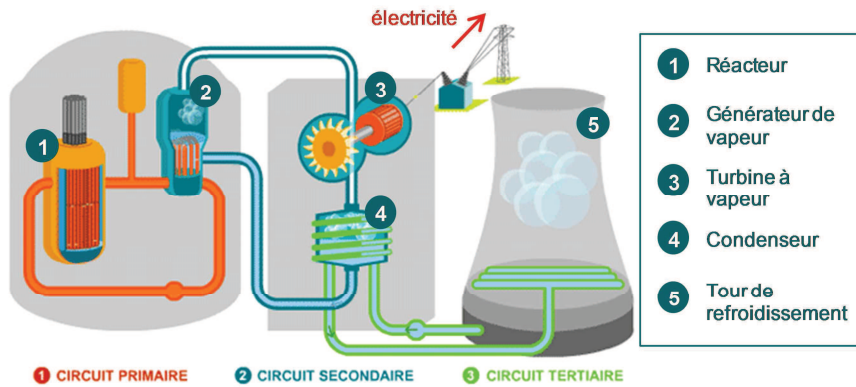
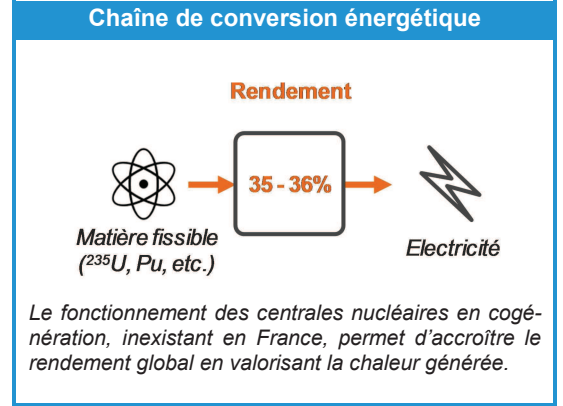


1 Centrales nucléaires à fission

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

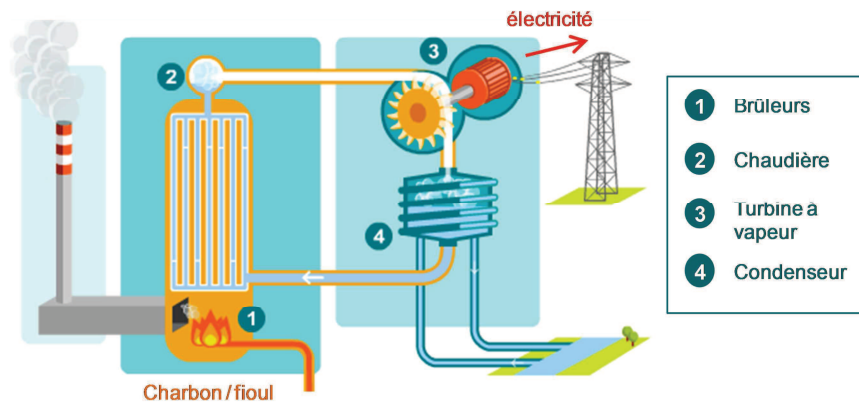
-
- Gestion des déchets nucléaires
 - Usage de combustible fissile (approvisionnement en combustible et dépendance énergétique)
 - Acceptabilité sociale complexe (sécurité, sûreté, déchets)
 - Criticité de l'impact en cas d'incident
 - Complexité du démantèlement et de la gestion de la fin de vie des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

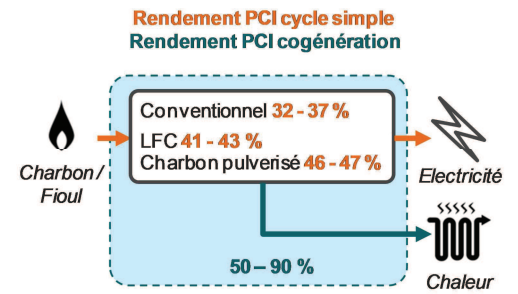


- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande
- Autonomie (dépendant de l'approvisionnement et du stock de combustible)
- Flexibilité dans le choix du combustible (pour certaines technologies)
- Longue durée de vie (30 à 40 ans)



- 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

Chaîne de conversion énergétique



Les rendements annoncés correspondent aux technologies actuellement disponibles.

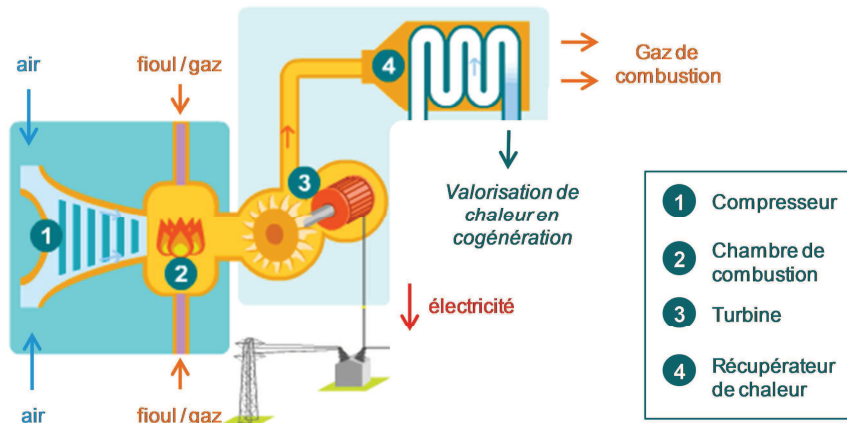


Crédits : Centrale de Cordemais (44), EDF

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).

