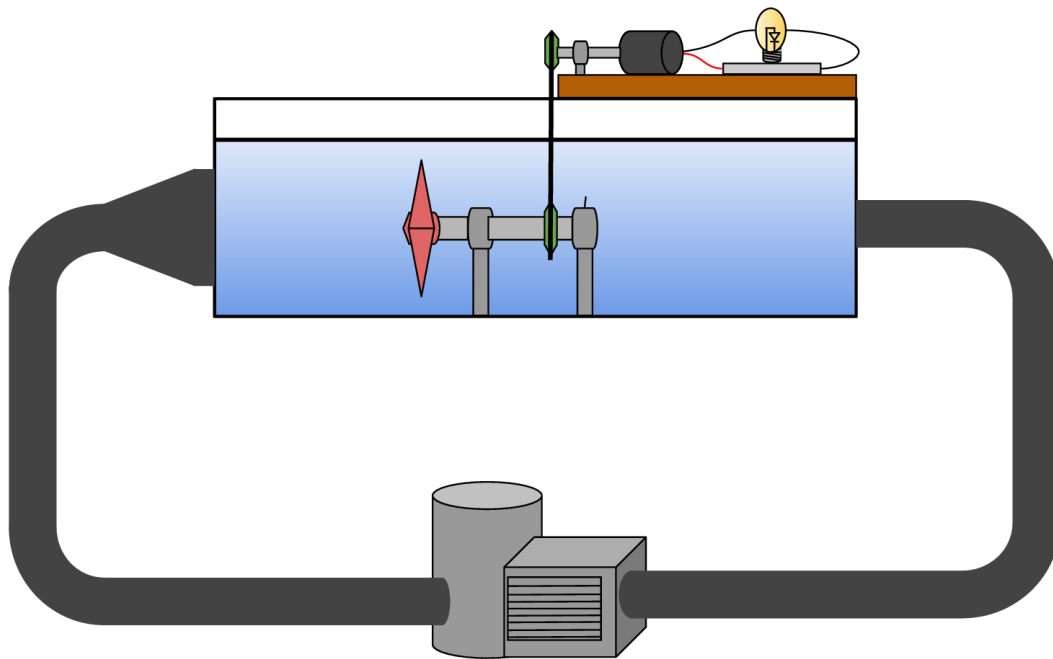


Conception d'un banc d'essais à énergie hydraulique



Étudiants :

Quentin DENIZE,
Jean-Baptiste LE GAC
Ilian REYRE

Guillaume FULCONIS
Claire LOCQUET
Killien SAINTILAN

Enseignant-responsable du projet :

Abdellah HADJADJ

Remerciements.

Tout d'abord, nous tenons à remercier Monsieur Hadjaj, qui nous a encadrés tout au long du projet. Son aide, sa disponibilité et ses précieux conseils nous ont permis d'acquérir une vision précise de nos objectifs, et d'en tirer des connaissances importantes pour notre cursus ingénieur.

Merci également à Monsieur Breteau, qui nous a été d'une grande aide dans la réalisation de notre maquette en conception assistée par ordinateur.

Nous souhaitons aussi remercier Monsieur Yon et Monsieur Honoré, responsables de la matière.

Finalement, nous remercions Pascal Williams et Hélène Rade pour leurs conseils d'un point de vue technique.

Table des matières

Introduction	5
1 Energies renouvelables, leurs utilités	6
1.1 Energie solaire	6
1.1.1 Différents moyens d'exploitation de l'énergie solaire	6
Solaire thermique	6
Solaire thermodynamique	6
Solaire photovoltaïque	7
1.1.2 Avantages et limites du solaire	7
1.1.3 Quel avenir pour le solaire?	7
1.2 Energie éolienne	8
1.2.1 Différents types d'éoliennes	8
1.2.2 Mécanisme d'une éolienne	8
Mécanisme général	8
Optimisation de la production	9
1.2.3 Perspectives d'avenir	10
1.3 Types d'énergies maritimes et marines	10
1.3.1 Energie marémotrice	10
1.3.2 Energie des courants marins	11
2 Conception	13
2.1 Objectifs de conception	13
2.1.1 Projet initial	13
2.1.2 Modifications du projet liées à l'impossibilité de réaliser les manipulations	13
2.2 Conception théorique du banc	14
2.2.1 Choix et solutions techniques	14
Récupération de l'énergie hydraulique	14
Dimensionnement du bassin	14
Choix d'une turbine adaptée	15
Optimisation des roulements	16
Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique: la dynamo	17
Agencement du montage	17
Choix d'une pompe	18
Optimisation de l'écoulement: la tuyère	18
2.2.2 Montage final	19
3 Limites de la théorie face à la réalisation expérimentale, pistes d'amélioration	21

3.1	Calculs: justification de nos choix	21
	Etude 1: A débit constant, on compare deux hypothèses de montage en modifiant la taille de la turbine	24
	Etude 2: A débit constant, on choisit de modifier la taille de la turbine	25
	Etude 3: On sélectionne une turbine et on modifie théoriquement le débit de la pompe	26
3.2	Limites de nos recherches théoriques	27
3.2.1	Détermination de la vitesse de rotation de l'hélice	27
	Première piste: le coefficient TSR	27
	Deuxième piste: les coefficients de Rateau	28
3.3	Pistes d'amélioration	29
 Conclusion		 31
 Bibliographie		 32
 Annexe A : L'origine des courants		 34
 Annexe B : Autres types d'énergies maritimes		 36
 Annexe C : Nombre de pales		 39
 Annexe D : Les différentes turbines existant à ce jour		 40
 Annexe E : La dynamo		 44
 Annexe F : Application numérique		 46

Introduction

Les énergies fossiles, bien que très polluantes lors de leur exploitation ou de leur extraction, sont aujourd’hui encore la source majoritaire de production d’électricité, malgré l’apparition de technologies permettant l’exploitation efficace d’énergies alternatives et renouvelables. Ainsi, en 2017, les énergies renouvelables ne représentaient que 25% de la production mondiale d’électricité, largement dominées par le charbon (à 38%), et cette part a même diminué depuis les vingt dernières années. Cependant, les énergies renouvelables proposent des avantages incompatibles avec les énergies fossiles, et ceux-ci sont leurs qualités dans la transition vers une production plus durable. En effet, elles utilisent des phénomènes naturels comme le rayonnement solaire, le vent, les marées ou encore la chaleur de la terre, elles sont par conséquent inépuisables et peuvent parfois être qualifiées de “gratuites”. Elles ont également pour la plupart une empreinte carbone moins importante que les énergies fossiles lors de leur exploitation, et sont moins nuisibles à notre santé. Ces énergies proposent donc une alternative intéressante aux moyens conventionnels de production d’électricité.

Nous avons voulu, à travers ce projet, illustrer ce qu’il est possible de mettre en place pour exploiter l’une de ces alternatives. Nous avons choisi pour cela l’énergie hydraulique, qui est générée naturellement par un courant marin dans les océans, les mers ou même les cours d’eau.

La première partie du corps de ce rapport sera dédiée à l’étude des différentes énergies renouvelables exploitables à ce jour, et des problématiques liées à chacune d’entre elles. Dans la seconde partie sera détaillée la conception du banc d’essai à énergie hydraulique, de la définition des objectifs de conception jusqu’au modèle final que nous avons réalisé. Enfin, la troisième partie sera consacrée aux limites et alternatives que nous avons trouvé à notre modèle, tout en expliquant et justifiant les calculs que nous avons effectué lors de sa conception.

1 Energies renouvelables, leurs utilités

1.1 Energie solaire

L'énergie solaire est utilisée depuis très longtemps par l'Homme. En effet, dès l'Antiquité elle était utilisée, notamment par les Grecs pour allumer la flamme olympique par le biais de jeux de miroirs. Les premières applications pratiques apparaissent au XVII^{ème} siècle, mais ce n'est qu'en 1839 que l'effet photovoltaïque est découvert par Edmond Becquerel. Robert Millikan est le premier à produire de l'électricité à partir d'une cellule solaire en 1916. L'énergie solaire progressera ensuite grâce à la conquête spatiale car elle est le seul moyen, en dehors du nucléaire, de fournir de l'énergie en orbite de manière constante. Depuis, ses applications se sont multipliées et sont devenues plus abordables.

1.1.1 Différents moyens d'exploitation de l'énergie solaire

Solaire thermique

Le solaire thermique consiste à utiliser la chaleur contenue dans les rayons du Soleil. Il existe plusieurs utilisations de cette chaleur: la technologie solaire active et la technologie solaire passive.

La technologie solaire active correspond aux utilisations à basse et moyenne température de la chaleur solaire. Cette chaleur est collectée par des capteurs solaires thermiques sur le toit des bâtiments. Elle est alors transmise à un fluide caloporteur afin de produire de l'eau chaude. Cette eau chaude peut alors être utilisée pour l'utilisation quotidienne d'eau chaude, le chauffage au sol ou encore rafraîchir un bâtiment.

La technologie solaire passive quant à elle ne requiert pas de capteurs solaires, mais elle utilise à profit le Soleil dans le but d'éclairer ou de chauffer des bâtiments. Une architecture et des matériaux adéquats optimisent cette source d'énergie gratuite¹.

Solaire thermodynamique

Un système solaire thermodynamique capte les rayons du Soleil en orientant le flux des protons à l'aide de miroirs. Ce système permet d'atteindre des températures allant de 250 à 1 000°C. Il est donc possible de les utiliser dans des processus industriels pour générer de l'électricité, générer de l'hydrogène ou encore dessaler la mer.

Les centrales solaires thermodynamiques font converger les rayons solaires grâce à des miroirs (en grande quantité) vers un fluide caloporteur. Ces miroirs sont mobiles afin de pouvoir suivre le mouvement du Soleil, et donc d'optimiser le rendement tout au long de la journée. Le fluide, chauffé par les rayons du soleil, produit de l'électricité grâce à des turbines à vapeur ou à gaz. Il existe 4 grands types de centrales thermodynamiques: les centrales à miroirs cylindro-paraboliques, les centrales à miroir de Fresnel, les centrales à tour et les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling².

Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie issue de la transformation des rayons du Soleil collectés par une cellule photovoltaïque. Ces cellules sont produites avec des matériaux semi-conducteurs. En effet, au contact de la lumière ils émettent des électrons qui en circulant dans un circuit fermé produisent de l'électricité. L'électricité est donc directement produite à partir du rayon lumineux. Une cellule est composée de 2 types de matériau semi-conducteur : un avec un excès d'électrons et l'autre avec un déficit d'électrons. On y ajoute des cristaux afin d'améliorer la conductivité. La figure 1 ci-dessous détaille le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

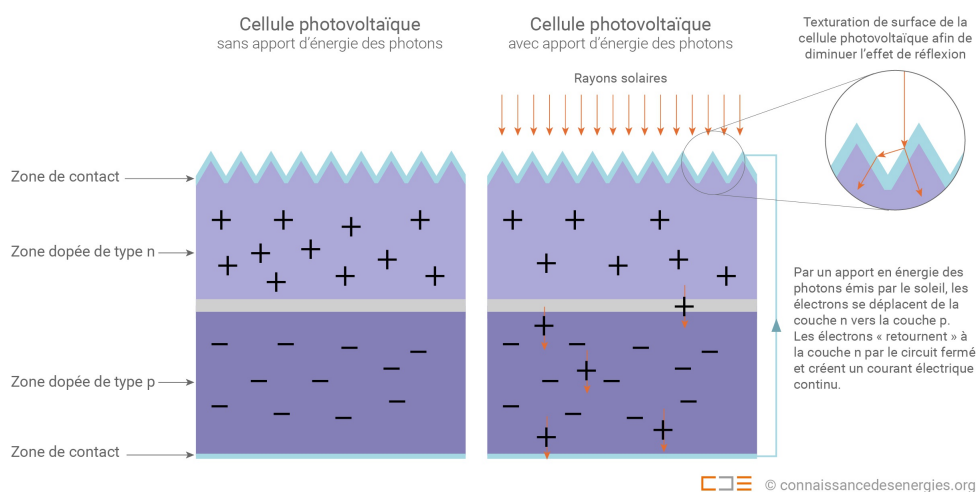


Figure 1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.1.2 Avantages et limites du solaire

Le principal avantage de cette énergie est qu'elle est inépuisable et non polluante. De plus, l'énergie solaire thermique permet de réaliser des économies en réduisant les factures d'électricité. Nous pouvons aussi ajouter que le rendement énergétique est positif. En effet, un panneau photovoltaïque produit entre 9 et 14 fois l'énergie nécessaire à le fabriquer. Enfin, les frais de maintenance sont relativement faibles.

Néanmoins de telles installations présentent des inconvénients. Le coût de ces installations est le principal frein à l'achat de ces panneaux. Les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie allant de 20 à 30 ans, et ils perdent de leur efficacité au fil des années. De plus, étant composés de déchets toxiques tels que le cuivre ou le chrome, leur recyclage pose problème³.

1.1.3 Quel avenir pour le solaire?

La recherche actuelle vise principalement à améliorer les systèmes actuels et à les rendre moins coûteux. De nouvelles innovations voient néanmoins le jour, telles que les routes solaires, les briquets et fours solaires, le sac à dos solaire ou encore les fenêtres photovoltaïques.

Aujourd'hui, l'énergie solaire constitue moins de 1% de l'énergie mondiale. Ce pourcentage est en constante évolution ces dernières années. De plus l'énergie solaire est loin d'être exploitée au maximum dans le monde et le soleil est une source d'énergie inépuisable. On peut donc penser qu'à l'avenir, le soleil représentera une plus grande part dans l'énergie mondiale⁴.

1.2 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une technique de production d'énergie très ancienne. Le vent est utilisé dès l'Antiquité en Grèce et en Perse, notamment pour irriguer les cultures et écraser du grain. C'est au XIII^{ème} siècle qu'apparaissent les premières éoliennes à axe horizontal. Dorénavant, on commence à étudier l'influence des différents paramètres de l'éolienne comme le nombre ou la forme des pales. Les aérogénérateurs font leur apparition au XIX^{ème} siècle et les premières éoliennes produisant de l'électricité voient le jour. Cependant, l'énergie éolienne demeure plus coûteuse que d'autres sources d'énergies, comme les énergies fossiles, ce qui fait qu'elle reste peu commercialisée jusqu'à la fin de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle⁵.

