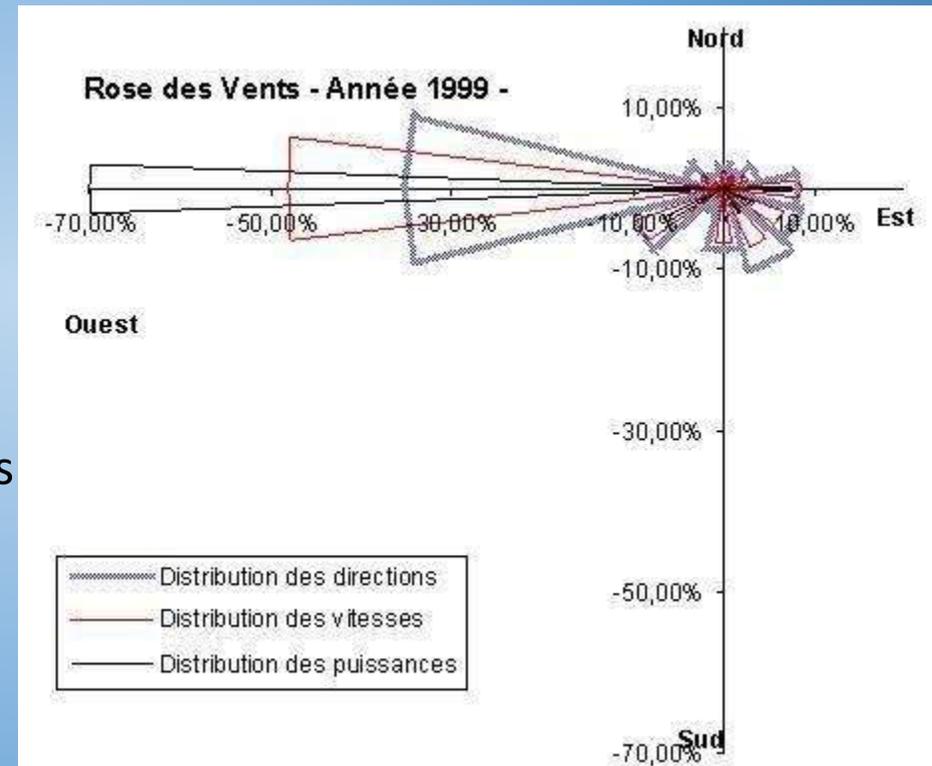
- Vents

Nécessite au moins 1 année de relevés météorologiques complets

→ on en déduit l'énergie totale par m<sup>2</sup> grâce à des anémomètres.

Vents réguliers sans variations brutales (pas comme le mistral)

Idéal : vents réguliers de 6 à 10 m/s (type alizés)

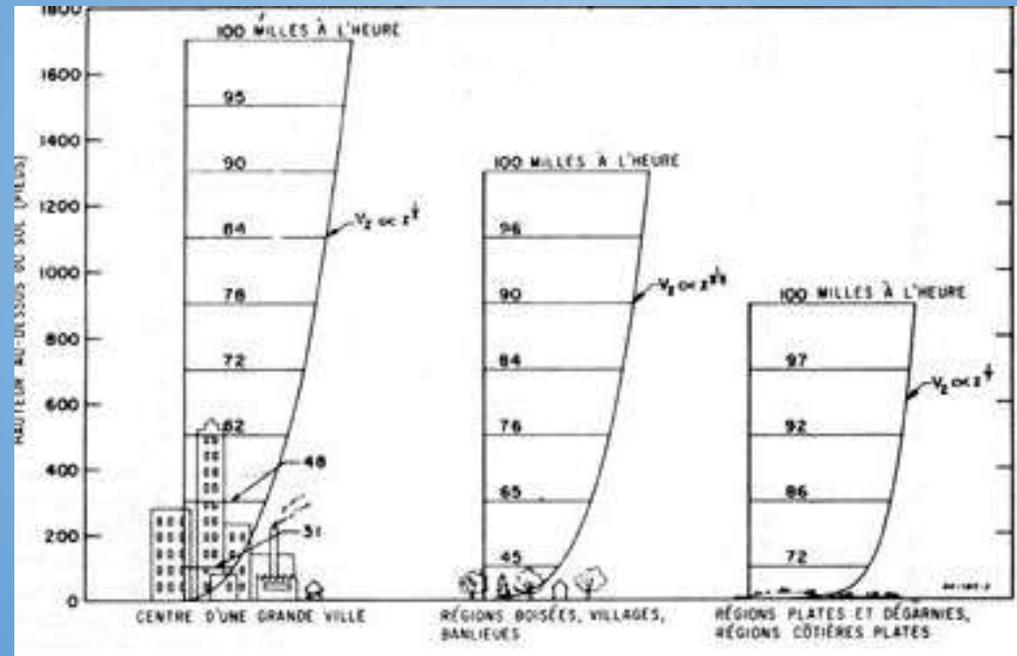


*Rose des vents sur la Corse*

# Application et développement

- Reliefs

Relief local : à prendre en compte dans l'interprétation des relevés pris à 10 m du sol.



*Profils de vitesses moyennes sur trois types de terrain pour un vent de 100 milles à l'heure.*

- Des milliers d'éoliennes fonctionnent à l'heure actuelle dans diverses régions du monde, avec une capacité totale de plus de 90 000 MW à fin 2007
- 1. Allemagne: 22 247 MW
- 2. Etat-Unis: 16 819 MW
- 3. Espagne: 15 145 MW
- 4. Inde: 7 850 MW
- 5. Chine: 5 899 MW
- 6. Danemark: 3 125 MW
- 7. Italie: 2 726 MW
- 8. France: 2 455 MW
- 9. Royaume Uni: 2 389 MW
- 10. Portugal: 2 130 MW



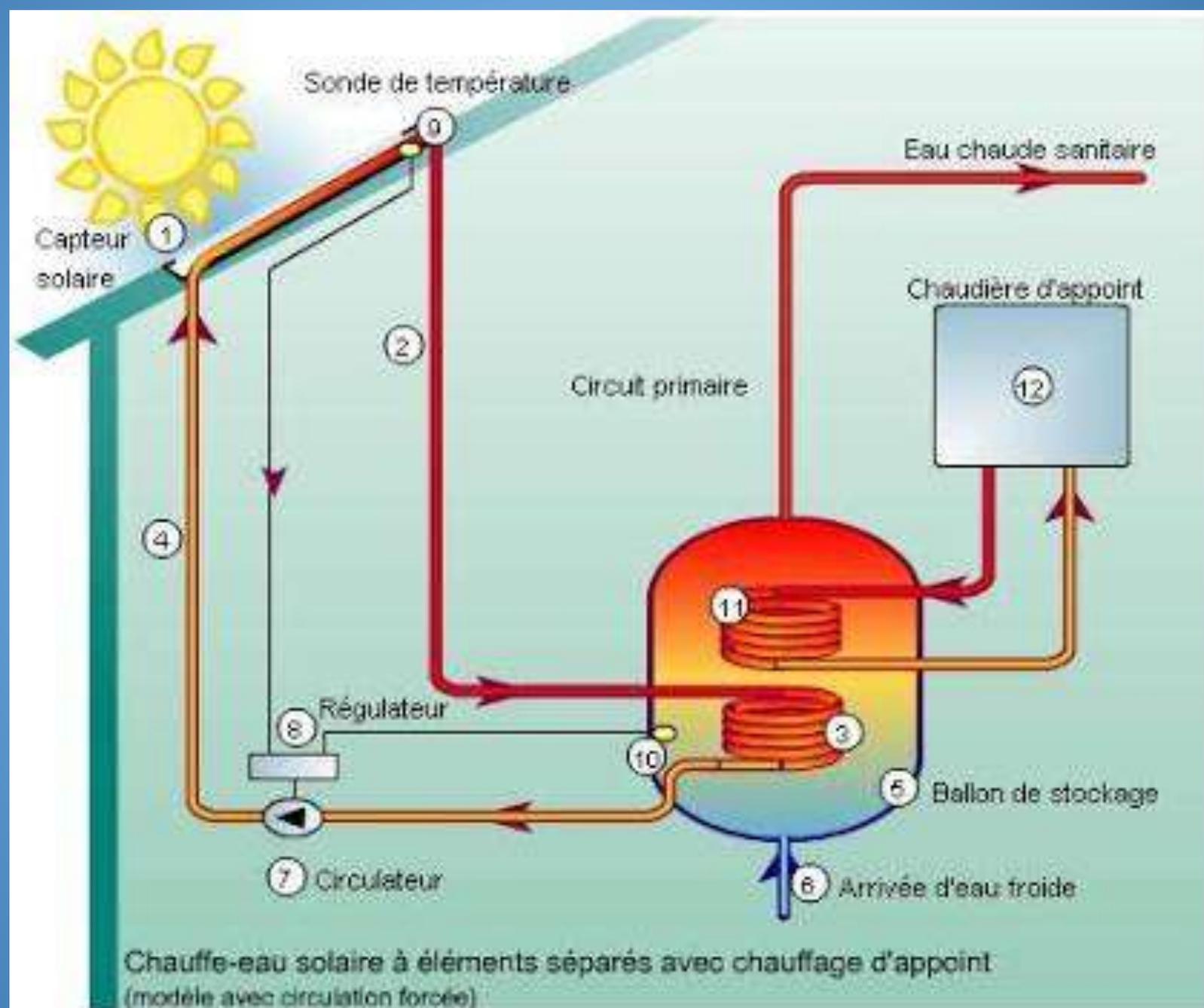
## L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

### PRINCIPE :

Un panneau solaire thermique a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à un circuit d'eau secondaire. Les rayons du soleil traversent la vitre, à l'intérieur une plaque absorbante qui a pour but de capter les rayons infrarouges. Derrière cette plaque chaude passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur.

Par la suite ce circuit alimente un circuit secondaire qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

La circulation de l'eau peut se faire par simple phénomène physique, l'eau chaude est moins dense que l'eau froide. Elle aura donc tendance à rester "en surface" dans le circuit.



## COÛT :

Tout dépend du type de chauffe-eau solaire choisi et de la difficulté à l'installer dans le bâtiment. Dans la majorité des cas, pour un système comportant 4 m<sup>2</sup> de capteurs et un ballon de 200 à 300 litres, il vous en coûtera entre 3 000 et 4 000 Euros TTC, fourniture du matériel et pose comprises. Avec les aides accordées, une installation revient en moyenne à 3 500 Euros TTC.

## CARACTERISTIQUES PARTICULIERES :

### **Avantages :**

- rendement élevé (jusqu'à 80%) : on peut récupérer jusqu'à 1200 W/m<sup>2</sup> de calories en France avec les meilleurs panneaux solaires et le meilleur ensoleillement.
- permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement, ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient maîtriser leurs dépenses telles que les piscines très énergivores.
- source d'énergie inépuisable mais attention les installations s'usent, surtout si le montage a été fait à la va-vite,
- potentiel de développement énorme.

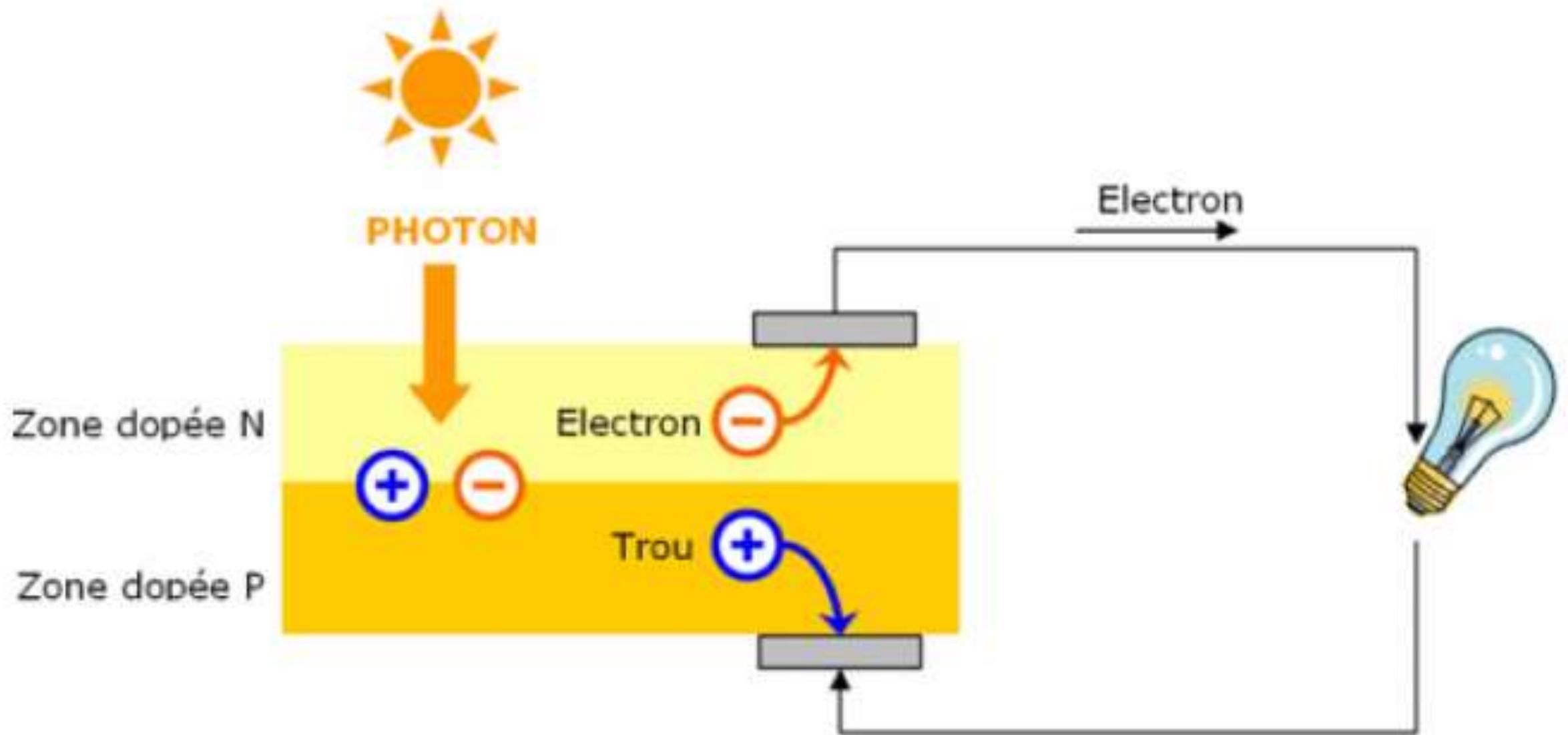
### **Inconvénients :**

- généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire sauf si vous disposez d'un plancher chauffant basse température
- l'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds (de 500 à 1500€ le m<sup>2</sup> installé),
- retour sur investissement assez long (un retour de 10 à 15 ans n'est pas rare),
- durée de vie des panneaux est généralement limitée à 20 ans,
- certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...),
- surfacturation du matériel dans bien des cas,
- essor "contrôlé" par les subventions et les aides diverses (à double tranchant).

