

Classification des moyens de production d'énergie électrique et thermique

Éolien, solaire, biomasse, centrale gaz, centrale
nucléaire, ... : renouvelable / non renouvelable,
disponibilité matières premières, rendement,
disponibilité, coût au kWh, bilan CO₂, ...



Étudiants :

Eve BOUMAZA

Émilien GOSSELIN

Enzo RUHNAU

Clément DEFER

Hugo GUICHARD

Lucie SEVER

Enseignant – Responsable du projet :

Bruno CROQUETTE

Date de remise du rapport : **18 / 06 / 2018**

Référence du projet : **STPI / P6 / 2018 – 010**

Intitulé du projet : Classification des moyens de production d'énergie électrique et thermique

Type de projet : recherche, documentation et étude théorique

Objectifs du projet :

Le projet consiste en l'élaboration d'une liste exhaustive de moyens de production d'énergie électrique et thermique et en leur classification. Pour ce faire, une liste de critères et de caractéristiques complétée pour chaque type de production sera établie afin de les comparer et les classer au mieux.

Mots-clefs du projet :

- Énergie
- Moyen de production
- Classification

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. Travail réalisé et résultats	7
3.1. Nucléaire	7
3.2. Centrale thermique à flamme.....	8
3.3. Biomasse – Centrale thermique à bois	10
3.4. Eolien – Onshore	11
3.5. Géothermie	13
3.6. Hydraulique – Centrale hydroélectrique.....	15
3.7. Solaire – Photovoltaïque	16
3.8. Tableau comparatif des moyens de production d'énergie	18
4. Conclusions et perspectives	19
5. Bibliographie	20
5.1. Sources par moyen de production	20
5.2. Table des illustrations.....	24
6. Annexe.....	25
6.1. Calcul du prix au kW/h par moyen de production.....	25

1. INTRODUCTION

Au fil des années, l'homme a su répondre à ses besoins en terme d'énergie de différentes façons. Dans un premier temps, les moyens de production de l'énergie n'ont pas pris en compte les effets secondaires pouvant être causés sur l'environnement. Puis les énergies renouvelables ont fait leur apparition et une grande préoccupation pour l'avenir de la planète a émergé. Les moyens de production de l'énergies sont donc divers et variés et possèdent différentes caractéristiques.

Afin de comprendre au mieux ces moyens de production, nous élaborerons une liste comprenant les moyens les plus courants de production d'énergie électrique et thermique. Les moyens de productions retenus sont les suivants :

- Nucléaire
- Centrale thermique à flamme
- Biomasse — Centrale à bois
- Eolien — Onshore
- Géothermie
- Hydraulique — Centrale hydroélectrique
- Solaire photovoltaïque

Pour étudier ces moyens, nous avons également conçu une liste de critères qui nous permet de comparer ces moyens. Cette comparaison a pour objectif de mettre en évidence les meilleures caractéristiques selon des critères définis. Ainsi, selon les besoins, nous serons capables d'identifier quel moyen de production est le plus adéquat dans une situation donnée. La liste de critères est la suivante :

- Définitions et procédés
- Environnement :
 - Pollution
 - Disponibilité des matières premières
 - Risques
 - Insertion dans le paysage
- Production :
 - Conditions de production
 - Gestion du besoin
 - Moyen d'acheminement
 - Niveau de développement

De plus, un tableau comparatif des différents moyen de production étudiés sera présenté en fin de rapport. Ce tableau contient des chiffres clés tels que durée de vie, coûts de production, etc.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Le première étape du travail sur ce projet a été de définir quels moyens de production nous allons étudier. La nécessité de classifier ces moyens de production nous a conduit à l'élaboration d'une liste exhaustive de caractéristiques et de critères de comparaison pour chacun d'eux.

En second est venue la répartition du travail de recherche sur chaque moyen de production. Nous nous sommes donc concertés pour attribuer par binôme une partie des recherches. Cette partie du projet a été la plus longue et la plus compliquée compte tenu du travail conséquent de recherche.

Troisièmement, le travail de rédaction a été la phase finale du rapport. En plus de l'élaboration du corps du rapport — introduction, méthodologie, mise en page, etc —, un gros travail de synthèse a été nécessaire. En effet, nos recherches nous ont menés vers une multitude d'informations malgré nos critères de comparaison bien définis.

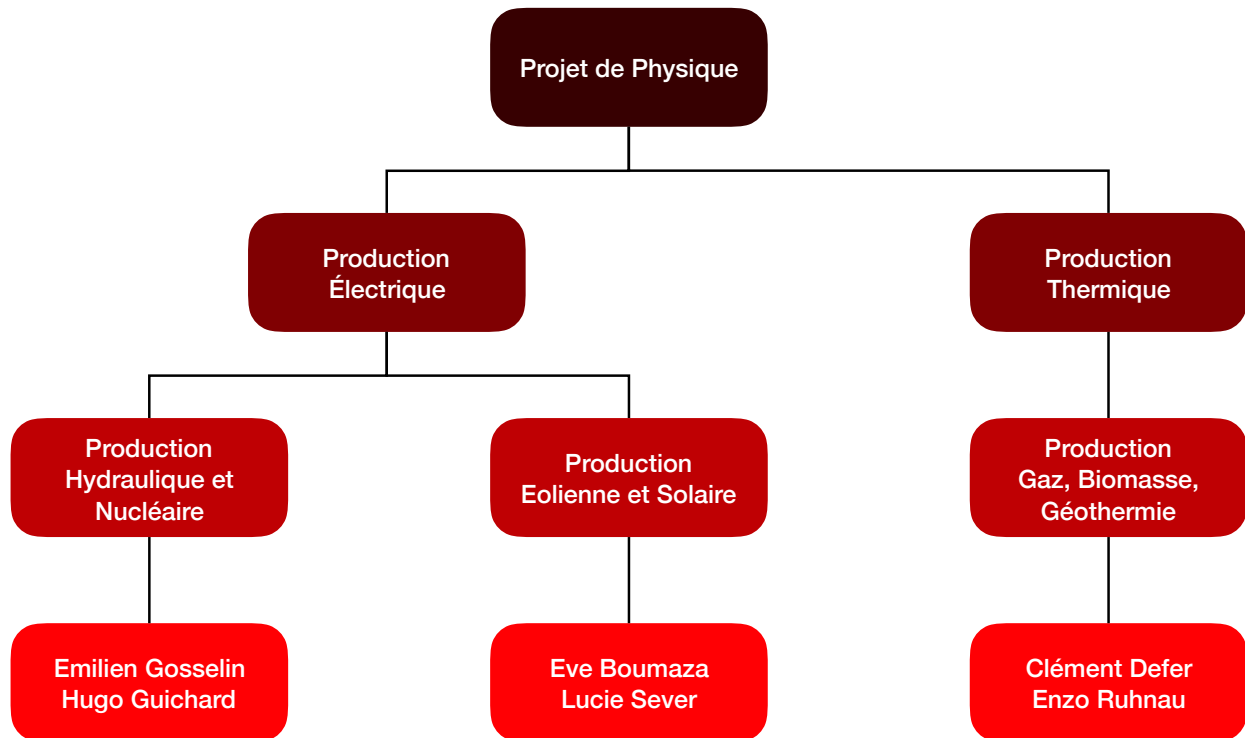


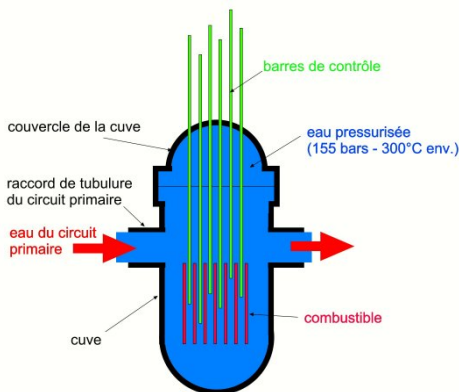
Illustration 2 : Organigramme de la répartition du travail pour la réalisation du projet

