

RESUME

MOYENS DE PRODUCTION CENTRALISE ET DECENTRALISE

(1M-RE : 2018-2019)

Sommaire

Note méthodologique	7
Présentation des modes de production d'énergie	12
1 Centrales nucléaires à fission	13
2 Centrales thermiques à flamme	14
3 Turbines à combustion (TAC)	15
4 Centrales à cycles combinés	16
5 Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes	17
6 Centrales électriques à combustion biomasse solide	18
7 Unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM).....	19
8 Unités de valorisation énergétique du biogaz (méthanisation)	20
9 Unités de valorisation énergétique du gaz de synthèse (gazéification)	21
10 Centrales hydroélectriques	22
11 Usines marémotrices	23
12 Fermes hydroliennes	24
13 Fermes houlomotrices	25
14 Fermes éoliennes terrestres	26
15 Fermes éoliennes marines.....	27
16 Systèmes solaires photovoltaïques	28
17 Systèmes solaires thermiques	29
18 Chaudières fioul / gaz	30
19 Chaudières biomasse	31
20 Poêles & Cheminées	32
21 Pompes à chaleur	33
22 Radiateurs électriques	34
Bibliographie	35
Acronymes	37
Crédits des pictogrammes	38

Note méthodologique

La monographie des moyens de production d'énergie se présente sous forme d'un recueil de fiches synthétiques, construites sous un format standard. Le parti pris d'homogénéité dans la présentation des systèmes énergétiques vise à faciliter leur comparaison, quels que soient leurs natures, leurs dimensions ou encore leurs usages.

Les technologies sont comparées sur un ensemble de critères de différentes natures :

- Caractéristiques techniques et performances (efficacité, flexibilité, modularité, etc.)
- Pertinence économique (valeur ajoutée pour les systèmes énergétiques, coût relatif de la ressource, etc.)
- Impact socio-environnemental (caractère renouvelable ou non de la ressource, émissions de gaz à effet de serre, acceptabilité sociétale, etc.)

Des informations quantifiées sont fournies uniquement pour certains critères techniques. L'impact environnemental ainsi que les données économiques (coût du système, coût de l'énergie produite, balance commerciale, etc.) n'ont pas été quantifiés dans cette étude. Le choix a en outre été fait de s'extraire au maximum du contexte d'aides publiques incitatives (tarifs d'achat, appels d'offres, etc.), afin de ne pas influencer sur la comparaison entre technologies.

Chaque moyen de production d'énergie a été analysé dans son périmètre propre. Ainsi, les caractéristiques et performances annoncées ne prennent pas en compte de briques supplémentaires susceptibles de modifier le fonctionnement global, d'accroître les performances ou d'apporter une solution à certaines contraintes techniques.

Chaque fiche est construite selon le modèle présenté ci-après.

Nom du moyen de production

Description synthétique du fonctionnement et des caractéristiques techniques

Schéma de principe

Atouts & Contraintes

14 Formes éoliennes terrestres

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité via un rotor, les pales, ainsi qu'un dispositif électromécanique. La puissance fournie étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, la performance de l'éolienne dépend de l'emplacement ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles. L'énergie du vent peut être captée à partir d'une vitesse de 3 m/s, pour une performance maximale atteinte à partir de 12 m/s à 15 m/s. Les éoliennes sont mises à l'arrêt au-delà d'une vitesse de vent seuil (variable selon les modèles).

Les modèles les plus répandus sont les éoliennes à axe horizontal à 3 pales, avec une vitesse variable. Alors que les modèles initiaux étaient conçus avec des rotors à vitesse fixe, les exigences des opérateurs de réseaux pour une électricité de meilleure qualité ont fait évoluer les technologies vers une variabilité croissante de la vitesse des rotors. Une évolution majeure concerne également le passage des électroaimants à des aimants permanents, plus fiables et efficaces à charge partielle.

1 Pales (rotor)
2 Nacelle
3 Transformateur

Credits : Adapté d'EDF

Chaîne de conversion énergétique

Rendement < 44%

Le rendement d'une éolienne ne peut dépasser 59% (limite de Betz), en tenant compte des différentes pertes, les éoliennes commerciales atteignent un rendement d'environ 75% de la limite de Betz.

Credits : Parc éolien Le Haut-Corlay (22), ADEME

Atouts (+)

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Intermittence de fonctionnement compensée par le foisonnement des régimes de vent sur l'ensemble du réseau
- Conception, installation et maintenance aisées
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

Contraintes (-)

- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variable dans le temps et dans l'espace de la ressource)
- En raison de la topographie, l'éolien terrestre profite de régimes de vents moins stables qu'en mer
- Incertitude dans la prévision de la ressource
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (pollution visuelle et sonore)

Gamme de puissance

20 MW (Ferme)
10 éoliennes
2 MW (Éolienne industrielle)
1 éolienne
5 kW (Éolienne domestique)
10 éolies

Taux de disponibilité

97%

Disponibilité technique du système (la disponibilité de la ressource en vent n'est pas prise en compte).

Durée de fonctionnement

6000-7500 h/an

Une éolienne fonctionne le plus souvent à charge partielle. L'électricité produite est fatale.

Facteur de charge

20-25%

Le facteur de charge dépend de la situation géographique. En Bretagne, il s'élevé en moyenne à 20-25%.

Chaîne de conversion énergétique et rendement

Illustration

Indicateurs techniques:

- Gamme de puissance
- Taux de disponibilité
- Durée de fonctionnement
- Facteur de charge

+ : Atouts ou avantages

- : Contraintes ou inconvenients

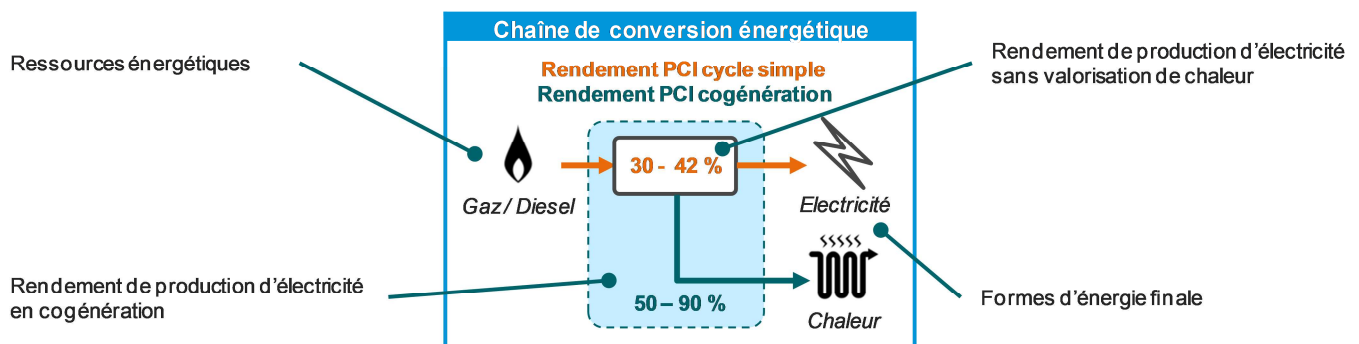
Chaîne de conversion énergétique

Les différentes étapes de conversion d'énergie sont présentées sous une forme schématique simplifiée, en faisant apparaître les formes d'énergie en entrée et en sortie, ainsi que les différents rendements.

Le **rendement énergétique**, exprimé en %, est globalement défini comme le rapport entre l'énergie récupérée en sortie du système et l'énergie fournie en entrée. Cette expression du rendement est affinée pour les systèmes incluant une transformation thermique à partir d'un combustible. Ainsi, on parlera pour les systèmes à combustion de **rendement PCI** (Pouvoir Calorifique Inférieur) qui traduit la quantité de chaleur dégagée lors d'une combustion complète, en supposant que l'énergie latente de vaporisation de l'eau et les produits de réaction ne sont pas récupérés.

Une autre expression du rendement est le **COP** (Coefficient de Performance), exprimé en chiffre, applicable aux pompes à chaleur. Le COP est le rapport entre la chaleur finale récupérée et le travail fourni au système.

Concernant les moyens de production thermique d'électricité (turbines, moteurs), l'information de rendement de génération électrique est complétée par la donnée d'un rendement de **cogénération**. La cogénération est un procédé propre aux moyens de production thermique d'électricité consistant à produire de manière couplée électricité et chaleur. La chaleur valorisée est récupérée au sein même du procédé de production d'électricité, grâce à un système d'échange thermique en contact avec les gaz de combustion, les fluides de refroidissement, etc. La cogénération permet donc d'accroître le rendement global du système, qui varie fortement en fonction de la fraction de chaleur récupérée et valorisée.



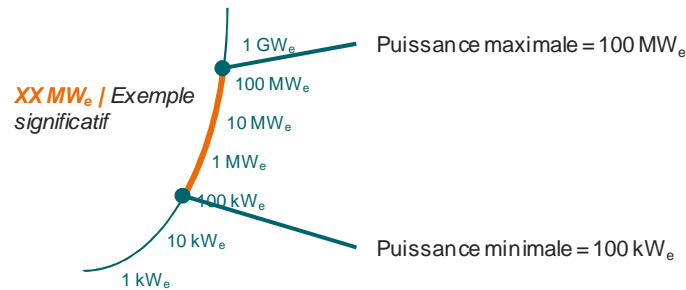
L'expression du rendement énergétique rencontre ses limites lorsqu'une valorisation de chaleur est en jeu. En effet, la qualité de la chaleur valorisée dépend de son niveau de température, ce qui n'est pas pris en compte dans l'expression du rendement. Afin de prendre en compte la dégradation de l'énergie, il est possible de définir un **rendement d'exergie**. L'exergie mesure l'énergie « utile » qui peut être extraite d'un réservoir ou d'un flux énergétique (en termes thermodynamiques, elle est définie comme une grandeur permettant d'évaluer le travail maximum que peut fournir un système lorsqu'il se met en équilibre thermodynamique avec son environnement). Par exemple, alors qu'un radiateur électrique de type convecteur atteint un rendement énergétique proche de 100%, son rendement exergétique ne s'élève qu'à environ 7%.

Le rendement mesure l'efficacité du système quant à la valorisation de l'énergie. Cette notion doit être relativisée selon qu'il s'agisse d'une ressource disponible et renouvelable (vent, rayonnement solaire) ou d'une ressource fossile à disponibilité limitée. En outre, le rendement s'apprécie au regard des autres paramètres que sont le facteur de charge ou le taux de disponibilité.

Gamme de puissance

L'indicateur de gamme de puissance représente l'éventail des valeurs de dimensionnement possible du système concerné, sur une échelle en kW_e / MW_e / GW_e (kilo / Méga / Giga Watt électrique) ou kW_{th} / MW_{th} / GW_{th} (kilo / Méga / Giga Watt thermique), selon le vecteur énergétique principal. Ainsi, certains systèmes existent sur des gammes très variées, du petit système de quelques kW au système massif de l'ordre du GW (l'hydroélectricité par exemple). A l'inverse, certains systèmes possèdent une gamme de dimensionnement plus restreinte (centrales nucléaires par exemple).

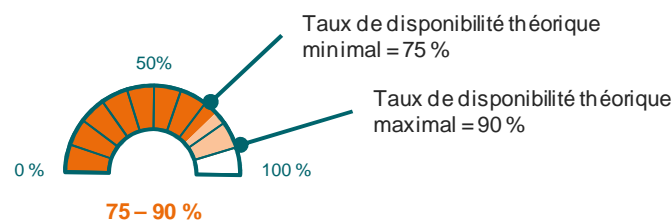
Pour chaque système, des exemples significatifs sont donnés, sans que ceux-ci soient exhaustifs. (Ces données sont généralement limitées au territoire français).



Taux de disponibilité

L'indicateur du taux de disponibilité rend compte de la disponibilité technique théorique du système. Il est défini comme le rapport entre le nombre d'heures durant lesquelles le système est effectivement disponible et le nombre d'heures total sur une année (8760 h/an).

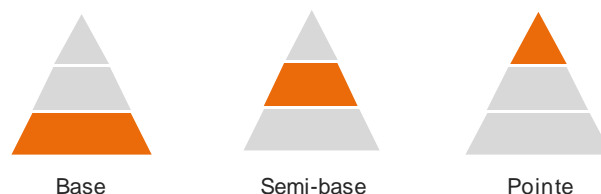
Cet indicateur prend notamment en compte l'indisponibilité due aux opérations de maintenance. Cette valeur est peu représentative pour certains systèmes dont la production est étroitement liée à la disponibilité de la ressource (solaire, éolien, etc.).



Durée de fonctionnement

L'indicateur de la durée de fonctionnement exprime le nombre d'heures par an durant lesquelles le système fonctionne de manière effective. Les systèmes de production d'énergie sont alors classés en 3 catégories :

- base entre 6000 et 8760 h/an,
- semi-base entre 2000 et 6000 h/an
- pointe entre 1 et 2000 h/an

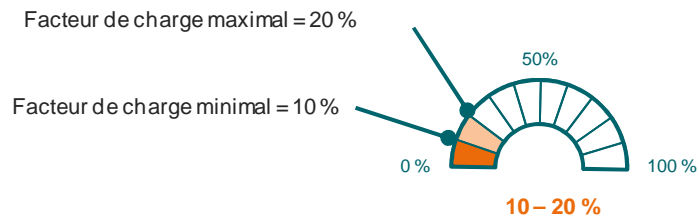


La durée de fonctionnement représente bien le temps durant lequel le système produit de l'énergie et non le taux d'utilisation de la puissance disponible (c'est le facteur de charge qui donnera cette indication). Ainsi, certains systèmes peuvent fonctionner une grande partie de l'année, mais à charge partielle (c'est le cas de l'éolien par exemple).

Finalement, certains systèmes considérés comme de la production de base vis-à-vis du réseau électrique, car produisant dès que la ressource est disponible, ne fonctionnent finalement que la moitié du temps (cas du solaire photovoltaïque par exemple).

Facteur de charge

L'indicateur du facteur de charge traduit le taux d'utilisation effectif de la puissance disponible théorique. Il est défini comme le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement en équivalent pleine puissance et nombre d'heures total sur une année (8760 h/an). Sur une période donnée, et pour une même puissance installée, un système avec faible facteur de charge produira donc moins d'énergie qu'un système avec facteur de charge élevé.



Exemple

Une éolienne de $1,5 \text{ MW}_e$ est en maintenance 270 h par an. Les pâles sont en rotation 7000 h par an, même si la production est parfois faible du fait d'un vent très modéré. Au compteur, on note une production annuelle de 2900 MWh_e .

- Le taux de disponibilité de l'éolienne est de $(8760 \text{ h} - 270 \text{ h}) / 8760 \text{ h}$, soit 97 %.
- Sa durée de fonctionnement est de 7000 heures.
- Son facteur de charge est de $(2900 \text{ MWh}_e / 1,5 \text{ MW}_e) / 8760 \text{ h}$, soit 22 %.

Définitions

Tranche de production : Elle correspond à l'unité de production standard d'une centrale électrique. On parle généralement de tranche pour qualifier les unités de production des centrales nucléaires ou des centrales thermiques, qui peuvent contenir plusieurs tranches sur un même site.

