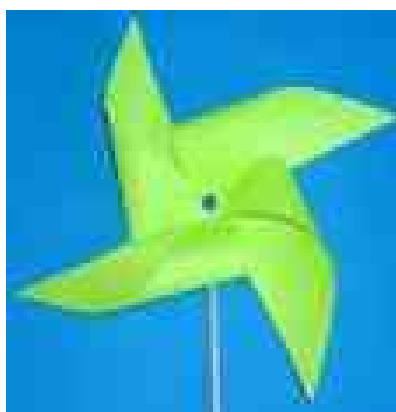


Travaux Personnels Encadrés

Lycée J-M Carriat

Année 2004/2005



L'éolienne économique

Introduction

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité ne date pas d'hier. Paul La Cour créait déjà en 1891 la première centrale éolienne connue. Aujourd'hui, la croissance constante des besoins énergétiques due notamment à l'émergence économique de certains pays (Chine, Brésil,...), ainsi qu'une politique énergétique frileuse au niveau nationale doivent engager chacun à prendre conscience des nouveaux problèmes environnementaux (effet de serre, difficulté de stockage des déchets nucléaires, ressources pétrolières limitées à moyen terme,...). Des efforts peuvent être fait à tous les niveaux. L'énergie éolienne présente l'avantage d'être gratuite, propre et ses ressources quasi illimitées. Une étude détaillée du potentiel éolien français aboutit à une estimation de l'énergie techniquement récupérable de $70 \cdot 10^9$ kWh/an sur des sites terrestres et de $477 \cdot 10^9$ kWh/an sur des sites en mer, soit 1.5 fois l'énergie électrique actuellement consommée en France. Pour contrer les critiques récurrentes allant à l'encontre de ce type d'énergie, nous avons créé une éolienne à un coût minimal, utilisable par tous. Nous avons voulu montrer qu'avec un minimum de moyen et d'envie n'importe qui doit pouvoir bénéficier des avantages d'une telle énergie. C'est une question de bonne volonté, et si ce projet de mini éolienne peut donner des idées et encourager l'utilisation d'énergies plus propres, son but sera pleinement atteint.

Le besoin auquel répond cette éolienne est très particulier. En effet elle est destinée à alimenter en électricité des installations nécessitant une faible puissance et étant situer à des endroits trop éloignés du réseau national d'électricité. En raison de sa faible puissance elle n'est pas en mesure d'assurer à un particulier une alternative à l'énergie délivrées par EDF, en France par exemple. Elle est destinée à des personnes ayant un budget très faible, peut être construite par n'importe qui et cela pour un coût largement réduit par rapport à une éolienne commerciale. Le coût de revient a été de 75€ contre environ 800 € pour un modèle acheté. L'utilisation de matériaux de récupération et de méthodes de fabrication simples a beaucoup contribué à la baisse des coûts de revient. Cependant, sa réalisation nécessite une réelle motivation et un gros investissement de temps. Cette éolienne pourrait par exemple alimenter en lumière une habitation dans un pays en voie de développement. Ou encore permettre à une pompe électrique de puiser de l'eau

dans un puit au milieu d'un champ. Pour notre projet l'énergie servira à l'éclairage d'une cabane à proximité.



La cabane qui sera éclairée

Sommaire :

I) Problématique 1 : Comment transformer l'énergie éolienne en énergie mécanique de rotation adaptée ?

- 1) Positionner l'éolienne : Poteau téléphonique
- 2) Orienter l'éolienne face au vent : empennage et fourche de vélo
- 3) Transformer l'énergie éolienne en énergie mécanique de rotation : Les pales
- 4) Adapter l'énergie mécanique de rotation : le multiplicateur
- 5) Aspect de sécurité

II) Problématique 2 : Comment convertir l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique disponible ?

- 1) Convertir l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique : l'alternateur
- 2) Adapter l'énergie électrique : pont de diodes et régulateur
- 3) Stocker et Utiliser l'énergie produite

Annexe : -FAST

I) Problématique 1 : Comment transformer l'énergie éolienne en énergie mécanique de rotation adaptée ?

1) Positionner l'éolienne : Poteau téléphonique

Le support de l'éolienne est un poteau téléphonique, de 7 mètres, en bois récupéré après qu'il ait été brisé durant un accident de voiture .Il fut installé à Rignat en bordure d'une vigne, ce qui nécessita des travaux de terrassement et de cimentage de la base : le mat est installé dans un trou, creusé à la main, de 80 cm de profondeurs et de 1 m de diamètre. Une fois le poteau installé et fixé avec des haubans, le trou fut remplis de pierres et enfin recouvert par une dalle de 25 cm d'épaisseur de béton .Ci contre, une photo du poteau avec un premier prototype d'éolienne, réalisé durant l'été 2004 par le chef de projet en dehors du cadre des TPE, il fut le point de départ du projet.



2) Orienter l'éolienne face au vent : empennage et fourche de vélo

-l'axe de rotation verticale

Il nous est vite apparu qu'une fourche de vélo constituerait un support idéal pour la nacelle. On en trouve dans n'importe quelle casse, chez le voisin ou dans son garage, en la récupérant d'un vieux vélo. Sa solidité fut un avantage décisif car elle devra supporter le poids des pales, de l'alternateur et de l'empennage. Ce qui

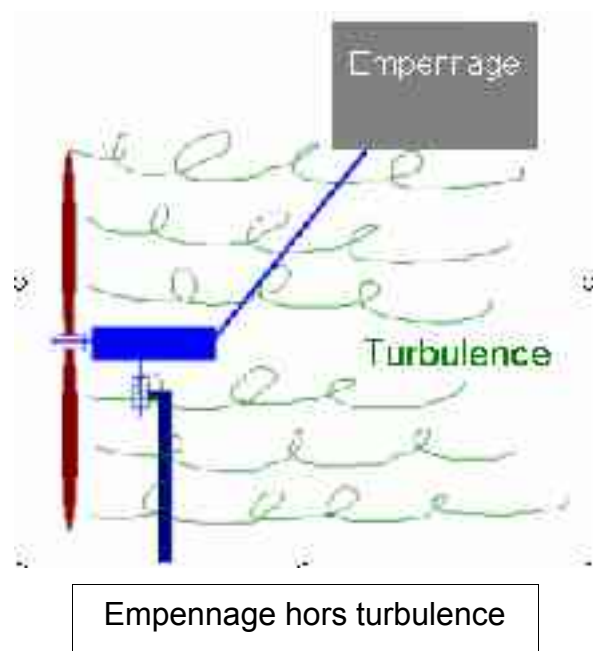
représente tout de même une dizaine de kilos. Il nous fallut alors faire face à différentes contraintes repérées lors de rapides « Brainstorming » :

-La fourche doit être dirigée vers le haut, pour pouvoir constituer un support fiable où fixer notre chaîne d'énergie.

-L'axe de la fourche est utilisé pour permettre l'orientation des pales face au vent grâce à l'empennage. C'est pourquoi l'axe de rotation doit être aligné avec l'axe du poteau. Ceci afin que les pales soient toujours à la même distance du poteau. Cette précaution n'avait pas été envisagée pour le premier prototype, or après plusieurs mois d'utilisation, par vent fort on a constaté que les pales touchaient le mat.