## L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

### PRINCIPE :

Une cellule photovoltaïque est composée de matériaux semi-conducteurs. Ceux-ci sont capable de transformer l'énergie fournit par le soleil en charge électrique donc en électricité car la lumière du soleil excite les électrons de ces matériaux. La courbe d'absorption de ces matériaux débute des faibles longueurs d'ondes jusqu'à une longueur d'onde limite qui est 1,1 micromètre pour le silicium. Le silicium est le principal composant d'une cellule photovoltaïque.



Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

# Rendement actuel des cellules photovoltaïques en silicium

Type de cellule	Rendement des Cellules			Coût
	Théorique	En laboratoire	Actuel	
<b>Silicium monocristallin</b>	27,0%	24,7%	14,0 à 16,0%	+++
<b>Silicium polycristallin</b>	27,0%	19,8%	12,0 à 14,0%	++
<b>Silicium amorphe</b>	25,0%	13,0%	6,0 à 8,0%	+

Un système photovoltaïque raccordé au réseau comprend les composants suivants :

- **un générateur photovoltaïque** qui doit être exposé autant que possible de façon à recueillir le maximum d'ensoleillement sur l'année
- **un onduleur** : son rôle est de transformer le courant continu fourni par le générateur photovoltaïque en un courant alternatif ayant toutes les caractéristiques du courant alternatif délivré par le réseau électrique
- **des organes de sécurité et de raccordement** au réseau qui assurent des fonctions de protection et d des personnes et des biens vis à vis de l'utilisateur et du réseau et de contrôle de production et de consommation
- **Un moyen de stockage de l'électricité** éventuel composé de batteries (lithium-ion, etc...)

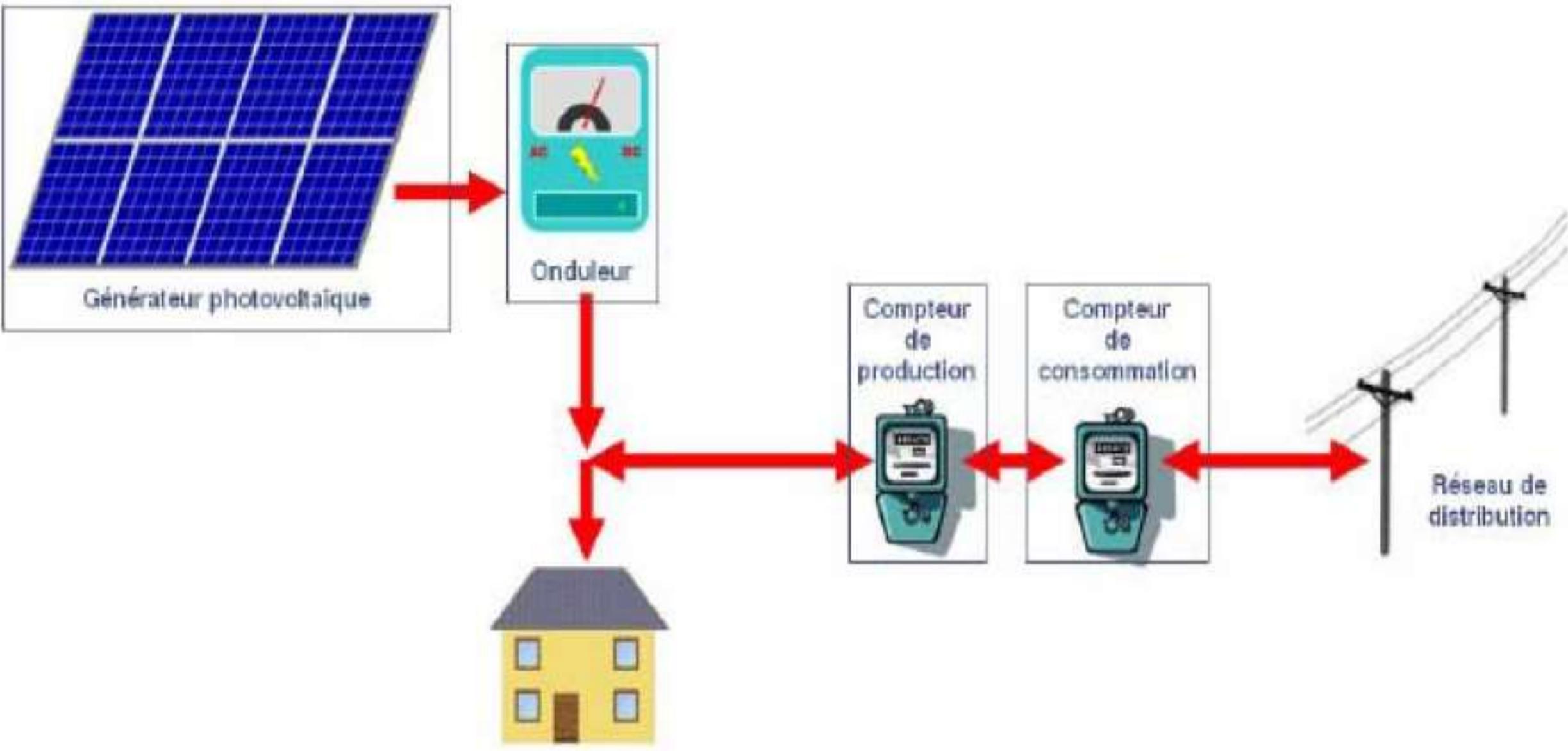
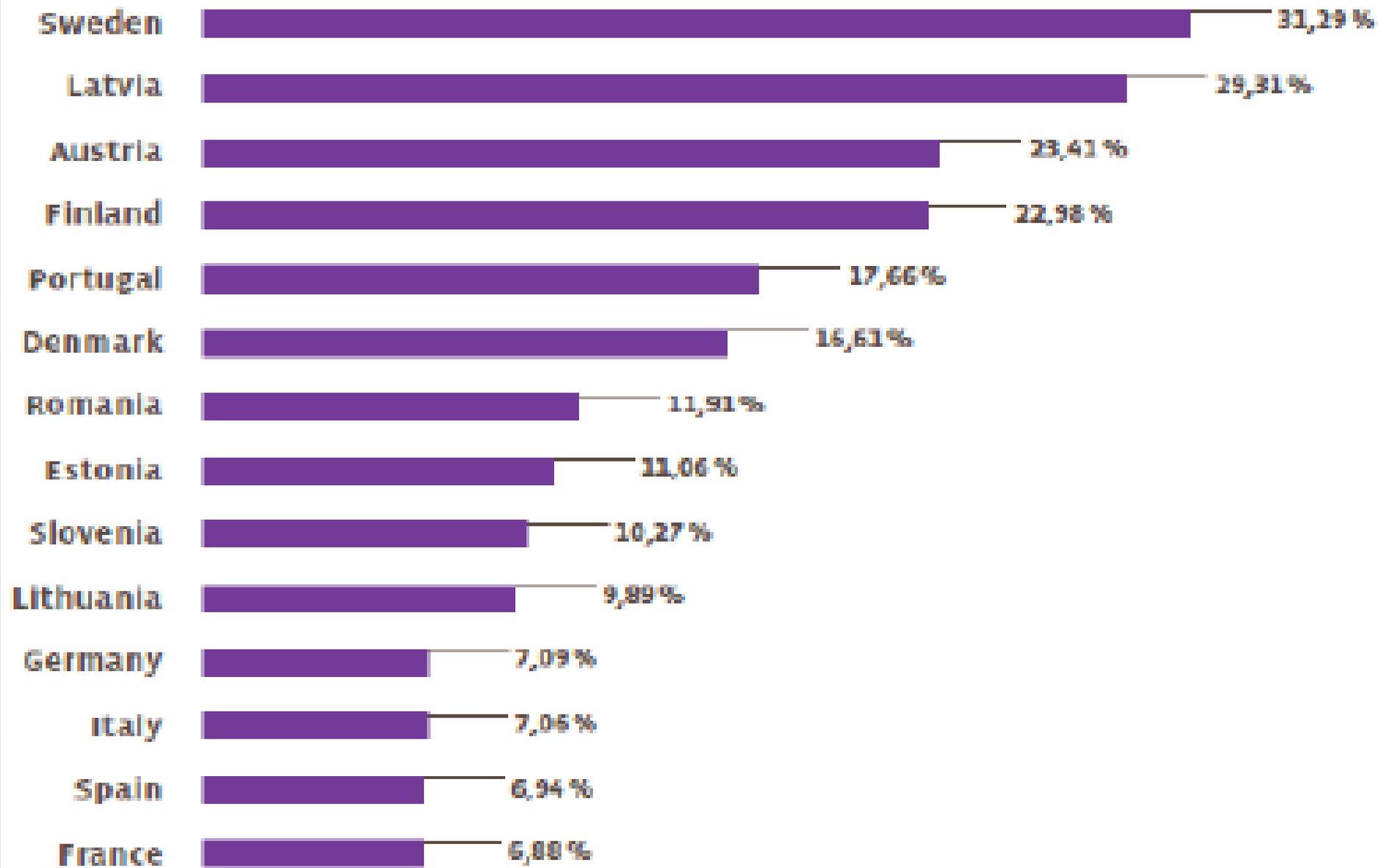
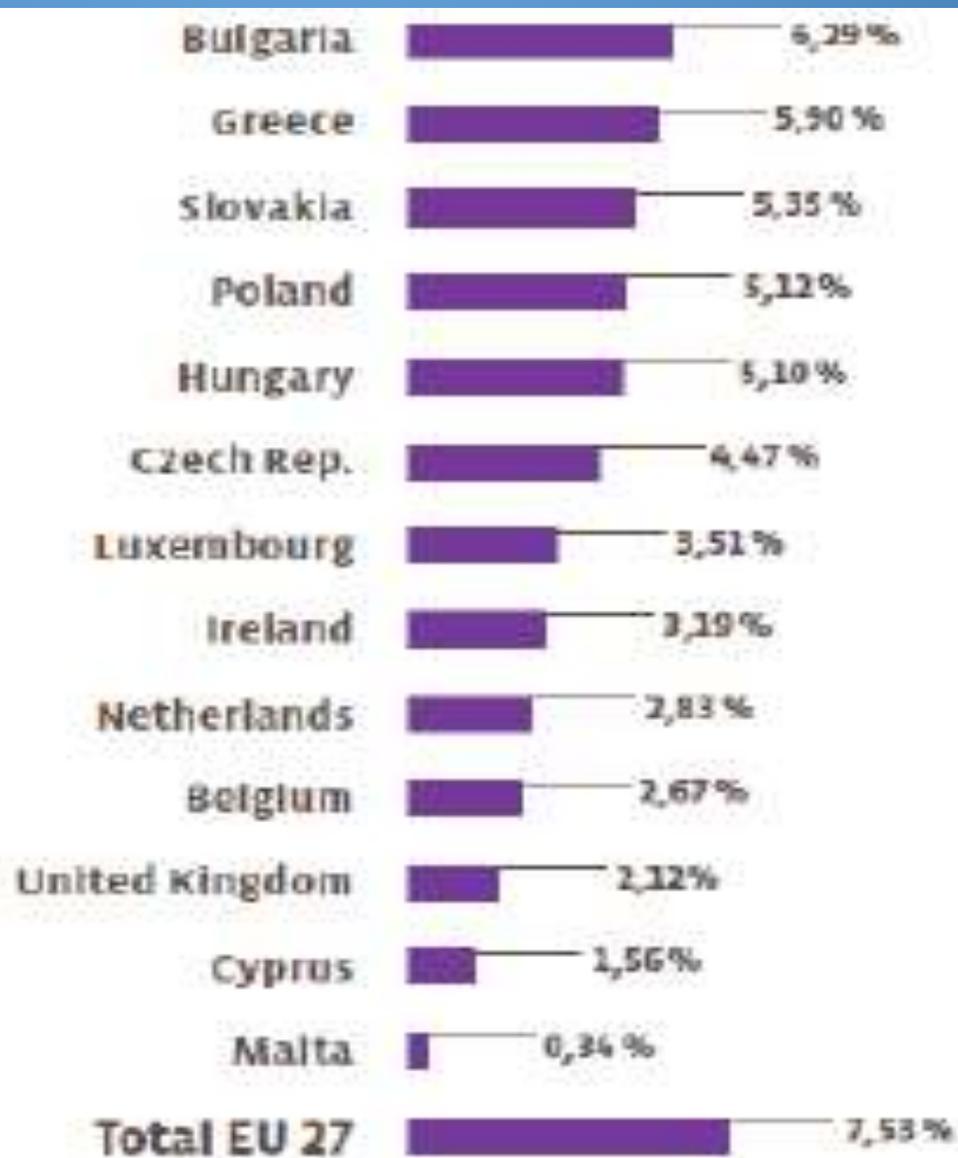


Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

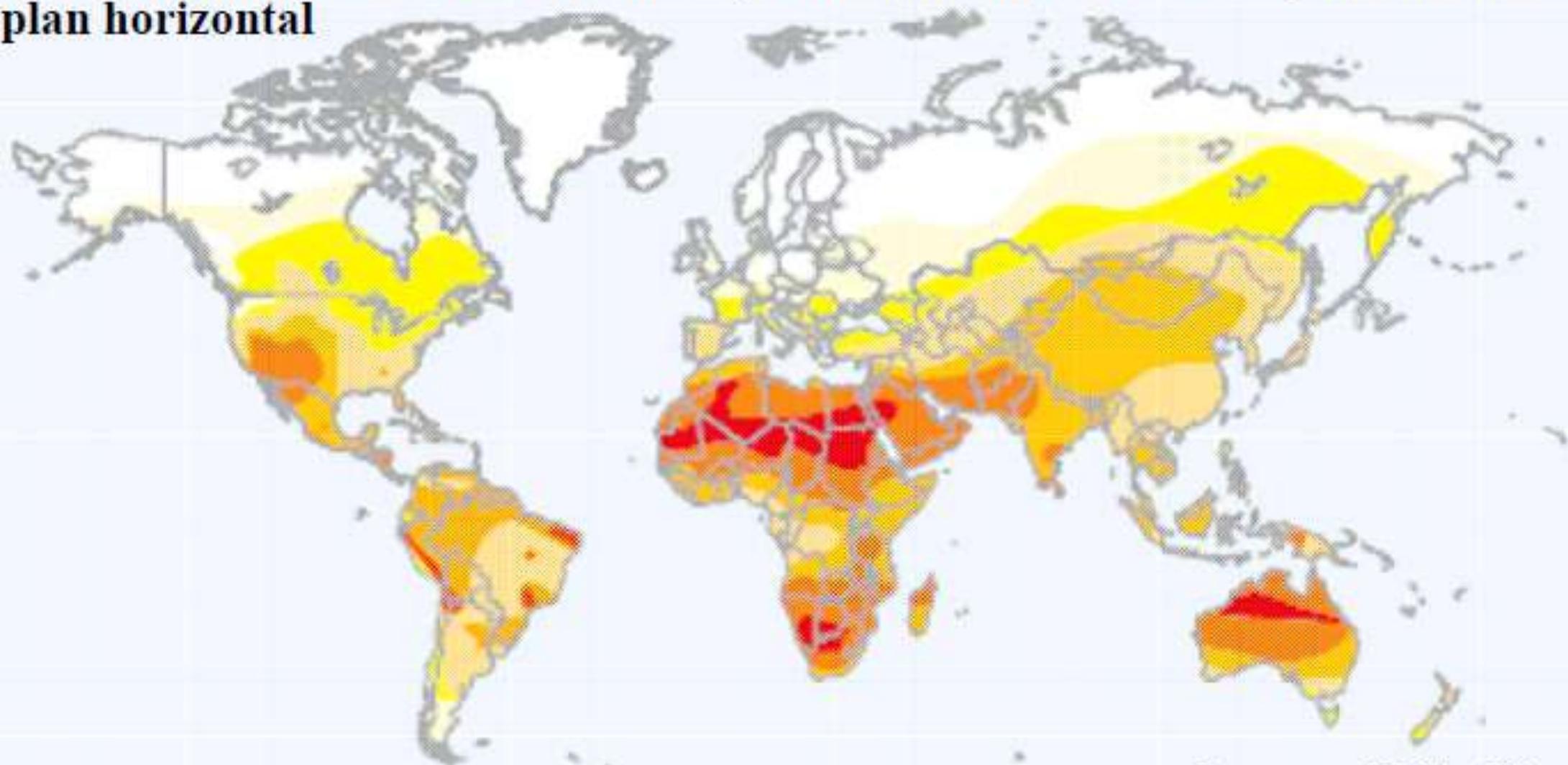


Part des énergies renouvelables (ENR) dans la Consommation totale d'énergie primaire dans différents pays d'Europe en 2007.

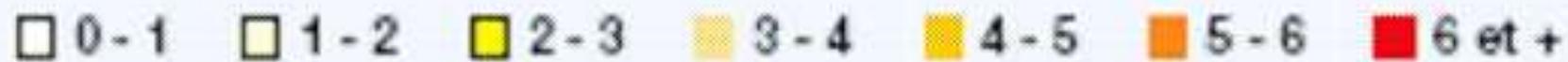


Part des énergies renouvelables (ENR) dans la Consommation totale d'énergie primaire dans différents pays d'Europe en 2007.

# Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m<sup>2</sup>/jour sur un plan horizontal



kWh/m<sup>2</sup>/jour



Source : HelioClim



Exemple de villa équipée de panneaux photovoltaïques.



Vue du lycée d'enseignement agricole professionnel de Saint Maximin équipé de panneaux photovoltaïques. Source : ENEOVIA

## Avantages :

- Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable,
- Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine,
- Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

## Inconvénients :

- Coût du photovoltaïque est élevé car il est issu de la haute technologie,
- coût dépend de la puissance de crête, le coût actuel du watt crête est d'environ 3,5€ soit environ 550€/m<sup>2</sup> de cellules solaires,
- le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance,
- marché très limité mais en développement
- production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit,
- le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût économique et écologique des batteries très élevé),
- durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallise" et rend inutilisable la cellule,
- pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production,
- de même en fin de vie : le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

# L'énergie hydraulique

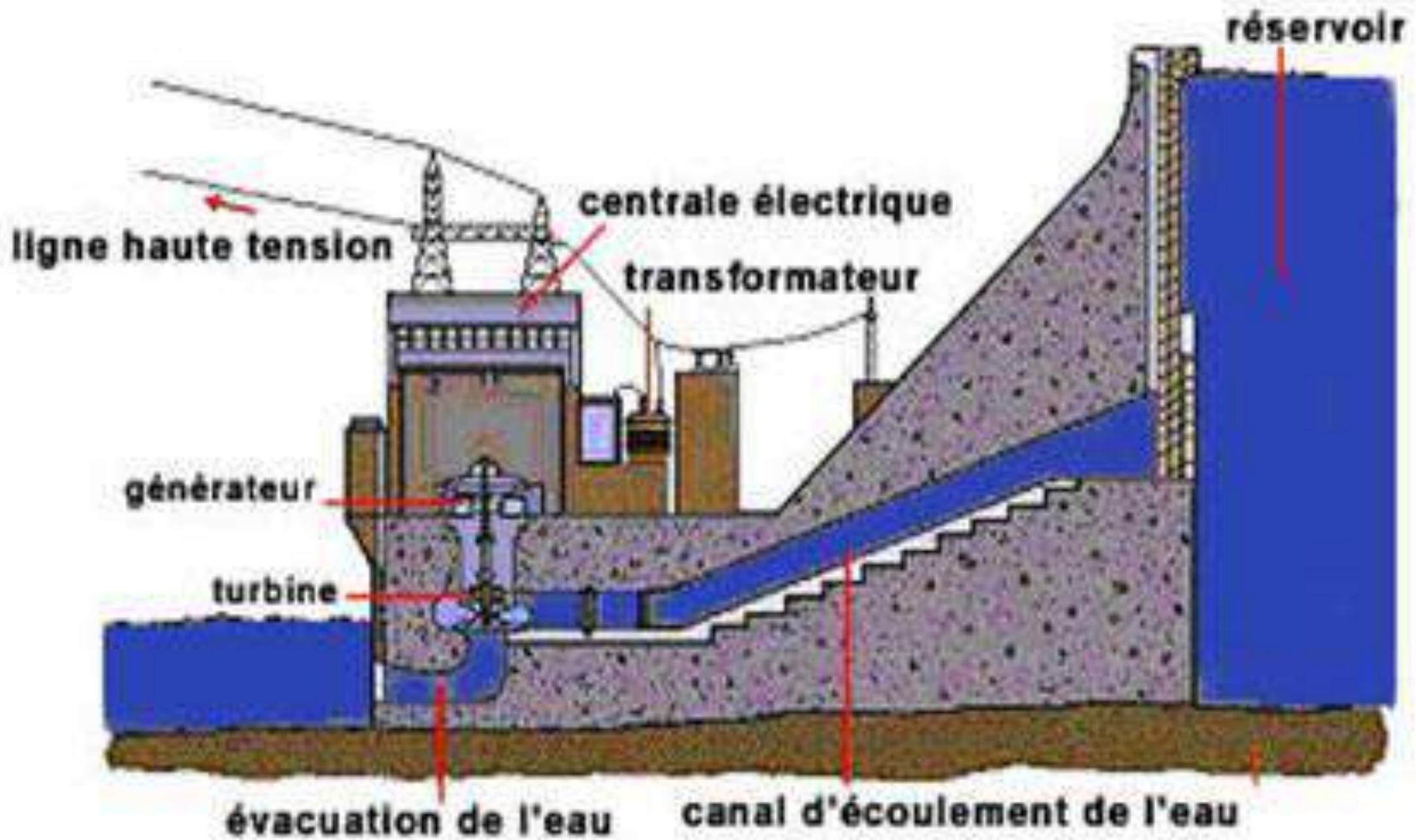
## PRINCIPE :

L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau. (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins,...). Elle comprend les grands barrages, les usines marémotrices, les petites centrales au fil de l'eau et les moulins à eau.

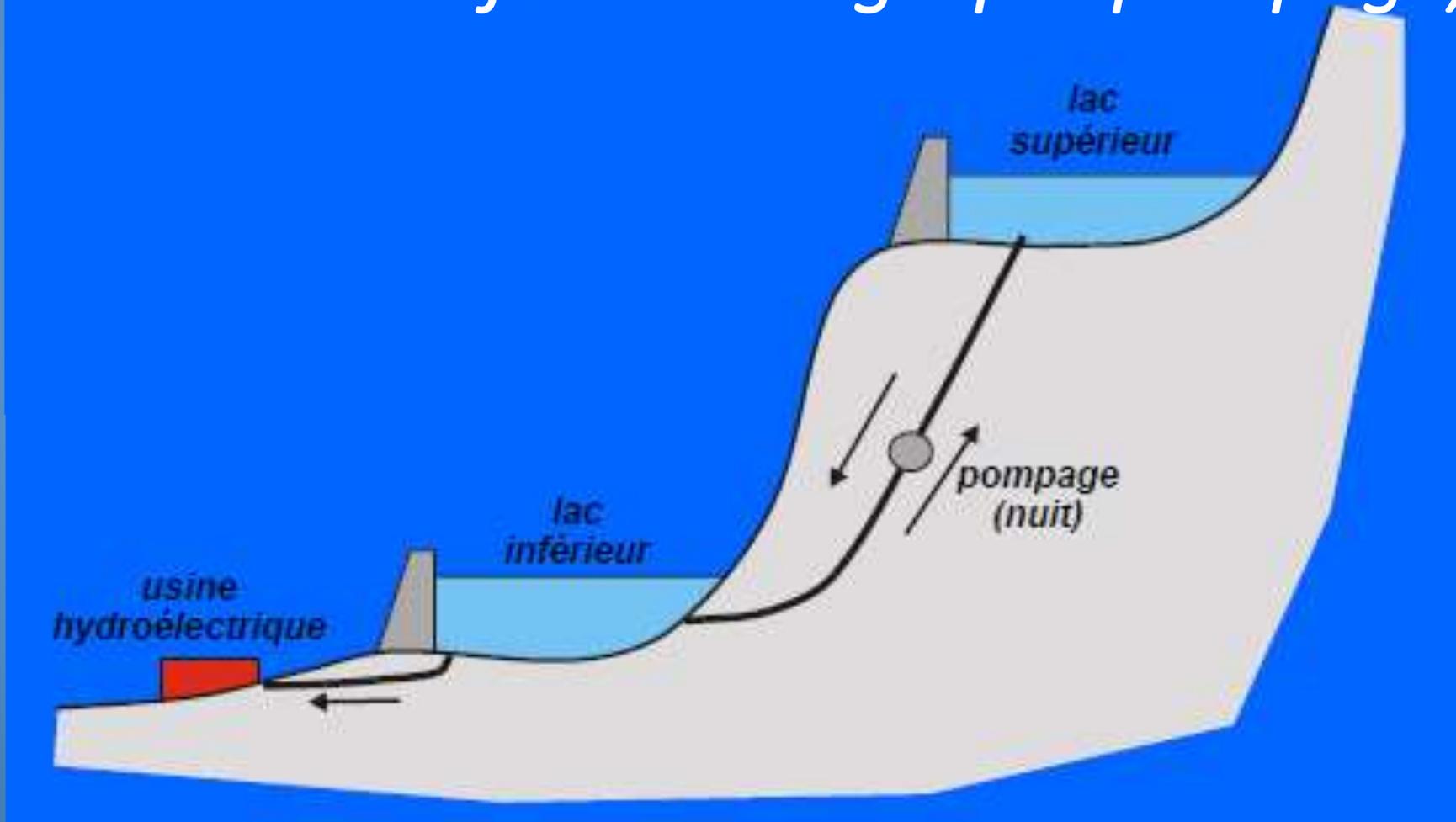
L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre. (Bien que remis en cause à propos des conséquences sur la faune et plus récemment vis à vis des gaz à effet de serre).

L'eau est retenue par un barrage, puis transportée vers la centrale par des galeries ou canaux d'amenée et des conduites forcées. Arrivée à la centrale, l'eau actionne la turbine, qui entraîne un arbre, qui fait tourner l'alternateur. Celui-ci transforme cette énergie mécanique en électricité. L'eau est ensuite rejetée à la rivière par le canal de fuite.

Le transformateur élève enfin la tension de cette électricité pour permettre son transport via les lignes à haute tension.