Coût marginal de production : Exprimé en €/kWh, il représente à un instant donné le coût de production d'une unité supplémentaire d'énergie, soit le coût du dernier kWh produit. A l'instar de nombreux systèmes électriques, le système français est conçu sur un principe « d'ordre de mérite » pour l'appel des moyens de production d'électricité, soit par ordre croissant de coût marginal. Ainsi, les moyens de production à coût marginal de production quasi-nul (l'éolien, le solaire, etc.) ont en théorie une préséance sur d'autres moyens à coût marginal plus élevé (nucléaire, centrales thermiques, etc.) pour produire sur le réseau.

Moyen de production « dispatchable » : Ce terme désigne un moyen de production d'énergie considéré comme flexible vis-à-vis du gestionnaire de réseau. Les moyens de production « dispatchables » peuvent notamment réagir de manière commandée à une sollicitation du gestionnaire de réseau en injectant à la hausse ou à la baisse, ceci dans un temps imparti. Le caractère « dispatchable » s'exprime également par opposition aux moyens de production considérés comme peu flexibles ou dont la production d'électricité est « fatale » (voir définition ci-dessous).

Energie fatale : On parle d'énergie fatale lorsque celle-ci est produite de manière inéluctable et serait perdue sans utilisation immédiate. L'électricité ou la chaleur fatale est généralement produite par des systèmes valorisant des ressources non stockables, telles que le vent, le soleil ou le flux d'un cours d'eau. Cette énergie peut également être issue d'un procédé amont, comme par exemple la chaleur contenue dans des gaz d'échappements. Le stockage de cette énergie représente une alternative à la valorisation immédiate, cette énergie n'étant alors plus considérée comme fatale.

Intermittence et prévisibilité : On qualifie d'intermittente une production énergétique variable dans le temps en raison d'une disponibilité discontinue de la ressource. La périodicité de l'intermittence peut être variable, sur un pas infra-journalier, journalier, pluri-journalier ou saisonnier. Dans le cas de la ressource solaire par exemple, l'intermittence peut être due au passage d'un nuage, à l'alternance jour-nuit ou à la saison. De plus, l'intermittence de la ressource est à rapprocher de sa prévisibilité. Ainsi, des ressources intermittentes fortement prédictibles (marnage, courants) sont moins contraignantes pour les systèmes énergétiques que des ressources dont la prévisibilité n'est pas bonne au-delà de quelques heures ou quelques jours (rayonnement solaire, vent).

Moyens de production centralisé et décentralisé : Les termes centralisé et décentralisé rendent compte du niveau de dissémination d'un parc de production d'énergie. Sans qu'il y ait de distinction univoque entre les deux catégories, on parlera de moyens centralisés lorsque la production énergétique est concentrée en quelques points du réseau (centrales nucléaires, centrale thermique à flamme, etc.) et de moyens décentralisés lorsqu'il existe une multitude de points d'injection avec des systèmes de tailles unitaires réduites (éolienne, panneau solaire, etc.).

Pointe électrique : Elle correspond à un maximum de puissance électrique sur le réseau, et donc à un pic de consommation d'électricité. Les profils de consommation d'électricité suivent une trame globalement périodique avec un pas journalier, hebdomadaire ou saisonnier. Ainsi, on parlera de pointe journalière pour désigner le maximum de puissance appelée sur une journée (autour de 19h en France). Le niveau de la pointe saisonnière, désignant le maximum de puissance appelée sur une année (en hiver pour la France), permet quant à lui de dimensionner en puissance le parc de production d'électricité.

Réactivité : La réactivité d'un moyen de production d'énergie qualifie sa capacité à répondre plus ou moins vite à une consigne de fonctionnement. La définition précise d'un indicateur de réactivité dépend du type de consigne considéré (réactivité au démarrage ou en fonctionnement, temps de montée en charge partielle ou totale, vitesse de montée en charge, etc.). Dans le cadre de ce document, seule une indication sur le temps nécessaire pour atteindre la puissance maximale au démarrage est donnée lorsque cela est pertinent.

Bilan carbone : Il donne un aperçu de l'impact global d'un système de production d'énergie en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Le bilan carbone prend en compte l'ensemble des émissions directes et indirectes d'un système, durant les phases de construction, d'exploitation et de démantèlement. Dans le cas de combustibles renouvelables comme la biomasse (cultures régularisées) ou certains déchets, on constate un bilan carbone quasi-neutre : la capacité de la biomasse à capter le CO₂ durant sa culture permet de compenser les émissions directes de sa combustion.

Niveau de maturité : Différentes méthodes de classification existent pour qualifier la maturité d'une technologie, avec des échelonnages plus ou moins raffinés. Quelle que soit la classification choisie, le niveau de maturité rend compte du statut de développement d'une technologie entre les premières études conceptuelles et son développement commercial. Parmi les systèmes présentés dans ce document, nombreux d'entre eux connaissent un développement commercial avancé et ne possèdent plus de verrous technologiques majeurs (production thermique d'électricité, fermes éoliennes, systèmes solaires photovoltaïque, méthanisation, etc.). D'autres systèmes en développement requièrent encore des phases de démonstration avant d'atteindre un niveau de développement commercial (énergies marines, gazéification).

Présentation des modes de production d'énergie

Les modes de production d'énergie présentés dans le tableau ci-dessous font l'objet d'une fiche dédiée dans la suite du document :

N°	Mode de production d'énergie	Type de source d'énergie	Production d'électricité	Production de chaleur
1	Centrales nucléaires à fission	Fissile	X	
2	Centrales thermiques à flamme	Fossile	X	(X)
3	Turbines à combustion (TAC)	Fossile	X	(X)
4	Centrales à cycles combinés	Fossile	X	(X)
5	Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes	Fossile	X	(X)
6	Centrales électriques à combustion biomasse solide	Renouvelable	X	X
7	Unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM)	Récupération	X	X
8	Unités de valorisation énergétique du biogaz (méthanisation)	Renouvelable et récupération	X	X
9	Unités de valorisation énergétique du gaz de synthèse (gazéification)	Renouvelable et récupération	X	X
10	Centrales hydroélectriques	Renouvelable	X	
11	Usines marémotrices	Renouvelable	X	
12	Fermes hydroliennes	Renouvelable	X	
13	Fermes houlomotrices	Renouvelable	X	
14	Fermes éoliennes terrestres	Renouvelable	X	
15	Fermes éoliennes marines	Renouvelable	X	
16	Systèmes solaires photovoltaïques	Renouvelable	X	
17	Systèmes solaires thermiques	Renouvelable		X
18	Chaudières fioul / gaz	Fossile		X
19	Chaudières biomasse	Renouvelable		X
20	Poêles & Cheminées	Renouvelable		X
21	Pompes à chaleur	Electricité		X
22	Radiateurs électriques	Electricité		X

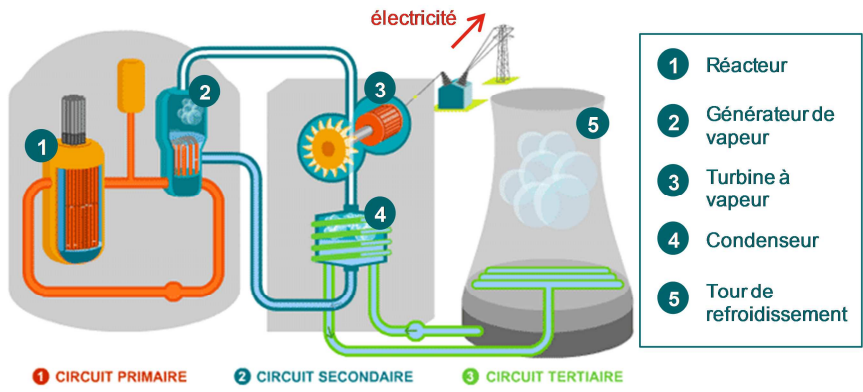
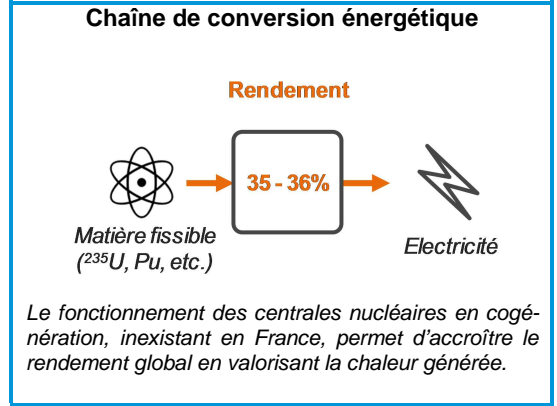
(X) Cogénération possible, mais non systématiquement pratiquée

1 Centrales nucléaires à fission

Une centrale nucléaire génère de l'électricité grâce à l'énergie dégagée par une réaction contrôlée de fission nucléaire, principalement des isotopes de l'Uranium et du Plutonium. Les principales technologies en service utilisent le réacteur de fission comme une chaudière alimentant en chaleur un circuit vapeur qui génère de l'électricité. L'eau fait à la fois office de caloporteur et de modérateur (réacteurs à eau légère).

Les centrales françaises en service utilisent des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) dit de 2^{ème} génération, comprenant un cycle vapeur primaire confiné traversant le réacteur et un cycle vapeur secondaire relié aux turbines. Le réacteur EPR en construction, dit de 3^{ème} génération, repose également sur la technologie eau pressurisée. Il intègre dès la conception des avancées en termes de sûreté.

Parmi les évolutions attendues, le développement des réacteurs à neutrons rapides (RNR) de 4^{ème} génération permettrait de limiter drastiquement la consommation de combustible et les déchets. Les "Small Modular Reactors" (SMR) pourraient également se développer pour répondre aux besoins de moyenne puissance.



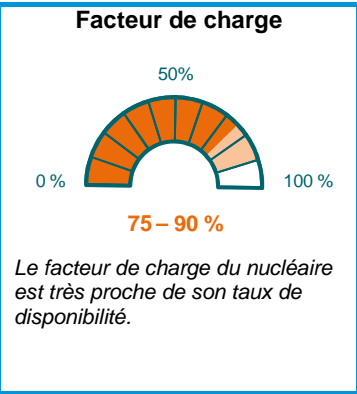
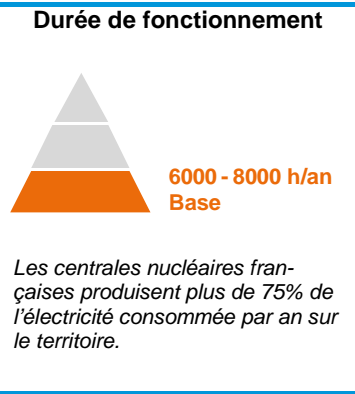
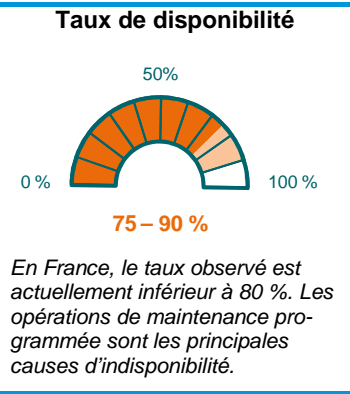
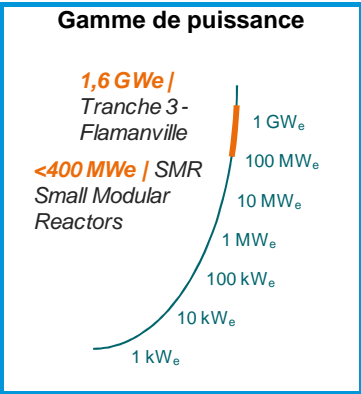
Crédits : Réacteur REP, adapté d'EDF



Crédits : Centrale de Flamanville (50), EDF

- +**
- Pas d'émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
 - Coût marginal de production d'électricité modéré, en raison notamment du coût relativement faible du combustible
 - Longue durée de vie (40 à 60 ans)
 - Ressources en combustible importantes pour la 4^{ème} génération (potentiellement plusieurs siècles)
 - Forte densité énergétique

-
- Gestion des déchets nucléaires
 - Usage de combustible fissile (approvisionnement en combustible et dépendance énergétique)
 - Acceptabilité sociétale complexe (sécurité, sûreté, déchets)
 - Criticité de l'impact en cas d'incident
 - Complexité du démantèlement et de la gestion de la fin de vie des centrales

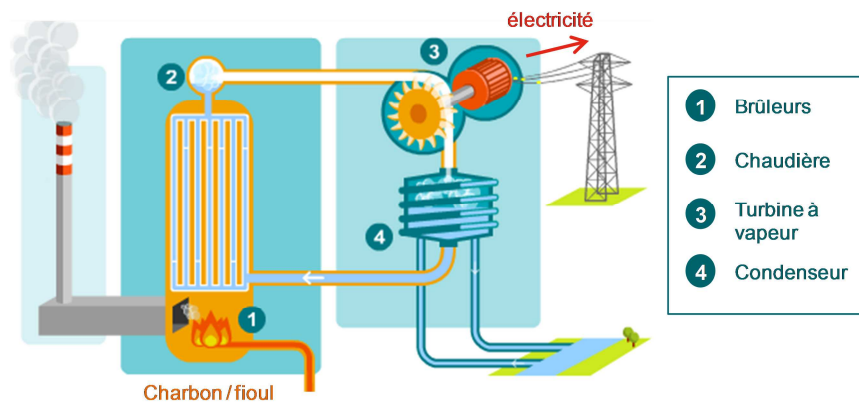


2 Centrales thermiques à flamme

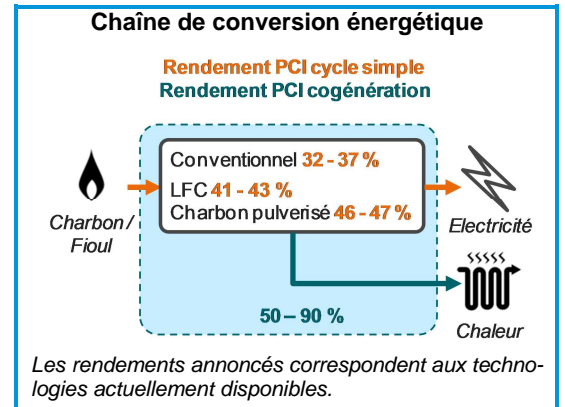
Dans une centrale thermique dite "à flamme", la chaleur de combustion dégagée dans une chaudière permet de générer de la vapeur qui, en circulant dans une turbine reliée à un alternateur, produit de l'électricité.

Diverses technologies existent, en fonction du combustible (charbon, fioul, gaz) ou du type de chaudière. Les chaudières à charbon pulvérisé sont les plus nombreuses ; de meilleures performances peuvent encore être atteintes à des niveaux de température et de pression plus élevés. Les chaudières à lit fluidisé circulant (LFC), flexibles sur les combustibles utilisés, sont également en développement.

Les efforts actuels visent à réduire l'impact environnemental des installations (réduction des émissions polluantes, captage du CO₂, etc.). Le fonctionnement en cogénération est possible, accroissant ainsi l'efficacité énergétique globale.



