

# DOSSIER PEDAGOGIQUE

## L'eau et l'énergie

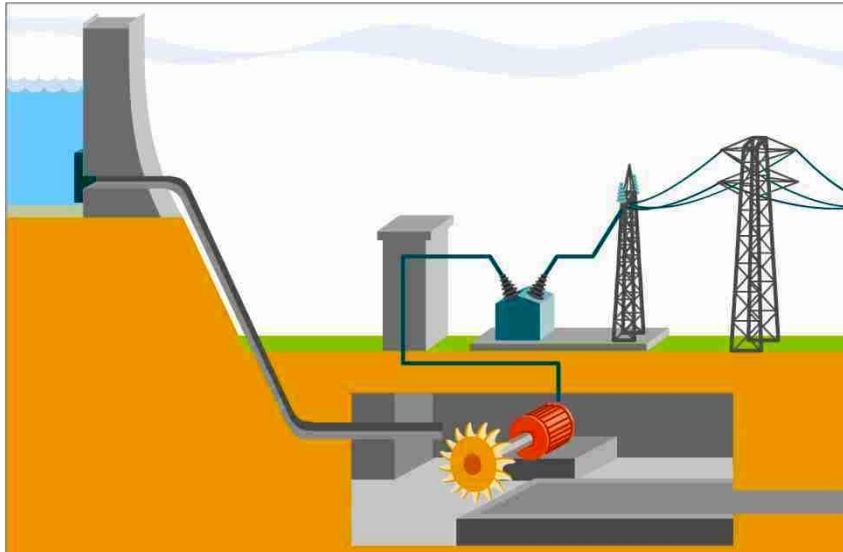
### L'énergie au fil des eaux...

*Si on contemple la Terre depuis l'espace on voit que la couleur principale est le bleu, d'où son nom la « planète bleue ». Le bleu est la couleur des océans qui recouvrent deux tiers de la surface de la Terre. L'abondance de l'eau est favorable au développement de l'énergie hydraulique, qui ne consomme et n'altère pas la qualité de l'eau. La force de l'eau est l'une des premières énergies maîtrisée par l'homme. Depuis l'Antiquité les hommes utilisaient des moulins à eau pour mouliner le grain. De nos jours la force de l'eau est utilisée pour produire de l'énergie. Les barrages hydroélectriques, les barrages marémoteurs, les centrales houlomotrices, les hydroturbines utilisent et convertissent l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique. La chaleur enfouie dans les profondeurs de la Terre est accessible et utilisable par l'Homme. La technologie actuelle permet également d'extraire de l'énergie au cœur même de la molécule d'eau*

# L'eau et l'énergie

## Qu'est-ce qu'une centrale hydroélectrique ?

Une centrale hydroélectrique utilise de l'énergie mécanique fournie par une masse d'eau en mouvement pour produire de l'énergie électrique. Un barrage retient une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue.



Centrale hydroélectrique - source : <http://jeunes.edf.com/>

## Que se passe-t-il d'un point de vue énergétique ?

→ L'eau en altitude possède une énergie de position mais pas d'énergie cinétique (elle est immobile).

→ Lorsque l'on ouvre le réservoir, l'énergie de position se transforme en énergie cinétique : l'altitude de l'eau baisse pendant que sa vitesse augmente.

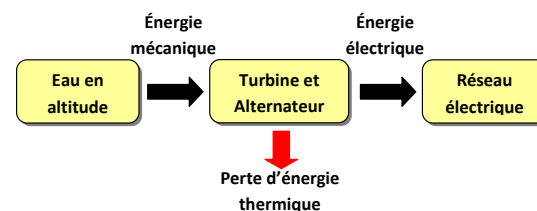
→ Cette énergie cinétique se transforme en énergie électrique grâce au couple turbine-alternateur et en énergie thermique perdue.



L'interaction entre le rotor et le stator (bobines de fils de cuivre fixes) de l'alternateur, crée le courant électrique grâce au phénomène d'induction.

L'eau en mouvement fait tourner la turbine.

La turbine fait tourner l'axe sur lequel est fixé l'électroaimant (rotor) de l'alternateur



## Pourquoi l'énergie

## hydroélectrique ?

- L'énergie hydraulique est une énergie inépuisable si elle est bien gérée.
- Elle n'émet pas de gaz à effet de serre et ne produit aucun déchet toxique.
- Elle permet de stocker et produire de très grandes quantités d'énergie sous forme d'énergie de position et ainsi d'alimenter de nombreux foyers.