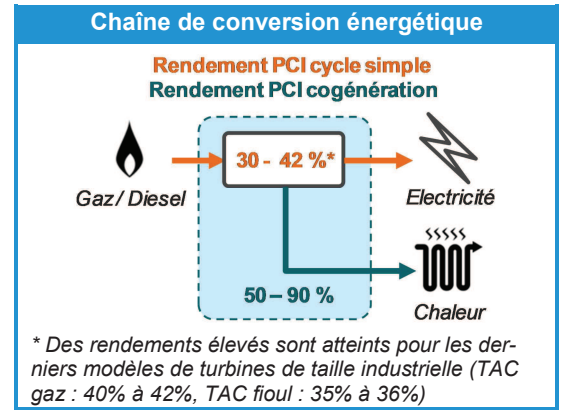
Sur le réseau électrique, la réactivité des TAC est souvent mise à profit pour fournir la pointe électrique. Les TAC sont également répandues pour la production décentralisée dans l'industrie ou le tertiaire, notamment pour un fonctionnement en cogénération. L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside 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

- +**
- 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



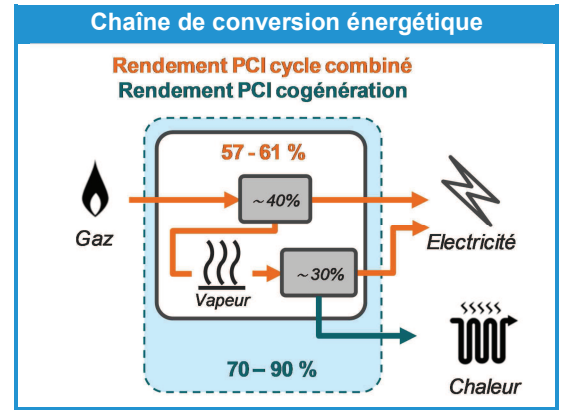
Crédits : TAC Dirinon (29), EDF/F. Sautereau

4 Centrales à cycles combinés

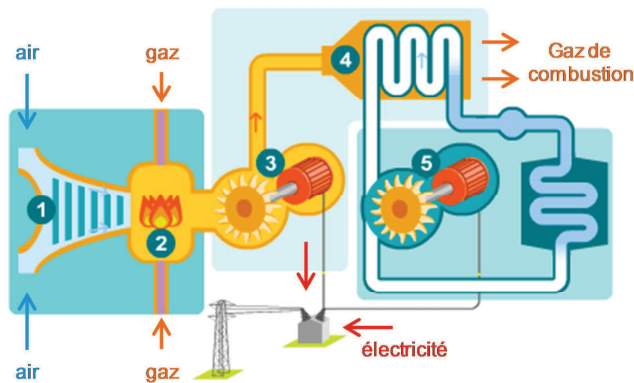
Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur 2 cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC : le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente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



- 1 Compresseur
- 2 Chambre de combustion
- 3 Turbine à gaz
- 4 Générateur de vapeur
- 5 Turbine à vapeur

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

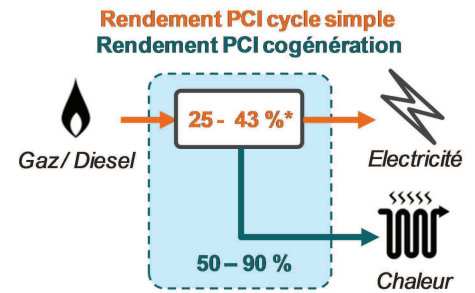
5 Moteurs à combustion interne / Groupes électrogènes

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.

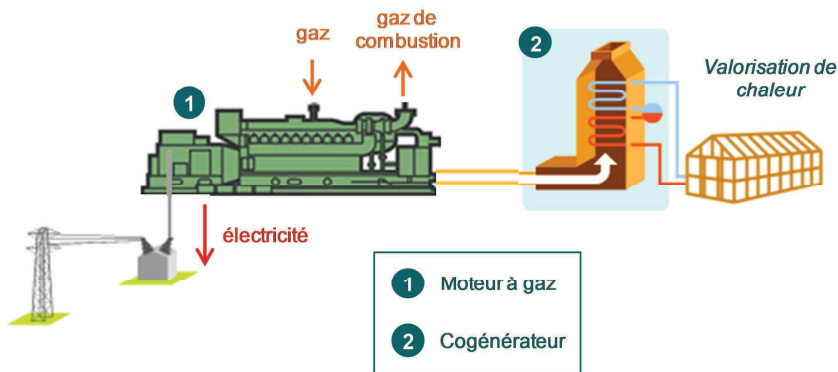
Les carburants liquides (diesel notamment), facilement stockables, sont couramment utilisés comme combustibles. En effet, les groupes électrogènes sont souvent utilisés pour de la production d'électricité sur des sites non interconnectés ou comme systèmes de secours (hôpitaux, industries, etc.). Connectés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



* 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

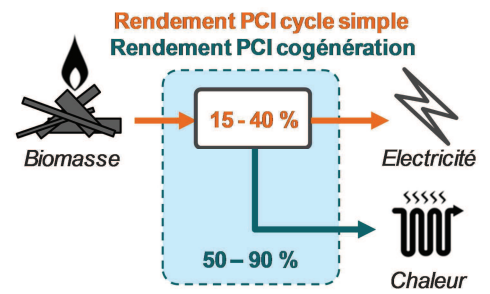
6 Centrales électriques à combustion biomasse solide

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.).

