

Renewable energies / wind turbine



Étudiants :

BABEL Yann
BERTHE Malou
GERARD Inès
LEKVE Sandra
NATIVEL Léa
RIBEYRON Suzanne

Enseignant-responsable du projet :

Mostafa Safdari SHADLOO

Date de remise du rapport : 15/06/2020

Référence du projet : STPI / P6 / 2019-2020

Intitulé du projet : renewable energies / wind turbine

Type de projet : travail bibliographique

Objectifs du projet : L'objectif de ce rapport est d'effectuer un travail bibliographique sur les énergies renouvelables (fonctionnement, avantages, inconvénients, puissance produite, part du marché...). Une étude plus approfondie des éoliennes (modèles, puissance, avantages et inconvénients...) sera également menée. Ce rapport fera l'objet d'un travail de référencement.

Mots-clés du projet : énergies renouvelables, éoliennes, bibliographie

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE ROUEN
DÉPARTEMENT SCIENCES ET TECHNIQUES POUR L'INGÉNIEUR
685 AVENUE DE L'UNIVERSITÉ BP 08 - 76801 SAINT-ÉTIENNE-DU-ROUVRAY
TÉL : +33 2 32 95 66 21 - FAX : +33 2 32 95 66 31

Table des matières

Introduction	4
Organisation du travail	5
1 Les différentes énergies renouvelables	6
1.1 La biomasse	6
1.1.1 Définition	6
1.1.2 Les différents procédés de la biomasse	6
1.1.2.1 L'énergie-bois	6
1.1.2.2 Le biogaz	6
1.1.2.3 Les biocarburants	6
1.1.3 Fonctionnement d'une centrale biomasse	7
1.1.4 Les perspectives d'avenir	7
1.1.4.1 Les limites de développement	7
1.1.4.2 De nombreux projets en cours de développement	7
1.2 L'énergie hydraulique	7
1.2.1 Le fonctionnement des différents types de centrale hydroélectrique	8
1.2.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique	8
1.2.3 Les perspectives d'avenir	8
1.3 L'énergie marine	9
1.3.1 L'énergie marémotrice	9
1.3.2 L'énergie houlomotrice	9
1.3.3 L'énergie hydrolienne	9
1.3.4 Les perspectives d'avenir	9
1.4 L'énergie solaire	10
1.4.1 Méthodes solaire passive et solaire active	10
1.4.2 Méthode solaire thermique et énergie photoélectrique (cellules solaires)	10
1.4.3 Les perspectives d'avenir	10
1.4.4 Conclusion	11
1.5 L'énergie géothermique	11
1.5.1 Définition	11
1.5.2 Origine de la chaleur du sous-sol	11
1.5.3 Principe d'exploitation	11
1.5.4 Les perspectives d'avenir	12
1.5.5 Conclusion	12
1.6 L'énergie éolienne	12
1.6.1 Les éoliennes terrestres	12
1.6.2 Les éoliennes en mer	12
1.6.3 L'énergie éolienne en France, en Europe et dans le monde	13
1.6.4 Les perspectives d'avenir	13
1.6.4.1 En France	13
1.6.4.2 En Europe et dans le monde	13

2	Les similarités entre les énergies renouvelables	14
3	La part des énergies renouvelables dans la production d'énergie	15
3.1	Dans le monde	15
3.2	Dans l'Union Européenne	15
3.3	En France	15
4	Les différentes variétés d'éoliennes	16
4.1	Les éoliennes à axe vertical	16
4.1.1	Les éoliennes de Darrieus	16
4.1.1.1	Description	16
4.1.1.2	Le problème de lancement	16
4.1.1.3	Rendement	16
4.1.2	Les éoliennes Savonius	17
4.1.2.1	Description	17
4.1.2.2	Caractéristiques	17
4.1.2.3	Rendement	17
4.1.3	Comparaison des éoliennes à axe vertical	17
4.2	Les éoliennes à axe horizontal	17
4.2.1	Caractéristiques des éoliennes à axe horizontal	17
4.2.1.1	Taille et vitesse de rotation	17
4.2.1.2	Puissance produite	18
4.2.2	Comparaison des coefficients de puissance en fonction du type d'éoliennes	18
4.2.3	Influence du nombre de pales	18
4.2.4	Les éoliennes dites « amont » et « aval »	18
4.2.5	Différents modèles d'éoliennes à axe horizontal	18
4.2.6	Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes à axe horizontal	19
4.3	Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical	19
	Conclusion	20
	Bibliographie	21
	Annexes	29

Introduction

Le monde dans lequel nous vivons est extrêmement demandeur en ressources énergétiques. Se déplacer, prendre une douche ou même manger nécessite un apport énergétique. Aujourd'hui, le nucléaire et les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon) fournissent la grande majorité de nos besoins énergétiques. Mais à quel prix ?

Gaz à effet de serre, pollution de l'air et des sols, réchauffement climatique sont des termes que l'on entend de plus en plus. La prise de conscience des dégâts causés par ces sources d'énergie sur notre environnement et notre planète entraîne une remise en cause de la production énergétique actuelle. De ce fait, on parle énormément de transition énergétique, d'énergies renouvelables et de leur potentiel pour remplacer la production nucléaire et minière. Mais est ce que la question est réellement dans le mot « remplacer » ?

Dans ce rapport, nous allons étudier les six grands types d'énergies renouvelables afin d'en déterminer les avantages mais aussi les inconvénients, le mode de fonctionnement et les perspectives d'avenir.

Nous approfondirons ensuite le cas de l'énergie éolienne en étudiant les deux grands types d'éoliennes à savoir les éoliennes à « axe horizontal » et celles à « axe vertical ». Nous aborderons les différents modèles existants, les performances et les subtilités de chaque type d'éolienne avant de les comparer entre elles afin de mieux comprendre leurs utilisations.

L'objectif de ce projet est de mener une recherche bibliographique et un travail de référencement à propos des énergies renouvelables et en particulier de l'énergie éolienne. Ces recherches nous permettront de porter notre regard sur les énergies renouvelables et leurs conséquences.

Organisation du travail

Au cours de ce projet, nous nous sommes répartis les différents sujets de recherche. Notre enseignant-responsable nous guidait toutes les deux semaines pour nous communiquer les nouveaux thèmes à aborder. Il nous indiquait également les points à développer dans notre travail.

Au fil du projet, nous mettions en commun nos rapports sur les domaines que nous avons étudiés. Notre rapport a donc été enrichi semaine après semaine.

Nous nous sommes répartis les sujets de recherche de la façon suivante :

Yohann BABEL	Malou BERTHE	GERARD Inès
Énergie hydraulique	Énergie marine	Énergie géothermique
Éoliennes à axe horizontal	Éoliennes à axe horizontal	Éoliennes à axe vertical
Introduction et conclusion		Réalisation de l'affiche

LEKVE Sandra	NATIVEL Léa	RIBEYRON Suzanne
Énergie solaire	Énergie de la biomasse	Énergie éolienne
Éoliennes à axe vertical	Éoliennes à axe vertical	Éoliennes à axe horizontal
		Étude de la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie
		Mise en forme du rapport à partir des textes écrits par chaque membre du groupe

TABLE 1 – Organisation du travail

Chapitre 1

Les différentes énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont issues de processus naturels se renouvelant constamment. Grâce au fait que l'utilisation des énergies renouvelables ne conduise généralement pas au réchauffement climatique, l'attention dont elles font l'objet a considérablement augmenté au cours des dernières décennies [7].

1.1 La biomasse

La biomasse est une énergie utilisée depuis le début de l'humanité, depuis que les premiers hommes des cavernes ont réalisé des feux de bois pour cuisiner ou se réchauffer. Aujourd'hui, cette énergie s'est développée et s'est adaptée pour répondre à nos besoins énergétiques, alimenter les générateurs électriques et autres machines que nous utilisons [94].

1.1.1 Définition

La biomasse est issue de la combustion, de la fermentation ou de la synthèse chimique de matières organiques telles que le bois, ou les déchets, végétaux et animaliers (compost et fumier). La chaleur dégagée par la combustion de ces matières permet de produire de l'électricité. La seule condition que doivent remplir ces matières organiques pour être considérées comme de l'énergie biomasse est que leur exploitation soit plus lente que le renouvellement de leur ressource. Il faut donc s'assurer de sécuriser et protéger la ressource en pensant au long terme [95, 96].

1.1.2 Les différents procédés de la biomasse

On distingue trois formes de biomasse : l'énergie-bois, le biogaz et les biocarburants.

1.1.2.1 L'énergie-bois

Il s'agit de la combustion du bois (biomasse sèche) dans une chaudière. La production de vapeur liée à cette combustion est ensuite utilisée pour produire de l'électricité.

1.1.2.2 Le biogaz

Le biogaz est issu de déchets organiques tels que les déchets agricoles (lisiers, fumiers, poussières de céréales) ou encore les sous-produits industriels (boue, graisse, épiluchures). Il provient également de déchets urbains tels que les déchets verts, déchets ménagers, de grandes surfaces. On distingue deux méthodes d'exploitation de ce biogaz : la méthanisation et la cogénération [97].

1.1.2.3 Les biocarburants

Enfin, les déchets végétaux (compost) ainsi que les plantes sont également une forme de biomasse. On parle ici de biomasse sèche. Les biocarburants sont des carburants de substitution obtenus à partir de la biomasse. On

utilise, par exemple, le colza ou le soja dont on peut extraire de l'huile et les plantes dont on peut obtenir de l'alcool comme la canne à sucre ou le maïs comme carburants pour faire fonctionner les automobiles [99, 100].

1.1.3 Fonctionnement d'une centrale biomasse

Le fonctionnement d'une centrale biomasse peut se décomposer en quatre étapes. La première étape consiste à brûler les matières organiques dans la chambre de combustion. La vapeur créée par cette combustion est envoyée avec une certaine pression vers des turbines et permettra alors de les faire tourner. Suite à cela, les turbines, reliées à un alternateur, lui fournissent de l'énergie transformée en électricité par ce dernier. La dernière étape consiste à recycler la vapeur produite par la combustion, utilisée pour le chauffage ou ré-utilisée pour recommencer un nouveau cycle [101] (Figure 4.3.1 page 29).

1.1.4 Les perspectives d'avenir

On distingue deux types de biocarburants : les biocarburants dits de première génération et ceux de deuxième génération aussi appelés biocarburants avancés qui constituent une perspective d'avenir pour répondre à nos besoins énergétiques tout en ralentissant le réchauffement climatique. Les biocarburants avancés proviennent de ressources non-alimentaires, ce qui est un avantage majeur car cela limite les problématiques d'usage des sols et de concurrence avec l'alimentaire. Cela offre même un nouveau débouché aux filières agricoles. Ces biocarburants sont issus de la lignocellulose ce qui correspond aux résidus agricoles et forestiers, aux sous-produits de transformation du bois mais aussi à des cultures dédiées telles que les plantes ligneuses (son principal matériau de structure est le bois) ou les plantes herbacées [136].

Les biocarburants avancés sont également répartis en deux familles : le bioéthanol avancé, et le biogazole et le biokérosène avancés. Enfin, une nouvelle biomasse est en cours de développement et soumise à de nombreuses recherches : les bio algues.

1.1.4.1 Les limites de développement

Cependant, la limite la plus importante à laquelle est confrontée cette industrie de biocarburants avancés est évidemment le manque de maîtrise des technologies permettant son exploitation. À ces contraintes techniques viennent s'ajouter des contraintes économiques. Pour avoir un ordre d'idée, d'après les estimations actuelles, les coûts de production de biocarburants à partir d'algues sont beaucoup plus élevés que ceux des biocarburants avancés (plus de 300 dollars le baril) [137].

1.1.4.2 De nombreux projets en cours de développement

De nombreux projets voient le jour en ce moment, tels que Futurol, BioTFuel ou encore Gaya en France. Ils visent à créer les filières françaises des biocarburants avancés. Biomass for the future est également un projet innovant qui vise à développer de nouveaux systèmes de culture à base de nouvelles variétés de plantes : le sorgho et le miscanthus [138]. Le sorgho est une plante herbacée cultivée pour ses graines et son fourrage. Il ressemble au maïs mais possède l'avantage d'avoir un haut rendement et d'être résistant à la sécheresse [139]. Le miscanthus est une plante dite pérenne : il se plante une fois pour 20 à 25 ans. Il ressemble à la canne à sucre ou au roseau mais a l'avantage d'être adapté à des climats plus tempérés, avec une faible dépendance aux engrais et aux produits phytosanitaires. Ces cultures ont l'avantage de combiner un fort potentiel de production de biomasse, avec un impact minimal sur l'environnement. La France est d'ailleurs le quatrième pays producteur mondial de biocarburants avec plus de 2 millions de tonnes de biocarburants produites sur le territoire (5 % de la production mondiale). En France, le projet de loi "Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)" prévoit l'intégration de 3.8 % de biocarburants avancés dans l'essence et 3.2 % dans le gazole à horizon 2028 [137].

1.2 L'énergie hydraulique

Aujourd'hui, l'énergie hydraulique est l'énergie renouvelable la plus développée en France (56 % de la production électrique par les énergies renouvelables) et dans le monde (73.2 %). En effet, elle couvre 16.4 % des besoins énergétiques mondiaux, avec une production atteignant 3400 TWh par an. En comparaison, seulement 56 TWh sont produits en France, ce qui représente 13 % de la production d'électricité française [72, 69].

1.2.1 Le fonctionnement des différents types de centrale hydroélectrique

Il existe aujourd'hui deux grands types d'ouvrages hydroélectriques :

- Les centrales dites « au fil de l'eau » utilisent directement et en continu le potentiel de l'eau (Figure 4.3.2 page 29).
- Les centrales dites « à chutes » possèdent une retenue d'eau (ouvrage de prise) qui permet de stocker une grande réserve d'eau opérationnelle en quelques dizaines de minutes (1800 MWh) (Figure 4.3.3 page 30) [67].

La chute (modulable par des vannes) ou le cours d'eau à exploiter s'engouffre dans une conduite forcée pour entraîner la rotation des aubes de la turbine en contrebas. Les turbines peuvent atteindre jusqu'à 8 mètres d'envergure pour une masse d'environ 3000 tonnes et un rendement de 70 à 90 %. L'eau est dirigée par des pales orientables permettant d'amener l'eau de manière optimale. L'énergie mécanique produite est convertie en énergie électrique par un alternateur. Un transformateur s'ajoute à l'ouvrage pour adapter la tension produite au réseau [71]. Le plus grand barrage de France est celui de Grand'Maison en Savoie (1820 MW installés) [81].

Le plus souvent pour les centrales dites « à chutes », un système de pompage-turbinage est installé. Lors des périodes de forte consommation, l'eau est prise dans le bassin supérieur pour être turbinée et relâchée dans le bassin inférieur. A l'inverse, en période de basse consommation, l'eau est pompée dans le bassin inférieur pour être ramenée vers le bassin supérieur. Cela participe à l'ajustement entre l'offre et la demande [70].

1.2.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique

Comme présenté précédemment, l'énergie hydraulique est renouvelable, permet un accès à de grandes réserves d'énergie en peu de temps et ceci à un rendement élevé. Ajouté à cela, l'énergie hydraulique est l'une des énergies renouvelables les plus compétitives du marché avec l'éolien (55 €/MWh pour l'hydraulique, 65 €/MWh pour l'éolien terrestre). Mais le nucléaire (42.3 €/MWh) et le charbon/gaz (60-65 €/MWh) restent aussi accessibles.

Ces coûts dépendent de nombreux paramètres comme les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance ou encore de la durée de vie de l'installation [74].

Néanmoins, la destruction des paysages naturels est évidemment un frein au développement de cette énergie au même titre que l'éolien.

Les modifications du débit des courants, l'apparition de zones d'eau stagnantes liées à la retenue d'eau, les modifications locales de pentes et le transport des solides perturbé, perturbent les conditions de vie des poissons et des végétaux.

De plus, une étude importante au préalable (stabilité des pans et des sols pour éviter l'apparition de microfissures) est nécessaire pour l'installation de tels ouvrages. Les glissements de terrain naturels amènent aussi une pression supplémentaire sur les barrages qui doivent être suivis minutieusement (fatigue des matériaux).

Le retour sur investissement à long terme freine donc aussi de nombreux investisseurs [68, 72].

1.2.3 Les perspectives d'avenir

En France, un potentiel de 10.6 TWh, se divisant en deux parties, ne serait pas exploité. Il pourrait permettre à quatre millions de français d'être alimentés quotidiennement par l'hydroélectricité [69].