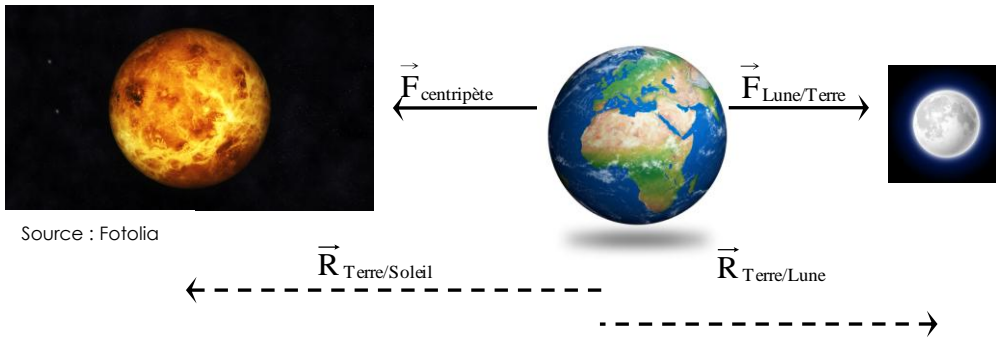
## Existe-t-il des inconvénients liés à l'hydroélectricité ?

- Les inconvénients ne sont pas liés à l'hydroélectricité mais à la construction des barrages si elle ne tient pas compte des paramètres environnementaux, humains et sociaux.
- Coût économique pouvant être important.
  - Modifications du paysage et de l'environnement.
  - Déplacements de population.

# Peut-on utiliser les mouvements de la mer pour produire de l'électricité ?

De la même manière que la centrale hydroélectrique, il est possible de transformer l'énergie mécanique de la mer en énergie électrique directement utilisable par l'Homme. On distingue l'énergie marémotrice qui utilise le mouvement des marées, l'énergie houlomotrice qui utilise le mouvement des vagues au large et l'énergie hydrolienne qui utilise les courants marins et fluviaux.

## L'énergie marémotrice

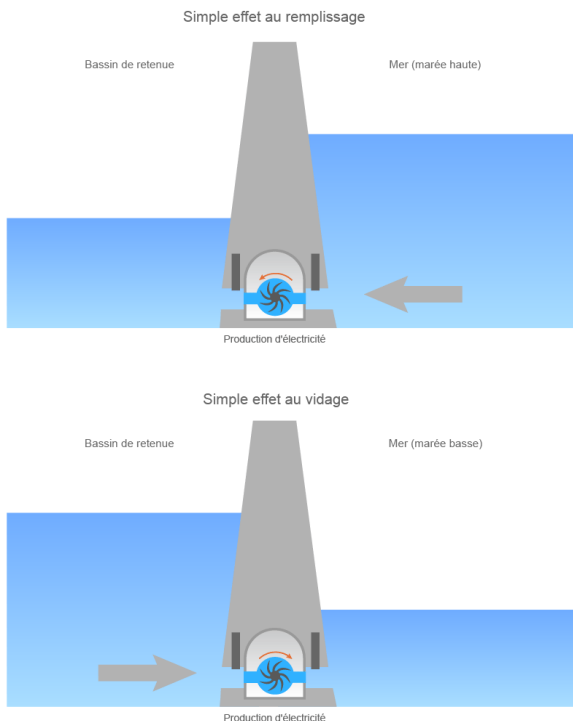


Source : Fotolia

<b>Force centripète</b> $\vec{F}_{\text{centripète}}$	<b>Force gravitationnelle</b> $\vec{F}_{\text{Lune/Terre}}$
$\vec{F}_{\text{centripète}} = \frac{m_{\text{Terre}} v^2}{(R_{\text{Terre/Soleil}})^2} \vec{R}_{\text{Terre/Soleil}}$	$\vec{F}_{\text{Lune/Terre}} = \frac{G \cdot m_{\text{eau}} \cdot m_{\text{Lune}}}{(R_{\text{Terre/Lune}})^3} \vec{R}_{\text{Terre/Lune}}$
Avec : $m_{\text{Terre}}$ : la masse de la Terre ; $v$ : la vitesse de rotation de la Terre autour du Soleil ; $R_{\text{Terre/Soleil}}$ : la distance en le centre de la Terre et le centre du Soleil.	Avec : $m_{\text{eau}}$ : la masse d'eau déplacée ; $m_{\text{Lune}}$ : la masse de la Lune ; $R_{\text{Terre/Lune}}$ : la distance entre e centre de la Terre et le centre de la Lune.

### D'où viennent les marées ?

Les marées sont la conséquence de deux forces appliquées sur la Terre :  
 → La force d'attraction gravitationnelle exercée essentiellement par la Lune sur la Terre (cette force est plus intense si l'astre en question est proche de la Terre et sa masse importante).  
 → La force centripète liée à la rotation de la Terre sur son orbite, et qui s'exerce de manière identique en tout point du globe.