-L'empennage

L'empennage permet grâce à la force du vent d'orienter l'éolienne automatiquement face au vent. C'est le système que l'on retrouve sur toutes les petites éoliennes ou girouettes. Une tige métallique est fixée, dans l'axe de l'éolienne, d'un côté à la nacelle et de l'autre à une plaque en aluminium. Il est possible de placer cette empennage hors de la zone de turbulences afin d'obtenir une orientation plus réactive et rapide. En effet le vent ne passant pas à travers les pales n'a pas perdu d'énergie et ses filets d'air sont bien tous orientés dans le même sens.



3) Transformer l'énergie éolienne en énergie mécanique de rotation : Les pales

Les pales sont les éléments centraux de notre éolienne c'est pourquoi nous y avons apporté un soin particulier.

a) Choix du type de pales

Le choix du type de pales dépend du lieu d'implantation et de l'usage de l'éolienne. L'éolienne est située à flanc de colline dans le Revermont, les conditions de vent ne prédisposent pas à des conditions de vents forts et violents mais plutôt à des vents faibles ou modérés. La puissance d'une éolienne ne dépend pas du nombre de pales mais de la surface balayée par celles-ci, le nombre de pales détermine la fréquence de rotation et le couple de démarrage. Plus il y a de pales plus le couple est élevé mais moins la fréquence est forte. Les vents étant faibles il nous fallait une éolienne multipale (plus de 4 pales) et aussi une vitesse de rotation élevée, c'est pourquoi nous avons fait un compromis entre couple et fréquence et avons choisi une éolienne tripale. La fréquence est proche de celle d'une éolienne bipale mais le couple est nettement plus élevé.

Les pales font 1m de longueur ce qui amène le diamètre du rotor à 2 mètres 10. La puissance mécanique théoriquement récupérable est d'environ 330 W à 30 km/h en fixant le rendement des pales à 0.4.

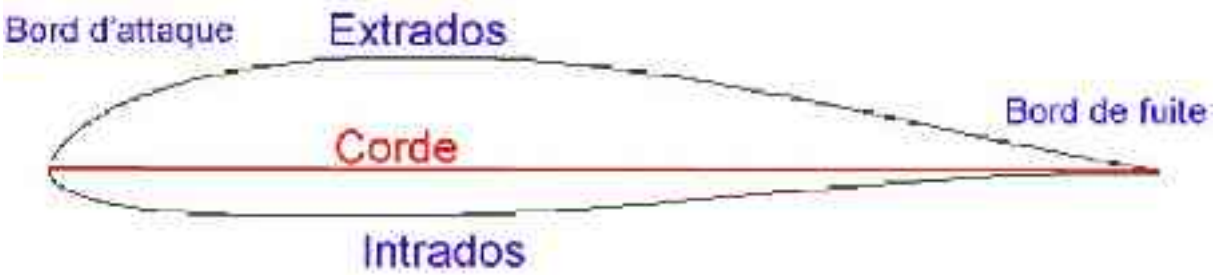
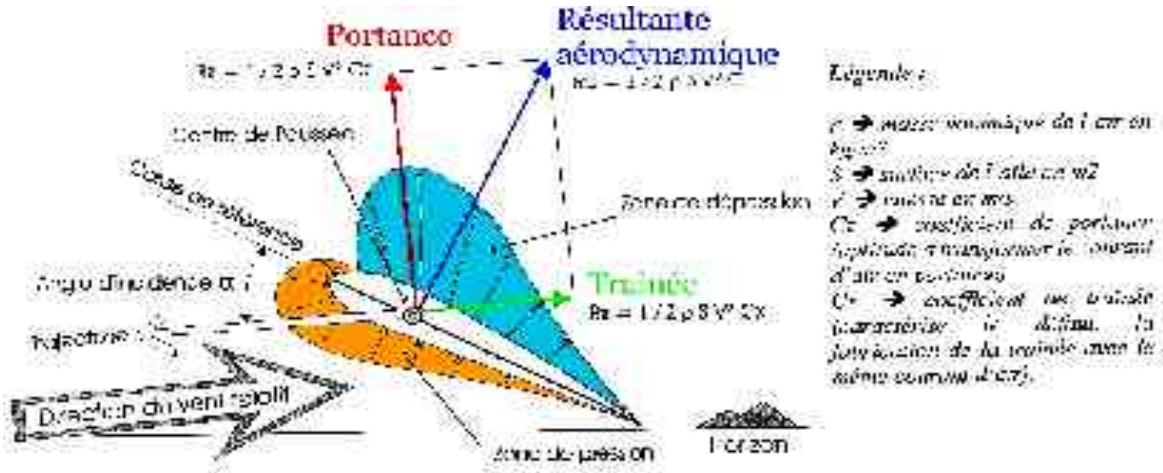


Une pale à largeur variable

Ensuite, nous avons choisi la forme des pales.

La vitesse linéaire en bout de pale est largement supérieure à celle au pied, cela induit des frottements aérodynamiques plus grands en bout de pale. Nous avons donc choisi une pale à largeur variable, comme sur la photo ci-contre. Vient ensuite le choix du profil. Les pales d'une éolienne fonctionnent exactement sur le même principe que les ailes d'un avion comme expliqué par le schéma ci-dessous. Grâce à la forme du profil l'air passant sur le dessus de l'aile, l'extrados, doit parcourir plus de chemin que celle passant par le dessous, l'intrados, c'est pourquoi l'air accélère

créant une dépression et donc une aspiration vers le haut. Sur l'intrados l'air provoque une surpression ce qui provoque aussi un effort vers le haut. Ces deux efforts réunis s'appellent la portance. La pénétration dans l'air ne se faisant pas sans frottement un autre effort, la traînée, s'oppose au mouvement. La résultante aérodynamique est la résultante de ces deux efforts, la portance et la traînée, c'est elle qui permet à l'avion de tenir en l'air ou ici de faire tourner le rotor. Nous avons choisi comme profil celui d'un planeur de modélisme récupéré sur Internet. La largeur de pale étant variable, le profile l'est aussi, c'est-à-dire qu'il est de plus en plus réduit au fur et à mesure que l'on s'approche de l'extrémité de la pale.



Voici le profil des pales à 50 cm du pied de pale

a) Choix de la méthode de fabrication

Nous avons tout d'abord réfléchi aux différentes possibilités pour la fabrication et les caractéristiques des pales, plusieurs solutions s'offraient à nous :

- des pales en bois,
- des pales en tuyau de PVC taillés,
- des pales moulées en résine,
- et enfin des pales en aluminium.

Après plusieurs réflexions et une étude de ces différentes possibilités, notre choix s'est orienté vers les pales en aluminium.

En effet, les pales en bois n'ont pas été choisis, car il est indispensable que les pales résistent aux intempéries, il s'avérait difficile de travailler le bois afin d'obtenir des pales identiques avec le matériel que nous possédions (même profil, même masse...). De plus le bois souvent utilisé pour ce type de construction, l'hykorie est un bois rare, cher et difficile à se procurer.