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Nucléaire

3.1.1. Définitions et procédés

Les centrales nucléaires actuelles utilisent le phénomène physique appelé “fission nucléaire” afin de créer de la chaleur puis de l’électricité. La fission nucléaire a été découverte en 1938 et les premières centrales arrivèrent dans les années 50. La fission fonctionne de la manière suivante : un neutron est bombardé sur un atome lourd, typiquement de l’uranium 235, qui va se fragmenter en 2 atomes plus légers. Lors de cette fragmentation, une énorme quantité d’énergie par atome est libérée. En effet, environ $200 \text{ MeV} = 32 \text{ pJ}$ sont libérés ce qui fait 82 GJ pour 1 g d’uranium, soit $2\,000\,000$ fois plus qu’ 1 g d’essence. Sont également libérés 2 ou 3 autres neutrons qui pourront à leur tour bombarder d’autres atomes d’uranium 235. Ceci crée donc une réaction en chaîne.



Cette réaction en chaîne est contrôlée à l’aide de barres de contrôles faites en bore. Le bore a la faculté d’absorber les neutrons et de ce fait, baisser entièrement les barres de contrôles arrête la réaction en chaîne. Les barres de bore s’intercalent entre les barres de combustibles.

Illustration 3 : Schéma du fonctionnement des barres de contrôle en bore

3.1.2. Environnement

Pollution

Les centrales nucléaires ne rejettent quasiment aucun gaz à effet de serre comme le font les centrales thermiques. Elles ne rejettent que de la vapeur d’eau et n’ont donc aucun impact sur le réchauffement climatique. Cependant, elles produisent des déchets radioactifs qui sont au cœur du problème actuel. Il faut prévoir des installations afin de les stocker sans danger. Ces déchets mettent plusieurs dizaines de millions d’années à disparaître. Il faut donc prévoir des lieux de stockage pérennes et non définitifs, au cas où on sache un jour traiter ces déchets. En France, environ 70 tonnes de déchets nucléaires sont produits chaque année.

Disponibilité des matières premières

La matière première nécessaire à la fission nucléaire est l’uranium 235. Pour en arriver là, l’uranium demande beaucoup de travail. L’uranium naturel est extrait principalement en Australie, au Kazakhstan, au Canada et en Afrique. Les minerais extraits contiennent très peu d’uranium (moins de 2%). Ils doivent donc être purifiés pour ne retenir que de l’uranium pur. Cet uranium pur est composé à plus de 99% d’uranium 238, l’isotope le plus stable. Cependant, l’uranium 235 est le seul isotope de l’uranium fissile. Le minerai d’uranium doit donc être enrichi en uranium 235.

L’uranium, à l’instar du charbon ou du pétrole, est une ressource fossile et limitée. Avec la technologie actuelle, les réserves d’uranium mondiales sont estimées à un siècle.

Risques

La production d’énergie d’origine nucléaire est extrêmement contrôlée et peu d’incidents se produisent. Cependant, lors d’un incident, les conséquences peuvent être désastreuses, comme nous avons pu le voir à Tchernobyl ou Fukushima. Ce sont les 2 seuls accident majeurs dans l’ère du nucléaire. En tout, on peut comptabiliser une vingtaine d’incidents nucléaires dans le monde, dont les conséquences

sont pour la plupart mineures et contenues dans le site lui-même. Au final, 5 accidents ont eu des impacts plus ou moins conséquents à l'extérieur de la centrale.

Insertion dans le paysage

Les centrales nucléaires sont des infrastructures très volumineuses et qui peuvent occuper plusieurs centaines d'hectares. Les cheminées de refroidissement sont également très hautes, certaines peuvent atteindre 180 mètres (centrale de Golfech). Il y a également un périmètre de sécurité obligatoire autour des centrales de 20km. On voit donc que les centrales nucléaires s'insèrent très mal dans le paysage.

3.1.3. Production

Conditions de production

Contrairement aux énergies renouvelables, la production d'électricité d'origine nucléaire ne dépend que de l'approvisionnement en combustible. C'est ce qui rend la production des centrales nucléaires si stable. Il y a, cependant, des périodes de maintenance qui peuvent arrêter la production. Par exemple, les réacteurs en France doivent se soumettre aux visites décennales, où pendant une centaine de jours le réacteur est complètement arrêté afin de faire des travaux de maintenance et remplacer le combustible.

Gestion du besoin

Les centrales nucléaires tournent presque en permanence et à pleine puissance (facteur de charge élevé). Elles assurent donc une "base" de production d'électricité et sont peu sensibles à la fluctuation du besoin.

Niveau de développement

Le nucléaire étant une énergie complexe à maîtriser et qui a demandé des dizaines d'années de développement, ce n'est pas la source d'énergie la plus utilisée. En effet, seuls une trentaine de pays l'utilisent comme moyen de production d'électricité. Ce sont en général des pays développés ou émergents (Chine, Inde). Les pays les plus pauvres dépendent en général du charbon.

Dans les pays où elle est utilisée, l'énergie nucléaire est bien développée, par exemple en France ou aux Etats-Unis. Dans des pays comme l'Allemagne, la Suède ou la Suisse, l'énergie nucléaire est de moins en moins utilisée, au profit des énergies renouvelables ou des centrales à charbon.

3.2. Centrale thermique à flamme

3.2.1. Définitions et procédés

Les centrales thermiques à flamme fonctionnent avec l'énergie thermique produite en brûlant un combustible (gaz, charbon ou fioul). Il existe trois fonctionnements :

- Turbine à vapeur (TAV) : dans une chaudière, qui transfère la chaleur dégagée par la combustion à l'eau, produisant de la vapeur. La pression exercée par la vapeur fait tourner une turbine, qui entraîne un alternateur. L'alternateur convertit l'énergie mécanique fournie par la rotation de la turbine en énergie électrique.
- Turbine à combustion (TAC) : l'énergie fournie par la combustion du combustible (liquide ou gazeux) permet la mise en rotation d'un arbre qui entraîne un alternateur produisant le courant électrique.
- Centrale à Cycle Combinés au gaz (CCG) : elle est composée d'une turbine à combustion et d'une turbine à vapeur. La TAC et la TAV fonctionnent ensembles et entraînent un ou deux alternateurs. La même quantité de combustible sert ainsi à une double production d'électricité : celle de la TAC et celle de la TAV. Le rendement de la centrale est donc optimisé.

3.2.2. Environnement

Pollution

Les centrales thermiques à flamme sont de très grandes émettrices de gaz à effet de serre, notamment de CO₂ :

- les centrales à charbon émettent 60% du CO₂ de toute l'électricité produite en France ;
- la combustion du fioul émet également du dioxyde de soufre (SO₂), responsable de pluies acides, et de l'oxyde d'azote (NO_x) ;
- quant au gaz naturel, le bilan environnemental est le plus favorable, la production de CO₂ est deux fois inférieure et il ne contient quasiment pas de soufre, contrairement au charbon. Les émissions de NO_x et de SO_x sont aussi très limitées.

L'extraction des gaz non conventionnels semblerait encore présenter des risques environnementaux. La technologie de fracturation hydraulique pour l'extraction des gaz de schiste crée un risque de pollution des nappes phréatiques.

Le transport maritime et l'extraction du pétrole offshore exposent aux risques de marées noires, dont les effets sont désastreux sur les fonds marins et les zones côtières.