Production d'électricité  
 Source : www.connaissancesdesenergies.org

La récupération d'énergie renouvelable grâce à la marée sur le littoral existe depuis très longtemps. Les moulins à marée construits sur les côtes de l'ouest de la France au Moyen-Âge en témoignent. Très peu exploités à ce jour, le potentiel de l'énergie marémotrice dans le monde est estimé à près de 380 TWh par an, soit 1,5% à 2% de la production électrique mondiale annuelle. De nombreux pays présentent des conditions environnementales appropriées pour développer des projets marémoteurs à moyen terme : l'Argentine, l'Australie, le Canada, la Chine et l'Inde, le Royaume-Uni, la France, la Corée du Sud.

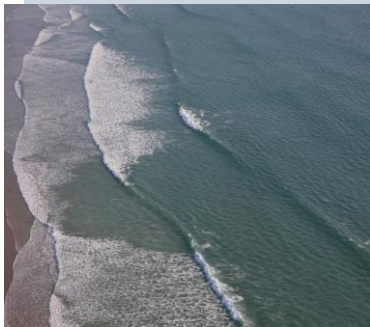
## L'énergie houlomotrice

### D'où viennent les vagues ?

La principale cause de la formation des vagues est le vent et non la marée comme on le croit souvent. Celui-ci est créé en se déplaçant d'un anticyclone (zone de haute pression) vers une dépression. Ainsi, à la surface de l'eau, le vent s'écoule de façon turbulente et provoque l'apparition d'ondulations plus ou moins marquées en fonction de sa force.

### Qu'est ce que la houle ?

La houle ou vague est une onde mécanique qui se propage à la surface de la mer. Comme toutes les ondes, une vague est caractérisée par une longueur d'onde (distance entre deux vagues consécutives), une amplitude (hauteur maximale de la vague), une période temporelle (durée entre le passage de deux vagues consécutives) et une célérité (vitesse de propagation des vagues).



Source : Fotolia

### Comment peut-on récupérer cette énergie ?

Le développement technologique de l'énergie houlomotrice se poursuit depuis plus de 20 ans. Encore peu présente en France, elle se développe dans plusieurs pays européens qui utilisent déjà une deuxième génération d'outils offshore, par exemple en Écosse et au Portugal.

**Le projet Pélamis**, de type chaîne de caissons flottants (reliés entre eux par des charnières articulées, les vagues déplacent les caissons selon leurs mouvements. L'énergie est récupérée au niveau des articulations mobiles entre chaque caisson grâce à des pistons actionnant des pompes à huile sous pression). C'est, aujourd'hui, le projet le plus avancé dans ce domaine.

**Le projet Limpet** est testé depuis 2000 sur l'île d'Islay (Écosse). Il recourt à la technologie des colonnes d'eau oscillantes côtières (les vagues sont recueillies en fin de course, l'eau entre dans un caisson où elle comprime de l'air qui fait tourner une turbine entraînant un générateur électrique) pour une puissance de 500 kW.

**Un prototype Wave Dragon** est lancé en 2007 au pays de Galles. Il utilise la technologie de plateforme à déferlement (la vague déferle sur un plan incliné et est recueillie sur un bassin en hauteur dans lequel l'eau actionne une turbine, puis retourne à la mer) pour une capacité de 7 MW.



Prototype du Pélamis à l'E.M.E.C

Le Searev (Système Électrique Autonome de Récupération de l'Énergie des Vagues) : projet français de l'École Centrale de Nantes.

Le principe du Searev ressemble à celui du Pélamis, il utilise le mouvement des vagues pour actionner des pistons et un moteur hydraulique. La différence réside dans l'action mécanique : tandis que le Pélamis se contorsionne, le Searev, lui, contient une roue pendulaire qui est bloquée par un frein lorsque la vague soulève le Searev. Une fois le Searev penché, la roue est libérée, entraînant des pistons.

## L'énergie hydrolienne

### Quelle est l'origine des courants marins ?

Les courants marins sont principalement créés par l'énergie solaire.

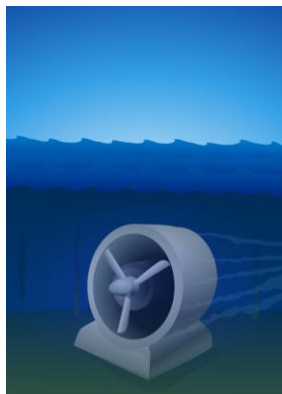
En fonction de la région dans laquelle on se trouve, l'eau reçoit plus ou moins d'énergie solaire. Les zones tropicales en reçoivent beaucoup plus que les zones polaires engendrant des différences de température. Pour rééquilibrer l'ensemble, les océans et l'atmosphère vont se mettre en mouvement, créant ainsi les courants. Ces courants sont appelés courants océaniques.

### Comment récupère-t-on l'énergie des courants ?

Les hydroliennes convertissent l'énergie cinétique des courants marins en énergie électrique, comme le feraient des éoliennes avec le vent.