Crédits : Adapté d'EDF



Crédits : Centrale de Cordemais (44), EDF

+

- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande
- Autonomie (dépendant de l'approvisionnement et du stock de combustible)
- Flexibilité dans le choix du combustible (pour certaines technologies)
- Longue durée de vie (30 à 40 ans)

-

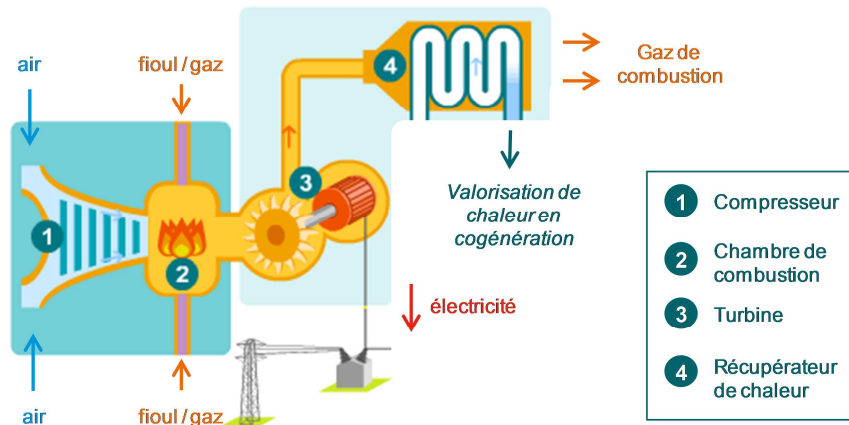
- Réactivité faible au démarrage (plus d'1h pour atteindre la puissance max)
- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique)
- Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, en particulier sur charbon et fioul (SO_x, NO_x, poussières)
- Coût et usure liés aux arrêts / démarrages
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>600 MW_e Centrale de Cordemais 1 tranche charbon</p> <p>1 GW_e 100 MW_e 10 MW_e 1 MW_e 100 kW_e 10 kW_e 1 kW_e</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>80 - 85 %</p> <p>L'indisponibilité est due en particulier aux opérations de maintenance.</p>	<p>2000 - 6000 h/an Semi-base</p> <p>En 2012, les centrales thermiques ont fonctionné en moyenne 2300 h en France.</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>20 - 85 %</p> <p>26 % en France en 2012 en moyenne. Utilisées en base, les centrales thermiques ont un facteur de charge plus élevé.</p>

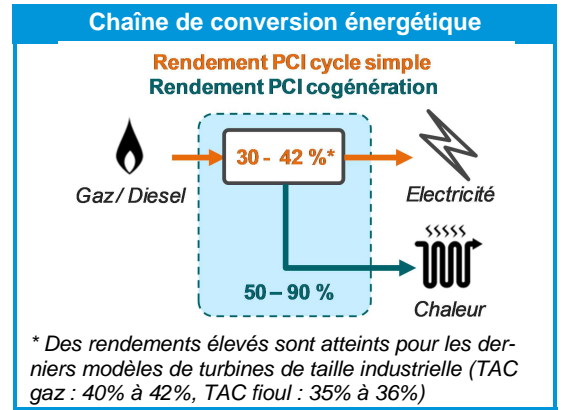
3 Turbines à combustion (TAC)

Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine. La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine, elle génère de la chaleur à partir d'un combustible (gaz ou fioul) et d'air initialement comprimé. Alors que le fioul apporte une sécurité de fourniture, le développement des TAC gaz est aujourd'hui privilégié, notamment pour des raisons environnementales (émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants moindres).

Sur le réseau électrique, la réactivité des TAC est souvent mise à profit pour fournir la pointe électrique. Les TAC sont également répandues pour la production décentralisée dans l'industrie ou le tertiaire, notamment pour un fonctionnement en cogénération. L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside dans la haute température des fumées de combustion, dont la chaleur peut être récupérée et valorisée sans affecter la production électrique.



Crédits : Adapté d'EDF



Crédits : TAC Dirinon (29), EDF/F. Sautereau

- +**
- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande
 - Forte réactivité (moins de 30 min pour atteindre la puissance max)
 - Autonomie et sécurité de fourniture des TAC fioul, grâce au stock de combustible sur site
 - Longue durée de vie (25 à 30 ans)
 - Qualité de la chaleur pour cogénération (haute température)

-
- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique)
 - Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, notamment pour le fioul (SOx, NOx)
 - Coût et usure liés aux arrêts / démarrages (croissants avec le besoin de flexibilité sur les réseaux)
 - Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

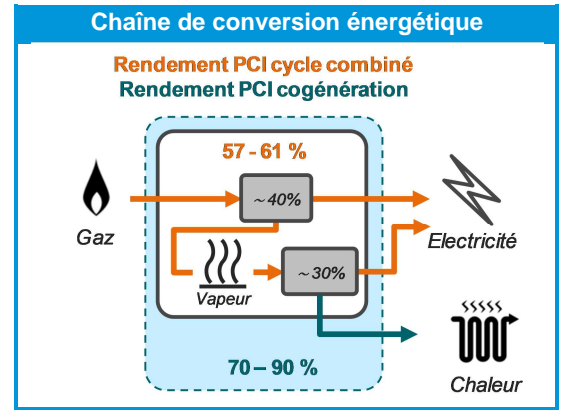
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>100 MW_e TAC centralisée</p> <p>20 MW_e TAC industrielle pour cogénération</p> <p><50 kW_e Micro-turbine</p>	<p>50%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Taux élevés atteints pour des TAC peu utilisées avec une maintenance planifiée.</p>	<p>TAC centralisées < 1000 h/an Pointe</p> <p>TAC décentralisées Variable</p> <p>Dans le cas de production décentralisée (industrie, tertiaire), la durée de fonctionnement est souvent plus longue, notamment en cogénération.</p>	<p>50%</p> <p>10 – 90 %</p> <p>8% en France en 2012. Des facteurs de charges élevés sont atteints pour des usages décentralisés.</p>

4 Centrales à cycles combinés

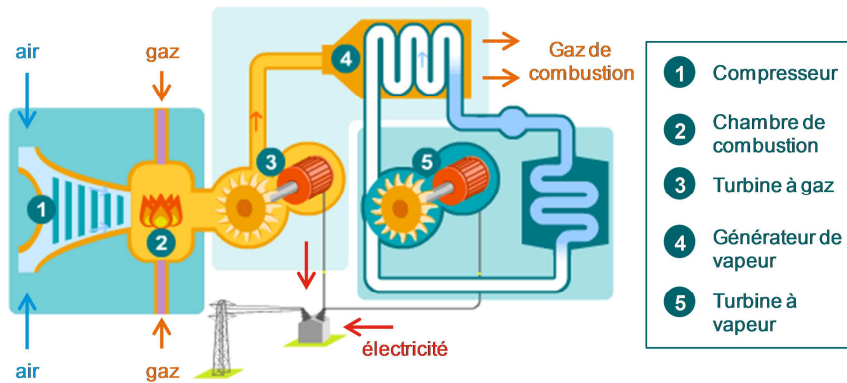
Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur 2 cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC : le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une turbine dédiée.

Les centrales à Cycle Combiné Gaz (CCG) présentent l'avantage d'atteindre des rendements élevés, par rapport aux TAC en cycle simple, et de fournir une alternative aux centrales thermiques à flamme avec un moindre impact environnemental.

La cogénération sur les CCG est possible en valorisant la chaleur résiduelle, mais elle demeure peu répandue.



Crédits : CCG, Montoir-de-Bretagne (44), GDF SUEZ



Crédits : Adapté d'EDF

+

- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande
- Rendement élevé par rapport à un cycle simple
- Réactivité (30 min à 1h pour atteindre la puissance max)
- Impact environnemental réduit par rapport aux centrales thermiques à flammes : émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants (SOx, NOx, etc.) moindres
- Longue durée de vie (25 à 30 ans)

-

- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique)
- Emissions de gaz à effet de serre
- Coût et usure liés aux arrêts / démarrages (croissants avec le besoin de flexibilité sur les réseaux)
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>435 MW_e / CCG de Montoir-de-Bretagne</p> <p>1 GW_e 100 MW_e 10 MW_e 1 MW_e 100 kW_e 10 kW_e 1 kW_e</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>80 - 90%</p> <p>L'indisponibilité est due en particulier aux opérations de maintenance</p>	<p>2000 - 6000 h/an Semi-base</p> <p>En 2012, les centrales thermiques ont fonctionné en moyenne 2300 h en France.</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>20 - 90 %</p> <p>26 % en France en 2012 en moyenne. Un facteur de charge élevé correspond à une utilisation en base.</p>

5 Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes

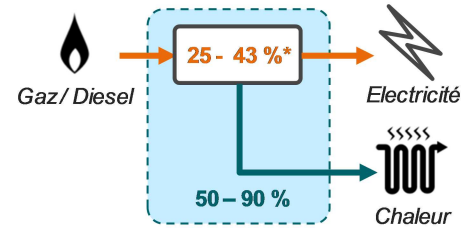
Les moteurs à combustion interne, largement utilisés pour la propulsion des véhicules, peuvent également produire de l'électricité lorsqu'ils sont reliés à un alternateur : on parle alors de groupes électrogènes. A l'intérieur du moteur, une combustion actionne le mouvement des pistons, entraînant la rotation de l'arbre relié à l'alternateur.

Les carburants liquides (diesel notamment), facilement stockables, sont couramment utilisés comme combustibles. En effet, les groupes électrogènes sont souvent utilisés pour de la production d'électricité sur des sites non interconnectés ou comme systèmes de secours (hôpitaux, industries, etc.). Connectés au réseau, ils sont des systèmes de production dits "d'extrême pointe".

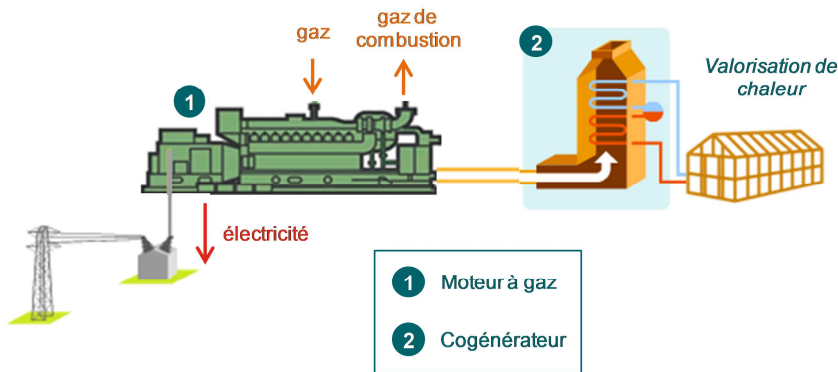
Les moteurs à gaz sont aussi courants, notamment pour de la production décentralisée en cogénération. Les tailles sont très variables, avec une gamme qui s'étend des petits systèmes domestiques jusqu'aux gros moteurs industriels.

Chaîne de conversion énergétique

Rendement PCI cycle simple
Rendement PCI cogénération



* Rendements significativement plus bas pour les petites unités (<25% pour les moteurs domestiques).



Crédits : Adapté d'EDF et de GE

Cogénération de Ploubazlanec (22)

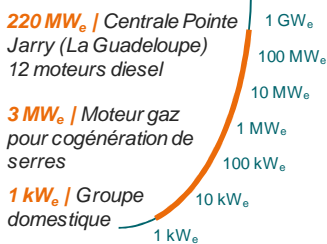


- Forte réactivité (quelques minutes pour atteindre la puissance maximale)
- Autonomie et sécurité de fourniture dans le cas du diesel, grâce au stock de combustible sur site
- Flexibilité et facilité d'installation
- Longue durée de vie (25 à 30 ans)
- Adaptés à la cogénération, notamment pour la production décentralisée (petites à moyennes puissances)

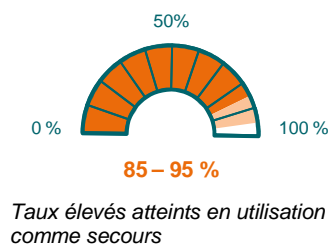


- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique)
- Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, notamment pour le diesel (SOx, NOx, etc.)
- Pollution sonore (pour les systèmes domestiques notamment)
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

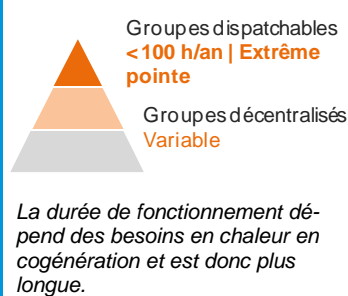
Gamme de puissance



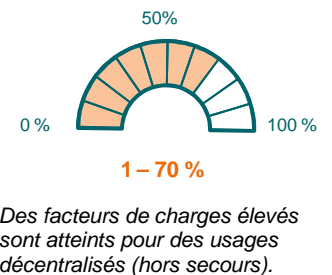
Taux de disponibilité



Durée de fonctionnement



Facteur de charge

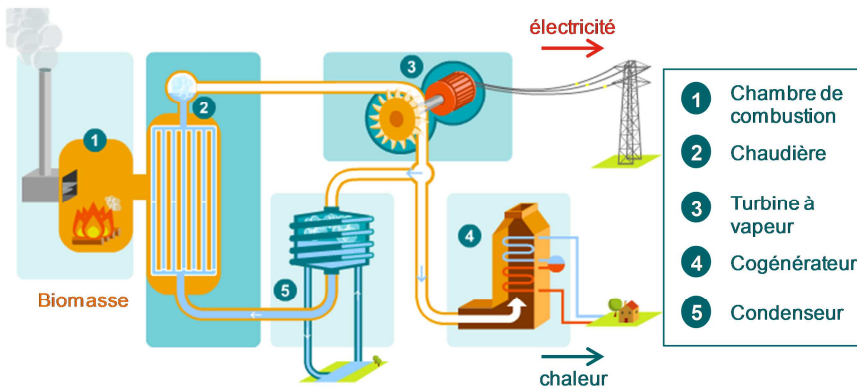
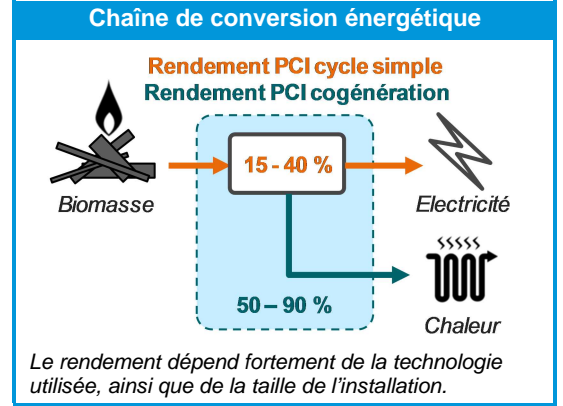


6 Centrales électriques à combustion biomasse solide

Les centrales à biomasse solide mettent en œuvre une combustion directe de biomasse au sein d'une chaudière, afin de produire de la vapeur à haute température et à haute pression (cf. fiche Chaudières biomasse). Cette vapeur entraîne une turbine qui génère de l'électricité via un alternateur. Une grande majorité des centrales biomasse produisant de l'électricité fonctionnent en cogénération, en valorisant l'énergie thermique contenue dans la vapeur en sortie de turbine. L'utilisation d'un fluide de travail organique (cycle organique de Rankine ou ORC), alternative aux cycles vapeur, peut être plus adaptée dans certains cas d'application (température de vaporisation plus basse, etc.).