L'extraction du charbon cause des fuites de méthane, gaz à effet de serre plus néfaste que le CO₂.

Disponibilité des matières premières

Le charbon, le fioul et le gaz naturel sont des ressources fossiles non-renouvelables. Ainsi, les réserves de charbons seront épuisées d'ici environ 230 ans, contre 80 et 60 ans pour le pétrole et le gaz naturel.

Insertion dans le paysage

Les centrales thermiques sont habituellement insérées dans des zones industrielles ou portuaires. Leur insertion dans le paysage est donc plus facile qu'une implantation en milieu rural.



Illustration 4 : Photo d'une centrale thermique à flamme

3.2.3. Production

Conditions de production

Pour les centrales utilisant des TAV, les centrales demandent de gros besoins d'eau pour le refroidissement des turbines. Elles sont donc implantées aux abords de cours d'eau.

Gestion du besoin

Ces centrales ne fonctionnent pas en continu, les besoins en combustible qui peut être stocké sur le site sont donc limités. De plus, le temps de démarrage de ces centrales est d'environ 30 minutes, ce qui est assez faible.

Moyen d'acheminement

Les combustibles sont souvent acheminés par bateau puis par train dans le cas du fioul et du charbon, tandis que le gaz est acheminé dans les centrales par gazoducs.

Niveau de développement

Le niveau de développement est presque arrivé à son maximum avec l'utilisation des CCG et de la cogénération. Néanmoins, les améliorations sont possibles pour limiter les rejets de gaz à effet de serre (CO₂, SO_x et de NO_x) et de particules fines.

3.3. Biomasse – Centrale thermique à bois

3.3.1. Définitions et procédés

La biomasse est « la matière d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique utilisable comme source d'énergie. » Il existe plusieurs processus permettant d'obtenir de l'énergie à partir de la biomasse :

- la biomasse sous forme de chaleur :
 - combustion : les déchets organiques sont brûlés et produisent de l'électricité, de la chaleur ou, par cogénération, les deux en même temps ;
 - pyrolyse, gazéification, carbonisation hydrothermale...
- par conversion biologique (aussi appelé méthanisation) : le biogaz. Ce biogaz est produit par la fermentation des matières organiques. Il est majoritairement composé de méthane (CH₄ : 65%) et de CO₂ (35%). Sa composition s'approche de celle du gaz naturel et son utilisation est similaire à celui-ci : sa combustion permet de produire électricité et/ou chaleur.
- sous forme de carburant : biocarburants ou agrocarburants : filière huiles et dérivés, filière alcool, gaz, charbon de bois.

De part la grande diversité de moyens de production d'énergie par la biomasse, nous nous concentrerons sur le plus courant : la centrale thermique à bois. Le fonctionnement de ce type de centrale est similaire à la centrale thermique classique. La seule différence réside dans l'utilisation d'un autre combustible : le bois.

3.3.2. Environnement

Pollution

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, 80% de la pollution provenant du chauffage bois provient du chauffage domestique. En effet, ils ne sont pas soumis à de strictes normes comme le sont les centrales à bois. Les émissions de ces dernières subissent un traitement et respectent ainsi la réglementation garantissant la qualité de l'air.

Les conséquences de la mise en place de l'exploitation de la biomasse ne sont pas négligeables. En effet, l'infrastructure permettant l'utilisation de cette biomasse est, par exemple pour le bois, une centrale à combustion. La mise en place de celle-ci pollue.

Disponibilité des matières premières

Les matières premières de la biomasse sont diverses et variées. Si on trouve souvent des centrales à combustion de bois, d'autres matériaux sont également utilisés pour produire de l'énergie via ce procédé.

Le bois est la matière première la plus couramment utilisée de part son accessibilité. Ce bois ne peut être utilisé que sous la condition que les arbres coupés, soient remplacés par de nouvelles plantations d'arbre. En revanche, le bois est également très prisé dans l'industrie comme celle de la construction. Dans ce secteur, le bois étant plus rentable que dans le secteur énergétique type biomasse, il est parfois difficile d'obtenir cette matière première face à cette concurrence.

Risques

Les risques liés à cette technique de production d'énergie sont majoritairement la surexploitation. En effet, l'objectif ambitieux mais nécessaire est d'atteindre une production (et donc consommation) d'énergie composée à 23% d'énergies renouvelables. Matthieu Combe, fondateur de Natura-

Sciences.com, prévoit que la biomasse contribuera pour moitié dans la production supplémentaires d'énergies renouvelables. Dans cette mesure, l'exploitation des forêts françaises peut vite devenir excessive et donc sortir du cadre de leur exploitation dite renouvelable.

De plus, le bois utilisé dans la biomasse provient de chute de coupes, de bois morts et de l'entretien forestier pour une partie. Une surexploitation mènerait à la récupération de plus de bois morts dans les forêts. Ces arbres morts sont en revanche l'habitat d'une faune non négligeable, qui pourrait se voir perturbée en cas d'utilisation irraisonnable de cette matière première.

Insertion dans le paysage

Une centrale biomasse doit être située le plus près possible des lieux d'extraction de la matière première. Cela implique d'implanter une telle centrale prêt d'un environnement naturel forestier. Une centrale étant assez imposante — taille et aspect — elle s'intègre mal dans son environnement.

3.3.3. Production

Conditions de production

Ces centrales, comme toutes centrales thermiques, ont besoin d'une source de refroidissement. Ainsi, elles sont situées au bord de cours d'eau pour satisfaire ce besoin. En outre, comme évoqué précédemment, elles doivent se trouver près des lieux d'extraction des matières premières.

Gestion du besoin

L'adaptation d'une centrale thermique à bois est similaire à celle d'une centrale dite classique.

Moyen d'acheminement

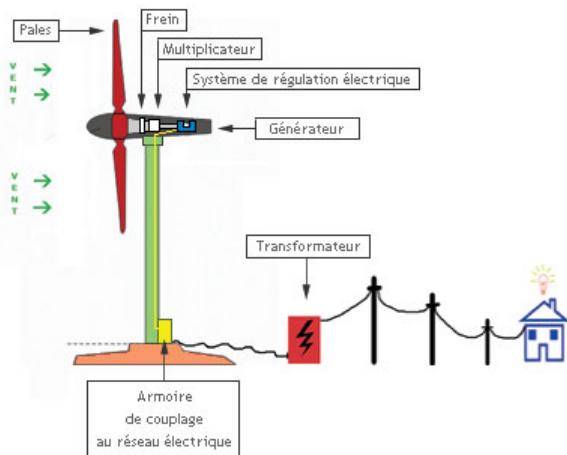
Les centrales thermiques à bois sont en général situés aux environs des lieux d'extraction et d'exploitation. De ce fait, le moyen d'acheminement le plus courant est le transport routier.

Niveau de développement

Les centrales biomasse à bois sont le moyen de production d'énergie renouvelable le plus développé et le plus exploité.

3.4. Eolien — Onshore

3.4.1. Définitions et procédés



Il existe deux types de mode d'exploitation de l'énergie éolienne : les éoliennes onshore (terrestres) et les offshore (maritimes). Les éoliennes offshore sont plus intéressantes concernant l'utilisation de l'espace. Néanmoins, l'entretien qu'elles requièrent et leurs coûts d'installation et de maintenance ne les rendent pas plus avantageuses par rapport aux éoliennes onshore.

De ce fait, nous avons choisi d'étudier le cas des éoliennes onshore.

Illustration 5 : Schéma du fonctionnement d'une éolienne onshore

Les pales et le rotor tournent grâce au vent. Le multiplicateur permet de créer un mouvement plus rapide. En effet, les pales tournent à une vitesse d'environ 100 à 650 tours/min alors que pour créer de l'électricité le générateur a besoin d'un mouvement autour de 1500 à 3000 tours/min. Grâce à l'énergie cinétique fournie, le générateur crée un courant alternatif. Le transformateur va alors élever la tension du courant afin de le transporter dans les lignes à moyenne tension du réseau.