En ce qui concerne les pales en tuyau de PVC, le profil de la pale ne convenait pas. Il était trop concave par rapport au profilé idéal. De plus le PVC est difficilement déformable et ne nous aurait permis un travail sur sa forme que trop approximatif.

Les pales moulées en résine, auraient quant à elles bénéficié d'un coût de fabrication largement trop élevé, ce qui ne rentrait pas dans notre problématique. Cependant il aurait été facile d'obtenir des pales ayant un très bon profil, une grande résistance aux efforts mécaniques et surtout une masse faible.

Nous en arrivons donc aux pales en aluminium. Solution souvent retenue par les amateurs d'éoliennes dont nous avons pu visiter le site internet. Nous avons donc fabriqué ces pales en 4 jours pendant les vacances de la Toussaint.

b) Description de la construction

Nous avons d'abord fabriqué la matrice d'une pale, c'est-à-dire la forme sur laquelle la tôle d'aluminium sera pliée.

Cependant elle ne fut pas utilisée car la tôle d'aluminium était trop rigide et il n'était pas possible de plier comme nous l'avions envisagée.



Les profils prêts à être assemblés.



La matrice une fois finie.

La pale est découpée dans une grande plaque d'aluminium (un ancien panneau publicitaire) ensuite elle est pliée d'abord sur un établi avec des sers joints puis sur un étau atelier.



La plaque d'aluminium.



Les pales sont pliées sur cet étau atelier.

Le bord de fuite est ensuite riveté tous les 30 mm pour garder une grande rigidité et solidité. Afin de permettre la fixation de la pale au moyeu une petite matrice sur mesure a été introduite dans la pale, ainsi trois tiges filetées permettent la fixation d'une équerre d'acier. Celle-ci est ensuite vissée au moyeu grâce à deux boulons.



Une petite matrice.



Une pale avec sa fixation.

L'angle d'incidence est réglable grâce aux rondelles. Il est conseillé de le fixer entre 12° et 17° . Plus l'angle de calage est petit plus les pales devront faire de tours pour parcourir la même distance, donc la vitesse est plus forte mais le couple est plus faible, et inversement. La masse des pales relativement importante (2 kg chacune) ainsi que la force centripète oblige la réalisation d'attaches de pieds de pales solides. C'est pourquoi elles sont réalisées grâce à des équerres en aciers renforcées avec des triangles soudés afin d'éviter qu'elles ne soient trop souples ou encore qu'elles ne se déforment.



On peut faire varier l'angle d'incidence grâce aux rondelles.



L'axe de rotation de pales est un axe de pédalier de vélo. Pour réaliser les liaisons encastremements entre d'un côté les pales et de l'autre le multiplicateur nous avons directement utilisé la pièce existante sur le vélo qui relie l'axe du pédalier aux plateaux. Ainsi la co-axialité et la transmission de puissance sont parfaitement

obtenues. Nous avons donc récupéré cet élément pour le fixer au moyeu, une plaque d'acier de 5 mm l'épaisseur.



L'axe de pédalier avec l'élément permettant l'encastrement.

c) L'équilibrage statique :

Cette étape est très importante car les vibrations dues à la rotation rapide des pales peuvent entraîner des dégradations. Ces vibrations desserrent les écrous, c'est pourquoi nous avons utilisé des rondelles à dents et des contres écrous à chaque fois qu'il y avait un risque, en particulier pour la fixation des pales au moyeu. Il faut au maximum réduire ces vibrations grâce à un équilibrage le plus précis possible. Cela consiste à rajouter de petites masses de façon empirique à l'extrémité des pales afin de contrer les défauts de fabrication des pales au niveau de leur masse et surtout de leur répartition autour de l'axe de rotation. Le fait que les

masses de chaque pale soient égales ne change rien, car c'est la répartition de la matière qui permet l'équilibre de l'ensemble. Pour réaliser l'équilibrage il faut mettre en mouvement les pales et vérifier qu'elles tournent de façon continue, elles ne doivent pas repartir en sens contraire lorsque le rotor tourne à faible vitesse. Il faut que l'hélice puisse



Le rotor au complet.

s'arrêter dans n'importe quelles positions. On met le rotor dans une position et on

vérifie qu'il ne bouge pas, il ne doit pas amorcer une rotation dans un sens ou dans l'autre.

4) Adapter l'énergie mécanique de rotation : le multiplicateur

Après plusieurs séances de tests des pales en extérieur nous avons pu noter une fréquence de rotation des pales se situant entre 150 et 250 tr/min, or l'alternateur doit tourner au minimum à 450 tr/min .Cette vitesse est trop faible pour entraîner directement l'alternateur, c'est pourquoi l'utilisation d'un multiplicateur s'est avérée indispensable. Plusieurs solutions se sont alors présentées :- l'utilisation de courroie de distribution de voiture avec les différents pignons.

-l'utilisation d'une boîte de vitesse de petite moto.

-l'utilisation des jeux de plateaux et pignons de VTT.

Après analyse de chaque solution la première fut mise de côté, en effet le rapport de multiplication maximum que l'on pouvait obtenir n'était pas suffisant, de plus la longueur des courroies est fixe et souvent très longue ce qui ne facilite pas la réalisation .Ensuite la deuxième solution fut également abandonnée car trop lourde. Finalement c'est le système plateaux et pignon de VTT qui a été retenu en effet sa masse est faible, il y a une multitude de combinaisons afin d'obtenir le rapport de réduction souhaité, le rendement est excellent et l'utilisation d'un maillon rapide permet d'ajuster la chaîne juste à la bonne longueur. Cette solution permet un rapport de multiplication maximum de 4, l'alternateur tournera donc entre 600 et 1000 tr/min, ce qui est tout à fait convenable. Le plateau est installé sur l'axe de rotation des pales les pignons ont été fixé sur le ventilateur de l'alternateur grâce à des vis.



Le multiplicateur

Nous avons choisi de placer l'alternateur sous la nacelle, afin que le système soit plus compact et facilite la mise en place du carter. La chaîne passe donc de chaque côté de la poutre centrale qui constitue la nacelle. L'alternateur est suspendu par une liaison pivot de façon à tendre la chaîne de vélo grâce à son propre poids. Un ressort de compression permet également de maintenir la chaîne en tension. Il est possible de modifier le rapport de multiplication en utilisant les différents pignons. Pour cela nous avons conçu une liaison pivot permettant de décaler les deux butées le long de l'axe de rotation de l'alternateur.

5) Aspect de sécurité

Pour des raisons de sécurité il est nécessaire d'envisager une solution en cas de vents très forts. L'éolienne pourrait s'emballer, une trop grande vitesse de rotation des pales pourrait créer des vibrations destructrices et donc endommager le système ou encore blesser des personnes autour par projection de débris.

a) choix du type de frein

- Frein manuel : le frein à disque

La première solution la plus simple est l'utilisation d'un frein manuel actionné au besoin par l'opérateur. Elle consiste en l'installation d'un frein à disque de VTT sur l'axe tournant provenant des pales. Les plaquettes de freins seraient actionnées par l'intermédiaire d'un câble au pied du poteau grâce à une manette. Afin d'éviter au câble de se tordre à cause de l'orientation de l'éolienne, il est possible d'utiliser le même système que sur les Vélos BMX. L'avantage de ce système est sa simplicité de mise en œuvre. Son inconvénient majeur est que le freinage n'est pas automatique et nécessite l'intervention d'une personne.