La biomasse solide regroupe le bois, les déchets de bois, les granulés et autres déchets végétaux et animaux (graisses). Les centrales de taille industrielle privilégient les plaquettes ou les granulés de bois comme combustible qui facilitent le stockage et les opérations de manipulations.

La reconversion de centrales thermiques à flamme conventionnelles à charbon en centrales biomasse est une option connaissant un intérêt croissant.



Crédits : Adapté d'EDF



Crédits : Centrale Biomasse, Rennes (35), DALKIA



- Usage de ressources renouvelables avec approvisionnement principalement local
- Emissions de gaz à effet de serre limitées pour la production d'électricité (bilan carbone neutre de la biomasse énergie)
- Synergies locales possibles (valorisation des résidus de biomasse sur site papetier, etc.)
- Conversion de centrales charbon à la biomasse possible



- Contraintes d'approvisionnement en biomasse (gestion des parties prenantes, sécurisation sur de longues périodes)
- Qualité variable du combustible (taux d'humidité, etc.)
- Traitement des fumées spécifique (poussières...)
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération
- Gestion des cendres

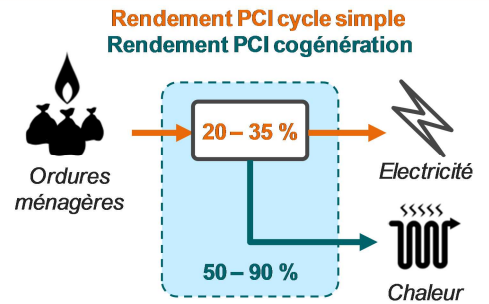
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>150 MW_e Tranche Provence 4, 850 kt/an de biomasse</p> <p>10 MW_e Centrale de Rennes, 100 kt/an de biomasse</p>	<p>50%</p> <p>90 – 95%</p> <p>Disponibilité technique du système (la disponibilité du combustible n'est pas prise en compte).</p>	<p>2000 - 8000 h/an</p> <p>Semi-base à Base</p> <p>Moyen de production théoriquement flexible. Les tarifs d'achat d'électricité fixes et la distribution de chaleur dans le cas d'une cogénération poussent les opérateurs à maximiser la durée de fonctionnement, et ainsi le facteur de charge.</p>	<p>50%</p> <p>20 – 90 %</p>

7 Unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM)

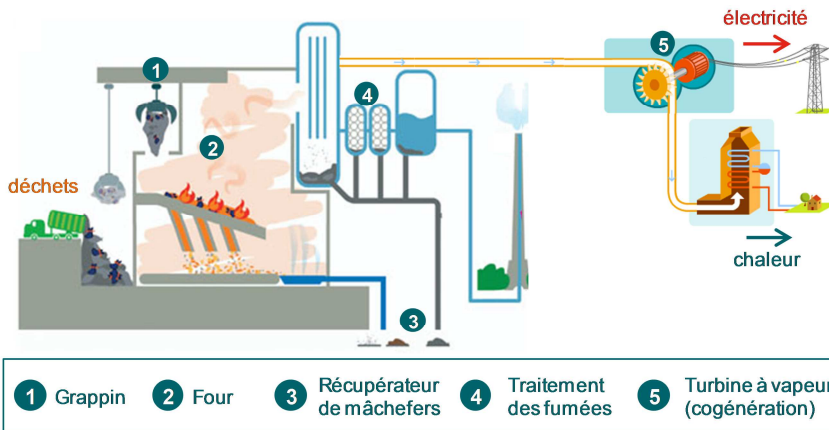
Une UIOM (également appelée incinérateur) détruit par combustion des déchets municipaux après leur collecte. L'énergie de combustion dégagée lors de l'incinération peut être valorisée sous forme thermique et/ou électrique. Pour cela, une chaudière récupère la chaleur de combustion du four, et la vapeur produite est soit directement valorisée sous forme de chaleur soit convertie en électricité par un turbo-alternateur, éventuellement équipé d'un module de cogénération.

La combustion de déchets produit d'importantes quantités de polluants gazeux qu'il est nécessaire de neutraliser. C'est pourquoi les UIOM sont obligatoirement munies d'importants équipements de dépollution des fumées (ex : injection d'urée dans la chaudière, filtres, lavage humide à la chaux, traitement au charbon actif). La gestion des déchets solides, notamment les mâchefers (résidus de combustions), est également un sujet majeur. Leur valorisation (en cimenterie par exemple) peut être une alternative à leur enfouissement en centre de stockage.

Chaîne de conversion énergétique



Une part de l'électricité produite est souvent autoconsommée par les incinérateurs (20 à 30%).



Crédits : Adapté du syndicat mixte de traitement des déchets, Béarn



Crédits : UIOM Vitré (35), ADEME/O. Pascaud

+

- Valorise l'énergie contenue dans les déchets (50% est considérée renouvelable par convention)
- Réduit la masse et le volume de déchets à stocker
- Réduit la nocivité de certains déchets (ex : déchets médicaux)

-

- Génère des polluants et des résidus qui doivent être neutralisés (fumées d'incinération, mâchefers, etc.)
- Mauvaise image due aux mauvaises pratiques par le passé quant à la gestion des polluants
- Ne doit pas constituer un obstacle au recyclage des déchets et à la réduction de leur production
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

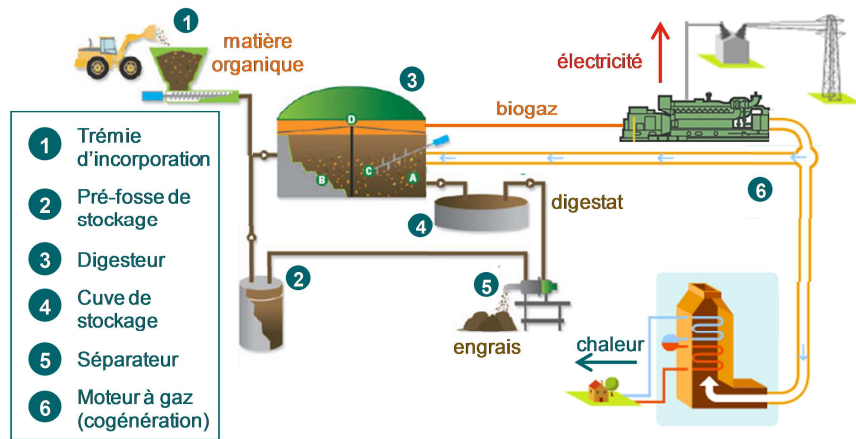
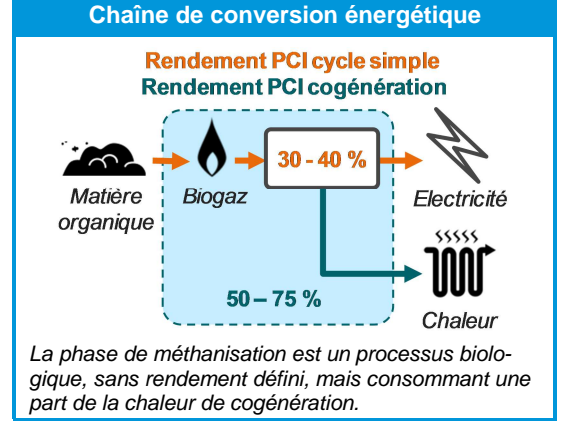
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>80 MW_e Incinération des ordures ménagères d'un million d'habitants (730 kt/an)</p> <p>10 MW_e Incinération des ordures ménagères de 126 000 d'habitants (90 kt/an)</p>	<p>50%</p> <p>85 - 90%</p> <p>Disponibilité technique du système (la disponibilité du combustible n'est pas prise en compte).</p>	<p>7500 - 7900 h/an Base</p> <p>Une UIOM est censée fonctionner en continu et n'être interrompue que lors des périodes de maintenance.</p>	<p>50%</p> <p>20 - 90%</p> <p>Le facteur de charge dépend fortement de l'approvisionnement en déchets (nature et quantité). Ainsi, les UIOM fonctionnent très souvent à charge partielle.</p>

8 Unités de valorisation énergétique du biogaz (méthanisation)

Le biogaz est un gaz combustible principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). Il est produit au cours d'un processus biologique naturel de dégradation de matière organique en l'absence d'oxygène, appelée digestion anaérobie ou méthanisation. Les éléments non digérés par ce processus sont nommés le digestat. Une large gamme de matières organiques est méthanisable : les déchets verts et déchets d'industries agro-alimentaires, les boues de stations d'épuration, les déjections animales, etc.

La digestion anaérobie peut se présenter spontanément comme dans les ISDND (Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux). Elle peut également être provoquée et contrôlée dans un réacteur dédié, nommé digesteur ou méthaniseur. Le biogaz produit peut être valorisé sous forme d'électricité dans une turbine ou un moteur à gaz ou bien sous forme de chaleur dans une chaudière.

Il existe des alternatives à la valorisation électrique du biogaz : son injection dans le réseau de gaz naturel national, nécessitant une étape supplémentaire de purification (on parle alors de biométhane) ou sa valorisation directe en chaudière, industrielle ou agricole.



Crédits : Méthanisation agricole avec cogénération, adapté d'Energie



Crédits : Méthanisation du Mené (22), Géotexia

+

- Usage de ressources renouvelables avec approvisionnement principalement local (sous-produit de mise en décharge pour les ISDND, déchets industriels / agricoles pour la méthanisation)
- Emissions de gaz à effet de serre évitées : alternative au torchage pour les ISDND, limitation d'émissions fugitives de CH_4 pour la méthanisation (fosses à lisier, etc.)
- Valorisation du digestat sous forme de fertilisant

-

- La méthanisation nécessite de disposer d'un approvisionnement en matière organique régulier et sécurisé.
- Complexité du contrôle d'un méthaniseur (gestion des équilibres réactionnels, de la température, du pH, etc.)
- Prétraitement du biogaz nécessaire pour sa valorisation par combustion (séparation de l' H_2S , des COV, etc.)
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération
- Risque de conflit d'usage si cultures énergétiques dédiées

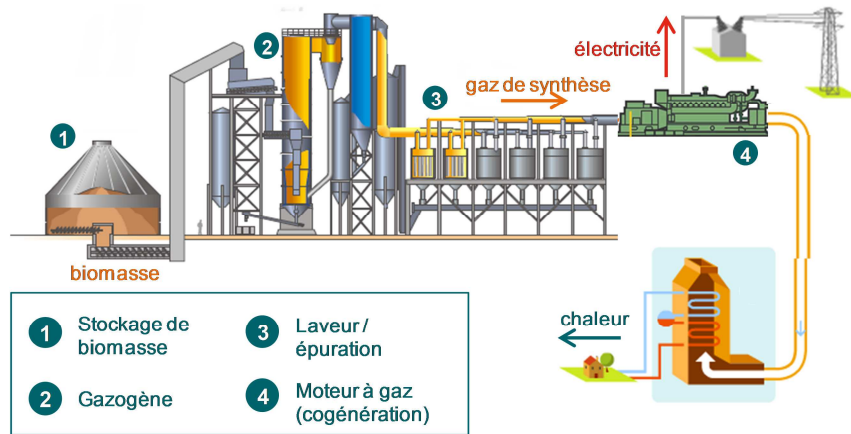
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>2 MW_e Méthaniseur territorial, 60 exploitations agricoles et 5 IAA (80 kt/an)</p> <p>50 kW_e Méthaniseur agricole (2 kt/an)</p>	<p>50%</p> <p>70 - 90%</p> <p>Disponibilité technique du système (la disponibilité de la ressource en matière organique n'est pas prise en compte).</p>	<p>6500 - 7900 h/an Base</p> <p>Les leviers de flexibilité sont limités par le processus de production de biogaz. La durée de fonctionnement est conditionnée par le tarif d'achat de l'électricité.</p>	<p>50%</p> <p>50 - 90%</p> <p>La plupart des unités ont un facteur de charge élevé. Le facteur de charge est faible lorsque l'approvisionnement en matière organique est réduit.</p>

9 Unités de valorisation énergétique du gaz de synthèse (gazéification)

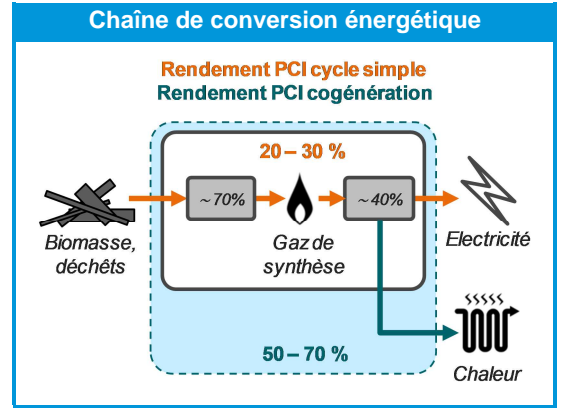
La gazéification est un procédé thermo-chimique de conversion de matière organique solide (biomasse, charbon, déchets) en un gaz dit de "synthèse" composé d'hydrogène (H₂) et de monoxyde de carbone (CO). Il met en œuvre une combustion incomplète à haute température, c'est-à-dire une combustion avec un défaut d'oxygène, afin de n'oxyder que partiellement la matière. La réaction de gazéification se déroule dans un équipement dédié nommé gazogène.

Le gaz de synthèse ainsi produit peut être utilisé comme combustible lors d'une étape ultérieure d'oxydation. Celle-ci peut être réalisée dans un moteur à gaz ou bien dans une turbine à gaz, voire dans un cycle combiné pour les plus grosses puissances.

En récupérant l'énergie thermique contenue dans les fumées de combustion, de la chaleur peut également être produite (cogénération). La gazéification de biomasse n'est pour l'instant pas une voie industrielle de production d'électricité, elle nécessite d'être validée à grande échelle.