*L'énergie hydraulique est actuellement la seule solution efficace de stockage de l'énergie par double bassin (STEP station de transfert d'énergie par pompage)*



# Les plus grands barrages actuels :



<b>Itaipu (Parana)</b>	<b>12,6 GW</b>
<b>Guri (Venezuela)</b>	<b>10,2 GW</b>
<b>Grand Coulee (USA)</b>	<b>6,5 GW</b>
<b>Sayano Shushenskaya (Russie)</b>	<b>6,4 GW</b>
<b>Krasnoyarsk (Russie)</b>	<b>6 GW</b>
<b>Xiaowan (Yunnan)(2013)</b>	<b>4,2 GW</b>

# Itaipu sur le Parana



longueur : 8 km

hauteur : 196 m

retenue :

1400 km<sup>2</sup>

29 milliards de m<sup>3</sup>

170km de long

Puissance électrique : 18 turbines de 700MW

→ 12,6 GW

2004 : 2 turbines supplémentaires (14 GW)

production (2003) : 89,151 TWh

# L'hydroélectricité dans le monde

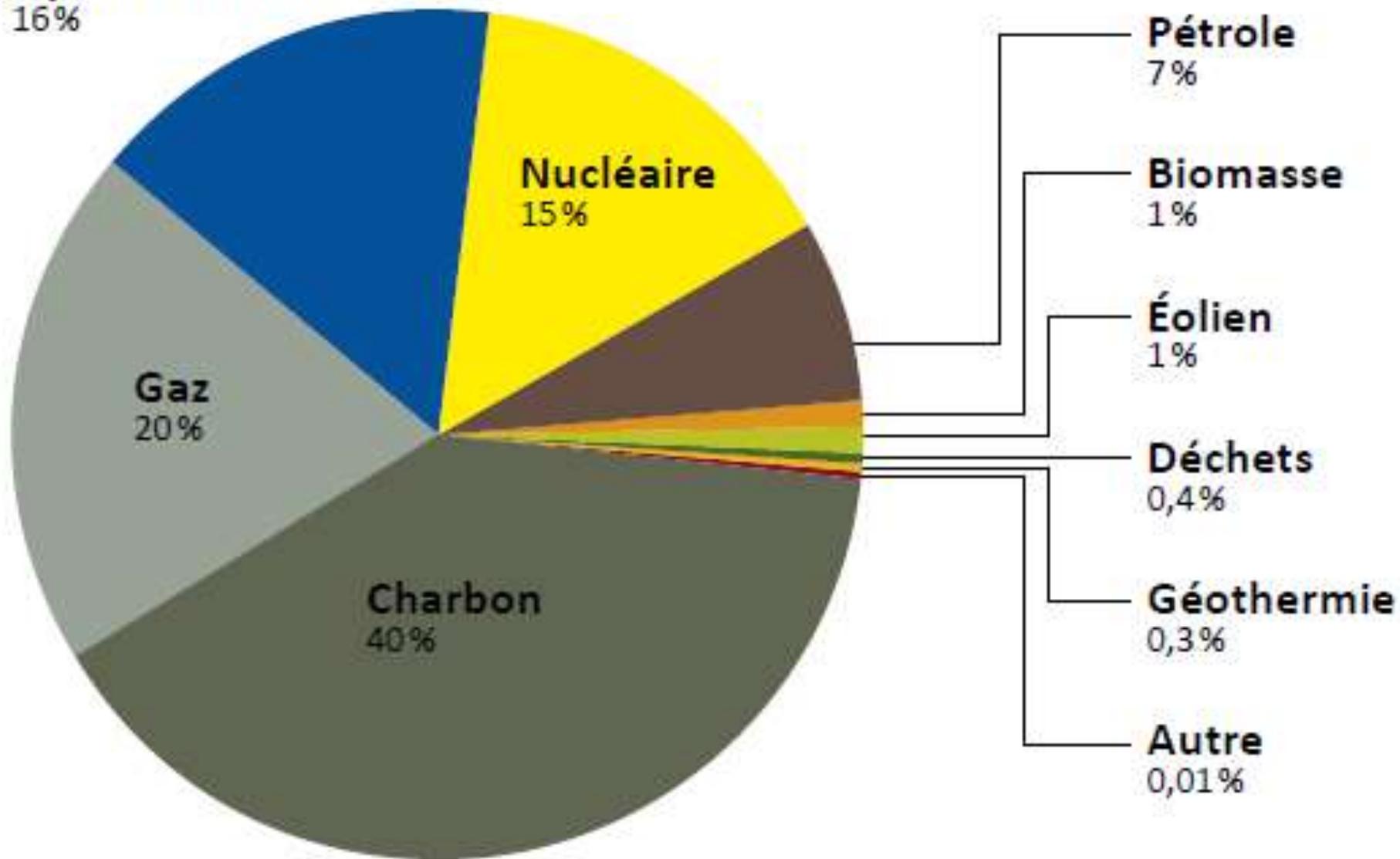
- Avec 16% de la production électrique mondiale, l'hydroélectricité constitue la troisième source de production électrique mondiale, derrière le charbon (40%) et le gaz (19%).
- Chaque année, dans le monde, environ 3 000 TWh (soit 3000 milliards de KWh) d'électricité sont produits à partir de l'énergie hydraulique.
- L'hydroélectricité représente près de 20 % des capacités électriques mondiales avec 715 000 MW (soit 715 millions de kW).

# Production électrique mondiale en 2005

source : AIE

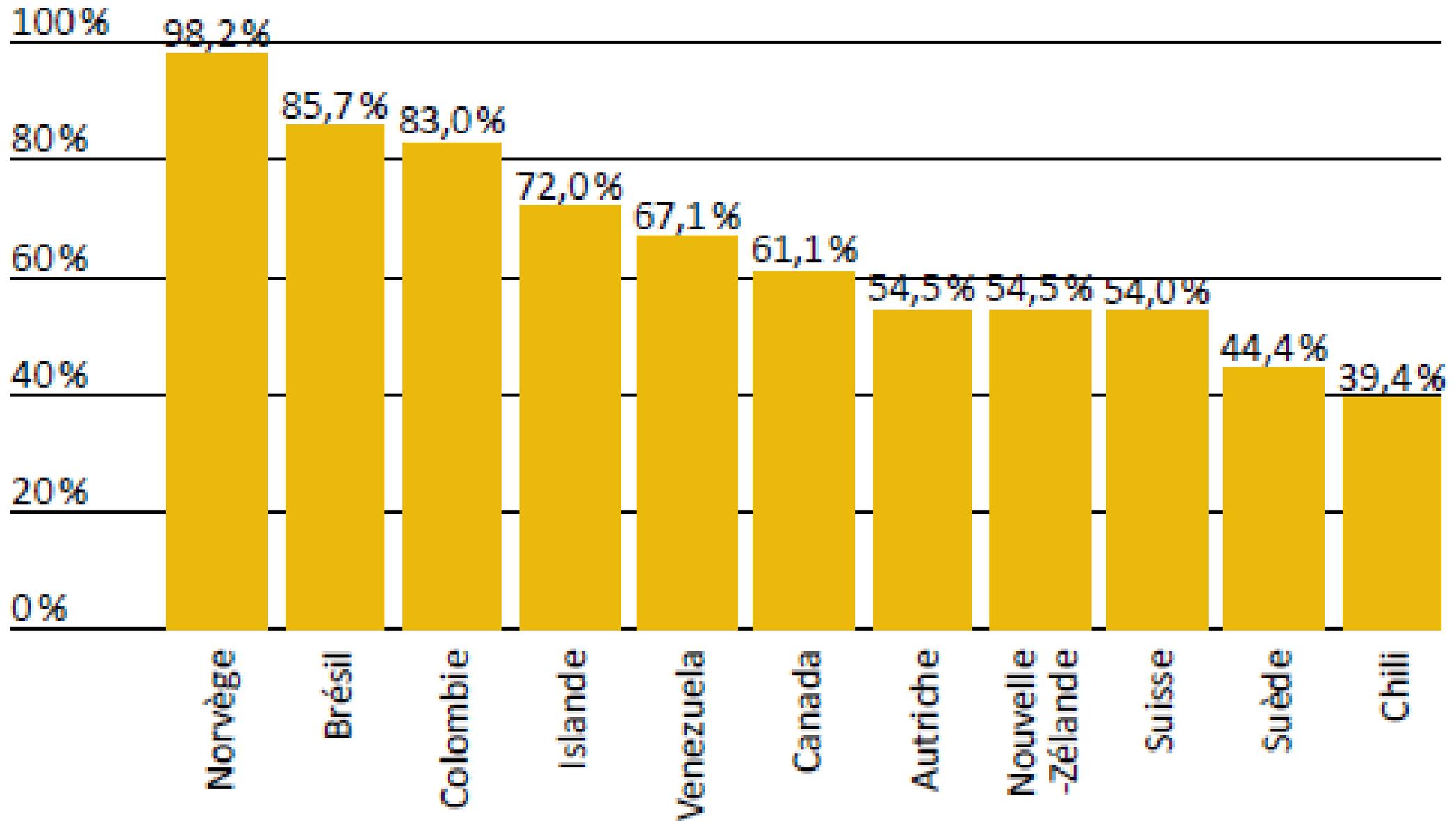
## Hydroélectricité

16%



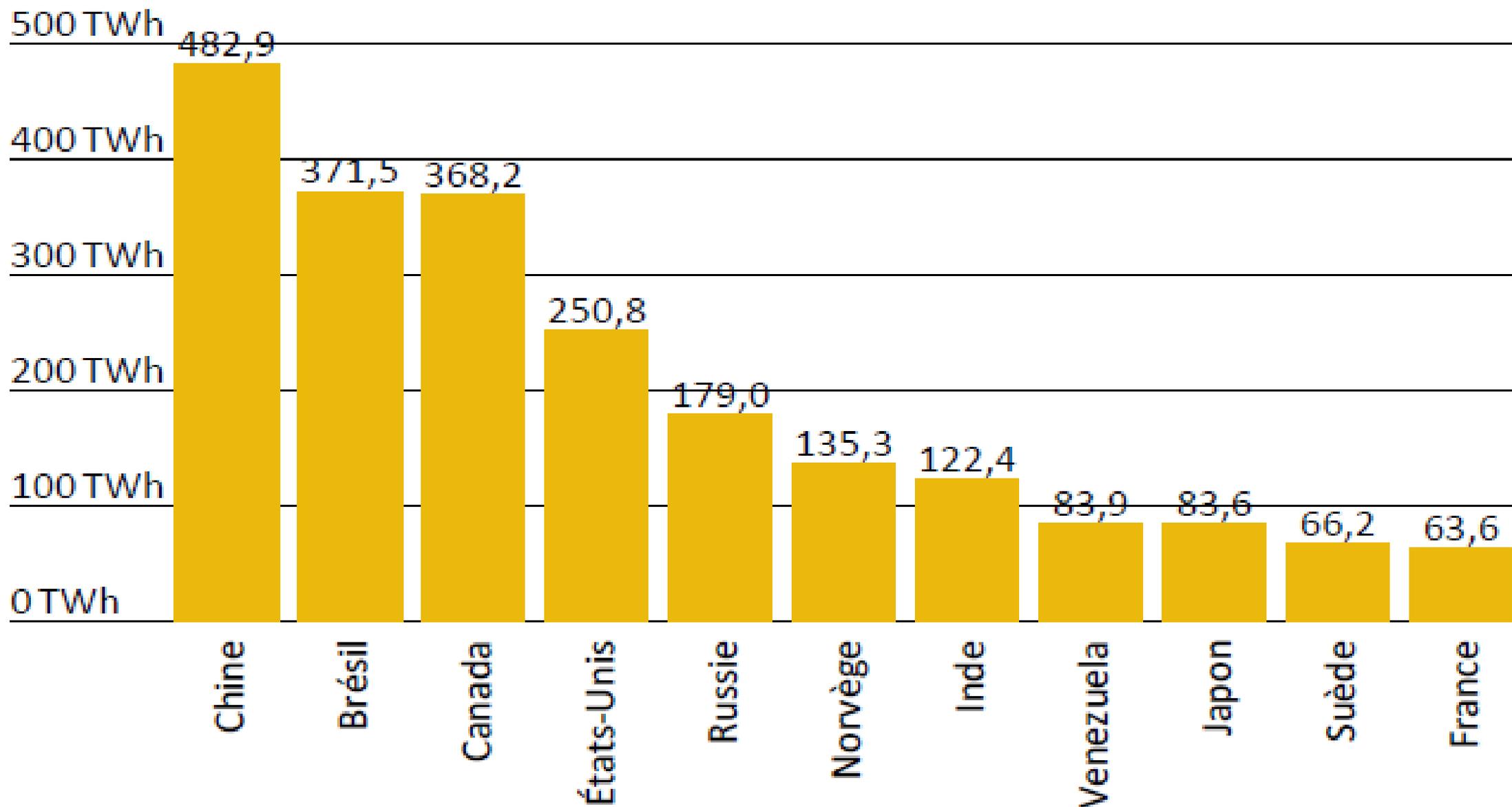
# Part de l'électricité produite par l'énergie hydraulique

source : BP, 2007



# Principaux pays producteurs d'hydroélectricité au monde

source : BP, 2007



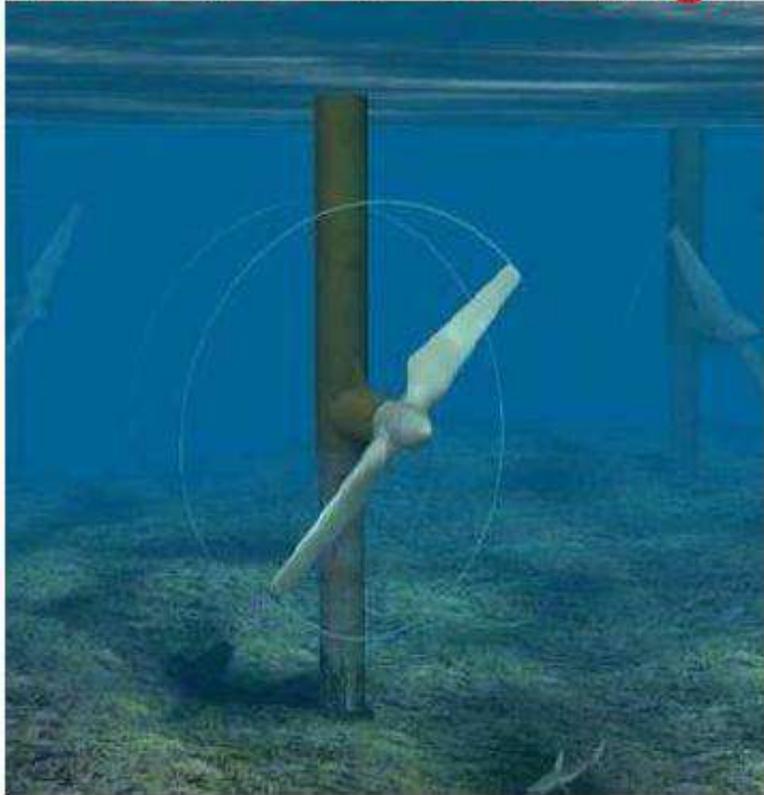
# Les énergies marines

On distingue :