3.4.2. Environnement

Pollution

La production d'énergie grâce à l'éolien bien que dite renouvelable, génère tout de même de la pollution. Pour évaluer cette pollution, il faut tenir compte de l'énergie consommée durant la vie d'une éolienne et ce, de sa fabrication à son recyclage. La fabrication des éoliennes demande un certain nombre de matières premières qui peuvent provenir du recyclage (plastiques, verres recyclés). En revanche, le transport des éoliennes nécessite des convois exceptionnels routiers en raison de l'imposante taille des pâles et des mâts, ce qui est source de pollution. Son fonctionnement ne génère aucune pollution puisqu'il s'agit d'une énergie propre. Enfin, une fois démontée, seul 2% du poids de l'éolienne ne peut pas être recyclé et son site n'est pas pollué.

Disponibilité des matières premières

Le vent est une source d'énergie inépuisable, ce qui en fait une énergie renouvelable.

Insertion dans le paysage

D'autres facteurs de pollution peuvent également être pris en compte telles que la pollution visuelle (impact subjectif) et la pollution sonore (une distance légale de 300m est à respecter par rapport aux habitations).

3.4.3. Production

Conditions de production

Toutes les éoliennes sont équipées d'un frein et d'un système de régulation électrique, dont la fonction est de ralentir le mouvement lorsque le vent est trop violent. Ce système évite que le rotor ne tourne trop vite et subisse trop de pression mais évite aussi une surchauffe du générateur. Cela explique que contrairement aux idées reçues, une éolienne ne produit pas forcément plus d'électricité si le vent souffle plus fort. En effet, pour permettre aux pales de tourner il faut au minimum que le vent soit de 18 km/h mais il ne faut pas qu'il dépasse 90 km/h. Dans ce dernier cas, les pales sont arrêtées pour éviter d'abîmer le rotor ou même le générateur à cause d'une surproduction.

Au final, l'éolienne produit au maximum de ses capacités lorsque la vitesse du vent est entre 54 et 90 km/h.

Gestion du besoin

Une éolienne ne peut produire de l'électricité qu'en présence de vent. De ce fait, si le besoin en énergie augmente, la production ne peut pas toujours suivre et dépend du facteur météorologique.

Niveau de développement

D'après RTE France, le parc éolien français a produit sur l'année 2016, 20.7 TWh soit 3.9% de l'électricité produite en France. L'éolien est la 4^{ème} source d'énergie en France et la 2^{ème} source d'énergie renouvelable (derrière l'énergie hydraulique (10.8%)). D'après le site officiel d'EDF, l'énergie éolienne est celle qui a le plus progressé au cours de ces 10 dernières années.

3.5. Géothermie

3.5.1. Définitions et procédés

La géothermie consiste à capter l'énergie thermique contenue dans le sol pour produire de l'électricité ou pour chauffer une maison / immeuble.

On distingue habituellement deux formes d'énergie géothermique avec la géothermie de surface et la géothermie profonde. La géothermie de surface consiste en la récupération de la chaleur pendant la période de l'hiver et de la fraîcheur pendant l'été à partir de la couche superficielle du sol. La géothermie profonde consiste quant à elle à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre en vue de produire du chauffage, ou même de l'électricité dès lors que la température est plus importante. Nous nous intéressons ici uniquement à la géothermie dite "profonde".

La Géothermie profonde se distingue en 3 types :

- la géothermie basse et très basse énergie exploite la chaleur de gisements d'eau situés à des profondeurs de quelques centaines de mètres jusqu'à environ 2 000 m, pour des températures généralement comprises entre 30°C et 90°C ;
- la géothermie moyenne énergie nécessite des puits plus profonds où elle est implantée dans des zones géologiquement plus actives. Les ressources géothermales se présentent alors sous forme d'eau chaude dont la température est comprise entre 90°C et 150°C. Elle peut servir pour la production d'électricité et dans des réseaux de chauffage ;
- la géothermie haute énergie exploite des températures supérieures à 150°C, l'eau sous forme de vapeur sert à alimenter des centrales produisant de l'électricité.

Dans la production d'électricité, on peut distinguer deux types de centrales.

Les centrales avec cycle à vapeur d'eau utilisent directement l'eau provenant des puits afin de produire de l'énergie par l'intermédiaire d'une turbine actionnée par la vapeur sèche d'eau obtenue par condensation. Le type de centrales le plus utilisé est la centrale à condensation, même si son installation est plus complexe. Dans ces centrales, la vapeur n'est pas rejetée dans l'atmosphère comme dans une centrale à cycle à échappement libre mais condensée afin de maximiser la récupération d'énergie du fluide géothermal.

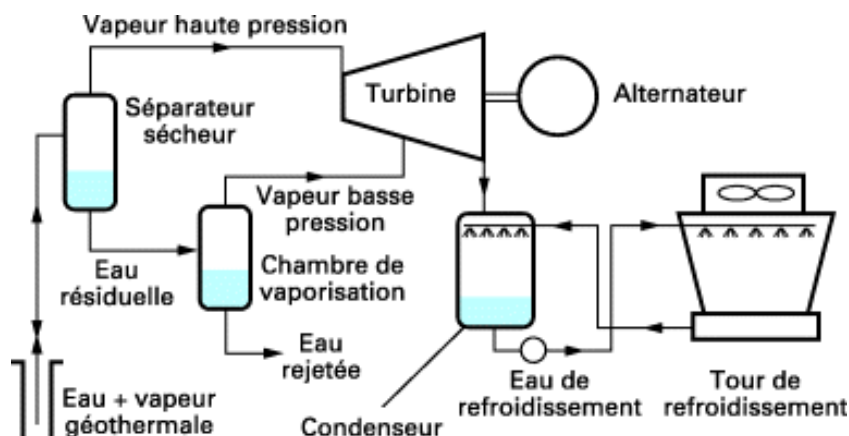


Illustration 6 : Schéma du fonctionnement d'une centrale géothermique

Les centrales géothermiques à fluide binaire possèdent un second cycle de production d'énergie en plus de celui utilisant la vapeur d'eau. En effet, à la sortie de la première turbine, la vapeur possède encore beaucoup de chaleur, qu'elle transmet à un fluide de travail par un évapo-condenseur. Ensuite, ce fluide actionne une autre turbine produisant de l'électricité. Dans certaines centrales, il peut même y avoir un troisième cycle de production d'énergie électrique où un fluide de travail ici absorbe l'énergie restante de l'eau du premier cycle et du fluide de travail du second.

3.5.2. Environnement

Pollution

La pollution liée à cette énergie est principalement due à la mise en place de la centrale (construction de la centrale et forage des puits). Les nuisances sonores avec les va-et-vient des camions et le forage peuvent être importantes. De plus il y a des risques de pollution des sols et d'émanations de gaz (H₂S) lors des forages. Lors de l'exploitation, aucune combustion n'est nécessaire donc aucun gaz polluant n'est émis.

Disponibilité des matières premières

La chaleur du sous-sol est disponible à chaque endroit, mais à importance différente. Les zones où l'activité géologique est élevée sont accompagnées d'un développement important de la géothermie à haute énergie. L'approvisionnement en chaleur est jugé inépuisable grâce à la gestion des puits.

Risques

Les risques sont minimes, mais quelques précautions doivent néanmoins être prises lors de la mise en place de la centrale, notamment lors du forage. Par exemple, dans les zones géologiquement instables, des injections de produits chimiques ou agents fluidifiants font diminuer l'activité sismique et augmentent la performance hydraulique des puits. Ces injections dissolvent des minéraux hydrothermaux tels que la calcite, ce qui peut alors fragiliser les sous-sols.