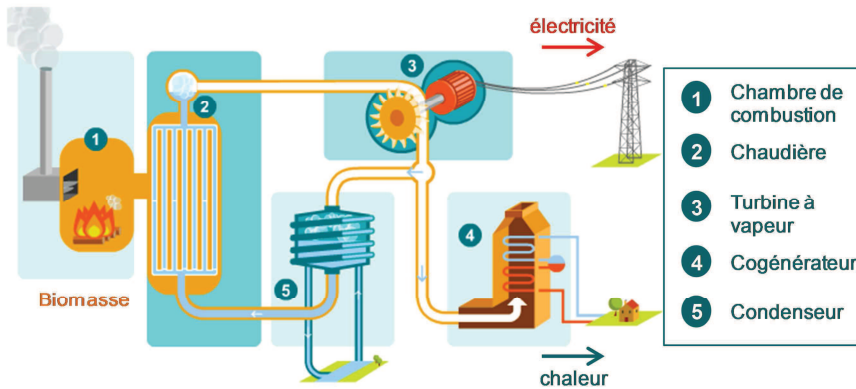
La biomasse solide regroupe le bois, les déchets de bois, les granulés et autres déchets végétaux et animaux (graisses). Les centrales de taille industrielle privilégient les plaquettes ou les granulés de bois comme combustible qui facilitent le stockage et les opérations de manipulations.

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

Chaîne de conversion énergétique



Le rendement dépend fortement de la technologie utilisée, ainsi que de la taille de l'installation.



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 papeter, etc.)
- Conversion de centrales charbon à la biomasse possible

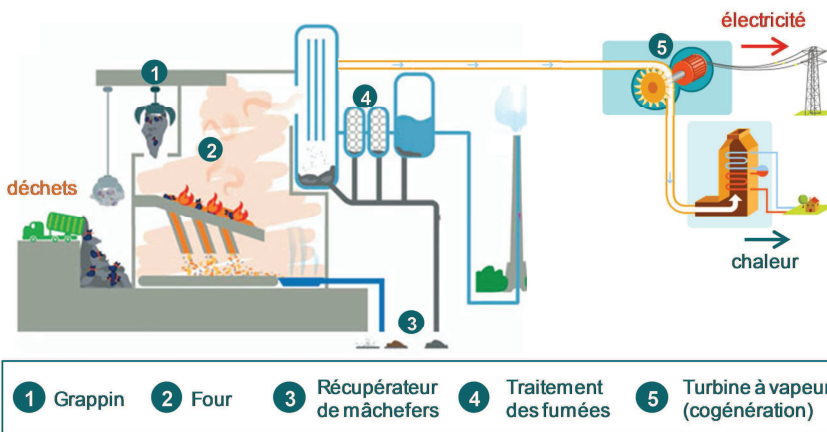


- Contraintes d'approvisionnement en biomasse (gestion des parties prenantes, sécurisation sur de longues périodes)
- Qualité variable du combustible (taux d'humidité, etc.)
- Traitement des fumées spécifique (poussières...)
- Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération
- Gestion des cendres

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.

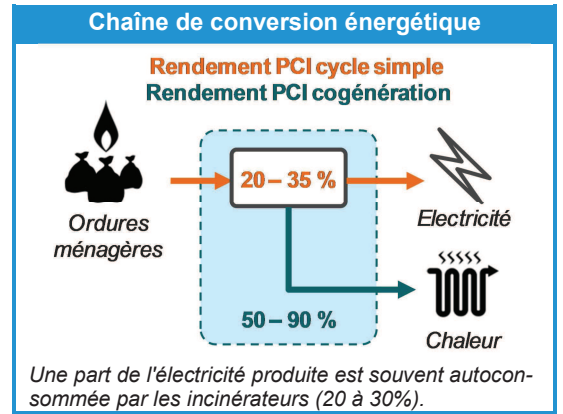
La combustion de déchets produit d'importantes quantités de polluants gazeux qu'il est nécessaire de neutraliser. C'est pourquoi les UIOM sont obligatoirement munies d'importants équipements de dépollution des fumées (ex : injection d'urée dans la chaudière, filtres, lavage humide à la chaux, traitement 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.



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

- | | |
|----------|--|
| + | <ul style="list-style-type: none"> 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) |
|----------|--|

- | | |
|----------|--|
| - | <ul style="list-style-type: none"> 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 |
|----------|--|



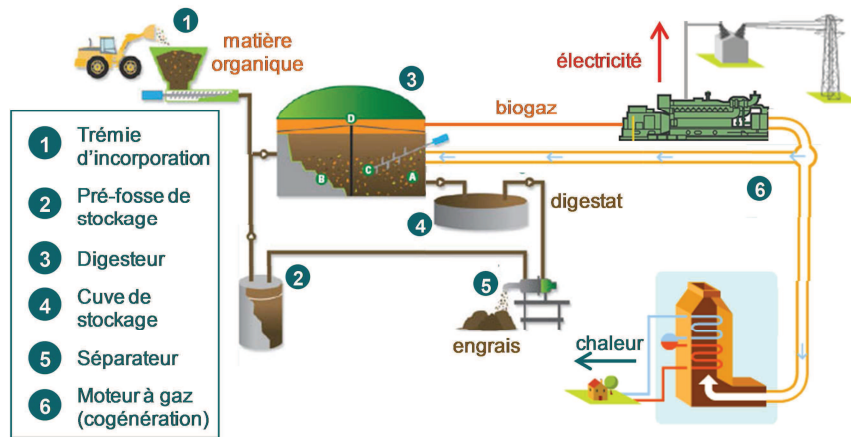
Crédits : UIOM Vitré (35), ADEME/O. Pascaud