Crédits : Adapté de Metso



Crédits : Gazéifieur de Morcenx (40), CHO-Power

- +**
- Usage de ressources renouvelables (entièrement ou en partie pour les déchets) avec approvisionnement local
 - Emissions de gaz à effet de serre limitées pour la production d'électricité (bilan carbone neutre de la biomasse énergie) et limitation du volume et de la teneur en éléments polluants des fumées par rapport à un traitement thermique direct
 - Tolère des natures de combustibles variées (boues de stations d'épuration, résidus agricoles, tourbe, bois, déchets)

-
- Technologie encore non maîtrisée à grande échelle
 - Assez contraignant en prétraitement de la biomasse (taille, humidité, cendres)
 - Production de goudrons dans le gaz de synthèse qui doit être nettoyé avant combustion (dans un moteur ou TAC)
 - Contraintes d'approvisionnement en biomasse (gestion des parties prenantes, sécurisation sur de longues périodes)
 - Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

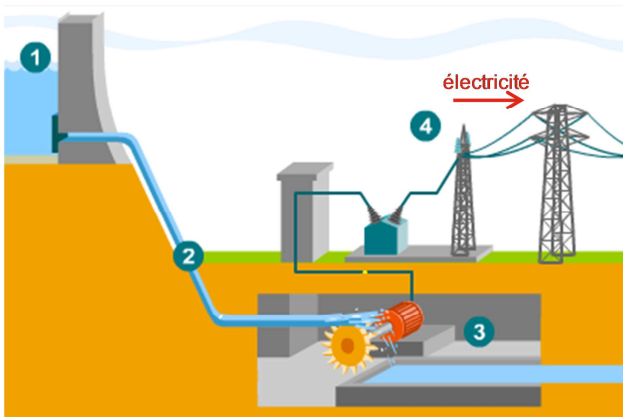
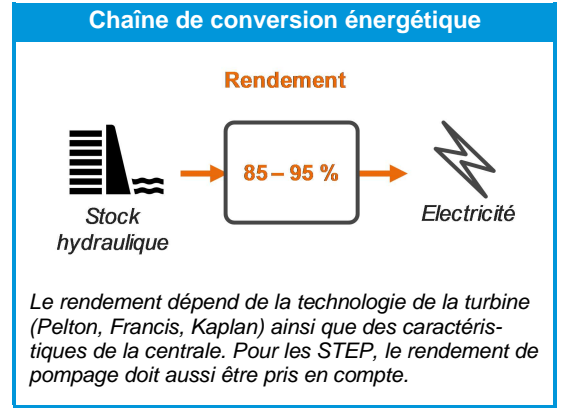
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>100 MW_e gazéification de 500 kt/an de biomasse</p> <p>10 MW_e gazéification de 50 kt/an de biomasse</p>	<p>50%</p> <p>80-90%</p> <p>Disponibilité théorique d'un gazéifieur seul. La disponibilité d'une installation de valorisation énergétique complète est encore méconnue par manque de retour d'expérience.</p>	<p>2000-8000 h/an Semi-base à Base</p> <p>Valeurs théoriques (manque de retour d'expérience). Il est important de noter que les gazéifieurs ne tolèrent que de faibles variations de charge.</p>	<p>50%</p> <p>20-90%</p>

10 Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques exploitent l'énergie potentielle gravitaire de l'eau pour produire de l'électricité. La chute de l'eau, guidée par un réseau de conduites, entraîne des turbines reliées à un alternateur. On distingue les ouvrages hydroélectriques disposant d'un stock d'énergie (ouvrages lac avec retenue d'eau) à ceux produisant au "fil de l'eau". Les ouvrages éclusés sont mixtes, avec une capacité de stockage limitée.

La taille des ouvrages est extrêmement variable, de l'ordre du kW_e pour la "pico-hydro" jusqu'à plusieurs dizaines de GW_e, pour des hauteurs de chutes de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Les centrales de taille restreinte, souvent au "fil de l'eau", produisent une électricité considérée comme fatale. A l'inverse, les ouvrages disposant d'un stock hydraulique sont des outils de flexibilité pour le réseau.

Certains ouvrages, les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), disposent en plus d'une capacité de pompage qui offre un degré de flexibilité supplémentaire, en remontant l'eau dans un bassin supérieur pendant les périodes creuses de consommation électrique et en produisant de l'électricité durant les périodes de plus forte consommation.



- 1 Lac de retenue et barrage
- 2 Conduite forcée
- 3 Turbine / Alternateur
- 4 Poste électrique

Crédits : Centrale de type « lac », adapté d'EDF



Crédits : Barrage de Guerlédan (22), EDF

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Forte réactivité (démarrage en quelques secondes)
- Production d'électricité flexible pour les centrales disposant d'un stock (et d'une capacité de pompage pour les STEP)
- Longue durée de vie (supérieur à 50 ans)
- Coût marginal de production d'électricité faible (dépendant du stock)

-

- Raréfaction des sites exploitables (fortes contraintes géographiques)
- Emprise au sol des gros ouvrages hydro-électriques
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impacts sur la continuité écologique des cours d'eau, ennoisement de zones habitées, etc.)
- Production électrique fatale pour les centrales sans stock
- Sensibilité au stress hydrique

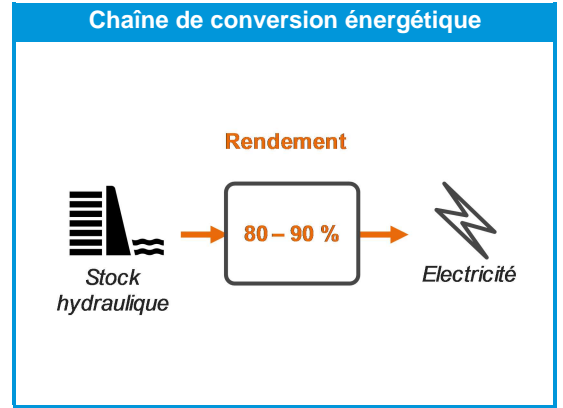
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>1,8 GW_e Centrale de Grand-Maison (Isère)</p> <p>15 MW_e Centrale de Guerlédan</p> <p>1 MW_e Centrale au fil de l'eau</p>	<p>50%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Disponibilité technique du système (sans prendre en compte le stock hydraulique).</p>	<p>Lac < 2000 h/an Pointe</p> <p>Eclusé 2000 – 6000 h/an Semi-base</p> <p>Fil de l'eau > 6000 h/an Base</p> <p>La durée de fonctionnement des centrales au fil de l'eau dépend du débit des cours d'eau. A l'inverse, les centrales lac sont exploitées pour maximiser les gains production, en tenant compte du stock.</p>	<p>50%</p> <p>20 – 95 %</p> <p>29% en moyenne en France en 2012. Les facteurs très élevés sont atteints pour les centrales au "fil de l'eau"</p>

11 Usines marémotrices

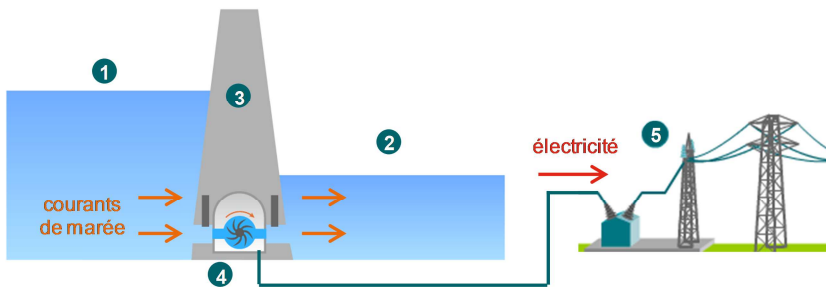
Les usines marémotrices exploitent l'énergie potentielle gravitaire liée à la différence de hauteur d'eau entre pleine mer et basse mer (marnage). Dans une baie ou un estuaire, la construction d'un barrage équipé de turbines permet de produire de l'électricité grâce au flux et reflux de marée entre le large et la retenue d'eau. Le potentiel énergétique dépend du niveau de marnage, dont un minimum de 5 mètres est requis et qui peut aller jusqu'à 20 mètres dans certaines régions du monde.

Dans certains cas, le stockage naturel dans la retenue d'eau peut être complété grâce un système de pompage, similaire aux STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) en montagne. L'usine marémotrice dispose alors d'un levier de flexibilité pour stocker de l'électricité lorsque cela est nécessaire, durant les périodes creuses.

Bien que la filière soit mature et bien maîtrisée techniquement, son développement reste limité en raison notamment de l'impact environnemental des infrastructures.



Crédits : Usine de la Rance (35), METL-MEDDE



- 1 Bassin de retenue
- 2 Mer
- 3 Barrage
- 4 Turbine
- 5 Poste électrique

Crédits : Adapté de Connaissance Des Energies

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Forte prédictibilité de la ressource (marnage)
- Longue durée de vie (> 50 ans)
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

-

- Intermittence de la production d'électricité malgré sa prévisibilité
- Contraintes géographiques fortes (fort marnage nécessaire)
- Emprise des gros ouvrages sur le littoral
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact environnemental, ensablement, etc.)
- Rareté des sites exploitables

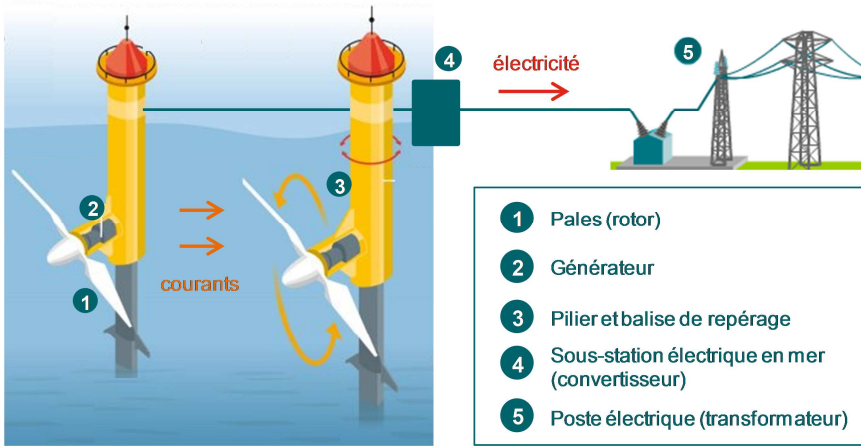
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>238 MW_e Centrale de La Rance</p>	<p>50%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Disponibilité technique du système, très proche de la disponibilité réelle, le marnage étant relativement prévisible.</p>	<p>2000 - 2500 h/an Base intermittente prédictible</p> <p>Base intermittente (production fatale) Durée de fonctionnement très stable d'une année sur l'autre.</p>	<p>50%</p> <p>~ 25 %</p> <p>Facteur de charge très stable d'une année sur l'autre</p>

12 Fermes hydroliennes

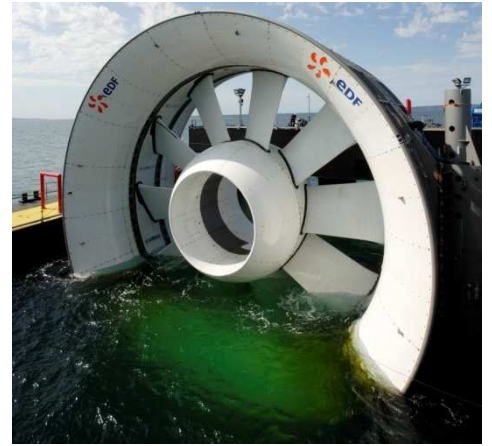
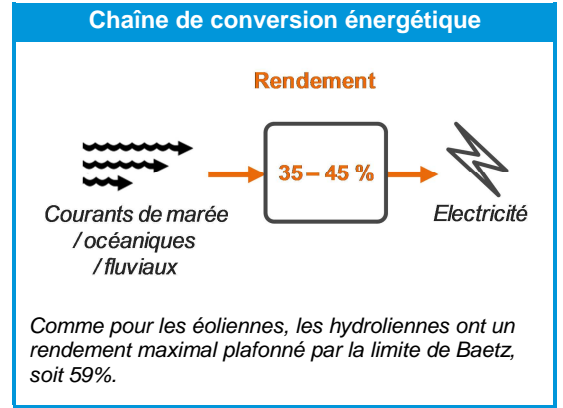
Flottantes ou installées sur les fonds marins, les hydroliennes permettent de récupérer l'énergie des courants de marées, des courants océaniques ou des courants fluviaux pour produire de l'électricité. Equivalents sous-marin des éoliennes, les hydroliennes sont constituées de pâles liées à un rotor, transmettant un couple à un alternateur.

Un des avantages principaux de la technologie est de s'appuyer sur une ressource continue dans le cas des courants océaniques et fluviaux et fortement prédictible dans le cas des courants de marées. Les sites éligibles sont très spécifiques : ils doivent disposer d'une vitesse de courant minimale de 2,5 m/s. Certaines zones sont particulièrement propices (estuaires, singularités bathymétriques, etc.).

L'émergence de la filière hydrolienne est encore récente. Ainsi, différents types de technologies sont aujourd'hui développées (turbines à axe vertical, profils oscillants, etc.). Comme pour l'éolien, les hydroliennes sont destinées à être regroupées en fermes à l'échelle commerciale.



Crédits : Adapté de Planète-énergies



Crédits : L'hydrolienne L'Arcouest, EDF/P. Dureuil

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Constance (courants océaniques) ou forte prédictibilité de la ressource (courants de marées)
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")
- Acceptabilité sociétale facilitée (pas de pollution visuelle)

-

- Filière non mature (en cours de développement)
- Intermittence (courants de marées) et caractère fatal de la production d'électricité
- Rareté des sites exploitables (profondeur limitée si dispositif fixé au sol)
- Complexité et coût de la conception, de l'installation et de la maintenance en raison du milieu marin
- Complexité et coût du raccordement

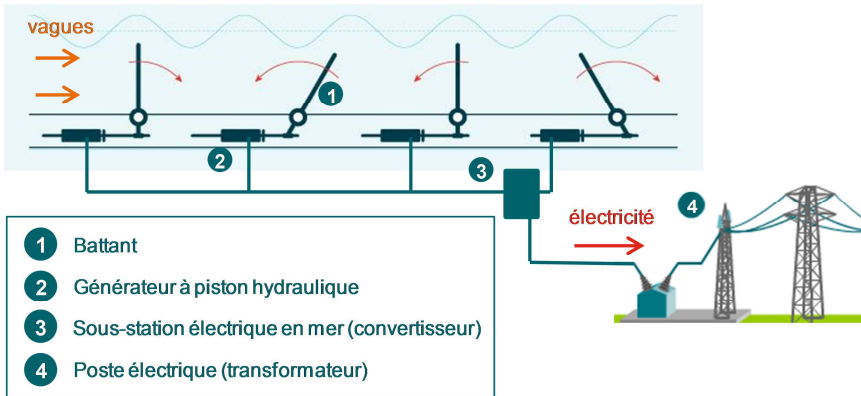
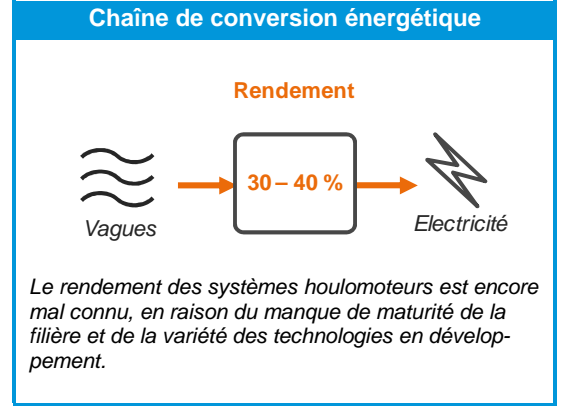
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>0,5 MW_e / Unité hydrolienne pilote</p> <p>1 GW_e 100 MW_e 10 MW_e 1 MW_e 100 kW_e 10 kW_e 1 kW_e</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Disponibilité technique du système, très proche de la disponibilité réelle, le marnage étant relativement prévisible.</p>	<p>4000 - 5000 h/an Base intermittente prédictible</p> <p>Des durées de fonctionnement plus longues pourraient être envisagées en exploitant les courants océaniques ou fluviaux continus.</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>40 – 55 %</p> <p>Comparativement au vent, les courants marins sont relativement réguliers. Ceci explique en partie la valeur du facteur de charge.</p>

13 Fermes houlomotrices

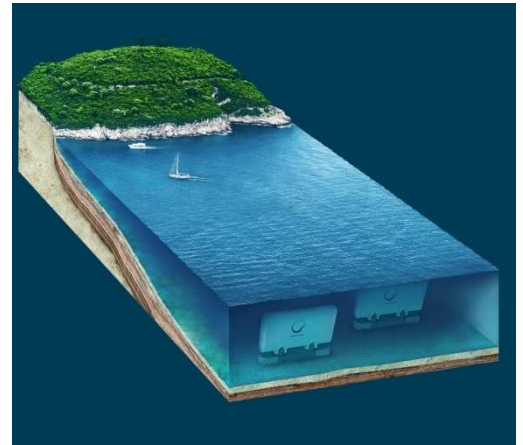
De nombreuses technologies sont encore à l'étude pour la récupération de l'énergie des vagues. Les systèmes dit houlomoteurs peuvent en effet être de natures très diverses : flotteurs ponctuels ou linéaires, systèmes à déferlement, colonnes d'eau oscillantes, etc. Chacun de ces systèmes est conçu pour transformer l'oscillation de la houle en électricité. Les conditions extrêmes de la surface de la mer impliquent des systèmes particulièrement robustes.