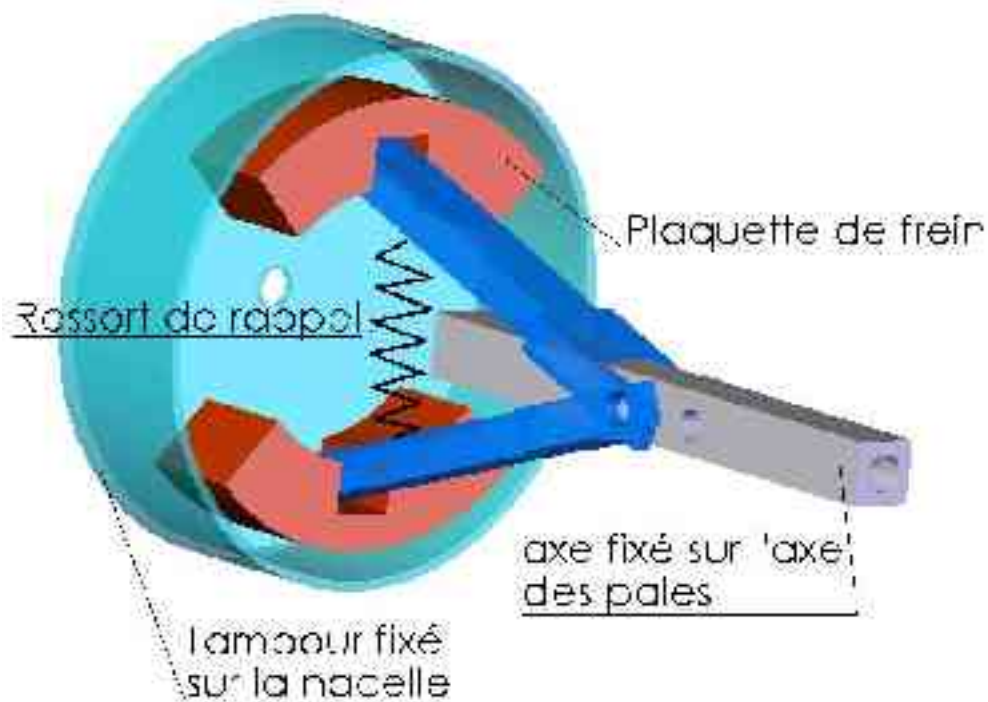
-Freins centripètes

Ensuite nous avons réfléchi à l'automatisation de ce système grâce à la force centripète. De cette manière, deux masses se trouvant fixées latéralement sur l'axe tournant, auraient en cas de vent important, déviées leurs trajectoires, et se seraient écartées de leur axe de rotation. Elle auraient ainsi établi une tension sur des câbles menant à l'étrier de frein, resserrant alors le disque, qui aurait par

conséquence ralentit le mouvement de rotation. L'avantage du système est qu'il ne nécessite aucune intervention. Ce système automatique provoque une stabilité du système : plus les pales tournent vite plus le freinage est important. Si le vent est idéal ou inférieur au seuil critique (environ 60 km/h) le frein est inactif.

Voici une autre solution assimilable à la précédente .Il a été envisagé d'installer sur l'axe tournant, un système mécanique similaire à une sorte de frein à tambour centrifuge. Celui-ci est solidaire de l'axe des pales, plus les pales tournent vite plus les plaquettes de frein s'écartent afin d'aller se plaquer sur le tambour fixe, ce qui cause des frottements, ralentie la vitesse de rotation des pales et crée une sécurité vis à vis de l'emballement de l'éolienne en cas de vent fort. Ce système autonome parut ingénieux de part son autonomie et sa régularité de fonctionnement.

Mais les raisons de la mise à l'écart de cette solution mécanique, sont l'extrême complexité de réalisation et que contenu de nos faibles moyens financiers nous ne pouvons pas réaliser un système fiable à cent pour cent. Pour ces raisons ce système a été abandonné.



-Frein aérodynamique : l'effacement

La dernière solution étudiée pouvant assurer la sécurité du système par vent fort, se trouve être l'installation d'un effacement. Cette solution est souvent retenue par les amateurs. On peut observer sur les éoliennes de pompages, que l'on trouve

dans certains champs, des systèmes assimilables .La solution se résume à modifier l'inclinaison du rotor face au vent, soit en mettant l'empennage sur le coté, soit en faisant basculer la nacelle en arrière. La surface des pales présentée au vent est donc réduite, l'éolienne tourne moins vite. Il est possible d'adapter le système afin qu'il soit autonome en utilisant la force du vent. En effet, nous avons vu précédemment que, l'effort du vent sur le rotor crée une traînée dirigée dans le sens du vent. La somme des traînées sur toute la surface des pales se résume à une résultante située au centre des pales. Elle peut être utilisée pour faire pivoter l'ensemble de la nacelle dans le sens du vent.



Un exemple d'une éolienne en effacement vertical.

2) Convertir l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique : l'alternateur

a) Choix de la génératrice

Si l'on veut convertir de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique, il est nécessaire d'utiliser une machine à courant continu, une machine asynchrone ou une machine synchrone en fonctionnement générateur. Ces 3 machines sont susceptibles d'être utilisées dans notre projet. Cependant il est nécessaire d'en choisir une.

La génératrice continue

Le générateur continu a certains avantages : la tension en sortie est directement utilisable pour charger une batterie, les moteurs sont souvent couplés à un réducteur qui se transforme en multiplicateur de très bon rendement lorsqu'on l'utilise en générateur.

La génératrice asynchrone

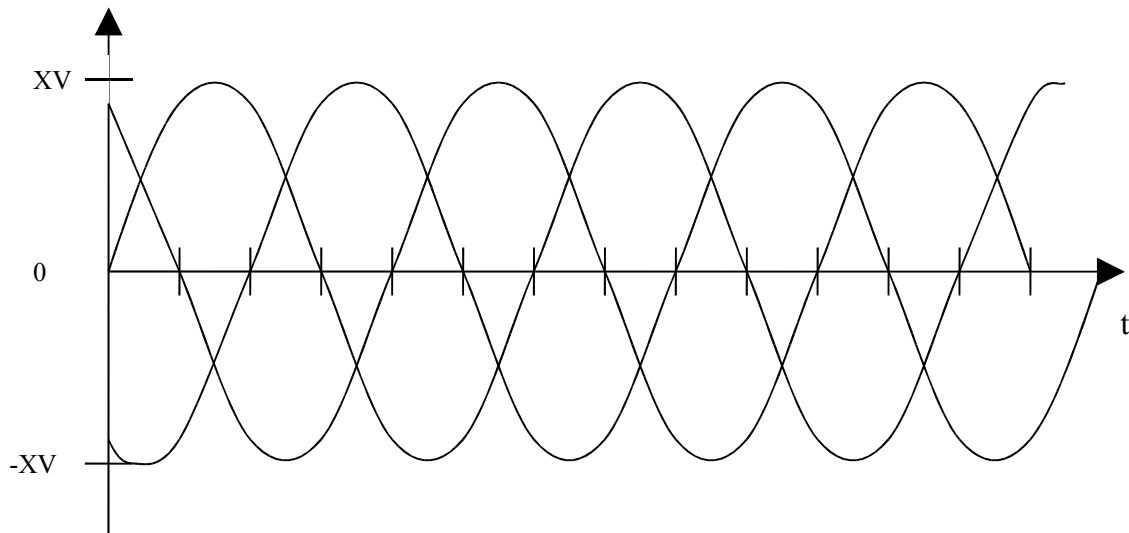
Ce type de génératrice est difficilement récupérable car il reste peu utilisé.