- Un potentiel de 9.5 TWh se baserait sur la création de nouvelles centrales hydrauliques. Certains sites ont été identifiés en France mais les questions environnementales (zones asséchées, déplacements perturbés des sédiments et des espèces migratrices...), financières et humaines (coût du barrage, déplacement de population...) freinent le développement des projets [69].
- Un potentiel de 1.1 TWh se baserait sur la réhabilitation d'anciennes centrales ou encore d'anciens moulins/roues à aubes. Il permettrait, d'une part, de fournir une production électrique locale (« petite hydraulique » allant de 10 kW à 400 kW) tout en respectant le cycle naturel de l'eau. D'autre part, on peut prendre comme exemple le projet de réhabilitation du barrage de Romanche-Cavet dont l'objectif est de remplacer 6 centrales et 5 barrages par un seul barrage et une centrale souterraine discrète et efficace, avec une galerie d'aménée de 9.5 km, qui fonctionnerait en continu au fil de l'eau. Le gain avoisinerait les 155 GWh (38 % d'augmentation) soit l'équivalent des besoins énergétiques d'une ville de 60 000 habitants [80, 69, 82].

Pour terminer, actuellement, notre Terre est recouverte à 71 % par des océans, une gigantesque masse en mouvement qui n'attend que nous. Des prototypes d'hydroliennes sont à l'essai pour utiliser le potentiel prédictible et régulier des courants fluviaux et marins. Le prototype EEL à membrane ondulatoire, consiste en une membrane qui va onduler de tout son long et de manière périodique sous l'effet des courants. On pourra ensuite, sur le prototype, convertir les déformations en électricité. Des puissances atteignant les 5 MW sont envisageables. On notera qu'elles sont 10 fois plus compactes qu'une éolienne classique, et qu'elles ne produiraient ni nuisances sonores, ni dégâts sur la faune. On envisagerait de faire passer des embarcations au dessus des fermes.

D'après certaines études, les courants offriraient un potentiel 450 TWh d'électricité dont 105 TWh en Europe si les courants marins corrosifs et sévères arrivaient à être domptés. En effet, les courants marins offriraient l'accès à des zones non accessibles avec des turbines mais qui ne facilite pas l'accès à des maintenances régulières [83, 84, 85].

1.3 L'énergie marine

L'énergie marine est captée grâce à de nombreux modes d'extraction. Elle représente environ 0.05 % de la production d'énergie renouvelable mondiale [62].

1.3.1 L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice s'appuie sur le marnage (mouvement des marées montant ou descendant, voir Figure 4.3.4 page 30). Cette énergie est encore très peu exploitée : 380 TWh/an [60]. Un de ses avantages est l'absence d'émissions de gaz à effet de serre. Cependant, elle présente de nombreux inconvénients. Dans un premier temps, la construction d'un barrage implique la submersion d'écosystèmes. Ensuite, sa production dépend des marées, elle est donc intermittente mais reste prévisible. Afin d'extraire cette énergie, il faut que le marnage soit entre 10 et 15 m et que la profondeur sous les basses mers soit de 10 à 25 m [65]. L'usine marémotrice de la Rance en France est l'une des premières du monde. Elle est composée de 24 turbines et sa production annuelle s'élève à 540 GWh [60].

1.3.2 L'énergie houlomotrice

L'énergie houlomotrice repose sur les mouvements des vagues et de la houle. Différents dispositifs permettent de produire de l'énergie électrique. Certains flottent à la surface de l'eau, comme la chaîne flottante articulée, constituée de flotteurs. Le mouvement des vagues crée une oscillation qui sera exploitée aux articulations afin de comprimer un fluide hydraulique qui va entraîner les turbines [61]. Il existe aussi de nombreux systèmes immergés tels que la paroi oscillante immergée d'une puissance de près de 300 kW [61], ou encore la colonne à oscillation verticale (Figure 4.3.5 page 30).

Cependant, l'énergie houlomotrice ne peut être extraite que sur des grandes surfaces maritimes. Sa production mondiale est comprise entre 2000 et 8000 TWh/an [61]. De nombreux projets sont étudiés afin d'améliorer les systèmes d'extraction et d'exploitation en vue d'un développement à grande échelle.

1.3.3 L'énergie hydrolienne

L'énergie hydrolienne se base sur la conversion de l'énergie cinétique des courants marins en énergie électrique. Les hydroliennes doivent être immergées à 30 ou 40 m de profondeur pour un résultat exploitable (Figure 4.3.6 page 31) [63].

Le principe d'une hydrolienne est en tout point similaire à celui d'une éolienne, elle utilise les courants marins à la place du vent [63]. Par ailleurs, la puissance d'une hydrolienne est trois fois supérieure à celle d'une éolienne, du fait que la masse volumique de l'eau est 800 fois plus élevée que celle de l'air [63]. Cependant, les coûts d'investissement et d'exploitation des hydroliennes sont supérieures à ceux des éoliennes. Le potentiel des hydroliennes est estimé à 2.5 GW en France et 12.5 GW en Europe [64].

1.3.4 Les perspectives d'avenir

Avec pour objectif de réduire ses émissions de gaz à effet de serre, l'Union Européenne tente de développer les énergies renouvelables, entre autres, l'énergie marine. Celle-ci étant encore très peu exploitée et disponible en grande

quantité. Il est clair que la façade atlantique de l'Europe présente des avantages [132]. De nombreuses lois quant à la transition énergétique essaient de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables. L'objectif de la France est que les énergies renouvelables atteignent 32 % de la consommation finale d'énergie à l'horizon 2030 [134]. De plus, l'exploitation de ces énergies est en constante augmentation [133].

Le plus grand obstacle à leur développement est leur coût élevé. En effet, il est bien plus important que celui des infrastructures liées aux énergies terrestres. Cela est d'autant plus vrai dans le cas de l'hydrolienne. Son entretien présente un coût très élevé et nécessite d'extraire fréquemment les hydroliennes de l'eau. Enfin, les plaintes locales sont aussi un aspect important. Les éoliennes offshore présentent une pollution visuelle importante, et de nombreux habitants peuvent se plaindre de la dégradation du paysage [135]. De même pour les infrastructures se rapportant à l'énergie houlomotrice. Celles-ci peuvent aussi poser problème quant à la circulation navale et à la pêche, et donc compromettre l'activité de nombreuses personnes.

1.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire désigne la part de l'énergie électromagnétique provenant du soleil qui parvient à la surface de la Terre. L'énergie solaire est l'une des principales formes d'énergie renouvelable. Les effets de l'énergie solaire sont à l'origine de la plupart des énergies renouvelables trouvées dans la nature.

L'énergie obtenue par le rayonnement solaire à la surface de la terre est tellement considérable qu'elle représente plusieurs milliers de fois la quantité d'énergie nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques de l'humanité. Le défi est de récupérer cette énergie. Pour cela, il existe différentes techniques : le solaire passif, le solaire actif, le solaire thermique et le solaire photovoltaïque [105, 109].

1.4.1 Méthodes solaire passive et solaire active

La méthode solaire passive est la plus ancienne méthode d'utilisation de l'énergie solaire. Le principe est de laisser la chaleur solaire directement chauffer la maison ou le bâtiment. L'énergie solaire est prise en compte lors de la conception architecturale (doubles façades, surface vitrée au sud, isolation thermique, etc).

La méthode solaire active consiste à équiper les panneaux solaires de miroirs concentrant les rayons du soleil en un endroit précis. Il s'agit d'un four solaire pouvant atteindre des températures très élevées (jusqu'à 3000°C). Les chaudières simples sont conçues pour être utilisées dans les pays en développement (Figure 4.3.7 page 31)[104].

1.4.2 Méthode solaire thermique et énergie photoélectrique (cellules solaires)

La méthode solaire thermique se déroule de la manière suivante. Dans une centrale thermique, la chaleur des rayons solaires est extraite puis concentrée afin d'atteindre la température appropriée. Ensuite, cette énergie thermique est convertie en énergie électrique (Figure 4.3.8 page 32) [104, 106].

À l'aide de cellules solaires, l'énergie solaire rayonnée peut être convertie directement en énergie électrique dans un processus appelé photoélectrique ou photovoltaïque. Le matériau semi-conducteur est placé entre deux électrodes. La lumière active les cellules pour des longueurs d'onde plus courtes qu'environ 1 micromètre (μ). Les ondes de grande longueur d'onde provoquent un échauffement indésirable. En théorie, l'efficacité des cellules solaires au silicium (matériau semi-conducteur le plus utilisé) est de 28 %, en pratique il est compris entre 15 et 24 %. Les cellules solaires qui peuvent absorber toutes les longueurs d'onde du soleil auront une efficacité théorique de 85 %. Dans des expériences de laboratoire, on atteint une efficacité de 40 % avec la lumière solaire concentrée [104].

1.4.3 Les perspectives d'avenir

Du fait de sa grande disponibilité et de son caractère inépuisable, l'énergie solaire est très attractive [140]. La vision de L'Agence internationale de l'énergie est que l'énergie solaire couvrira environ 27 % de toute la production d'énergie dans le monde d'ici 2050 [104]. Pour rendre l'énergie solaire encore plus compétitive, elle doit continuer à s'améliorer, tout en réduisant les coûts globaux [140].

1.4.4 Conclusion

L'énergie solaire est très attractive, le défi est de la récupérer. Le solaire passif, le solaire actif, le solaire thermique et le solaire photovoltaïque, sont différentes méthodes pour récupérer cette énergie. Dans un avenir proche, les cellules solaires devraient être implantées en plus grand nombre et leur prix devrait continuer à baisser. Dans le même temps, la recherche de nouvelles cellules plus efficaces et moins coûteuses va se poursuivre. Dans quelques années, nous verrons probablement apparaître des alternatives aux cellules solaires au silicium dans nos parcs solaires et sur nos toits. Cela contribuera à fournir de l'énergie propre et renouvelable [140].

1.5 L'énergie géothermique

1.5.1 Définition

Le mot géothermie vient du grec « geo » (la Terre) et « thermos » (la chaleur). Il désigne non seulement la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe, mais aussi la technologie qui vise à exploiter cette énergie thermique [39].

1.5.2 Origine de la chaleur du sous-sol

On peut se demander d'où provient cette chaleur créée par la planète. S'il est vrai que pour certains sites cette chaleur provient du centre de la Terre, dans la majorité des cas, elle provient des éléments radioactifs, tels que les particules d'uranium, de thorium et de potassium, présents à l'état naturel et en grande quantité dans les roches de la croûte terrestre et du manteau supérieur. En se désintégrant, ces particules libèrent de l'énergie sous forme de chaleur, qui représente 90 % de la chaleur interne de la Terre [40].

Cependant, cette chaleur est inégalement répartie sur la surface du globe. La répartition de l'énergie thermique dépend effectivement du gradient géothermique, qui correspond à la variation de la température avec la profondeur, et donc de l'activité thermique des régions. En moyenne, la température du sol augmente de 1°C tous les 30-40 m, mais parfois, la température augmente bien plus rapidement, jusqu'à 1°C tous les 2.5 m pour les zones volcaniques, où le gradient géothermique est plus favorable [38]. À titre de comparaison sur le territoire français, dans le Bassin Parisien : à 1.5 km de profondeur, la température est de 70°C ; en Alsace : à 1.5 km, elle est de 100°C ; en Guadeloupe : à 1 km, elle est de 250°C (Figure 4.3.9 page 32).

1.5.3 Principe d'exploitation

Le principe d'exploitation de l'énergie thermique produite par le globe est assez simple et se décline en plusieurs méthodes. Le flux géothermique est la quantité d'énergie thermique dissipée par unité de surface terrestre et par unité de temps. Le flux géothermique moyen est de l'ordre de 87 mW/m², mais il est différent sur les continents (~ 65 mW/m²) et sur les océans (~ 100 mW/m²) [40].

Il est tout d'abord possible d'extraire de la chaleur dans des zones à gradient géothermique moyen, grâce à la présence d'eau. En effet, il est nécessaire que le sous-sol soit composé d'aquifères, qui sont des couches de roches poreuses et gorgées d'eau chaude. Par exemple, si l'on creuse entre 1600 et 2000 m de profondeur, on trouve l'aquifère du Dogger, composé de roches calcaires riches en eau, qui date de la période du Jurassique. La température dans cette couche rocheuse varie entre 55°C et 85°C. En Ile-de-France, c'est principalement cet aquifère qui est exploité, pour chauffer 350 000 logements, avec 40 centrales géothermiques [40].

L'exploitation se divise en une suite d'étapes faisant intervenir différents systèmes, afin d'extraire cette chaleur. L'eau géothermale est puisée via un forage, appelé « puits de production », et arrive en surface dans la centrale à une température de 70°C. Elle passe dans un échangeur thermique à plaques, qui va transmettre sa chaleur à un autre réseau d'eau : le réseau de distribution. Ensuite, l'eau géothermale dont on a puisé la chaleur (maintenant à environ 35°C) est réinjectée dans l'aquifère, à une distance de 1500 m du point d'extraction initial. Cette distance de séparation permet de ne pas tiédir l'eau chaude extraite, tout en réinsérant l'eau utilisée dans le cycle, en circuit fermé. C'est la boucle géothermale. Il est également possible, dans les régions volcaniques, de capter en profondeur

des eaux bouillantes ou de la vapeur d'eau sous pression, afin de faire tourner des turbines et de transformer cette énergie thermique en électricité [40].

1.5.4 Les perspectives d'avenir

La géothermie, bien que source d'énergie propre et inépuisable, présente toutefois certaines limites. Elle est aujourd'hui malheureusement assez peu utilisée à l'échelle mondiale (encore moins en France), malgré le grand nombre de zones exploitables [129]. La part d'énergie produite par la géothermie, représentant moins de 0.4 % à l'échelle mondiale, demeure largement en marge face aux écrasants 75.5 % produits par des sources d'énergies non renouvelables. En 2016, 81.7 TWh ont été produits par la géothermie dans le monde, sur un total de 25081.6 TWh [128]. En France, ce n'est qu'en Guadeloupe avec la centrale de Bouillante que l'électricité géothermique est produite de façon industrielle. Cette production de 84 GWh, avec une puissance de 13.5 MW, représente 4.7 % de la production de l'île en 2016. L'objectif actuel est de pousser cette production à 20 % pour l'ensemble des régions d'outre-mer [131].

Dans le futur, il est également envisageable que les centrales géothermiques s'appuient sur les anciens champs pétroliers. Effectivement, la géothermie pourrait se développer au niveau des eaux très chaudes associées aux réservoirs pétroliers des bassins sédimentaires. D'autres méthodes d'exploitation géothermique sont actuellement en cours de recherche, dans le but d'être développées à l'horizon 2030. Par exemple, les réservoirs de très haute température (> 400°C) permettraient de forer des puits de puissance dix fois supérieure à celle d'un forage basique. Une autre piste est celle de l'exploitation des ressources géothermales sous-marines [130].

1.5.5 Conclusion

La géothermie est une source d'énergie au service du développement durable : inépuisable à l'échelle humaine, propre, écologique, disponible presque partout et économique. La quantité moyenne de CO_2 émis dans l'atmosphère par les centrales géo-thermoélectriques dans le monde est estimée à environ 55 g/kWh, alors qu'une centrale au gaz naturel en produit dix fois plus [41]. La diversité des implantations géothermiques actuelles dans le monde montre l'importance de cette source d'énergie, que l'homme pourrait utiliser davantage qu'il ne le fait actuellement.

1.6 L'énergie éolienne

Le principe de l'éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [10, 11]. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne qui entraînent le rotor. Dans la nacelle, le rotor entraîne un arbre relié à un alternateur. Un transformateur, placé à l'intérieur du mât, élève la tension électrique du courant pour faciliter son transport dans le réseau. Enfin, le courant est injecté dans le réseau ou bien stocké (Figure 4.3.10 page 33) [11, 17].

Les éoliennes commencent à tourner pour des vents de 15 km/h et s'arrêtent quand ils dépassent 90 km/h (pour des raisons de sécurité). En moyenne, elles fonctionnent plus de 80 % du temps [17].

1.6.1 Les éoliennes terrestres

En France, les éoliennes tripales à axe horizontal sont les plus implantées [11]. Au cours des dix dernières années, la taille des éoliennes terrestres a augmenté de 17 % et leur productivité a doublé [13]. Enfin, leur impact environnemental est faible, une éolienne terrestre émet en moyenne 12.7 g de CO_2 par kWh. De plus, 94 % à 97 % d'une éolienne est recyclable ou réutilisable [12].

1.6.2 Les éoliennes en mer

L'éolien en mer bénéficie des forts vents marins et d'un espace sans obstacle. Depuis 15 ans, ce secteur a connu un fort développement en Europe. Ainsi, le coût de la filière a énormément baissé. Fin 2019, l'Europe possédait plus de 5000 éoliennes en mer en fonctionnement [16]. La France possède un très gros potentiel grâce à son importante surface maritime (la 2^e plus grande au monde) [14]. Néanmoins, l'installation et la maintenance d'infrastructures éoliennes en mer sont plus complexes que celles des éoliennes terrestres. Leur coût est également plus élevé [18].