Insertion dans le paysage

Comme tout bâtiment d'une telle ampleur (plusieurs dizaines de mètres), une telle centrale n'est pas parfaitement intégrable dans l'environnement. D'autant plus si la centrale est implantée dans un milieu rural.

3.5.3. Production

Conditions de production

La géothermie s'implante dans des zones du globe géologiquement stables, où l'activité géothermique est élevée. La géothermie à basse énergie peut être utilisée sur toute la surface du globe pour un réseau de chauffage par exemple, dans des zones géologiquement stables.

Gestion du besoin

La chaleur du sous-sol étant toujours pleinement disponible, la centrale peut fonctionner à plein temps et à pleine puissance, ce qui explique son facteur de charge très élevé.

Moyen d'acheminement

La chaleur venant du sol est directement captée par l'eau présente dans le réseaux de la centrale et est donc directement acheminée dans celle-ci.

Niveau de développement

En soi, le principe de la géothermie est développé à son maximum. La seule voie de développement encore possible est l'amélioration du rendement des machines thermiques produisant l'électricité, pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le sous-sol, ainsi que d'augmenter la puissance unitaire de ces centrales. De plus, la mise en place de cogénération dans ces centrales géothermiques, afin d'utiliser la chaleur non utilisée pour produire de l'électricité, permet d'augmenter le rendement des centrales.

3.6. Hydraulique — Centrale hydroélectrique

3.6.1. Définitions et procédés

Avec 16 % de la production d'électricité mondiale issue de l'eau, l'énergie hydraulique constitue la troisième source de production électrique, derrière la combustion du charbon et du gaz. Elle se situe même devant l'énergie nucléaire.

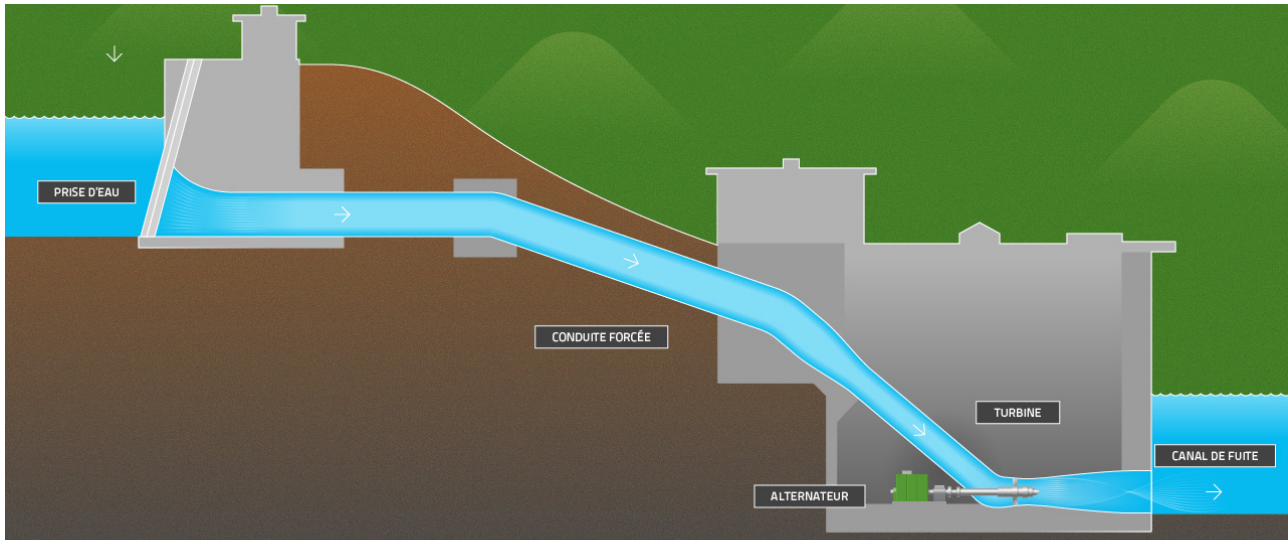


Illustration 7 : Schéma montrant la composition d'un barrage

Au sein de toutes les installations hydroélectriques, le principe de fonctionnement est similaire. En effet, le mouvement de l'eau entraîne une turbine qui elle-même entraîne un alternateur qui génère un courant électrique alternatif. Une turbine est simplement un système qui utilise le mouvement d'un fluide afin de faire tourner un arbre, grâce à des aubes. Un alternateur est un dispositif qui transforme une énergie mécanique en énergie électrique.

On peut les classer en deux grandes catégories : celles qui utilisent l'énergie potentielle de l'eau (barrages, cascades) et celles qui utilisent son énergie cinétique (marées, courants). Il y a plusieurs applications pour ce moyen de production d'électricité :

- Barrages : ils retiennent l'eau en amont d'un cours d'eau pour la stocker puis ils utilisent son énergie potentielle pour l'accélérer dans un conduit.
- STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) : elles sont composées de deux bassins, un en amont et un en aval. Ils utilisent l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau comme moyen de stockage de la surproduction d'électricité du réseau. Ensuite, elles fonctionnent comme un barrage classique pour produire de l'électricité.
- Centrales marémotrices : elles utilisent la périodicité des marées et leurs mouvements d'eau afin de créer de l'électricité. Elles fonctionnent en profondeur.
- Centrales au fil de l'eau : elles laissent couler l'eau en permanence et ont une puissance variable pour s'adapter au besoin.
- Fermes houlomotrices : elles utilisent les mouvements verticaux de l'eau (et non les déplacements horizontaux) pour générer de l'électricité.

3.6.2. Environnement

Disponibilité des matières premières

Comme la seule matière première nécessaire à ces centrales est l'eau. Celle-ci est "infinie" à condition de l'utiliser raisonnablement. En effet, le cycle de l'eau permet sa régénération. Cependant le

risque de sécheresse est présent et peut nuire drastiquement à la production d'électricité, voire la stopper totalement.

Risques

Les barrages hydrauliques sont des édifices immenses qui doivent faire face à des contraintes mécaniques énormes. En effet, ils doivent supporter leur propre poids, le poids de l'eau, faire face aux crues, aux éventuels séismes, etc. Par exemple, le barrage des Trois Gorges en Chine suscite régulièrement l'inquiétude des ingénieurs lors de grosses inondations.

Insertion dans le paysage

L'insertion dans le paysage est sûrement le plus gros inconvénient des centrales hydroélectriques. Effectivement, elles sont assez volumineuses et peuvent modifier la forme du paysage, comme les barrages.

3.6.3. Production

Conditions de production

La production d'électricité d'origine hydraulique dépend uniquement de l'approvisionnement en eau. Sauf sécheresse grave, celui-ci est toujours renouvelée par le cycle de l'eau.

Gestion du besoin / facilité d'adaptation

La gestion du besoin est facilement gérable avec les installations hydrauliques. En effet, grâce à la relative régularité du cycle de l'eau et des courants d'eau, les installations peuvent produire en continu. Lorsque la demande est faible, il suffit de fermer des vannes pour ne pas gaspiller d'énergie.

Niveau de développement

L'énergie hydroélectrique est la troisième source d'électricité dans le monde, derrière les centrales au charbon et les centrales au gaz. Comme dit précédemment, elle est particulièrement présente dans les pays propices à son utilisation (ex : pays nordiques, Canada, Chine). En effet, elle est peu complexe à mettre en place et son utilisation est bon marché. Son niveau de développement est limité par le nombre d'emplacements possibles où l'on peut installer une centrale hydroélectrique. Cela est caractérisé par le potentiel hydroélectrique. Par exemple, en France, ce potentiel s'élève à 100 TWh par an, dont 70 TWh considérés comme exploitables. Sur ces 70 TWh, 72% sont exploités.