La ressource houlomotrice est généralement chiffrée en kW par mètre de front de vague. La gamme optimale se situe entre 15 et 75 kW/m. Sur la face atlantique française, la ressource moyenne est estimée à 45 kW/m.

D'origine éolienne, l'énergie est concentrée dans l'ondulation de la mer et offre donc une ressource abondante. Bien que difficilement prévisible à long terme, la ressource houlomotrice est prévisible avec une excellente précision à 1 ou 2 jours.



Crédits : Système Waveroller, adapté de DCNS



Crédits : Projet houlomoteur Wattmor, DCNS

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Abondance de la ressource
- Bonne prévisibilité de la ressource à court terme (48 h)
- Diversité des sites éligibles (notamment en eaux profondes)
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

-

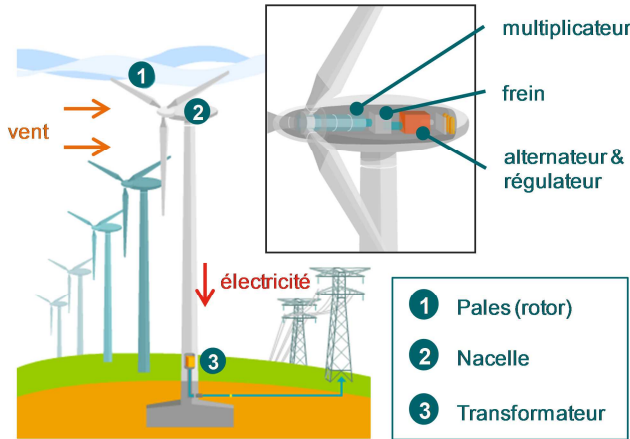
- Filière non mature (en cours de développement)
- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité
- Incertitude dans la prévision de la ressource à long terme
- Complexité et coût de la conception, de l'installation et de la maintenance en raison du milieu marin
- Complexité et coût du raccordement

Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>0,5 MW_e Unité houlomotrice pilote</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Disponibilité théorique du système, sachant qu'il existe encore peu de retour d'expérience sur les technologies houlomotrices.</p>	<p>6000 - 8000 h/an Base « fatale »</p> <p>La ressource houlomotrice peut être connue avec une excellente précision 48h à l'avance.</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>30 – 50 %</p> <p>Facteur de charge théorique, méritant d'être précisé lorsque la filière houlomotrice sera plus développée.</p>

14 Fermes éoliennes terrestres

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité via un rotor, lié aux pales, ainsi qu'un dispositif électromécanique. La puissance fournie étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, la performance de l'éolienne dépend de l'emplacement ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles. L'énergie du vent peut être captée à partir d'une vitesse de 3 m/s, pour une performance maximale atteinte à partir de 12 m/s à 15 m/s. Les éoliennes sont mises à l'arrêt au-delà d'une vitesse de vent seuil (variable selon les modèles).

Les modèles les plus répandus sont les éoliennes à axe horizontal à 3 pales, avec rotors à vitesse variable. Alors que les modèles initiaux étaient conçus avec des rotors à vitesse fixe, les exigences des opérateurs de réseaux pour une électricité de meilleure qualité ont fait évoluer les technologies vers une variabilité croissante de la vitesse des rotors. Une évolution majeure concerne également le passage des électroaimants à des aimants permanents, plus fiables et efficaces à charge partielle.



Crédits : Adapté d'EDF

Chaîne de conversion énergétique

Rendement

Vent → 35-45 % → Electricité

Les modèles récents d'éoliennes (axe horizontal, 3 pales) ont un rendement supérieur à 40 %.

Le rendement d'une éolienne ne peut dépasser 59% (limite de Baetz). En tenant compte des différentes pertes, les éoliennes commercialisées atteignent un rendement d'environ 75% de la limite de Baetz.



Crédits : Parc Le Haut-Corlay (22), ADEME/J. Le Goff

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau national et européen
- Conception, installation et maintenance aisée
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

-

- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource)
- Incertitude dans la prévision de la ressource
- Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.)
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.)

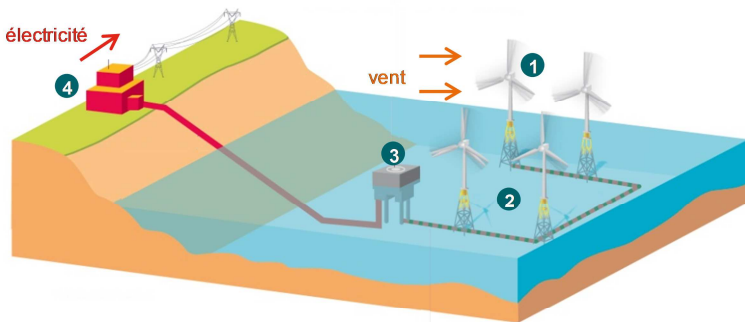
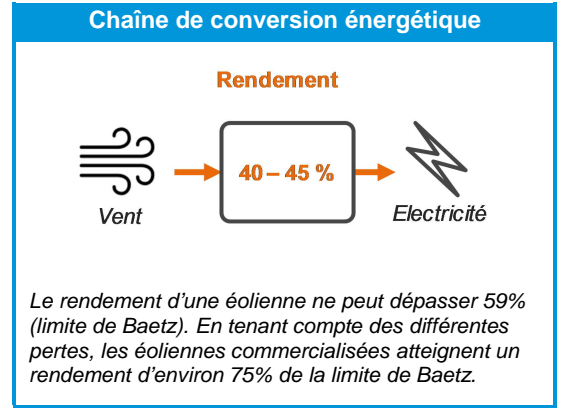
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>20 MW_e Ferme 10 éoliennes</p> <p>2 MW_e Eolienne industrielle</p> <p>5 kW_e Eolienne domestique</p>	<p>50%</p> <p>~ 97%</p> <p>Disponibilité technique du système, n'incluant que les arrêts pour maintenance ou fortuits (la disponibilité de la ressource en vent n'est pas prise en compte).</p>	<p>6000 - 7500 h/an</p> <p>Base « fatale »</p> <p>Une éolienne fonctionne le plus souvent à charge partielle. L'électricité produite est fatale.</p>	<p>50%</p> <p>20 - 25%</p> <p>Le facteur de charge dépend de la situation géographique. En Bretagne, il s'élève en moyenne à 21% (1 MW_e éolien produit environ 1900 MWh_e par an)</p>

15 Fermes éoliennes marines

Le principe de fonctionnement des éoliennes marines est similaire à celui des technologies terrestres : l'énergie du vent est convertie en électricité via la rotation d'un rotor relié à un dispositif électromécanique. Le milieu marin présente cependant des spécificités, avec une ressource en vent plus stable mais aussi de fortes contraintes sur la conception des infrastructures ou la conduite opérationnelle.

Les éoliennes posées, disposant de fondations fixées sur les fonds marins (20% à 25% de l'investissement), sont les technologies les plus développées. Le diamètre des rotors et la puissance des éoliennes n'a cessé de croître, atteignant plus de 150 m pour 8 MW_e.

Pour étendre le champ d'application à des fonds plus profonds, des technologies éoliennes flottantes sont en cours de développement. Des premiers démonstrateurs ont été mis en place jusqu'à des profondeurs de 200 m. L'éolien flottant fait cependant face au problème du raccordement, dont le coût est déjà substantiel pour l'éolien posé (10% à 25% de l'investissement).



- 1 Turbines éoliennes
- 2 Fondations
- 3 Sous-station électrique en mer (convertisseur)
- 4 Poste électrique terrestre (transformateur)

Crédits : Adapté d'Ailes Marines



Crédits : Projet de ferme de St-Brieuc (22), Iberdrola

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau national et européen
- Ressource en vent élevée et stable en mer
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

-

- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource)
- Incertitude dans la prévision de la ressource
- Complexité et coût de la conception, de l'installation et de la maintenance en raison du milieu marin
- Complexité et coût du raccordement
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (pollution visuelle, conflits avec les activités maritimes)

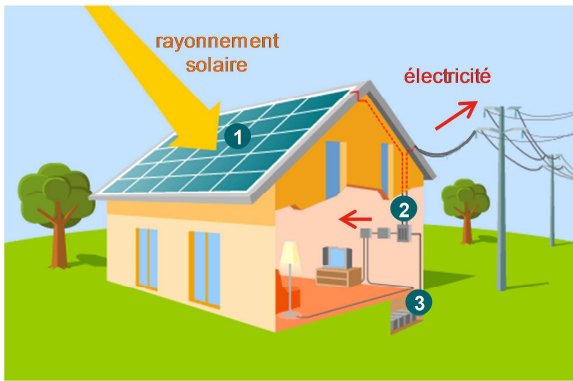
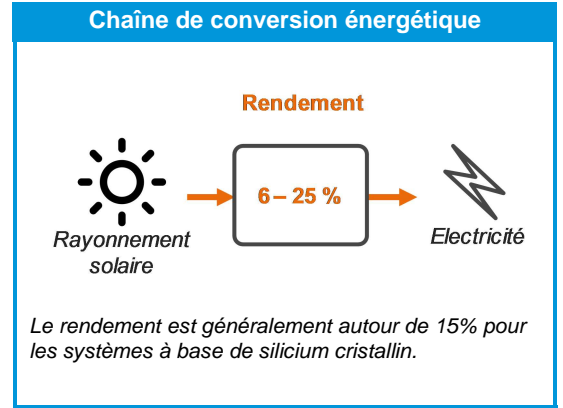
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>500 MW_e Ferme de la baie de St-Brieuc, 100 éoliennes (en projet)</p> <p>8 MW_e Eolienne offshore la plus puissante en 2014</p>	<p>50%</p> <p>~ 97%</p> <p>Disponibilité technique du système, n'incluant que les arrêts pour maintenance ou fortuits (la disponibilité de la ressource en vent n'est pas prise en compte).</p>	<p>6000 - 7500 h/an</p> <p>Base « fatale »</p> <p>Une éolienne fonctionne le plus souvent à charge partielle. L'électricité produite est fatale.</p>	<p>50%</p> <p>30 - 45 %</p> <p>Le facteur de charge est de manière générale plus élevé en mer que sur terre, en raison de vents plus intenses et plus réguliers. (1 MW_e éolien marin produit entre 2600 et 4000 MWh_e par an)</p>

16 Systèmes solaires photovoltaïques

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) convertissent l'énergie du rayonnement solaire en électricité grâce à un matériau semi-conducteur qui, sous l'excitation des photons de la lumière, crée un déplacement d'électrons. Les matériaux semi-conducteurs peuvent être cristallins (silicium monocristallin et polycristallin), sous forme de couche mince (silicium amorphe, tellure de cadmium), ou encore faits de matière organique. Les matériaux cristallins sont les plus répandus. Les couches minces ont toutefois des propriétés intéressantes, notamment pour une intégration aux bâtiments (meilleur captage du rayonnement diffus, bonne résistance à l'échauffement, etc.).

Les systèmes se présentent sous forme de panneaux disposés au sol ou sur des toitures, dans un nombre variant de un à plusieurs centaines de panneaux. Le courant délivré étant continu, l'installation d'un onduleur est nécessaire pour délivrer un courant alternatif, notamment dans le cas d'une injection de l'électricité sur le réseau.

Les panneaux PV captent les rayonnements solaires direct et diffus. Certains systèmes comme les « trackers », qui suivent la course du soleil, ou les concentrateurs permettent de maximiser les rendements en zones de fort ensoleillement direct.



- 1 Panneaux photovoltaïques
- 2 Onduleur / Compteur électrique
- 3 Batteries (si stockage)



Crédits : Adapté d'EDF

Crédits : Les Glénan (29), ADEME/O. Sébart

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Abondance de la ressource
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")
- Forte modularité d'installation, adaptée au logement particulier et à l'autoconsommation

-

- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de l'ensoleillement)
- Incertitude dans la prévision de la ressource
- Création de perturbations sur le réseau (variations brutales d'ensoleillement)
- Emprise au sol, conflits d'usage

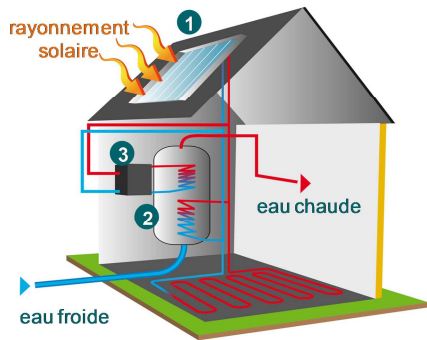
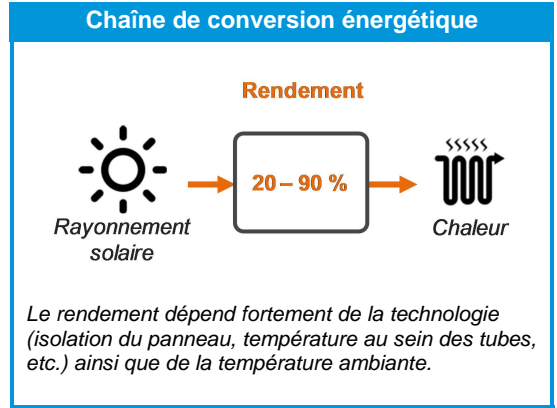
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>12 MW_{ec} / Ferme solaire d'une emprise au sol de 25 ha</p> <p>0,5 kW_{ec} / Panneau solaire domestique de 5 m²</p>	<p>50%</p> <p>95 – 98 %</p> <p>Disponibilité technique du système. A noter que cette valeur est purement théorique puisque les systèmes ne fonctionnent pas la nuit.</p>	<p>~ 4000 h/an</p> <p>Base « fatale » intermittente</p> <p>4000 h/an en France en moyenne, correspond au nombre d'heures pendant lesquelles l'onduleur est allumé (en journée)</p>	<p>50%</p> <p>10 – 20 %</p> <p>En 2012 en Bretagne, le facteur de charge était de 12%, contre une moyenne nationale de 13%. (1 MW_e solaire PV produit environ 1050 MWh_e par an)</p>

17 Systèmes solaires thermiques

Les systèmes solaires thermiques convertissent l'énergie contenue dans les rayons du soleil en chaleur. Ils se présentent sous forme de panneaux exposés au soleil (le plus souvent installés sur des toitures), et dans lesquels des tubes remplis d'un liquide caloporteur captent la chaleur des rayonnements. Le liquide (eau simple ou mélangée à de l'antigel sous pression) est chauffé dans les tubes puis distribué aux équipements utilisant de la chaleur.