Il existe deux types d'éoliennes en mer : les éoliennes en mer posées et les éoliennes en mer flottantes. La différence réside dans leur système de fondation et d'attache au fond marin.

Les éoliennes en mer posées sont fixées sur le fond marin et ne peuvent être implantées à plus de 50 m de fond. Il s'agit des éoliennes les plus puissantes actuellement sur le marché [11]. En France, le potentiel théorique est estimé à 80 GW sur une superficie de 10 000 km² [15].

Il existe de nombreux types de fondations pour les éoliennes en mer posées. Leur usage dépend de la nature du projet, du terrain sous-marin et des turbines employées (Figure 4.3.11 page 33) [18].

Les éoliennes en mer flottantes sont attachées sur une plateforme flottante reliée au fond marin par des câbles d'ancrage. Elles peuvent être implantées jusqu'à 350 m de fond [11, 16]. En France, le potentiel théorique est estimé à 140 GW sur une superficie de 25 000 km². L'avantage de ce type d'infrastructures est qu'il est moins dépendant de la distance des côtes et de la bathymétrie (science de la topologie du terrain sous-marin [77]) [15].

1.6.3 L'énergie éolienne en France, en Europe et dans le monde

En 2017, la production d'électricité éolienne française a atteint 24.7 TWh [28]. Elle couvre ainsi, en 2018, 5.8 % de la consommation nationale d'électricité [24]. Les régions Hauts-de-France et Grand Est contribuent à près de la moitié de la production éolienne nationale [35, 25]. Avec 1829 parcs éoliens en mars 2019, la France se place 4^e parmi les pays de l'Union Européenne en matière de puissance installée [12].

En 2018, la production éolienne, en Europe, a couvert 14 % de la demande européenne en électricité [33]. L'Europe représente 80 % de la capacité mondiale en matière d'éolien offshore [34].

L'énergie éolienne représente près de 4.7 % de la production mondiale d'électricité [8]. Détenant 24.9 % du marché, l'Europe est la deuxième zone géographique du monde en matière de puissance installée. L'Asie reste cependant l'acteur majoritaire avec plus de la moitié du marché mondial [32].

1.6.4 Les perspectives d'avenir

1.6.4.1 En France

La France souhaite développer l'éolien en mer et structurer une filière nationale avec à la clé 15 000 emplois à temps plein [114]. Elle engagera chaque année le développement de 1000 MW d'éolien en mer (Figure 4.3.12 page 34). A l'horizon 2025, elle devrait disposer de 7750 MW de puissance installée d'éolien en mer [114]. Le Programme Pluriannuel de l'Énergie (PPE), a fixé les objectifs suivants pour ce secteur : atteindre 2.4 GW de puissance fin 2023 et 5.2 GW d'ici 2028 [15]. En matière d'éolien terrestre, la France se donne pour objectifs 24.6 GW de capacité installée en 2023 puis 35 GW d'ici 2028 [115].

De plus, la France veut réduire le délai de concrétisation des projets éoliens en mer [16] et favoriser l'investissement participatif des citoyens et des collectivités locales dans les projets éoliens. D'ici 2023, le recyclage des éoliennes sera obligatoire lors de leur démantèlement. La réutilisation des sites arrivant en fin de vie sera favorisée [115]. Ainsi, le nombre total de mâts en France passera de 8000 (en 2018) à 14500 en 2028 [115].

1.6.4.2 En Europe et dans le monde

Dans les prochaines années, l'Europe fournira une demande régulière et sur de gros volumes en matière d'éolien en mer. Les constructeurs pourront alors limiter les surcoûts liés à l'incertitude des projets [114].

Dans le monde, la puissance éolienne installée devrait tripler d'ici 2025. Elle atteindrait alors 910 GW. Le marché mondial devrait, quant à lui, doubler. Il passerait alors de 21 à 47 milliards d'euros [116].

La production mondiale d'énergie éolienne devrait atteindre 1439 TWh à 2821 TWh en 2030 et 2412 TWh à 6678 TWh en 2050. La production européenne devrait être comprise entre 288 GW et 397 GW d'ici 2030 [117, 8].

Les éoliennes offshore se développeront fortement. A l'horizon 2040, l'Europe devrait se trouver en première position en matière de puissance installée en mer avec 127 GW. La Chine suivrait de près avec 107 GW [118].

D'ici 2040, l'énergie éolienne devrait alors représenter près de 12 % de la production mondiale d'électricité [119].

Chapitre 2

Les similarités entre les énergies renouvelables

Mis à part la biomasse, toutes les autres énergies renouvelables dépendent de certaines conditions géographiques et environnementales pour être développées (Tableau 4.1 page 35). Cependant, seule l'énergie hydraulique ne connaît pas de limites de fonctionnement. Les réserves d'eau sont, en effet, presque entièrement contrôlées par l'homme. Les autres énergies renouvelables sont beaucoup plus sujettes aux éléments extérieurs (Tableau 4.3 page 36).

Du point de vue de leur fonctionnement, les énergies renouvelables peuvent être classées en trois catégories (Tableau 4.2 page 35) :

- Les énergies éolienne, hydraulique et marémotrice : elles transforment l'énergie cinétique en énergie mécanique qui est ensuite convertie en électricité.
- Les énergies géothermique et solaire thermique : elles utilisent un fluide chauffé à l'aide de l'énergie produite par la nature (chaleur reçue du soleil ou du centre de la Terre). La chaleur transportée par le fluide est ensuite utilisée pour chauffer des installations en le faisant passer par des tuyaux.
- L'énergie solaire photovoltaïque et la biomasse : elles ont un fonctionnement complètement différent des autres énergies renouvelables. Elles sont donc classées à part.

La part des différentes énergies renouvelables dans la production primaire d'énergie renouvelable en France varie beaucoup selon les énergies. On remarque toutefois que le bois-énergie constitue la part la plus importante avec 39 %. L'énergie hydraulique vient en deuxième (16.7 %). Les autres énergies renouvelables ont une production bien inférieure (Tableau 4.3.15 page 41).

Les énergies renouvelables constituent une faible part de la production d'énergie (globale) dans le monde. Les plus importantes sont l'hydraulique (16.30 % de la production mondiale d'électricité) et la biomasse (14 % de la production mondiale d'énergie primaire). Les autres énergies renouvelables occupent une moins grande place dans la production mondiale d'énergie (Tableau 4.5 page 36).

La puissance générée par les énergies renouvelables varie énormément suivant la taille des installations et les types d'énergie (Tableau 4.6 page 37). Néanmoins, l'énergie hydraulique possède un rendement bien meilleur comparé aux autres types d'énergies renouvelables (70 % à 90 %) (Tableau 4.7 page 37).

On peut citer une certaine variété d'avantages offerts par les énergies renouvelables : l'absence d'émissions de gaz à effet de serre (énergies éolienne, hydraulique, marémotrice et solaire), l'absence de dégradation de l'environnement (énergies éolienne et solaire), l'absence de dépendance aux conditions météorologiques (énergies hydraulique et géothermique) (Tableau 4.8 page 38).

Les énergies renouvelables possèdent, néanmoins, des inconvénients. En effet, leur coût est important et elles peuvent avoir un impact sur l'environnement. Pour finir, les énergies renouvelables font face à des problèmes de recyclage de leurs infrastructures (Tableau 4.9 page 39).

Chapitre 3

La part des énergies renouvelables dans la production d'énergie

3.1 Dans le monde

Le continent Africain est le plus friand d'énergies renouvelables. Sa consommation d'énergies renouvelables représente près de la moitié de sa consommation totale. Cela s'explique par une forte utilisation du bois comme énergie ainsi qu'une faible consommation énergétique. D'autres pays, comme la Russie ou le Moyen-Orient, privilégient les énergies fossiles au détriment des énergies renouvelables (Figure 4.3.13 page 40) [28]. En 2017, la Chine, l'Europe et les États-Unis ont effectué 75 % des investissements mondiaux dans les énergies renouvelables [33].

3.2 Dans l'Union Européenne

En 2007, l'Union Européenne s'est fixée l'objectif de porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation globale de l'Union Européenne. En 2017, elle n'en était qu'à 17.5 % [26, 20].

Chaque pays membre s'est fixé ses propres objectifs. Certains d'entre eux, comme le Danemark ou l'Estonie, les ont atteints dès 2017. La France, dont l'objectif est de porter à 23 % la part des énergies renouvelables dans sa consommation totale, n'en était qu'à 16.3 % en 2017. Elle fait partie, avec le Royaume-Uni, l'Irlande et les Pays-Bas, des pays les plus éloignés de leur objectif en 2017 (Figure 4.3.14 page 40) [20].

Toutefois, il est intéressant de remarquer que la France est le troisième pays membre de l'UE en matière de production primaire d'énergies renouvelables en 2017 avec un total d'environ 23 000 ktep (Mille tonnes d'équivalent pétrole [21]). Le Danemark se place à la 14^e place [28]. Ces chiffres soulèvent un paradoxe entre l'importance de la production primaire d'énergies renouvelables et l'atteinte des objectifs pour 2020. On peut sans doute l'expliquer par une différence de quantité d'énergie consommée par chaque pays. La population française est, en effet, 11 fois plus importante que celle du Danemark [22, 23]. Il est donc évident que leurs besoins énergétiques sont différents.

3.3 En France

Les énergies hydraulique, éolienne et photovoltaïque sont en constante hausse depuis 1990. En 2016, elles représentaient 3.2 % de la consommation française d'énergie primaire (totalité des produits énergétiques qui sont importés ou directement exploités). On constate cependant que les deux tiers de cette consommation sont obtenus à partir du nucléaire et du pétrole. Ces chiffres se confirment en 2017 avec 10.7 % de la consommation d'énergie primaire provenant de sources renouvelables (Figure 4.3.15 page 41).

La filière de l'éolien représente 8.2 % de la production française d'énergie primaire renouvelable en 2017. Cependant, la production des secteurs bois-énergie et hydraulique reste plus importante (Figure 4.3.16 page 41).

Suivant l'utilisation, certains types d'énergies renouvelables sont privilégiés. Le bois-énergie et les pompes à chaleur sont davantage utilisés pour la production de chaleur comme le chauffage. L'éolien et l'hydraulique, quant à eux, permettent principalement la production d'électricité [28].

Chapitre 4

Les différentes variétés d'éoliennes

4.1 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont l'avantage d'encaisser des vents très violents, dépassant les 220 km/h, et ont un fonctionnement indépendant de la direction du vent [88]. Elles sont plus robustes et moins bruyantes que les éoliennes à axe horizontal. On favorise donc leur utilisation dans les milieux urbains.

4.1.1 Les éoliennes de Darrieus

4.1.1.1 Description

Les éoliennes de type Darrieus sont constituées de deux ou trois pales courbes, disposées en triangle autour de l'axe vertical, à profil aérodynamique (Figure 4.3.17 page 42). Ce profil est destiné à transformer l'énergie de déplacement du vent en énergie motrice. Le flux d'air créé autour du profil se compose d'une poussée qui entraîne le rotor (portance) et d'une traînée qui constitue une force parasite, qui s'oppose au mouvement. Les pales sont placées selon différents angles et sont soumises à des vents de direction et d'intensité variables. La résultante de toutes les forces appliquées sur la pale génère alors un couple moteur entraînant la rotation des pales. Les différents angles auxquels sont soumis les profils (contours de la pale) proviennent de la combinaison de la vitesse propre du contour de la pale et de la vitesse du vent incident. En fonction de l'angle où ils se trouvent, certains profils généreront une traînée plus importante que la portance et ce sera l'inverse pour d'autres. La force de portance globale est supérieure à la force de traînée entraînant ainsi le rotor (Figure 4.3.18 page 42) [89].

4.1.1.2 Le problème de lancement

L'éolienne de Darrieus nécessite un mécanisme de lancement, car son bloc rotor pèse sur sa base. Ce lancement peut se faire par le biais de différents types de mécanismes, comme par exemple des moteurs électriques ou même d'autres éoliennes, notamment les éoliennes Savonius, dont le démarrage autonome est bien meilleur que celui des éoliennes Darrieus [90].

4.1.1.3 Rendement

Ces éoliennes ont un rendement très faible, qui varie entre 15 % et 35 % selon les modèles [91]. Cela est dû au fait que le poids du rotor pèse sur sa base (le stator) provoquant des forces de frottement. De plus, le générateur électrique est placé à même le sol, or pour être efficace, les pales d'une éolienne doivent être au moins à 40 m de hauteur. Leur faible hauteur peut, cependant, être considérée comme un avantage. En effet, il n'est pas nécessaire d'investir dans la construction d'un mât et l'entretien de l'éolienne est facilité. Néanmoins, ce faible rendement est compensé par le fait que ces éoliennes soient indépendantes de la direction du vent [88].

Il existe différents types de rotor Darrieus dont le principe de fonctionnement reste le même. Parmi eux, nous retrouvons le rotor Darrieus H. L'éolienne Darrieus H est constituée d'un rotor simple et de trois pales verticales disposées autour de ce dernier. Malheureusement d'un point de vue mécanique, le rotor Darrieus H est très mauvais

car ses pales ont tendance à se courber pour reprendre la forme « troposkine ». C'est pour cela que les rotors H sont, dans la plupart des cas, utilisés sur des petites machines (Figure 4.3.19 page 43) [92].

4.1.2 Les éoliennes Savonius

4.1.2.1 Description

Les éoliennes de type Savonius sont constituées de deux demi-cylindres positionnés autour d'un axe vertical de sorte à former un « S » en vue de dessus. Le vent va pénétrer dans les demi-cylindres ce qui va provoquer la rotation de l'axe et ainsi générer de l'électricité. Le principe de cette éolienne est basé sur un couple aérodynamique induit par l'écoulement du flux d'air dans la structure (Figure 4.3.20 page 43) [93].

4.1.2.2 Caractéristiques

Tout comme l'éolienne de Darrieus, cette éolienne se distingue par son faible niveau de bruit et sa compacité, qui la rendent très discrète et facilement intégrable en milieu urbain.

Sa prise au vent est optimisée et rendue continue grâce à son design, en forme hélicoïdale. Elle est d'autant plus facile à intégrer sur des bâtiments communs grâce à sa forme originale et agréable à regarder. Mise en valeur avec des couleurs vives et attractives, elle est parfois même utilisée à des fins publicitaires.

Contrairement à l'éolienne Darrieus, l'éolienne de type Savonius présente l'avantage de pouvoir démarrer facilement, sans avoir besoin d'un système de lancement, et d'entrer en rotation même pour de faibles vents [93].

4.1.2.3 Rendement

Le rendement de l'éolienne Savonius est cependant très faible. En effet, la présence de frottements causés par le poids du rotor sur la base limite son efficacité. De plus, la pale offrant sa face convexe face au vent n'est pas aussi efficace que celle présentant au même moment sa face concave au souffle du vent [93].

4.1.3 Comparaison des éoliennes à axe vertical

Nous pouvons donc en conclure que les éoliennes Darrieus présentent certains inconvénients mais également de nombreux avantages. D'une part, les éoliennes Darrieus nécessitent un mécanisme de lancement. D'autre part, leur rendement reste faible. Cependant, elles sont moins bruyantes que les autres éoliennes et peuvent encaisser des vents très violents.

De plus, l'éolienne Savonius présente de nombreuses similitudes avec l'éolienne Darrieus, mais les quelques différences dont elle est dotée apportent des avantages non négligeables. Bien souvent, ces deux types d'éoliennes sont utilisées de manière complémentaire, sous la forme d'un système hybride, pour disposer des avantages de chacune (Tableau 4.10 page 44).

4.2 Les éoliennes à axe horizontal

4.2.1 Caractéristiques des éoliennes à axe horizontal

4.2.1.1 Taille et vitesse de rotation

Les éoliennes à axe horizontal possèdent certaines caractéristiques. Leur taille varie entre 1 m pour les plus petites (usage individuel sur un bateau par exemple) à 160 m de haut pour les éoliennes de production. Les éoliennes d'autoconsommation mesurent entre 8 et 12 m. La taille est un facteur décisif pour les éoliennes car elle est proportionnelle à leur puissance [6].

Les pales mesurent généralement 50 à 65 % de la taille du mât. De plus, les pales ne doivent pas descendre à moins de 3 m du sol pour une question de sécurité [6]. La longueur des pales engendre une valeur maximale de la vitesse de rotation (due à la force centrifuge et à la vitesse en bout de pale). Les pales de l'éolienne tournent à des vitesses comprises, en moyenne, entre 100 et 650 tr/min. Or, les générateurs électriques ont besoin d'avoir une vitesse de rotation comprise entre 1500 et 3000 tr/min. La présence d'un multiplicateur de vitesse entre l'hélice et le générateur électrique est donc fondamentale [59].