Ces courants ont pour caractéristiques d'être prévisibles, et particulièrement forts.

L'eau étant 830 fois plus dense que l'air, ces turbines, significativement plus petites que des éoliennes



Exemple d'hydrolienne : source Fotolia

En Europe, des potentiels importants existent : l'Angleterre détient avec la France l'essentiel du potentiel de l'hydrolien.

La France possède de nombreux atouts en raison de la puissance des courants, et plus particulièrement sur la côte Nord-Ouest. Les sites les plus favorables sont essentiellement répartis entre la Bretagne et le Cotentin.

Plusieurs industriels travaillent sur le développement de l'énergie hydrolienne. La France compte aujourd'hui deux réalisations avec l'hydrolienne de Sabella dans l'Odéa en 2008 et l'hydrolienne OpenHydro installée par EDF en 2011 sur le site de Paimpol Bréhat (Côtes d'Armor), centre d'essai pour les hydroliennes

### Comment fonctionne une hydrolienne ?

- Le mât : il est ancré dans le sol au fond de l'eau soutenant la ou les turbines. Le mât est rotatif car les turbines doivent toujours être face au courant pour être fonctionnelles.
- Les turbines ou hélices : c'est la partie mécanique qui convertit l'énergie cinétique du courant en énergie de rotation. C'est aussi la partie sur laquelle sont fixées les pales.
- Les pales : elles sont fixées sur la turbine et permettent de capter le courant et d'entraîner la turbine.
- Le multiplicateur : c'est le système qui convertit la vitesse lente de la turbine en une vitesse rapide adaptée au générateur.
- Le générateur : il convertit l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique.
- La balise : c'est la partie émergente de l'eau qui permet d'avertir les navires de la présence de l'hydrolienne.

### Comparaison hydrolienne/éolienne

	Courants marins		Vent
Vitesse en m/s	1,5	2	13
Puissance en kW/m <sup>2</sup>	1,7	3,9	1,4

## Quelques chiffres

La première Conférence Internationale sur les Energies Renouvelables Marines a eu lieu aux Etats-Unis, à New York en avril 2008.

L'ordre de grandeur de l'énergie naturellement dissipée annuellement par les marées est évalué à 22 000 TWh, soit l'équivalent de deux GTEP (1 TEP (tonne équivalent-pétrole) = 41,9 GJ). Ce chiffre est à comparer à la consommation annuelle d'énergie de l'humanité, de l'ordre de 10 GTEP.

La puissance mécanique de ce phénomène s'exprime en kW par mètre de largeur de crête. Sur la façade atlantique française sont dissipés chaque année 417 TWh (la production du parc nucléaire français est à peu près la même).

La première installation de production d'électricité utilisant l'énergie marémotrice est l'usine marémotrice de la Rance en France. Elle a été installée sur un site qui, avec des marées dont l'amplitude peut atteindre 13 à 14 mètres, avait déjà connu dans l'histoire de nombreux moulins à marée. Les travaux du barrage ont démarré en 1961, et l'usine fut définitivement achevée en 1966.

Le Canada a mis en place 190 sites marémoteurs pour une puissance potentielle totale de plus de 42 000 MW/an, soit près des 2/3 de la demande canadienne d'électricité en 2008.

Le World Energy Council estime que 10% de la demande annuelle mondiale en électricité pourrait être couverts par l'énergie houlomotrice (14 000 TWh).

Selon Alain Clément, concepteur du Searev, l'énergie des vagues présenteraient un « gisement » potentiel de 2 500 W/m<sup>2</sup> ! (contre 400 pour l'éolien et 150 pour le solaire).

Le potentiel des courants marins est très important, EDF estime le potentiel européen hydrolien exploitable à environ 12,5 GW, soit l'équivalent de 12 réacteurs nucléaires de 900 MW et la France, à elle seule, en représente 20% soit 2,5 GW : 2 ou 3 réacteurs nucléaires.

La France profite à elle seule de 80% du potentiel hydrolien d'Europe, principalement en Bretagne et dans le Cotentin. Cela correspond à un potentiel de production d'électricité de 10 TWh par an selon EDF. Pour exploiter ce gisement énergétique, il faudrait 5000 hydroliennes.

### Qu'est-ce qu'un watt ?

Le watt (symbole W) est l'unité de puissance dans le système international (SI). Le terme provient du nom de l'ingénieur écossais James Watt qui a contribué au développement de la machine à vapeur.

Un watt correspond à un échange d'énergie de 1 joule pendant une seconde. Le joule (symbole J) est l'unité d'énergie SI. L'unité doit son nom au physicien anglais James Prescott Joule. Un joule est l'énergie nécessaire pour soulever une masse de 100 g sur une hauteur de 1 m sur Terre.