Notre choix : la génératrice synchrone ou alternateur

La génératrice synchrone est la plus adaptée à notre projet : elle bénéficie d'un rendement excellent, et est utilisée dans n'importe quelle automobile et donc

facilement récupérable. De plus, il existe des dispositifs capables de réguler la tension, inexistantes sur une génératrice continue (cf. partie 3).

b) Description de l'alternateur



L'alternateur triphasé utilisé convertit une énergie mécanique de rotation en trois tensions alternatives identiques décalées d'un tiers de période :

L'alternateur se compose de deux parties : le rotor et le stator. Le rotor porte l'enroulement inducteur. Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paires de pôles. Il faut apporter le courant à l'inducteur par l'intermédiaire de bagues et de balais comme sur un moteur à courant continu.

Le stator porte les enroulements induits. Ils sont le siège des 3 courants alternatifs décrits par le graphique

Ces courants sont induits par la rotation du champ magnétique du rotor.

Formules de la tension de sortie :

$$U = K' \cdot N_s \cdot \Phi$$

U : tension en sortie d'alternateur

K' : constante dépendant des caractéristiques de la machine

N_s : vitesse de rotation en tr/s

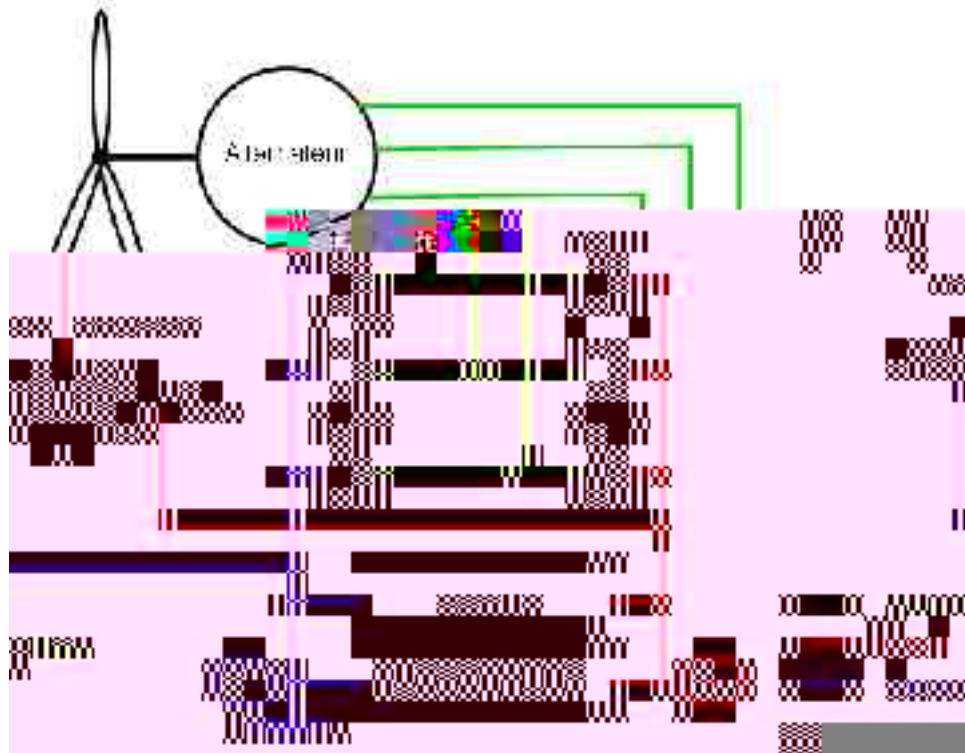
Φ : flux d'induction magnétique (Wb) proportionnel à la tension d'excitation

Cela met en évidence des relations de proportionnalité qui nous serviront par la suite.



L'alternateur (à gauche) en phase de tests.

2) Adapter l'énergie électrique : pont de diodes régulateur

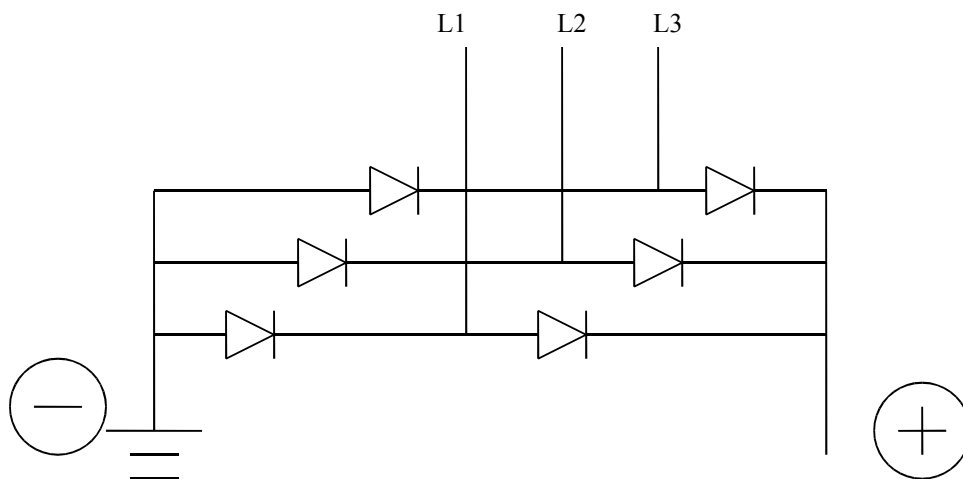


Le schéma de principe que nous allons détailler

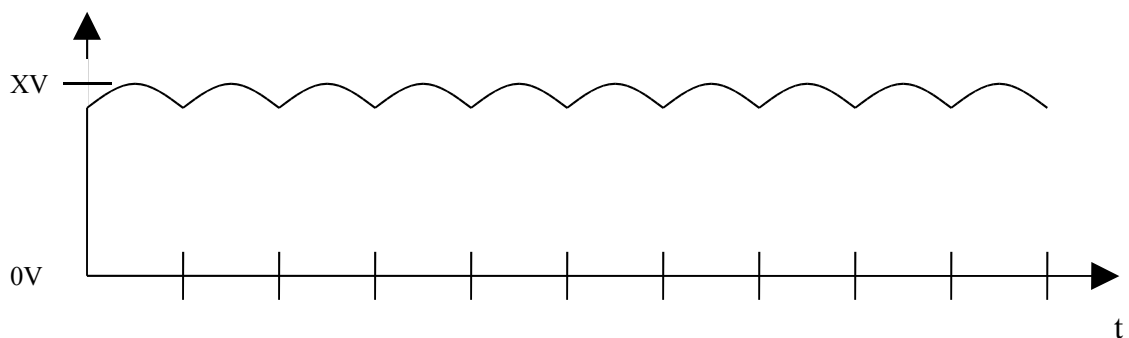
Puisque nous avons pour but de recharger une batterie, nous devons forcément adapter l'énergie électrique en transformant les trois tensions sinusoïdales en une seule de même signe puis en la stabilisant à une tension proche de 14V supérieure à la tension batterie : si elle était inférieure elle ne pourrait pas la recharger et si elle pouvait être supérieure à 14V, le courant de charge pourrait éventuellement être trop important et endommager la batterie en la faisant bouillir.