Les éoliennes à axe horizontal forcent le flux d'air à passer autour des pales afin de les entrainer et non à travers l'éolienne. Pour obtenir ce résultat, les éoliennes sont munies de grandes pales. Elles sont donc fragiles et nécessitent une rotation relativement lente pour préserver leur structure [49].

4.2.1.2 Puissance produite

La puissance produite par les éoliennes à axe horizontal varie de façon non négligeable suivant la taille des installations.

Ainsi, les éoliennes domestiques produisent entre 15 et 20 kW (voir 60 kW pour les éoliennes semi-commerciales). Grâce à leur très bonne performance, elles permettent l'autonomie totale de certaines exploitations agricoles.

Les éoliennes industrielles produisent de 100 kW à 4 ou 5 MW pour les plus récentes. Cela permet d'alimenter 1500 foyers en électricité (hors chauffage) [58].

4.2.2 Comparaison des coefficients de puissance en fonction du type d'éoliennes

Pour comparer les différents types d'éoliennes, on s'intéresse à l'évolution du coefficient de puissance qui représente le rendement en fonction de la vitesse du vent et ceci pour différents types d'éoliennes (Figure 4.3.21 page 45).

On remarque tout d'abord que le rendement des éoliennes ne peut dépasser 59.6 %, il s'agit de la limite de Betz. Cette limite n'est d'ailleurs pas atteignable dans la réalité car les éoliennes dévient une partie du vent avant même qu'il soit balayé par le rotor. La figure 4.3.21 (page 45) nous montre clairement que les éoliennes à axe vertical ont un bien moins bon rendement que les éoliennes à axe horizontal. On remarque que les éoliennes tripales possèdent un meilleur rendement que les éoliennes bipales et monopales (supérieur à 3 %), et ce, pour des vitesses de vent inférieures. Cependant, les éoliennes bipales peuvent avoir une plage de fonctionnement plus large qu'une tripale tout en gardant un rendement satisfaisant. Les deux types d'éoliennes les plus intéressants pour un usage à grande échelle sont donc les modèles bipale et tripale [1].

4.2.3 Influence du nombre de pales

Plus le nombre de pales est grand et plus le couple transmis à l'arbre moteur est important. Cela signifie que l'éolienne pourra commencer à tourner pour des vents de plus faible vitesse. Cependant, l'augmentation du nombre de pales entraîne une prise au vent plus importante. Les éoliennes doivent alors s'arrêter lorsque le vent devient trop fort. De plus, un grand nombre de pales peut augmenter le coût de fabrication de l'éolienne. Pour finir, chaque pale engendre des turbulences pour les autres pales ce qui peut ralentir la vitesse de rotation de l'éolienne [4].

4.2.4 Les éoliennes dites « amont » et « aval »

Il existe deux types d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes « aval » et les éoliennes « amont ».

Chez les éoliennes « amont », le vent souffle sur la face avant des pales de l'éolienne ce qui entraîne leur rotation. Cela nécessite une plus grande résistance des pales c'est pourquoi ce type d'éolienne a un usage industriel. La puissance de ces éoliennes peut dépasser 1000 kW.

Chez les éoliennes « aval », le vent souffle sur l'arrière des pales. Les pales n'ont donc pas besoin d'être aussi solides que celles des éoliennes « amont ». Leur usage est alors domestique [57].

4.2.5 Différents modèles d'éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à pales contrarotatives possèdent deux pales coaxiales entraînées par un ou deux moteurs chacune tournant dans un sens différent. Pour un diamètre donné, elles produisent plus de puissance qu'une éolienne standard. En effet, une partie de l'énergie de rotation perdue par la première pale est récupérée par la deuxième. Cependant, ce modèle est très peu utilisé car la complexité de la transmission (arbres et boîtes de transmission) rend l'ensemble très fragile [53, 54, 52].

Il est également intéressant de citer le projet de l'entreprise nommée Ogin (anciennement FloDesign). Grâce à sa structure particulière (Figure 4.3.22 page 45), l'éolienne FloDesign serait capable d'extraire 3 à 4 fois plus d'énergie que les éoliennes standards. L'air arrive d'abord sur une série de lames fixes appelées stator. Il est ensuite distribué

sur l'ensemble des lames mobiles appelées rotor (orientées de 15 à 20 degrés par rapport à la direction du vent). De plus, le coffrage, comportant les ailes, ramène le vent rapide balayé par le rotor vers le centre du capot tandis que l'air sortant des turbines tend à dévier vers l'extérieur. Lorsque les flux d'air se rencontrent avec des angles d'incidence différents, ils créent un vortex. L'éolienne FloDesign utilise ce phénomène très énergétique.

Ces éoliennes possèdent de nombreux avantages. En effet, la présence d'un aileron leurs permet de s'aligner automatiquement dans le sens du vent. De plus, leur transport est facile car elles peuvent être désassemblées et mises sur un seul camion (contrairement aux éoliennes standards). Leur plage de fonctionnement en fonction de la vitesse du vent est également plus étendue. Enfin, elles nécessitent moins d'espace au sol que les éoliennes standards. Cela permet de les rendre plus rentables au km². Néanmoins, après approfondissement, nous nous sommes rendus compte que les différents essais effectués par l'entreprise n'étaient pas concluants et que certains points avaient été quelque peu exagérés. Toutefois, le projet reste intéressant à développer [46, 47].

4.2.6 Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes à axe horizontal

Comme nous l'avons vu précédemment, pour obtenir un rendement similaire à une éolienne tripale, les éoliennes bipales doivent avoir une vitesse spécifique plus grande. Cela engendre le fait que la vitesse périphérique (correspondant à ΩR) est plus importante. Cela peut alors créer des problèmes aéroélastiques et acoustiques. De plus, l'effort exercé sur chaque portion de la pale est plus important. Il est alors nécessaire de consolider la structure de la pale (en particulier au niveau du pied de la pale pour des moyeux à pales encastrées). Pour finir, la présence du mât entraîne des perturbations dans l'écoulement de l'air ce qui sollicite le moyeu (il a donc besoin d'être plus résistant) [1].

De plus, les éoliennes bipales s'usent plus rapidement car la différence de force s'exerçant sur la pale du haut et celle du bas entraîne une torsion sur l'axe du rotor [1].

Les éoliennes bipales sont principalement utilisées pour des tailles de puissances réduites ou pour une implantation dans des milieux spécifiques. En effet, elles sont très adaptées à des milieux cycloniques. Leur entretien est facile et leur légèreté permet notamment de pouvoir les rabattre au sol en cas d'alertes cycloniques [4].

Les pales des éoliennes bipales sont vrillées et effilées afin d'offrir des meilleurs rendements aérodynamiques [3].

La configuration tripale a été majoritairement retenue. En effet, elle permet d'avoir un bon rendement et cela pour des vitesses de vent relativement faibles. Il est important de rappeler que la majorité des éoliennes commercialisées en 2015 sont des machines tripales. Il s'agit, en effet, des éoliennes que nous retrouvons le plus communément dans nos paysages [2].

4.3 Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical

Les éoliennes à axe horizontal possèdent, néanmoins, des inconvénients. En effet, la force inertielle variable s'appliquant sur les pales impose à la structure de supporter une charge alternative ce qui augmente la fatigue des pales. La maintenance et la réparation des infrastructures sont généralement difficiles. Les éoliennes à axe vertical, quant à elles, font face à des forces s'appliquant de manière constante sur leurs pales. Cela leur permet d'avoir une plus grande longévité. Ces éoliennes sont en général de plus petite taille ce qui facilite leur maintenance. Les éoliennes à axe vertical, si elles sont bien configurées, peuvent démarrer pour une vitesse de vent de 2 m/s alors que les éoliennes à axe horizontal nécessitent une vitesse de vent de 4 m/s. Les éoliennes à axe horizontal ne sont pas adaptées à un usage domestique du fait de leurs nuisances sonores. De plus, ces éoliennes engendrent fréquemment la mort d'oiseaux. Les éoliennes à axe horizontal possèdent toutefois un meilleur rendement et une meilleure puissance produite que les éoliennes à axe vertical (Tableau 4.11 page 46) [51].

Conclusion

Pour introduire l'objet de nos recherches, nous nous étions demandés si l'essence de la transition énergétique était réellement dans le mot « remplacer ».

Après avoir mené de nombreuses recherches sur les différentes énergies renouvelables, nous avons pu constater que chacune avait des avantages conséquents (capacité de stockage, rentabilité, potentiel inépuisable. . .) mais aussi des freins importants à son développement (coût d'installation ou de maintenance, prix au MWh, destruction d'habitats naturels. . .).

Plus précisément dans le cas de l'éolien, nous avons pu constater que la variété des modèles pouvait permettre de produire de l'électricité dans des environnements très variés.

Nous avons aussi constaté que de nombreuses voies d'améliorations technologiques, au niveau de la production énergétique, pourraient voir le jour dans les prochaines années (comme l'éolienne FloDesign). Des exploitations plus respectueuses sont aussi envisageables pour palier les problèmes environnementaux. Le potentiel de ces énergies est donc considérable mais très coûteux.

En comparant les énergies renouvelables avec les énergies fossiles, on se rend compte que ces dernières restent tout de même, à l'heure actuelle, plus productives et financièrement plus attractives.

La solution serait donc, peut être, de ne pas remplacer les énergies fossiles par les énergies renouvelables mais plutôt d'envisager un mix énergétique suffisamment efficace pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en étant respectueux de l'environnement et de nos paysages.

Nous terminerons par illustrer cette idée de mix énergétique par la mise en lumière d'un nouveau type de centrale à cycle combiné au gaz naturel nouvelle génération. Elle vient s'ajouter, d'une manière plus respectueuse de l'environnement, à l'hydraulique et au nucléaire pour la production électrique française [75].

Pour finir, ce projet nous a permis de mieux comprendre comment réaliser correctement un travail bibliographique ce qui nous sera utile dans notre travail d'ingénieur. En effet, avant tout projet d'ingénieur il est important de mener des recherches sur les potentielles pistes de solution ou sur le fonctionnement des installations étudiées. Cette compétence nous sera également utile pour nos prochains projets au cours de nos études.

Notre projet pourrait servir de base à des recherches plus poussées sur les éoliennes ou les énergies durables. Ainsi, il pourrait être étoffé et complété ou bien servir de point de départ à des projets plus techniques à propos des éoliennes.

Bibliographie

- [1] Marc RAPIN et Philippe LECONTE. 10/01/2017. *Éoliennes - Évolution, principes de base et potentiel de conversion*. [Article scientifique] Techniques de l'ingénieur. Réf : BM4640V3 (consulté le 10/03/2020)
- [2] Denis LEFEBVRE et Jean-Marc NOEL. 10/01/2017. *Centrales éoliennes couplées aux réseaux*. [Article scientifique] Techniques de l'ingénieur. Réf : BE8585V2 (consulté le 10/03/2020)
- [3] Jean-Marc NOEL. 10/01/2009. *Énergie éolienne pour la fourniture d'électricité*. [Article scientifique] Techniques de l'ingénieur. Réf : BE8585V1 (consulté le 10/03/2020)
- [4] Le journal de l'éolien. *Les principales technologies éoliennes*. [En ligne]. <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/les-principales-technologies-eoliennes/> (consulté le 11/03/2020)
- [5] Actu industrie. 02/09/2015. *Éoliennes : de l'énergie cinétique à l'énergie mécanique*. [En ligne] <https://www.actu-industrie.fr/mecanique/eoliennes-de-lenergie-cinetique-a-lenergie-mecanique/> (consulté le 09/03/2020)
- [6] Ooreka. *Hauteur d'une éolienne*. [En ligne]. <https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/376182/hauteur-d-une-eolienne> (consulté le 11/03/2020)
- [7] INSEE - Institut National de la statistique et des études économiques. 13/10/2016. *Énergies renouvelables*. [En ligne]. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1898> (consulté le 09/02/2020)
- [8] Wikipédia. 23/03/2020. *Énergie éolienne*. [En ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne (consulté le 09/02/2020)
- [9] Ecoinfos. 09/01/2020. *Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne*. [En ligne] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/avantages-inconvenients-eolienne/> (consulté le 10/02/2020)
- [10] Total direct energie. Adeline M. 20/10/2017. *Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne*. [En ligne]. <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne> (consulté le 08/02/2020)
- [11] France énergie éolienne. *Principes et fonctionnement*. [En ligne] <https://fee.asso.fr/comprendre-leolien/principes-et-fonctionnement/> (consulté le 12/02/2020)
- [12] Syndicat des énergies renouvelables. *Éolienne terrestre*. [En ligne] <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/les-energies-renouvelables/eolien/eolien-terrestre/> (consulté le 11/02/2020)
- [13] France énergie éolienne. *L'éolien terrestre en chiffres*. [En ligne] <https://fee.asso.fr/eolien-terrestre/> (consulté le 11/02/2020)
- [14] France énergie éolienne. *L'éolien en mer en chiffres*. [En ligne] <https://fee.asso.fr/eolien-en-mer/> (consulté le 11/02/2020)
- [15] France énergie éolienne. *Enjeux et perspectives*. [En ligne] <https://fee.asso.fr/eolien-en-mer/enjeux-et-perspectives/> (consulté le 11/02/2020)
- [16] Syndicat des énergies renouvelables. *Éolien en mer*. [En ligne] <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/les-energies-renouvelables/eolien/eolien-en-mer/> (consulté le 11/02/2020)

- [17] EDF. *Le fonctionnement d'une éolienne*. [En ligne] <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> (consulté le 08/02/2020)
- [18] EDF. *Éolien terrestre ou en mer*. [En ligne] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-d-eoliennes> (consulté le 08/02/2020)
- [19] Quelle énergie. *Caractéristiques d'une éolienne domestique*. [En ligne] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/technique> (consulté le 09/02/2020)
- [20] Toute l'Europe. 12/06/2019. *Les énergies renouvelables dans l'UE*. [En ligne]. <https://www.touteleurope.eu/actualite/les-energies-renouvelables-dans-l-ue.html> (consulté le 09/02/2020)
- [21] Wiktionnaire. 19/04/2016. *ktep*. [En ligne] <https://fr.wiktionary.org/wiki/ktep> (consulté le 09/02/2020).
- [22] PopulationData.net. 14/01/2020. *France*. [En ligne] <https://www.populationdata.net/pays/france/> (consulté le 09/02/2020)
- [23] PopulationData.net. 30/07/2019. *Danemark*. [En ligne] <https://www.populationdata.net/pays/danemark/> (consulté le 09/02/2020)
- [24] Syndicat des énergies renouvelables. *En 2018, la production électrique renouvelable a couvert 22,7% de la consommation française*. [En ligne] <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/actualites/en-2018-la-production-electrique-renouvelable-a-couvert-227-de-la-consommation-francaise/> (consulté le 12/02/2020)
- [25] RTE, Syndicat des énergies renouvelables, ENEDIS, ADEEF, Agence ORE. Février 2019. *Panorama de l'électricité renouvelable en 2018*. [En ligne] https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2020/01/PanoramaT4_2018_BDOK.pdf (consulté le 10/02/2020)
- [26] Commission européenne. *Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020*. [En ligne] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr (consulté le 08/02/2020)
- [27] Syndicat énergies renouvelables. 06/02/2020. *Communiqué de presse*. [En ligne] <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/presse/cp-panorama-enr-annuel-2019.pdf> (consulté le 09/02/2020)
- [28] Commissariat général au développement durable. Mai 2019. *Chiffres clés des énergies renouvelables*. [Rapport] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-53-chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2019-mai2019.pdf> (consulté le 10/02/2020)
- [29] INSEE - Institut National de la statistique et des études économiques. 27/02/2018. *Bilan énergétique*. [En ligne]. <https://insee.fr/fr/statistiques/3303620?sommaire=3353488#tableau-T18F191G2> (consulté le 08/02/2020)
- [30] Gouvernement français. Novembre 2019. *Tableau de bord : éolien*. [Rapport] https://www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/112505/1/SDES_stat_239_2019.pdf (consulté le 08/02/2020)
- [31] France énergie éolienne. *Cartes de l'éolien*. [En ligne] <https://fee.asso.fr/ressources/cartes-de-leolien/> (consulté le 09/02/2020)
- [32] Toute l'Europe. 13/06/2019. *L'énergie éolienne en Europe*. [En ligne] <https://www.touteleurope.eu/actualite/l-energie-eolienne-en-europe.html> (consulté le 12/02/2020)
- [33] France énergie éolienne. *L'éolien en Europe et dans le monde*. [En ligne] <https://fee.asso.fr/comprendre-leolien/leolien-en-europe-et-dans-le-monde/> (consulté le 12/02/2020)
- [34] Techniques de l'ingénieur. Matthieu Combe. 15/04/2019. *L'énergie éolienne en Europe : où en est-on en 2019 ?* [En ligne] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lenergie-eolienne-en-europe-ou-en-est-on-en-2019-65104/> (consulté le 12/02/2020)
- [35] Connaissances des énergies. *Parc éolien français*. [En ligne]. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/parc-eolien-francais> (consulté le 24/03/2020)
- [36] sciences-en-ligne. *Éoliennes offshore*. [En ligne] <http://sciences-en-ligne.net/assets/medias/news/eolienne160112.png> (consulté le 08/02/2020)