James Watt (1736-1819)

James Prescott Joule (1818-1889)

Ainsi, un Wh (wattheure) est l'énergie produite ou consommée pendant une heure.

### Pourquoi l'énergie de la mer ?

L'énergie de la mer est propre, naturelle et renouvelable.

Les marées constituent une source d'énergie inépuisable et n'est pas soumise aux aléas climatiques, elle est donc totalement prédictible.

On peut produire une grande quantité d'énergie.

L'impact écologique est mineur.

### Existe-t-il des inconvénients liés à l'énergie de la mer ?

Une usine marémotrice doit être construite dans un endroit où le marnage est très grand et suffisamment large pour permettre l'installation d'un barrage.

La composition des sols doit permettre à l'usine de rester en équilibre.

La corrosion des matériaux par l'eau de mer.

Le bruit des turbines strident et inconfortable.



James Watt (1736-1819)

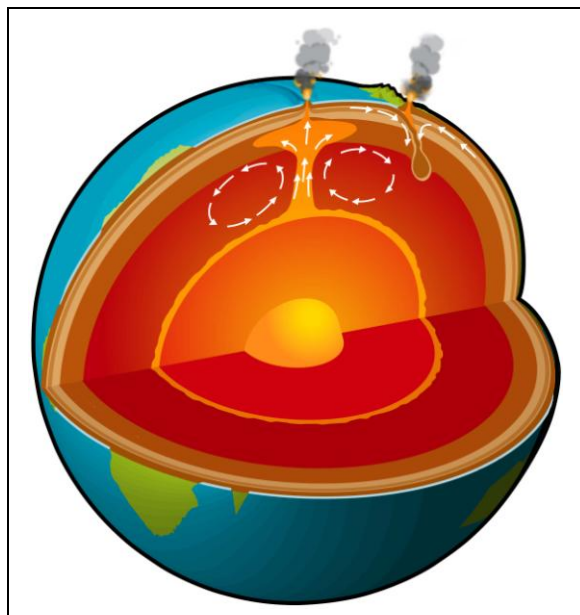


James Prescott Joule (1818-1889)

## L'eau, ça chauffe aussi !

L'eau peut également être une source d'énergie thermique. L'eau des aquifères situés à de très grandes profondeurs est chaude. Il est possible aujourd'hui de pomper cette eau chaude pour la ramener en surface.

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur), désigne la technologie qui vise à l'exploiter l'énergie, dite géothermique, issue du sous-sol terrestre.



Structure interne de la Terre – source BRGM

### De l'eau chaude sous terre ?

Le manteau terrestre chaud transmet sa chaleur à la croûte terrestre, cependant la plus grande partie de l'énergie géothermique en surface (87 %) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium).

### Manifestations naturelles de la géothermie

L'énergie géothermique est présente en tout point du globe. Mais il y a des régions où leur gradient géothermal est plus important, comme aux frontières des plaques tectoniques où le magma peut remonter. La manifestation la plus visible est celle des volcans. Dans ces régions le gradient géothermal peut atteindre 30°C/100m. Les volcans ne sont pas les seuls manifestations, il y a aussi les geysers, les sources d'eau chaudes...



Geyser en Islande – source : Fotolia



Macaques dans une source chaude au Japon – source : Fotolia



Eruption volcanique – source : Fotolia

L'état de l'eau dépend non seulement de la température mais également de la pression, il est ainsi possible d'avoir de l'eau liquide à des températures supérieures à 100°C pour de hautes pressions comme c'est le cas dans les profondeurs de la Terre.

## Comment exploiter l'énergie géothermique ?

L'idée est simple : il s'agit de récupérer l'énergie stockée sous nos pieds et de s'en servir pour chauffer les bâtiments ou produire de l'électricité selon la profondeur dans la croûte terrestre.

### Les différentes géothermies

Type de géothermie	Caractéristiques	Utilisations
Très basse énergie	Nappe à moins de 100 m ; température inférieure à 30°C	Chauffage et rafraîchissement de locaux avec pompe à chaleur.
Basse énergie	30°C < Température < 150°C	Chauffage urbain, industriel, balnéothérapie.
Moyenne et haute énergie	180°C < Température < 350°C	Production d'électricité
Géothermie profonde	Roches chaudes et sèches à plus de 3000 m	Électricité et chauffage au stade de la recherche

### Comment fonctionne une pompe à chaleur géothermique ?

→ Un premier circuit de tuyaux (circuit primaire) remplis d'eau collecte la chaleur à faible profondeur et la fait remonter vers la maison.

→ Le circuit primaire arrive au contact d'un deuxième circuit de tuyaux (échangeur thermique) remplis d'un fluide caloporteur comme le glycol (fluide permettant de transporter la chaleur) et le réchauffe, le faisant passer à l'état de gaz.

