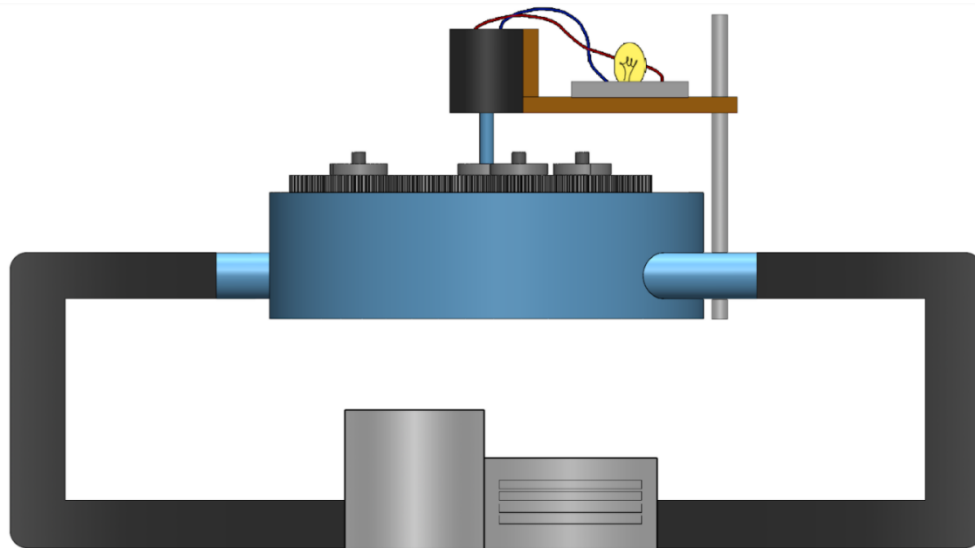


Conception d'un banc d'essais à énergie hydraulique



Etudiants :

Bruno ALVES LIMA

Julie LANGRAND

Amélie NICOLAS

Juliette CARON

Yazide MRAIZIG

Élisa PREZEAU

Enseignant-responsable du projet :

Abdellah HADJADJ

Date de remise du rapport : *12/06/2021*

Référence du projet : *STPI/P6/2021 – 6*

Intitulé du projet : *Energies marines renouvelables*

Type de projet : *Conception, Réalisation*

Objectifs du projet :

L'objectif premier de ce projet était la réalisation d'un banc d'essais à énergie hydraulique. En effet, ce projet devait aboutir à la création d'un banc permettant de transformer l'énergie d'un courant de l'eau en électricité afin d'allumer une ampoule. Cependant, le contexte sanitaire nous a empêché de nous réunir dès le début du semestre pour commencer la réalisation de ce banc. C'est pourquoi, nous nous sommes concentrés uniquement sur la partie théorique de la réalisation du banc d'essai. Nous avons repris le projet de l'année dernière en y ajoutant et modifiant des éléments. Nous espérons que les futurs élèves qui travailleront sur ce projet pourront s'appuyer sur nos recherches afin de réaliser le banc.

Mots-clefs du projet :

Energies marines renouvelables

Turbine verticale

Remerciements.

En premier lieu nous souhaitons remercier Monsieur HADJADJ pour nous avoir encadrer au cours de ce projet. Son aide, ses remarques et ses conseils nous ont fortement aidé tout au long du projet à revoir nos objectifs et à affiner nos recherches.

Nous souhaitons également remercier Monsieur Harter pour son expertise de Solidworks, en effet son aide a été fort appréciée dans la réalisation de notre modélisation.

Tables des matières

Introduction.....	7
Organisation du travail.....	8
1. Différentes énergies renouvelables	9
1.1 Énergies éoliennes.....	9
1.1.1 Différents types d'éoliennes.....	9
1.1.2 Fonctionnement d'une éolienne	9
1.1.3 Quelques chiffres	10
1.2 Énergies solaires.....	11
1.2.1 Solaire photovoltaïque	11
1.2.2 Solaire thermique	12
1.3 Énergies marines	13
1.3.1 Énergie marémotrice	13
1.3.2 Énergie houlomotrice	13
2. Conception d'un nouveau banc.....	15
2.1 Conception théorique du nouveau banc	15
2.1.1 Par quel moyen récupérer l'énergie hydraulique ?	15
2.1.2 Turbine	15
2.1.3 Bassin hydraulique	18
2.1.4 Système de carénage	19
2.1.5 Choix de la pompe utilisée.....	20
2.1.6 Transformation de l'énergie mécanique en électricité.....	21
2.2 Montage final	21
3. Limites de la théorie et pistes d'amélioration	24
3.1 Calcul de la puissance électrique en sortie.....	24
3.2 Limites de nos recherches	26
3.3 Pistes d'amélioration.....	26
Conclusion	28
Bibliographie	29

Annexe A : Avantages et inconvénients des énergies éoliennes et solaires	32
Annexe B : Energie thermique des mers et énergie osmotique	33
Annexe C : Quelques exemples concrets.....	35
Annexe D : L'hydrolienne Hydroquest	37
Annexe E : Autres turbines existantes	38
Annexe F : Etude des matériaux	40
Annexe G : Calculs théoriques	42

Introduction

De nos jours, la lutte contre le réchauffement climatique a pris une place importante dans le monde. Il devient nécessaire de trouver des alternatives aux énergies fossiles, qui représentent la cause première d'émission de CO₂. De plus, même si leurs réserves sont encore très grandes, elles ne sont pas inépuisables. C'est pourquoi les énergies renouvelables tendent à se développer dans le monde. En 2018, la consommation des énergies renouvelables en France représentait 14,9 %. La France a pour objectif d'ici 2030 d'atteindre 32 % d'énergies renouvelables.

L'électricité est aujourd'hui principalement produite par des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz ou bien l'uranium. Néanmoins, les énergies renouvelables ont participé à hauteur de 26,9% à la couverture de la consommation d'électricité de France métropolitaine au cours de l'année 2020. Ces dernières ont l'avantage de provenir de sources renouvelées en permanence. De plus, leur exploitation cause peu de déchets et d'émissions polluantes. Les principales sources sont le soleil, le vent, l'eau, ou encore la chaleur de la Terre.

Ainsi, ce projet présente l'exploitation de l'une de ces sources afin de produire de l'électricité. Notre sujet traitant des énergies marines renouvelables, nous avons alors travaillé sur l'énergie hydraulique créée à partir des courants de l'eau en mer ou dans un cours d'eau. Dans la continuité du projet de l'année dernière, nous avons repris certains concepts et ajouté de nouvelles idées.

Dans une première partie, nous présenterons les différentes énergies renouvelables exploitables aujourd'hui. Puis nous détaillerons la conception du banc, les différents éléments qui le composent, jusqu'au projet final. Enfin, nous montrerons que cette conception a des limites mais qu'elle peut encore être améliorée.

Organisation du travail

Afin de mener ce projet jusqu'au bout, nous nous sommes organisés de la façon suivante au sein de notre groupe. Premièrement, nous avons créé un Drive dans lequel nous y avons mis toutes les recherches effectuées. Cela nous a aussi permis de faire des Google Slides que nous avons présentées à notre enseignant responsable à chaque séance avec lui. Par la suite, nous avons travaillé par binôme pour avancer les recherches plus vite. Nous mettions chaque semaine notre travail en commun et nous en discussions ensemble avant la réunion avec notre enseignant. Certaines notions plus difficiles nous ont demandé plus de recherches. Dans ces cas-là, nous avons tous réfléchi au sujet. Concernant les supports à rendre, nous avons tous rédigé les parties sur lesquelles nous avons travaillé. Puis, deux élèves se sont occupés de la mise en page ainsi que de la rédaction des parties manquantes, deux autres ont mis en forme la présentation Powerpoint et le dernier binôme a réalisé le poster.

1. Différentes énergies renouvelables

1.1 Energies éoliennes

Les premières utilisations de l'énergie éolienne apparaissent avec l'utilisation des voiliers afin de se déplacer en mer ou encore avec les moulins à vent qui sont considérées comme les ancêtres des éoliennes d'aujourd'hui. Les moulins à vent transformaient l'énergie éolienne en énergie mécanique afin de transformer les céréales en farine ou pour extraire l'huile d'olives en écrasant des olives. Néanmoins, cette énergie reste plus coûteuse que les énergies fossiles et commencera à être commercialisée seulement vers la moitié du XXème siècle. De nos jours, l'énergie éolienne est principalement utilisée pour être transformée en énergie électrique et pour être stockée.

1.1.1 Différents types d'éoliennes

Il existe deux types de capteurs éoliens : ceux à axe horizontal et ceux à axe vertical. Les premières sont les plus communes et utilisées aujourd'hui. Elles ont un meilleur rendement, sont plus solides et leur coût de fabrication est moins élevé que celui des éoliennes à axe vertical.

1.1.2 Fonctionnement d'une éolienne

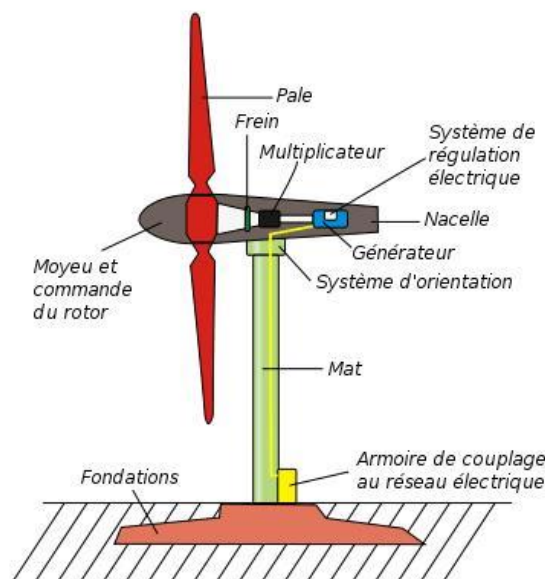


Figure 1 : Schéma d'une éolienne

Une éolienne est composée de différents éléments [1]. Le mât permet de placer le rotor à une hauteur où le vent souffle de façon plus régulière qu'au niveau du sol, ce qui est nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal. Le mât est généralement composé d'acier mais des mâts en béton sont également de plus en plus utilisés. La nacelle est montée au sommet du mât et abrite les composants mécaniques, pneumatiques, et certains composants électroniques et électriques nécessaires au fonctionnement de l'éolienne. De plus, cette nacelle peut tourner pour s'orienter dans la bonne direction du vent. Enfin, le rotor est composé du nez de l'éolienne et des pales au nombre de deux ou trois fixées sur un arbre tournant. Ce rotor est entraîné par l'énergie du vent qui fait tourner les pales. Puis cela entraîne la rotation de l'arbre principal à l'intérieur de la nacelle. L'arbre est relié à un multiplicateur permettant d'augmenter la vitesse de rotation grâce à un système d'engrenage. En effet, le générateur a besoin d'une vitesse de rotation bien plus élevée que celle de l'arbre. Enfin, le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique pour produire du courant. Le générateur utilise l'induction électromagnétique. En effet, il s'agit de la mise en mouvement d'un aimant mobile (rotor) au sein de bobines de fils conducteurs (stator). Le courant produit se dirige vers la base de l'éolienne dans un transformateur, pour être soit distribuée au réseau électrique, soit stockée.