- [37] <https://i.ytimg.com/vi/xqHipyQccKU/maxresdefault.jpg> (consulté le 24/03/2020)
- [38] Jean-Christian Lhomme. (2004). *Les énergies renouvelables* (2e éd). Paris : Systèmes solaires. (consulté le 10/02/2020)
- [39] Wikipédia. 12/03/2020. *Géothermie*. [En ligne]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie> (consulté le 24/03/2020)
- [40] Ville de Chevilly-Larue. 19/07/2017. *La Géothermie, comment ça marche ?* [En ligne]. https://www.youtube.com/watch?v=_p8wMK913y0 (consulté le 10/02/2020)
- [41] ASP - Assistance Scolaire Personnalisée. 2020. *Géothermie et propriétés thermiques de la Terre*. [En ligne]. https://www.assistancescolaire.com/eleve/TS/svt/reviser-le-cours/geothermie-et-proprietes-thermiques-de-la-terre-t_svt_10 (consulté le 25/03/2020)
- [42] Lucazeau et Vasseur. 1989. [En ligne] <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g03/etude-de-la-zone-souterraine> (consulté le 25/03/2020)
- [43] Champoux et Toutant. 1988. [En ligne] https://www.assistancescolaire.com/eleve/TS/svt/reviser-le-cours/geothermie-et-proprietes-thermiques-de-la-terre-t_svt_10 (consulté le 25/03/2020)
- [44] Futura Planète. *Les différents types d'éoliennes*. [En ligne]. <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-sont-types-eoliennes-1226/> (consulté le 06/03/2020)
- [45] Eolienne pour Particulier. 2017. *Eolienne horizontale pour particulier*. [En ligne]. <https://www.eolienne-particulier.info/eolienne-horizontale/#:~:text=Eolienne%20Horizontale%20pour%20Particulier,de%20loin%20les%20plus%20r%C3%A9pandues>. (consulté le 06/03/2020)
- [46] Brigitte Bornemann. 03/12/2020. *FloDesign : ces turbines qui tripleraient les capacités éoliennes*. [En ligne]. <https://energiesdelamer.eu/publications/1469-65flodesign-ces-turbines-qui-tripleraient-les-capacites-eoliennes> (consulté le 08/03/2020)
- [47] pafurijaz. 03/05/2009. *Nuovi impianti eolici FloDesign Wind Turbine*. [En ligne]. <https://www.youtube.com/watch?v=8AMvwXaQ2y0&t=207s>. (consulté le 08/03/2020)
- [48] Danish Wind Industry Association. 07/05/2003. *La loi de Betz*. [En ligne]. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/betz.htm> (consulté le 04/03/2020)
- [49] Danish Wind Industry Association. 07/05/2003. *Les éoliennes détournent le vent*. [En ligne]. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/tube.htm> (consulté le 08/03/2020)
- [50] Enerlice. 11/01/2016. *Énergie éolienne*. [En ligne]. <https://enerlice.fr/2016/01/11/energie-eolienne/>. (consulté le 06/03/2020)
- [51] Enerlice. 15/05/2016. *Éolienne Horizontale contre Éolienne Verticale*. [En ligne]. <https://enerlice.fr/2017/05/15/eolienne-horizontale-contre-eolienne-verticale/>. (consulté le 06/03/2020)
- [52] Wikipédia. 13/02/2020. *Hélice contrarotative*. [En ligne]. https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9lice_contrarotative. (consulté le 04/03/2020)
- [53] Environnement-magazine.fr. 01/05/2010. *Une double hélice pour une éolienne plus efficace*. [En ligne]. <https://www.environnement-magazine.fr/energie/article/2010/05/01/6486/une-double-helice-pour-une-eolienne-plus-efficace>. (consulté le 04/03/2020)
- [54] MecaFlux Heliciel. 2019. *Hélice Contrarotative*. [En ligne]. <https://heliciel.com/helice/helice%20contrarotative.htm> (consulté le 04/03/2020)
- [55] COE - Connaissance des Energies. 22/09/2014. *Pourquoi la plupart des éoliennes ont elles trois pales*. [En ligne]. <https://www.connaissancedesenergies.org/pourquoi-la-plupart-des-eoliennes-ont-elles-trois-pales-140919> (consulté le 06/03/2020)
- [56] Énergies renouvelables. Mai 2004. *L'énergie éolienne*. [En ligne]. http://enrj.renouvelables.free.fr/energie_eolienne.html. (consulté le 23/03/2020)
- [57] info éolien. *Axe horizontal*. [En ligne]. <http://www.info-eolien.com/eoliennes-horizontal.html>. (consulté le 25/03/2020)

- [58] info éolien. *Éoliennes industrielles*. [En ligne]. <http://www.info-eolien.com/eoliennes-industrielles.html>. (consulté le 25/03/2020)
- [59] MTaTerre. 2016. *Le fonctionnement de l'énergie éolienne*. [En ligne]. <https://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-eolienne/le-fonctionnement-de-lenergie-eolienne>. (consulté le 25/03/2020)
- [60] Planete Energies. 22/09/2014. *L'énergie marémotrice*. [En ligne] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/1-energie-maremotrice> (consulté le 28/03/2020)
- [61] Connaissance des énergies. 26/09/2012. *Énergie houlomotrice*. [En ligne] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-houlomotrice-ou-energie-des-vagues> (consulté le 28/03/2020)
- [62] Futura sciences. *Quel est le potentiel des énergies marines ?* [En ligne] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-potentiel-energetique-energies-marines-962/> (consulté le 28/03/2020)
- [63] Connaissance des énergies. 26/12/2012. *Hydroliennes*. [En ligne] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroliennes> (consulté le 28/03/2020)
- [64] Notre planète. 13/04/2016. *L'énergie hydrolienne : l'avenir des énergies*. [En ligne] <https://www.notre-planete.info/actualites/4458-hydrolienne-avenir-energie-renouvelable> (consulté le 28/03/2020)
- [65] Connaissances des énergies. 22/09/2014. *L'énergie marémotrice*. [En ligne] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice> (consulté le 28/03/2020)
- [66] Houda ZOUGGARI, Khaled AIT ALI. 20/01/2017. *Énergie renouvelables marines*. [Rapport] <https://docplayer.fr/57895033-Energies-renouvelables-marines-hydrolienne-eolienne.html> (consulté le 29/03/2020)
- [67] Pierre Lavy. *Mini Centrales hydroélectriques*. Paris. Eyrolles. 2011 (consulté le 29/03/2020)
- [68] Adeline M. 22/11/2018. *Énergie Hydraulique : Avantages et Inconvénients*. [En ligne]. <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/energie-hydraulique-avantages-et-inconvenients>. (consulté le 14/02/2020)
- [69] Adeline M. 08/11/17. *Tout savoir sur l'énergie hydraulique*. [En ligne]. <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/tout-savoir-sur-l-energie-hydraulique>. (consulté le 13/02/2020)
- [70] ecosources.info. 09/05/2014. *Les STEP : stockage d'énergie par pompage-turbinage*. [En ligne]. https://www.ecosources.info/dossiers/Station_stockage_transfert_pompage_turbinage. (consulté le 13/02/2020)
- [71] picbleu. 27/02/2020. *Production d'électricité hydraulique : centrales hydroélectriques*. [En ligne]. <https://www.picbleu.fr/page/production-d-electricite-hydraulique-centrales-hydroelectriques>. (consulté le 28/02/2020)
- [72] planète-energies. 07/01/2015. *L'énergie hydraulique en domaine terrestre : les freins à son développement*. [En ligne]. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/1-energie-hydraulique-en-domaine-terrestre-les-difficultes-de-son-developpement>. (consulté le 15/02/2020)
- [73] EDF. *Mobilisable à la demande*. [En ligne]. <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/hydraulique/atouts/mobilisable-a-la-demande>. (consulté le 16/02/2020)
- [74] connaissancesdesenergies. 24/09/2013. *Cout de production de l'électricité en France*. [En ligne]. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/couts-de-production-de-l-electricite-en-france>. (consulté le 26/02/2020)
- [75] Youtube. EDF. 29/09/2015. *Bouchain, centrale à cycle combiné gaz nouvelle génération*. [En ligne] https://www.youtube.com/watch?time_continue=65&v=d0jZvdpsw5g&feature=emb_title (consulté le 29/03/2020)
- [76] Parc éolien en mer de Saint-Nazaire. *Présentation du projet*. [En ligne]. <http://parc-eolien-en-mer-de-saint-nazaire.fr/le-parc-eolien-en-mer/presentation-projet/> (consulté le 30/03/2020)

- [77] Wikipédia. 26/01/2020. *Bathymétrie*. [En ligne]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bathymétrie> (consulté le 31/03/2020)
- [78] *Centrale au fil de l'eau*. [En ligne] <https://i.pining.com/originals/d3/61/bf/d361bf511ad6a89a899c6c9127a08b2b.jpg> (consulté le 31/03/2020)
- [79] EDF. *Centrale hydroélectrique de « haute chute »* [En ligne] (consulté le 31/03/2020)
- [80] EDF. *Performance et innovation*. [En ligne]. <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/hydraulique/enjeux/performance-et-innovation>. (consulté le 02/05/2020)
- [81] Bureau Veritas. 04/19. *Avec l'hydroélectricité, la France peut dépasser 30% d'énergie renouvelable*. [En ligne]. <https://lemag.bureauveritas.fr/hydroelectricite-energie-renouvelable/>. (consulté le 02/05/2020)
- [82] Enerlip. *Energie Hydraulique et investissements*. [En ligne]. <https://enerfip.fr/enerfip-vous-eclaire/investissement/hydroelectrique/>. (consulté le 02/05/2020)
- [83] Jean-Pierre Cornou. Novembre 2018. *L'avenir de l'hydroélectricité*. [En ligne]. http://www.fondapol.org/wp-content/uploads/2018/11/138-HYDROELECTRICITE_2018-11-16_w.pdf (consulté le 04/05/2020)
- [84] EEL Energy. 2015. *L'hydrolienne EEL, la conversion d'énergie par membrane ondulante*. [En ligne]. <https://www.eel-energy.fr/fr/conversion-energie-par-membrane-ondulante/> (consulté le 04/05/2020)
- [85] EEL Energy. 2015. *Une ressource immense et renouvelable à l'échelle du globe*. [En ligne]. <https://www.eel-energy.fr/fr/> (consulté le 04/05/2020)
- [86] *Systèmes d'énergie solaire actifs et passifs* [En ligne] https://energie.techno-science.ca/img/ehibitions/44-1_Active_and_Passive_Solar.jpg (consulté le 31/03/2020)
- [87] *Centrale solaire thermodynamique* [En ligne] <https://i.pining.com/originals/1b/ea/a9/1beaa9fc1548346f9b11bc4895bcf770.png> (consulté le 31/03/2020)
- [88] Enerlice. 2018. *Tout savoir sur l'éolienne Darrieus*. [En ligne]. <https://enerlice.fr/2017/04/06/savoir-leolienne-darrieus/> (consulté le 15/03/2020)
- [89] Megherbi Rachida, Aichouni Ibtissem. 2019. *Modélisation numérique de l'écoulement autour d'un rotor d'une éolienne à axe verticale*. [En ligne]. <http://dSPACE.univ-km.dz/jspui/bitstream/123456789/2945/1/memoire%20corrigé.pdf> (consulté le 14/03/2020)
- [90] Romain Guillo. 19/05/2014. *Éolienne à axe vertical de type Darrieus*. [En ligne]. https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus (consulté le 15/03/2020)
- [91] Eolie. *L'éolien à axe vertical*. [En ligne]. <https://web.eolie-energie.fr/presentation/eolienne-a-axe-vertical/> (consulté le 31/03/2020)
- [92] Salient White Elephant. 29/03/2009. *Eye of the cat*. [En ligne]. <https://salientwhiteelephant.wordpress.com/2009/03/29/eye-of-the-cat/> (consulté le 14/03/2020)
- [93] Enerlice. 2018. *Tout savoir sur l'éolienne Savonius*. [En ligne]. <https://enerlice.fr/2017/06/24/savoir-leolienne-savonius/> (consulté le 01/04/2020)
- [94] Andrew Turgeon et Elizabeth Morse. 19/11/2012. *Biomass energy*. [En ligne] <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/biomass-energy/> (consulté le 12/02/2020)
- [95] Florence Rousselle. 30/12/2019. *Définition biomasse*. [En ligne] https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse.php4 (consulté le 20/02/2020)
- [96] Groupe EDF. *Qu'est-ce que la biomasse ?*. [En ligne] <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> (consulté le 20/02/2020)
- [97] Clarke Energy. *Cogénération de biogaz / production combinée de chaleur d'électricité*. [En ligne] <https://www.clarke-energy.com/fr/biogaz/> (consulté le 26/03/2020)
- [98] Dalkia Groupe EDF. 2018. *La cogénération* [En ligne] <https://www.dalkia.fr/fr/besoins/energies-locales-et-renouvelables/cogeneration> (consulté le 01/04/2020)
- [99] Ministère de la Transition écologique et solidaire. 2020. *Biocarburants* [En ligne] <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants> (consulté le 01/04/2020)
- [100] Plates Bandes Communication. *Les explorateurs d'énergie La biomasse*. [En ligne] <http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/biomasse> (consulté le 01/03/2020)

- [101] Groupe EDF. 2020. *Le fonctionnement d'une centrale biomasse* [En ligne] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/1-energie-de-a-a-z/tout-sur-1-energie/produire-de-1-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-biomasse> (consulté le 01/03/2020)
- [102] Renewable Resources Co. 2016. *The Advantages and Disadvantages of Biomass Energy* [En ligne] <https://www.renewableresourcescoalition.org/biomass-energy-advantages-disadvantages/> (consulté le 15/03/2020)
- [103] Adeline M. 2018. Groupe Total Direct Énergies. *Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse*. [En ligne] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-avantages-et-les-inconvenients-de-l-energie-biomasse> (consulté le 15/03/2020)
- [104] Hofstad. Knut. 23/08/2019. *Solenergi i Store norske leksikon*. [En ligne] <https://snl.no/solenergi> (consulté le 06/02/2020)
- [105] Hofstad. Knut. 11/04/2019. *fornybare energikilder*. [En ligne] https://snl.no/fornybare_energikilder (consulté le 05/02/2020)
- [106] Rosvold. Knut A. 15/04/2019. *Solkraftverk*. [En ligne] <https://snl.no/solkraftverk> (consulté le 06/02/2020)
- [107] Wikipedia. 29/11/2019. *Solcelle*. [En ligne] <https://no.wikipedia.org/wiki/Solcelle> (consulté le 06/02/2020)
- [108] Wikipedia. 4/03/2020. *Cellule photovoltaïque*. [En ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovoltaïque (consulté le 08/03/2020)
- [109] Wikipedia. 24/02/2020. *Énergie solaire*. [En ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_solaire (consulté le 08/03/2020)
- [110] Ecosources. 19/05/2014. *Éolienne verticale Darrieus*. [En ligne] https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus (consulté le 22/03/2020)
- [111] Ecosources. 19/05/2014. *Éolienne à axe vertical de type Darrieus*. [En ligne] https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus (consulté le 05/04/2020)
- [112] Bricolsec. 11/07/2008. *Éoliennes d'essais Savonius... énergie, taupes et éclairage!*. [En ligne] <http://bricolsec.canalblog.com/archives/2008/07/11/9834639.html> (consulté le 05/04/2020)
- [113] Unblogsurlaterre. 09/05/2012. *Avantages et inconvénients de l'énergie solaire*. [En ligne] <http://unblogsurlaterre.com/actualitesenvironnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenients-energiesolaire-011/> (consulté le 02/04/2020)
- [114] Syndicat des énergies renouvelables. Juin 2019. *Énergies marines et renouvelables : ancrer des énergies compétitives et innovantes dans le mix énergétique français*. [En ligne] https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/ser-assisesemr2019-propositions-pap_md.pdf (consulté le 28/04/2020)
- [115] Ministère de la Transition écologique et solidaire. *Stratégie française pour l'énergie et le climat*. [En ligne] <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Synthèse%20finale%20Projet%20de%20PPE.pdf> (consulté le 28/04/2020)
- [116] 20 minutes. 22/02/13. *L'avenir formidable de l'énergie éolienne*. [En ligne] <https://www.20minutes.fr/high-tech/1106577-20130222-lavenir-formidable-lenergie-eolienne> (consulté le 29/04/2020)
- [117] Green Peace et Global Wind Energy Council (GWEC). 2012. *Global wind energy outlook*. [En ligne] https://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/GWEO_2012_lowRes.pdf (consulté le 29/04/2020)
- [118] International Energy Agency. 18/11/2019. *Installed offshore wind capacity, 2018 and 2040, Stated Policies Scenario*. [En ligne] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-offshore-wind-capacity-2018-and-2040-stated-policies-scenario> (consulté le 29/04/2020)
- [119] International Energy Agency. 21/11/2019. *Electricity generation by fuel and scenario, 2018-2040*. [En ligne] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-generation-by-fuel-and-scenario-2018-2040> (consulté le 29/04/2020)