La technologie classique de capteurs plans permet de générer de l'eau chaude entre 20 et 40°C sans vitrage isolant et entre 70 et 120°C si la présence d'une vitre réduit les déperditions thermiques. La présence d'une couche de vide entre deux vitres permet d'augmenter encore l'isolation thermique du système et d'atteindre des températures élevées jusqu'à 300°C dans les cas les plus favorables.

Les panneaux ou tubes solaires thermiques ont un usage domestique, tertiaire ou industriel pour couvrir des besoins en eau chaude sanitaire, chauffage, voire eau chaude de procédés industriels.



- 1 Capteurs solaires thermiques
- 2 Ballon de stockage d'eau chaude
- 3 Chaudière d'appoint



Crédits : Adapté de Neoartisanat

Crédits : Silfiac (56), ADEME/J. Fresnod

+

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production de chaleur
- Abondance et gratuité de la ressource
- Utilisation locale de l'énergie (pas de raccordement à un réseau).
- Forte modularité d'installation
- Composante de stockage permettant un usage en continu

-

- Performance dépendante de la localisation géographique et des conditions météorologiques (ensoleillement, température ambiante).
- En autoconsommation, nécessité d'une solution de chauffage d'appoint.

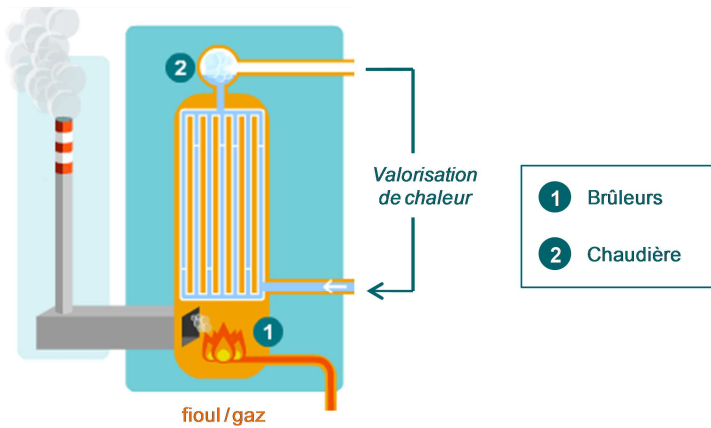
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>100 kW_{th} / Système collectif, 140 m² de panneaux</p> <p>4 kW_{th} / Système domestique, 6 m² de panneaux</p>	<p>50%</p> <p>~ 99 %</p> <p>Besoin de maintenance théoriquement négligeable.</p>	<p>Production ~ 4000 h/an</p> <p>Disponibilité Continue avec stock tampon</p> <p>Les systèmes solaires thermiques fonctionnent en continu jour et nuit grâce au stockage tampon, bien que la production de chaleur soit effective uniquement lorsque l'ensoleillement est suffisant.</p>	<p>50%</p> <p>5 – 10 %</p> <p>La puissance thermique instantanée est rarement au niveau de la puissance installée maximale. Ceci explique la faiblesse du facteur de charge.</p>

18 Chaudières fioul / gaz

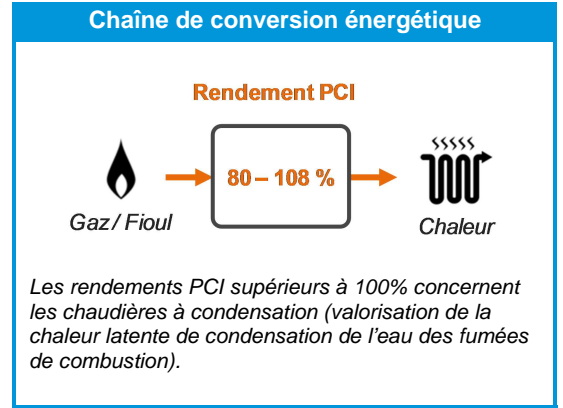
Les chaudières à gaz ou au fioul sont des appareils de chauffage permettant de transférer en continu de l'énergie issue de la combustion de gaz ou de fioul à un fluide caloporteur. Ce fluide caloporteur – généralement de l'eau chaude ou de la vapeur – est utilisé pour le chauffage de procédés industriels, le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire (ECS).

Les chaudières sont également les systèmes de génération de vapeur alimentant les turbines dans certaines centrales de production d'électricité thermiques (cf. fiches Centrales thermiques à flamme et Centrales à cycles combinés).

Il existe un grand nombre de technologies différentes, fonction de nombreux paramètres comme l'application recherchée (individuelle collective ou industrielle), la nature des échanges thermiques (avec ou sans condensation de l'eau des fumées de combustion), la nature du fluide caloporteur, etc.



Crédits : Adapté d'EDF



Crédits : Chaudière industrielle, Vapotech

- +**
- Forte modularité de puissance (fonctionnement à charge partielle jusqu'à 30% de la puissance nominale)
 - Nombreuses technologies disponibles, adaptables au besoin
 - Simplicité d'approvisionnement dans le cas du gaz
 - Autonomie dans le cas du fioul, grâce au stock de combustible sur site
 - Rendement élevés, en particulier dans le cas des chaudières à condensation

-
- Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique)
 - Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, notamment pour le fioul (SOx, NOx, Poussières)
 - Reconstitution du stock de combustible potentiellement contraignant pour les chaudières fioul

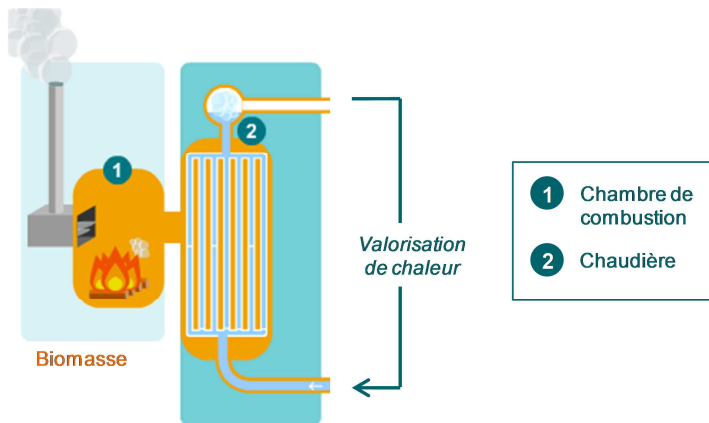
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>5 MW_{th} Chaudière industrielle</p> <p>20 kW_{th} Chaudière domestique</p>	<p>50%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Disponibilité technique du système incluant la maintenance planifiée.</p>	<p>Ch. domestiques Saisonnier</p> <p>Ch. Industrielles Variable</p> <p>L'utilisation des chaudières industrielles dépend des procédés mis en jeu, et des horaires de fonctionnement de l'industrie (continu, 1x8h, 2x8h, avec ou sans arrêt le week-end, etc.). Le fonctionnement à charge partielle est possible, dans la limite de la modularité du brûleur. Néanmoins, une charge partielle peut impacter le rendement de la chaudière.</p>	<p>50%</p> <p>30 – 90 %</p>

19 Chaudières biomasse

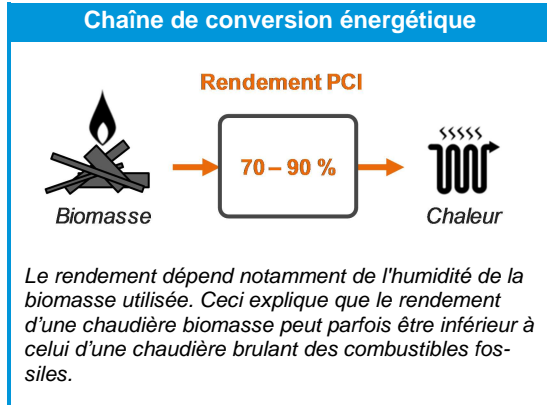
Les chaudières biomasse fonctionnent sur un principe relativement identique à celui des chaudières gaz ou fioul : elles permettent de transférer en continu de l'énergie issue de la combustion de biomasse (bûches, granulés de bois, copeaux de bois, bague...) à un fluide caloporteur, généralement de l'eau chaude ou de la vapeur. Une des différences notables réside dans la manipulation du combustible, souvent plus contraignante que pour des intrants gazeux ou liquides.

Les chaudières biomasses se substituent également aux chaudières fioul ou gaz dans leurs usages, pour de la chaleur industrielle, du conditionnement d'ambiance ou de l'eau chaude sanitaire (ECS). On parlera de chaufferie biomasse pour une production de chaleur centralisée, pouvant être distribuée à des consommateurs diffus par réseau de chaleur. La vapeur générée par la chaudière peut également servir à alimenter une turbine pour la production d'électricité, souvent en cogénération (cf. fiche 6).

Il existe plusieurs types de chaudières (foyer volcan, à grille mobile, spreader stoker, lit fluidisé), adaptées à différentes gammes de puissance et différents types de biomasse. Les efforts d'amélioration actuels portent notamment sur la filtration accrue des fumées.



Crédits : Adapté d'EDF



Crédits : Espace de Lannion (22), ADEME/J. Le Goff

+

- Usage de ressources renouvelables avec approvisionnement principalement local
- Emissions de gaz à effet de serre limitées pour la production de chaleur (bilan carbone neutre de la biomasse énergie)
- Forte modularité de puissance (fonctionnement à charge partielle jusqu'à 30% de la puissance nominale)

-

- Emissions d'éléments polluants (particules fines)
- Encombrement relativement important (en raison du stock de biomasse)
- Contraintes liées à la reconstitution du stock de biomasse, ainsi qu'à l'approvisionnement manuel régulier du foyer pour les chaudières domestiques
- Nécessité d'une qualité du bois maîtrisée (humidité)

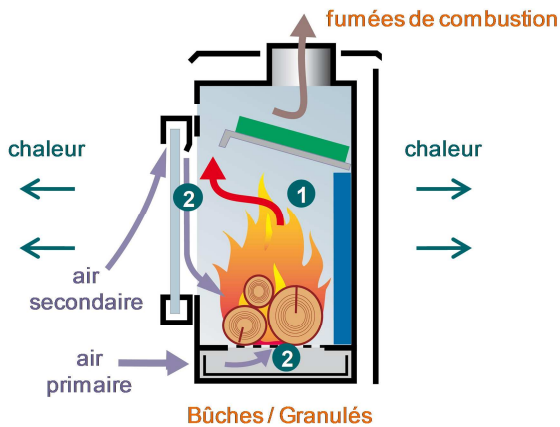
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>5 MW_{th} Chaudière industrielle</p> <p>20 kW_{th} Chaudière domestique</p>	<p>50%</p> <p>85 – 95 %</p> <p>Disponibilité technique du système incluant la maintenance planifiée.</p>	<p>Ch. domestiques Saisonnier</p> <p>Ch. Industrielles Variable</p> <p>L'utilisation des chaudières industrielles dépend des procédés mis en jeu, et des horaires de fonctionnement de l'industrie (continu, 1x8h, 2x8h, avec ou sans arrêt le week-end, etc.). Le fonctionnement à charge partielle est possible, dans la limite de la modularité du brûleur. Néanmoins, une charge partielle peut impacter le rendement de la chaudière.</p>	<p>50%</p> <p>30 – 90 %</p>

20 Poêles & Cheminées

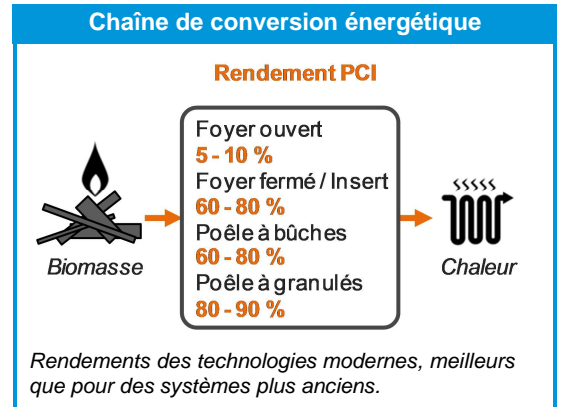
Les inserts, foyers ouverts, foyers fermés et poêles sont des appareils de chauffage permettant de transférer en continu de l'énergie issue de la combustion de biomasse (bûches et granulés majoritairement) directement au milieu à chauffer par convection et rayonnement.

Ces technologies servent essentiellement au chauffage d'habitat individuel et nécessitent la présence d'une cheminée ou d'un conduit de fumées pour l'évacuation des produits de combustion.

Les cheminées à foyers ouverts sont les moins efficaces et les plus polluantes. Les inserts peuvent remplacer les foyers ouverts en venant s'encastrier directement dans la cheminée existante. Les poêles à granulés représentent aujourd'hui les solutions les plus performantes.



Crédits : Poêle à bois, adapté de Supra



Crédits : Insert, ADEME/O. Sébart

+

- Usage de ressources renouvelables avec approvisionnement principalement local
- Emissions de gaz à effet de serre limitées pour la production de chaleur (bilan carbone neutre de la biomasse énergie)
- Performances environnementales en progression (garanties par le label Flamme verte)
- Gains de rendement élevés pour le passage d'un foyer ouvert à un foyer fermé

-

- Emissions d'éléments polluants et de poussières et nécessité de disposer d'un conduit d'évacuation des fumées
- Encombrement du stock de bois et gestion des cendres
- Autonomie limitées (quelques heures)
- Faible rendement des foyers ouverts
- Contraintes liées à la reconstitution du stock de bois, ainsi qu'à l'approvisionnement manuel régulier du foyer
- Nécessité d'une qualité du bois maîtrisée (humidité)

Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>10 kW_{th} / Cheminée domestique</p>	<p>50%</p> <p>~ 99%</p> <p>Entretien / ramonage 1 à 2 fois par an par une personne qualifiée.</p>	<p>Appoint Ponctuel Principal Saisonnier</p> <p>Technologie souvent dédiée au chauffage d'appoint en complément d'une source principale de chauffage (2/3 des équipements bretons).</p>	<p>50%</p> <p>1 - 25%</p>

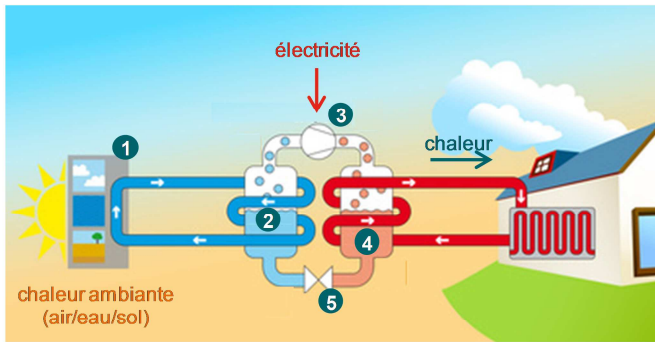
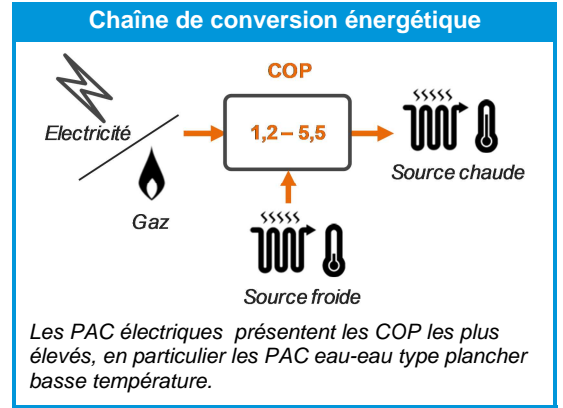
21 Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur (PAC) captent la chaleur d'un milieu basse température (air, eau ou sol) pour la transférer à un milieu à plus haute température (air, eau ou sol) grâce à un fluide frigorigène subissant un cycle thermodynamique.