→ Il gagne le compresseur : comme son nom l'indique, cette petite machine alimentée en électricité comprime le gaz pour augmenter sa température. Le gaz chauffé arrive au contact d'un troisième circuit de tuyaux (circuit secondaire) remplis d'eau et lui cède sa chaleur. Ce circuit alimente le plancher chauffant partout dans le bâtiment et permet de le chauffer.

→ Le gaz du circuit secondaire se refroidit. Il arrive dans le détendeur, qui fait le travail inverse du compresseur en jouant sur la pression : le gaz redevient liquide. Il poursuit sa route jusqu'à rencontrer de nouveau le circuit primaire qui ne cesse de rapatrier la chaleur du sous-sol... Et c'est reparti pour un tour !

Une pompe à chaleur montée à l'envers est un réfrigérateur ! La géothermie peut donc assurer non seulement la production de chaleur en hiver, mais aussi la production de froid en été.

Il existe plus de 350 installations géothermiques productrices d'électricité dans le monde. En 2010, leur puissance totale était estimée à 10 700 MW, contre 8 000 MW en 2000.

La géothermie représente 0,4% du mix électrique mondial. D'après les chiffres de 2009, il s'agit de la quatrième source d'électricité renouvelable dans le monde après l'hydraulique, l'éolien et la biomasse.

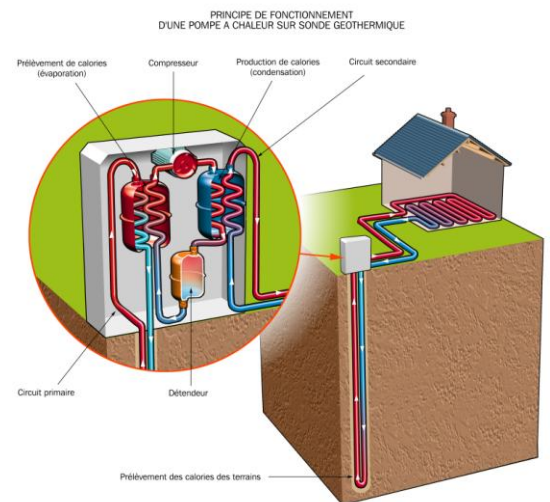
La géothermie est une énergie peu polluante voire non polluante.

La géothermie est donc partout, sur tous les continents, offrant un potentiel quasiment infini en ce qui concerne l'exploitation.

La géothermie est une énergie renouvelable.

La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent...).

La géothermie est la 3ème énergie renouvelable en France, en terme de production annuelle de chaleur et de froid. Chaque année, ce sont 30 000 t de CO2 non émis et 10 000 t de pétrole d'économisés.



Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique  
Source : BRGM

- 1) L'eau s'infiltré dans les failles de la croûte terrestre pour créer un réservoir à haute température.
- 2) Grâce à une pompe, l'eau chaude est ramenée à la surface. Pendant la montée, la pression baisse et l'eau se transforme en vapeur.
- 3) La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.
- 4) Un transformateur élève la tension électrique pour le transport dans les lignes haute-tension.



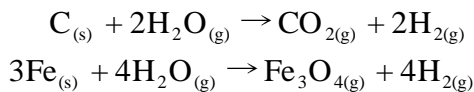
# L'eau comme source d'hydrogène ?

L'eau est la source d'hydrogène la plus abondante. Associé à la pile à combustible, il permet de produire de l'électricité en ne rejetant que de l'eau. Le deutérium et le tritium, isotopes de l'hydrogène, constituent le combustible de la fusion nucléaire contrôlée.

## Des expériences historiques

En 1789, Antoine Lavoisier, chimiste français, publie les résultats d'une série d'expériences mettant en évidence un nouveau gaz, le dihydrogène à partir de l'eau. En effet, la molécule d'eau, H<sub>2</sub>O, est constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène.

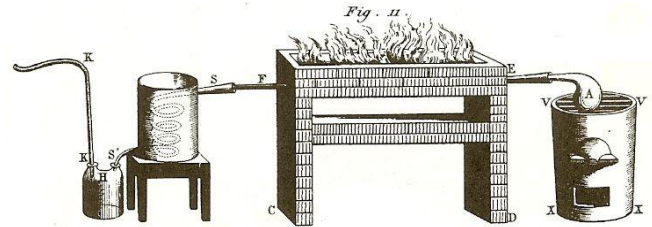
Il fit réagir du carbone porté à incandescence ou du fer avec de la vapeur d'eau :



Aujourd'hui, le dihydrogène est obtenu par électrolyse de l'eau, processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. La première électrolyse de l'eau en ses deux composants a été réalisée le 2 mai 1800 par deux chimistes britanniques, William Nicholson et Sir Anthony Carlisle quelques jours après l'invention de la première pile électrique par Alessandro Volta donnant naissance à l'électrochimie.



**Antoine Laurent de Lavoisier** (1743-1794) à Paris, est un chimiste, philosophe et économiste français. Il a énoncé la première version de la loi de conservation de la matière, démis la théorie phlogistique, baptisé l'oxygène et participé à la réforme de la nomenclature chimique. Il est souvent fait référence à Antoine Laurent de Lavoisier en tant que père de la chimie moderne.



Dispositif expérimental utilisé par Lavoisier



La pile de Volta



Le comte **Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta** (1745-1827), est un physicien italien. Il est connu pour ses travaux sur l'électricité et pour l'invention de la première pile électrique, appelée pile voltaïque. En son hommage, l'unité de mesure de la tension électrique est le volt (symbole V).

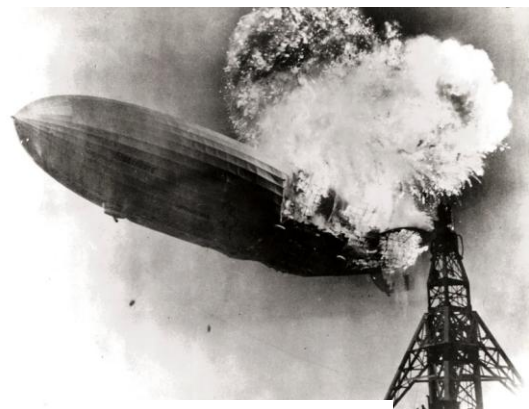
La pile de Volta est formée par un empilement, d'où son nom, de petits disques de cuivre et de zinc alternés. Chaque disque de cuivre est séparé du disque de zinc sous-jacent par une surface de tissu ou de feutre imbibé de saumure, solution aqueuse salée, alors que le disque de cuivre suivant est en contact direct avec le disque de zinc qu'il surplombe.

L'hydrogène n'est pas toxique quoique non respirable. C'est un gaz classé extrêmement inflammable.

**Dihydrogène** : H<sub>2</sub> ; M = 2,016 g/mol ; H<sub>2</sub>O,



Début de l'incendie du Hindenburg le 6 mai 1937 dans le New Jersey. D'une longueur de 247 mètres, le dirigeable, remplis de dihydrogène, brûle en quelques secondes à l'atterrissage. La mise à la terre du ballon au moyen de câbles métalliques aurait causé une étincelle et l'inflammation du gaz. L'accident fit 35 morts



Le dirigeable Hindenburg

## La pile à combustible

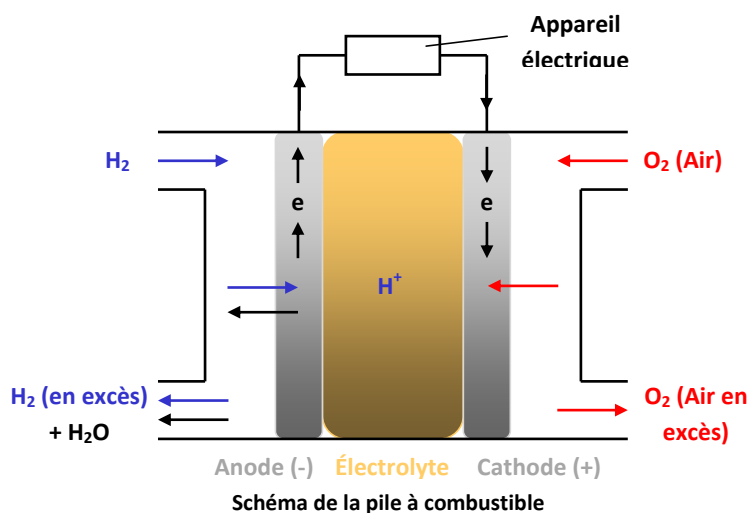
**L'hydrogène figure parmi les nouvelles sources d'énergies** susceptibles de pallier la pénurie des énergies fossiles et de limiter à long terme les rejets de gaz à effet de serre. En effet, employé comme combustible dans une pile à combustible (PAC), il fournit de l'énergie électrique et de la chaleur avec de l'eau comme seul résidu !

Le fonctionnement d'une pile repose sur une réaction d'oxydoréduction au cours de laquelle il y a transformation de l'énergie

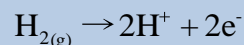
**À partir de 1960**, la Nasa utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini).

La pile à combustible est promise à un bel avenir. Outre ses applications dans le transport, elle peut être miniaturisée et servir de chargeur pour des appareils nomades, tels que téléphone, ordinateur... Son introduction dans le mix énergétique ne présente un véritable intérêt que lorsqu'il est produit à partir des énergies renouvelables.