a) Redresser la tension triphasée

Pour transformer les trois tensions alternatives en sortie d'alternateur en une seule de même signe, on utilise un circuit appelé pont de diodes où L1, L2 et L3 sont les 3 phases et + et – la sortie redressée:



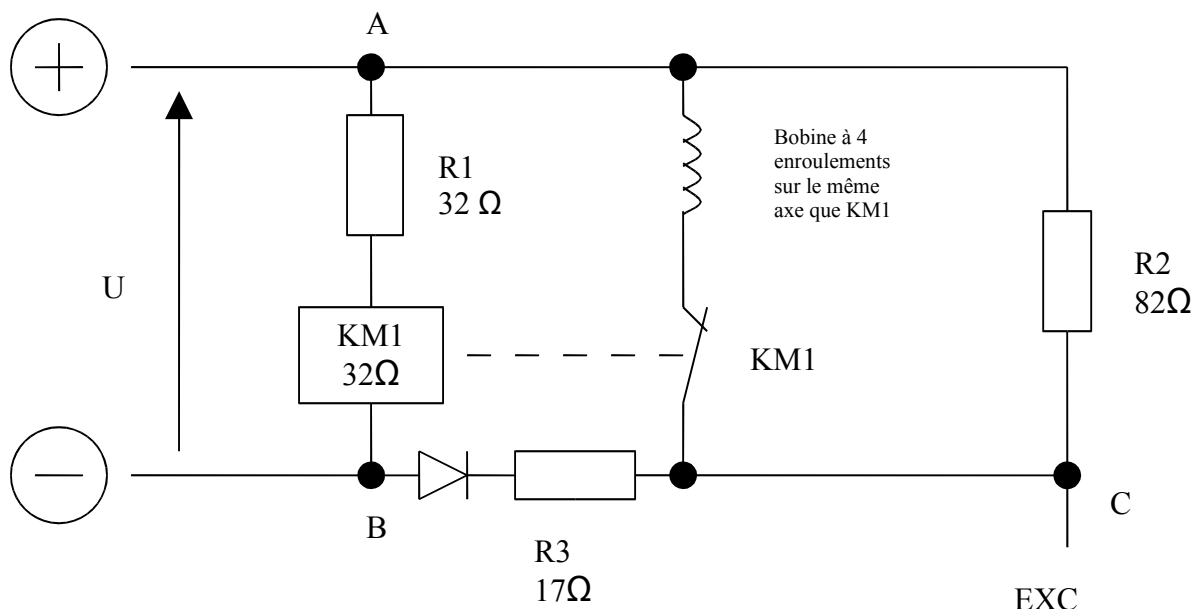
On obtient en sortie la tension suivante qui permet de charger la batterie



b) Réguler la tension

Cependant, cela n'est vrai que pour une vitesse de vent stable car comme on l'a vu précédemment, la fréquence et surtout la valeur de la tension en sortie d'alternateur dépendent de la vitesse de rotation. C'est pourquoi nous avons besoin d'un autre dispositif qui est utilisé en automobile et donc facilement récupérable, le régulateur.

Le fonctionnement de cet élément peut être expliqué à partir de la formule qui exprime la tension en sortie d'alternateur : $E = K' \cdot N \cdot \Phi$ où Φ est proportionnel à la tension d'excitation. Le régulateur adapte donc la tension d'excitation en fonction de la vitesse de rotation N du rotor de l'alternateur afin d'avoir toujours une tension stable pour charger la batterie. Le schéma du régulateur utilisé est le suivant :



La tension U est celle produite par l'alternateur.

Pour remplir sa fonction, le régulateur agit sur le courant d'excitation en jouant sur le rapport cyclique. $R = \frac{V_{\text{moy excitation}}}{U}$

Si l'on diminue le courant d'excitation, le champ magnétique créé par le rotor va diminuer, par conséquent la production de l'alternateur va aussi baisser. On distingue trois cas :

- _ Lorsque la tension U devient trop importante, le contacte $KM1$ s'ouvre.
- _ Lorsque la tension U est inférieure à 14V, le contact est fermé.

_ Lorsque le courant d'excitation est trop fort traversant la bobine à 4 spires, le contact s'ouvre (ici les mesures sont difficiles à réaliser).

L'ouverture et la fermeture du contact fait varier la résistance équivalente entre les points A et C. La diode permet de résoudre les problèmes dus à une mauvaise masse.

c) Augmentation de la plage de fonctionnement.

Il nous reste à traiter les différentes modifications apportées au système ayant pour but l'élargissement de la plage de fonctionnement : en effet, si la tension en sortie de régulateur est stable à 14V environ, ce type de fonctionnement n'est valable qu'à partir d'une vitesse de rotation suffisante du rotor. En dessous d'une certaine valeur, le régulateur ne peut pas augmenter soit le rapport cyclique, soit la tension d'excitation. C'est pourquoi nous avons réfléchi aux différentes manières de diminuer la vitesse minimale de fonctionnement.

4 solutions sont alors envisagées :

- l'emploi de 2 alternateurs mis en série a été expérimenté, validé puis abandonné du fait du poids supplémentaire que cela impose.

- le passage d'un couplage triangle à un couplage étoile afin de multiplier la tension par $\sqrt{3}$ mais malheureusement l'alternateur était déjà couplé en étoile.

- le rebobinage qui augmente la tension proportionnellement au nombre de spires du stator (le rebobinage du rotor étant trop compliqué).

- l'utilisation d'un multiplicateur qui permet d'augmenter la vitesse de rotation entre l'axe de l'éolienne et l'axe de l'alternateur.