- [120] Image de couverture https://ensia.com/wp-content/uploads/2017/01/voices_energy_numbers_main.jpg (consulté le 29/05/2020)
- [121] EDF. *Performance et innovation*. [En ligne]. <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/hydraulique/enjeux/performance-et-innovation>. (consulté le 02/05/2020)
- [122] Bureau Veritas. 04/19. *Avec l'hydroélectricité, la France peut dépasser 30% d'énergie renouvelable*. [En ligne]. <https://lemag.bureauveritas.fr/hydroelectricite-energie-renouvelable/>. (consulté le 02/05/2020)
- [123] Enerlip. *Energie Hydraulique et investissements*. [En ligne]. <https://enerfip.fr/enerfip-vous-eclaire/investissement/hydroelectrique/>. (consulté le 02/05/2020)
- [124] Jean-Pierre Cornou. Novembre 2018. *L'avenir de l'hydroélectricité*. [En ligne]. http://www.fondapol.org/wp-content/uploads/2018/11/138-HYDROELECTRICITE_2018-11-16_w.pdf (consulté le 04/05/2020)
- [125] EEL Energy. 2015. *L'hydrolienne EEL, la conversion d'énergie par membrane ondulante*. [En ligne]. <https://www.eel-energy.fr/fr/conversion-energie-par-membrane-ondulante/> (consulté le 04/05/2020)
- [126] EEL Energy. 2015. *Une ressource immense et renouvelable à l'échelle du globe*. [En ligne]. <https://www.eel-energy.fr/fr/> (consulté le 04/05/2020).
- [127] Le monde de l'énergie. 25/03/2016. *La Chine tire la croissance de l'hydroélectricité*. [En ligne]. <https://www.lemondedelenergie.com/la-chine-tire-la-croissance-mondiale-de-lhydroelectricite/2016/03/25/> (consulté le 08/05/2020).
- [128] EDF – Electricité de France. (2016). *La géothermie en chiffres*. [En ligne]. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-geothermie-en-chiffres> (consulté le 05/05/2020)
- [129] TPE – Travaux Pratiques Encadrés, Terminale SI. (2011). *Les énergies de demain*. [En ligne]. <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/pages/geothermie/les-contraintes.html> (consulté le 05/05/2020)
- [130] Planète Energies. *Géothermie : des techniques nouvelles*. [En ligne]. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/geothermie-des-techniques-nouvelles> (consulté le 05/05/2020)
- [131] Futura-Sciences. *La géothermie en France : quel développement ?* [En ligne]. <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/batiment-quest-ce-geothermie-577/page/10/> (consulté le 05/05/2020)
- [132] Énergies de la mer. *Le futur des énergies renouvelable sur la façade atlantique européenne*. [En ligne] <https://www.energiesdelamer.eu/publications/959-551e-futur-des-energies-marines-renouvelables-sur-la-facade-atlantique-europeenne> (Consulté le 10/05/2020)
- [133] The conversation. 08/02/2018. *L'immense potentiel des énergies marines renouvelables*. [En ligne] <https://theconversation.com/limmense-potentiel-des-energies-marines-renouvelables-90714> (Consulté le 10/05/2020)
- [134] La mer notre avenir. *Les projets d'énergies marines tardent à se réaliser*. [En ligne] <https://www.lamernotreavenir.fr/2018/11/20/projets-denergies-marines-tardent-a-se-realiser/> (Consulté le 10/05/2020)
- [135] Les énergies marines. 2013. *L'avenir des énergies marines* [En ligne] <http://energiesmarinestpe.e-monsite.com/pages/c-avenir-des-energies-marines.html> (Consulté le 10/05/2020)
- [136] Copyright Les Horizons, Mathieu DESPREZ. 12 juillet 2019. *Enjeux et perspectives de la biomasse en France* [En ligne] <https://leshorizons.net/enjeux-perspectives-biomasse-energie-france/> (consulté le 03/05/2000)
- [137] INRAE. 12 avril 2018. *Biomass for the futur* [En ligne] <https://www6.inrae.fr/biomassforthefuture/Le-Projet/Presentation-du-projet> (consulté le 03/05/2000)
- [138] LeMonde.fr. 2017. *Sorgho, une céréale sans gluten* [En ligne] <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-820-sorgho-sorghum-bicolor-cereale-sans-gluten.html> (consulté le 03/05/2000)
- [139] Géraud Bosman-Delzons. 24 janvier 2018. *Le miscanthus, culture du futur ?* [En ligne] <https://magazine.laruchequiditoui.fr/le-miscanthus-culture-du-futur/> (consulté le 03/05/2000)
- [140] Harvard University by Emily Kerr. 19/03/2019. *Future of Solar energy is bright*. [En ligne] <http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2019/future-solar-bright/> (consulté le 22/05/2020)

- [141] PV Magasine by Emiliano Bellini. 28/01/2019. *France to tender 17.2 GW of solar up to 2025*. [En ligne] <https://www.pv-magazine.com/2019/01/28/france-to-tender-17-2-gw-of-solar-up-to-2025/> (consulté le 22/05/2020)
- [142] Amplus Solar. 10/01/2019. *Future of Solar Power Companies – what lies ahead!* [En ligne] <https://amplussolar.com/blogs/future-of-solar-power-companies-what-lies-ahead> (consulté le 22/05/2020)

Annexes

Annexe 1 : Chapitre 1, les types d'énergies

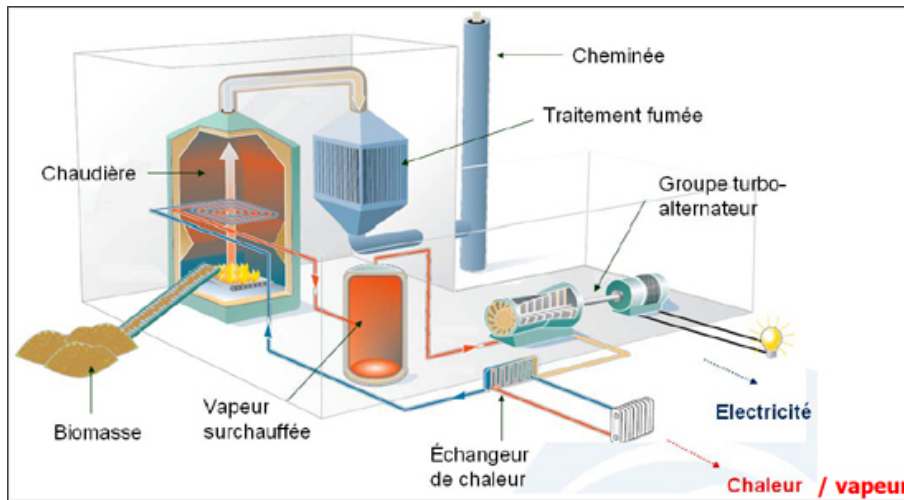


FIGURE 4.3.1 – Fonctionnement d'une centrale biomasse [101]

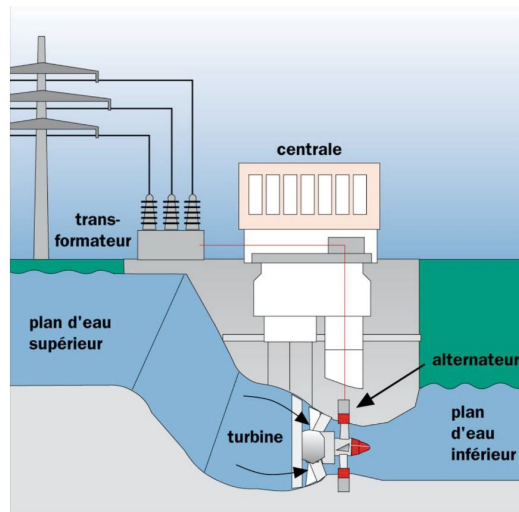


FIGURE 4.3.2 – Schéma d'une centrale dite « au fil de l'eau » [78]

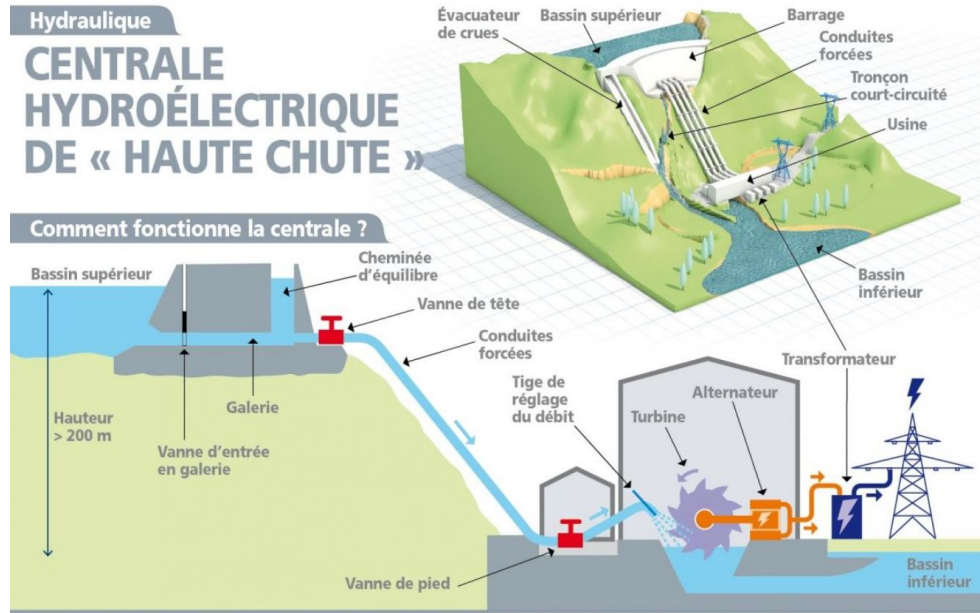
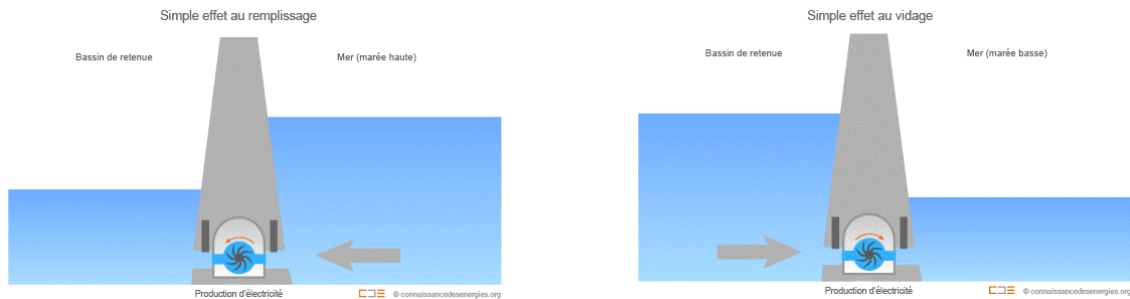


FIGURE 4.3.3 – Schéma d'une centrale dite « à chute » [79]



(a) Schéma de fonctionnement d'un barrage marémoteur au remplissage

(b) Schéma de fonctionnement d'un barrage marémoteur au vidage

FIGURE 4.3.4 – Schéma de fonctionnement d'un barrage marémoteur [65]



(a) Chaîne flottante articulée à la surface



(b) Paroi oscillante immergée

FIGURE 4.3.5 – Installations d'exploitation de l'énergie houlomotrice [61]

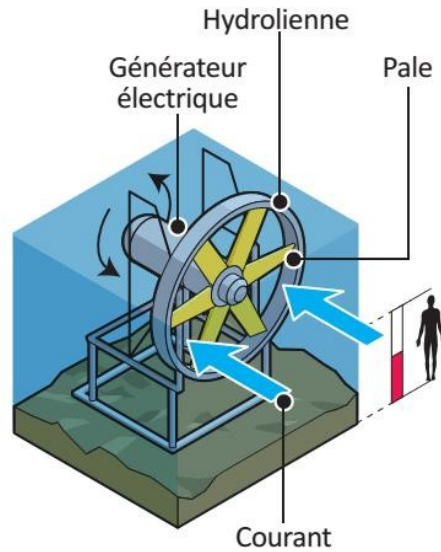


FIGURE 4.3.6 – Principe de fonctionnement d’une hydrolienne [66]

**Active and Passive
Solar Energy**

**Systèmes d’énergie solaire
actifs et passifs**

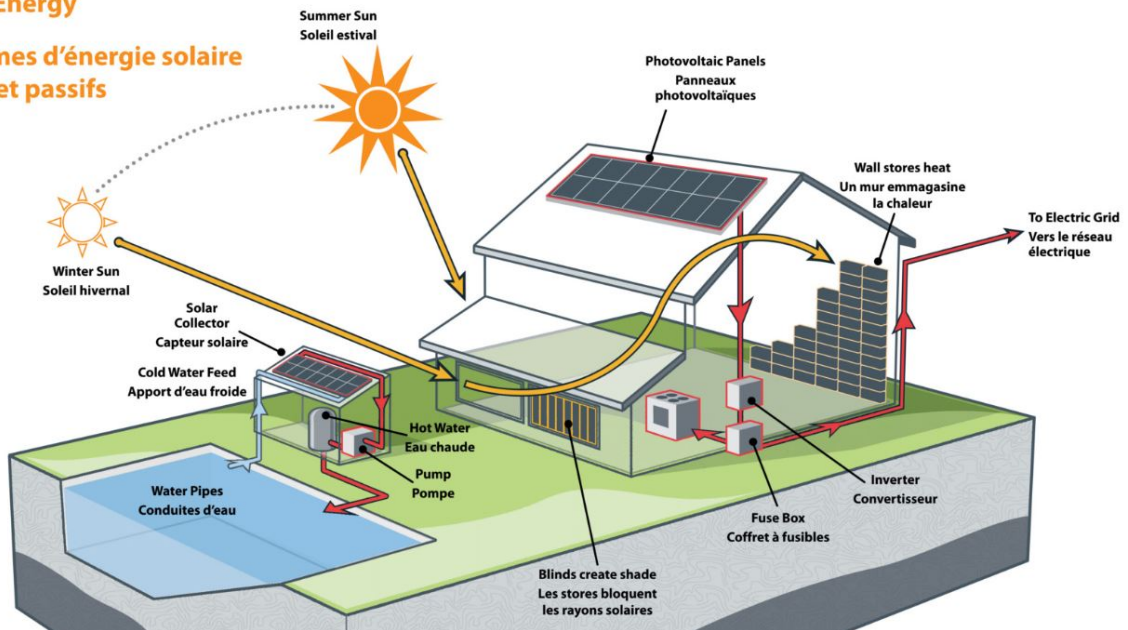


FIGURE 4.3.7 – Schéma de fonctionnement d’une maison utilisant les méthodes solaires passive et active [86]