8 Unités de valorisation énergétique du biogaz (méthanisation)

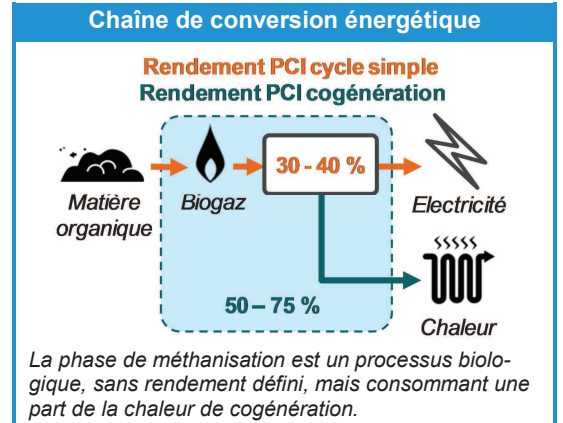
Le biogaz est un gaz combustible principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). Il est produit au cours d'un processus biologique naturel de dégradation de matière organique en l'absence d'oxygène, appelée digestion anaérobie ou méthanisation. Les éléments non digérés par ce 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'Energieze



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



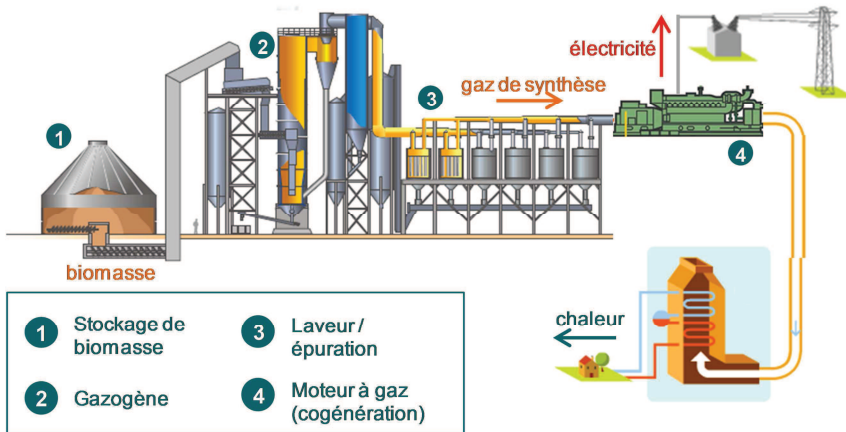
- La méthanisation nécessite de disposer d'un approvisionnement en matière organique régulier et sécurisé.
- Complexité du contrôle d'un méthaniseur (gestion des équilibres réactionnels, de la température, du pH, etc.)
- Prétraitement du biogaz nécessaire pour sa valorisation par combustion (séparation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

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

La gazéification est un procédé thermochimique 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.

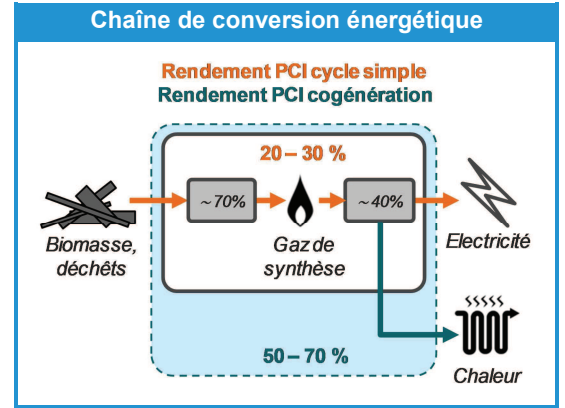
Le gaz de synthèse ainsi produit peut être utilisé comme combustible lors d'une étape ultérieure d'oxydation. Celle-ci peut être réalisée dans un moteur à gaz ou bien dans une turbine à gaz, voire dans un cycle combiné pour les plus grosses puissances.

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

- +**
- 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)



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

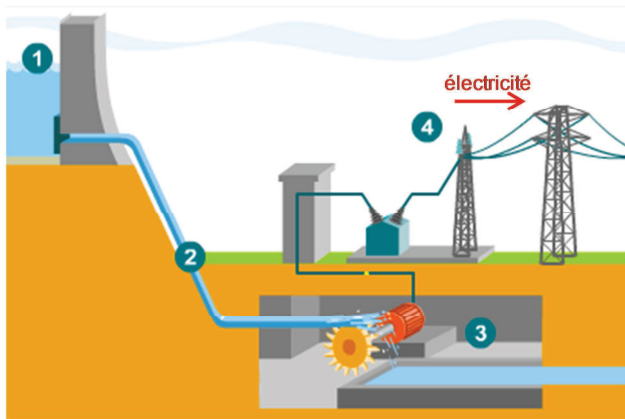
-
- Technologie encore non maîtrisée à grande échelle
 - Assez contraignant en prétraitement de la biomasse (taille, humidité, cendres)
 - Production de goudrons dans le gaz de synthèse qui doit être nettoyé avant combustion (dans un moteur ou TAC)
 - Contraintes d'approvisionnement en biomasse (gestion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

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.

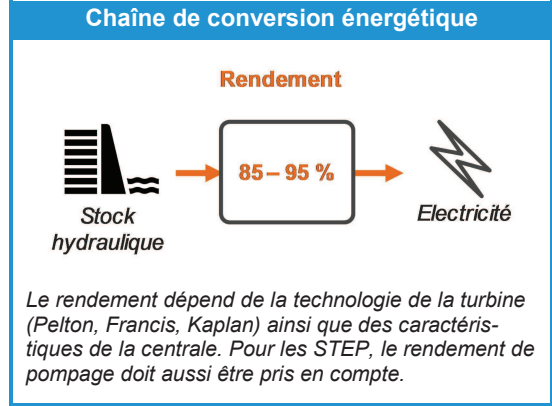
La taille des ouvrages est extrêmement variable, de l'ordre du kW_e pour la "pico-hydro" jusqu'à plusieurs dizaines de GW_e, pour des hauteurs de chutes de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Les centrales de taille restreinte, souvent au "fil de l'eau", produisent une électricité considérée 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



Le rendement dépend de la technologie de la turbine (Pelton, Francis, Kaplan) ainsi que des caractéristiques de la centrale. Pour les STEP, le rendement de pompage doit aussi être pris en compte.