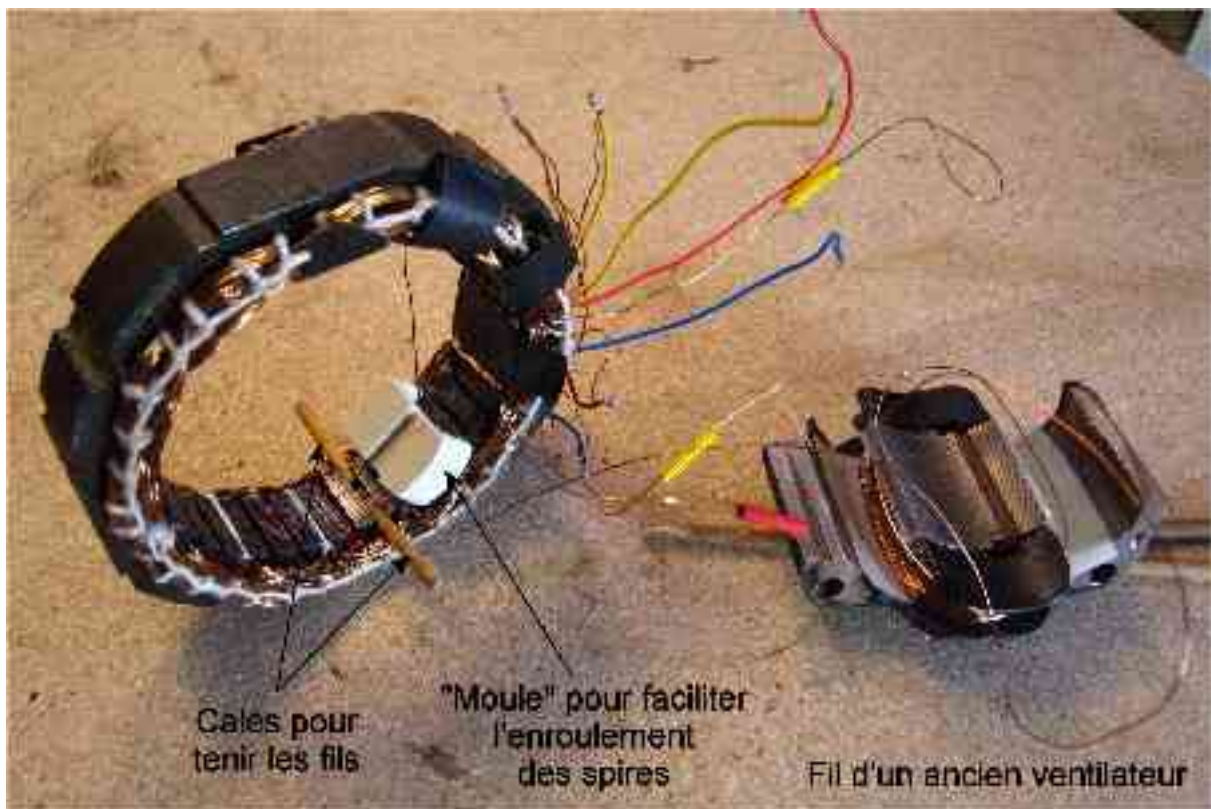
Finalement nous avons choisi la combinaison des deux dernières ; le multiplicateur ayant été détaillé dans la première partie, nous allons maintenant expliquer le rebobinage.

Tout d'abord, on sait que le flux d'induction magnétique (Φ) est proportionnel au nombre de spires du rotor. En rajoutant, on augmente donc le rapport de proportionnalité entre la tension de sortie et la vitesse de rotation. ($E=K'.N. \Phi$).

On obtient globalement une tension plus élevée et donc la vitesse nécessaire au fonctionnement est diminuée. Cependant la résistance du bobinage est plus élevée donc on peut produire des courants moins élevés.

Avant le rebobinage, d'après les caractéristiques du constructeur l'alternateur pouvait délivrer 12V à environ 1000 tr.min⁻¹ et jusqu'à 50A (à très grande vitesse). Pour notre utilisation, nous n'avons pas besoin de tels courants mais plutôt d'une tension supérieure à la batterie le plus rapidement possible. Nous avons donc doublé le nombre de spires (10 spires) pour chaque phase. Finalement, il nous restait de la place et nous avons fait un deuxième bobinage avec 5 spires. Nous pouvions alors avoir plusieurs possibilités de couplage : pour obtenir plus ou moins d'intensité.

Nous avons fini par opter pour un couplage série-étoile qu'on a appelé « montage grande tension » (les deux bobinages sont en série et couplés en étoile). Grâce à ce couplage et le bon réglage du régulateur, l'alternateur s'auto amorce, c'est à qu'il peut fournir de l'énergie sans l'aide de batterie comme une voiture.



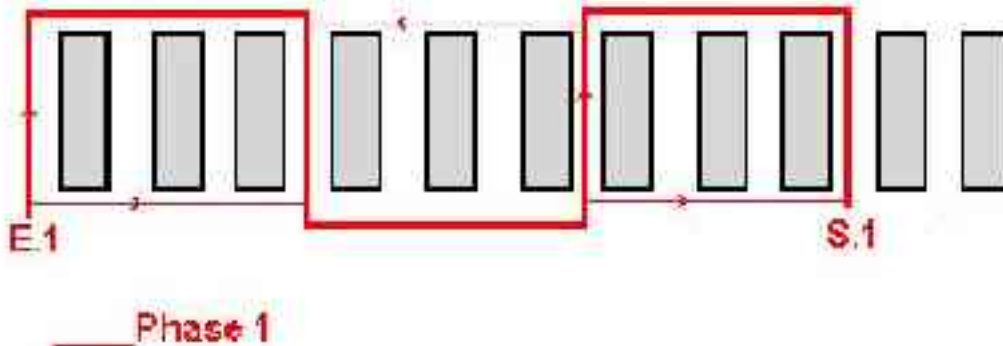
Le rebobinage du stator (mise en place de 42 mètres de fil)

Le rebobinage :

L'avantage est que l'alternateur fonctionne même si nous n'avons pas une batterie chargée, et il s'excite seulement lorsque la vitesse est suffisante. Nous avons donc enlevé le fil original pour en mettre un plus fin, pour gagner de la place et faire plus de tours.