3.7. Solaire – Photovoltaïque

3.7.1. Définitions et procédés

La lumière naturelle est constituée de photons. Lorsque ces photons rencontrent une surface semi-conductrice, les électrons du matériau vont alors se mettre en mouvement, ce qui va générer un courant électrique continu. Le système des panneaux photovoltaïques utilise ce principe : en effet, le silicium (principal matériau du dispositif) est semi-conducteur. Grâce à des fils métalliques qui parcourent tout le panneau, cellules par cellules, le courant va être recueilli, réuni puis dirigé vers la centrale photovoltaïque.

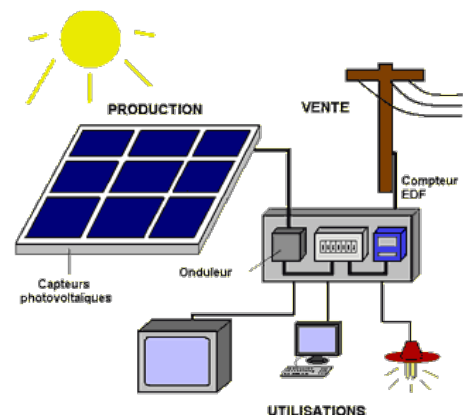


Illustration 8 : Schéma expliquant la production d'électricité par le photovoltaïque

3.7.2. Environnement

Pollution

Tout comme les éoliennes, les panneaux solaires ne polluent pas lors de la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique. Néanmoins, c'est la fabrication, le transport, l'installation et le recyclage des panneaux photovoltaïques qui ont un impact sur l'environnement. En effet, au cours de la fabrication, les matériaux utilisés engendrent des conséquences sur l'environnement à l'exemple de l'aluminium, du plomb ou encore de l'argent. De plus, la fabrication du silicium, constituant primaire des cellules photovoltaïques, alourdit fortement le bilan énergétique puisqu'une assez grande quantité de CO₂ est rejetée dans l'air lors de sa fabrication. Concernant le recyclage, les panneaux solaires sont recyclables à 85% et mettent entre un et cinq ans pour produire autant d'énergie qu'il a été nécessaire pour le fabriquer (d'après une étude menée par l'Agence Internationale de l'Energie).

Disponibilité des matières premières

Ici encore, l'avantage est le fait que le soleil est une ressource inépuisable. Pour l'exploiter pleinement en revanche, il faut se trouver dans une région souvent ensoleillée.

Insertion dans le paysage

Concernant leur insertion dans le paysage, les panneaux photovoltaïques s'intègrent à tous les environnements et leur design est de plus en plus travaillé pour ne pas engendrer de pollution visuelle.

3.7.3. Production

Conditions de production

La source d'énergie utilisée par les panneaux est le soleil. Pour assurer un meilleur rendement, il est nécessaire de vérifier ces différents critères :

- la zone géographique d'implantation : selon les régions en France, le niveau d'ensoleillement ne sera pas le même.
- l'orientation et l'inclinaison de l'installation : pour qu'un panneau solaire ait un meilleur rendement, il faut privilégier une exposition sud et une inclinaison à 30°.

Un panneau solaire de 1m² produit entre 100 et 200 Wc (crête : puissance maximal d'un seul panneau relevé dans les conditions optimales) de puissance électrique par an.

Gestion du besoin

Comme pour une éolienne, le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque dépend de la météo. L'adaptation au besoin immédiat n'est donc pas optimal.

Niveau de développement

L'énergie solaire par le photovoltaïque est le moyen de production d'électricité le moins développé en France, bien loin derrière le nucléaire. Lorsque l'on considère seulement les énergies renouvelables, elle est aussi considérablement moins importante que l'hydraulique par exemple (66.6% contre 6% pour le solaire). Ce qui la place au 7ème rang mondiale. Cependant, la France compte tout de même 6 centrales photovoltaïques dont la plus grande d'Europe à Cestas inaugurée fin 2015.

3.8. Tableau comparatif des moyens de production d'énergie

Moyen de production	Type de source	Énergie produite	Durée de vie	Rendement / efficacité	Coûts d'investissements	Facteur de charge	Coûts de production
Nucléaire	Fossile	Électrique	30 - 40 ans	30 %	2 500 €/kW	74 %	0,04 €/kWh
Centrale thermique : gaz	Fossile	Thermique	30 ans	Thermique : 60 % Cogénération : 90 %	900 €/kW	26 %	0,035 €/kWh
Centrale biomasse : bois	Renouvelable	Cogénération	20 - 25 ans	Thermique : 40 % Cogénération : 80 %	3 000 €/kW	80 %	0,047 €/kWh
Éolien : onshore	Renouvelable	Électrique	20 ans	35 %	1 300 €/kW	20 - 30 %	0,052 €/kW
Géothermie	Renouvelable	Thermique	40 ans	Électrique : 15 % Cogénération : 33 %	1 900 €/kW	80 %	0,024 €/kW
Hydraulique : centrale hydroélectrique	Renouvelable	Électrique	40 ans	80 %	3 500 €/kW	Retenue : 30-60 % Fil de l'eau : 80-100%	0,03 €/kW
Solaire : photovoltaïque	Renouvelable	Électrique	20 - 25 ans	15 %	2 000 €/kW	10 - 16 %	0,114 €/kW (Normandie)

Ce tableau regroupe les critères les plus pertinents pour la comparaison en chiffres entre les différents moyens de production d'énergie électrique et thermique. Ainsi, le facteur de charge « correspond au rapport entre l'énergie effectivement produite durant un laps de temps donné et l'énergie qu'elle aurait pu générer à sa puissance nominale pendant la même période ».

La plupart de ces chiffres sont tirés de nos recherches. En revanche, les coûts de production ont été calculés par nos propres soins. Le détail des calculs est transposé dans l'annexe.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Comme nous avons pu le voir à travers ce projet, il existe de nombreux critères permettant de classer les différentes énergies, qu'elles soient renouvelables ou non. Il n'existe pas d'énergie "parfaite" qui permettrait de répondre entièrement aux besoins de la population sur Terre. A travers ce rapport, nous avons vu que les énergies fossiles sont, de nos jours, encore très utilisées, et la transition vers des énergies renouvelables demande encore du travail. En effet, les énergies fossiles restent celles qui sont les plus abordables et simples à mettre en place. C'est pour cela qu'elles sont majoritaires dans les pays émergents. Cependant, suites à nos recherches, nous avons pu voir que les énergies renouvelables sont plus abordables que ce que l'on pourrait penser, et que leur développement dépend uniquement de l'ambition et de la volonté politique.

Ce projet nous a appris beaucoup de choses, tant au niveau des connaissances que de la méthodologie. Il a fallu bien s'organiser pour répartir le travail, notamment bien définir chaque critère de comparaison des énergies. L'une des difficultés que nous avons rencontrées était de bien vérifier nos sources ainsi que les chiffres donnés. En effet, le domaine des énergies est très sujet aux polémiques et aux fausses déclarations, particulièrement autour du nucléaire. Il fallait donc que nous cherchions des sites neutres afin d'être sûrs de ce que nous rédigeons. De plus, c'est un domaine en constante évolution, et de ce fait, nous devons trouver des sources récentes sinon notre propos risquait d'être peu pertinent.

Comme nous souhaitons tous rejoindre des départements en rapport avec une problématique énergétique, il est certain que ce projet de P6 nous servira beaucoup pour appréhender notre futur département.

5. BIBLIOGRAPHIE

5.1. Sources par moyen de production

“Facteur de charge”, futura-sciences.com. [Date inconnue].

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-facteur-charge-13639/>

5.1.1. Nucléaire

“Le prix d’une centrale nucléaire et le coût du kWh nucléaire”, econologie.com. Publié le 22/02/2008.

<https://www.econologie.com/prix-centrale-nucleaire-cout-kwh-nucleaire/>

“Extraction de l’uranium”, wikipedia.org. Dernière modification : 05/06/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraction_de_l%27uranium

“Réserves d’uranium naturel dans le monde”, conaissancedesenergies.org. Publié le 18/04/2014.

<https://www.conaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reserves-d-uranium-naturel-dans-le-monde>

“Surgénération”, wikipedia.org. Dernière modification : 05/12/2017.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Surg%C3%A9n%C3%A9ration>

“Liste d’accidents nucléaires”, wikipedia.org. Dernière modification : 30/05/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_d%27accidents_nucl%C3%A9aires

“Tour aéroréfrigérante”, wikipedia.org. Dernière modification : 05/05/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_a%C3%A9ror%C3%A9frig%C3%A9rante

“Facteur de charge (électricité)”, wikipedia.org. Dernière modification : 03/06/2018.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_charge_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_charge_(%C3%A9lectricit%C3%A9))

“Centrale nucléaire”, wikipedia.org. Sous-partie : rendement d’une centrale nucléaire. Dernière modification : 27/05/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire#Rendement_d%27une_centrale_nucl%C3%A9aire

“Bilan électrique français 2016”, rte-france.com. [date inconnue].

https://www.rte-france.com/sites/default/files/2016_bilan_electrique_synthese.pdf

5.1.2. Centrale thermique à flamme

“Dossier et documents sur la centrale CCG de Blénod”, edf.fr. Publié en mai 2015.

https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-blenod/presentation/Dossier_de_Presse_Blenod_2015.pdf

“Statistiques sur le thermique à flamme en France et dans le monde”, edf.fr. Publié en 2013.

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-thermique-a-flamme-en-chiffres>

“Données sur les centrales thermiques en France”, plan-eco-energie-bretagne.fr. Publié en mai 2014.

http://www.plan-eco-energie-bretagne.fr/upload/docs/application/pdf/2014-06/les_moyens_de_production_denergie_-_version_finale.pdf

“Fiche pédagogique, Centrale à charbon”, [connaissancedesenergies.org](https://www.connaissancedesenergies.org). Publié le 05/07/2016.
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>

“Données sur les différentes centrales thermiques”, GDF Suez. Publié en 2013.
<http://www.japprends-lenergie.fr/upload/enjeux/ressources/centrales-thermiques-a-flamme.pdf>

“Fiche pédagogique, gaz de schiste”, [connaissancedesenergies.org](https://www.connaissancedesenergies.org). Publié le 27/11/2014.
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-de-schiste>

5.1.3. Biomasse – Centrale à bois

“Biomasse (énergie)”, [wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie)#Définition_en_Europe_et_en_France). Dernière modification : 15/06/2018.
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(énergie\)#Définition_en_Europe_et_en_France](https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie)#Définition_en_Europe_et_en_France)

“Qu’est-ce que la biomasse ?”, edf.fr. [Date inconnue].
<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-biomasse>

“Biomasse énergie”, [ecologique-solidaire.gouv.fr](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr). Publié le 26/03/2018.
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biomasse-energie>

“Énergies et climat”, [developpement-durable.gouv.fr](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr). Publié en 2018.
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-climat/966.html>

“La belle énergie de la biomasse”, [usinenouvelle.com](https://www.usinenouvelle.com). Publié le 12/09/2013.
<https://www.usinenouvelle.com/article/la-belle-energie-de-la-biomasse.N204577>

“Le bois énergie et la qualité de l’air”, [ademe.fr](http://www.ademe.fr). Dernière modification : 12/06/18.
<http://www.ademe.fr/en/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-chaleur/dossier/bois-biomasse/bois-energie-qualite-lair>

“Production biomasse et distribution de chaleur”, [ademe.fr](http://www.ademe.fr). Publié en mai 2015.
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/couts-investissement-exploitation-installations-biomasse-energie-2015-synthese.pdf>

“Biomasse énergie, pollution atmosphérique et santé”, [appa.asso.fr](http://www.appa.asso.fr). Publié en juin 2014.
http://www.appa.asso.fr/_docs/1/fckeditor/file/Revue/PollutionAtmospherique/HS_energie_2014/Mathis.pdf

“Biomasse : y a-t-il des risques de surexploitation en France ?”, [natura-sciences.com](http://www.natura-sciences.com). Publié le 26/03/2016.
<http://www.natura-sciences.com/energie/biomasse-surexploitation526.html>

“La méthanisation”, [insa-rennes.fr](http://methanisation.insa-rennes.fr). [Date inconnue].
<http://methanisation.insa-rennes.fr/contraintes-installations/>

“L’énergie biomasse : définition, fonctionnement et chiffres clés”, [direct-energie.com](https://www.direct-energie.com). Publié le 22/11/2017.
<https://www.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/l-energie-biomasse-definition-fonctionnement-et-chiffres-cles>

“La biomasse solide”, [developpement-durable.gouv.fr](http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr). Publié en juin 2017.
http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/biomasse_solide.pdf

5.1.4. Eolien – Onshore

“Energie éolienne”, connaissancedesenergies.org. Dernière modification : 01/04/16.

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>

“Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne”, les-energies-renouvelables.eu. Dernière modification : 08/01/2018.

<https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne/>

“Le fonctionnement d'une éolienne”, edf.fr. [Date inconnue].

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-eolienne>

“L'éolien en chiffres”, edf.fr. [Date inconnue].

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-eolien-en-chiffres>

“Une éolienne pollue-t-elle ?”, voseconomiesdenergie.fr. Publié le 11/01/2012.

https://www.voseconomiesdenergie.fr/actualites/energies-renouvelables/une-eolienne-pollue-t-elle_00192

5.1.5. Géothermie

“Centrale géothermique”, wikipedia.org. Dernière modification : 03/02/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_g%C3%A9othermique

“Géothermie - Aspects économiques”, techniques-ingenieur.fr. Publié le 10/01/2008.

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/environnement-et-construction-42552210/geothermie-be8590/aspects-economiques-be8590v2niv10005.html>

“La géothermie haute énergie : l'électricité”, planete-energies.com. Publié le 27/08/2014.

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-geothermie-haute-energie-l-electricite>

“Géothermie haute température”, connaissancedesenergies.org. Publié le 22/06/2011.

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie-haute-temperature>

5.1.6. Hydraulique – Centrale hydroélectrique

“La construction d'une nouvelle centrale”, edf.fr. [Date inconnue].

<https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-pays-de-savoie/chantier-la-coche-pelton/la-construction-d-une-nouvelle-centrale>

“Les coûts de production de l'électricité en France”, connaissancedesenergies.org. Publié le 25/09/2013.

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/couts-de-production-de-l-electricite-en-france>

“450 barrages hydrauliques français dans un «état de vétusté avancé» et une centaine dangereux ?”, maire-info.com. Publié le 26/02/2007.

<http://www.maire-info.com/environnement-developpement-durable/eau-et-assainissement/450-barrages-hydrauliques-francais-dans-un-etat-de-vetuste-avance-et-une-centaine-dangereux-article-8012>

“La réhabilitation des centrales hydroélectriques : Une vraie opportunité”, encyclopedie-energie.org. Publié en avril 2016.