1.2.1 Différents types d'éoliennes

Il existe plusieurs types de capteurs éoliens⁶ : les capteurs à axe horizontal et ceux à axe vertical. Les premiers sont ceux utilisés actuellement car ils ont un meilleur rendement. Ils sont utilisés dans la production d'électricité, et leurs hélices contiennent deux ou trois pales. Les éoliennes les possédant sont plus solides et ont un coût plus faible que celles à axe vertical.

1.2.2 Mécanisme d'une éolienne

Mécanisme général

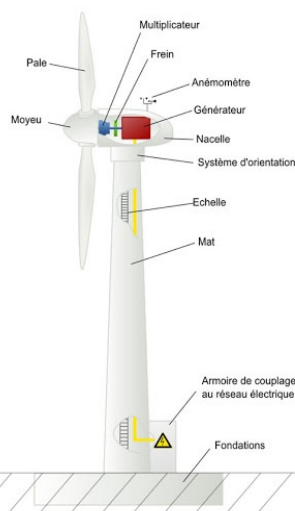


Figure 2. Schéma d'une éolienne

Le vent fait tourner les pales de l'éolienne, qui mettent en rotation un moyeu. La vitesse du vent doit être d'au moins de 15 km/h pour que l'hélice commence à tourner. Lorsque le vent pousse les pales de l'hélice, il entraîne la rotation du rotor dont le moyeu, solidaire des pales, est situé au centre de ces dernières, comme vous pouvez le voir sur la figure 2 ci-dessus. Cela entraîne donc la rotation de l'arbre principal à l'intérieur de la nacelle. Cet arbre est lié à un multiplicateur. En effet, la rotation de l'arbre est faible (entre 10 et 15 trs/min) et son couple est élevé. Or un générateur a besoin d'une vitesse de rotation bien plus élevée pour fonctionner (entre 1000 et 2000 tours/min), le multiplicateur sert donc à élever la vitesse de rotation grâce à un système d'engrenages où le rapport entre ces derniers permet de modifier la vitesse de rotation⁷. Une fois la vitesse atteinte, un générateur transforme cette rotation en énergie électrique et produit donc un courant. Ce générateur fonctionne selon le principe d'induction électromagnétique. Un électroaimant est fixé sur la partie en rotation (rotor) et des composants fixes autour (stator). Lorsqu'il y a une rotation, les positions des pôles nord et sud de l'électroaimant sont modifiées en permanence créant un champ magnétique variable et donc un courant induit dans les bobines. Le courant électrique obtenu est alors alternatif et est transformé en courant continu par un système de pont de diode. La puissance électrique ainsi produite va vers la base de l'éolienne dans un transformateur élévateur, puis cette puissance est soit dirigée vers le réseau de distribution, soit stockée dans des batteries⁸.

Optimisation de la production

Une éolienne ne fonctionne pas tout le temps à sa puissance nominale. D'après différentes sources elles seraient en marche entre 80% et 90% du temps⁹. Pour que la production soit maximale, un capteur, situé sur la nacelle, permet de faire en sorte que l'éolienne soit toujours dans l'axe du vent, en faisant pivoter l'hélice. En effet le vent doit avoir une direction parallèle à la nacelle pour que la production soit optimale. L'inclinaison des lames peut aussi être ajustée pour être dans la direction de la vitesse relative du vent. Les pales d'éoliennes sont positionnées de manière inclinée afin de s'aligner avec la direction de la vitesse du vent.

Le fonctionnement d'une éolienne dépend aussi de la vitesse du vent, il faut qu'elle soit comprise entre 15 km/h et 90 km/h (voir figure 3). En dessous de 15 km/h le vent n'est pas assez puissant pour faire tourner l'hélice. Lorsque le vent est trop fort et dépasse les 90 km/h, les pales se mettent en drapeau, et l'éolienne s'arrête pour des raisons de sécurité¹⁰.

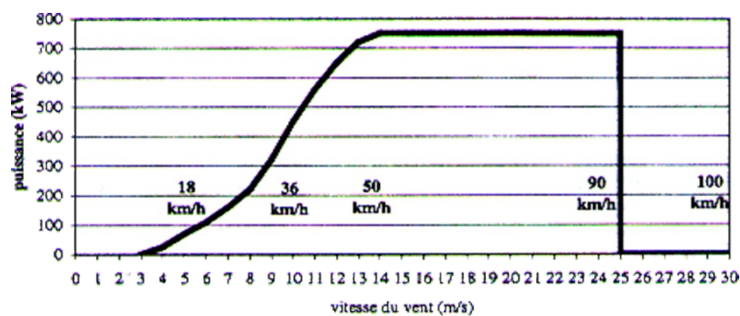


Figure 3. Graphe de la puissance produite en fonction du vent

1.2.3 Perspectives d'avenir

Aujourd'hui, l'énergie éolienne ne fait plus consensus au sens de l'opinion publique. A cause du bruit et de l'impact sur les paysages, personne ne souhaite voir un parc éolien s'implanter à côté de chez soi. Une des solutions serait les parcs éoliens off-shore, c'est-à-dire des éoliennes implantées en mer. Actuellement, il n'en existe pas en activité en France, mais 6 sont en cours de construction. Ces éoliennes sont soumises à plusieurs contraintes : elles doivent être reliées au sol par des fondations de 50 mètres maximum, ce qui limite leur zone d'installation. Mais la recherche sur ce nouveau type de parc éolien est en pleine expansion. La technologie des éoliennes flottantes, encore à l'état de prototype, est peut être la solution. En effet, l'absence de fondations permettra une installation moins chère, plus loin des côtes, là où le vent est plus fort, et limitera l'impact environnemental en utilisant moins de matériaux¹¹.

Un des problèmes de l'énergie éolienne est son irrégularité, car elle est totalement dépendante du vent. Les éoliennes ne tournent pas en continu, soit parce que le vent est trop faible, soit parce qu'il est trop fort. Les éoliennes doivent donc venir en complément d'autres sources d'énergie.

1.3 Types d'énergies maritimes et marines

Les mers et les océans recouvrent près de 71% de la surface du globe et les richesses qui s'y trouvent sont grandes. En effet, les espaces maritimes sont répartis entre les pays côtiers et c'est ainsi qu'avec son vaste territoire d'outre-mer, la France possède le deuxième plus grand espace maritime au monde (10 165 095 km²).

C'est seulement au début du XXIème siècle que l'énergie maritime est considérée sérieusement, et encore plus aujourd'hui avec la volonté de réussir une transition écologique viable. Au-delà de l'aspect environnemental, la France pourrait donc en tirer un avantage économique énorme car elle possède un vaste territoire marin et maritime.

1.3.1 Energie marémotrice

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant).

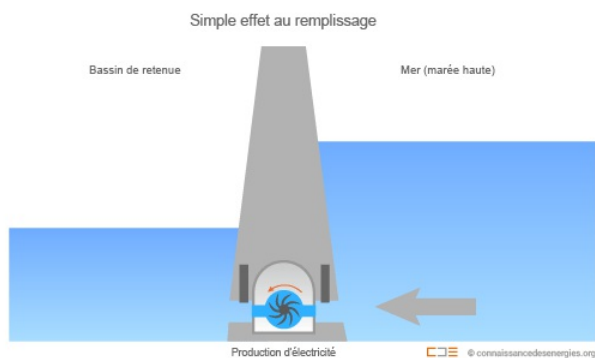


Figure 4. Fonctionnement d'une usine marémotrice

À l'inverse des hydroliennes qui captent l'énergie cinétique des courants de marée, les sites marémoteurs s'appuient sur une énergie potentielle. Cette source d'énergie exploite la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage pour produire de l'électricité (système représenté sur la figure 4).

Les usines marémotrices sont généralement implantées au niveau d'un estuaire. Les conditions naturelles favorables à l'implantation d'un site marémoteur sont assez simples. Il faut tout d'abord un marnage important, entre 10 et 15 mètres dans l'idéal même si un marnage de 5 mètres est exploitable. Ces installations nécessitent une profondeur comprise entre 10 et 25 mètres par rapport au niveau d'eau à marée basse (basse mer). Un substrat rocheux (ou sablo-graveleux) est requis pour recevoir les fondations.

Il existe deux types d'infrastructures : les simples bassins et les doubles bassins. Le simple bassin est divisé en 2 sous catégories : les bassins à effet simple et les bassins à effet double. Le bassin à effet simple produit de l'électricité soit lors de son remplissage, soit lors de la phase de vidage. Les bassins à double effet allient le système de bassins à simple effet au vidage et au remplissage. L'avantage est qu'ils produisent plus d'électricité dans la journée. Le site de la Rance en Bretagne repose sur ce système. Les sites marémoteurs sont majoritairement implantés en France, au Royaume-Uni et en Corée du Sud. Ces infrastructures possèdent bon nombre d'avantages. Tout d'abord, leur durée de vie peut dépasser les 100 ans. De plus, les coûts d'installation et d'entretien sont plutôt faibles, rendant l'énergie marémotrice l'une des plus rentables. Enfin, ce type d'énergie reposant sur le phénomène des marées, la quantité d'électricité produite durant une période donnée est facilement prédictible.

En revanche, lors des périodes où le coefficient de marée est faible (inférieur à 70), il est clair que l'électricité produite est moindre. Les impacts environnementaux potentiels (en particulier une perturbation de l'écosystème durant la phase de travaux d'une centrale) sont souvent jugés comme rédhibitoires pour généraliser des systèmes marémoteurs sur les côtes à fort marnage¹².

1.3.2 Energie des courants marins

“Contrairement aux vagues qui sont une onde mécanique superficielle, les courants marins constituent un déplacement massif d'eau de mer”

FUTUREMAG-ARTE

Les courants marins sont en partie provoqués par le phénomène des marées et offrent une force motrice importante. Bien que leurs vitesses soient plutôt faibles (10 à 20 km/h), les débits et la densité de l'eau de ces mouvements constituent des avantages incontestables.

Les courants marins sont exploités par des systèmes nommés hydroliennes. Ces dernières se rapprochent des éoliennes de par leur fonctionnement et leur design similaire. Une des grandes différences entre ces 2 installations réside dans le fait que l'intensité du vent ne soit pas prédictible longtemps à l'avance, contrairement aux forces des marées et des courants qui peuvent être déterminées très précisément.

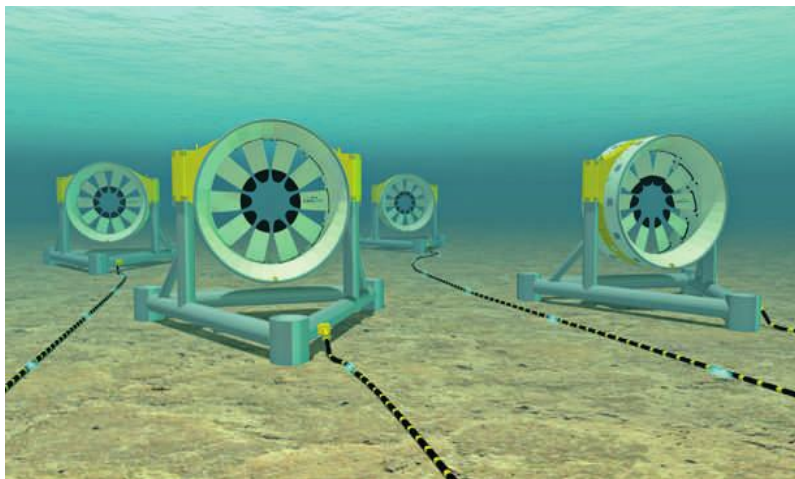


Figure 5. représentation 3D d'un champ d'hydroliennes

L'hydrolienne est très facile d'installation. En effet celle-ci ne nécessite pas de travaux importants. Pour la mise en place, l'hydrolienne est tout simplement emmenée à l'endroit nécessaire par une barge avant d'être fixée grâce à des socles de plusieurs centaines de tonnes, comme sur la figure 5 ci-dessus.

Ce dispositif dispose d'un bon potentiel électrique car il peut s'étendre à de multiples endroits du globe. Néanmoins, actuellement il n'est que très peu exploité car ces infrastructures possèdent plusieurs inconvénients majeurs.

Le coût très élevé des hydroliennes est un réel frein à leur développement dans le monde. L'installation, bien qu'assez simple, est très coûteuse. L'entretien l'est également à cause de la corrosion des matériaux. Enfin, les pêcheurs dans les chalutiers sont réticents à l'installation de ces appareils. Ils considèrent que l'environnement aquatique peut être perturbé et que la zone de pêche est réduite. En effet, les espèces sont susceptibles de se blesser avec les pales et peuvent également être bouleversées par les turbulences générées par la rotation des pales. Le Royaume-Uni, la France et la Norvège sont les pays les plus disposés à exploiter cette énergie¹³.

Il existe d'autres énergies marines et maritimes qui sont exploitées dans le monde de manière minoritaire, celles-ci sont détaillées dans l'annexe B.

2 Conception

2.1 Objectifs de conception

2.1.1 Projet initial

Ce projet, en plus de contenir une étude générale des différentes énergies renouvelables exploitées à ce jour, avait une dimension expérimentale majeure. Ainsi, l'objectif principal de celui-ci était la conception d'un banc d'essai transformant de l'énergie hydraulique en énergie électrique, en quantité mesurable. Ce banc aurait eu un usage pédagogique, pour effectuer notamment des démonstrations. Ce concept très large nous laissait une grande liberté de réalisation et d'innovation, cependant nous nous sommes imposés dès le début du projet quelques contraintes. Celles-ci nous ont semblées pertinentes et logiques pour réaliser un banc qui soit représentatif de ce qu'il est possible de réaliser en taille réelle, et dans dans un contexte marin. Nous avons donc écarté les types d'installations qui nécessitent une zone géographique particulière (un estuaire, une côte...) pour se limiter à celles que l'on peut mettre en place dans n'importe quelle zone d'eau où se trouve un courant marin. De plus, nous voulions que notre banc soit de taille réduite, transportable, réutilisable et avec un budget raisonnable et évalué. Nos objectifs principaux étaient d'obtenir à la fin des transformations énergétiques une puissance électrique utilisable (par exemple suffisante pour alimenter une ampoule LED). Nous voulions également être capable d'effectuer un calcul de rendement, et d'optimiser les paramètres variables de notre installation pour améliorer celui-ci (notamment les caractéristiques des éléments composant le système: surface de la pale d'une hélice et ses dimensions, vitesse du courant artificiel, rapports d'engrenages, rendement (capacité) de l'alternateur/de la dynamo, etc).

2.1.2 Modifications du projet liées à l'impossibilité de réaliser les manipulations

Au vu de la situation actuelle, et par conséquent de l'impossibilité de réaliser un banc "physique", nous n'avons plus la possibilité d'y effectuer des mesures expérimentales. Ces dernières nous auraient permis de calculer des rendements, de compléter nos calculs théoriques et d'optimiser notre système. La dimension expérimentale du projet est devenue impossible à mettre en place. Cela a nécessité quelques modifications de nos objectifs initiaux. Nous nous sommes donc principalement concentrés sur l'approche théorique du banc, et l'imagination de solutions pour pouvoir effec-

tuer nos calculs de rendements sans réaliser de mesures. De plus, ce projet étant amené à se poursuivre les années suivantes, nous nous sommes aussi donnés comme objectif de proposer dans notre rapport des composants alternatifs et des pistes d'amélioration pour notre banc.

2.2 Conception théorique du banc

2.2.1 Choix et solutions techniques

Récupération de l'énergie hydraulique

Après avoir rassemblé et étudié les différentes techniques qui se présentaient à nous pour produire de l'électricité à partir d'une énergie maritime, il a été décidé que le montage d'une hydrolienne serait le plus approprié. En effet, comme évoqué précédemment, le banc d'essai se devait d'être transportable et le plus réaliste possible. Concernant l'énergie houlomotrice, la reproduction de la houle nous semblait très complexe à réaliser car ce phénomène est difficilement quantifiable. De plus le système de production d'électricité de ces infrastructures était plus complexe à mettre en place. Quand à la production d'électricité à partir de la chaleur de l'eau de mer, ce système ne semblait pas adapté au format réduit et transportable que nous souhaitions. Il aurait fallu un système de pompe à chaleur, très peu pratique. Nous avons donc deux choix restants, le montage d'une hydrolienne ou la réalisation d'une installation à énergie marémotrice. Le choix de l'hydrolienne a été retenu car, comme nous l'avons déjà précisé, nous souhaitions privilégier les dispositifs qui ne nécessitent pas de zone géographique particulière pour être mis en place, l'objectif étant de créer un modèle représentant au mieux ce qui est réalisable en taille réelle. Aussi, le système de production de l'électricité nous était plus familier pour l'hydrolienne que pour l'installation à énergie marémotrice.

Après avoir décidé du type de montage que nous allions réaliser, nous avons été amené à choisir les différents composants de celui-ci.

Dimensionnement du bassin

Concernant notre bassin, plusieurs options s'offraient à nous. Un aquarium de forme cylindrique nous est apparu comme étant le meilleur design au niveau de la performance, car l'absence de discontinuités sur les parois du bassin aurait tout simplement facilité l'écoulement (circulaire dans ce cas) de l'eau, limitant la perte d'énergie cinétique due aux turbulences (un tel bassin est schématisé sur la figure 6). Nous aurions donc obtenu un courant plus régulier et ainsi plus performant. Il aurait néanmoins fallu se procurer des matériaux de forme courbée, notamment du plexiglas. Cependant celui-ci se vend majoritairement en feuille plane et il aurait été compliqué de l'adapter. De plus, la forme cylindrique ne facilitant pas l'insertion de l'hydrolienne dans le bassin, elle impliquait d'opter pour des dimensions probablement plus grandes qu'avec un bassin rectangulaire. Cela aurait donc compromis la transportabilité du dispositif. Nous avons donc opté pour un design classique

d'aquarium rectangulaire, dont la longueur parallèle à la direction du courant serait grande devant sa largeur et sa hauteur, pour diminuer les perturbations inévitables liées aux angles des parois.

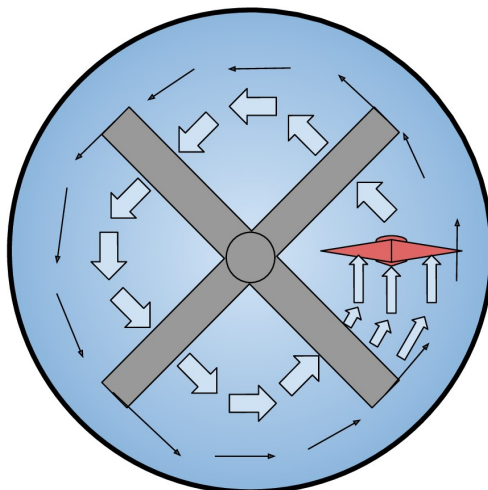


Figure 6. Schéma d'un bassin cylindrique vu de haut

La construction de l'aquarium étant artisanale, nous avons choisi une épaisseur de paroi de deux centimètres afin de renforcer au maximum l'infrastructure. Concernant les dimensions de cet aquarium, nous avons décidé que sa largeur et sa hauteur dépendraient de la taille de la turbine choisie. En effet, dans le but de limiter les turbulences de l'eau pour ne pas réduire la vitesse du courant produit, nous avons décidé qu'une marge de cinq centimètres autour de l'hydrolienne devait être respectée. Cette marge ne devait pas non plus être trop grande pour diriger le courant marin au maximum vers l'hélice. La longueur du bassin a quant à elle été choisie de sorte à ce que l'installation ne soit pas à l'étroit. Puisque que notre turbine initiale avait un diamètre de 10 centimètres, le bassin avait pour largeur 20 cm, pour hauteur 25 cm (20 cm d'eau+5 cm avec le rebord) et une longueur de 50 cm. Par la suite, nous avons été amené à réduire la taille de la turbine à 5 cm, ce choix a été décidé suite à des calculs de performance, ceux-ci sont explicités dans la partie 3). Un bassin de dimensions 15x20x40cm a donc finalement été retenu.

Choix d'une turbine adaptée

La turbine est l'élément le plus essentiel de notre projet, car c'est elle qui va transformer l'énergie cinétique du courant en énergie mécanique de rotation. Notre idée de départ était de créer nous même notre propre turbine. Nous avons donc fait des recherches sur le nombre de pales des hydroliennes, leur longueur, leur largeur, leur profil...

Nous nous sommes vite rendus compte de l'impossibilité de la tâche en si peu de temps, l'hélice aurait pu faire l'objet d'un projet à elle-seule. En effet, nos recherches sur l'optimisation de la turbine sont détaillées dans l'annexe C. Nous y avons conclu

que le meilleur rapport entre rendement, couple et vitesse de rotation est une turbine à trois pales. Cependant, nous sommes confrontés à plusieurs problèmes. Comment dessiner le profil des pales? Un profil optimisé augmenterait le rendement en limitant les interactions entre les pales. Le logiciel *Heliciel* aurait pu nous aider à faire des simulations pour la conception de la turbine. Cependant celui-ci coûte très cher et il nous aurait fallu beaucoup de temps pour le maîtriser. Nous avons donc abandonné l'idée de créer une turbine parfaite. Une autre solution était de créer une turbine sous *Solidworks*, puis de la fabriquer grâce à une imprimante 3D. Mais dans ce cas, il nous était impossible d'adapter au mieux le profil des pales. Notre dernière option était donc de prendre une turbine déjà existante et de d'utiliser ses caractéristiques, par conséquent nous en avons choisi une, trouvée sur internet.

Cependant, suite aux modifications apportées au projet, notre approche est devenue purement théorique et nous avons donc choisi de considérer la turbine comme parfaite, en laissant sa conception expérimentale aux futurs repreneurs du projet. Nous avons cependant présenté plusieurs mécanismes différent de l'hélice classique, dans l'annexe D. Nous en avons créé un modèle (esthétique seulement) sur *Solidworks* pour réaliser notre montage 3D.

Optimisation des roulements

Dans notre montage, nous avons deux arbres: le moyeux de l'hélice qui est immergé, et un autre en dehors de l'eau (qui relie le multiplicateur et la dynamo). Ces deux arbres sont en rotation uniquement. Or comme ils reposent sur des piliers fixes, il est nécessaire d'inclure des roulements dans notre montage, afin de réduire la résistance et ne pas diminuer le rendement. Pour assurer la stabilité du système, chaque axe va être maintenu par deux supports, donc deux roulements.

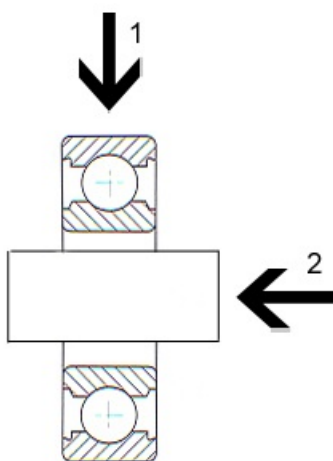


Figure 7. schéma d'un roulement en vue de coupe

Comme représenté sur la figure 7, un roulement est soumis à une charge radiale (1) et une charge axiale (2). Il existe plusieurs types de roulements¹⁴, et chaque type

répond à un besoin spécifique. Dans notre cas les deux roulements sont soumis à des charges radiales si l'on considère qu'ils sont seulement soumis au poids des axes. Il existe les roulements à billes et les roulements à rouleaux. Les premiers permettent des vitesses de rotation plus importantes mais des charges moins lourdes. Pour notre utilisation, les roulements à billes semblent être plus adaptés car le but est d'obtenir une vitesse de rotation la plus élevée possible. Dans le cas où l'on fabrique nous même notre banc, il y aura un défaut de précision lors de la fabrication. On peut pour cela utiliser des roulements à rotules sur bille, comme illustré sur la figure 8 ci-dessous. En effet ils sont parfaits pour supporter une charge radiale, et supportent un défaut d'alignement. De plus la charge portée par ces roulements ne sera pas très élevée, et ne diminuera donc pas leur efficacité. Étant dans l'eau, il est nécessaire que les roulements ne rouillent pas. Ils doivent donc être étanche grâce à des joints en caoutchouc. On peut aussi utiliser de l'acier voire même de l'acier inoxydable.



Figure 8. schéma d'un roulement à rotules sur bille

Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique: la dynamo

Concernant la transformation de l'énergie mécanique de rotation de l'hélice en énergie électrique, nous avons d'abord pensé à un système d'alternateur. Nous avons par la suite réalisé que ce mécanisme n'était pas du tout adapté aux dimensions de notre montage. Ces pièces étant destinées à la grande industrie (automobile, deux-roues...), nous avons opté pour un système a priori moins efficace mais plus adapté à notre utilisation : une dynamo. A partir du mouvement de rotation d'une roue, ce système produit une quantité d'électricité suffisante pour allumer une ampoule LED (des calculs sont détaillés dans l'annexe D). Il y a deux types de dynamo: à frottement (la roue fait tourner la dynamo avec une action de contact) ou à moyeu (le courant est généré sans frottements par la rotation de la roue). L'absence de frottements nous a semblé être un avantage non négligeable, ceux-ci entraînant des pertes d'énergie et une usure plus rapide des matériaux.

Agencement du montage

Nous avons plusieurs possibilités pour utiliser l'espace disponible, plus particulièrement pour disposer le système électrique composé de la dynamo et de la LED. Nous avons d'abord imaginé pouvoir immerger tout le système dans une nacelle étanche reliée directement au moyeu, de la même manière que sur une éolienne mais sous l'eau. Cependant, cette nacelle risquait d'être délicate à fabriquer et à installer, et elle entraînerait de fortes turbulences dans l'écoulement du fluide, ce qui aurait obligatoirement altéré les performances de l'hydrolienne. Nous avons donc décidé de placer tous ces composants hors de l'eau, sur un support au dessus de l'aquarium.

De plus, disposer ces éléments de façon visible, hors de l'eau, peut avoir un avantage pédagogique lors des démonstrations auxquelles est destiné notre banc.

Pour relier la dynamo au moyeu immergé tout en limitant la perte d'énergie, deux engrenages roulant sans glissement étaient évidemment la solution la plus performante, néanmoins les pignons auraient créé le même problème de turbulences que la nacelle immergée, nous avons donc écarté cette solution. Un système de poulies associées à une courroie nous a semblé plus pertinent, malgré la possible perte d'énergie dans le cas d'un glissement aux points de contact. Cette solution, si implémentée avec des poulies de petit diamètre, nous permettait en effet de limiter au maximum les perturbations dans l'écoulement.

Choix d'une pompe

Pour le choix de la pompe, il nous a semblé logique d'en choisir une avec un débit important. En effet, plus le débit est élevé, plus la puissance exploitable du courant l'est également. Nous nous sommes d'abord tourné vers une pompe ayant un débit de 2200 L/h . Cependant, après calculs (voir 3.1), le débit de cette pompe s'est révélé être insuffisant pour pouvoir allumer une diode, puisque le courant électrique disponible en fin de circuit ne dépassait pas 10 mW avec une hélice de 5 cm de diamètre et 0.6 mW avec une hélice de 10 cm de diamètre. C'est pourquoi il a fallu réaliser d'autres calculs afin de déterminer le débit de la pompe qui nous permettrait de produire un courant suffisant. Nous avons donc réalisé les mêmes calculs pour une pompe de débit 5000 L/h . Les calculs se sont avérés concluants : l'intensité du courant électrique disponible à la sortie de la dynamo est suffisante pour allumer la diode. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de garder cette pompe.

Evidemment, nous aurions pu choisir une pompe avec un débit supérieur. Or, avoir un débit de $14\ 000\text{ L/h}$ dans un petit aquarium ne nous semblait pas réalisable. De plus, une telle pompe engendrerait un coût élevé à l'achat.

Optimisation de l'écoulement: la tuyère

Enfin, nous avons réfléchi à une solution pour optimiser le transfert d'énergie entre le flux d'eau de la pompe et les pales de la turbine, afin d'obtenir le meilleur rendement possible.

Pour cela, il faut que le flux soit dirigé perpendiculairement aux pales, et que la surface qu'il traverse corresponde à l'amplitude de celles-ci. Par conséquent, nous avons décidé d'adopter un système de tuyère. Ce système est le suivant : la tuyère est reliée au conduit de la pompe par lequel l'eau arrive. Elle est également fixée à la paroi du bassin afin de la stabiliser et éviter les turbulences. D'un côté, elle aurait donc le diamètre du tuyau de la pompe, et de l'autre côté, son diamètre serait identique à celui de la turbine. A la sortie de la tuyère, nous avons pensé qu'un rebord horizontal serait nécessaire afin de diriger le courant marin perpendiculairement à la turbine et éviter qu'il "s'échappe". Voici deux schémas explicatifs. Sur la figure 9, le courant fuit avec un angle et il y a des pertes. Sur la figure 10, le courant est dirigé perpendiculairement à la turbine.

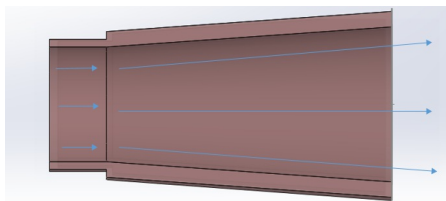


Figure 9. tuyère sans rebord

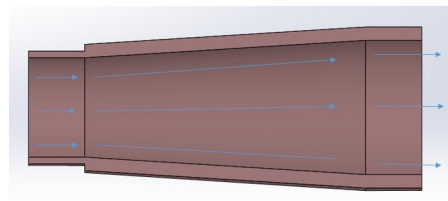


Figure 10. tuyère avec rebord horizontal

2.2.2 Montage final

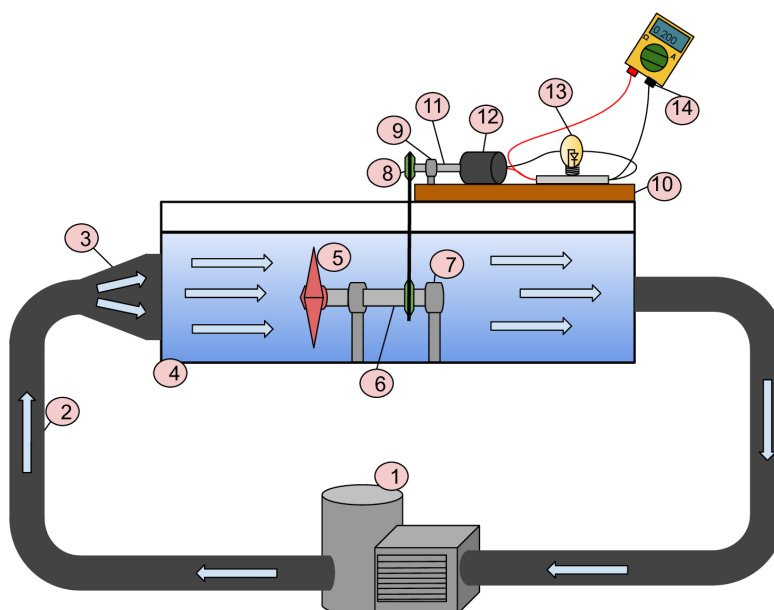


Figure 11. Représentation en 2 dimensions du montage (les dimensions ne sont pas à l'échelle)

Notre modèle final (voir figure 11), est donc composé de 14 éléments. La pompe (1) crée le courant marin artificiel dans les conduits (2), dans le sens orienté par les flèches. La tuyère (3) est placée sur la paroi du bassin (4), rempli d'eau jusqu'à la hauteur voulue. A l'intérieur du bassin, la turbine (5) est maintenue par son arbre (6) en rotation autour des deux roulements immergés (7) assurant sa stabilité. Le mouvement de rotation est transmis par un système de poulies-courroies (8) jusqu'à un deuxième arbre situé en dehors du bassin et maintenu par un autre roulement (9) reposant sur un support (10). Un moyeu (11) relie la dynamo (12) au système poulies-courroies.. Enfin, la dynamo est reliée à une ampoule (13) et un multimètre (14) pour réaliser les observations et mesures. La figure 12 est une représentation en trois dimensions du dispositif.

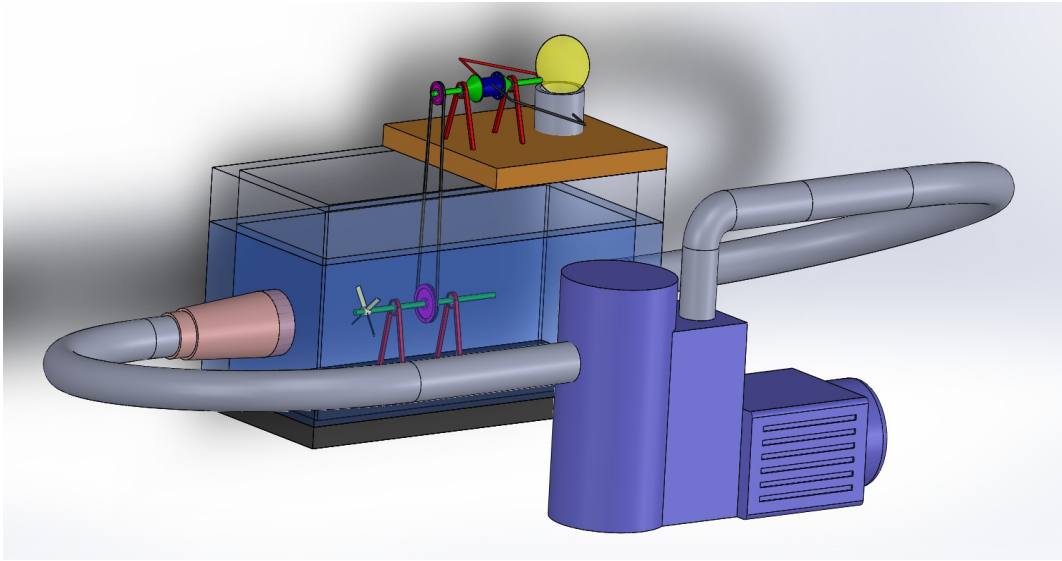


Figure 12. Représentation en 3 dimensions du montage (les dimensions ne sont pas à l'échelle)

Nous avons calculé théoriquement que le rendement final de notre installation, de la quantité d'énergie cinétique disponible dans le courant marin jusqu'à l'énergie électrique produite, est de 34.67%. Avec les caractéristiques des composants définis précédemment, nous estimons que le banc peut fournir une puissance de 119mW à partir d'un débit de 5000 L/h obtenu grâce à la pompe.

3 Limites de la théorie face à la réalisation expérimentale, pistes d'amélioration

3.1 Calculs: justification de nos choix

Tout d'abord, nous allons détailler les étapes qui justifient la formule suivante pour un courant:

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

Où évidemment, ρ est la masse volumique de l'eau, v est la vitesse du fluide étudié (ici l'eau) et S est la surface que les pales balayent.

Explication du raisonnement: La puissance est en Joules par seconde (Watts) et l'énergie s'exprime en Joules, donc si l'on veut obtenir l'expression de la puissance cinétique du courant, il suffit donc de chercher son énergie cinétique par unité de temps (par seconde).

Démonstration de la formule: L'énergie cinétique d'un corps en mouvement (en Joules) est:

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} m v^2$$

Où m est la masse d'eau considérée, et v la vitesse du fluide.

Maintenant, considérons un volume V_0 d'eau et appelons τ l'unité de temps en secondes. On remarque alors:

- $\frac{E_{\text{cinétique}}}{\tau} = P_{\text{cinétique}}$
- $m = \rho V_0 = \rho S v \tau \Rightarrow$ trois formules équivalentes qui donnent un résultat en kg.

Nous avons alors:

$$\begin{aligned} P_{\text{cinétique}} &= \frac{E_{\text{cinétique}}}{\tau} \\ P_{\text{cinétique}} &= \frac{\frac{1}{2} m v^2}{\tau} \\ P_{\text{cinétique}} &= \frac{\frac{1}{2} \rho v \tau v^2}{\tau} = \frac{1}{2} S \rho v^3 \end{aligned}$$

On retrouve bien la formule précédente où S est la surface balayée par les pales: *voir schémas plus bas*.

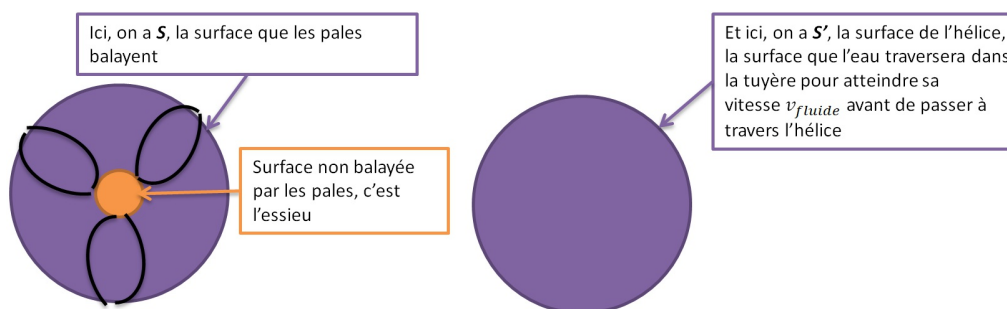


Figure 13. Schéma explicatif de S et S'

Il faut bien distinguer S de S' : $S' = S + S_{\text{essieu}}$

S dépendra alors du calibre de notre turbine que nous déterminons un peu plus bas. Pour ce qui est de la vitesse du fluide, elle dépend de deux paramètres qui sont le **débit** et la **surface S' que traversera le fluide**.

$$v[m/s] = \frac{\text{débit}[m^3/s]}{S'[m^2]}$$

Dans notre montage, le débit est caractérisé par la pompe (généralement exprimé en L/h). Nous comptons aussi réduire au maximum la surface S' pour maximiser la vitesse du fluide. Avec l'aide d'un carter et d'une tuyère, la surface que traversera le fluide sera donc égale à la surface de la turbine.

Supposons maintenant que notre turbine est parfaite, avec une orientation perpendiculaire à la direction du fluide et un rendement très élevé (voir annexe C). Notre turbine pourra-t-elle alors récupérer toute l'énergie du courant qui arrive face à elle? La réponse est non, c'est ce que Albert Betz expliqua en 1919.

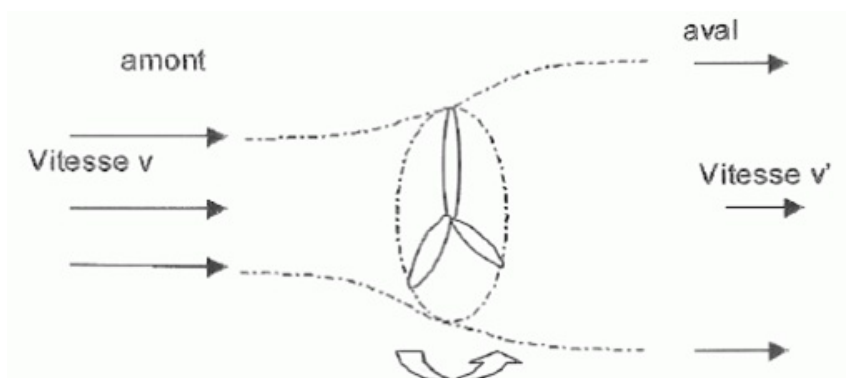


Figure 14. Différence de vitesse entre l'amont et l'aval de la turbine

Paradoxe : on ne peut pas utiliser toute l'énergie disponible d'un courant! En effet, si c'était le cas, on aurait alors $v'=0$ et donc il n'y aurait plus de courant. C'est comme si le courant percutait un mur et non une turbine

Ainsi, Albert BETZ détermina le coefficient maximal de puissance extractible d'un courant. Il travaillait sur des fluides gazeux mais c'est exactement le même principe pour des fluides liquides¹⁵ (ici, de l'eau). Ce coefficient est égale à : $\frac{16}{27}$.

En conclusion, si on considère une turbine parfaitement orientée face au courant, avec le rendement le plus élevé possible, on aura alors :

$$P_{extraactibleMax} = \frac{16}{27} P_{cinétique}$$

Où $P_{extraactibleMax}$ est la puissance mécanique de rotation fournie à la pièce turbine-essieu.

Pour la suite, nous vous proposons un schéma qui montre la puissance disponible tout au long de la chaîne de montage avec un exemple. Nous prenons une turbine de 10 cm de diamètre, un essieu de 1cm de diamètre et une pompe avec un débit de 2150 L/h. Tous les calculs sont détaillés dans l'annexe E.

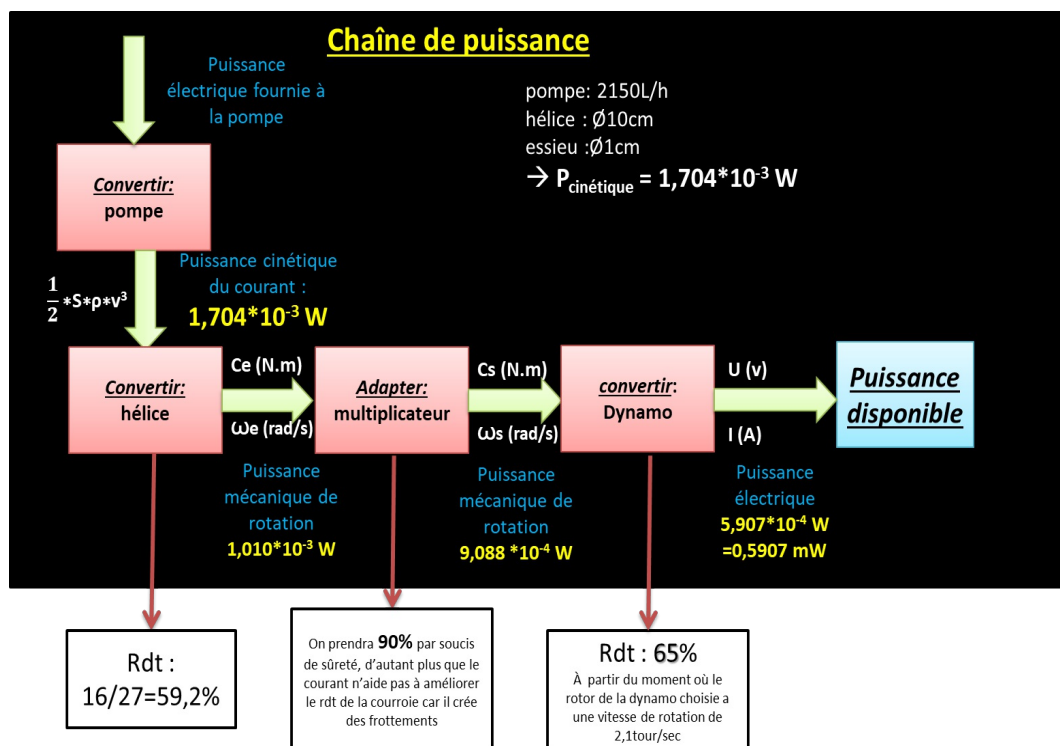


Figure 15. diagramme explicatif de la transmission de puissance

Les multiplicateurs ont généralement des rendements très élevés (entre 95% et 99%) mais nous n'avons aucun moyen de déterminer le nôtre sans étude expérimentale. Nous prenons donc 90% pour avoir un peu de marge.

Pour ce qui est du rendement de la dynamo, nous nous sommes fiés à sa fiche technique. Nous estimons son rendement à 65% lorsque la vitesse de rotation du rotor est de 2,1 tours/sec. Ces calculs sont décrits et expliqués dans l'annexe E.

Pour la suite, nous souhaitons illustrer **trois études simples** à l'aide de graphiques, pour appuyer nos arguments dans la partie II.

Premièrement, nous allons démontrer l'importance de mettre en place une tuyère. Pour ce faire, nous allons donc observer la puissance cinétique du courant fournie avec une pompe (débit de 2150 L/H) selon deux cas très simplifiés :

Pour le premier cas, nous imaginons une tuyère qui dirige et concentre le courant sur la turbine. Ainsi,

$$v [m/s] = \frac{\text{débit} [m^3/s]}{S' [m^2]}$$

On nommera la puissance cinétique obtenue : $P_{\text{cinétique flux concentré}}$

Pour le second cas, nous ferons l'hypothèse que la pompe fournit un courant uniforme dans l'aquarium et qu'il n'y a pas de frottements.

Ici,

$$v [m/s] = \frac{\text{débit} [m^3/s]}{0,15 \times 0,15 [m^2]}$$

où

$\underbrace{0,15 \times 0,15}_{\text{surface (en eau) que traverse le courant}} \times 0,4 = \text{volume d'eau en mètre cube dans l'aquarium}$

On nommera la puissance cinétique obtenue : $P_{\text{cinétique flux large}}$

Etude 1: A débit constant, on compare deux hypothèses de montage en modifiant la taille de la turbine

Pour simplifier, nous prenons un diamètre égal à 1/10 du diamètre de la turbine

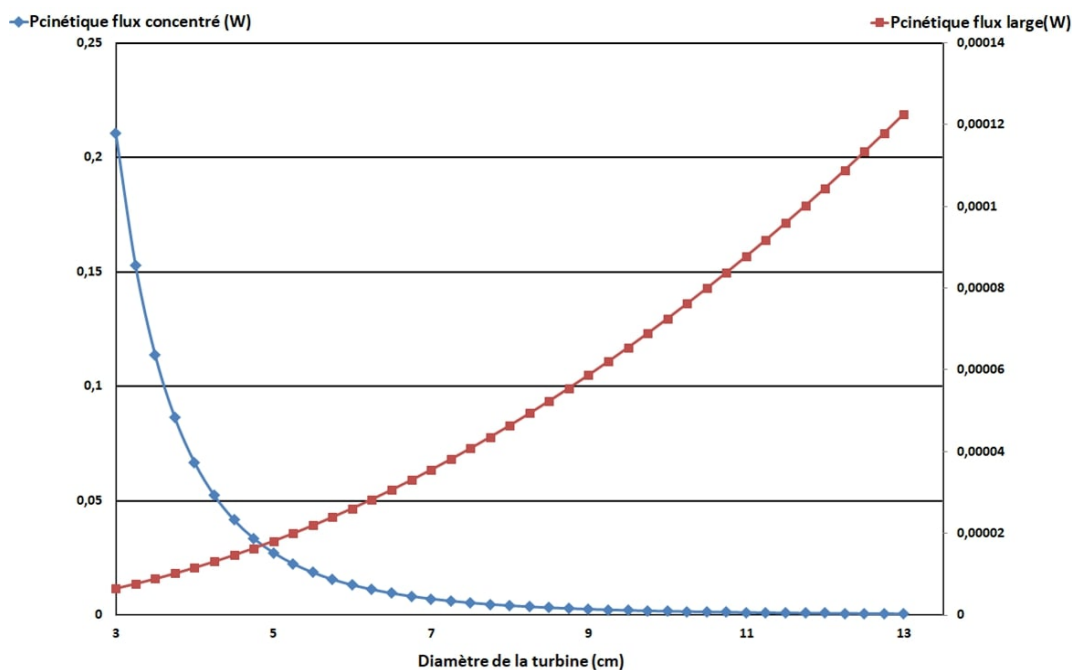


Figure 16. Puissance cinétique obtenue en fonction du diamètre de la turbine

Il est très clair que la présence d'une tuyère est essentielle, entre les deux cas, on observe une variation moyenne de $4.36 \times 10^4\%$. En effet, sans tuyère, avec un courant si faible, augmenter le diamètre de l'hélice de quelques centimètres n'est pas la solution. Au contraire, avec une tuyère, diminuer le diamètre de l'hélice a beaucoup plus d'impact. C'est la vitesse qui joue un rôle clé ici, la raison est explicitée avec les deux études qui suivent.

Aparté : Avec 2150 L/h de débit, on a, avec nos hypothèses simplificatrices (pas de frottements contre les parois de l'aquarium et courant uniforme) un courant de 0.027 m/s. C'est extrêmement faible! En effet, les turbines deviennent réellement rentables lorsque les courants s'approchent plus de 1 à 5 m/s! Dans ces cas-là, il est vrai qu'augmenter le diamètre de la turbine contribue grandement à augmenter la puissance cinétique disponible. Dans notre cas, en augmentant le diamètre, nous avons en effet une augmentation de la puissance disponible mais c'est complètement négligeable. En revanche, avec une tuyère, la vitesse du courant est fortement accrue.

Avec l'aide des deux courbes ci-après, nous allons montrer l'importance de deux paramètres clés liés à la vitesse du flux afin d'obtenir une puissance électrique disponible maximale en bout de chaîne. Bien sûr, nous supposons la présence d'une tuyère qui s'adaptera à la turbine pour ces deux études.

Etude 2: A débit constant, on choisit de modifier la taille de la turbine

Pour simplifier, nous prenons un diamètre essieu égal à 1/10 du diamètre de la turbine.

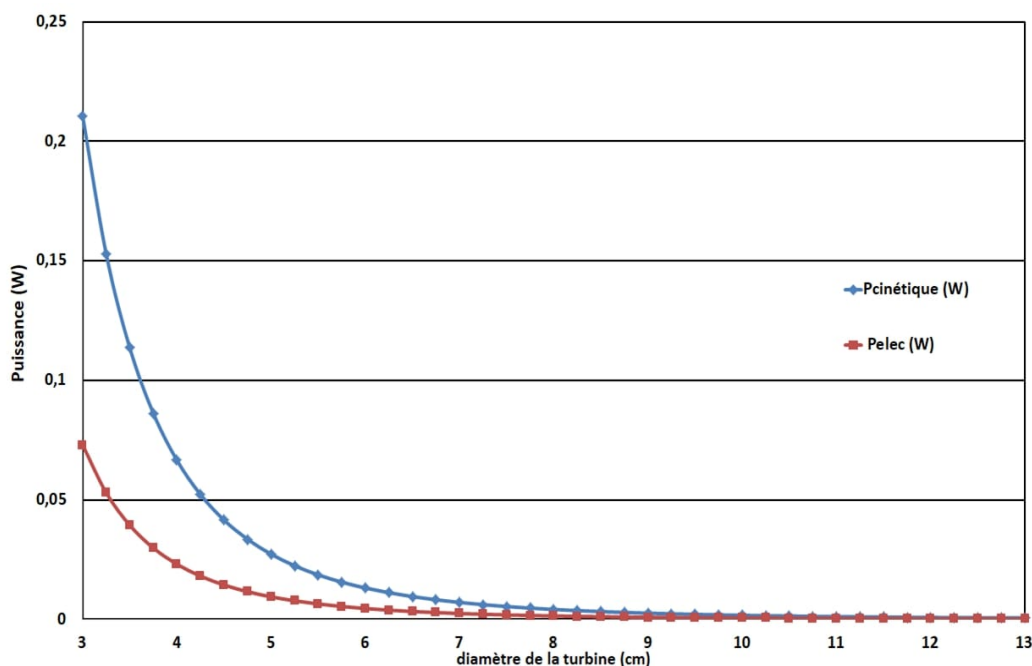


Figure 17. Puissance obtenue avec un débit de 2150 L/h

Pour réaliser cette étude, le débit choisi était de 2150 L/h.

Ici, on voit nettement l'importance du diamètre de la turbine, si celui-ci est petit, la puissance disponible en sortie de chaîne sera plus importante. C'est tout à fait logique dans notre étude puisque dans

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

La vitesse du flux est égale à:

$$v [m/s] = \frac{\text{débit} [m^3/s]}{\text{Surfaceturbine} [m^2]}$$

Plus la turbine sera petite et plus le flux sera rapide. Nous avons néanmoins fait attention à ne pas prendre une turbine trop petite afin de rester à une échelle intéressante pour une expérience.

Etude 3: On sélectionne une turbine et on modifie théoriquement le débit de la pompe

Pour simplifier, nous prenons un diamètre essieu égal à 1/10 du diamètre de la turbine.

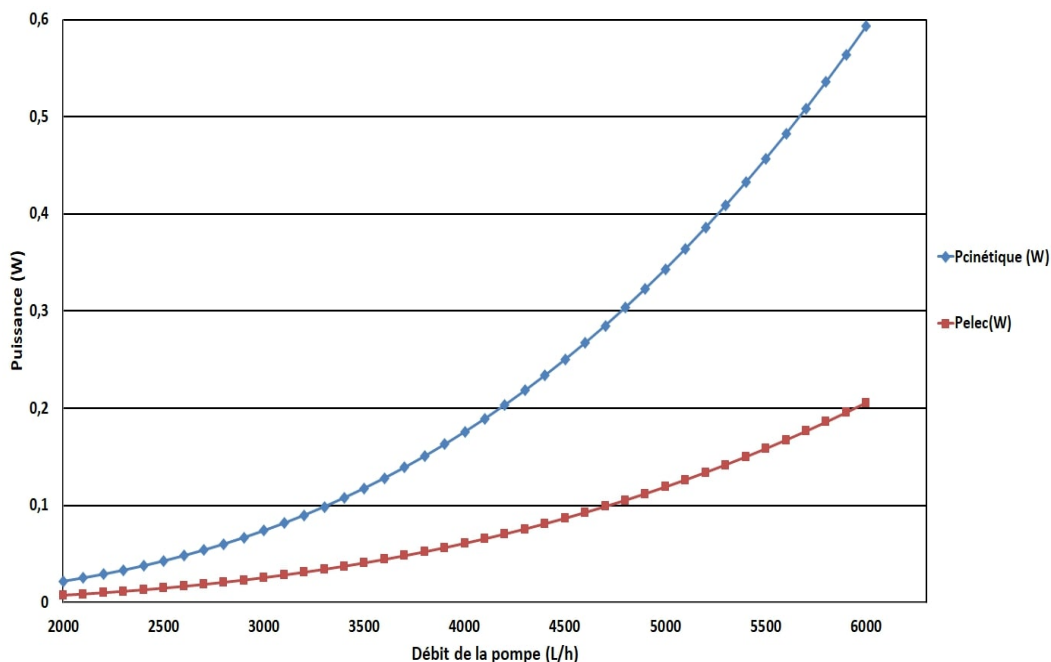


Figure 18. Puissance obtenue selon le débit, pour une même turbine

Pour réaliser cette étude, nous avons sélectionné deux diamètres au préalable : celui de la turbine est de 5 cm et celui de l'arbre est de 0,5 cm. Ici, on voit aussi très clairement l'importance d'un fort débit. L'explication est la même que pour la deuxième étude. Plus le débit sera important et plus la vitesse de flux le sera également.

Nous savons que pour allumer une petite diode, il est nécessaire d'avoir une puissance électrique disponible de 36 mW. C'est pour cette raison que nous avons sélectionné une turbine de 5 cm de diamètre avec un essieu de 0.5 cm et une pompe avec un débit de 5000 L/h. En ayant sélectionné ces deux composants, nous aurions alors une vitesse du fluide suffisamment élevée. En effet, notre montage fournirait théoriquement une puissance de **119 mW**. (On réalise simplement les mêmes calculs que dans l'annexe F, en modifiant les données).

3.2 Limites de nos recherches théoriques

3.2.1 Détermination de la vitesse de rotation de l'hélice

Notre projet initial était de fabriquer une hydrolienne miniature. Ainsi certains paramètres et certaines grandeurs devaient être, au départ, définis expérimentalement. Or du fait de la situation exceptionnelle du confinement, le projet a dû être réorienté vers une dimension plus théorique. Bien que certaines grandeurs ont pu être définies par le calcul, d'autres telles que la vitesse de rotation et le couple de l'hélice étaient plus difficiles à trouver. En effet, ne pouvant plus les déterminer expérimentalement et n'ayant pas de logiciels spécialisés tel que *Heliciel* à notre disposition, nous avons essayé de trouver une relation dans la littérature et sur des documents spécialisés.

Première piste: le coefficient TSR

Le Tip speed ratio (TSR) était la piste la plus prometteuse puisque la relation ne faisait apparaître qu'un seul terme qui nous était inconnu. Il correspond au rapport de la vitesse tangentielle au bout d'une pale de l'hélice avec la vitesse d'écoulement de l'eau (ou de l'air). Ce nombre dépend de la conception globale de l'hélice, notamment le nombre de pales, l'angle d'attaque ou encore l'angle de calage. Ce nombre est régulièrement pris en compte lors de la conception d'une turbine pour optimiser l'énergie extraite du courant.

Généralement, le TSR est mesuré par tachéométrie avec une vitesse d'écoulement fixée et en faisant varier la vitesse de rotation de la turbine. Cela permet d'établir le TSR pour lequel le fonctionnement est optimal (et ainsi déterminer certains coefficients comme ceux de puissance et de traînée). Voici son expression¹⁶:

$$\text{TSR} = \frac{R\omega}{U}$$

Avec R rayon de l'hélice en mètre, ω la vitesse de rotation en rad/s et U la vitesse de l'écoulement incident. Cependant, cette mesure se fait expérimentalement.

Par conséquent, nous nous sommes basés sur la thèse de Fabrice Maganga de l'université du Havre intitulée *Caractérisation numérique et expérimentale des effets d'interaction entre une hydrolienne et le milieu marin*¹⁷. Dans cette thèse l'auteur

compare les caractéristiques de deux maquettes d’hydroliennes à axe horizontal avec une géométrie de pales différentes : le “NACA63418” et le “NAC64xxx”. Ne connaissant pas les caractéristiques exactes du profil NAC64xxx nous nous sommes concentrés sur l’autre.

La seule donnée manquante est donc le TSR avec lequel travailler, mais à la page 48 de la thèse la phrase “la puissance maximale récupérée par ces maquettes est atteinte pour des TSR entre 4 et 6 suivant les conditions d’entrée de l’écoulement.” indiquerait qu’il faudrait prendre en compte cette plage de données. Mais dans la suite de la thèse, notamment à la page 100, l’auteur évoque des différences entre la méthode numérique et la littérature pour des TSR élevés (supérieur à 4.0) plus particulièrement dans ce qui concerne le calcul du coefficient de puissance. Ce problème est apparemment dû au modèle d’émission (de modélisation). Toujours dans la suite du rapport, dans la troisième partie plus précisément qui concerne les résultats, l’auteur évalue différents coefficients (page 106) comme celui de traînée avec des TSR entre 0 et 4,58 ce qui nous ramène à la question du TSR à utiliser.

Le manque d’informations sur le TSR à utiliser pour que la puissance récupérée soit optimale rend les résultats obtenus approximatifs. En effet, admettons que notre hélice ait trois pales ayant le profil “NACA63418” comme l’une des maquettes de la thèse évoquée précédemment. Notre hélice a un diamètre de 5 mm et la vitesse d’écoulement de l’eau est de 0,7073 m/s (on néglige les effets de turbulence). L’idée étant que notre hélice soit un modèle réduit de la maquette décrite dans cette thèse.

Pour un TSR de 4, d’après la relation précédente, la vitesse de rotation de l’hélice est de 1081 tours/minutes alors que pour un TSR de 6 elle est de 1621 tours/minutes. Ainsi l’écart est très important et ne sachant pas le TSR exact, il ne serait pas pertinent de travailler avec ces valeurs.

Deuxième piste: les coefficients de Rateau

D’après le document *Caractéristiques et similitudes des turbomachines hydrauliques*,

“Lorsque des turbomachines hydrauliques de même type fonctionnent en similitude et que l’on peut négliger l’influence du nombre de Reynolds et de la rugosité relative, leurs coefficients de pression μ , de débit δ , et de puissance interne τ , leur ouverture réduite γ et leur rendement interne η sont des invariants.”¹⁸

Mais n’ayant pas trouvé de turbine pour laquelle nous aurions les dimensions exactes et les coefficients associés à cette dernière, il ne nous était pas possible de trouver la vitesse de rotation de notre hélice par cette méthode. En effet, nous n’avons pas trouvé de turbine dont nous connaissions les caractéristiques de l’hélice ainsi que les différentes grandeurs qui nous permettent d’établir une équivalence de fonctionnement. Il ne nous est donc pas possible de déterminer avec précision la vitesse de rotation ou le couple de notre hélice.

Le rendement du circuit sera donc approximatif car le fait que nous n'ayons pas de solution pour le multiplicateur rend le calcul précis du rendement impossible.

3.3 Pistes d'amélioration

Nous avons pensé à quelques améliorations possibles dans le but d'optimiser au maximum le rendement de notre banc.

- Nous pourrions utiliser une courroie trapézoïdale, dont le rendement est meilleur que celui d'une courroie classique. Nous pourrions également remplacer les roulements et l'arbre par des trains épicycloïdaux, ce qui nous permettrait de gagner de la place et d'envisager un dispositif entièrement immergé.
- Il faudrait par ailleurs chercher à réduire au maximum la longueur de l'arbre afin de maximiser le couple. En effet, plus l'arbre est long et plus il est lourd et donc plus difficile à faire tourner. Par ailleurs, les roulements, désormais immergés dans l'aquarium devraient donc être étanches, afin qu'ils ne rouillent pas et que leur efficacité soit maximale.
- De plus, trouver une pompe plus performante que celle actuelle tout en restant dans les limites envisageables avec un si petit aquarium permettrait d'obtenir une vitesse d'écoulement supérieure et ainsi un meilleur rendement (voir dans la partie 3.1 sur les calculs).
- En utilisant un carénage, il serait possible d'optimiser au maximum la surface des pales. En effet, l'eau ne pourra plus être déviée à l'extrémité des pales. (voir annexe sur les pâles).
- En situation réelle il n'y a pas le problème de la pompe et du courant redirigé vers l'hélice pour avoir une vitesse de fluide la plus élevée possible, on pourrait donc augmenter la surface de la turbine et la puissance rendue serait alors plus grande (explication détaillée dans la partie calculs).

De plus, à la place d'avoir une hélice à axe horizontal, on pourrait remplacer notre hélice par une hélice à axe vertical. Un des meilleurs exemples est la turbine Achard¹⁹ (voir figure 19). C'est une turbine à flux transversal.

Ce type de turbine a plusieurs avantages. L'idée serait d'en empiler plusieurs sur un même axe, comme modélisé sur la figure 20 ci dessous, ce qui permettrait par conséquent l'exploitation de l'énergie disponible sur une grande colonne d'eau, donc un flux traversant une surface bien plus large. Un axe vertical permettrait aussi d'éviter la présence d'une courroie, ce qui diminuerait les pertes. Ainsi on pourrait soit directement fixer la dynamo sur l'axe de l'hélice, soit inclure seulement un engrenage servant de multiplicateur.

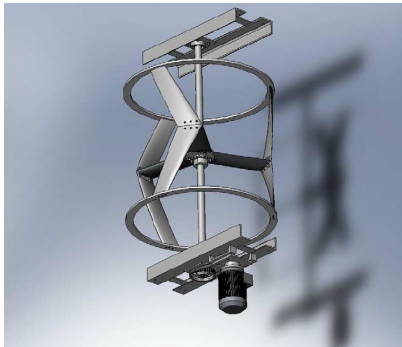


Figure 19. Modélisation 3D d'une turbine Achard

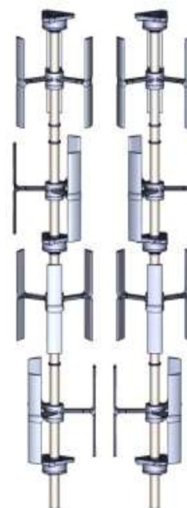


Figure 20. Modélisation d'un empilement de turbines Achard

Conclusion

Ce projet, bien qu'ayant été affecté par les conditions actuelles qui sont exceptionnelles, a été une première étape dans la construction du banc d'essai à énergie hydraulique. Ainsi, si nous n'avons pas pu le réaliser physiquement, nous avons été capables de proposer un modèle théorique cohérent, tout en contournant les limites imposées par l'impossibilité de réaliser des mesures expérimentales. Cette première version théorique du dispositif constitue une ébauche, mais aussi une bibliographie qui facilitera la réalisation de la version physique du banc par les futurs repreneurs du projet dans les prochaines années.

Avec notre montage, on a vu que le rendement global de la chaîne approche les 35%, ce qui signifie que théoriquement, il est possible de tirer 35% de la puissance cinétique du courant que fournit la pompe pour la convertir en puissance électrique. En d'autres mots, avec une pompe à débit réglable, prenons de 2150 à 5000 L/h , nous pourrions obtenir une puissance électrique disponible en bout de chaîne allant de 9 à 119 mW avec une turbine de 5cm de diamètre.

A travers ce projet, nous avons tiré des connaissances importantes qui nous seront nécessaires pour exercer le métier d'ingénieur, notamment concernant notre capacité à travailler et débattre en groupe. De même, il nous a poussé à évoluer pour être capable d'effectuer un raisonnement qui est celui d'un ingénieur, c'est à dire développer notre capacité à innover, à trouver des solutions lorsque nous sommes confrontés à des difficultés ou que nous sommes bloqués, ou encore à réaliser des choix techniques et à les justifier. Cela a donc été une expérience très valorisante au sein de notre formation d'ingénieur à l'INSA.

Bibliographie

Références textuelles

1. <https://www.google.com/url?q=https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique&sa=D&ust=1591349371943000&usg=AFQjCNGGrvQJiyF9eePZvGQ3dcIILpUMdBA>
2. https://www.google.com/url?q=https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration&sa=D&ust=1591349371943000&usg=AFQjCNF28c-zq-xYvu-nYNwKfssgo4JU_ZQ
3. <https://www.google.com/url?q=http://unblogsurlaterre.com/actualites-environnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenients-energie-solaire-011/&sa=D&ust=1591349371945000&usg=AFQjCNHY5mqTQdGE2p9SZoCt-frRWQ9K4vQ>
4. <https://www.google.com/url?q=https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/energie-solaire-5-innovations-et-leurs-perspectives-d-aveni&sa=D&ust=1591349371945000&usg=AFQjCNExDucaycJ-fPDxtfTtmi17TjWKtg>
5. https://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne
6. http://energythic.com/usercontent/3/2008.05.20_FR_Technology_Wind-Plant_EnergyThic_Technologie_des_eoliennes.pdf
7. https://www.google.com/url?q=https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-eolienne-relais-de-la-force-du-vent&sa=D&ust=1591349371952000&usg=AFQjCNE7IJ6yejufDIDUOsJ-CRpn_YapDDA
8. <https://www.google.com/url?q=http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/le-fonctionnement-d-une-eolienne/&sa=D&ust=1591349371950000&usg=AFQjCNGVxQWwZ2Y0vgvbrVtvKz6Fhj2AtQ>
9. <https://www.google.com/url?q=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&sa=D&ust=1591349371947000&usg=AFQjCNFnjLotQ6I97s92BCmFFMvQ9jDGJg>
10. <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>

- <https://www.google.com/url?q=https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/pourrait-on-alimenter-la-france-en-electricite-uniquement-avec-de-leolien/&sa=D&ust=1591349371948000&usg=AFQjCNH4B8dBVwIcDcdUOUa3lB-0mXBFpg>
11. <https://www.google.com/url?q=http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/eolien-en-mer-pose-eolien-en-mer-flottant/&sa=D&ust=1591349371957000&usg=AFQjCNFICeW77TzWHZ1pYcsdDHXUkeqB8Q>
 12. <https://www.google.com/url?q=https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice&sa=D&ust=1591350767382000&usg=AFQjCNE7KFmTbNg-DEeTLpcNoZJoXPRStyA>
 13. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-energie-des-courants-marins>
 14. <http://lamaintenance.fr/mecanique/les-roulements-les-differents-types/>
 15. https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz
 16. https://en.wikipedia.org/wiki/Tip-speed_ratio
 17. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01186430/document>
 18. <https://studylibfr.com/doc/3937918/caract%C3%A9ristiques-et-similitude-des-turbomachines-hydrauliques>
 19. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00876949/document>
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01424843/document>

Références des figures:

- Les figures 6, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18 ont été réalisées manuellement
- figure 1: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- figure 2: <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/le-fonctionnement-d-une-eolienne/>
- figure 3: <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/pourrait-on-alimenter-la-france-en-electricite-uniquement-avec-de-leolien/>
- figure 4: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice>
- figure 5: <https://france3-regions.francetvinfo.fr/normandie/manche/cherbourg-cotentin/incertitudes-projet-ferme-hydrolienne-manche-apres-retrait-naval-energies-1518698.html>
- figures 7 et 8: <http://lamaintenance.fr/mecanique/les-roulements-les-differents-types/>
- figure 14: <http://chimix.com/an10/concours10/general04.html>
- figures 19 et 20: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00876949/document> et <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01424843/document>

Annexe A : L'origine des courants

Un courant marin est un déplacement d'eau de mer défini par plusieurs critères qui sont : le débit du courant, sa direction ainsi que sa vitesse. Nous pouvons parler de deux types de courants, ceux en surface et ceux en profondeur et les deux peuvent avoir des origines communes ou non.

Les courants en surface ne concernent que 10% des courants des océans. Ils sont généralement dus aux vents ainsi qu'à la marée lorsque l'on s'approche des côtes.

Au delà de 800 mètres de profondeur, les vents n'ont plus d'influence mais l'eau des océans est toujours en mouvement, c'est la circulation thermohaline. Cela peut se résumer par la différence de densité en profondeur aux différents endroits du globe. Il est connu de tous que l'eau chaude est moins dense que l'eau froide car l'eau chaude est plus dilatée. Si on prend l'exemple d'un bain chaud laissé au repos un moment on pourra observer ensuite que l'eau chaude sera en haut et l'eau froide en bas.

Sur la planète, il existe des endroits où l'eau se fait réchauffer constamment par le Soleil jusqu'en profondeur comme les eaux entre la Floride et les Bahamas. À l'inverse, aux pôles, les glaciers sont la source des eaux froides du globe.

Pour décrire globalement les courants de l'océan Atlantique, les eaux chaudes de Floride remontent alors au Pôle nord jusqu'à la surface et les eaux froides des glaciers descendent en profondeur vers la source chaude. Deux courants sont alors créés, un qui arrive jusqu'à la surface vers les glaciers et un autre en profondeur vers les Bahamas pour refroidir les eaux que le Soleil réchauffe continuellement.

On peut alors schématiser ainsi la circulation thermohaline¹ :

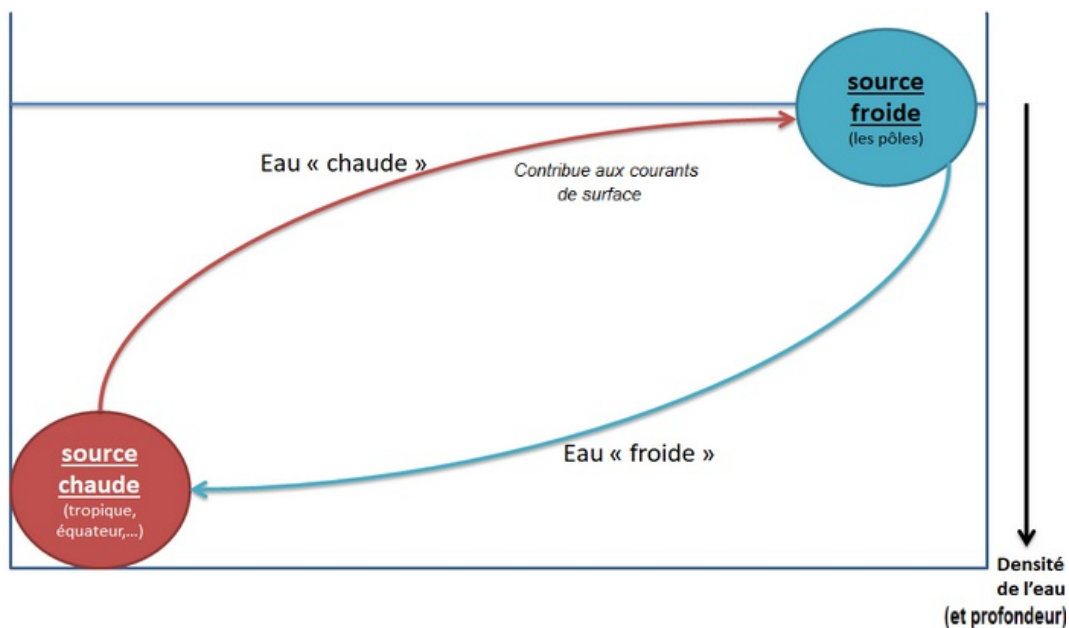


Figure 21. Schéma de la circulation thermohaline

1. figure réalisée manuellement

Dans la circulation thermohaline, le sel joue aussi un rôle important, en effet, plus une eau est salée et plus elle est dense. Donc, plus l'eau est salée et plus elle ira vers le fond des océans. La différence de salinité de l'eau selon la profondeur joue exactement le même rôle que la température, car elle crée des différences de densité de l'eau dans les océans, ce qui favorise encore plus les courants marins².

2. d'après <https://www.youtube.com/watch?v=PvUTDlbbk0U> et <https://www.youtube.com/watch?v=m4el8ARcO-8>

Annexe B : Autres types d'énergies maritimes

L'énergie thermique:

L'énergie thermique des mers (ETM), également appelée énergie maréthermique consiste à exploiter la différence de température entre les eaux profondes et les eaux à la surface d'un océan dans le but de créer de l'électricité.

Chaque unité de production d'ETM comprend ces composants :

- un ensemble évaporateur-turbine-condenseur
- des conduites et des pompes d'alimentation en eau chaude et froide pompée en surface et en profondeur

Ces installations doivent être situées dans les zones intertropicales (entre 30° de latitude nord et 30° de latitude Sud) puisqu'il faut une différence supérieure à 20°C entre les eaux profondes et les eaux à la surface.

Le fonctionnement de ces infrastructures est assez connu puisqu'elles fonctionnent suivant le modèle d'une pompe à chaleur. Les centrales ETM se divisent en 2 types principaux. Celles en cycle ouvert et celles en cycle fermé.

Concernant les centrales ETM en cycle ouvert, le fonctionnement est le suivant (voir figure ci-dessous). L'eau de mer située à la surface est récupérée et traverse un évaporateur dans lequel une infime partie de vapeur s'échappe. La vapeur produite entraîne la turbine qui produit de l'électricité. La vapeur repasse sous forme liquide dans le condenseur lorsqu'elle entre en contact avec l'eau froide puisée en profondeur. L'eau est ensuite remise en mer.

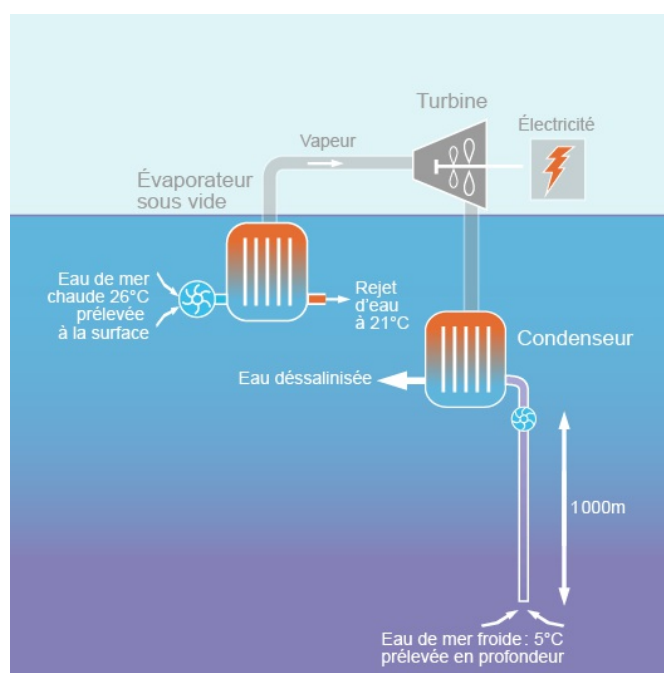


Figure 22. Fonctionnement d'une centrale ETM en cycle ouvert

Pour les centrales ETM en cycle fermé (ou cycle de Rankine), il s'agit d'un fonctionnement en cycle thermodynamique (voir figure ci dessous). Le fluide est le même tout au long du cycle, pas d'échange avec l'eau de mer. La centrale comprend les mêmes composants qu'une centrale en cycle ouvert. La grande différence est qu'il y a une boucle fermée. Dans ce cas, ce n'est plus l'eau qui est le fluide caloporteur mais de l'ammoniac car son point de condensation est plus haut que celui de l'eau (4°C).

L'eau chaude est pompée à la surface puis ses calories sont transmises à l'ammoniac dans l'évaporateur, qui transforme le fluide en vapeur. Puis, de la même façon qu'en circuit ouvert, la vapeur entraîne la turbine. Enfin le fluide est condensé dans le condenseur alimenté en eau froide.

L'avantage des centrales en cycle fermé est que le fluide circule plus rapidement car il passe moins de temps au niveau de l'évaporateur. La production est donc meilleure.

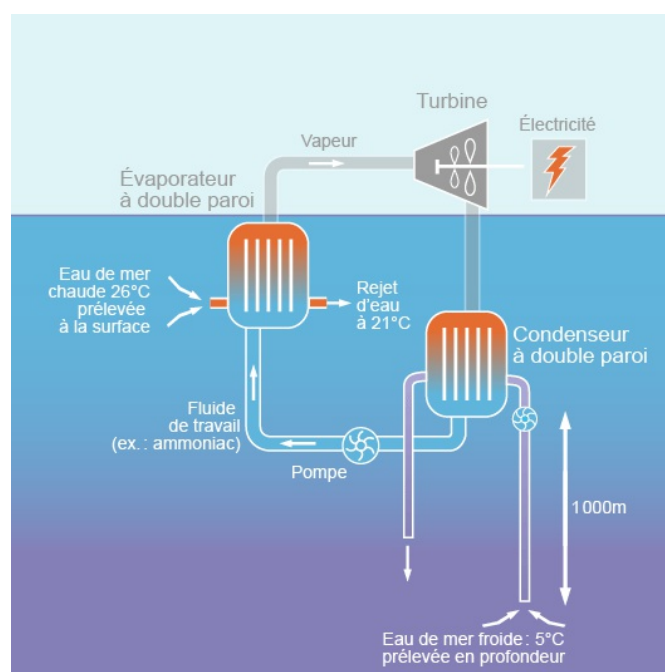


Figure 23. Fonctionnement d'une centrale ETM à cycle fermé

L'énergie thermique disponible dans les mers et océans a l'avantage d'être abondante, prévisible (comme la plupart des énergies maritimes) et disponible toute l'année.

Malgré son fort potentiel estimé à 50% de la consommation mondiale, cette énergie demeure peu exploitée à l'heure actuelle. En effet, son rendement n'est pour l'heure pas assez élevé par rapport aux autres types d'énergie maritime. De plus son coût élevé freine les investisseurs. L'Inde, le Japon, Taiwan, les Etats-Unis et la France sont les pays qui investissent le plus dans ce type d'énergie³.

L'énergie houlomotrice

3. Source pour les centrales ETM et les schémas: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-thermique-des-mers-etm>

L'énergie houlomotrice désigne la production d'énergie électrique à partir de la houle, c'est-à-dire à partir de vagues successives nées de l'effet du vent à la surface de la mer. Il existe de multiples dispositifs permettant d'exploiter l'énergie des vagues. La plupart ne sont encore que des prototypes.

Une des installations existantes est la chaîne flottante articulée (ou "serpent des mers"). Ce dispositif est composé de longs flotteurs qui s'alignent dans le sens du vent, comme représenté ci-dessous. Ceux-ci disposent d'une tête ancrée au fond marin par un câble. Les vagues mettent alors en mouvement les câbles qui oscillent. Ces oscillations permettent de comprimer un fluide qui entraîne une turbine. Ce procédé est à l'heure actuelle le plus connu. Ce système est implanté au Portugal notamment.

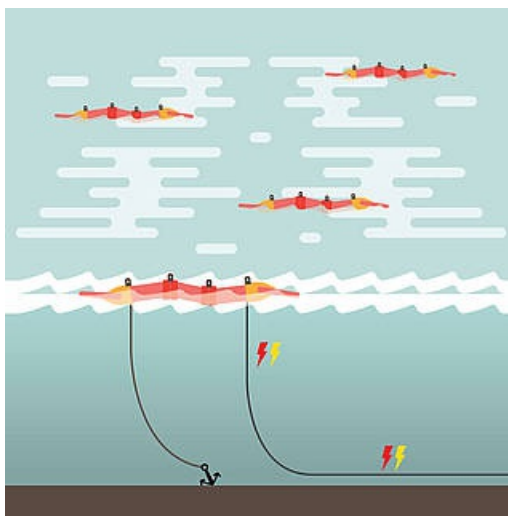


Figure 24. exploitation de l'énergie houlomotrice de la mer

L'avantage majeur de ces installations est qu'elles peuvent être implantées aux quatre coins du globe. Le potentiel exploitable est donc important. En revanche, ces infrastructures nécessitent beaucoup d'entretien et leur durée de vie n'est pas élevée. En effet, la corrosion et l'accumulation de dépôt usent les matériaux. La résistance des matériaux doit donc être importante. Il faut qu'en cas de conditions extrêmes, le système ne soit pas endommagé ce qui implique un coût élevé. De plus, l'ancrage et l'accessibilité en milieu marin pour entretenir régulièrement en font une solution peu pratique⁴.

4. source de l'énergie houlomotrice: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-houlomotrice-ou-energie-des-vagues>

Annexe C : Nombre de pales

On retrouve des hydroliennes dans des zones de fort courant (supérieur à 4 ou 5 noeuds). Les hydroliennes exploitent l'énergie cinétique de l'eau. Elles mesurent plusieurs dizaines de mètres. Le nombre de pales varie entre 2 et 6 par turbine chez les hydroliennes actuelles. La meilleure hélice est celle qui transmet le moins d'énergie en aval.

On observe que plus on augmente le nombre de pales plus on augmente le couple, mais on perd aussi en rendement. En effet, plus il y a de pales, plus la dissipation d'énergie est importante. Et au contraire, moins il y a de pales plus la turbine gagne en vitesse et plus elle est efficace. Ainsi, on en déduit qu'il faut diminuer le nombre de pales si la vitesse de rotation est faible.

Le rendement de la turbine est le plus optimum à vitesse de rotation élevée. Or, un des facteurs qui limite la vitesse de rotation est l'interaction entre les pales. Afin de minimiser ce phénomène on peut modifier la géométrie des pales. En effet, cela permet d'augmenter le rendement en diminuant l'interaction entre les pales.

Il faut veiller à ce que la largeur des pales ne soit pas trop importante afin d'avoir une vitesse de rotation plus élevée. De plus, il faut adapter les pales à l'alternateur ou au moteur, car la turbine absorbe la puissance qui lui est fournie.

Quand la puissance moteur augmente, il existe différentes paramètres sur lesquels on peut agir pour améliorer le rendement: augmenter l'angle d'attaque des pales, leur longueur, largeur et courbure dans le but d'augmenter la vitesse de rotation.

Agir sur les dimensions des pales influence notamment la solidité de la turbine, ainsi augmenter leurs dimensions permet de travailler sur plus de fluide. La meilleure option est d'augmenter le nombre de pales puisque la perte de rendement est la plus faible.

Les turbines bipales permettent une vitesse de rotation plus élevée. Elles ont un poids plus faible et un coût moins important. Mais si l'on a que deux pales, les vibrations seront plus importantes donc les pales seront plus fragiles. Ainsi, le meilleur compromis serait une turbine à 3 pâles. De plus, pour limiter la perte d'énergie au bout de celles-ci on peut mettre en place un carénage. Cela empêche l'eau d'être déviée au niveau de l'extrémité des pales.

Pour ce qui est des matériaux, il faut qu'ils soient résistants et légers. On peut négliger lors de la modélisation de notre projet la fatigue mécanique et la résistance à l'érosion. Les meilleurs matériaux sont donc des matériaux composites comme la fibre de verre ou la fibre de carbone. De plus, il faut protéger l'hydrolienne avec un produit antirouille. On peut réaliser les pales grâce à l'impression 3D, à l'usinage ou au moulage⁵.

5. voir sur <https://tpehydroliennes.webnode.fr/presentation-du-concept/>

Annexe D : Les différentes turbines existant à ce jour

Il existe principalement 3 types de turbines: les turbines **Francis**, **Kaplan** et **Pelton**. Les turbines Francis et Kaplan sont des turbines hydrauliques à réaction, c'est-à-dire que la pression à l'entrée de la roue est supérieure à celle de sortie de la roue. Le principe de ces turbines est de transformer à la fois l'énergie cinétique (vitesse de l'eau) et une différence de pression (à l'entrée et à la sortie de la roue). C'est pourquoi elles utilisent à la fois un principe de réaction (la pression statique du fluide est transmise à la roue) et un principe d'impulsion (l'énergie cinétique du fluide est transmise à la roue). De plus, ce sont des turbines à écoulement centripète.

Turbine Francis:

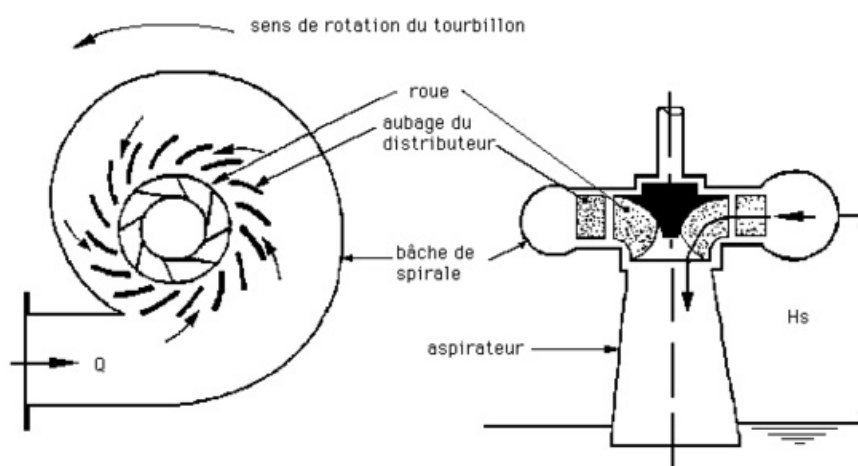


Figure 25. Schéma d'une turbine francis

Principe de fonctionnement: l'eau entre dans la bêche de spirale. Elle passe dans l'aubage fixe de l'avant distributeur, puis à travers un cercle de vannage à aubes mobiles. Ici, la section de passage peut être réglée en fonction du débit souhaité. L'eau pénètre alors dans la roue de manière radiale, et est ensuite dirigée axialement vers l'évacuateur. L'évacuateur permet de ramener le fluide à la même pression que la pression extérieure et de récupérer l'énergie cinétique restante à la sortie de la roue⁶.

Fonctions du distributeur:

- Propulser l'eau dans une direction adaptée à l'entrée de la roue pour minimiser les chocs.
- Régler le débit.

6. <https://lamh.gmc.ulaval.ca/turbines-en-bref/turbine-francis/>

La turbine Francis est généralement installée selon un axe vertical, mais elle peut être montée horizontalement pour des puissances moyennes à faibles. Elles sont utilisées pour des chutes moyennes, et peuvent développer des puissances importantes.

Le diamètre de la roue peut varier de quelques décimètres à 10m. Constituées de 11 à 17 aubes, leur vitesse de rotation varie entre 70 et 3000 tours par minutes.

Turbine Kaplan:

Cette turbine exploite des petites différences de hauteur jusqu'à 10m environ.

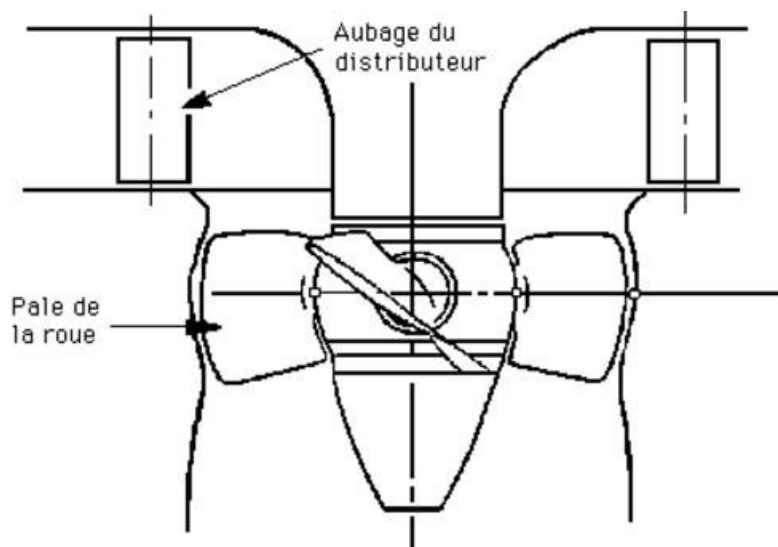


Figure 26. Schéma d'une turbine Kaplan

Principe de fonctionnement: Comme représenté sur la figure 23, l'eau passe d'abord par une chambre de forme telle que l'écoulement complet est distribué sur la circonférence du distributeur. Celui-ci a pour fonction d'ajuster le débit de l'eau et il fait tourner l'eau par rapport à l'axe de la roue. L'eau arrive alors sur les aubes de la roue de manière axiale qui transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Le flux passe alors à travers un diffuseur qui a pour fonction de récupérer l'énergie cinétique.

La particularité de cette turbine est que les pales peuvent pivoter grâce à un mécanisme situé dans le moyeu. Cette turbine peut supporter un fort débit mais de petites chutes d'eau, c'est pourquoi les aubes sont longues et solides. En effet elles supportent des débits allant de 70 à 800 m^3/s , et leur rotation varie entre 50 et 250 tours par minutes. Le diamètre de la roue est compris entre 2 et 10m⁷.

Turbine Pelton

Il s'agit d'une turbine à action pure, c'est-à-dire que la pression à l'entrée de la roue est égale à la pression de sortie de la roue. L'énergie est fournie à la sortie du distributeur sous forme d'énergie cinétique. Cette turbine est utilisée pour des chutes hautes et des petits débits. Un jet projette l'eau sur les augets.

7. <https://lamh.gmc.ulaval.ca/turbines-en-bref/turbine-kaplan-et-helices/>

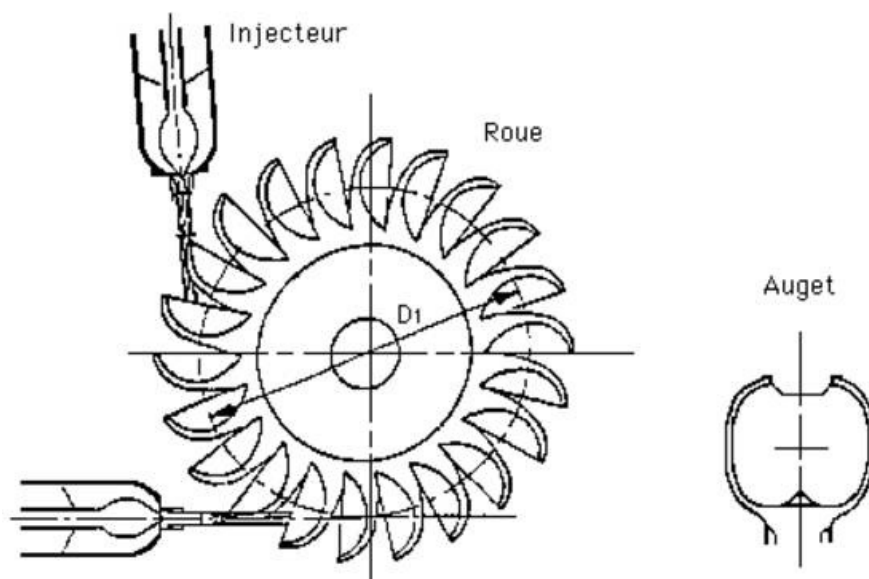


Figure 27. schéma d'une turbine Pelton

Principe de fonctionnement: Le jet exerce une force sur les augets à la périphérie de la roue, ce qui est illustré sur le schéma ci-dessus. Cette force est transformée en couple et puissance mécanique. Le jet est alors dévié de 160 à 165° dans le même plan. Ce changement entraîne la roue pour produire de l'électricité. Son rendement est supérieur à 80%⁸.

Comparaison du rendement des turbines:

Il est intéressant de comparer le rendement des différentes turbines⁹ entre elles et avec une hélice. Voici un graphique¹⁰ illustrant cette comparaison:

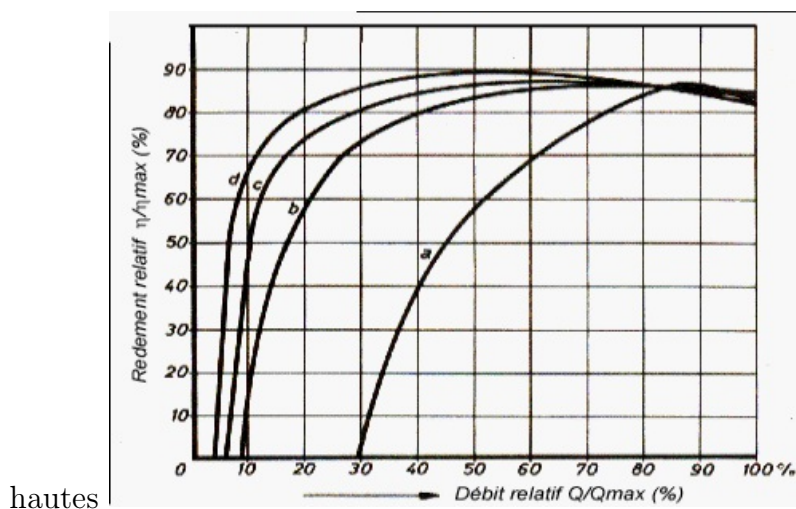


Figure 28. Graphe de comparaison des différentes turbines

a: hélice classique, b:turbine Francis, c: turbine Kaplan, d: turbine Pelton

8. <https://lamh.gmc.ulaval.ca/turbines-en-bref/turbine-pelton/>

9. Toutes les représentations schématiques proviennent du site <https://lamh.gmc.ulaval.ca/turbines-en-bref/>

10. <https://www.mecaflux.com/turbines.htm>

Ainsi, on remarque que ces turbines ont un rendement très supérieur aux hélices classiques. La turbine Pelton selon ce document semble être celle avec le meilleur rendement, même si l'on constate que les autres ont des rendements assez similaires¹¹.

11. <https://www.mecaflux.com/turbines.htm>

Annexe E : La dynamo

Pour ce qui est de la dynamo, nous nous sommes orientés vers une dynamo moyeu de vélo de la marque SON. Le modèle choisi est le SON 28¹² c'est le produit avec le plus de caractéristiques techniques. D'après le site internet Rosebikes¹³, cette dynamo produit une tension de 6 volts, une puissance de 3 watts et elle a un rendement de 65% à 15 km/h pour une roue de 28 pouces. D'après le site Cyclable¹⁴, une roue de 28 pouces correspond à l'appellation française "700C". Or, une roue "700C" a une jante de 622 mm de diamètre, le diamètre de la roue varie ensuite en fonction de l'épaisseur des pneus équipés.



Figure 29. Photo du modèle de dynamo choisi

Déterminons à présent le nombre de tours par seconde nécessaires pour avoir un rendement de 65% avec cette dynamo. Ne sachant pas le type de pneu équipé, nous allons faire nos calculs seulement avec le diamètre de la jante, ce qui correspond au pire des cas.

Calculons le périmètre de la roue :

$$\begin{aligned}
 \text{Périmètre} &= 2 \pi r && \text{avec } r \text{ le rayon de la jante en km} \\
 &= 2 \pi \times \frac{0.622 \cdot 10^{-3}}{2} \\
 &= 1.954 \times 10^{-3} \text{ km}
 \end{aligned}$$

12. Page du produit et source de la dynamo en photo: <https://nabendynamo.de/en/products/hub-dynamos/for-standard-forks/>

13. <https://www.rosebikes.fr/son-28-dynamo-dans-le-moyeu-551884>

14. <https://www.cyclable.com/quelle-taille-de-roue-privilegier-pour-un-velo-a-assistance-electrique/>

On sait que 1 tour de roue correspond à 1.954×10^{-3} km, ainsi par règle de trois:

$$\frac{15}{1.95 \times 10^{-3}} = 7692 \text{ tours}$$

En 15 km il y a 7692 tours de roue. Pour obtenir le nombre de tours par seconde on divise le résultat par 3600 :

$$\frac{7692}{3600} = 2.1 \text{ tr/s}$$

Il faut donc une rotation de 2,1 tr/s au minimum pour que la dynamo ait un rendement de 65%.

Annexe F : Application numérique

Débit de la pompe: 2150 L/h
 turbine: diamètre de 10 cm
 essieu: diamètre de 10 cm

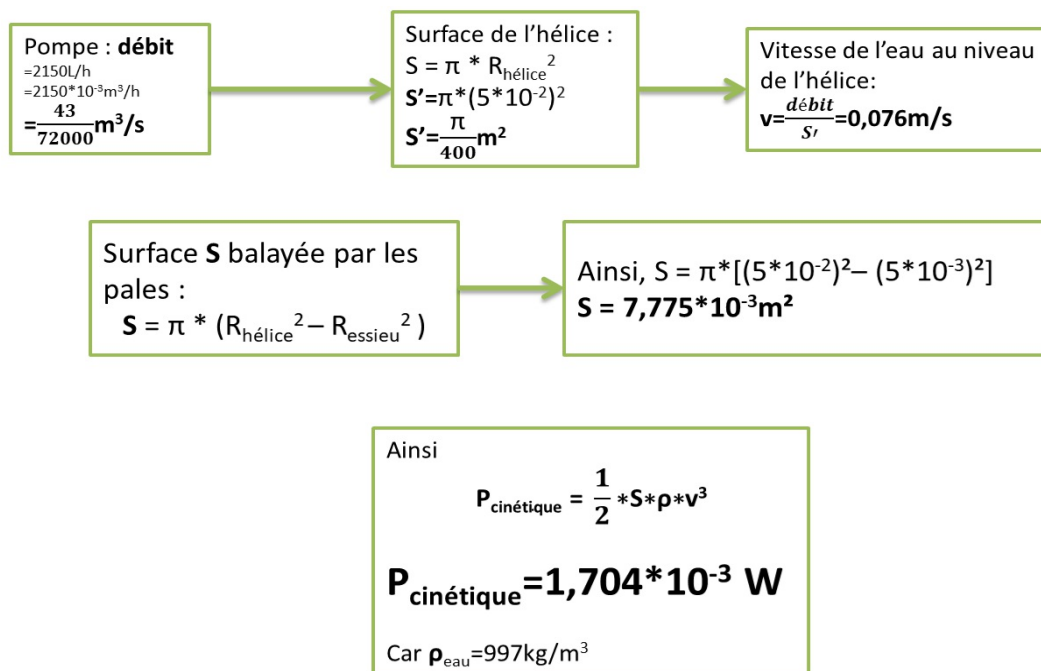


Figure 30. Calculs à suivre avec les données en entrée, pour obtenir la puissance cinétique

Nous supposons que notre turbine est parfaite, son rendement est donc maximal:

$$P_{\text{rotation,turbine}} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} (=1.010 \times 10^{-3} \text{ W})$$

Puis nous avons le multiplicateur, avec un rendement théorique de 90%, donc:

$$P_{\text{rotation,multiplicateur}} = \frac{90}{100} P_{\text{rotation,turbine}} (=9.088 \times 10^{-4} \text{ W})$$

Enfin, pour obtenir la puissance électrique disponible en bout de chaîne, la dynamo a un rendement de 65%, on a alors:

$$P_{\text{électrique}} = \frac{65}{100} P_{\text{rotation,multiplicateur}} (=5.907 \times 10^{-4} \text{ W})$$

Nous pouvons simplifier ces calculs de puissance avec l'aide d'un seul rendement, il s'agit du rendement global de la chaîne de montage (de la turbine jusqu'au circuit électrique), nous le nommerons $\eta_{\text{chaîne}}$, ainsi:

$$\eta_{\text{chaîne}} = \frac{16}{27} \times \frac{90}{100} \times \frac{65}{100} = \frac{26}{75} \Rightarrow \eta_{\text{chaîne}} = 34.67\%$$