Bobinage original

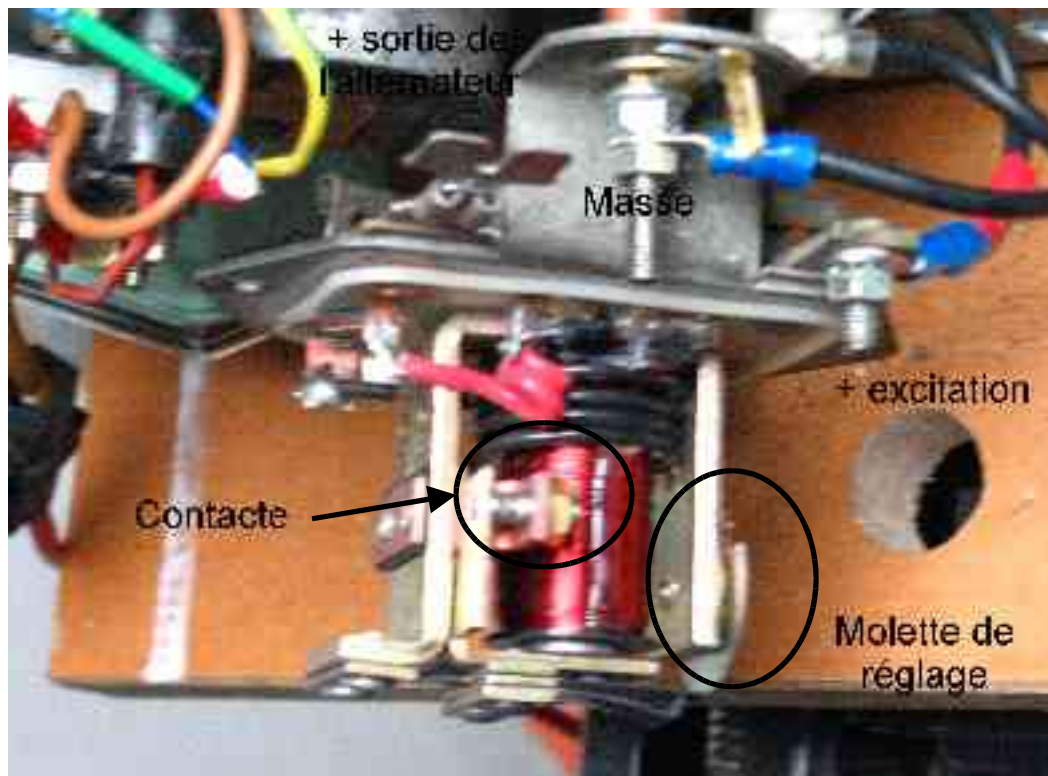


Méthode pour rebobiner

Selon ce schéma, nous avons fait en tout 15 tours pour chaque ensemble de 3 encoches et en changeant de sens d'enroulement pour chaque ensemble. Ici nous avons le schéma pour une phase. Sachez qu'il faut réaliser le même travail en décalant chaque phase d'une encoche. Il y a 36 encoches, donc l'alternateur contient 6 paires de pôles. Nous nous sommes aperçus lors de nos tests que la relation :

$\omega = f / N_{\text{paires de pôle}}$ valable pour les moteurs asynchrones est aussi valable pour les alternateurs (ω : vitesse de rotation de l'arbre en tr.s^{-1} , f la fréquence en Hz). Ceci

nous a été très utile pour savoir la vitesse de rotation de l'arbre lors de nos tests en dehors du lycée (car nous n'avions pas de tachymètre).



Régulateur électromagnétique

Nous avons aussi réalisé de nombreux tests avec des régulateurs électroniques. Ceux-ci sont beaucoup plus précis : ils tiennent exactement 14,55V comme leur plaque signalétique indique. Cependant ils sont beaucoup plus fragiles (pannes fréquentes sur les voitures d'après un garagiste) et surtout ils s'adaptent moins bien à notre configuration, ce qui se traduit par une efficacité nettement en recul par rapport au régulateur électromagnétique.

Avec notre solution, nous rechargeons la batterie jusqu'à environ 13V à partir de 450 tr.min-1

4) Stocker et Utiliser l'énergie produite : la batterie

a. Le récepteur

Comme on le voit sur le schéma bloc de départ, il est possible d'alimenter n'importe quel système avec notre alimentation : on peut imaginer l'utilisation d'un moteur à courant continu ou encore d'un système de chauffage mais cela ne

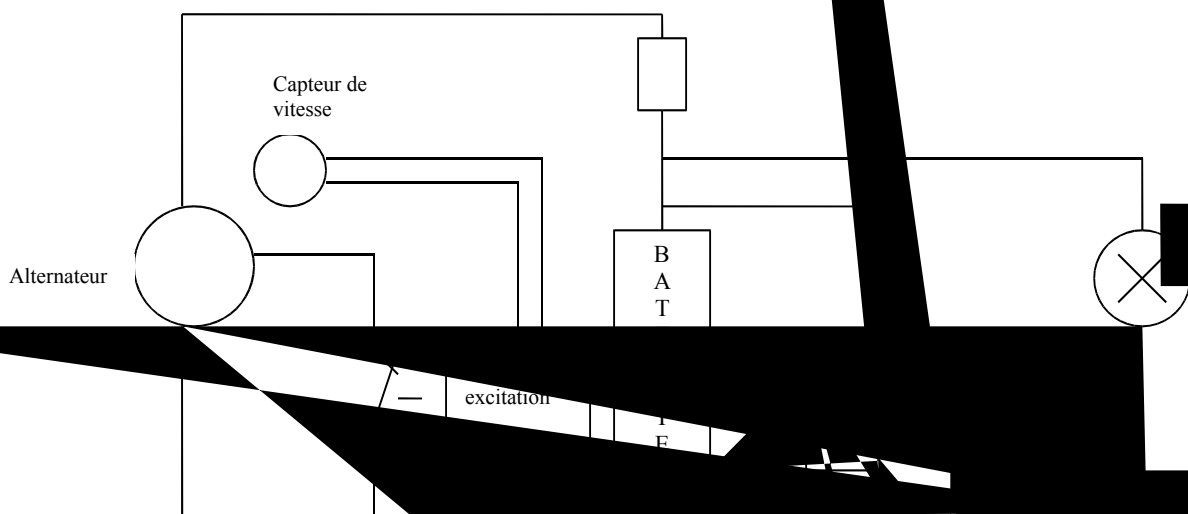
rentrant pas dans le cadre de notre problématique et n'ayant pas d'intérêt sur le site d'implantation, nous allons nous servir de l'énergie récupérée pour éclairer une cabane

De plus, la batterie ne doit pas être utilisée hors de ses limites de fonctionnement : si on la décharge trop, il y a sulfatation des plaques et la batterie perd une partie de ses performances et peut même devenir inutilisable. De même si on la charge trop, il y a électrolyse de l'eau et production d'un mélange gazeux $O_2 + 2H_2$ explosif.

c) Importance et réalisation du circuit de commande

Pour résoudre les problèmes liés à la batterie cités précédemment ainsi que la nécessité de couper l'excitation lors d'un vent trop faible pour récupérer de l'énergie (et donc pour éviter d'en perdre), il nous était nécessaire de réaliser un circuit de commande. Celui-ci permet de couper l'excitation lorsque c'est nécessaire et aussi de couper la consommation lorsqu'elle est trop importante. En effet, la charge est déjà limitée du fait que la tension maximale en sortie de régulateur est de 14V.

Schéma global :



Fin de décharge

Si l'on fixait un seuil unique sous lequel la consommation... en place un contact oscillant car lorsque l'on enlève la charge... la tension batterie remonte automatiquement. C'est pourquoi no...

comparateur à fenêtre qui permet de régler 2 seuils : lorsque la tension batterie descend au dessous du seuil bas, la consommation est stoppée mais elle n'est rétablie que si la tension batterie remonte au dessus du seuil haut.

Coupure de l'excitation

La vitesse de rotation de l'hélice est mesurée par un moteur à courant continu qui sera relié à un arbre. De cette manière on peut la comparer à une vitesse minimale fixée et couper l'excitation en dessous de ce seuil mais le problème est le même que précédemment : si l'on coupe l'excitation, le couple résistant sera diminué et la vitesse augmentera. On utilise donc le même circuit que précédemment.

Sécurité

De plus, le circuit dispose d'une résistance qui limite le courant de charge au dixième de la capacité de la batterie car un courant supérieur risquerait de l'endommager. Dans le cas ou celle-ci ne suffirait pas, nous avons prévu un fusible ou un disjoncteur permettant d'éviter un tel incident.

Réalisation du montage

Toujours dans un souci de n'utiliser que des matériaux de récupération engendrant un moindre coût, le circuit a été réalisé avec des composants dessoudés sur d'autres circuits et soudés sur une plaque d'époxy dont la plaque de cuivre a été fraisée pour réaliser les connections.