- l'énergie hydrolienne (courants de marée)
- l'énergie marémotrice (les marées)
- l'énergie houlomotrice (énergie des vagues)
- la biomasse (énergie des algues)
- l'énergie thermique des mers (ETM) (différence de température)
- la pression osmotique (gradient de salinité)

# l'énergie hydrolienne

**Absence de carénage**



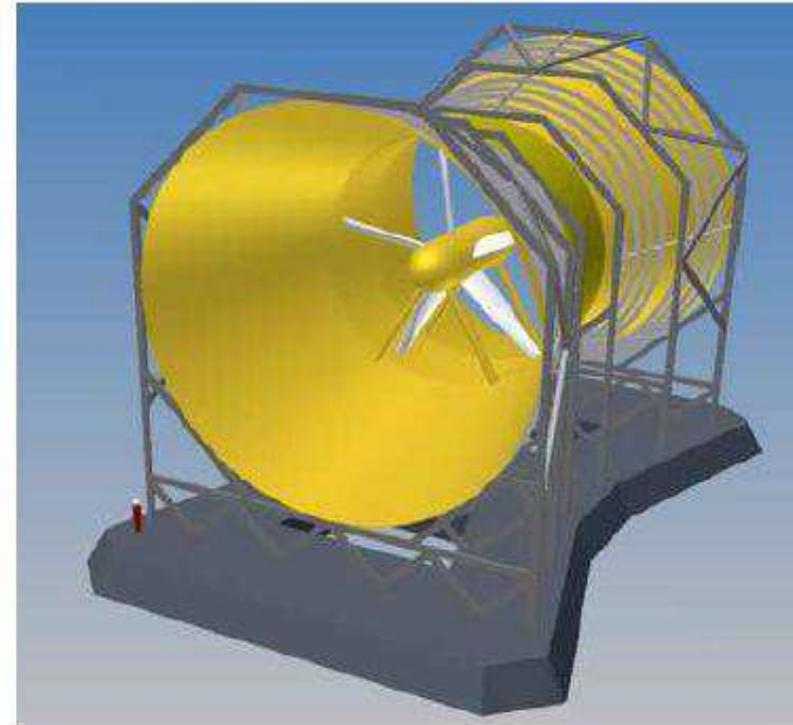
**Type SeaFlow (MCT)**

**Carénage simple**

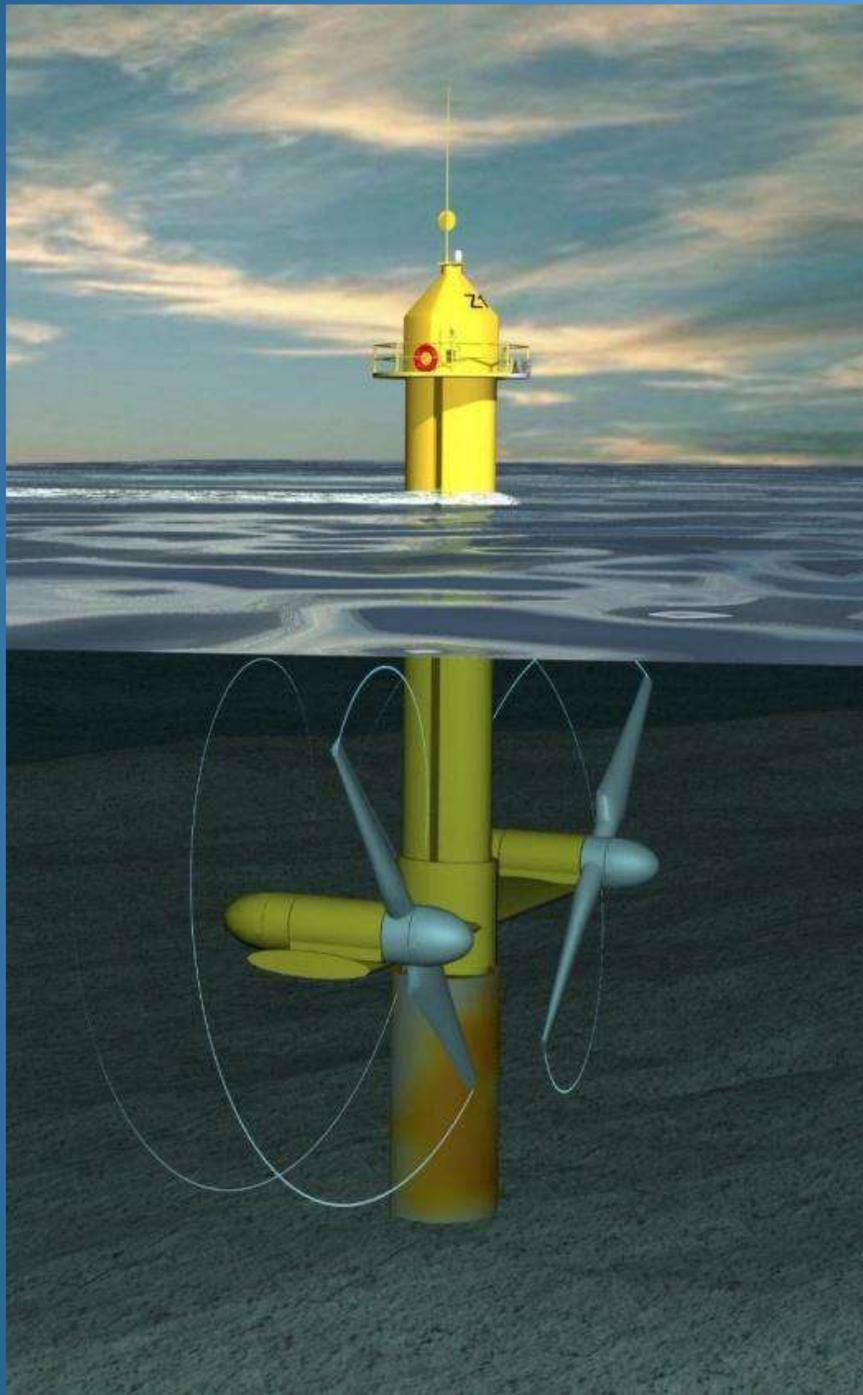


**Type Sabella D03  
(Hydrohélix)**

**Carénage avec  
accélérateur de flux**



**Type turbine Rotech**



# Les principales turbines

- **La turbine Bulbe** est utilisée pour les très faibles chutes (de 1 à 30 m), ou pour certaines installations marémotrices, tel que le barrage de la Rance, en Bretagne.
- **La turbine Kaplan** est la turbine la plus adaptée pour les faibles chutes (de 5 à 55 m) et les débits importants. Ses pales sont orientables et permettent par une simple rotation d'ajuster la puissance de la turbine.
- **La turbine Francis** est utilisée pour les moyennes chutes (de 40 à 600 m) et les débits moyens. L'eau entre par la périphérie, glisse sur les pales et s'évacue en son centre.
- **La turbine Pelton** est la turbine la plus adaptée pour les faibles débits et les hautes chutes (entre 200 et 1800 m). Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un ou plusieurs injecteurs.
- **La turbine VLH** «très basse chute» est un nouveau concept de turbine qui a été mis au point en 2006, et présente plusieurs intérêts majeurs



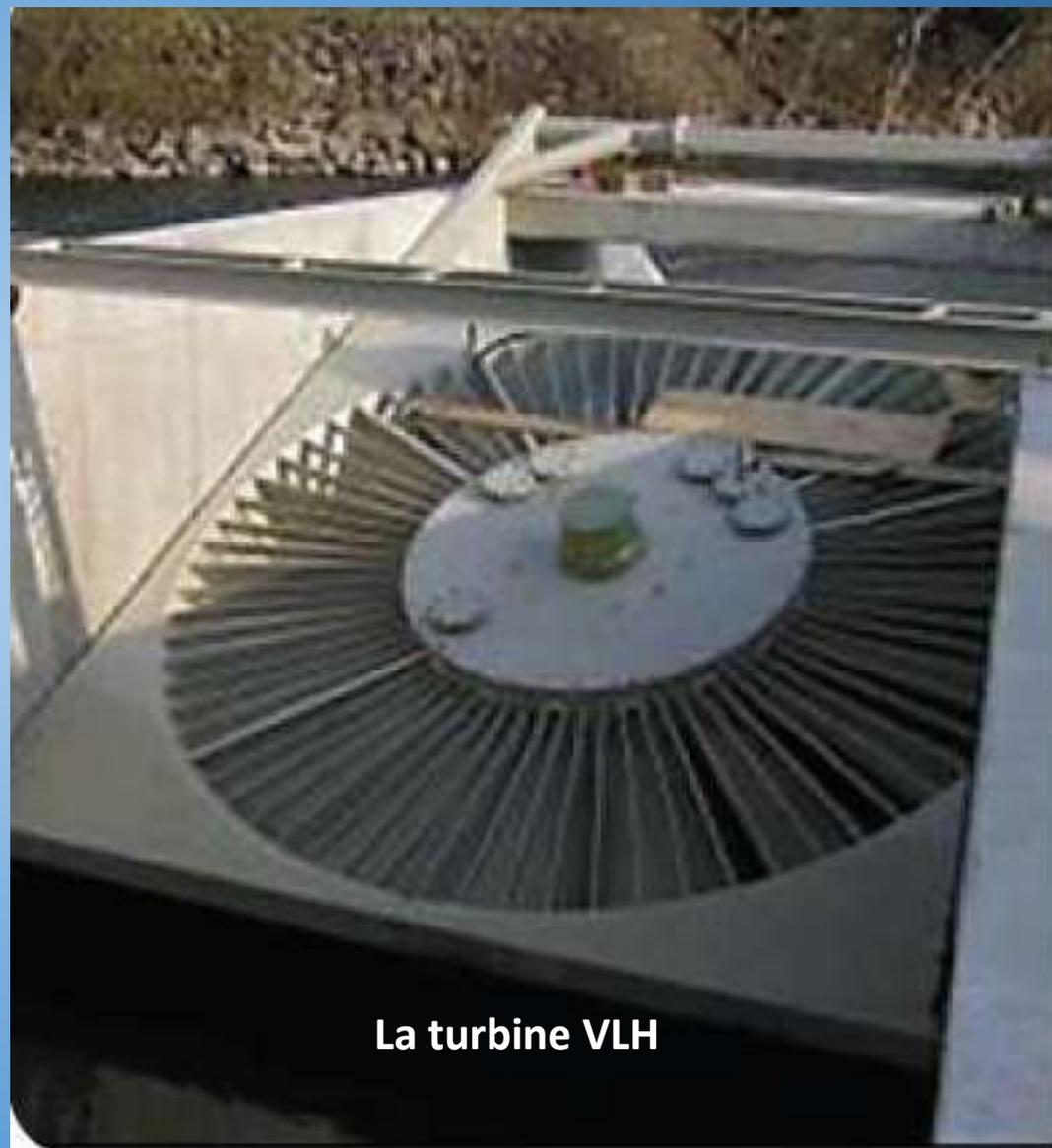
turbine Kaplan



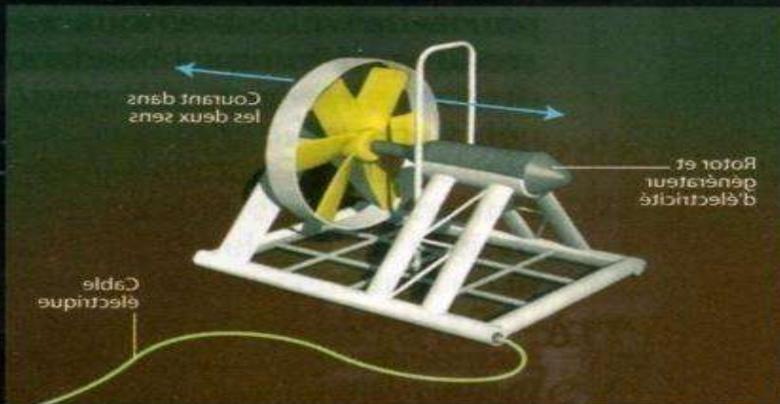
turbine Francis



turbine Pelton



La turbine VLH



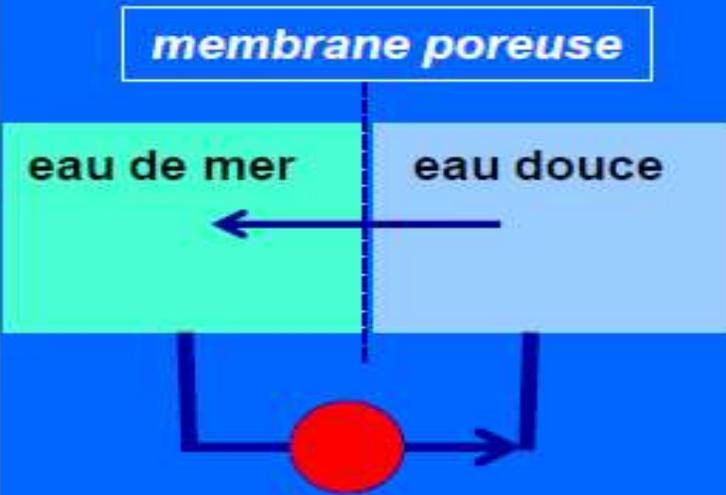
MICHELLE DEHOKA



La turbine,  
construite en  
Irlande a été posée  
à Brest sur son  
embase Avec sa  
tuyère, la turbine  
mesure 16 mètres  
de diamètre.  
L'ensemble pèse  
la bagatelle de 850  
tonnes  
(l'équivalent de 18  
semi-remorques !).