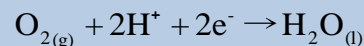
Actuellement, le rendement de conversion en énergie électrique varie selon le type de pile et est généralement supérieur à 50 %. L'énergie non convertie en énergie électrique est émise sous forme de chaleur et est évacuée sous forme d'eau chaude ou de vapeur.



À l'anode, le dihydrogène est oxydé, libérant un proton  $H^+$  et deux électrons :

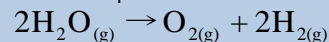


À la cathode, l'oxygène est réduit par réaction avec les protons et les électrons formés :



Les protons sont transférés par l'électrolyte (résine, polymère...) et les électrons sont transférés par le circuit électrique extérieur.

La réaction globale de la pile s'écrit :



Il s'agit de la synthèse de l'eau.

### Avantages de la pile à combustible :

Les qualités environnementales des piles à combustible et leur excellent rendement contribueraient à la préservation de l'environnement.

Son fonctionnement est silencieux contrairement aux moteurs ou aux turbines.

La technologie moderne a permis de résoudre un handicap majeur de la pile : son encombrement.

Pour les applications mobiles, la température de l'intérieur du moteur n'atteint que  $80^\circ C$  au maximum alors que la température du cœur d'un moteur diesel est de plus de  $1000^\circ C$ .

La pile à combustible ne provoque aucun mouvement : il n'y a donc pas d'usure et elle ne nécessite, par conséquent, aucun entretien.

## La fusion nucléaire contrôlée

### La fusion nucléaire ?

La fusion est le mariage de noyaux légers qui donne naissance à des noyaux plus lourds comme l'hélium, par exemple. Elle s'accompagne d'une très forte libération d'énergie.

Cette réaction est difficile à réaliser car les forces nucléaires qui lient les nucléons n'agissent qu'à très faible distance alors que les noyaux des atomes, qui sont chargés positivement, se repoussent. Pour passer cette barrière de répulsion, les noyaux doivent se trouver dans un état d'agitation thermique très grand. C'est le cas lorsqu'ils sont portés à très haute température. La fusion existe naturellement dans les environnements extrêmement chauds que sont les étoiles, comme le Soleil. Il y a, au cœur du Soleil, une température de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de degrés qui permet la fusion de noyaux légers comme ceux d'hydrogène en hélium. Ces réactions de fusion thermonucléaire libèrent beaucoup d'énergie et expliquent la très haute température de cet astre qui atteint en surface les 5700 °C.

Sources : le site du CEA et l'Atlas des énergies par Bertrand Barré (édition autrement)

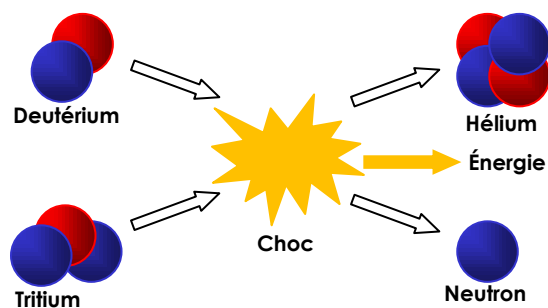
### Un Soleil sur Terre ?

L'homme cherche à maîtriser les réactions de fusion pour récupérer cette fabuleuse énergie. Il a réussi à maîtriser celle-ci dans les bombes nucléaires de type H mais pas encore pour produire de l'électricité. Pour une application civile de la fusion, la réaction la plus étudiée est la fusion de deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium qui fusionnent pour créer un noyau plus lourd, celui de l'hélium. Pour atteindre des températures très élevées et des densités suffisantes de noyaux et pour augmenter la probabilité qu'ils se rencontrent, l'Homme se heurte à de nombreuses difficultés techniques.

Le 28 juin 2005, sept grands partenaires (Union européenne, Japon, Fédération de Russie, États-Unis, Chine, Corée du Sud et Inde) ont décidé de construire en commun à Cadarache (Bouche du Rhône) le plus gros Tokamak du monde appelé ITER (International Tokamak Experimental Reactor). Cette installation devrait commencer ses expériences en 2016. ITER doit apporter la démonstration physique de la fusion contrôlée et stabilisée.

#### La fusion présente quatre avantages majeurs :

- Une production d'énergie abondante
- Des ressources en combustible abondantes et peu coûteuses (eau des océans).
- Pas dangereux : il est très simple et très rapide de stopper la réaction en cas de disfonctionnement.
- Il s'agit d'une énergie propre : pas de pollution à long terme, la production du combustible est également non polluante.



Réaction de fusion du deutérium et du tritium libérant de l'hélium et de l'énergie

Source d'énergie	Combustible nécessaire pour produire 1000 MW/an
Charbon	2 600 000 tonnes
Pétrole	1 800 000 tonnes
Fission de l'uranium	25 tonnes d'uranium enrichi
Fusion de	100 kg de deutérium et 150 kg