Lorsque l'on fait référence à une puissance électrique de 2 mégawatt-crête cela signifie que pour fournir 2 MW la vitesse du vent minimal doit être de 15 m.s^{-1} . En dessous de ce seuil, l'éolienne produit moins d'énergie. Cependant, si la vitesse du vent dépasse 15 m.s^{-1} , elle ne produira pas plus d'électricité. Un seuil de sécurité est instauré afin d'éviter les accidents, lorsque le vent souffle à une vitesse supérieure à 25 m.s^{-1} , l'éolienne s'arrête.

1.1.3 Quelques chiffres

En 2009, 1,3% de la production d'électricité mondiale était fourni par l'énergie éolienne. La production d'énergie électrique en France fournie était de 1,5%. On remarque une nette augmentation de la production d'électricité fourni par le parc éolien français s'élevant à 34,1 TWh soit 6,3% de la production d'électricité sur l'ensemble du territoire.

Concernant le rendement d'une éolienne à axe horizontal, la taille de l'éolienne influe beaucoup. Les plus petites produisent environ 100 kW alors que les plus grandes peuvent produire jusqu'à 7,5 MW mais leur puissance est comprise entre 1MW et 3MW.

1.2 Energies solaires

Apparu vers l'Antiquité, l'énergie solaire est une source utilisée depuis des milliers d'années par les Hommes. Les Grecs l'utilisaient pour allumer la flamme olympique grâce à un jeu de miroir permettant de concentrer les rayons du Soleil. Les premières applications pratiques se développent vers le XVII^{ème} siècle avec une pompe solaire dont l'air utilisé est chauffé par le rayonnement solaire. Il faudra attendre 1839 pour que Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque permettant de convertir la lumière en électricité. En 1916, une première cellule solaire permettant de produire de l'électricité est créée. Cependant, cette dernière possède un rendement très faible pour transformer la lumière du Soleil en énergie. La conquête spatiale fera progresser cette énergie car le panneau solaire est le seul moyen non nucléaire de fournir de l'énergie aux satellites. Enfin, dans les années 1970, le prix du pétrole augmente à la suite du premier choc pétrolier, ce qui encouragera le développement des panneaux solaires. Elle représente la principale source d'énergie sur terre.

L'énergie solaire sert dans la production d'énergie électrique de manière durable mais également pour obtenir de la chaleur sans combustibles, en effet avec la production d'eau chaude ou l'utilisation de four solaire, concentrant les rayons solaires en un point pour atteindre la température nécessaire.

1.2.1 Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque [2] provient des rayonnements solaires grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base du panneau. Elle est constituée d'un matériau semi-conducteur. Ils sont photosensibles, permettant de libérer des électrons au contact des rayonnements du Soleil. En effet, la lumière apporte de l'énergie sous forme de photons, qui viennent en contact avec les électrons. Une fois les électrons libérés, ces derniers circulent dans un circuit fermé permettant de créer un courant électrique. L'électricité produite peut être directement utilisée ou bien stockée dans des batteries.

De plus, en fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage. Il s'agit donc bien d'une source d'énergie « verte » et renouvelable, car à l'échelle du temps humain, le Soleil est considéré comme inépuisable.

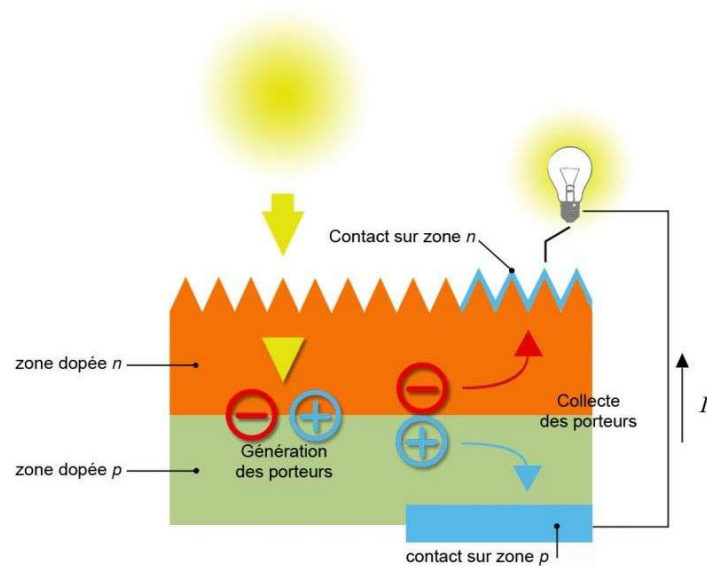


Figure 2 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.2.2 Solaire thermique

L'énergie solaire thermique permet d'exploiter les rayonnements du Soleil pour les transformer directement en chaleur. Il existe trois types de technologies permettant d'utiliser l'énergie thermique :

- la technologie thermique active est utilisée à basse [3] et moyenne [4] température. Pour cela, des capteurs thermiques installés sur les toits des bâtiments récupèrent la chaleur provenant du Soleil et la transmettent à un fluide caloporteur. Cette eau chaude est utilisée pour l'utilisation sanitaire ou bien le chauffage de locaux.

- la technologie thermique passive n'utilise pas de capteurs thermiques. En revanche, elle utilise l'absorption des rayons du Soleil à travers les fenêtres. L'énergie est alors stockée dans les murs, le plafond, le plancher. Cela demande une architecture du bâtiment adaptée et des matériaux spéciaux. La chaleur produite permet de chauffer uniformément un logement.

- la technologie solaire thermodynamique [5] est utilisée à haute température (de 250° à 1000°). Le principe est de concentrer les rayons du Soleil à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide caloporteur à haute température. La vapeur générée permet d'actionner des turbines permettant de créer de l'électricité. Dans les centrales thermodynamiques, de nombreux miroirs permettent de faire converger les rayons vers le fluide. Ils sont mobiles pour permettre de suivre le Soleil tout au long de la journée. Cette technologie permet à la centrale de produire aussi lorsque l'ensoleillement est faible ou nul. Elle est cependant principalement utilisée dans les régions à fort ensoleillement direct.

1.3 Energies marines

Il existe de nombreuses manières d'utiliser les mers et les océans pour créer de l'énergie [6]. Le terme 'd'énergies marines' regroupe toutes les formes d'exploitation des ressources renouvelables issues du milieu marin, c'est-à-dire les marées, courants, vagues, chaleur, salinité, biomasse et enfin les vents. Dans cette partie nous allons essentiellement nous concentrer sur l'exploitation des courants, marées et des vagues.

1.3.1 Energie marémotrice

Cette récupération d'énergie basée sur la marée consiste à laisser un bassin se vider et se remplir au gré des marées. A l'intérieur sont placées plusieurs turbines qui sont activées par les mouvements dans le bassin et qui génèrent de l'électricité. Cette méthode exploite l'énergie potentielle des marées. Une usine en France, à la Rance, utilise d'ailleurs cette technique depuis 1966 et grâce à ses 24 turbines elle produit 500 GWh par an ce qui représente 25% de la production d'électricité en Bretagne.

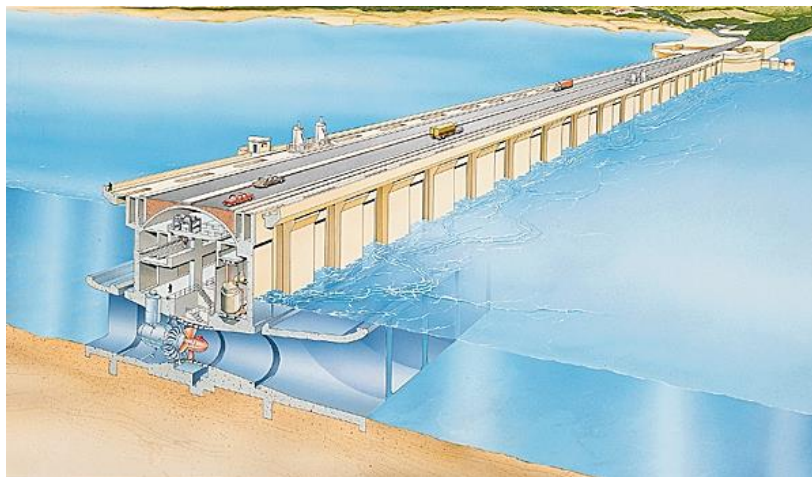


Figure 3 : Usine marémotrice de la Rance

1.3.2 Energie houlomotrice

Les vagues sont créées par le vent à la surface de l'eau et elles transportent de l'énergie cinétique qui peut être transformée en électricité de différentes manières. Une fois que les vagues s'abattent contre un plan incliné près de la côte ou à l'aide de systèmes immergés au large ou près des côtes. Cette forme d'énergie n'en est encore qu'au début de son développement mais de nombreux sites de tests existent dans le monde. La méthode [7] la mieux maîtrisée est celle de « La chaîne flottante articulée ». L'installation consiste en une ligne de flotteurs alignés perpendiculairement au sens des vagues, ces dernières créent une oscillation de la chaîne qui va entraîner une turbine et ainsi créer de l'électricité. Il existe aussi la méthode de la colonne à oscillations

verticales où le mouvement des vagues actionne une pompe qui met sous pression un fluide qui va entraîner une turbine. Ou encore la paroi oscillante immergée qui est une paroi métallique fixée à une tige sous l'eau qui bouge au gré des vagues et fait ainsi tourner une turbine. Cependant le plus gros inconvénient de toutes ces méthodes est qu'elles sont résistantes face à de violentes conditions météorologiques qui arrivent fréquemment au large.

Différents projets ont été lancés en Europe, notamment, en France, le projet Searev [8] à l'Ecole Centrale de Nantes qui consiste en un système off-shore de flotteurs dans lequel est suspendue une roue de 9 mètres de diamètre qui agit comme un pendule quand les vagues font bouger les flotteurs. Grâce à l'action des pompes hydrauliques et des moteurs à haute pression reliés au système, un générateur d'électricité est activé et transmet l'électricité ainsi créée à la terre par des câbles sous-marins. Ces modules immergés ont pour but d'être placés entre 5 et 10 km de la côte et devraient atteindre une puissance de 500 kW. Le projet Limpet est mis en œuvre depuis 2000 en Ecosse et utilise la technique de colonne à oscillation verticale pour acquérir une puissance égale à celle du projet français. Les experts prévoient que la France pourrait atteindre 40 TWh (l'équivalent de 4 centrales nucléaires) d'électricité produite par an dans quelques années en continuant de développer ces méthodes de production d'énergie.

2. Conception d'un nouveau banc

2.1 Conception théorique du nouveau banc

2.1.1 Par quel moyen récupérer l'énergie hydraulique ?

Nous avons pu voir dans la première partie qu'il existait différents moyens pour produire de l'électricité à partir de l'énergie maritime. Nous avons alors choisi de modéliser une hydrolienne. En effet, il est difficile de reproduire l'énergie houlomotrice dans un bassin de petite taille devant être facilement transportable. De même, l'utilisation de l'énergie thermique des mers (Voir *Annexe B*) s'avérait difficilement réalisable à notre échelle. Il nous aurait fallu un système de pompe à chaleur. Enfin, l'énergie osmotique (Voir *Annexe B*) n'était pas réalisable non plus car nous voulions nous concentrer sur une technologie ne demandant pas de zone géographique particulière. C'est ainsi que nous avons retenu le choix de l'hydrolienne afin de créer un modèle qui pourrait représenter au mieux ce qui existe déjà en grandeur nature. De plus, nous devons travailler dans la continuité du projet de l'année dernière. C'est pourquoi, nous avons repris l'idée de l'hydrolienne en y ajoutant des caractéristiques différentes et des nouveaux éléments.

Nous allons expliquer par la suite les différents composants de notre montage.

2.1.2 Turbine

La turbine étant la partie la plus importante du montage nous avons effectué des recherches sur plusieurs turbines différentes. De plus, ce projet étant la poursuite directe de celui de l'année passée, nous avons commencé par baser nos recherches sur les leurs. Ils avaient pour idée d'acheter une turbine horizontale déjà existante mais avaient évoqué l'idée d'en utiliser une verticale, nous avons alors creusé cette voie et nous nous sommes concentrés sur ce type de turbine peu commun.

Le principal avantage de ce type de turbine est qu'elle produit de l'énergie quel que soit le sens du courant, elle fonctionne donc même s'il change de sens.

Elle permet également de convertir directement l'énergie cinétique du courant en énergie mécanique, sans interrompre le flux naturel de l'eau. Cela a plusieurs avantages, peu de main d'œuvre est nécessaire, seulement les techniciens de maintenance et surtout la minimisation de la destruction de la biodiversité.

De plus, tant qu'il y a du courant on peut utiliser ce genre de turbines, que ce soit en haute ou basse mer ou dans des fleuves et des rivières. Ce courant n'a pas non plus

besoin d'être très puissant pour produire de l'électricité. Cependant la turbine reste plus efficace avec un courant constant et un dénivelé négligeable.

Il y a cependant quelques inconvénients. Ces derniers étant surtout la corrosion de la turbine, la végétation marine poussera sûrement sur les pales ce qui les ralentira. De plus, il ne sera pas possible d'installer ces turbines marémotrices partout car il faut prendre en compte les bateaux dans de nombreuses zones ainsi que les potentiels baigneurs en rivière.

C'est ainsi que nous avons choisi d'utiliser une turbine à axe vertical de type Achard [9].



Figure 4 : Différentes variantes de la turbine Achard

Cette turbine est une évolution des turbines Darrieus et Gorlov. Les pales ont une forme d'aile et sont fixées à un unique axe de rotation. Il existe plusieurs variantes représentées ci-dessus. L'avantage du bras unique est de limiter la traînée provoquée par les bras en comparaison à d'autres turbines possédant plusieurs bras.

Une étude réalisée par [10] a permis de faire une comparaison entre la turbine Achard et ses deux prédécesseurs, afin de montrer l'évolution du coefficient de puissance C_p (Voir 3.1) en fonction du paramètre d'avance λ . Ce dernier est le rapport entre la vitesse périphérique de la pale $V = \omega R$ et la vitesse de l'écoulement loin à l'amont de la turbine. La vitesse de l'écoulement en amont est fixée à $2,3 \text{ m.s}^{-1}$.

On obtient le graphe donné ci-dessous. On voit que pour $\lambda = 2$, le fonctionnement est optimal pour les trois turbines. La turbine Achard dispose d'un meilleur rendement (33%).

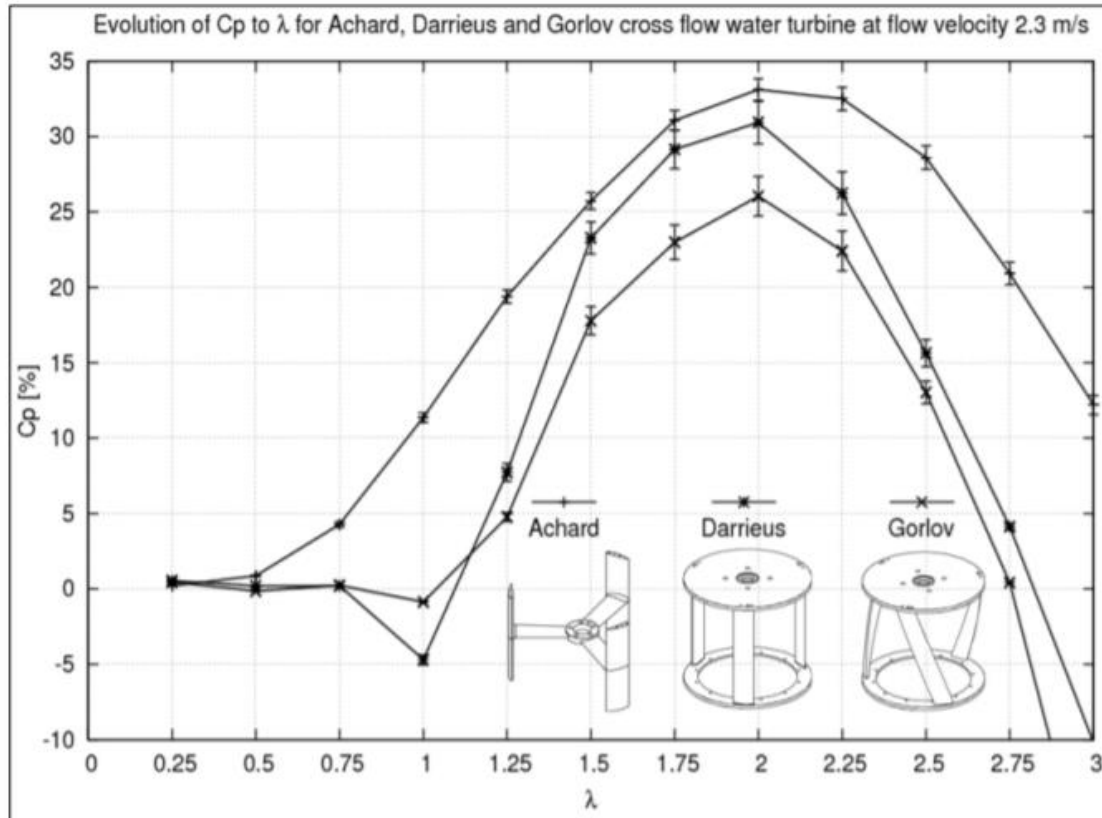


Figure 5 : Comparaison du coefficient de puissance des turbines Achard, Darrieus et Gorlov

D'après les rapports de proportions des turbines achard on obtient les valeurs suivantes :

$$R = 75 \text{ mm}$$

$$H = 15 \text{ cm}$$

$$c = 20 \text{ mm}$$

De plus, il y a un angle de 30° entre le haut et le centre de chaque pale et les pales sont toutes éloignées de 120° .

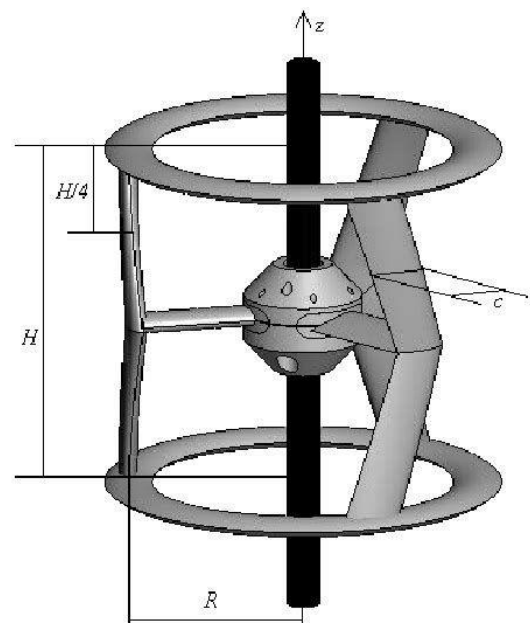


Figure 6 : Schéma turbine Achard

2.1.3 Bassin hydraulique

Afin d'étudier un flux il fallait en créer un, le plus logique pour avoir une meilleure efficacité aurait donc été d'avoir un bassin circulaire. Cependant, d'un point de vue pratique, pour la construction du bassin, cela n'aurait pas été possible, en effet il n'existe pas de matériaux à notre disposition permettant de produire un tel bassin circulaire. Nous avons donc pensé à reprendre l'idée d'un bassin rectangulaire similaire à celui d'un aquarium où le flux arriverait par un côté et serait dirigé vers la turbine. Ce bassin était une première option mais peut-être pas la plus efficace. Cependant, afin d'apporter de la nouveauté, nous avons repensé entièrement le fonctionnement et la forme du bassin. Nous obtenons ainsi un résultat inédit et innovant. Nous avons donc choisi d'opter pour une forme peu commune, en effet nous ne pouvons utiliser que des plaques droites de matériaux mais cela n'empêche pas d'approcher la forme d'un cercle. L'idée de ce bassin est donc d'approcher la forme d'un cercle avec un bassin décagonal. De plus il est prévu à l'intérieur un deuxième décagone plus petit. Le bassin serait donc une "boucle" dans laquelle circulerait le courant passant de turbine en turbine.

Nous avons évoqué deux principales possibilités : une boucle avec "carénage" intégré ou une boucle sans "carénage" intégré. Le bassin a été pensé pour être produit à partir de plaques de plexiglas, en effet moins fragiles que du verre, plus faciles à couper et tout aussi résistantes, elles permettent de fabriquer un bassin de la forme souhaitée.

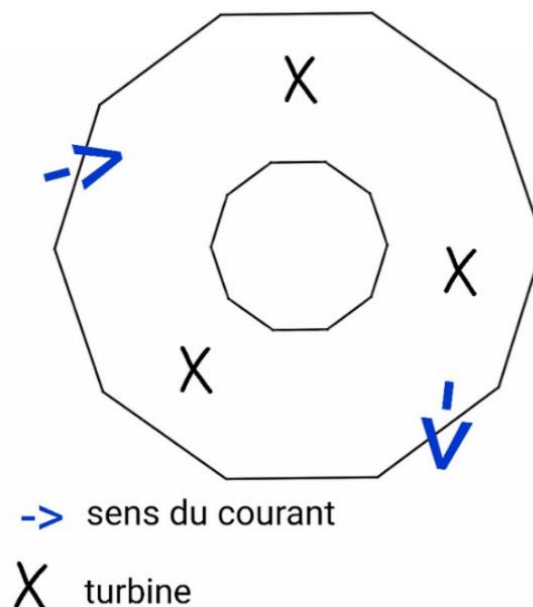


Figure 7 : Schéma du prototype du bassin

2.1.4 Système de carénage

La turbine doit produire le meilleur rendement possible. Pour cela, l'installation d'un carénage permet d'augmenter la puissance. Il s'agit d'une structure fixe installée autour du rotor permettant de concentrer l'écoulement pour augmenter le débit passant. Lorsque l'eau passe à travers le carénage, une dépression à la sortie de celui-ci se crée. D'après la limite de Betz [11], une hydrolienne à axe vertical ne peut extraire plus de 16/25 de l'énergie contenue dans le courant dans lequel la machine est plongée. Le rotor ne peut extraire plus de 64% de l'énergie de l'écoulement. Pour les turbines à axe horizontal, la puissance extraite est de 16/27 (59,3%). Le système de carénage permet de définir les frontières de l'écoulement. Ainsi, l'élargissement des lignes de courant est limité par la géométrie du carénage. Il existe deux grands types de carénage qui se différencient par la trainée créée par l'écoulement :

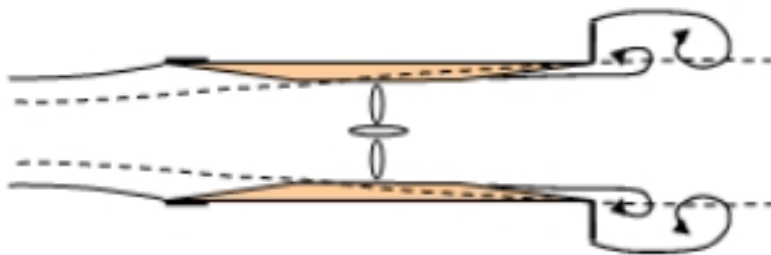


Figure 8 : Carénage Venturis

Les carénages de type venturis : cette technologie utilise l'effet Venturi [12]. C'est un phénomène de la dynamique des fluides montrant qu'un fluide en écoulement subit une dépression là où la vitesse

d'écoulement augmente ou bien là où le passage d'écoulement se réduit. Le carénage se compose de deux segments rectilignes (en orange sur la figure). Ils présentent souvent une symétrie amont aval. Cependant, ce type de carénage est plus souvent utilisé pour les turbines à axe horizontal.

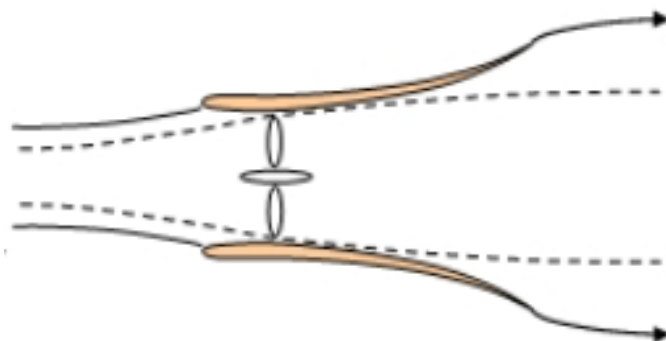


Figure 9 : Carénage diffuseur

Les diffuseurs [13] : dans ce cas-là, le phénomène de portance hydrodynamique est présent. En effet, il s'agit d'une force perpendiculaire à l'écoulement créée par l'aspiration dans une zone de dépression. Ce carénage est asymétrique entre l'amont et l'aval. Ce type de carénage sera utilisé pour les turbines à axe vertical. Plus

la longueur du carénage sera grande devant le diamètre du rotor, plus le rendement sera élevé.

Sur les deux figures précédentes, les traits en pointillés montrent le chemin du courant lorsqu'il n'y a pas de carénage. Tandis que les traits pleins représentent le courant lorsque le rotor est caréné. Ainsi, le conditionnement de l'écoulement permet d'obtenir un débit plus élevé à travers le rotor, et en conséquence les pales tourneront plus vite.

On peut voir sur la *Figure 10* une hydrolienne de type darrieus à axe vertical avec un carénage de type diffuseur sur les côtés. L'illustration réelle de cette hydrolienne est montrée en *Annexe D*.

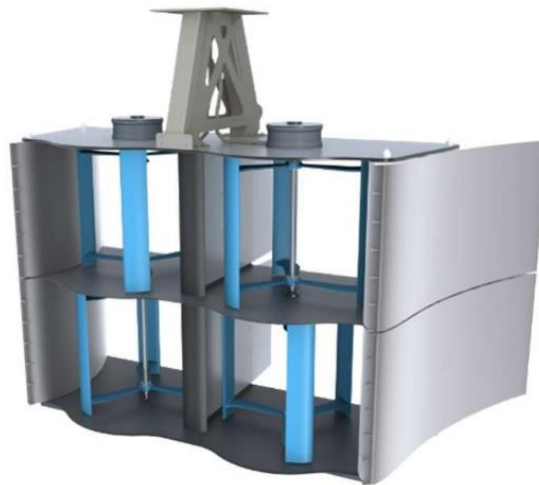


Figure 10 : Représentation schématique de l'hydrolienne

Dans notre montage final, nous avons fait le choix de modéliser un carénage de type diffuseur. En effet, sa forme permet de concentrer l'eau vers les turbines.

2.1.5 Choix de la pompe utilisée

La pompe représente un élément essentiel dans le montage de notre banc hydraulique. En effet, cette dernière va permettre d'envoyer de l'eau dans le bassin pour faire tourner les turbines. Ainsi, sa puissance doit être assez importante pour délivrer un débit suffisamment fort. Il fallait alors choisir une pompe avec un débit important. N'ayant pas les capacités d'en fabriquer une, nous avons donc décidé d'intégrer une pompe déjà existante à notre projet. D'après les calculs réalisés par le groupe de l'année dernière, une pompe ayant un débit de 2200 L/h n'était pas suffisante. Cependant, nous avons apporté de nombreuses modifications au montage et d'après nos calculs (voir 3.1 et *Annexe F*) il faudrait un débit minimum de 14200 L/h pour obtenir une puissance de 60

mW permettant d'allumer une petite LED. Il existe des pompes délivrant un tel débit dans le commerce.

2.1.6 Transformation de l'énergie mécanique en électricité

Chaque turbine est reliée par un pignon à son axe de rotation. Une roue placée au centre du bassin est reliée à chaque pignon. Lorsque cette dernière sera en rotation, elle fera ainsi une dynamo. Il s'agit d'un petit système électrique permettant de transformer l'énergie mécanique en électricité. A partir du mouvement de rotation ce système nous permettra d'allumer une ampoule LED. Nous avons choisi une dynamo de type moyen [14], se fixant dans le trou de la roue principal. Une dynamo peut fournir une puissance de 3 Watts. En moyenne, le rendement d'une dynamo moyen est de 65%.

2.2 Montage final

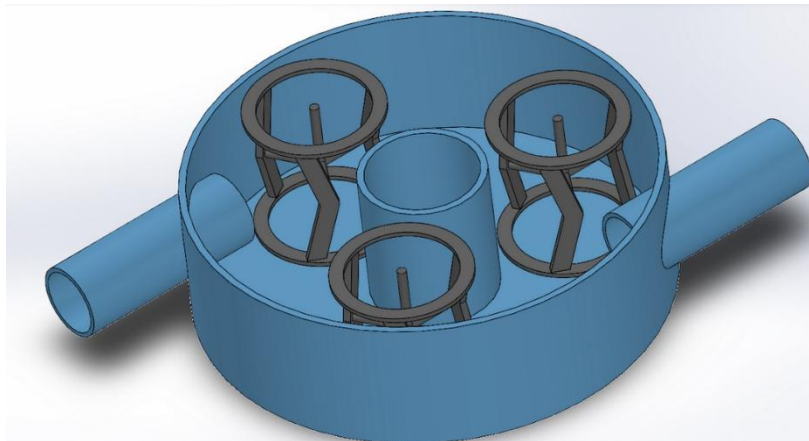


Figure 11 : Première modélisation de notre banc

Une fois avoir rassemblé toutes nos données et idées pour le bassin, nous avons réalisé une modélisation prototype. Cela a permis de soulever plusieurs problèmes, le premier étant que les turbines doivent être intégralement immergées dans le bassin et donc il faut prévoir leurs mesures en fonction de cela. Le deuxième point d'amélioration important était le trou central, nous avons soulevé l'idée de le relier aux turbines ou bien d'en faire une sortie d'eau.

La version finale de notre banc est quelque peu différente de la première, nous avons tout d'abord augmenté la taille du bassin pour que les turbines soient bien immergées dans le bassin. Nous avons également ajouté les carénages pour guider le courant sur les turbines.

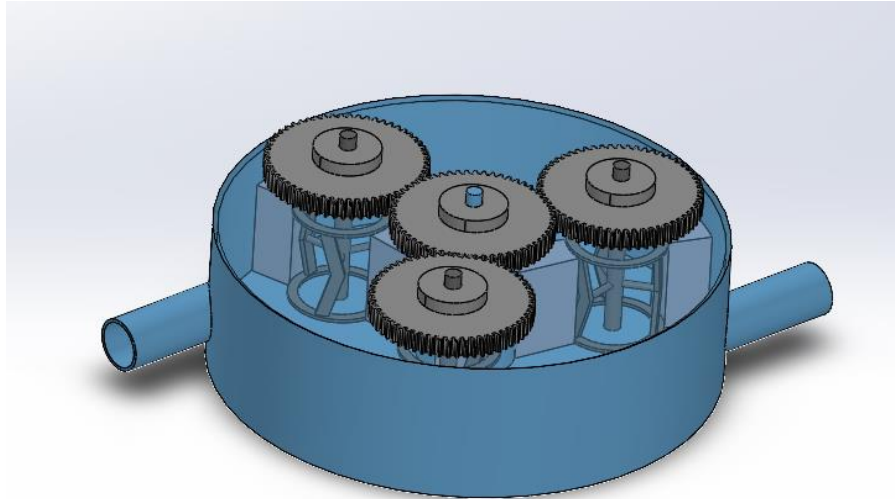


Figure 12 : Montage final

Nous avons réalisé la modélisation de notre banc à l'aide du logiciel SolidWorks. Etant donné que la prise en main de ce logiciel est assez longue, nous n'étions pas à l'aise sur toutes les fonctionnalités. C'est pourquoi le bassin a été modélisé en cercle. En réalité, si nous avons dû le concevoir réellement, il aurait bien eu une forme de décagone comme expliqué dans la partie 2.1.3.

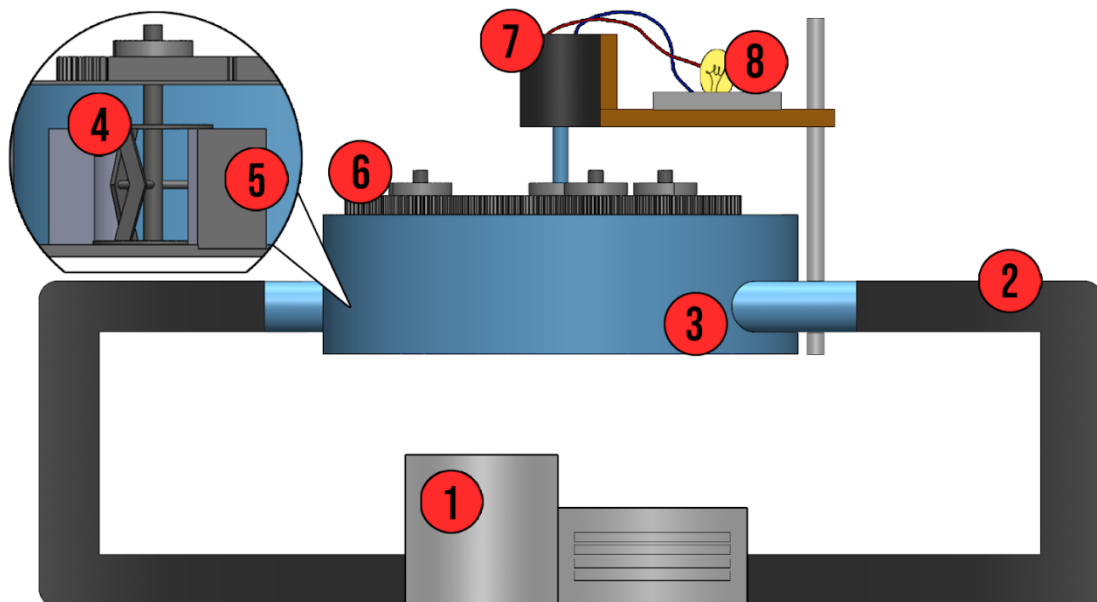


Figure 13 : Schéma explicatif en 2D du montage

Notre modèle final est donc composé de 8 grandes parties. La pompe (1) crée le courant marin artificiel dans les conduits (2), qui débouche sur le bassin (3). Le bassin est donc rempli d'eau pour submerger les turbines (4) dans celle-ci et d'en tirer un apport

énergétique. Les turbines sont maintenues dans le bassin grâce à leur axe de rotation emboîté à la base et au couvercle du bassin. À l'intérieur du bassin, on peut remarquer la présence de carénages (5) placés dans celui-ci, notamment pour maximiser le fonctionnement des turbines. Au-dessus du bassin et aux sorties des turbines, un train d'engrenage (6) permet de transférer l'énergie apportée par les turbines et les transférer à la dynamo (7) grâce à l'engrenage central. La dynamo transforme l'énergie mécanique en énergie électrique et la transmet finalement à la diode (8) qui est maintenue à l'aide d'un support.

Au niveau du train d'engrenages, nous avons opté pour 4 roues identiques pour ne pas avoir de rapport de réduction. Nous avons choisi, avec l'aide d'un professeur, un module de 4. Nous avons mesuré un entraxe de 240 mm . Or on sait que $d = m z$, on a donc $z = \frac{d}{m} = \frac{240}{4} = 60\text{ dents}$. De plus, pour faire en sorte qu'il n'y ait pas de problème au niveau de la rotation des engrenages du au sens de rotation des turbines, nous avons décidé d'utiliser des roues libres pour que la rotation ne se fasse que dans un sens.

3. Limites de la théorie et pistes d'amélioration

3.1 Calcul de la puissance électrique en sortie

L'hydrolienne capte l'énergie cinétique de l'eau pour la restituer en énergie mécanique de rotation. La puissance extraite par la turbine s'exprime par la formule :

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p S v^3$$

Avec $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ la densité volumique de l'eau, C_p le coefficient hydrodynamique de la turbine, S la surface équivalente balayée par les pales de la turbine et v la vitesse de l'eau. Le coefficient C_p est limité à 64% (16/25) pour une turbine verticale d'après la loi de Betz.

Cette formule peut se démontrer de la manière suivante :

On sait que l'énergie cinétique d'un corps (exprimée en Joules) est :

$$Ec = \frac{1}{2} m v^2$$

Avec m la masse d'eau et v la vitesse de l'eau.

Or, on sait que la puissance s'exprime en Watt, soit des Joules par seconde. Alors si l'on considère τ le temps exprimé en secondes, on obtient :

$$P = \frac{Ec}{\tau}$$

De plus, considérons un volume d'eau V_0 , on peut alors écrire :

$$m = \rho v = \rho S v \tau$$

Ainsi, on obtient :

$$P = \frac{\frac{1}{2} m v^2}{\tau} = \frac{\frac{1}{2} \rho S \tau v^3}{\tau}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

En multipliant par la limite de Betz, on retrouve bien l'expression de la puissance cinétique.

Pour une turbine à axe vertical, la surface S balayée est :

$$S = 2 R H$$

Avec R la rayon et H la hauteur de la turbine.

Regardons maintenant la vitesse de l'eau v . Elle dépend du débit et de la surface S' traversée par le fluide.

$$S' = S + S_{axe}$$

Avec S la surface balayée par les pales et S_{axe} la surface occupée par l'axe de rotation d'une turbine.

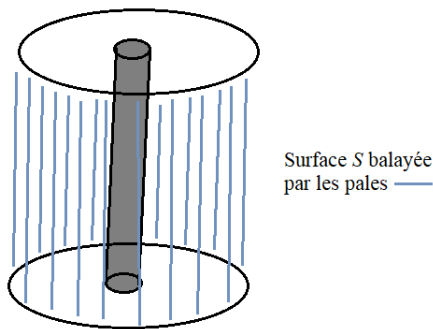


Figure 14 : Schéma représentant la différence entre S et S'

S_{axe} est représentée en gris sur le schéma. Donc S dépend du diamètre de l'axe central.

Ainsi, la vitesse de l'eau s'exprime avec la formule :

$$v = \frac{\text{débit}}{S'}$$

Ici, le débit est exprimé en m^3/s , mais en général le débit d'une pompe est donné en L/h .

Pour augmenter la vitesse il faut prendre un débit le plus grand possible ou diminuer le plus possible la surface S' .

Notre système de carénage nous permet de simplifier les calculs en admettant que les turbines sont parfaites. Ainsi, la surface traversée par l'eau est égale à la surface balayée par les pales.

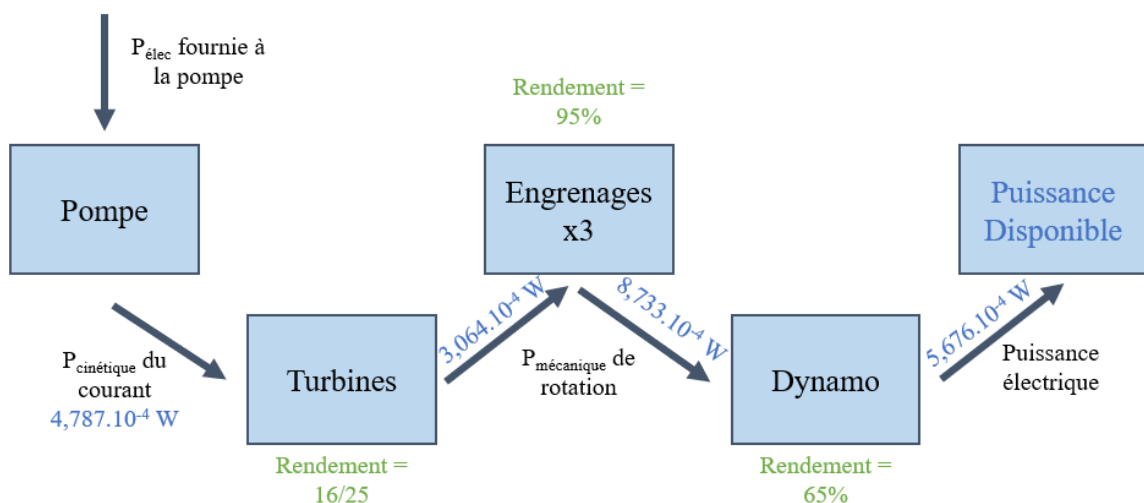


Figure 15 : Schéma de la chaîne de puissance

Le schéma représenté ci-dessus, montre la puissance disponible tout le long du système. On sait que d'après la limite de Betz, le rendement de la turbine est de $16/25$. Nous n'avons pas les moyens de calculer celui du système d'engrenage. Néanmoins, dans la littérature [15], le rendement minimal d'un système d'engrenage est de 95%. Pour la plupart des dynamos que l'on trouve dans le commerce, le rendement est de 65%. Les résultats numériques ont été détaillés en *Annexe F*. Sur cet exemple la puissance électrique en sortie est bien trop faible pour allumer une LED. Nous avons fait d'autres calculs sur Excel, ce qui nous a permis de trouver que le débit de la pompe réglable devait se trouver entre 7000 et 18000 L/h pour obtenir une puissance électrique en bout de chaîne 7 à 122 mW avec trois turbines de 15 cm de diamètre.