<http://encyclopedie-energie.org/articles/la-r%C3%A9habilitation-des-centrales-hydro%C3%A9lectriques-une-vraie-opportunit%C3%A9>

“Coût du kwh électrique”, energythic.com. Publié le 30/06/2012.

<http://energythic.com/view.php?node=269>

“Les impacts de l'hydraulique sur l'environnement”, mtaterre.fr. [Date inconnue].

<http://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-hydraulique/les-impacts-de-lhydraulique-sur-lenvironnement>

“Énergie hydraulique : avantages et inconvénients”, direct-energie.com. Publié le 17/10/2017.

<https://www.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/energie-hydraulique-avantages-et-inconvenients>

“Risques et contraintes des barrages”, energiehydraulique.com. [Date inconnue].

<http://www.energiehydraulique.com/risques.html>

“Inondations en Chine: le barrage des Trois-Gorges suscite l'inquiétude”, rfi.fr. Publié le 28/07/2010

<http://www.rfi.fr/asie-pacifique/20100728-inondations-chine-le-barrage-trois-gorges-suscite-inquietude>

“Énergie en Norvège”, wikipedia.org. Sous-partie : secteur électrique. Dernière modification : 29/05/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Norv%C3%A8ge#Secteur_%C3%A9lectrique

“L'hydraulique en chiffres”, edf.fr. [Date inconnue].

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-hydraulique-en-chiffres>

“Hydroélectricité en France”, wikipedia.org. Dernière modification : 03/06/2018.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydro%C3%A9lectricit%C3%A9_en_France

“L'hydroélectricité: les chiffres en France et dans le monde”, enr.fr. Publié en juin 2012.

http://www.enr.fr/userfiles/files/Kit%20de%20communication/2009204901_Hydraumars2009toutesenbassedf.pdf

“Hydroélectricité : stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)”, conaissancedesenergies.org. Publié le 03/01/2013.

<https://www.conaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>

5.1.7. Solaire photovoltaïque

“Comment fonctionnent les panneaux photovoltaïques ?”, evasol.fr. [Date inconnue].

<http://panneaux-solaires-photovoltaïques.evasol.fr/photovoltaïque-pourquoi-fois-je-le-faire.html>

“Le solaire photovoltaïque en chiffres”, edf.fr. [Date inconnue].

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-solaire-photovoltaïque-e>

“Rendement photovoltaïque d'une installation de panneaux solaires”, energies.nouvelles.net. [Date inconnue].

<https://www.energies-nouvelles.net/rendement-installation-panneaux-photovoltaïques/>

“Listes des centrales solaires en France”, fournisseurselectricite.com. [Date inconnue].

<https://www.fournisseurs-electricite.com/guides/acteurs/production/centrales-solaires-france#liste-france>

“La plus grande centrale photovoltaïque d’Europe est française”, notre-planete.info. Dernière modification : 06/04/2017.

<https://www.notre-planete.info/actualites/4387-plus-grande-centrale-solaire-Europe>

“Énergie solaire : son impact sur l’environnement”, maison-travaux.fr. Publié le 22/02/2018.

<http://www.maison-travaux.fr/dossiers/energies-renouvelables-renovation-par-type/guide-quest-lenergie-solaire-fp/limpact-de-lenergie-solaire-lenvironnement-fp-183591.html>

“Croissance de l’éolien et du solaire - Quel stockage de l’électricité ?”, conseils.xpair.com. Publié le 01/01/18.

https://conseils.xpair.com/actualite_experts/croissance-eolien-solaire-stockage-electricite.htm

5.2. Table des illustrations

Illustration 1 : Illustration de couverture.....	1
Illustration 2 : Organigramme de la répartition du travail pour la réalisation du projet.....	6
Illustration 3 : Schéma du fonctionnement des barres de contrôle en bore	7
Illustration 4 : Photo d’une centrale thermique à flamme.....	9
Illustration 5 : Schéma du fonctionnement d’une éolienne onshore	11
Illustration 6 : Schéma du fonctionnement d’une centrale géothermique.....	13
Illustration 7 : Schéma montrant la composition d’un barrage	15
Illustration 8 : Schéma expliquant la production d’électricité par le photovoltaïque.....	16

Illustration 1

<http://www.ecorenove.fr/stop-aux-idees-recues-sur-les-energies-renouvelables-1/>

Illustration 3

<http://tpe-fukushima-s06.e-monsite.com/pages/l-accident-nucleaire-de-fukushima.html>

Illustration 4

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/comment-fonctionne-une-centrale-thermique-a-flamme>

Illustration 5

<http://www.pearltrees.com/abdelhamidfalah/fonctionnement-eolienne/id9417646/item92718630>

Illustration 6

<https://www.techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/environnement-et-construction-42552210/geothermie-be8590/figures/ul-be8590v2niv10004/2/sl4880126-web.gif>

Illustration 7

<http://www.innergex.com/energies/hydroelectricite/>

Illustration 8

<http://tpe-photovoltaique.besaba.com/introduction.html>

6. ANNEXE

6.1. Calcul du prix au kW/h par moyen de production

Pour calculer le prix au kWh de chaque moyen de production, nous avons utilisé la formule suivante :

$$\text{Coûts de production} = \frac{\text{Coûts d'Investissement (I)} + \text{Coûts de maintenances (M)}}{\text{kWh}}$$

Avec Coûts de maintenance : $M = I \times \% \text{ de l'Investissement} \times \text{Durée de vie}$
 kWh = Durée de vie \times 24 heures \times Facteur de charge

Nucléaire :

I : 2500 €/kW installé
 M : $0,05 \times 2500 \times 40 = 5000 \text{ €}$
 kWh : $40 \times 365 \times 24 \times 0,75 = 262\ 800 \text{ kWh}$
 Coûts de production = **0,029 €/kWh**

Géothermie :

I : 1 900 €/kW installé
 M : $0,06 \times 1900 \times 40 = 4\ 560 \text{ €}$
 kWh : $40 \times 365 \times 24 \times 0,8 = 280\ 320 \text{ kWh}$
 Coûts de production = **0,023 €/kWh**

Centrale thermique à flamme :

I : 900 €/kW installé
 M : $0,06 \times 900 \times 30 = 1\ 620 \text{ €}$
 kWh : $30 \times 365 \times 24 \times 0,26 = 68\ 328 \text{ kWh}$
 Coûts de production = **0,036 €/kWh**

Hydraulique :

I : 3 500 €/kW installé
 M : $0,05 \times 3500 \times 40 = 7\ 000 \text{ €}$
 kWh : $40 \times 365 \times 24 \times 0,9 = 315\ 360 \text{ kWh}$
 Coûts de production = **0,033 €/kWh**

Biomasse – Centrale à bois :

I : 3 000 €/kW installé
 M : $0,06 \times 3000 \times 20 = 3\ 600 \text{ €}$
 kWh : $20 \times 365 \times 24 \times 0,8 = 140\ 160 \text{ kWh}$
 Coûts de production = **0,047 €/kWh**

Solaire – Photovoltaïque :

I : 2 €/Wc TTC pour une puissance de
 1 kWc solaire, soit :
 2 000 €/kWc TTC
 M : $0,01 \times 2000 \times 20 = 400 \text{ €}$
 kWh : $20 \times 365 \times 24 \times 0,12 = 21\ 024 \text{ kWh}$

Coûts de production = **0,114 €/kWh** (en Normandie)

Eolien – Onshore :

I : 1,3 €/Wc TTC pour une puissance de
 1 kWc éolien, soit :
 1 300 €/kWc TTC
 M : $0,02 \times 1300 \times 20 = 520 \text{ €}$
 kWh : $20 \times 365 \times 24 \times 0,20 = 35\ 040 \text{ kWh}$
 Coûts de production = **0,052 €/kWh**