## L'énergie osmotique



pression osmotique pour équilibrer le taux de salinité

flux d'eau de « l'eau douce » vers « l'eau de mer »

Surpression dans le compartiment « eau de mer »

L'eau en excès sert à produire de l'électricité

La capacité de production européenne pourrait être de 1700 TWh/an (50% de la consommation)

*La centrale norvégienne de Statkraft devrait produire en 2015 166 GWh/an*

*La première centrale électrique fonctionnant par osmose a été inaugurée par Statkraft en novembre 2009*



## Les points positifs :

- L'énergie hydraulique est renouvelable et propre
- Les petites centrales hydrauliques ne rejettent pas de CO<sub>2</sub>, ni de gaz nocifs ou de substances polluantes. Elles ne produisent pas de déchets.
- Une centrale hydraulique au fil de l'eau fonctionne en continu, jour et nuit, toute l'année.
- Économiquement, l'énergie hydraulique est compétitive. Le combustible ne coûte rien et les frais de fonctionnement sont peu élevés.
- Les centrales hydroélectriques ont un excellent bilan énergétique. Pendant leur durée de vie, qui peut dépasser cent ans, elles amortissent jusqu'à 150 fois leur construction.
- La technologie de l'énergie hydroélectrique est une technologie éprouvée, simple et bien maîtrisée.
- Les petites centrales hydrauliques « certifiées » répondent à des normes sévères pour protéger l'écosystème de la rivière.

## Les inconvénients :

- Les grands barrages entraînent de gros dommages environnementaux et humains par l'inondation de vallées entières.
- Les lacs d'accumulation tropicaux émettent beaucoup de CO<sub>2</sub> et de méthane à cause de la décomposition des végétaux dans les zones inondées.
- Le paysage est parfois dégradé par les murs de retenue, les prises d'eau ou les conduites forcées.
- Les centrales qui ne respectent pas un débit résiduel minimal ou qui ne sont pas équipées d'une échelle à poissons portent atteinte à la faune piscicole.
- Les rejets d'eau bruts provoquent des marnages et des dépôts de sédiments préjudiciables à l'écosystème des environs de la centrale.

# L'énergie Géothermique

## PRINCIPE :

La géothermie (du grec "Gê", la terre, et "Thermie", la chaleur) consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage (température inférieure à 90°) ou de l'électricité (température entre 90 et 150°).

Le principe est simple. Il s'agit d'extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) en faisant un ou plusieurs forages, plus ou moins profond(s) selon la température désirée ou le gradient thermique local.

Plus l'on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température atteint 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région du globe considérée. Il peut varier de 3 °C par 100 m (régions sédimentaires) jusqu'à 15°C ou même 30°C (régions volcaniques, zones de rift comme en Islande ou en Nouvelle-Zélande). La plus grande partie de la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre

## On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

✚ **La géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée** exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche.

Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité.

Elle est parfois subdivisée en deux sous-catégories :

- la géothermie moyenne énergie (aux températures comprises entre 100 et 150°C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire
- la géothermie haute énergie (aux températures supérieures à 150°C) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

✚ **La géothermie de basse énergie** : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100°C. Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

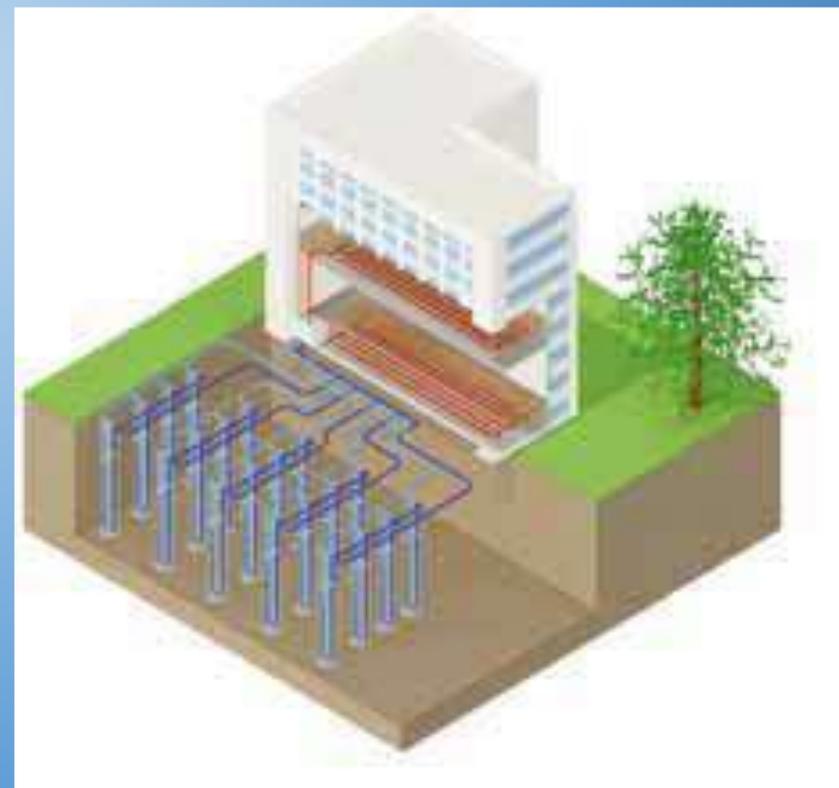
✚ **La géothermie de très basse énergie** : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30°C. Principales utilisations : le chauffage et la climatisation individuelle par dispositifs thermodynamiques généralement fonctionnant à l'électricité, d'où le terme barbare électro-thermodynamique, appelés plus communément « pompes à chaleurs aérothermiques » (puisant dans l'air extérieur) et « pompe à chaleur géothermique » (puisant dans la terre ou l'eau à faible profondeur) beaucoup plus performantes que les premières.

# Les PAC Géothermiques pour bâtiments publics

## PAC géothermique sur nappe



## PAC géothermique sur champ de sondes

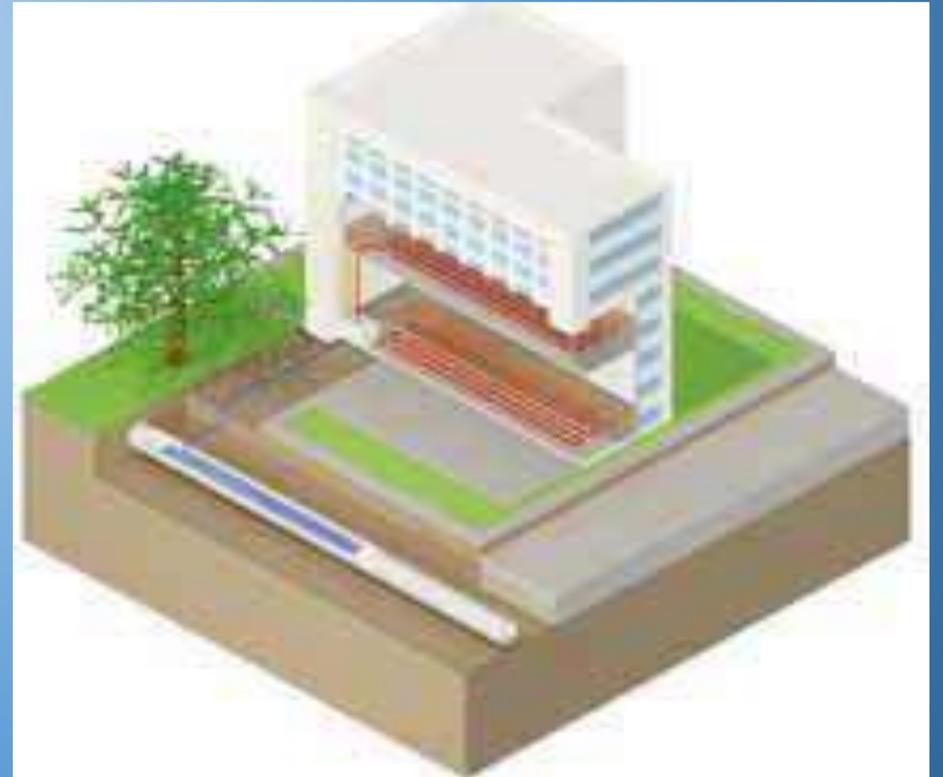


# Les PAC Géothermiques pour bâtiments publics

**Fondations thermoactives  
(pieux géothermiques)**



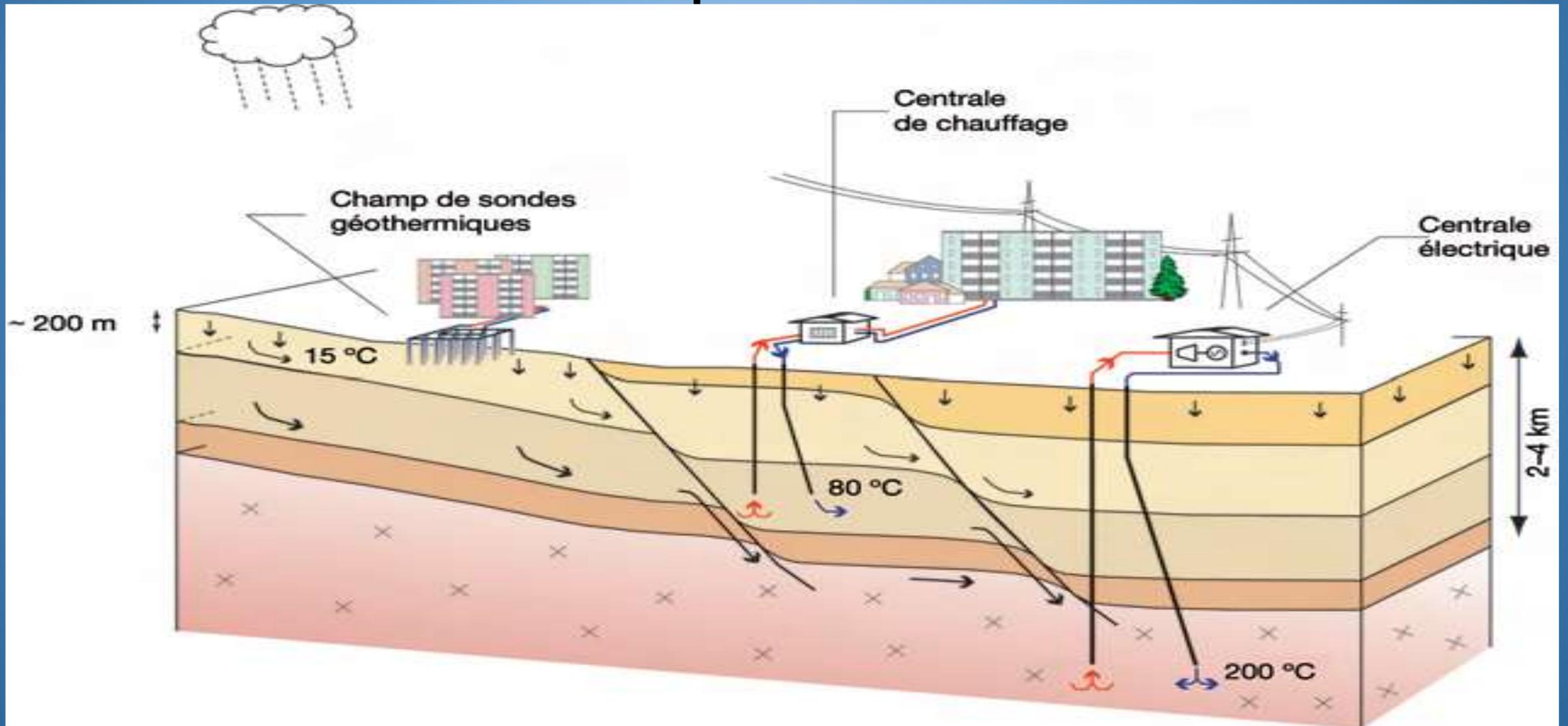
**PAC sur eaux usées (ou  
eaux grises) et eau de mer**



# Typologie et caractéristiques des ressources géothermiques

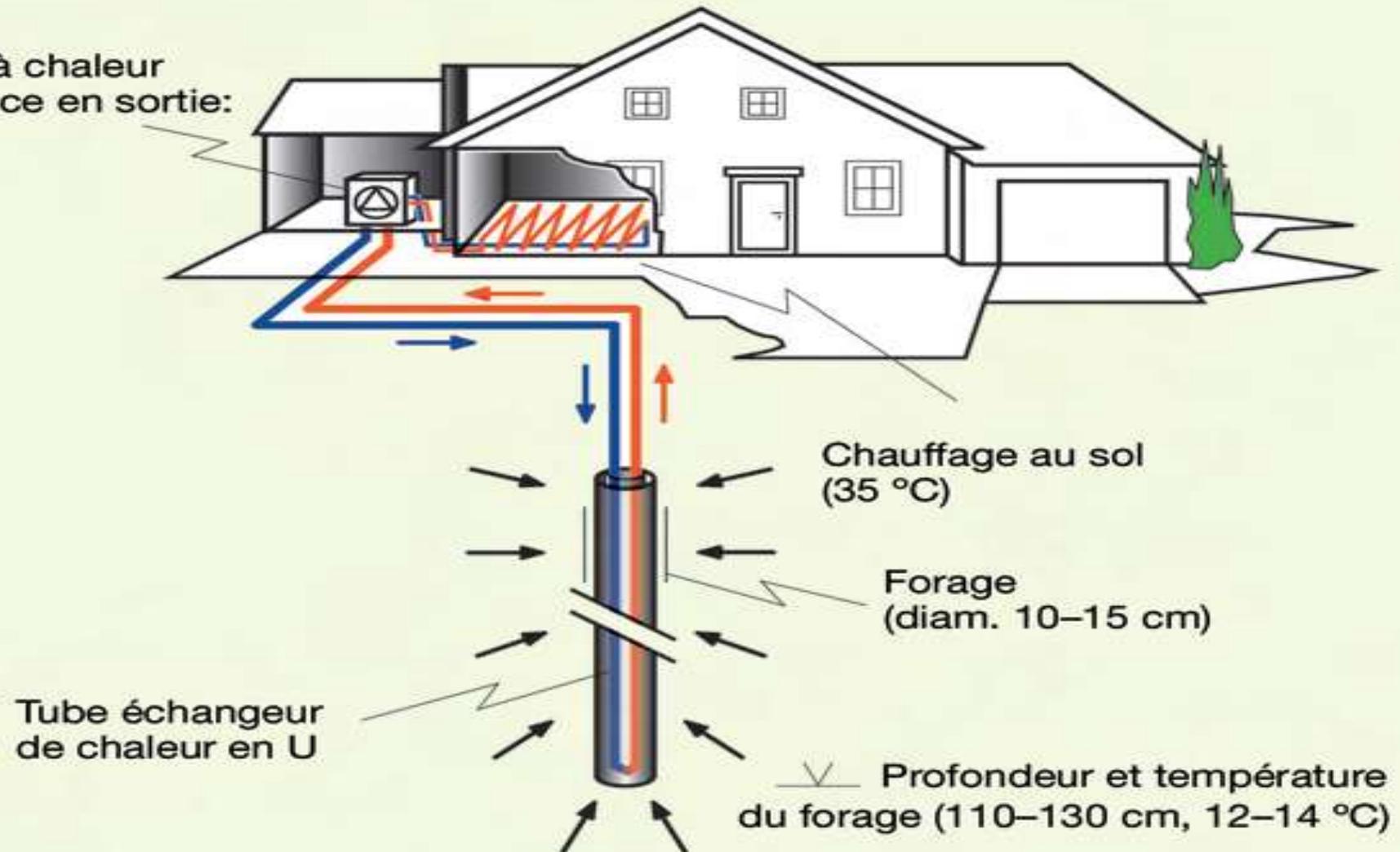
Type de géothermie	Ressource	Profondeur (m)	Production	Technologie
Très basse énergie 10...30° C	Roches sèches Aquifères peu profonds	10...100 10...1000	Chaleur ou froid	Sondes géothermiques verticales, géostructures énergétiques, tunnels, etc.
Basse énergie 30...90° C	Aquifères profonds Zones d'anomalie thermique à faible profondeur	1000...3000 100...1000	Chaleur	Centrales de chauffage urbain, complexes de serres agricoles, thermalisme, pisciculture, etc.
Géothermie de moyenne énergie 90...150° C	Aquifères très profonds Zones d'anomalie thermique à faible profondeur	2000...4000 500...2000	Electricité et/ou chaleur	Centrales de production électrique et/ou distribution de chaleur couplée
Géothermie de haute énergie 150...350° C	Aquifères profonds dans des zones de gradient anormalement élevé Systèmes géothermiques stimulés EGS	1000...5000	Electricité (et chaleur)	Centrales de production électrique (et distribution de chaleur couplée) Centrales dès 2006

# Ressources géothermiques et modes d'exploitation



# Chauffage d'une maison familiale avec une sonde géothermique couplée à une pompe à chaleur

Pompe à chaleur  
(puissance en sortie:  
7-8 kW)



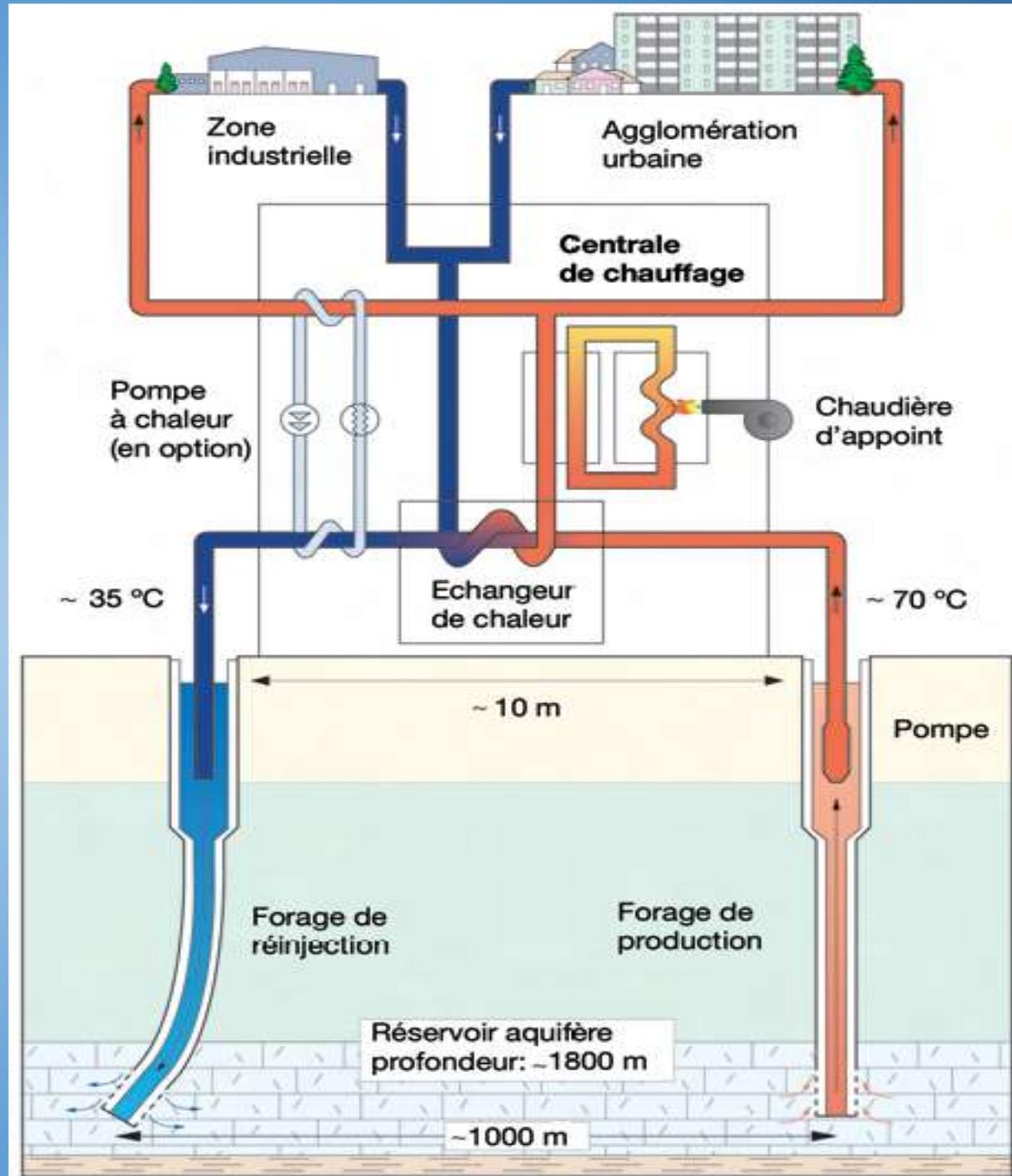
Chauffage au sol  
(35 °C)

Forage  
(diam. 10-15 cm)

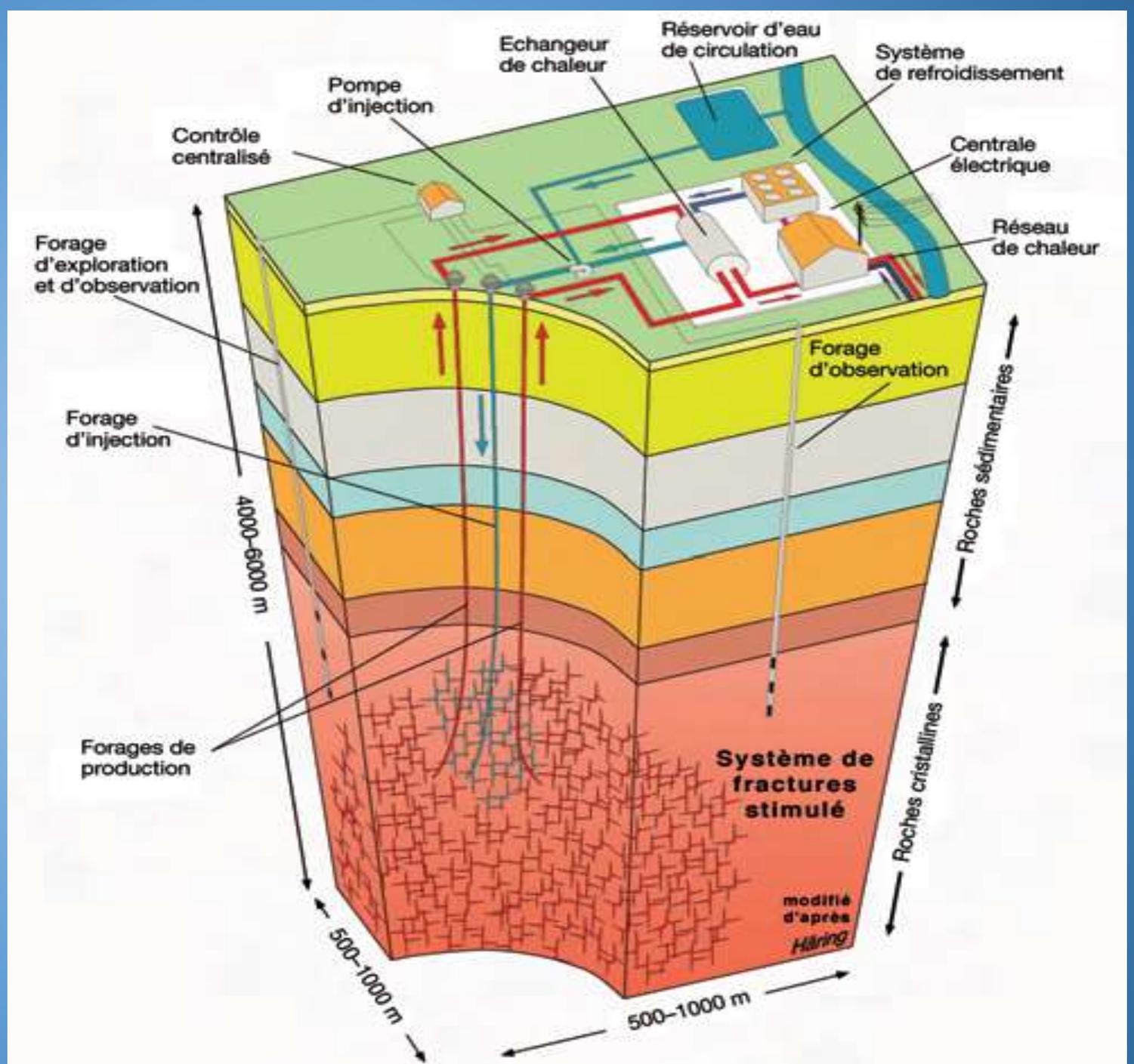
Tube échangeur  
de chaleur en U

Profondeur et température  
du forage (110-130 cm, 12-14 °C)

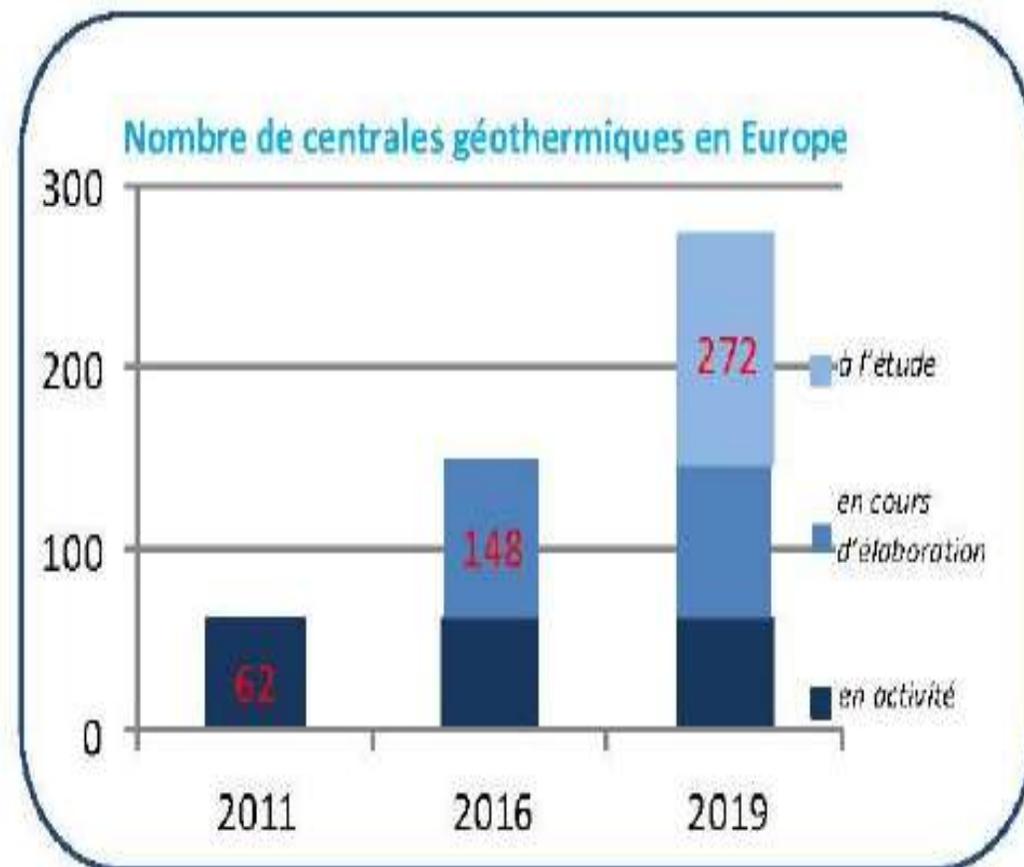
Schéma type d'un doublet géothermique alimentant un réseau de chauffage à distance



# Schéma de fonctionnement d'une installation géothermique de grande profondeur

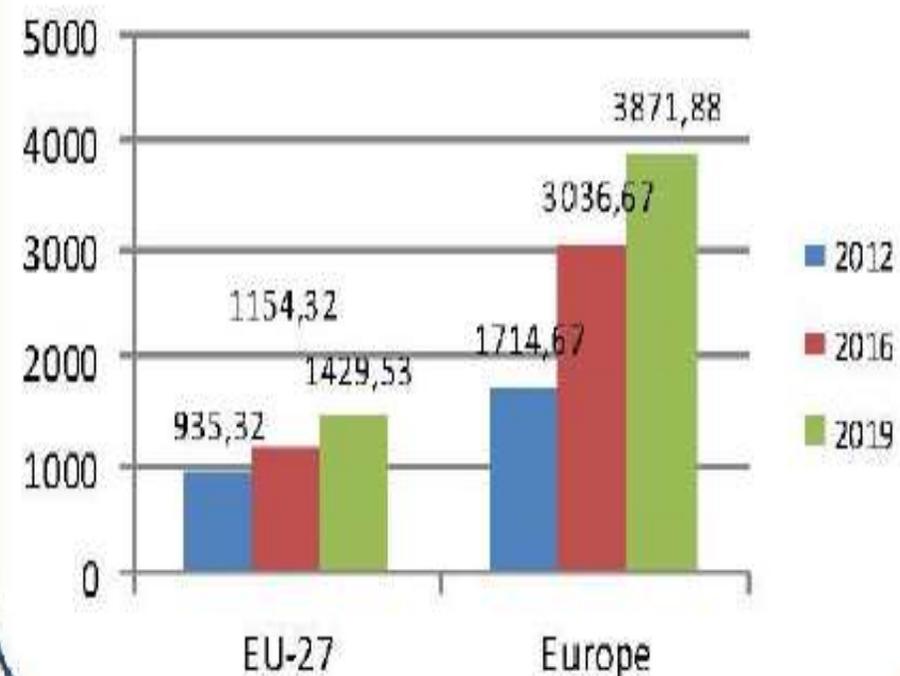


- La production d'électricité géothermique témoigne d'un regain de popularité en Europe. Il y a **62** centrales géothermiques en activité dont **48** situées dans les pays membres de l'UE, principalement en Italie, où sont implantées **35 centrales**.
- **86** centrales sont actuellement en cours d'élaboration (un projet géothermique nécessite généralement 5 à 7 ans pour être opérationnel) et **98** sont en phase d'exploration.

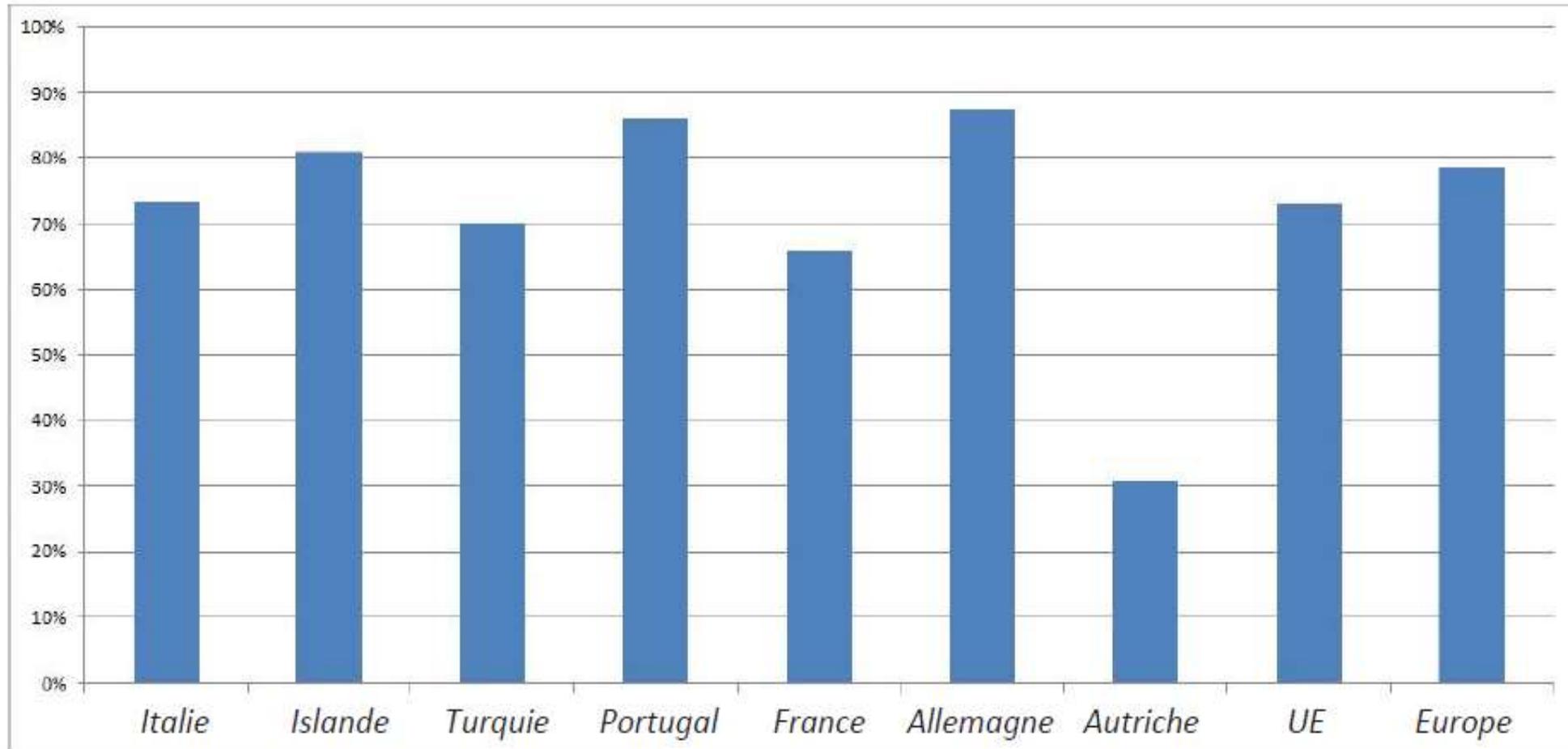


- En 2012, la puissance totale installée en Europe était de **1,71 GWe**, produisant **11,38 térawatt-heure (TWh)** d'électricité par an.
- En considérant les centrales en cours d'élaboration, la puissance installée atteindra environ **3 GWe** en 2016, tandis que les projets à l'étude apporteraient une puissance supplémentaire de 1 GWe, et une puissance de presque 4 GWe d'ici 2019.

*Puissance installée d'électricité géothermique (en MWe)*



- La géothermie permet une production de base d'électricité renouvelable et souple. Étant donné que la ressource n'est pas soumise aux conditions climatiques, les centrales géothermiques fonctionnent généralement plus de 70 % du temps (jusqu'à 95 % pour les centrales les plus récentes). Le cas particulier de l'Autriche s'explique par le fait que ses trois centrales électriques de cogénération sont spécialement conçues pour des systèmes de chauffage urbain.



- Trois types de centrale électrique géothermique sont en activité en Europe : centrale conventionnelle (hydrothermale), centrale à cycle binaire et centrale EGS (*Enhanced Geothermal System* : Système de géothermie stimulée). Si les centrales actuellement en activité sont majoritairement des centrales conventionnelles, l'avancée constante des autres techniques ainsi que la flexibilité géographique du système EGS permettront une progression des deux autres types de centrales. Par exemple, les centrales EGS, qui sont au nombre de 3 actuellement, seront sans doute 49 d'ici 2020.



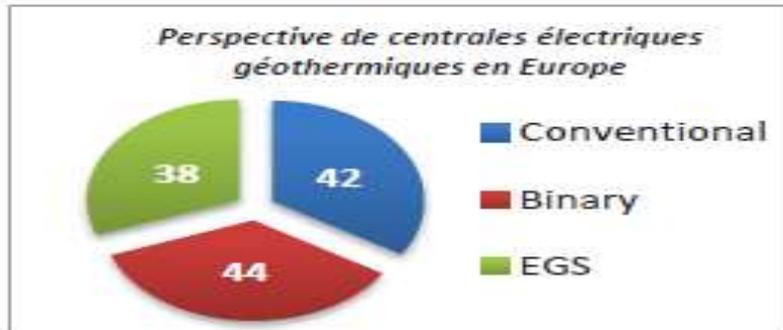
**ACTUELLEMENT**

Conventionnelle = 85 %  
 Cycle binaire = 12 %  
 EGS = 3 %



**À COURT TERME**

Conventionnelle = 73 %  
 Cycle binaire = 20 %  
 EGS = 7 %



Conventionnelle = 55 %  
 Cycle binaire = 27 %  
 EGS = 18 %

L'électricité géothermique connaît un essor important depuis quelques années et, en 2013, quelques 11,38 TWh d'énergie électrique ont été produites en Europe grâce à une puissance totale installée d'environ 1,71 GWe.

Selon les Plans d'action nationaux pour l'énergie renouvelable (NREAP) des États-membres de l'UE, la puissance passera de 0,9 GWe, installée en 2013, à 1,4 GWe en 2020. La production d'électricité géothermique prévue pour 2020 est de 11 TWh.

Pour l'Europe, la production totale passera de 11,4 TWh à 16,7 TWh, cette forte augmentation étant due à la croissance rapide des marchés turcs et islandais.

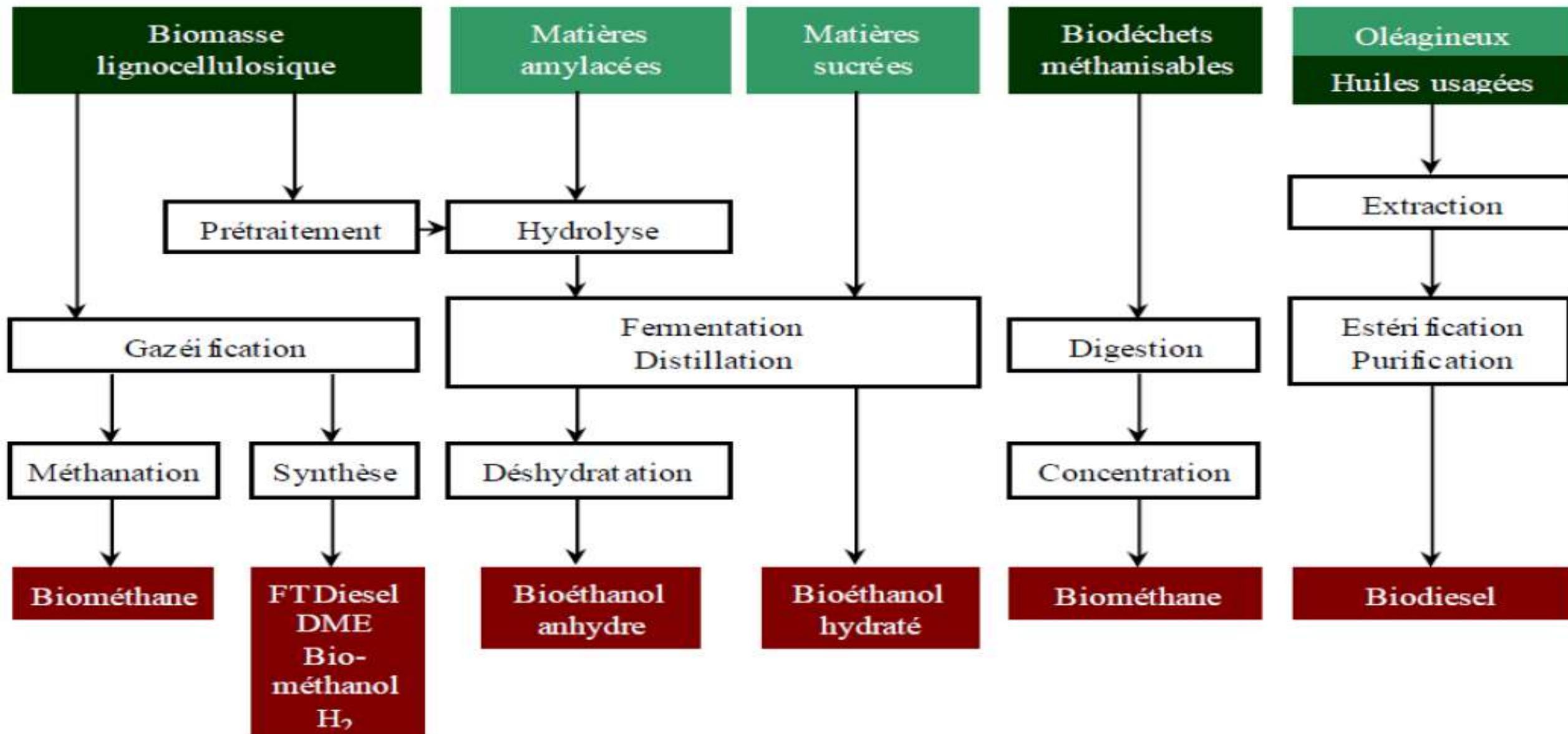
**Le potentiel économique de l'énergie géothermique est beaucoup plus élevé en 2020 :**

- **21,2 TWh pour l'UE-28 ;**
- **70,8 TWh pour le potentiel total de l'Europe.**

# Biomasses

de 1<sup>ère</sup> génération

de 2<sup>ème</sup> génération



### Plantes sucrières



La betterave et la canne à sucre sont simplement broyées et pressées pour obtenir un jus sucré.

### Plantes amylicées



L'amidon doit être hydrolysé en sucres. L'hydrolyse est réalisée par des enzymes (amylases et amyloglucosidases)



Les sucres sont transformés en éthanol par fermentation grâce à l'action de micro-organismes dont les plus connus sont des levures du genre *Saccharomyces*. Vient ensuite une étape de distillation qui sépare l'alcool de l'eau.

FERMENTATION  
DISTILLATION

CO-PRODUITS  
(Glycol, glycérine)



ÉTHANOL