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)

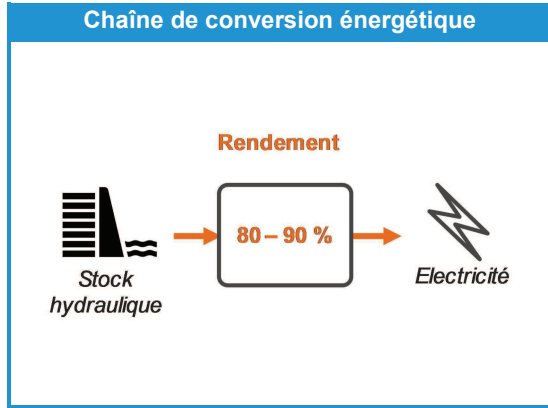
- - Raréfaction des sites exploitables (fortes contraintes géographiques)
 - Emprise au sol des gros ouvrages hydro-électriques
 - Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impacts sur la continuité écologique des cours d'eau, ennoisement de zones habitées, etc.)
 - Production électrique fatale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

11 Usines marémotrices

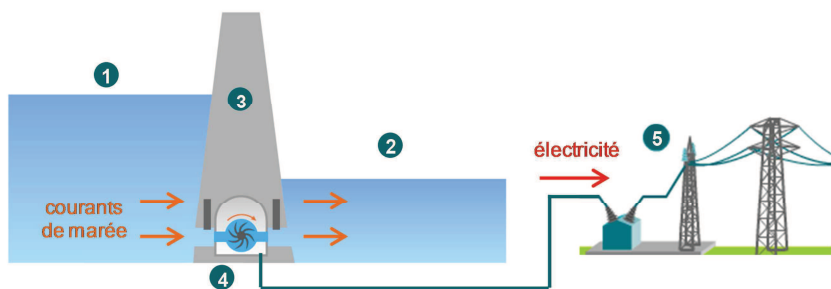
Les usines marémotrices exploitent l'énergie potentielle gravitaire liée à la différence de hauteur d'eau entre pleine mer et basse mer (marnage). Dans une baie ou un estuaire, la construction d'un barrage équipé de turbines permet de produire de l'électricité grâce au flux et reflux de marée entre le 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")

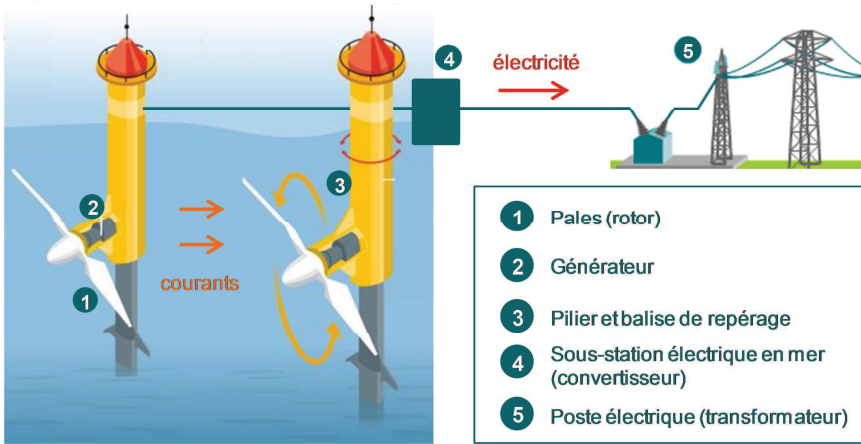
- - Intermittence de la production d'électricité malgré sa prévisibilité
 - Contraintes géographiques fortes (fort marnage nécessaire)
 - Emprise des gros ouvrages sur le littoral
 - Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact environnemental, envasement, etc.)
 - Rareté des sites exploitables

12 Fermes hydroliennes

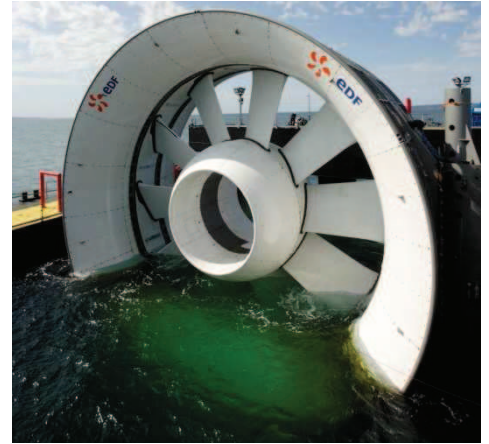
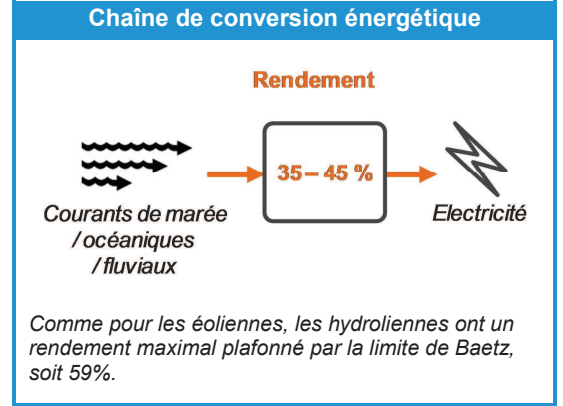
Flottantes ou installées sur les fonds marins, les hydroliennes permettent de récupérer l'énergie des courants de marées, des courants océaniques ou des courants fluviaux pour produire de l'électricité. Equivalents sous-marin des éoliennes, les hydroliennes sont constituées de pâles liées à un rotor,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