3.2 Limites de nos recherches

Notre projet de départ était de fabriquer une maquette d'une hydrolienne. Cependant, le contexte sanitaire ne nous a pas permis de la réaliser. A partir de celle-ci, nous aurions pu prendre des mesures expérimentales de certaines grandeurs et ainsi adapter certains composants de notre banc par rapport à nos calculs théoriques. Nous aurions pu par exemple vérifier nos calculs théoriques et étudier différentes mise en situation en fonction du débit délivré par la pompe.

3.3 Pistes d'amélioration

Amélioration de la turbine

L'élément central de ce montage étant la turbine, c'est la partie qui pourrait le plus être améliorée. Pour commencer, cette conception étant purement théorique, nous ne pouvons pas être certains que les mesures estimées soient les meilleures, il faudrait effectuer des tests pratiques pour le vérifier. De plus, la forme des pales est un grand sujet de débat, la forme recommandée pour ce type de turbine est la NACA 4518 dont on peut voir la forme sur la *Figure 10* mais il est possible de la modifier pour obtenir un résultat différent.

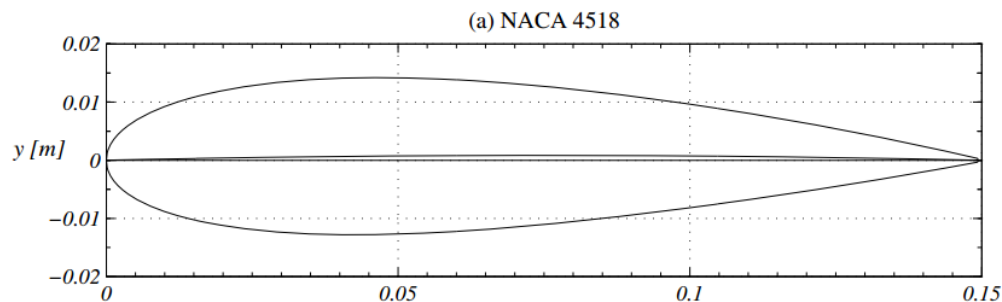


Figure 16 : Schéma représentant la forme d'une pale

Canal de tranquillisation

Nous avons réfléchi à un système permettant de concentrer le flux vers le canal grâce à un système d'entonnoir. Il s'agit d'un canal de tranquillisation. Il permet de linéariser le flux en sortie de la turbine. En effet, en sortie de la turbine le flux est turbulent, il ne peut donc pas alimenter une turbine de suite. Il faut que le courant redevienne linéaire et orienté pour pouvoir alimenter une turbine. C'est pourquoi il est important de placer un canal de tranquillisation entre les turbines. Il est constitué d'une alternance de grillages et de pailles. Le grillage permet de casser les turbulences et les pailles permettent de garder un flux unidirectionnel. L'alternance grillage-paille avec un grillage de plus en plus fin permet d'assurer la bonne linéarisation du flux.

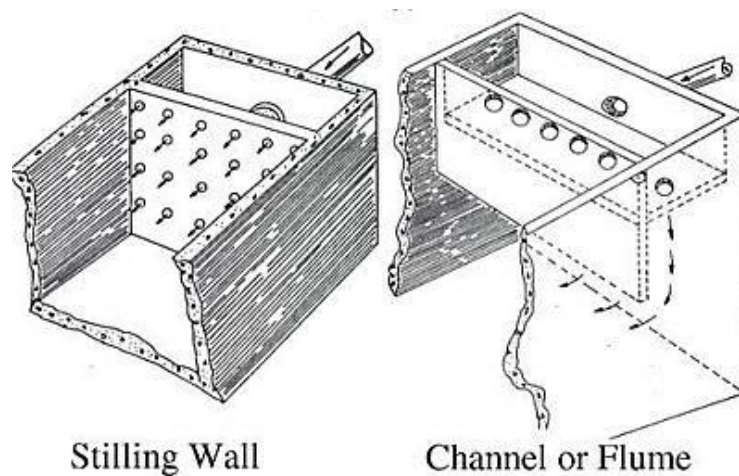


Figure 17 : Schéma représentant un canal de tranquillisation

Assemblage vertical des turbines

Une des idées d'amélioration que nous avons eu était d'empiler les turbines pour former une colonne. Cela permettrait au flux de traverser une surface bien plus large.



Figure 18 : Assemblage de turbines verticales

Conclusion

Ce projet, à cause des conditions sanitaires actuelles, n'a pas pu être mené comme il aurait initialement dû. Le but était la fabrication du banc conceptualisé par le groupe 2019-2020, mais nous avons finalement amélioré l'aspect théorique de ce même banc. Cette approche purement théorique nous a permis une plus grande liberté quant à nos idées pour créer un banc inédit et innovant.

Le démarrage du projet était assez difficile car nous n'avions jamais pris part à quelque chose de tel, et nous étions perdus quant à ce que nous devions faire. Cependant nous avons réussi à cerner les points centraux du projet précédent et proposer des idées pour les améliorer. Toutes ces idées n'étaient pas intéressantes ou réalisables et en discutant avec notre professeur responsable nous avons pu nous concentrer sur les points importants.

Ce projet étant purement théorique il y a alors sûrement des imperfections que nous ne voyons pas. Le but pour le groupe qui reprendra le projet l'année prochaine est donc de fabriquer ce banc afin de l'améliorer encore et le voir enfin prendre forme.

C'était également pour nous tous, la première fois que nous devions travailler avec des inconnus autour d'un projet que nous avons choisi. Cela nous a appris à nous répartir le travail, à communiquer différemment et à échanger des avis et des idées. Cette approche nous a permis de nous enrichir et de participer à ce qui ressemble beaucoup à un projet en entreprise.

Bibliographie

1. REFERENCES

- [1] «https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne,» [En ligne].
- [2] «http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp,» [En ligne].
- [3] «http://www.energies-renouvelables.org/solaire_thermique.asp,» [En ligne].
- [4] «http://www.energies-renouvelables.org/solaire_thermique_ht.asp,» [En ligne].
- [5] «<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique>,» [En ligne].
- [6] «<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energies-marines>,» [En ligne].
- [7] «<https://selectra.info/energie/guides/environnement/houlomotrice>,» [En ligne].
- [8] «<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-energie-houlomotrice-l-utilisation-du-mouvement-perpetuel>,» [En ligne].
- [9] <https://core.ac.uk/download/pdf/40114112.pdf>. [En ligne].
- [10] V. M. T. AUMELAS, Development of an experimental facility for cross flow, Bucharest, Roumanie.: ISSN 4th International Conference on Energy, 2009.
- [11] «https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00685850/PDF/Menchaca_ane_2011_archivage.pdf,» [En ligne].

- [12] «https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Venturi,» [En ligne].
- [13] «https://www.encyclopedie-energie.org/les-hydroliennes/#_ftn2,» [En ligne].
- [14] «<https://www.citycycle.com/4462-dynamo-moyeu-energie-roue-velo>,» [En ligne].
- [15] «<https://fr.wikipedia.org/wiki/Engrenage>,» [En ligne].
- [16] «<https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-greentech-hydrofluv-hydrolienne-bientot-testee-loire-48708/>,» [En ligne].

2. REFERENCES DES FIGURES

Les figures 7, 11, 12, 14, 15, 25 et 26 ont été réalisées manuellement.

Figure 1 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Schema_eolienne.svg

Figure 2 : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/5/>

Figure 3 : https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/usine_mar%C3%A9motrice_de_la_Rance/140309

Figure 4 et 5 : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01424843/document>

Figure 6 et 18 : <https://sites.google.com/site/cseraguanish/energies/la-mer/l-hydrolien/axe-verticale>

Figure 8 et 9 : https://www.encyclopedie-energie.org/les-hydroliennes/#_ftn2

Figure 10 et 20 : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-greentech-hydrofluv-hydrolienne-bientot-testee-loire-48708/>

Figure 16 : https://www.researchgate.net/figure/Blade-profiles-for-15-0-c-0-m-a-curved-airfoil-NACA-4518-b-straight-airfoil_fig3_236173533

Figure 17 : https://water.mecc.edu/courses/ENV195WWI/lesson3_2b.htm

Figure 19 : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-energies-marines-en-chiffres>

Figure 21 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_Kaplan

Figure 22 : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Laufrad-Soesetalsperre.jpg>

Figure 23 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_Pelton

Figure 24 : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00685850/PDF/Menchaca_ane_2011_archivage.pdf

Annexe A : Avantages et inconvénients des énergies éoliennes et solaires

L'énergie éolienne possède de nombreux avantages. En effet, le vent est une source d'énergie propre et renouvelable. La production d'électricité d'une éolienne est très écologique car elle ne produit aucun déchet ni CO₂. Elle est également assez sûre car la durée de vie d'une éolienne est estimée entre 20 et 25 ans et son démontage est rapide et écologique. Néanmoins, l'énergie éolienne dépend des masses d'air et de la puissance du vent, elle est donc intermittente¹. De plus, le bruit et l'impact sur le paysage ne sont pas négligeables. C'est pourquoi, l'idée de parcs éoliens offshore se développe. EDF a d'ailleurs annoncé en 2021 le lancement de la construction du parc éolien offshore dans le Calvados. Des éoliennes flottantes sont encore à l'étude. Cela pourrait être une solution car plus loin des côtes le vent est plus fort.

L'énergie solaire est une source inépuisable d'énergie de plus elle est idéale pour les sites isolés, difficiles d'accès ou éloignés des réseaux électriques. Lors de la production de l'énergie cette méthode a un faible impact environnemental, en effet elle ne contribue pas à l'effet de serre ni au réchauffement climatique contrairement aux énergies non renouvelables. Ces installations nécessitent également un entretien moindre en comparaison avec d'autres installations de production d'électricité. L'énergie solaire est très pratique, et très utilisée, dans le cas des satellites, étant la seule énergie utilisable au côté de l'énergie nucléaire, elle est donc préférable. La quantité d'énergie fournie étant variable selon les conditions quotidiennes et saisonnières il est donc difficile de prévoir les quantités d'énergies électrique pouvant être produites². Cette discontinuité rend difficile la satisfaction de la demande d'électricité à tout moment avec seulement de l'énergie solaire. Afin de contrer ce problème il devient nécessaire d'implanter des batteries de stockage pour l'énergie photovoltaïque ou de réservoir isolés dans le cas d'énergie solaire thermique. Le coût d'investissement est élevé pour obtenir un kilowatt en comparaison à d'autres sources d'énergies. La production de panneaux photovoltaïques nécessite beaucoup d'énergie et utilise souvent des sources d'énergies non renouvelables comme le charbon ce qui en fait une énergie ayant une empreinte carbone non négligeable. De plus, certains matériaux contenus dans la fabrication des cellules photovoltaïques sont dangereux et difficilement recyclables.

¹ Voir sur <https://plum.fr/blog/energie-ecologie/rendement-eolienne/#:~:text=En%20termes%20de%20rendement%2C%20une,puissance%20de%200%2C3%20kW>

² Voir sur <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire>

Annexe B : Energie thermique des mers et énergie osmotique

L'énergie thermique des mers³, autrement appelé l'énergie maréthermique, est une énergie qui utilise la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes pour produire de l'électricité. Cette énergie est applicable dans les zones intertropicales, et un prototype est en cours de développement à l'île de la Réunion. Aujourd'hui, le faible rendement et le coût important de cette nouvelle énergie sont la raison de sa non-application, c'est pourquoi elle est encore en phase de recherche et développement. Malgré tout, cette méthode pour produire de l'électricité est prometteuse. Le principe sur lequel s'appuie l'énergie thermique des mers est assez simple. Les océans captent l'énergie solaire de manière directe (rayonnement solaire) et de manière indirecte (rayonnement réfléchi par l'atmosphère terrestre). La capacité à capter les rayonnements solaires est optimale en zone intertropicale grâce au positionnement du soleil à 90°. Le rayonnement solaire diminue lorsque l'on se rapproche du fond, ainsi la température diminue et la masse volumique augmente. Tout cela fait que l'eau froide ne se mélange pas avec l'eau chaude de la surface.

Pour utiliser cette énergie, un différentiel de température de 20°C est nécessaire. En zone intertropicale, il fait 4°C à 1000m de profondeur, mais plus de 24°C en surface, ce qui remplit cette condition. Plusieurs éléments qui composent une unité de production ETM comme :

- un ensemble évaporateur-turbine-condenseur
- des conduites et des pompes d'alimentation en eau chaude et froide
- une infrastructure pour les équipements connexes

Cette nouvelle énergie renouvelable est au cœur de plusieurs enjeux : des enjeux techniques, car il y a des conditions topographiques précises pour pouvoir installer une unité de production ETM. Comme le fait d'avoir 1000 mètres de fond sur le lieu-dit ainsi qu'un écart de température de 20°C comme nous le disions précédemment. Des enjeux économiques, car il faut pouvoir produire de l'électricité 3 à 5 fois plus que celle produite par la centrale. Et enfin, des enjeux environnementaux, car il y a des risques par rapport à la mort des poissons entraînés par le pompage d'eau, ou encore la bio-salissure, les dépôts marins... Malgré tout, l'un des principaux avantages d'une centrale ETM est qu'elle produit 100 fois moins de CO₂ qu'une centrale électrique thermique.

³ Voir sur <https://www.maisondelamer.org/ressources/energies-marines-renouvelables/>

L'ETM peut aussi être utilisée pour produire de l'eau douce. L'eau froide peut aussi être récupérée et utilisée pour de nombreux usages tels que la réfrigération des bâtiments, l'élevage de poissons, l'alimentation des centrales électriques.

L'énergie osmotique est une énergie qui utilise la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce. Dans le dispositif, l'eau douce et l'eau salée sont séparés par une membrane semi-perméable. Le but est d'utiliser une hauteur d'eau ou une pression qui a été créée par la migration des molécules d'eau à travers la membrane. Ce dispositif exploite donc le système d'osmose. La pression d'eau assure un débit qui pourra être utilisé par une turbine pour produire de l'électricité.

L'énergie osmotique⁴ fait partie des énergies les moins développées par rapport à l'investissement et les recherches engagées. Aujourd'hui, une société norvégienne prénommée Statkraft a mis en service un prototype de centrale osmotique en novembre 2009. Le principe d'une centrale osmotique repose sur l'osmose, un concept chimique découvert vieux du 19ème siècle qui permet de comprendre les phénomènes de migration des molécules dans les solutions aqueuses. Selon le dictionnaire Larousse, l'osmose est un « transfert d'eau d'une solution diluée (hypotonique) vers une solution concentrée (hypertonique) au travers d'une membrane semi-perméable (perméable à l'eau, mais non aux grosses molécules en solution) ». Or dans une centrale osmotique, les deux réservoirs sont de concentrations saline différentes. C'est la raison pour laquelle les molécules d'eau vont migrer via la membrane de l'eau douce à l'eau de mer. L'effet s'arrête lorsque l'équilibre osmotique est atteint, c'est-à-dire lorsque nous sommes à l'équilibre de pression (même hauteur) et de concentrations (même quantité de sels) dans les deux solutions.

⁴ Voir sur <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-eau-salee-moteur-de-l-energie-osmotique>

Annexe C : Quelques exemples concrets

En Europe, la France est le second pays en termes de ressources marémotrices. En effet, c'est aussi le 2^{ème} espace maritime au monde. Elle possède 11 millions de km² de côtes et 3 façades maritimes. De nombreuses hydroliennes pourraient être implantées sur les côtes. On compte 3 sites en France où l'installation d'hydroliennes pourraient être très intéressantes⁵. Le passage de Fromveur en Bretagne. Les raz de Blanchard et de Barfleur situés sur la pointe du Cotentin. Ces sites possèdent des courants marins très puissants. Néanmoins de nombreux projets n'ont pas abouti car les littoraux sont très protégés.

D'après EDF, 2,5 GW d'électricités pourraient être produites en France grâce à l'énergie hydrolienne. Cela représente la quantité produite par 2 à 3 réacteurs nucléaires. C'est pourquoi de nombreuses questions se posent aujourd'hui face à l'énergie nucléaire. Le premier parc hydrolien, géré par EDF, a été installé en France en 2008. Plusieurs essais ont été réalisés jusqu'en 2016. Il est situé au large de l'île-de-Bréhat, face à la ville de Paimpol. Le projet final regroupe 2 turbines d'une puissance de 1 MW chacune. Chaque hydrolienne mesure 16 mètres de haut, pèse 850 tonnes et est placée à 40 ou 35 mètres de profondeur. Le projet est raccordé au réseau d'électricité et permet d'alimenter près de 3000 logements en électricité. L'hydrolienne est une énergie verte avec un fort potentiel en France.

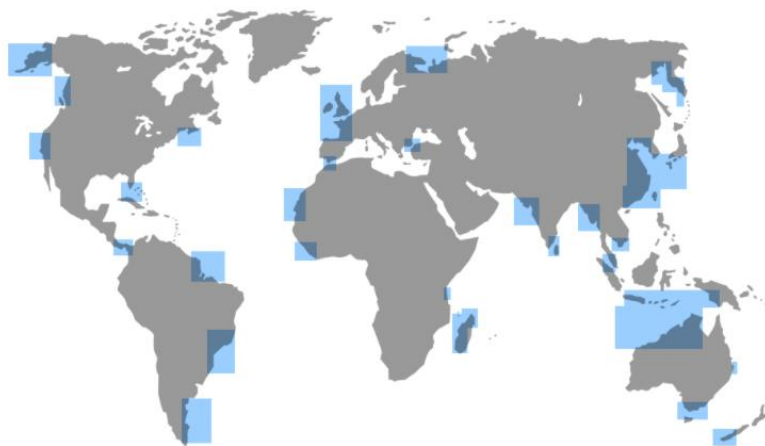


Figure 19 : Zones à fort potentiel pour les énergies marines

⁵ Voir sur <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/principe-et-fonctionnement-de-l-hydrolienne#:~:text=Une%20hydrolienne%20est%20une%20structure,est%20in%C3%A9puisable%2C%20renouvelable%20et%20r%C3%A9guli%C3%A8re>

D'après la commission européenne, la production d'électricité due aux énergies marines liées au courant et à la houle pourraient être de 100 GW d'ici 2050. En Europe, les principales zones pouvant accueillir ces installations sont La Manche, la mer du Nord et la mer d'Irlande.

Dans le monde, plusieurs fermes hydroliennes produisant de l'électricité sont installées. Par exemple au nord de l'Ecosse où une turbine de 1,5 MW fonctionne. La carte ci-dessus représente les zones à fort potentiel pour les énergies marines dans le monde.

Les principaux acteurs industriels⁶ de pointe dans ce domaine sont MCT (Marine Current Turbines), OpenHydro et Alstom Hydro. Le premier avait installé en 2008 l'hydrolienne SeanGen⁷ au large de l'Irlande du Nord. Elle était raccordée au réseau et a produit au total 11 GWh d'électricité. Elle a été mise hors service en 2016 à la fin de son cycle de vie. Une partie de la structure de SeaGen a été recyclée. C'est le deuxième qui installe les deux hydroliennes immergées sur le parc EDF de Paimpol en France. Enfin, le dernier développe des turbines à 3 pales de 1,4 MW de puissance.

⁶ Voir sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroliennes#:~:text=Les%20hydroliennes%20de%20type%20SeaGen,4%20MW%20selon%20le%20groupe>

⁷ Voir sur <https://www.energiesdelamer.eu/2019/08/01/l-hydrolienne-seagen-a-terminer-sa-carriere/>

Annexe D : L'hydrolienne Hydroquest



Figure 20 : Hydrolienne Hydroquest

On peut voir l'hydrolienne Hydroquest⁸ en taille réelle représentée sur cette image. Elle est ici à l'horizontale. Elle est composée de 2 colonnes, chacune composée de 4 turbines.

Cette hydrolienne a été testée dans un canal d'amenée d'une installation hydroélectrique EDF. Chaque turbine mesure 50 cm de diamètre. Cette hydrolienne est capable de produire de l'électricité à partir d'un courant de 1 m/s, soit un cours d'eau plutôt calme. La puissance de l'installation devrait être comprise entre 30 et 50 kW. A l'avenir, l'entreprise souhaite développer et commercialiser dans le monde cette hydrolienne. L'élément de carénage a une forme asymétrique ce qui permet de créer un effet d'entonnoir pour permettre d'accélérer le mouvement de l'eau qui agit sur les pales du rotor. Néanmoins, la puissance obtenue reste inférieure à celles d'autres installations hydrauliques exploitées en France. Mais cette hydrolienne pourrait être respectueuse de l'environnement, avec un impact visuel et sonore très réduit et composée de matériaux recyclables.