Bien que majoritairement utilisées en tant qu'appareils de chauffage, les PAC permettent également de refroidir le milieu d'où la chaleur est extraite (climatisation).

Il existe plusieurs technologies de PAC, fonction de la source d'énergie, de la nature des milieux émetteurs et récepteurs de calories (PAC air-air, air-eau, géothermique) et de la réversibilité du cycle. Les technologies les plus répandues sont les PAC électriques où le cycle thermodynamique est induit par un compresseur alimenté électriquement. Les autres technologies développées sont les PAC à absorption et les PAC à moteur fonctionnant au gaz.

On définit généralement l'efficacité des PAC par leur COP (coefficient de performance), traduisant la chaleur fournie en énergie finale par rapport au travail mécanique absorbé (consommation électrique ou gaz du compresseur).



Crédits : Adapté de Une-pompe-à-chaleur

Crédits : PAC aérothermique, QuelleEnergie.fr

- + Faible impact environnemental sur site (pas d'émissions de SOx, de particules, etc.)
- + Utilisation en double saison des PAC réversibles, pour des usages de chauffage et de climatisation
- + Utilisation possible en production simultanée de chaleur et de froid (cas d'application industriels), avec un gain en efficacité par rapport à une production unique de chaud ou de froid

- La majorité des fluides frigorigènes ont un effet sur le réchauffement climatique
- Nuisances sonores
- La croissance du parc de PAC électriques accroît la thermosensibilité sur le réseau électrique, avec des pointes de consommations lors des périodes de grand froid
- Un COP > 3,5 n'est garanti que pour un chauffage à 45°C, pour des usages en préchauffage industriel par exemple

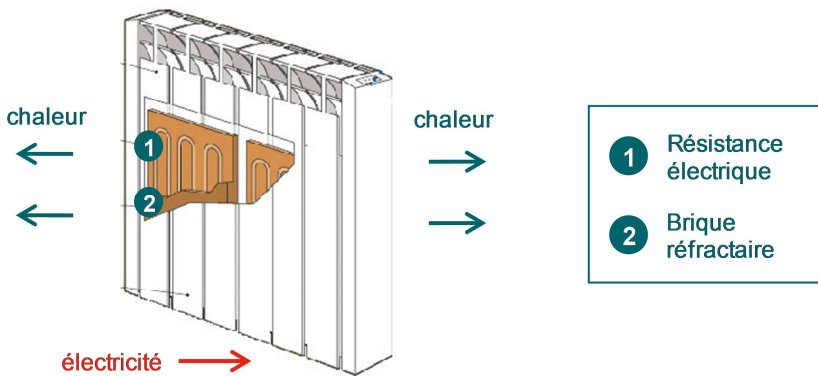
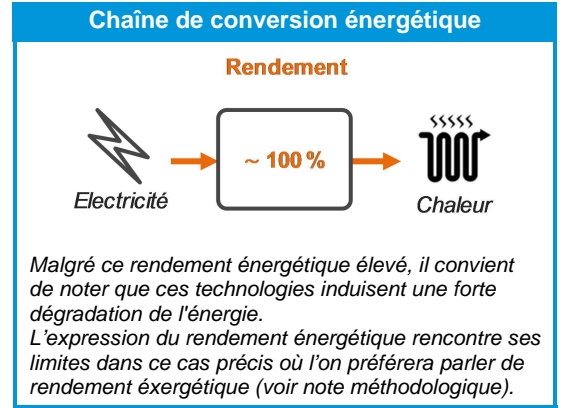
Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>15 kW_{th} / PAC électrique domestique</p>	<p>50% 0% 100% ~ 99%</p> <p>Appareils nécessitant très peu d'entretien et de maintenance.</p>	<p>PAC domestiques Saisonnier PAC Industrielles Variable</p> <p>On retrouve en grande majorité les PAC pour des usages domestiques (résidentiel et tertiaire), et donc en utilisation saisonnière. Les applications industrielles sont néanmoins en progression. Les PAC réversibles peuvent fonctionner en double saison (hiver et été), avec dans ce cas un facteur charge supérieur.</p>	<p>50% 0% 100% 10 - 50%</p>

22 Radiateurs électriques

Les radiateurs électriques sont des appareils de chauffage permettant de convertir de l'énergie électrique en chaleur. Ils sont essentiellement destinés au chauffage individuel, bien qu'on les retrouve parfois dans l'industrie ou dans le tertiaire.

Il existe plusieurs types de technologies présentant des performances et des confort de chauffe variés. Les convecteurs sont les appareils les plus répandus mais les moins performants et confortables, car basés sur un transfert de chaleur par convection. Les radiateurs à inertie permettent d'accumuler la chaleur (dans des matériaux réfractaires ou un fluide caloporteur) et de la restituer de manière régulière et diffuse, améliorant ainsi la qualité du chauffage.

D'autres radiateurs mettent en jeu un chauffage par rayonnement, ce qui permet une meilleure répartition de la chaleur. On distingue les panneaux rayonnants, faciles à mettre en œuvre, des planchers et plafonds rayonnants, plus adaptés aux logements neufs.



Radiateur électrique à inertie



Crédits : Convecteur, Acqualys

+

- Faible impact environnemental sur site (pas d'émissions de SOx, de particules, etc.)
- Technologie standardisée (adaptable à tout site disposant d'une alimentation électrique)
- Simplicité et modularité d'installation
- Gains en confort thermique avec les radiateurs à inertie

-

- Technologie induisant une forte dégradation de la qualité de l'énergie (conversion d'électricité en chaleur basse température)
- Faible confort pour le chauffage par convecteurs
- La croissance du parc de radiateurs électriques accroît la thermosensibilité sur le réseau électrique, avec des pointes de consommations lors des périodes de grand froid

Gamme de puissance	Taux de disponibilité	Durée de fonctionnement	Facteur de charge
<p>1 kW_{th} / Radiateur domestique</p> <p>1 kW_{th}, 10 kW_{th}, 100 kW_{th}, 1 MW_{th}, 10 MW_{th}, 100 MW_{th}, 1 GW_{th}</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>$\sim 99\%$</p> <p>Appareils nécessitant très peu d'entretien et de maintenance.</p>	<p>Appoint Ponctuel</p> <p>Principal Saisonnier</p> <p>Technologies pouvant servir de chauffage principal ou de chauffage d'appoint.</p>	<p>50%</p> <p>0% 100%</p> <p>10-50%</p> <p>Technologie très flexible. Par convention, il est ici supposé un fonctionnement maximal pour une demi-année.</p>

Bibliographie

- [1] Commission européenne, «Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan,» 2011.
- [2] RTE, «Bilan électrique 2012,» 2013.
- [3] NREL, «Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies,» 2010.
- [4] IFP & CEA, «Panorama 2010 - Quelles ressources en combustibles nucléaires,» 2010.
- [5] EDF, «Les TAC, une production de pointe,» 2012.
- [6] EDF PEI , «Pointe-Jarry, une nouvelle centrale électrique pour la Guadeloupe,» 2011.
- [7] A. Bretagne, «Conférence bretonne de l'énergie - Atelier Méthanisation en pointe,» 16 mars 2012.
- [8] Observ'ER, «Le baromètre 2011 des énergies renouvelables électriques en France,» 2011.
- [9] Observ'ER, «Le baromètre 2012 des énergies renouvelables électriques en France,» 2012.
- [10] EDF, «Biomasse : inauguration de la centrale de Saint-Pierre-des-Corps,» 30 septembre 2013. [En ligne]. Available: <https://www.lenergieenquestions.fr/biomasse-inauguration-de-la-centrale-de-saint-pierre-des-corps/>.
- [11] V. Krystell, «La centrale biomasse de Rennes redonne vie aux déchets de bois,» *France 3 Bretagne*, 13 janvier 2014.
- [12] ADEME, «ITOM : Les Installations de Traitement des Ordures Ménagères en France, Résultats 2010,» 2012.
- [13] ADEME, «Les avis de l'ADEME : L'incinération des déchets ménagers et assimilés,» 2012.
- [14] INSEE, *Ordures ménagères traitées dans les installations autorisées en Bretagne*, 2008.
- [15] SITA, «Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux de la Butte Bellot - Rapport d'activité 2010,» 2010.
- [16] Process Alimentaire Magazine, «Un nouveau méthaniseur grande capacité en France,» 30 Avril 2013. [En ligne]. Available: <http://www.processalimentaire.com/Qualite/Un-nouveau-methaniseur-grande-capacite-en-France-23090>.
- [17] Methaqtion, «Installation de « petite » méthanisation (50kWe) en établissement d'enseignement agricole,» 2013.
- [18] ENEA Consulting &IFP Training, «Modules de formation aux énergies renouvelables : Introduction à la filière Biogaz,» 2012.
- [19] Aile, «Installations de valorisation du biogaz en Bretagne et Pays de Loire - Etat des lieux septembre 2012,» 2012.
- [20] RECORD, «Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse,» 2009.
- [21] ENEA Consulting, «Electrical Valorization of Bamboo,» 2012.
- [22] VTT, «Biomass gasification technologies for advanced power systems and synfuels,» 2009.
- [23] ENEA Consulting, «Le point sur l'énergie hydraulique,» 2010.
- [24] Bretagne Environnement, «Les chiffres clés de l'énergie en Bretagne : Edition 2012,» 2012.
- [25] RTE, «Bilan électrique 2012 de la région Bretagne,» 2013.
- [26] ENEA Consulting, «Les énergies marines renouvelables : Enjeux et solutions techniques,» 2012.
- [27] EDF, «L'usine marémotrice de la Rance : plus de 40 ans d'exploitation au service d'une production d'électricité renouvelable sans CO2,» 2011.
- [28] L. e. q. EDF, «L'hydrolienne d'EDF sera immergée dans les prochains jours à Paimpol-Bréhat,» 10 décembre 2013.
- [29] Connaissance des énergies, «Hydroliennes,» [En ligne]. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroliennes>.
- [30] Enerzine, «Nouveau projet de développement de l'énergie des vagues en Bretagne,» 26 septembre 2013.
- [31] Connaissance des Energies, «Énergie houlomotrice (ou énergie des vagues),» [En ligne]. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-houlomotrice-ou-energie-des-vagues>.
- [32] Ailes Marines S.A.S., «Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc,» [En ligne]. Available: <http://www.eolienoffshoresaintbrieuc.com/fr/accueil.aspx>.
- [33] Solairedirect, «Brochure parcs Solairedirect,» 2012.
- [34] Système Off Grid, «Photovoltaïque : les indicateurs de rendement et de performance,» 2012.
- [35] Giordano Industries, [En ligne]. Available: <http://www.giordano.fr/la-production-d-eau-chaude-solaire-collective-par-giordano>.
- [36] Solagro, «Chauffe-Eau Solaire Individuel,» 2013.
- [37] Sia Partners, «Le solaire thermique en France : des objectifs loin d'être atteints,» [En ligne]. Available: <http://energie.sia-partners.com/20130318/le-solaire-thermique-en-france-des-objectifs-loin-detre-atteints/>.
- [38] ENEA Consulting, «Chauffage eau chaude par couplage énergie solaire et gaz».
- [39] TERMOEKONOMI, «Stockholm / Yeast Factory project: 6 MW heat pump and industrial process cooling,» 2008.

- [40] Règles de l'Art Grenelle Environnement , «Les pompes à chaleur avec inverter,» 2013.
- [41] AFPAC, «Statistiques ventes 2013 PAC (5 à 50 kW),» 2013.
- [42] ADEME, CHAUDIERES PERFORMANTES (STANDARD HAUT RENDEMENT, BASSE TEMPERATURE, CONDENSATION) AVEC REGULATION PERFORMANTE, 2006.
- [43] IEA, ETSAP - Industrial Combustion Boilers, 2010.
- [44] INSEE, [En ligne].
- [45] Actu Environnement , «Chaudières biomasse,» 2011.
- [46] ADEME, «La biomasse énergie, une filière en plein essor,» 2007.
- [47] Jean Gobeil & Associés inc, «Les chaudières à la biomasse».
- [48] AET, «The AET Biomass boiler,» 2013.
- [49] ADEME, «Se chauffer au bois,» 2012.
- [50] I. Obser'ER, «Suivi du marché 2011 d'appareils domestiques de chauffage au bois en France,» Juin 2012.
- [51] ADEME, «Chauffage électrique,» 2013.
- [52] A. Bretagne, «Conférence bretonne de l'énergie, Atelier Sécurisation de l'approvisionnement électrique,» 8 novembre 2011.

Acronymes

CCG	Cycles combinés gaz
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
COP	Coefficient de performance
COV	Composé organique volatile
DIB	Déchet industriel banal
ECS	Eau chaude sanitaire
EPR	European pressurized (water) reactor
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
IAA	Industrie agro-alimentaire
IED	Industrial emissions directive
ISDND	Installation de stockage des déchets non dangereux
LFC	Lit fluidisé circulant
NOx	Oxydes d'azotes
OM	Ordures ménagère
ORC	Organic rankine cycle
PAC	Pompe à chaleur
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PV	Photovoltaïque
REP	Réacteur à eau pressurisée
RNR	Réacteur à neutrons rapides
SMR	Small modular reactor
Sox	Oxydes de soufre
STEP	Station de transfert d'énergie par pompage <i>ou</i> Station d'épuration
TAC	Turbine à combustion
UIOM	Unité d'incinération des ordures ménagères
UPS	Uninterruptible power system

Crédits des pictogrammes

Les pictogrammes suivants sous licence *Creative Commons*, libres de droit, avec attribution nécessaires à l'auteur.



Radiator (radiateur)
Ilсур Aptukov, The Noun Project



Sun (soleil)
Adam Whitcroft, The Noun Project



Power plant (centrale électrique)
Ana Maria Lora Macias, The Noun Project



Windmill (turbine éolienne)
Fabio Grande, The Noun Project



Nuclear (nucléaire)
Michael Row, The Noun Project



Greenhouse (serre)
Cristina Gallego, The Noun Project



Generator (générateur)
JonTrillana, The Noun Project



Recyclable (recyclable)
Fellipe Camara, The Noun Project



Thermometers (thermomètres)
Adam Whitcroft, The Noun Project

Tous les pictogrammes n'apparaissant pas dans la liste ci-dessus sont sous licence libre (sans attribution nécessaire à l'auteur) ou ont été conçus par ENEA Consulting.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.plan-eco-energie-bretagne.fr

Brochure (**simplifiée 2018-2019**) réalisée par :

www.enea-consulting.com