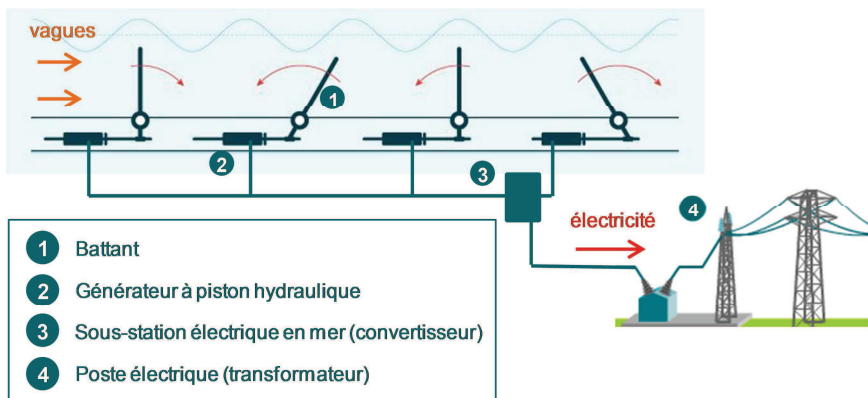
-
- Filière non mature (en cours de développement)
 - Intermittence (courants de marées) et caractère fatal de la production d'électricité
 - Rareté des sites exploitables (profondeur limitée si dispositif fixé au sol)
 - Complexité et coût de la conception, de l'installation et de la maintenance en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

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.

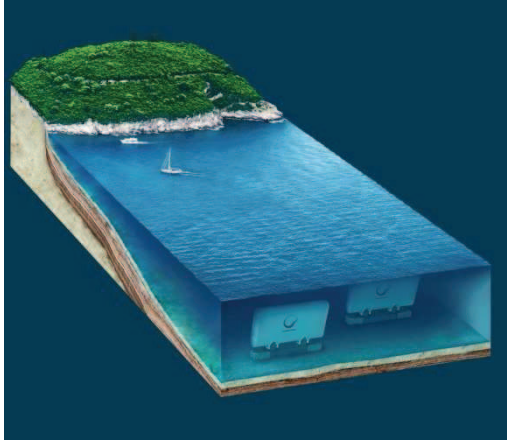
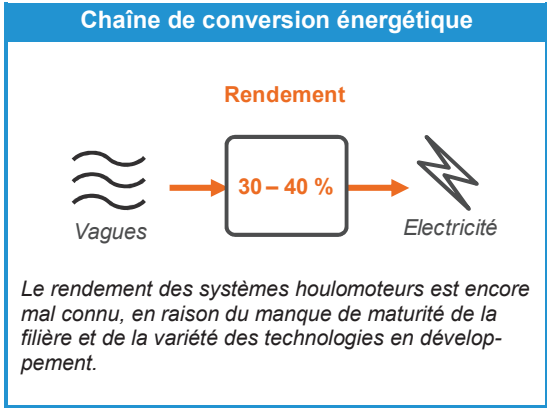
La ressource houlomotrice est généralement chiffrée en kW par mètre de front de vague. La gamme optimale se situe entre 15 et 75 kW/m. Sur la face atlantique française, la ressource moyenne est estimée à 45 kW/m.

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

- 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")



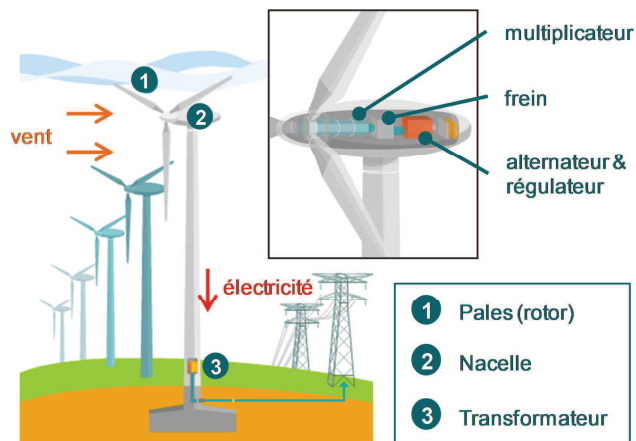
Crédits : Projet houlomoteur Wattmor, DCNS

- 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

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).

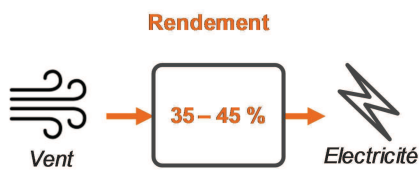
Les modèles les plus répandus sont les éoliennes à axe horizontal à 3 pales, avec rotors à vitesse variable. Alors que les modèles initiaux étaient conçus avec des rotors à vitesse fixe, les exigences des opérateurs de réseaux pour une électricité de meilleure qualité ont fait évoluer les technologies 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

- | | |
|----------|--|
| + | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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") |
|----------|--|

Chaîne de conversion énergétique



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

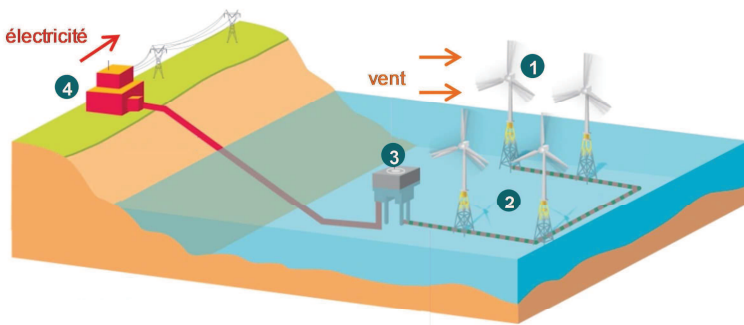
- | | |
|----------|---|
| - | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource) ▪ Incertitude dans la prévision de la ressource ▪ Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.) ▪ Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.) |
|----------|---|

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.

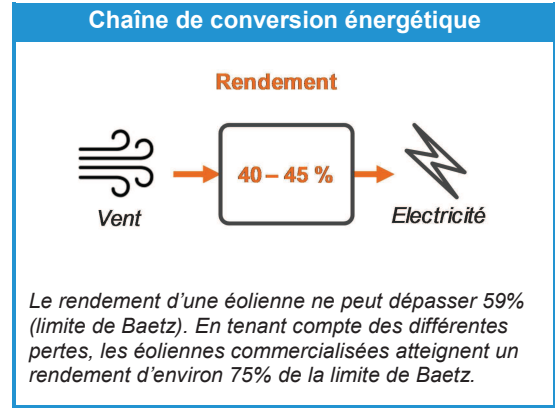
Les éoliennes posées, disposant de fondations fixées sur les fonds marins (20% à 25% de l'investissement), sont les technologies les plus développées. Le diamètre des rotors et la puissance des éoliennes n'a cessé de croître, atteignant plus de 150 m pour 8 MW_e.

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")

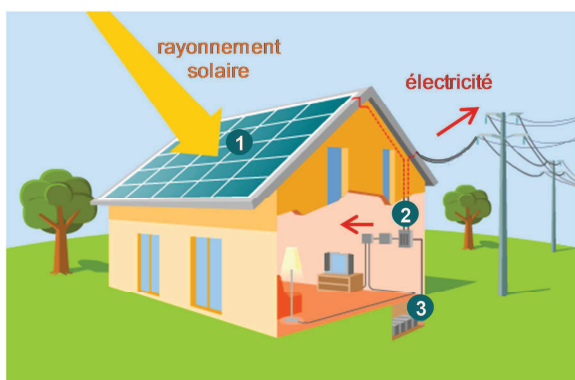
- - Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource)
 - Incertitude dans la prévision de la ressource
 - Complexité et coût de la conception, de l'installation et de la maintenance en raison du milieu marin
 - Complexité et coût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

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, tellurure 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.).

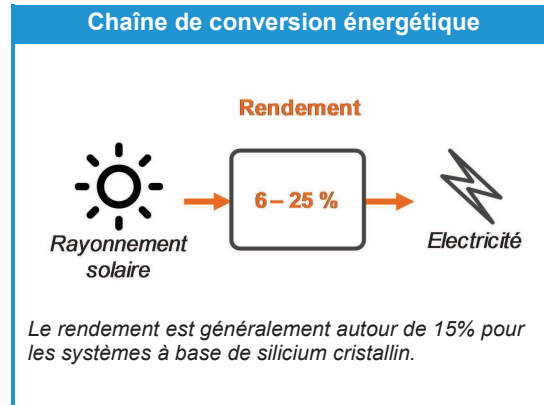
Les systèmes se présentent sous forme de panneaux disposés au sol ou sur des toitures, dans un nombre variant de un à plusieurs centaines de panneaux. Le courant délivré étant continu, l'installation d'un onduleur est nécessaire pour délivrer un courant alternatif, notamment dans le cas d'une injection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

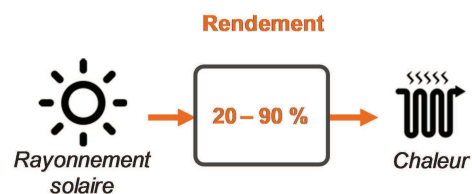
17 Systèmes solaires thermiques

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.

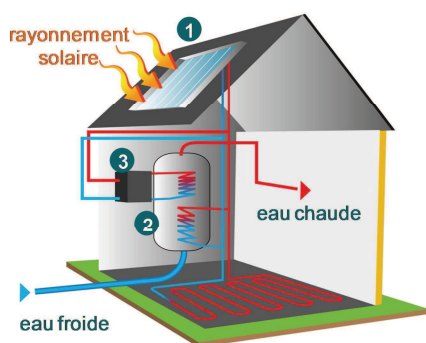
La technologie classique de capteurs plans permet de générer de l'eau chaude entre 20 et 40°C sans vitrage isolant et entre 70 et 120°C si la présence d'une vitre réduit les déperditions thermiques. La présence d'une couche de vide entre deux vitres permet d'augmenter encore l'isolation thermique du 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.

Chaîne de conversion énergétique



Le rendement dépend fortement de la technologie (isolation du panneau, température au sein des tubes, etc.) ainsi que de la température ambiante.



- 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



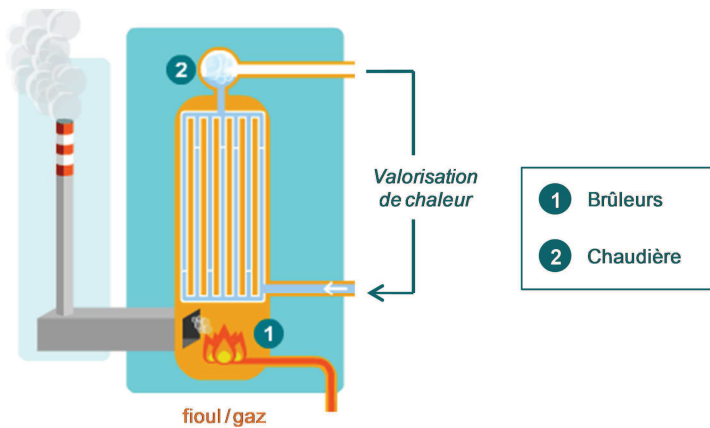
- Performance dépendante de la localisation géographique et des conditions météorologiques (ensoleillement, température ambiante).
- En autoconsommation, nécessité d'une solution de chauffage d'appoint.

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

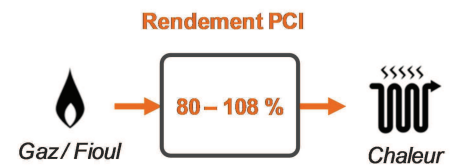


- Forte modularité de puissance (fonctionnement à charge partielle jusqu'à 30% de la puissance nominale)
- Nombreuses technologies disponibles, adaptables au besoin
- Simplicité d'approvisionnement dans le cas du gaz
- Autonomie dans le cas du fioul, grâce au stock de combustible sur site
- Rendement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

Chaîne de conversion énergétique



Les rendements PCI supérieurs à 100% concernent les chaudières à condensation (valorisation de la chaleur latente de condensation de l'eau des fumées de combustion).



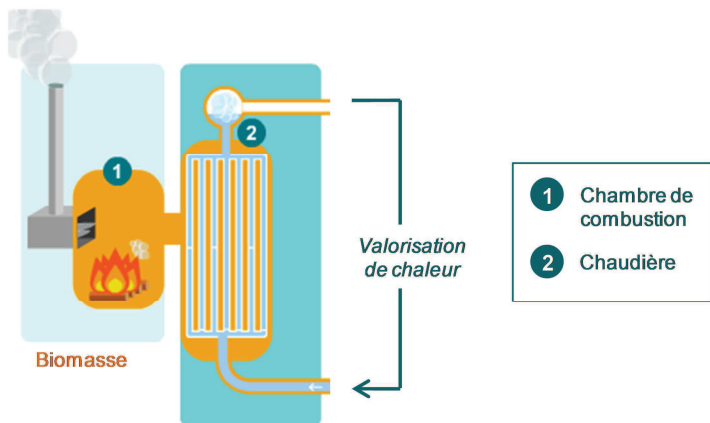
Crédits : Chaudière industrielle, Vapotech

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.

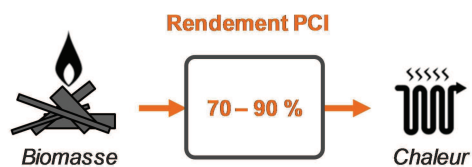


Crédits : Adapté d'EDF

- | | |
|----------|---|
| + | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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) |
|----------|---|

- | | |
|----------|--|
| - | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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) |
|----------|--|

Chaîne de conversion énergétique



Le rendement dépend notamment de l'humidité de la biomasse utilisée. Ceci explique que le rendement d'une chaudière biomasse peut parfois être inférieur à celui d'une chaudière brûlant des combustibles fossiles.



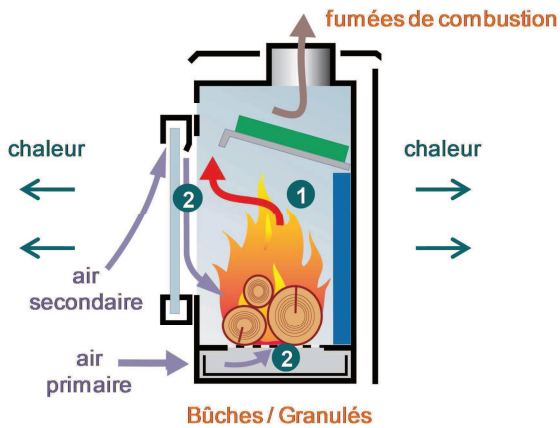
Crédits : Espace de Lannion (22), ADEME/J. Le Goff

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'encastrer directement dans la cheminée existante. Les poêles à granulés représentent aujourd'hui les solutions les plus performantes.



Crédits : Poêle à bois, adapté de Supra

- 1 Foyer
- 2 Entrées d'air

Chaîne de conversion énergétique

Rendement PCI

Biomasse	Foyer ouvert 5 - 10 % Foyer fermé / Insert 60 - 80 % Poêle à bûches 60 - 80 % Poêle à granulés 80 - 90 %	Chaleur
----------	---	---------

Rendements des technologies modernes, meilleurs que pour des systèmes plus anciens.



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)

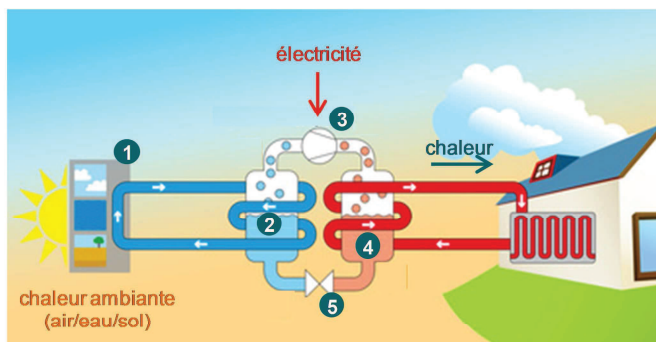
21 Pompes à chaleur

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).



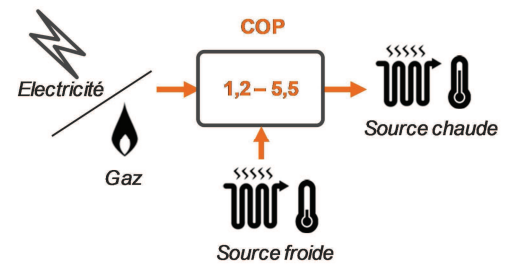
- 1 Capteurs (air / eau / sol) 2 Evaporateur 3 Compresseur 4 Condenseur 5 Détendeur

Crédits : Adapté de Une-pompe-à-chaleur



- 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

Chaîne de conversion énergétique



Les PAC électriques présentent les COP les plus élevés, en particulier les PAC eau-eau type plancher basse température.



Crédits : PAC aérothermique, QuelleEnergie.fr



- 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