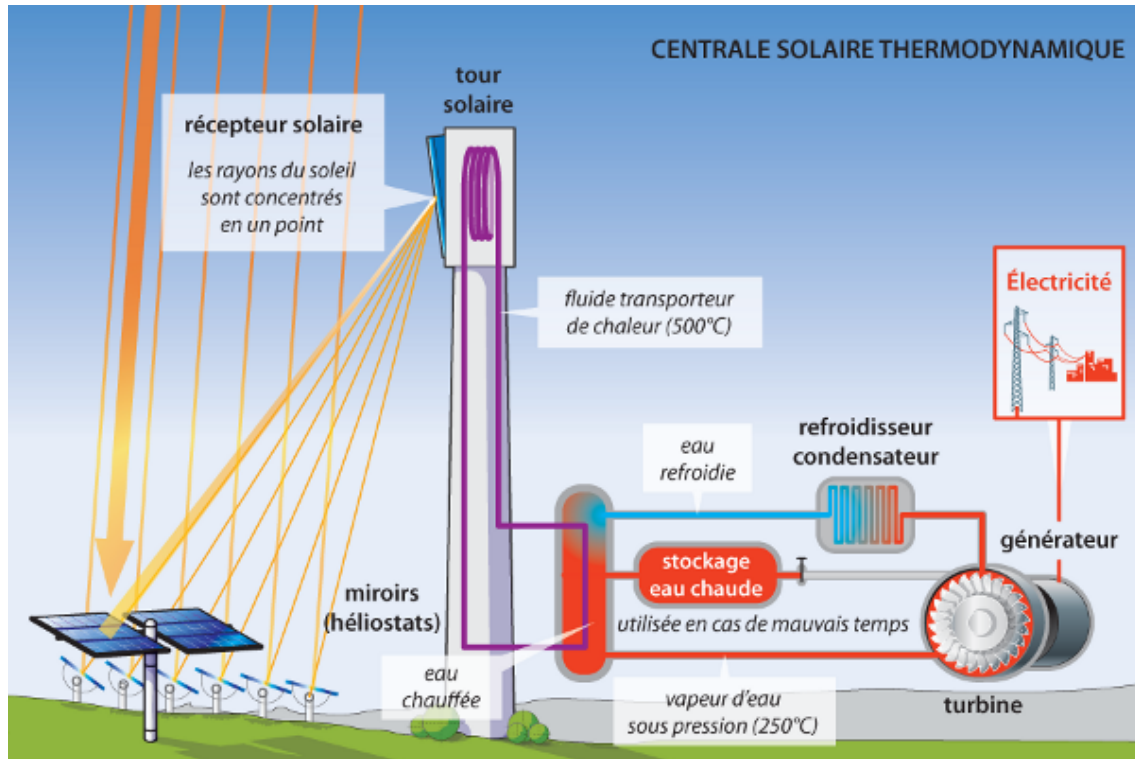


FIGURE 4.3.8 – Schéma du fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique [87]

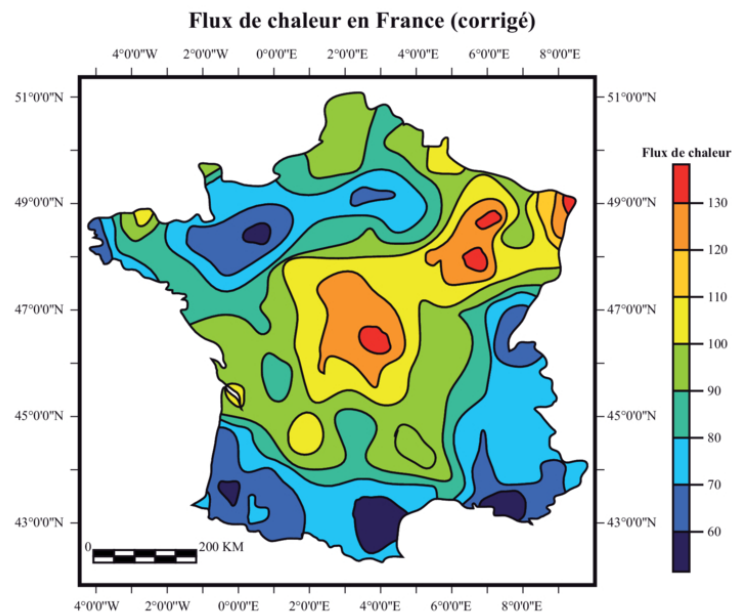


FIGURE 4.3.9 – Flux de chaleur en France [42]

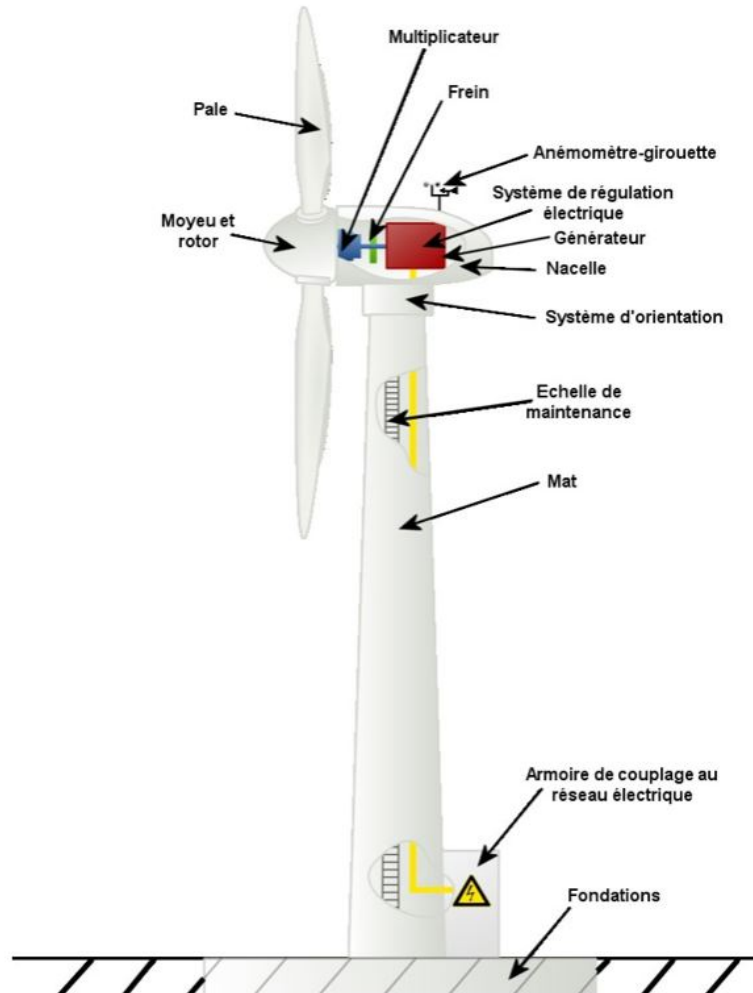


FIGURE 4.3.10 – Schéma des différentes parties d'une éolienne [5]

ÉOLIENNES OFFSHORE
Fondations

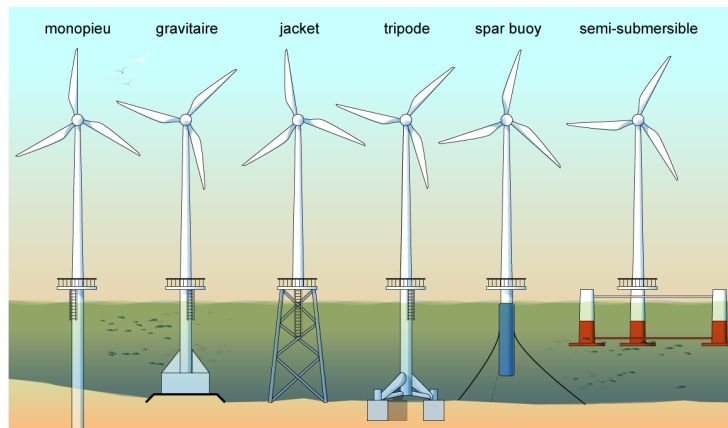


FIGURE 4.3.11 – Schéma des différentes fondations pour les éoliennes en mer posées [36]

Année d'attribution		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Éolien flottant	Volume (MW)			250	2×250	500	500	1500 dont 500 flottants en Méditerranée
	Façade			Nord Atlantique Bretagne	Méditerranée	Nord Atlantique Manche Ouest	Méditerranée	
Éolien posé	Volume (MW)	500	1000	750	750	750	750	
	Façade	Manche Est Dunkerque	Manche Est Mer du Nord	Sud Atlantique	Manche Est Mer du Nord	Nord Atlantique Manche ouest	Manche Est Mer du Nord	
Total année (MW)		500	1000	1000	1250	1250	1250	1500
Total cumulé (MW)		500	1500	2500	3750	5000	6250	7750

FIGURE 4.3.12 – Tableau prévisionnel de l’attribution des projets éoliens en mer [114]

Annexe 2 : Chapitre 2, les similarités

Type d'énergie	Contraintes géographiques d'implantation
Géothermique	Zone à fort gradient géothermique
Éolienne	Terrestre : région plate avec un vent suffisamment fort [10, 17]
	Éoliennes en mer posées : pas plus de 50 m de profondeur [10, 17]
Hydraulique	Stabilité des sols et des pans sur lesquels le barrage sera adossé. Zone non soumise aux glissements de terrain [72]
Marine	Marémotrice : marnage entre 10 et 15 m, profondeur entre 10 et 25 m, régions littorales à fort marnage.
	Hydrolienne : profondeur de 30 à 40 m.
Solaire	Région ensoleillée, plus efficace près de l'équateur [104]
Biomasse	Absence de contraintes spécifiques.

TABLE 4.1 – Les contraintes géographiques d'implantation

Type d'énergie	Principe de fonctionnement
Géothermique	Récupérer l'eau chaude en profondeur afin de l'extraire et de distribuer son énergie thermique, puis la relâcher afin qu'elle entre de nouveau dans le cycle.
Éolienne	Transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (rotation des pales) puis en électricité [10, 11]
Hydraulique	Transformer l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique à l'aide d'une chute plus ou moins haute. Cette énergie cinétique accumulée va entraîner la rotation des aubes de la turbine et la production d'énergie mécanique. Cette dernière est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'un alternateur [67]
Marine	Marémotrice : utilise le marnage.
	Houlomotrice / hydrolienne : utilise le courant
Solaire [104]	Solaire passive : laisser la chaleur solaire directement chauffer la maison ou le bâtiment.
	Solaire thermique : utilisation de miroirs pour faire converger les rayons du soleil vers des tuyaux afin de chauffer le fluide caloporteur qu'ils contiennent.
	Énergie photoélectrique : la cellule est basée sur l'effet photovoltaïque (photo-émission). Le matériau semi-conducteur est placé entre deux électrodes.
Biomasse	L'énergie biomasse est issue de la combustion, la fermentation ou de la synthèse chimique de matières organiques.

TABLE 4.2 – Principe de fonctionnement des différentes énergies renouvelables

Type d'énergie	Limites de fonctionnement
Géothermique	Encroutement par précipitation de sels minéraux entraînant la perturbation ou le blocage de la fermeture des vannes. Usure importante des infrastructures.
Éolienne	Fonctionne pour un vent compris entre 15 km/h et 90km/h. [17]
Hydraulique	Aucune car les débits sont contrôlés et l'eau est stockée (en excluant les limites de puissance de production).
Marine	L'énergie marémotrice dépend de l'intermittence des marées.
Solaire	Absorbe uniquement les longueurs d'onde plus courtes qu'environ 1 micromètre (μ). Besoin de filtrer les longueurs d'onde plus grandes car elles provoquent un échauffement indésirable. [104]
Biomasse	Production saisonnière et dépendante de contraintes météorologiques.

TABLE 4.3 – Les limites de fonctionnement des différentes énergies renouvelables

Type d'énergie	Part dans la production primaire d'énergies renouvelables en France (en 2017) [28]
Géothermique	1.3 %
Éolienne	8.2 %
Hydraulique	13 %
Marine	0.2 %
Solaire	Photovoltaïque : 3.2 %
	Thermique : 0.7 %
Biomasse	Bois-énergie : 39.6 %
	Biocarburants 10.2 %

TABLE 4.4 – Part des énergies renouvelables dans la production primaire d'énergies renouvelables en France (en 2017)

Type d'énergie	Pourcentage de la production des énergies renouvelables dans le monde
Géothermique	En 2017, les centrales géothermiques produisent 0.44 % de l'électricité mondiale et six pays produisent plus de 10 % de leur électricité grâce à la géothermie.
Éolienne	Près de 4.7 % de la production d'électricité en 2018. [8]
Hydraulique	16.4 % [72]
Marine	1.5 % à 2 % de la production électrique mondiale (marémotrice).
Solaire	0.7 % (Photovoltaïque : 28.6 %, Thermique : 71.4 %)
Biomasse	14 % dans la production mondiale d'énergie primaire.

TABLE 4.5 – Part des énergies renouvelables dans la production mondiale

Type d'énergie	Puissance générée
Géothermique	De 5 MW à 4000 MW (varie selon les régions)
Éolienne	Par éolienne : de quelques kW à 7.5 MW [58]
Hydraulique	De quelques kW (petite hydraulique) à plus de 1800 MW (barrages) [67, 73]
Marine	Marémotrice : 380 TWh/an
	Houlomotrice : 2000 à 8000 TWh
	Hydrolienne : 12.5 GWh (littoraux européens)
Solaire [104]	Centrale photovoltaïque : de quelques centaines de watts à 250 MW
	Centrale solaire thermodynamique : de 2 à 350 MW
Biomasse	Parc des installations de production d'électricité à partir de biomasse solide fin 2016 : 1495 MW

TABLE 4.6 – Puissance générée

Type d'énergie	Rendements et facteurs de charge ¹
Éolienne	Facteur de charge de 21 % en moyenne (en France en 2018) [25]
Hydraulique	Rendement entre 70 % et 90 % en fonction du type d'installation et des turbines utilisées
Marine	Hydroliennes : 40 à 50 % du rendement théorique
Solaire	Photovoltaïque (silicium) en théorie 28 % en pratique 15 à 24 %. Les cellules solaires pouvant absorber toutes les longueurs d'onde du Soleil auront une efficacité théorique de 85 %.[107] Facteur de charge moyen de l'énergie solaire en France en 2018 : environ 13 % [25]
Biomasse	0.2 à 0.5 %

TABLE 4.7 – Rendements et facteurs de charge des différentes énergies renouvelables

1. Rapport entre l'énergie réellement produite par l'installation et l'énergie qu'elle aurait pu produire si elle avait fonctionné au maximum de sa capacité, cet indicateur est souvent utilisé pour caractériser la productivité des infrastructures éoliennes et solaires

Type d'énergie	Avantages
Géothermique	Peu d'émissions de gaz à effet de serre.
	Énergie inépuisable.
	Durée de vie des gisements entre 30 et 80 ans.
Éolienne	Absence d'émissions de gaz à effet de serre et de rejets de produits toxiques [9]
	Absence de dégradation de l'environnement (pollution de l'air, de l'eau...) [9]
	Possibilité de mettre des éoliennes dans des parcelles agricoles sans gêner l'agriculteur [9]
	La production d'électricité éolienne est plus importante en hiver ce qui est en adéquation avec nos besoins énergétiques plus élevés à cette saison [10]
Hydraulique [67, 73, 74]	Absence d'émissions de gaz à effet de serre, absence de production de déchets toxiques.
	Absence de dégradation de l'environnement (pollution de l'air, de l'eau...).
	Capacité de stockage importante qui permet une bonne compréhension de l'offre et de la demande.
	Prix compétitif lié aux nombreuses installations et aux faibles coûts de maintenance.
Marine	Marémotrice : prévisions des marées, impacts environnementaux moindres.
	Hydroliennes : les courants marins sont inépuisables.
Solaire [113]	Source inépuisable d'énergie.
	Absence d'émissions de gaz à effet de serre.
	Coûts de maintenance et de fonctionnement relativement faibles.
	Le rendement énergétique est positif : il faut, en moyenne, entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.
Biomasse	Absence de contraintes d'implantation.
	Énergie renouvelable la plus rentable.
	Bilan carbone neutre (la quantité de CO ₂ absorbée est égale à celle dégagée).

TABLE 4.8 – Les avantages des différentes énergies renouvelables

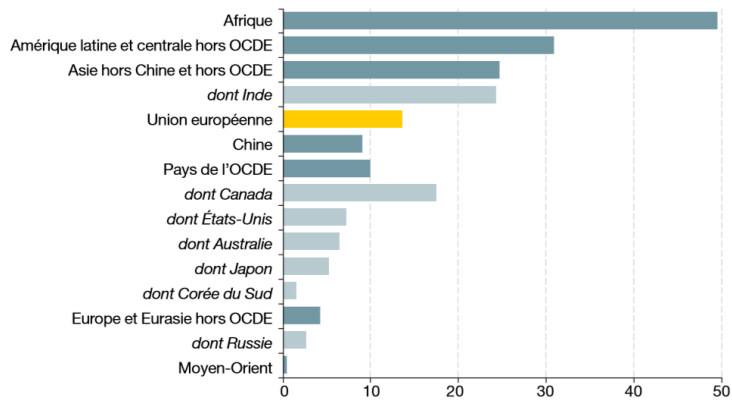
Type d'énergie	Inconvénients
Géothermique	Usure rapide des installations due à l'aspect corrosif et abrasif du fluide employé.
	Besoin d'utiliser des stimulations chimiques pour minimiser l'activité micro-sismique.
Éolienne	Production d'électricité éolienne variable car elle dépend de la force du vent.[9, 10]
	Nuisances sonores (infrasons et basses fréquences) qui ont un impact sur la santé.[10, 9]
	Dépendance à la topographie du terrain.[9]
Hydraulique [67, 68, 72]	Fort coût d'investissement et retour sur investissement de longue durée.
	Destruction de paysages naturels et perturbations des écosystèmes environnants.
	Étude préalable de la topographie importante (stabilité des sols, glissement de terrain...).
Marine	Marémotrice : impact environnemental élevé lors de la construction, destruction de la biodiversité sur le site, intermittence des marées.
	Hydrolienne : coût d'exploitation plus élevé que celui des éoliennes.
Solaire [113]	Coût d'investissement d'une installation solaire thermique relativement élevé.
	Énergie intermittente, nécessite donc d'être combinée avec un autre système énergétique.
	Durée de vie d'une installation photovoltaïque comprise entre 20 à 30 ans. Diminution du rendement au fil du temps.
	Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
	Rendements encore faibles.
Biomasse	Rendement énergétique assez faible.
	Baisse de la production agricole.
	Émission de gaz à effet de serre.
	Coûts importants.
	Risque de déforestation.