⁸ Voir sur <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-greentech-hydrofluv-hydrolienne-bientot-testee-loire-48708/>

Annexe E : Autres turbines existantes

Il existe de nombreux types de turbines qui sont utilisées dans différents cas pour différents résultats. Les trois grands types de turbines utilisées dans des barrages et autres installations marines ayant pour but de transformer de l'énergie sont les types Kaplan, Francis et Pelton. Ce sont des turbines horizontales à différents nombre et forme de pales.



Figure 21 : Turbine Kaplan



Figure 22 : Turbine Francis



Figure 23 : Turbine Pelton

Il existe également différentes turbines verticales qui sont principalement utilisées dans des hydroliennes à axe vertical. Elles ont des propriétés variées mais sont assez peu utilisées car pas encore assez démocratisées. De plus, les turbines de types Darrieus sont plus fréquemment utilisées dans des éoliennes, sur terre ou en mer, ou pour des hydroliennes domestiques.

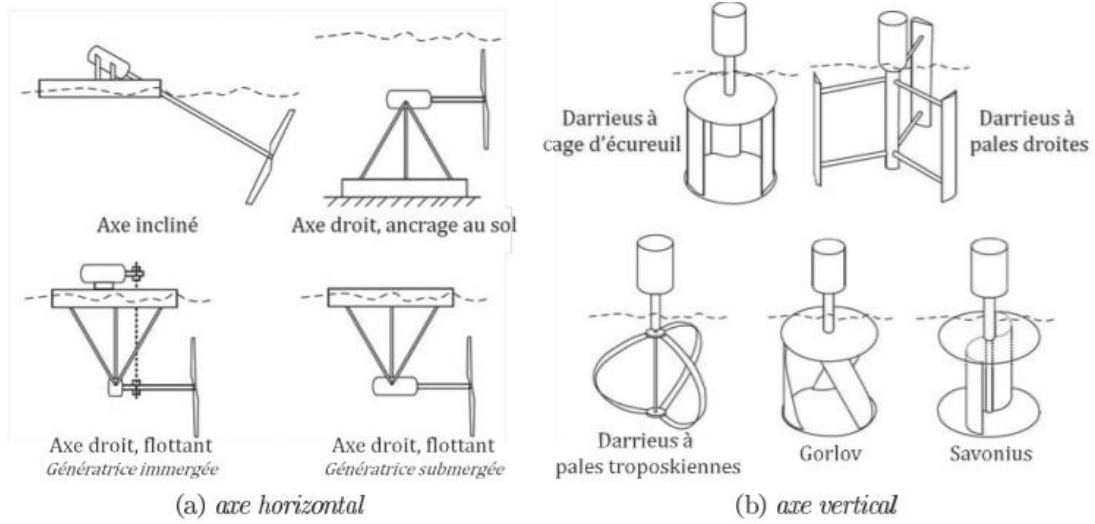


Figure 24 : Différentes hydroliennes à axe vertical

Annexe F : Etude des matériaux

Une autre piste de recherche intéressante à l'élaboration de notre hydrolienne est le choix du matériau. Le matériau choisi pour la pale de la turbine doit donc respecter certains critères.

Tout d'abord, il ne doit pas s'oxyder et doit durer dans le temps ; afin d'avoir le meilleur rendement possible, il doit aussi être léger et résistant. De plus, nous voudrions faire en sorte que le coût ne soit pas très élevé que ce soit au niveau de l'achat ou de l'entretien de la turbine. Afin de répondre aux enjeux écologiques, il nous semble aussi important de chercher à minimiser l'impact environnemental de notre activité (en privilégiant des méthodes d'extraction et de fabrication les plus vertes possible par exemple). Nous allons nous intéresser plus particulièrement au matériau utilisé pour les pales des turbines.

Dans le cadre de notre projet, nous aimerions savoir quelles modifications nous pourrions apporter à notre travail pour l'améliorer ; ainsi, nous souhaitons nous intéresser aux innovations technologiques du moment qui pourraient être pertinents. C'est ainsi que nous avons trouvé un article qui parlait de l'utilisation de la structure de certains coquillages en tant que matériau.

Une équipe de chercheurs du MIT⁹ s'est intéressée à la structure des conques afin de pouvoir concevoir des casques et des protections militaires plus légères et plus robustes. Tout d'abord, une conque est une coquille de divers mollusques gastéropodes, souvent utilisée comme instrument de musique à vent. Dans la nature, cette coquille est capable de résister à la pression de mâchoires de prédateurs ou encore au cisaillement des pinces des crabes. Les molécules principales qui composent les carapaces de tortues, d'escargots ou d'espèces marines sont le carbonate de calcium ainsi que les protéines. Ce sont des matériaux composites¹⁰. Ces derniers permettent de meilleures performances grâce à la combinaison de matériaux aux propriétés complémentaires. Selon la théorie de l'évolution de Darwin, nous pouvons dire que l'évolution aurait privilégié un matériau remarquable pour sa solidité.

Ce qui fait de ce coquillage un matériau léger et résistant, n'est pas sa composition (carbonate de sodium) mais son architecture microscopique. Le coquillage se divise en fait sur son épaisseur en 3 couches ; chaque couche utilise un motif avec une orientation

⁹ Voir sur <https://www.letemps.ch/sciences/materiaux-vrais-nature>

¹⁰ Voir sur <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/des-secrets-dans-la-coquille-1339.php>

différente à chaque fois. Grâce à cette disposition des atomes, la structure globale absorbe d'autant mieux les ondes de choc.

A l'aide d'une imprimante 3D, les chercheurs ont produit une plaque à la géométrie similaire, et ont cherché à visualiser la propagation des fissures sur la plaque grâce à un appareil simulant l'impact d'une balle. Le résultat montre que ce matériau similaire à la conque possède une efficacité de 85% contre la propagation des fissures, tandis qu'il est de 70% pour un arrangement composite de fibres traditionnelles.

Si nous parvenons à imiter cette structure, nous pourrions fabriquer des pièces légères, résistantes, et peu chères. Ainsi, un plastique imitant la structure microscopique des conques pourrait devenir aussi résistant que du métal.

Malgré tout, l'ingénierie d'aujourd'hui parvient à produire des matériaux ayant aux plus deux types de structures à deux échelles différentes. C'est pourquoi le projet est toujours en cours, mais il est très prometteur.

A notre échelle d'étudiant de l'INSA Rouen, il est difficile de pouvoir utiliser des coquillages afin d'en faire un matériau pour notre pôle. Ainsi, nous allons continuer d'utiliser les matériaux jusqu'à lors utilisés (matériaux composites). Il est néanmoins intéressant de rester informé sur les nouvelles découvertes technologiques afin de toujours rester dans l'ère du temps et des techniques.

Annexe G : Calculs théoriques

Données :

Débit de la pompe = 3000 L/h
 Diamètre de la turbine $d_t = 15 \text{ cm}$
 Hauteur de la turbine $h_t = 15 \text{ cm}$
 Diamètre de l'axe de rotation $d_a = 24 \text{ mm}$

- Pompe : débit = 3000 L/h

$$\text{débit} = 3 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1\text{L} = 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$\text{débit} = \frac{3}{3600} = \frac{1}{1200} \text{ m}^3/\text{s} \quad (1\text{h} = 3600 \text{ s})$$
- Surface S' : $S' = d_t \cdot h_t$
 Pour simplifier les calculs, nous avons réduit la surface à un rectangle.
 $S' = 15 \times 15 = 225 \text{ cm}^2$
- Vitesse de l'eau arrivant sur la turbine :

$$v = \frac{\text{débit}}{S'} = \frac{1}{1200 \times 225 \cdot 10^{-4}} = \mathbf{0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$$
- Surface S balayée par les pales : elle se réduit à une section de forme carrée.

$$S = h_t(d_t - a_t)$$

$$S = 15(15 - 2,4)$$

$$S = 189 \text{ cm}^2$$

$$\mathbf{S = 1,89 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2}$$

Ainsi, on peut calculer la puissance cinétique :

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 189 \cdot 10^{-2} \cdot 0,037^3$$

$$\mathbf{P_{\text{cinétique}} = 4,787 \cdot 10^{-4} \text{ W}}$$

Au passage de la turbine, on a :

$$P_{\text{mécanique,turbine}} = \frac{16}{25} \cdot 4,787 \cdot 10^{-4} = \mathbf{3,064 \cdot 10^{-4} \text{ W}}$$

Le système d'engrenage a un rendement théorique de 95% :

$$P_{\text{mécanique,engrenage}} = \frac{95}{100} \cdot 3,064 \cdot 10^{-4} = 2,911 \cdot 10^{-4} \text{ W}$$

Etant donné que nous avons 3 turbines reliées chacune à un système d'engrenage, cela augmente la puissance mécanique récupérée par le système d'engrenages.

On obtient ainsi : $P_{\text{mécanique,engrenage}} = 3 \times 2,911; 10^{-4} = 8,733 \cdot 10^{-4} \text{ W}$

Enfin, le rendement de la dynamo est de 65% donc :

$$P_{\text{électrique}} = \frac{65}{100} \cdot 8,733 \cdot 10^{-4} = 5,676 \cdot 10^{-4} \text{ W}$$

$$P_{\text{électrique}} = 0,569 \text{ mW}$$

	A	B	C	D	E	F
débit de la pompe (L/h)		7000	debit (m3/s)	0,00194444	S' = dt ht (cm2)	225
dt		15			v = débit/S' (m/s)	0,08641975
ht		15			S (m2)	0,0189
da		2,4				
Pcinétique (W)		0,00609917				
Pméca,turbine (W)		0,00390347				
Pméca,engrenage (W)		0,01112489				
Pélec (W)		0,00723118				
pélec (mW)		7,23117817				

Figure 25 : Calcul sur Excel de la puissance électrique théorique en sortie pour une pompe ayant un débit de 7000 L/h

	A	B	C	D	E	F
1 débit de la pompe (L/h)		14200	debit (m3/s)	0,00394444	S' = dt ht (cm2)	225
2 dt		15			v = débit/S' (m/s)	0,17530864
3 ht		15			S (m2)	0,0189
4 da		2,4				
5						
6 Pcinétique (W)		0,05091454				
7 Pméca,turbine (W)		0,0325853				
8 Pméca,engrenage (W)		0,09286811				
9 Pélec (W)		0,06036427				
10 pélec (mW)		60,3642732				

Figure 26 : Calcul sur Excel de la puissance électrique théorique en sortie pour une pompe ayant un débit de 14200 L/h