TABLE 4.9 – Les inconvénients des différentes énergies renouvelables

Annexe 3 : Chapitre 3, la part des énergies renouvelables

PART DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LA CONSOMMATION PRIMAIRE D'ÉNERGIE EN 2016 DANS LE MONDE*

En %



* Pour les pays non-membres de l'OCDE, les données relatives à la biomasse solide sont des estimations. Étant donné leur poids important au sein des énergies renouvelables, les classements sont donc à prendre avec précaution.

Source : AIE, World Energy Balances (2018 edition) © OCDE/AIE 2016

FIGURE 4.3.13 – Part des énergies renouvelables dans la consommation mondiale [28]

Objectif 2020

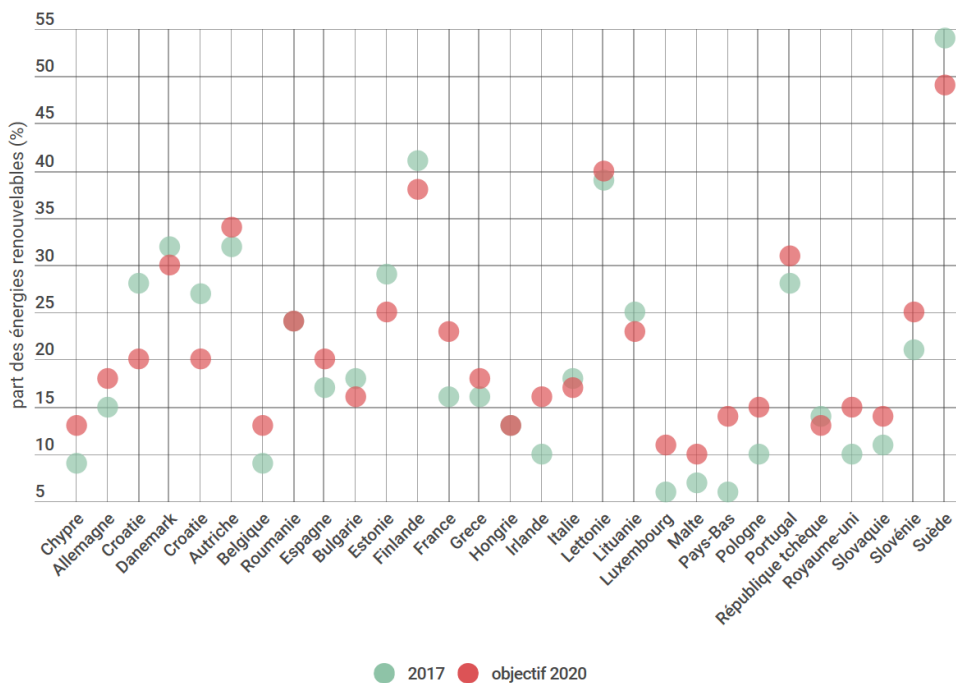
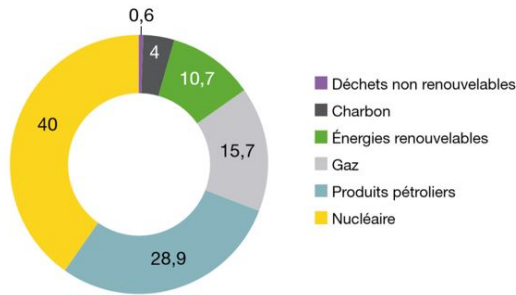


FIGURE 4.3.14 – Graphique des objectifs de 2020 en matière de production d'énergie renouvelable pour les pays membres de l'Union Européenne [20]

CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR TYPE D'ÉNERGIE EN 2017

TOTAL : 251,4 Mtep

En % (données corrigées des variations climatiques)



Source : SDES, d'après les sources par énergie

Structure de la consommation d'énergie primaire

en %

	1990	2000	2010	2015	2016
Hydraulique, éolien, photovoltaïque	2,1	2,2	2,4	2,8	3,2
ENR ¹ et déchets	5,1	4,4	6,3	7,4	8,2
Nucléaire ²	34,3	40,0	42,0	42,9	41,3
Gaz	11,8	14,4	15,4	14,6	15,6
Pétrole	37,9	33,1	29,5	28,6	28,3
Charbon	8,9	5,9	4,4	3,6	3,5
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

1. Énergies renouvelables thermiques : biomasse solide (bois-énergie, résidus agricoles et agroalimentaires), biogaz, biocarburants, géothermie, solaire thermique, pompes à chaleur.

2. L'énergie nucléaire est comptabilisée en équivalent primaire à la production (chaleur dégagée par la réaction nucléaire, puis convertie en électricité), déduction faite du solde exportateur d'électricité.

Note : énergie primaire corrigée des variations climatiques.

Champ : France métropolitaine.

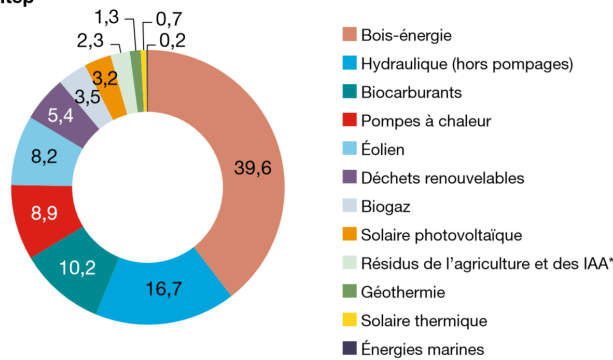
Source : SDES.

FIGURE 4.3.15 – Part des énergies renouvelables dans la production d'énergie en France en 2016 et 2017 [28, 29]

PRODUCTION PRIMAIRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES PAR FILIÈRE EN 2017

TOTAL : 25,9 Mtep

En %



* IAA : industries agroalimentaires.

Source : SDES, d'après les sources par filière

FIGURE 4.3.16 – Part de la production des différentes énergies renouvelables dans la production primaire d'énergie renouvelable en France (2017) [28]

Annexe 4 : Chapitre 5, les différentes éoliennes

Les éoliennes à axe vertical

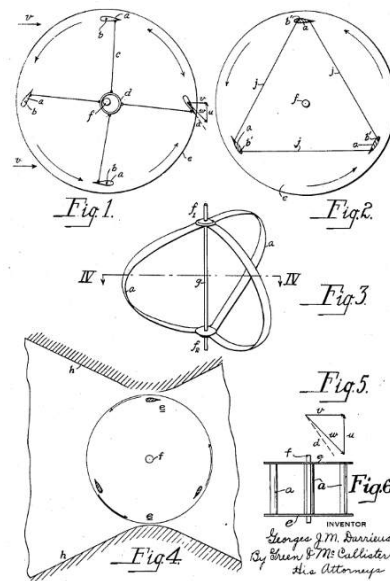
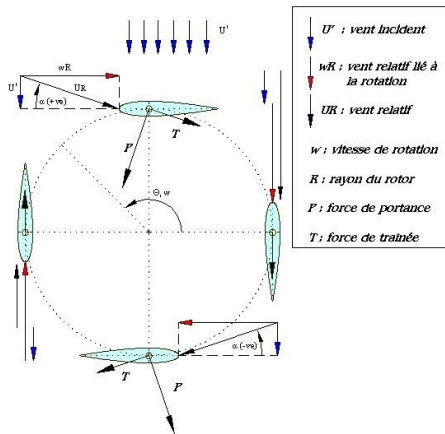
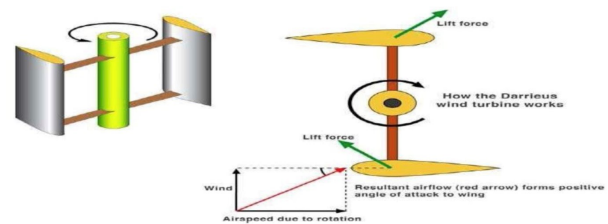


FIGURE 4.3.17 – Les schémas fournis par Georges Jean Marie Darrieus dans sa demande de brevet [88]



(a) Force et rotation de l'éolienne



(b) Fonctionnement de l'éolienne Darrieus

FIGURE 4.3.18 – Schémas de fonctionnement des éoliennes Darrieus [89]

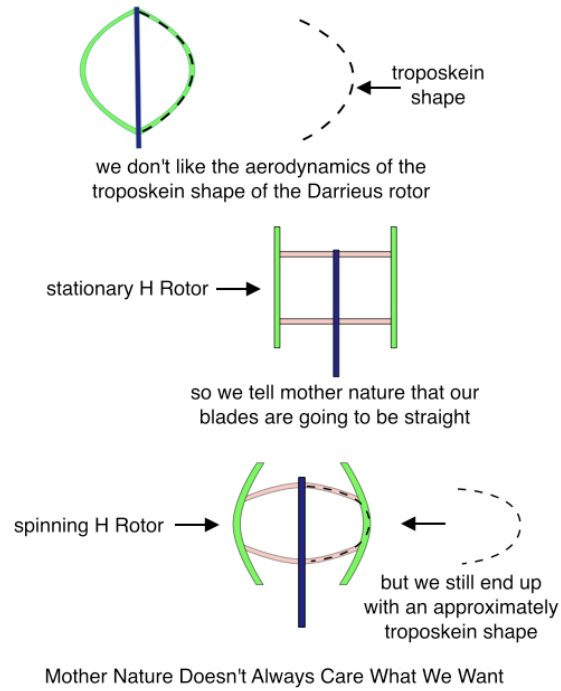
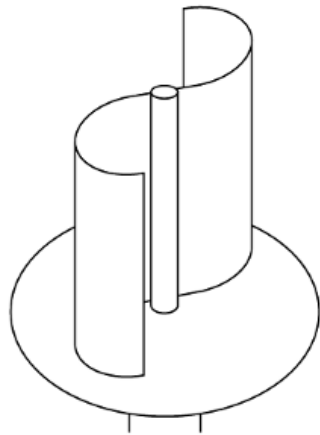
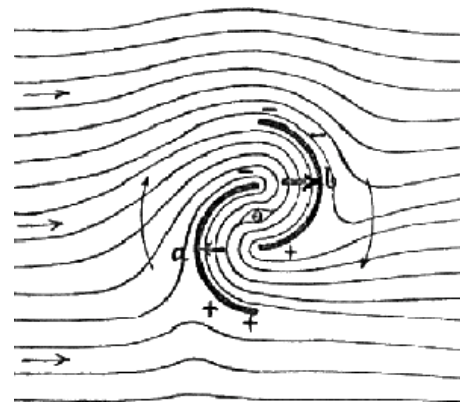


FIGURE 4.3.19 – Évolution de la forme des pales de l'éolienne Darrieus H avec le temps [92]



(a) Pales hélicoïdales de l'éolienne Savonius [93]



(b) Un dessin original de Sigurd Savonius [93]

FIGURE 4.3.20 – Schéma d'éoliennes Savonius

	Éoliennes Darrieus/Darrieus H	Éoliennes Savonius
Dimensions	5 m de haut et 2 à 3 m de diamètre.	Éolienne d'essai (exemple) : longueur de 75 cm et largeur totale d'environ 50 cm.
Principe de fonctionnement	2 ou 3 pales courbes, disposées en triangle autour de l'axe vertical. Elles sont placées selon différents angles et sont soumises à des vents de direction et d'intensité variables. Il y a création d'un couple moteur entraînant la rotation des pales.	2 demi-cylindres positionnés en forme de « S » autour d'un axe vertical. Le vent pénètre dans les demi-cylindres ce qui va provoquer la rotation de l'axe et ainsi générer de l'électricité.
Limites de fonctionnement	Nécessite un mécanisme de lancement.	Sa face convexe face au vent n'est pas aussi efficace que celle présentant au même moment sa face concave au souffle du vent.
Puissance générée	6 kW	0.6 W
Rendement	Entre 15 % et 40 % suivant les modèles (faible).	Entre 10 % et 15 % lorsqu'elles fonctionnent toutes seules (extrêmement faible).
Avantages	Plus silencieuses qu'une éolienne classique.	Faible niveau de bruit.
	Compacité.	Compacité.
	Génératrice pouvant être placée au sol selon les modèles ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour.	Démarrer facilement.
	Indépendantes de la direction du vent. Supportent des vents de plus de 220 km/h sans avoir besoin de frein automatique.	Gain esthétique et attractivité visuelle commercialement intéressants.
Inconvénients	Faible rendement.	Rendement extrêmement faible.
	Démarrage difficile.	

TABLE 4.10 – Tableau comparatif des éoliennes Darrieus et Savonius [111, 112]

Les éoliennes à axe horizontal

Afin de classer les différents types d'éoliennes en fonction de leur fonctionnement et de la vitesse du vent, une grandeur λ appelée « vitesse spécifique » a été créée. Elle est définie de la manière suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

avec R le rayon de la pale, Ω la vitesse angulaire de rotation des pales et V_0 la vitesse axiale initiale du vent.

On est donc en mesure de représenter graphiquement l'évolution du coefficient de puissance qui représente le rendement en fonction de la vitesse spécifique et ceci pour différents types d'éoliennes.

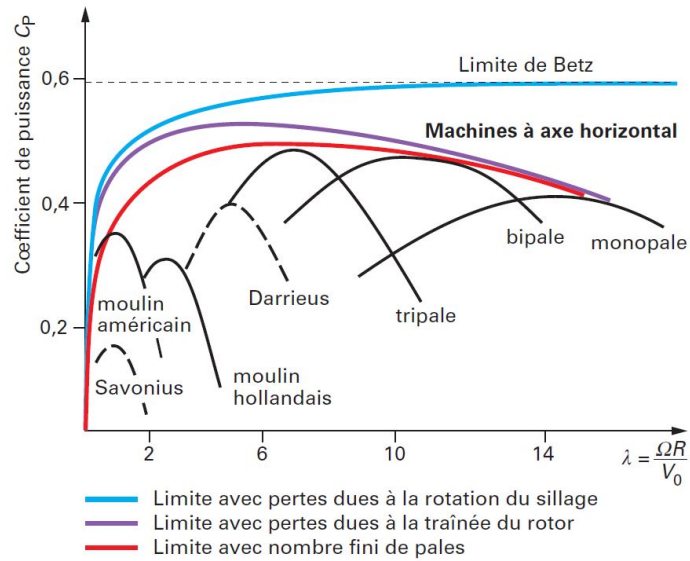


FIGURE 4.3.21 – Graphique représentant l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ et des différents types d'éoliennes [1]



FIGURE 4.3.22 – Éolienne FloDesign [37]

	Éoliennes à axe horizontal	Éoliennes à axe vertical
Taille	Entre 1 m et 160 m.	Petits formats (de quelques centimètres à moins d'une dizaine de mètres).
Vitesse de rotation	Entre 100 tr/min et 650 tr/min.	Entre 100 tr/min et 150 tr/min.
Vitesse de vent au démarrage	4 m/s	2 m/s
Domaine d'utilisation	Usage industriel (production à grande échelle).	Usage domestique.
Puissance	15 kW à 20 kW (éolienne domestique) 100 kW à 5 MW (éolienne industrielle)	Moins de 10 kW (peu efficace).
Coefficient de puissance (C_p)	Entre 0.375 (éolienne monopale) et 0.45 (éolienne tripale)	0.358 (éolienne Darrieus)
Avantages	Meilleur rendement et meilleure puissance produite que les éoliennes à axe vertical.	Peu d'usure de la structure. Supportent des vents violents venant de toutes les directions.
	Possibilité d'implantation en mer pour avoir une plus grande puissance produite.	Entretien et maintenance facilités par la petite taille et leur placement au sol. Gain esthétique et attractivité visuelle commercialement intéressants. Compacité.
Inconvénients	Usure rapide de la structure.	Faible rendement.
	Entretien et maintenance difficiles (taille de l'éolienne).	Démarrage difficile.
	Ne sont pas adaptées à un usage domestique (nuisances sonores, taille).	
	Entraînent fréquemment la mort d'oiseaux.	
Logistique de transport compliquée.		

TABLE 4.11 – Tableau comparatif des éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal