

qu'un système en 24 Volts avec le même jeu de pales (et la même vitesse de rotation).

Si le nombre de tours est trop petit par rapport à une batterie donnée, il faudra que l'hélice tourne très rapidement pour que l'alternateur commence à produire. Si le nombre de tours est trop important, l'alternateur va commencer à charger les batteries à de faibles vitesses. On aura donc un couple qui empêchera les pales d'atteindre leur vitesse optimum. Le risque est d'avoir une production faible. Il est important d'avoir le nombre correct de tours correspondant à la taille des pales et à la tension des batteries.

Les sections de fils données ici sont les tailles maximum que vous pouvez facilement rentrer dans le stator. Les fils plus gros perdent moins de puissance donc chauffent moins. Un alternateur en 12 volts va devoir supporter deux fois plus de courant qu'en 24 Volts (pour la même puissance) mais comme les fils dans la bobine sont plus courts et plus épais, la chaleur dégagée est similaire. (Le fil reliant l'éolienne et les batteries devra lui aussi être plus gros, pour prévenir des pertes trop importantes).

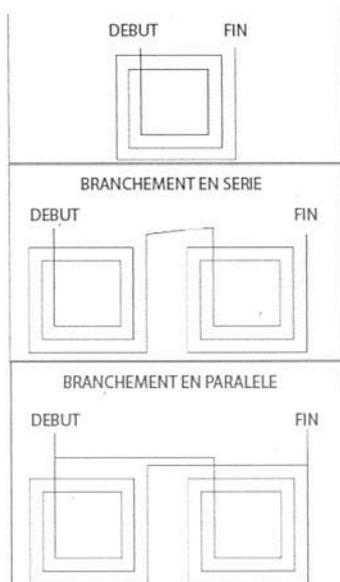
A partir d'un certain point, il est plus simple de bobiner avec deux fils car le fil de cuivre épais est peu maniable. Si vous bobinez avec deux fils dans la main, vous devez avoir deux bobines et enrouler les deux en même temps dans le bobineur. Avec deux fils plus fins, vous aurez moins de bosses dans votre bobine.

Dans certains cas, l'alternateur en 12 volts va être connecté en parallèle plutôt qu'en série pour réduire la taille du fil dans les bobines. (Voir ci dessous).

Connexions des bobines

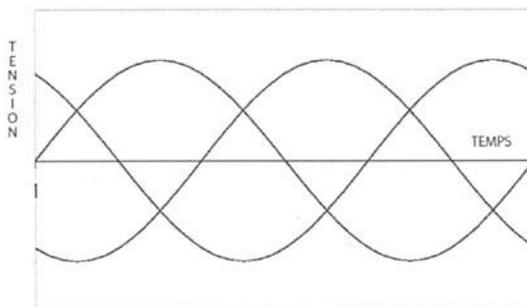
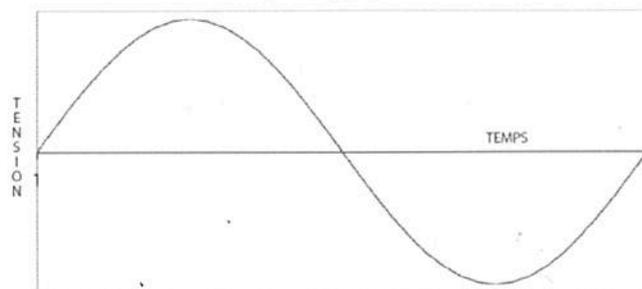
Chaque bobine va produire une tension mais la tension du stator va dépendre du type de connexion. Plusieurs connexions sont possibles.

Une bobine possède deux bouts, un début et une fin. Les bobines peuvent être connectées en série ou en parallèle. Pour une connexion en série : la fin d'une bobine se connecte avec le début de la suivante. Les tensions des bobines s'ajoutent entre elles pour produire une tension double entre le début et la fin des deux bobines.



Pour les connexions en parallèle ce sont les entrées qui sont connectées ensemble. Il en va de même pour les sorties. La tension résultante est la même que pour une bobine mais elles peuvent transporter deux fois plus de courant.

Je préfère connecter les bobines en série. La connexion en parallèle pose des problèmes pour des alternateurs auto construits : les tensions de sortie de chaque bobine vont être légèrement différentes. Cette différence provoque des courants parasites entre les bobines ce qui gaspille du courant. Par contre la connexion en série pour des batteries de faible voltage implique peu de tours et un fil épais qui n'est pas très maniable. Avec des connexions en parallèle, on peut utiliser des fils plus épais. Le problème de courant parasite peut être réglé avec un redresseur spécial monté sur l'éolienne (voir p36).



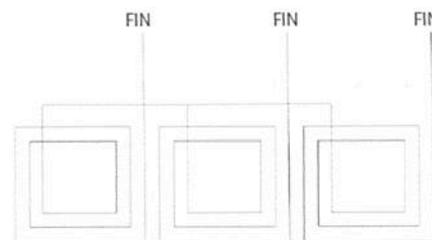
Stator triphasé

Chaque bobine va produire un courant alternatif (AC) avec l'alternance des pôles d'aimants passant devant elle (nord, sud, nord...). Ci dessus, est un graphique qui montre la variation de la tension avec le temps (signal sinusoïdal).

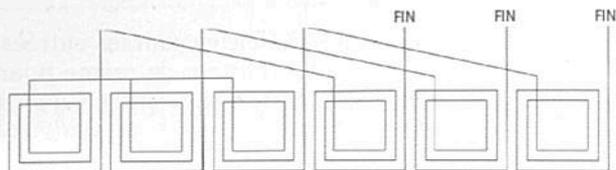
Tous les alternateurs dans ce manuel sont triphasés, le stator contient trois groupes de bobines qui produisent la même tension mais pas en même temps. Les stators avec trois phases présentent l'avantage de mieux utiliser l'espace entre les aimants et de délivrer une tension de sortie plus lisse.

Le meilleur moyen de connecter les trois phases de bobines est appelé montage en étoile.

(Il existe un autre montage en triangle mais je préfère l'éviter car lui aussi génère des courants parasites).



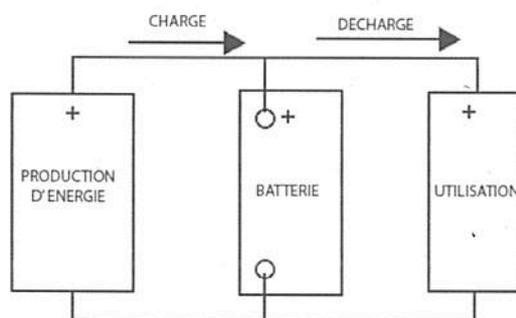
Dans une connexion en étoile, les 3 départs sont connectés ensemble comme montré ci dessus. Les 3 phases de sortie constituent les 3 fils de sortie du stator. Ce branchement série/étoile est souvent le meilleur branchement. Un exemple avec 6 bobines est détaillé ci-dessous.



La bobine 1 et la bobine 4 sont branchées sur la même phase. Les deux autres groupes sont 2&5, 3&6... Pour les plus grands alternateurs il peut y avoir 3 voir 4 bobines dans chaque phase pour un total de 9 ou 12 bobines dans le stator.

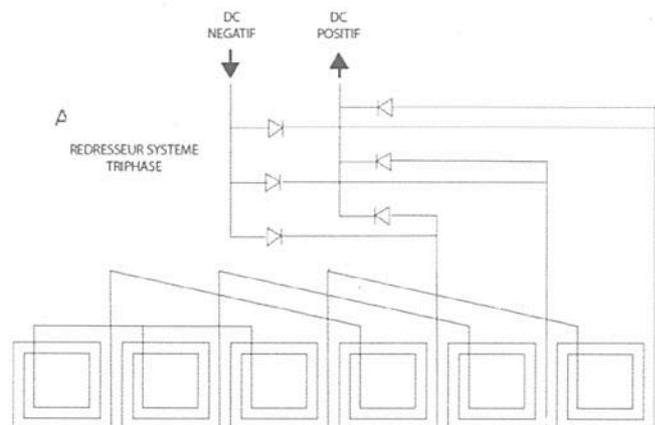
Chargement des batteries en courant continu

Les batteries sont des équipements chimiques qui stockent l'énergie. Il y a une tension entre les bornes mais elle ne varie presque pas, elle ne s'alterne pas comme pour le stator. Pour charger une batterie on doit forcer un courant électrique à entrer dans la borne positive et sortir par la borne négative. Quand les batteries se déchargent, cette énergie est utilisée, forçant le courant à sortir de la borne positive et aller dans l'appareil connecté. Dans les deux cas, le courant DC retourne à sa source car il ne peut pas y avoir de courant sans un circuit fermé. Dans certains cas, l'éolienne peut fournir directement l'électricité sans que les batteries (ou système similaire) participent. Mais la plupart du temps, le fournisseur et le demandeur ne sont pas en phase et c'est pour cela qu'on utilise des batteries.



Pour produire un courant continu qui pourra recharger les batteries à partir du courant alternatif des 3 phases, il faut passer par un redresseur ou pont de diodes. Les petits triangles avec une barre représentent les diodes. Ce petit composant autorise le passage du courant dans un seul sens (celui de la flèche). Le réseau des diodes est fait de telle sorte que le courant ne puisse aller que dans un sens. Le pont de diode transforme le courant alternatif en courant continu et empêche que les batteries se déchargent dans le stator.

Les bobines



Utilisez du fil de cuivre émaillé pour le bobinage. Un fil de grade 2 qui résiste jusqu'à 200 degrés est idéal mais un grade inférieur fera l'affaire. L'émail protège le fil de son voisin dans la bobine.

Le prix du cuivre est plutôt élevé au moment où j'écris ce livre. Vous ferez une meilleure affaire en achetant une bobine de 20 kg. En Europe les cotes du fil émaillé sont le diamètre en mm du cuivre (contrairement au fil électrique isolé ou la cote est la surface en mm²). Aux Etats Unis, et dans d'autres pays, la taille du fil est selon la norme AWG. Voir le tableau p 57 pour la correspondance.

Dans le tableau des tailles de fil et du nombre de tours, je recommande parfois d'utiliser deux fils (marqué 2@) pour faciliter l'enroulement. Pour les autres alternateurs, libre à vous d'utiliser un fil deux fois plus lourd à la place et inversement.

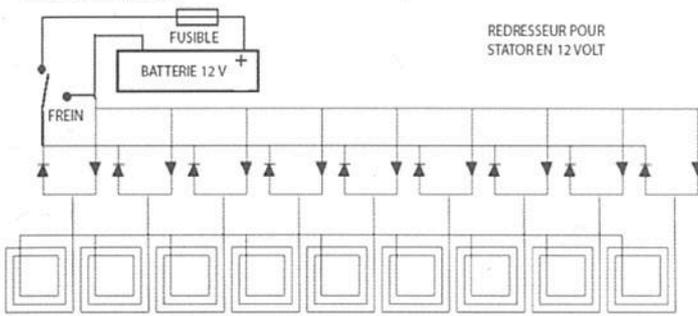
Stator marqué d'un astérisque (12 volt)

Les stators marqués d'un astérisque * sont connectés en parallèle car la connexion en série devient compliquée. Pour éviter les courants parasites du montage en parallèle, je recommande d'utiliser une paire de diodes pour chaque bobine. Il faut donc placer le redresseur sur la nacelle. Il y a du pour et du contre pour ce branchement mais c'est finalement celui qui marche le mieux pour les stators en 12 Volt.

Diamètre turbine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
Poids de cuivre	1.5kg	2.6kg	3kg	5kg	5kg	7kg
Nb de bobines	6	6	9	9	12	12
12-V diam(mm)	1.4	1.4	1.7	1.8	1.7	1.7
Tour par bobine	76	130*	73*	90*	80*	100*
24-V diam(mm)	1.06	1.5	2@1.5	2@1.6	2@1.8	2@1.8
Tour par bobine	140	110	45	55	37	45
48-V diam(mm)	0.75	1.06	1.5	1.6	1.8	1.8
Tour par bobine	270	220	90	110	75	90
Connexion réseau, ONDULEUR WINDY BOY 1700 150 - 350V ENTREE	WINDY BOY			0.9	0.9	0.9
	Tour par bobine			350	300	380

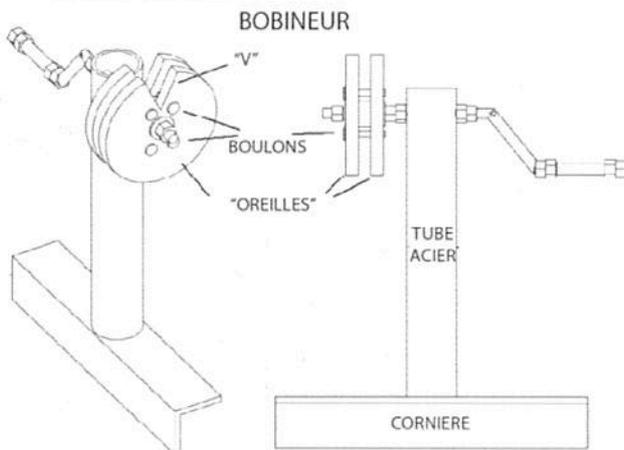
Les fils d'un système en 12 Volts sont gros afin de réduire les pertes engendrées par les forts courants les traversant. Utiliser deux fils avec un courant continu est plus efficace que 3 fils en courant alternatif. Le

fait de positionner le redresseur sur la nacelle est idéal pour le refroidissement mais complique la maintenance.



La mise en court-circuit de la machine est elle aussi plus compliquée car il faut déconnecter les batteries avant de connecter les fils entre eux.

Fabrication du bobineur



Le bobineur est le même que celle que soit la machine. La seule modification est sur l'épaisseur du séparateur.

L'axe est constitué d'une tige filetée de 10 mm tordue en forme de manivelle avec un bout du tuyau de cuivre qui sert de manche. Utilisez deux boulons serrés ensemble pour positionner la poignée ainsi que pour positionner l'axe à travers un tuyau de 48 mm. Ce bout de tuyau est généralement soudé sur un bout de cornière. On pourra fixer la cornière sur un plan de travail ou sur un tréteau. Le design est modifiable à souhait.

Les côtés des bobines sont tenus par deux joues. Ces joues sont faites de deux disques de 120 mm de diamètre dans un contreplaqué d'épaisseur 13.

Avant de procéder à la découpe, marquez et percez précisément les trous qui vont servir aux boulons sur lesquels les bobines seront faites. Les dimensions correspondent à la taille d'un aimant. Utilisez une équerre pour réaliser un travail

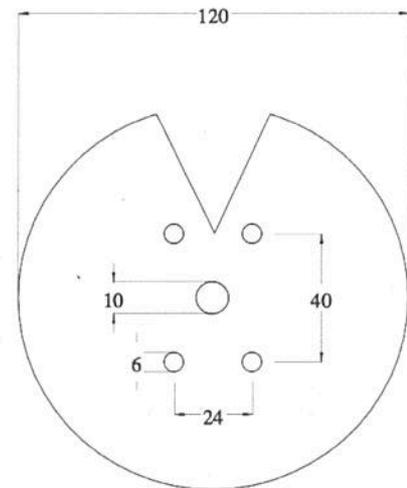


précis. Tracez deux lignes parallèles espacées de 40 mm et deux lignes espacées de 24mm.

Ensuite trouvez le centre en dessinant deux diagonales. A partir du centre tracez un cercle de rayon 60 mm.

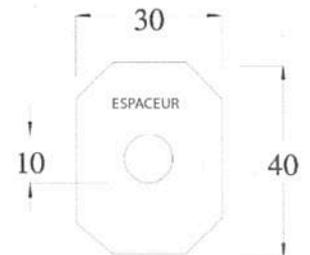
Dessinez un cercle identique mais cette fois vous n'avez pas besoin de marquer les emplacements des trous.

Découpez les disques avec une scie sauteuse. Joignez les deux disques, centrez-les et percez-les à travers le disque marqué (avec une perceuse à colonne). Marquez les deux disques pour avoir le même assemblage à chaque fois.



Chaque fois que vous percez un trou, mettez un boulon. Faites une découpe en V qui descend légèrement en dessous des deux trous des boulons. Vous pourrez ainsi introduire un bout de fil pour tenir la bobine.

Passez à la fabrication de « l'espaceur » qui donnera l'épaisseur des bobines : 12 mm (10 mm pour la 1200). Percez le centre en 10 mm avant de faire la découpe de la pièce. Les dimensions ne sont pas trop critiques mais 30*40 mm avec des coins coupés convient le mieux. Si la première bobine fabriquée ne rentre pas dans le stator, vous pouvez augmenter l'épaisseur.



Assemblez les deux oreilles avec des boulons et des rondelles. Vous pouvez coller l'espaceur sur l'oreille du fond. Assemblez dans la bonne position et placez les quatre boulons. Des boulons sans filetage sur la partie inférieure sont conseillés pour ne pas abîmer l'émail de la cuivre sinon vous pouvez mettre du scotch sur les filetages.

Fabrication des bobines

Placez la bobine de cuivre sur le sol. Si vous disposez d'une bobine de 20 Kg mettez-la sur sa tranche. Dans le cas d'une bobine légère, passez une tige qui servira d'axe pour le déroulement.

Ne manipulez le cuivre que lorsque nécessaire. Le cuivre devrait être sans pliures. Faites un angle de 90 degrés à environ 200 mm du bout. Passez l'extrémité par le V et enroulez l'excédent au niveau de la tige filetée.

A partir de maintenant, vous devez tenir le fil d'une main et tourner la manivelle de l'autre. Garder une légère tension dans le fil. Si vous relâchez la tension, la bobine risque de se défaire.

Commencez le bobinage et comptez chaque tour. Assurez vous que le fil soit bien collé au précédent. Ne laissez pas le fil faire des zig zag sinon vous perdez de la place. Le stator est conçu pour mettre un maximum de cuivre dans un minimum de place.

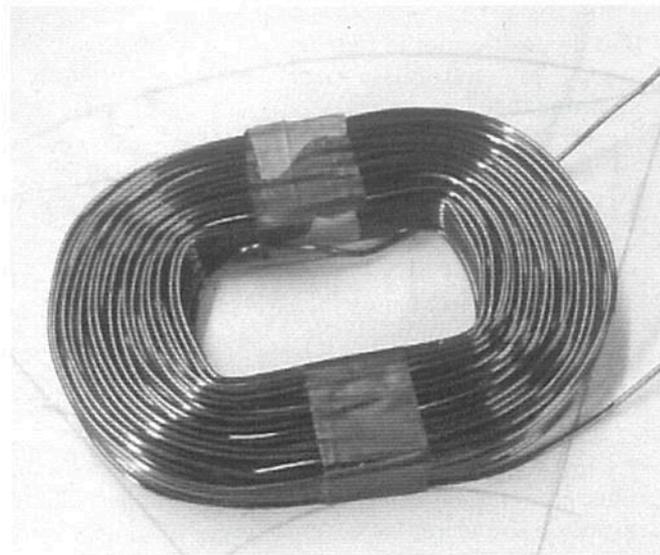


Soyez assez précis sur le nombre de tours surtout pour des faibles nombres. Lorsque vous avez le bon nombre de tours ne relâcher pas la tension dans le fil. Attachez un bout de fil autour de la bobine au niveau du V et twistez le. Coupez le fil de la bobine avec un extra de 200 mm. Entourez le surplus autour de la bobine et enlevez les 4 boulons ainsi que la tige de 10 mm. Manipulez la bobine avec soin pour garder sa forme et entourez les jambes de scotch électrique (voir photo).

L'entrée et la sortie de bobine doivent être dans la même direction. Il est bon de vérifier, avec la première bobine, que toutes les bobines vont rentrer dans le stator. Mettez la bobine dans le moule et vérifiez que la taille corresponde avec les lignes démarquant l'espace maxi occupé par une bobine (ligne sur la photo).

J'aime bien vérifier le poids de chaque bobine pour assurer l'homogénéité. Une bobine plus lourde peut être due à un nombre de tours trop important ou à un bobinage moins serré.

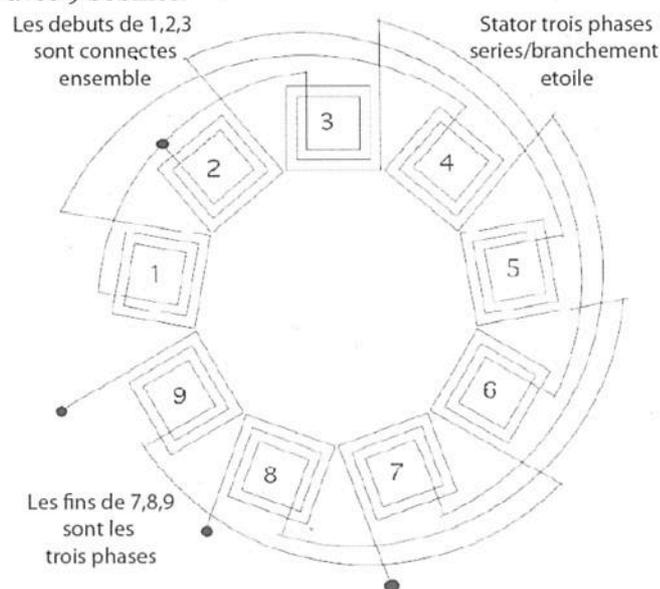
Dans le cas d'une bobine bien formée mais qui ne rentre pas dans le stator, vous pouvez refaire la bobine avec un espaceur plus large ou en diminuant la taille du centre de la bobine (cela ne devrait pas arriver si la



bobine est bien faite). Si la bobine est trop petite, bobinez en diminuant la tension sur le fil ou en diminuant la taille de l'espaceur.

Connexions des bobines

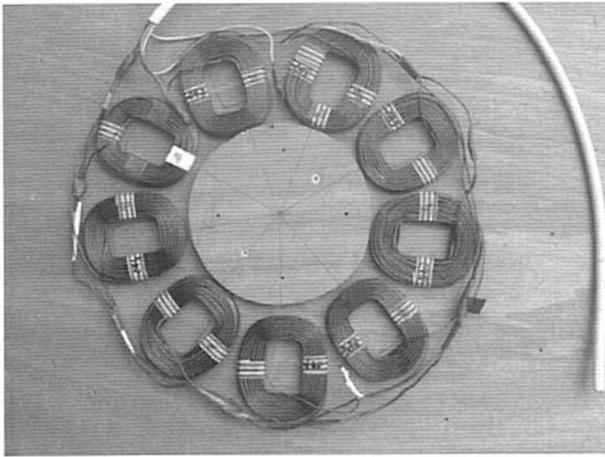
Dans la plupart des cas, les connexions vont être série/étoile. On peut voir un exemple d'une connexion avec 9 bobines.



La fin de la bobine 1 se connecte avec le début de la bobine 4, la fin de la bobine 4 se connecte avec le début de la bobine 7, la fin de la bobine 7 est une des trois phases.

Les bobines 1, 4 et 7 forment une phase. Si le pôle nord d'un aimant passe sur la bobine 1, un autre pôle nord va passer sur la bobine 4 et de même pour la bobine 7 : elles produisent toutes le même voltage.

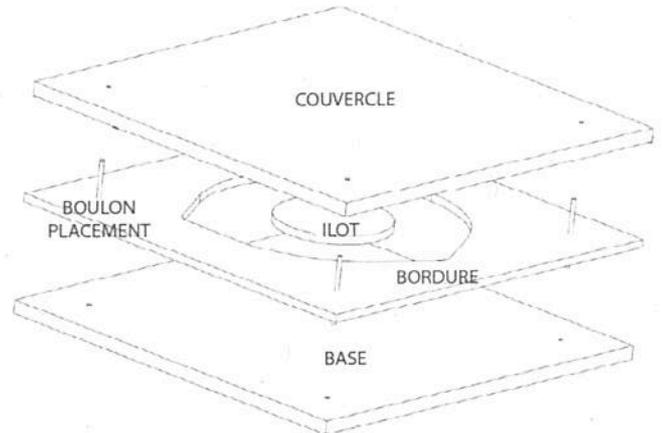
Les deux autres phases (2, 5 et 8) et (3, 6 et 9) partagent la connexion au neutre avec le début des bobines 1, 2,3 qui sont connectées ensemble et à rien d'autre. La fin des bobines 8 et 9 fournissent les deux autres phases qui vont être connectées (via un long câble) au pont de diodes qui lui sera proche des batteries.



Une fois les connexions faites, testez la résistance de chaque phase avec la position Ω (Ohms) du voltmètre. Vous devriez obtenir une petite valeur identique pour chaque phase.

Les moules

Le stator et les rotors vont être coulés dans la résine polyester ou vinylique pour encapsuler les aimants et



S'il n'y a que 6 bobines les phases sont : 1&4, 2&5, 3&6. S'il y a 12 bobines les phases sont 1, 4, 7 et 10 etc... Une bonne position pour le joint de soudure est souvent entre les deux bobines que vous sautez. Voir la section outillage pour des conseils sur la soudure.



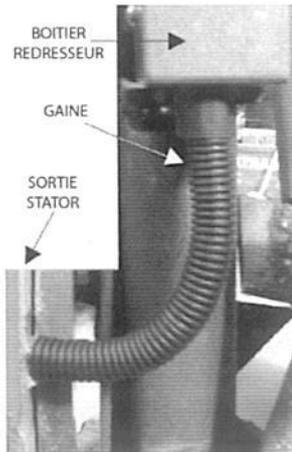
A la fin on doit obtenir une ceinture qui entoure l'extérieur des bobines. Je vous conseille de mettre les bobines à plat en position et les fixer en place pendant

que vous faites les connexions. Ca sera plus simple pour les positionnez dans le moule.

les bobines. Faites les moules à partir de contreplaqué ou de matériaux ayant un rendu similaire. Un contreplaqué de bonne qualité donnera un meilleur rendu. Au milieu, les bobines sont coulées dans la résine. Les bords entourant la résine sont formés par une pièce de contreplaqué appelé « bordure ». Le trou au milieu du stator est formé par une pièce appelé « ilot ». Coupez trois carrés à la dimension A (voir tableau). Attention les épaisseurs sont différentes. La pièce du milieu doit avoir la même épaisseur qu'une bobine. Elle peut être un peu plus fine mais pas plus épaisse pour pouvoir comprimer le stator durant le moulage.

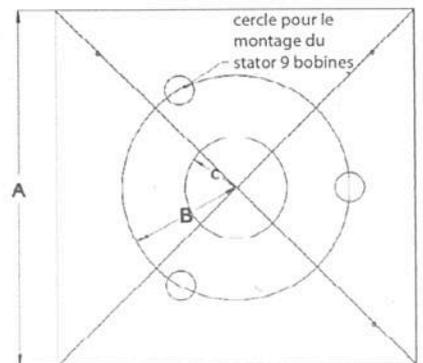
Le stator en 12 Volt

Les stators en 12 Volt marqués d'un astérisque ne sont pas connectés en série. Tous les débuts des bobines sont connectés à un « cercle » de neutre (tous connectés ensemble) qui fait le tour du stator et connecté à rien d'autre que les débuts. Les fins sont chacune connectée à un fil isolé qui sort du stator pour aller à la boîte ou se trouve le redresseur. Je préfère couvrir ces 9 (voir 12) fils avec un bout de flexible.



Utilisez du fil isolé flexible résistant au temps pour la connexion des phases sortant du stator (du câble avec 3 fils sauf pour le 12V). Soudez-les aux 3 phases. Les fils ont besoin d'être plus solides car ils vont être soumis aux vibrations, à la flexion et l'abrasion. J'aime bien utiliser des câbles souples.

Le couvercle et la base doivent être résistants avec une finition lisse. Vous pouvez par exemple utiliser de l'aggloméré servant comme plancher ou du MDF avec une fine couche lisse sur le dessus. Un contreplaqué de 12 mm fonctionne pour les trois pièces (le bas est préférable en 18 mm). Les vis prennent mieux dans le contreplaqué que dans le reste.



Je préfère percer 3 trous à travers les plaques pour assembler les plaques toujours de la même façon. C'est très utile pour mettre le couvercle lors du moulage.

Marquez la forme du stator sur la pièce centrale comme sur le dessin :

Commencez par les diagonales pour trouver le centre. Avec les machines à 16 pôles vous pouvez utiliser ces lignes pour marquer les 4 points de montage.

Diamètre éolienne	1200	1800	2400
A	450	500	600
B	162	167	186
C	45	66	83
Diamètre éolienne	3000	3600	4200
A	600	650	700
B	220	240	272
C	99	125	147

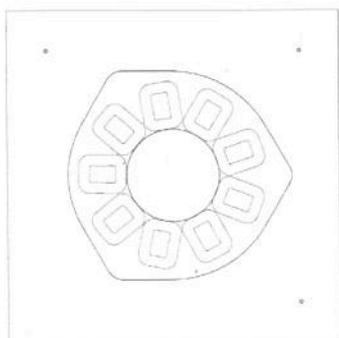
A partir du centre, tracez les cercles de rayon **B** et **C**. C est le rayon de l'îlot central. Pour la machine 1800 vous pouvez faire une forme hexagonale pour faire rentrer les 6 bobines. (comme pour la 1200, page suivante).

Remarque : Les cotes de C sont indicatives, elles peuvent diminuer ou augmenter en fonction de la qualité des bobines. Découpez ce cercle une fois les bobines finies.

Maintenant marquez la position des points de fixation du stator. Ils se trouvent sur le cercle de rayon **B** qui marque l'extérieur du stator. Il y aura 3 points pour les machines 1800-3000 et quatre pour les 3600 et 4200. Comme d'habitude la petite machine va être différente.

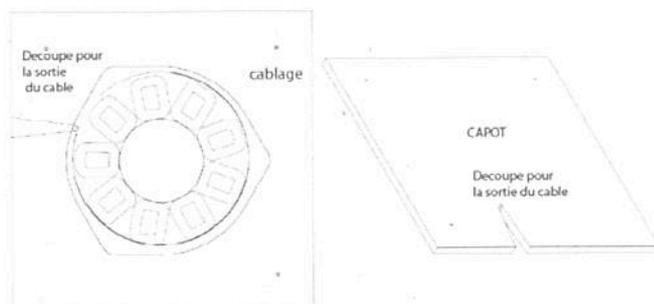
Les points doivent toujours être à la même distance. Utilisez un compas pour trouver la position des 3 points. Pour les machines à 4 points, c'est plus simple, ils sont tous sur les diagonales. A chaque point de fixation tracez un cercle de **25 mm** de rayon. Tracez des lignes tangentes à ces cercles et au plus grand cercle et vous avez la forme du stator. Ne coupez pas tout de suite.

Le schéma montre les bobines en position dans le moule touchant l'îlot central. Le fait qu'elles touchent devrait permettre aux aimants de passer parfaitement au milieu. L'excédant de place autour est destiné au passage des fils. Quand vous placez les fils de cuivre, placez-les loin des points de fixation ou vous risquez de percer un fil de cuivre.



Pour la compression du moule vous pouvez utiliser des serre-joints mais il vous en faut beaucoup pour avoir une pression également répartie. J'ai l'habitude d'utiliser des vis ou des boulons répartis le long des bords. Vous pouvez percer les 3 parties en 10 mm puis serrer avec des boulons en 8. Je préfère pré-percer le couvercle et le milieu et serrer l'ensemble avec des vis qui prennent dans la base. Les trous servent aussi pour l'évacuation de pression qui se crée lorsque les

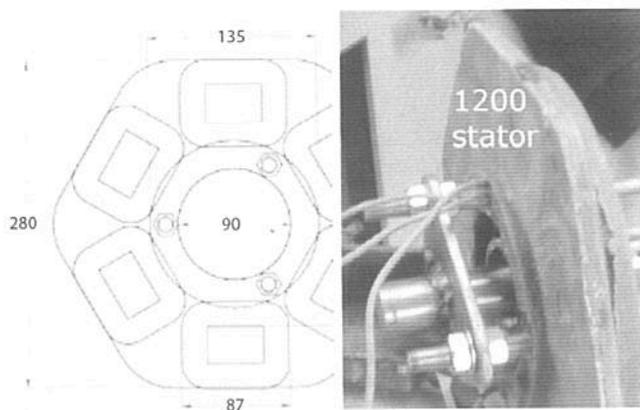
premières vis sont fixées. Les vis/ou les boulons vont être contaminés par la résine et difficilement réutilisables. Le reste du moule peut être utilisé plusieurs fois, si vous le nettoyez correctement dès le démoulage.



Découpez la forme du stator avec une scie sauteuse en une fois pour que la forme du stator (qui ne sert pas pour le moulage) soit utilisable. Vous pouvez percer des trous pour le passage de la lame dans la partie qui ne sert pas au moule. Utilisez une lame de bonne qualité et fine. Ecartez la lame de la perpendiculaire pour faciliter le démoulage. Pour faire les arrondis, n'appliquez pas de pression latérale mais faites bouger l'arrière de la machine de façon à garder le même angle de coupe.

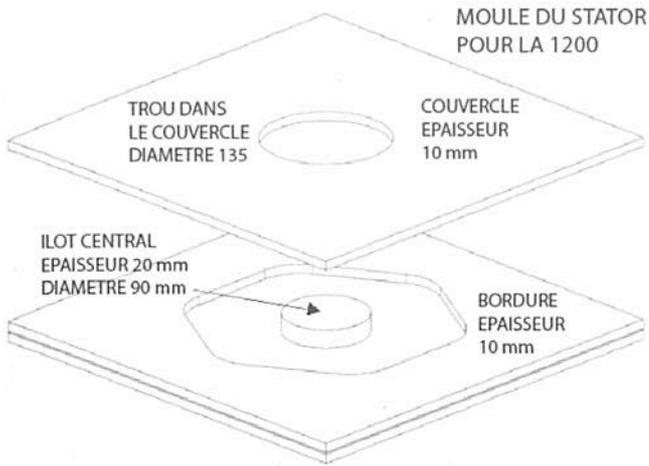
Vous pouvez maintenant assembler le milieu et le couvercle pour marquer le point de sortie des fils sur le couvercle. Le point de sortie doit être proche du bord et dans une position où les fils peuvent facilement aller à la boîte électrique. Mettez-le loin des points d'ancrage. Séparer le couvercle du milieu et couper la sortie.

Le moule du stator pour la 1200 mm



L'épaisseur du stator de la petite machine est seulement de 10 mm. Le stator a trois points de fixation (3 tiges filetées diam 12 mm) qui sont coulés dans la résine. Ils sont situés à **55 mm** du centre là où l'épaisseur de résine va atteindre **20mm**. Le trou central (d'un rayon de **45mm**) permet le passage de l'axe du moyeu.

Fixez les tiges filetées de fixation sur la pièce de métal servant à supporter l'ensemble rotor stator pendant que vous coulez le moule.



Le couvercle et l'îlot central sont à la même hauteur pour former l'anneau surélevé dans lequel se trouveront les tiges filetées.

La partie un peu délicate est le placement des tiges dans la bonne position. Fixez-les sur la plaque supportant le stator et le rotor. Si l'axe du moyeu est soudé sur cette plaque vous devez faire un trou dans l'îlot. Cela peut aider pour le centrage de l'ensemble.

Les fils sortent de l'anneau surélevé entre deux des tiges filetées.

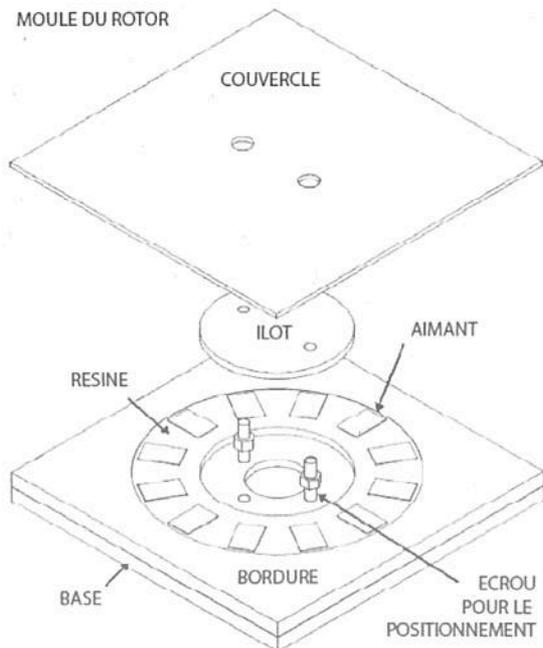
Le moule du rotor

Aimants: N40 grade 46 x 30 x 10 mm			
Diamètre turbine	1200 / 1800	2400 / 3000	3600 / 4200
Nombre d'aimants	8 sur un disque	24 12 par disque	32 16 par disque

Le rotor magnétique moulé dans la résine pour 2 raisons :

- empêcher les aimants de se désolidariser si la machine s'emballe
- protéger les aimants de la corrosion

MOULE DU ROTOR



Les aimants NdFeB (Fer néodyme) sont très sensibles à la corrosion. Il est donc important que leur protection ne soit pas endommagée. Pour ajouter de la résistance à la résine, je préfère placer un peu de fibre de verre sur les aimants.

La fabrication de deux moules permet de tout couler en même temps. (la 1200 et la 1800 ont un seul rotor magnétique).

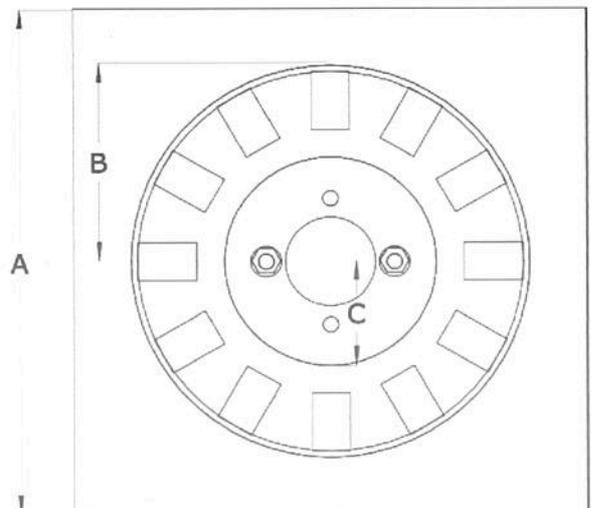
Le moule est composé d'une base épaisse (18 mm), un milieu et un couvercle (6 ou 9 mm). L'épaisseur du milieu varie pour chaque machine. Elle doit être légèrement inférieure à l'épaisseur disque plus aimants.

Pour le capot, j'utilise un contreplaqué fin sur lequel je mets des morceaux d'acier. Les aimants attirent fortement les pièces d'acier. Cette technique permet d'avoir un minimum de résine sur les aimants.

Taille des disques d'acier mm			
Diamètre turbine	1200 (un seul)	1800 (un seul avec aimant)	2400
DIAMETRE	230	250	300
EPAISSEUR	6	6	8
Diamètre turbine	3000	3600	4200
DIAMETRE	350	400	450
EPAISSEUR	10	10	10

Le diamètre du trou dans le contreplaqué de contour est plus grand que la plaque d'acier (environ 5 mm) de telle sorte que la résine couvre et protège le bord des aimants. Fabriquer un îlot de 9 mm d'épaisseur pour le visser sur la plaque d'acier. Il empêche la résine de déborder sur les trous qui servent au montage. Toutes les parties sont centrées et tenues par deux boulons qui traversent la base, le disque, l'îlot et le couvercle. Le capot a besoin d'un trou assez grand pour laisser passer les écrous et le surplus de résine.

Ci dessous les tailles des moules sont détaillées : **A** désigne la taille du moule, **B** le rayon de l'intérieur du moule et **C** le rayon de l'îlot.

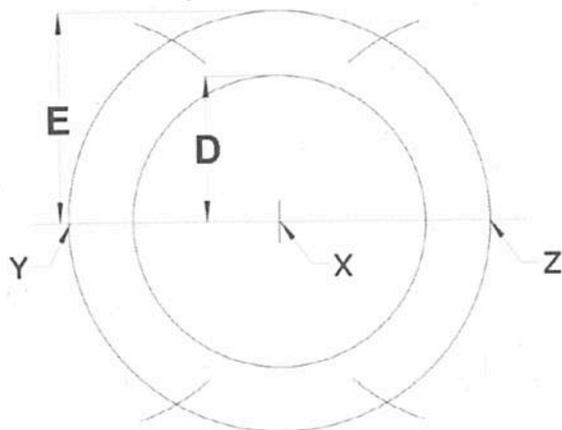


Diamètre turbine	1200	1800	2400
Longueur moule A	350	400	400
Rayon rotor B	120	130	155
Rayon îlot C	65	66	83
Rayon D	83	93	104
Rayon E	115	125	150
Diamètre turbine	3000	3600	4200
Longueur moule A	500	500	600
Rayon rotor B	180	205	230
Rayon îlot C	99	129	147
Rayon D	129	154	179
Rayon E	175	200	225

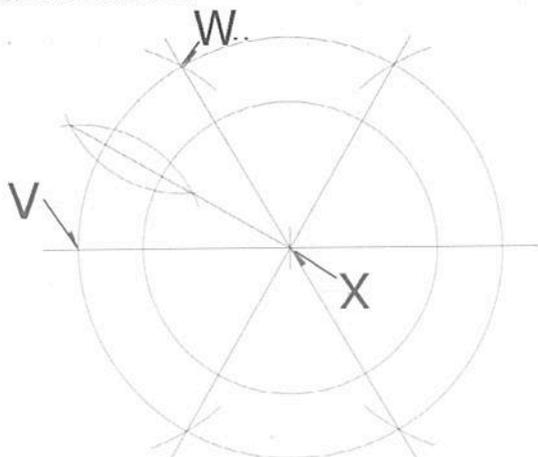
Le gabarit de positionnement des aimants

Avant de couler le rotor, vous avez besoin de coller les aimants sur le disque d'acier. Pour cela il faut un gabarit qui permette de bien positionner les aimants. Le gabarit est fait de contreplaqué fin (6 mm) avec deux trous pour le positionner.

Commencez par tracer une ligne et placer un point central X sur cette ligne.



Tracez deux cercles de rayon D et E à partir du centre X. Dans le cas d'un rotor à 12 aimants, vous allez diviser le cercle en 6 parties comme décrit ci-dessous. En utilisant le même rayon E mais centré sur Y et Z, tracez les arcs qui coupent le cercle de rayon E vous donnant un angle de 60°. Tracez les lignes entre ces points et le centre X.



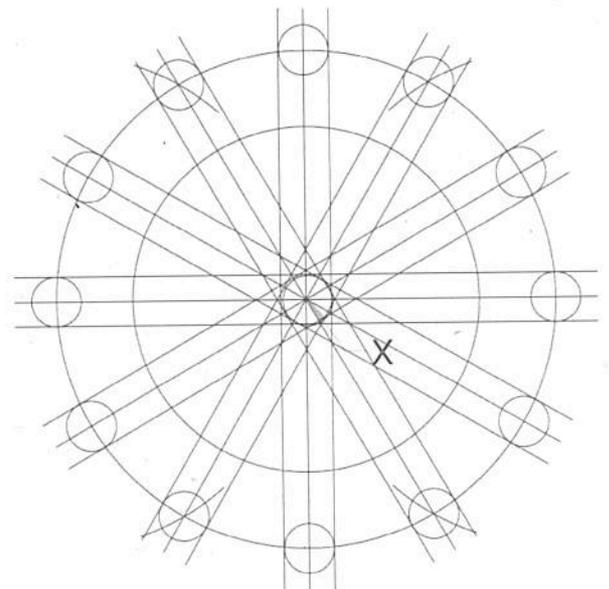
Divisez les angles de 60 par deux à l'aide des bissectrices : prenez un longueur aléatoire avec votre

compas pour créer un arc de cercle dont le centre est V puis un deuxième centré sur W. Dessinez la ligne qui passe par les deux intersections et qui rejoint X.

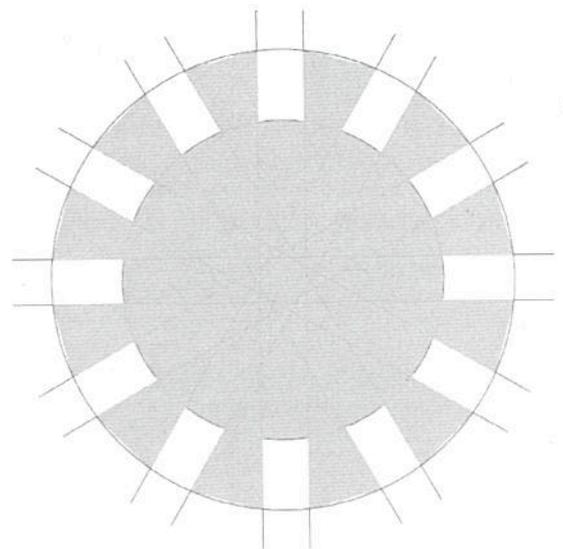
Faites de même sur le reste du cercle pour obtenir 12 points équidistants qui marquent le centre des aimants.

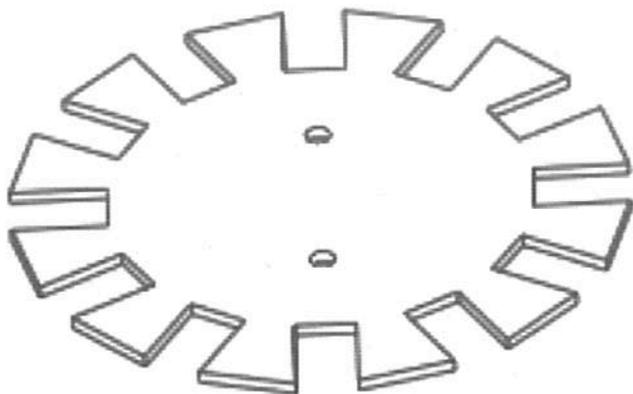
Dans le cas de 8 ou 16 aimants, vous pouvez sauter l'étape des 60° et procéder avec les bissectrices jusqu'à obtenir le bon nombre de divisions. Commencez avec Y et Z, trouvez l'angle à 90° ensuite passez à 45° (vous êtes bon pour 8 aimants) et finalement à 22.5°. Cela vous donne l'emplacement des 16 aimants.

Maintenant vous avez les centres des aimants. L'étape suivante consiste à tracer un cercle de rayon 15 mm (la moitié de la largeur d'un aimants) ou 23 mm dans le cas d'aimants positionné dans l'autre sens à partir de ces centres et au milieu (en X).



Tracez les parallèles comme sur le dessin et vous avez les lignes extérieures de votre gabarit. Découpez les petits rectangles à la scie sauteuse pour créer le gabarit.





La résine

Vous pouvez utiliser de la résine polyester (la même que pour les canoës) pour le stator et le rotor. La résine polyester NPG est un peu meilleure car elle supporte des températures plus élevées. C'est aussi possible d'utiliser de la résine époxy. Elle est beaucoup plus chère mais elle apporte une meilleure protection pour les aimants parce qu'elle adhère mieux et résiste à l'eau. La corrosion des aimants est plus probable avec l'utilisation d'une résine polyester. La résine époxy ne convient pas pour les bobines car elle est mauvaise conductrice de chaleur. La résine vinylique est finalement le meilleur compromis : elle peut être utilisée pour le rotor et le stator et elle conduit mieux la chaleur que la résine polyester. Elle est aussi résistante à l'eau.

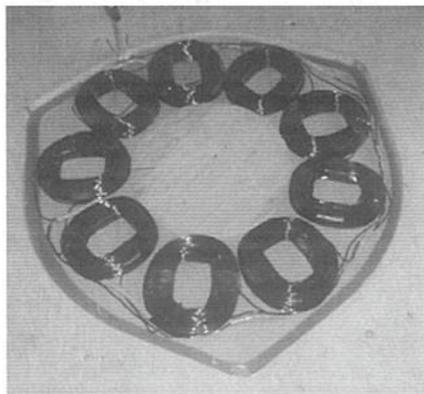
La résine polyester contient déjà un accélérateur. Vous devez ajouter un catalyseur pour faire prendre le mélange. Le catalyseur (du peroxyde très toxique) réagit avec le cobalt (accélérateur) produisant de la chaleur qui active la réaction. Lorsque vous coulez, vous avez besoin de beaucoup moins de catalyseur que pour les bateaux en fibre de verre. Le moule garde la chaleur et la résine prend plus rapidement. Si vous utilisez trop de catalyseur ou que la pièce est chaude, la résine risque de prendre avant la fermeture du moule. Il devient dur de bien comprimer l'ensemble. Si l'ensemble chauffe trop, les contraintes lors du refroidissement peuvent entraîner des fissures.

Il est préférable d'ajouter de la poudre comme du talc ou de l'aluminatrihydrate (ATH) à la résine pour diminuer la température. Ces poudres sont des bons conducteurs de chaleur ce qui aide le stator à se refroidir.

De plus, ces poudres sont peu chères. Elles sont essentielles pour avoir une bonne résine. Vous pouvez utiliser d'autres poudres.

Le stator

Commencez par



tout préparer. Vous allez avoir besoin des éléments suivants :

- Moule avec couvercle,
- Bobines connectées ensemble,
- Deux morceaux de fibre de verre découpés à la forme du stator,
- graisse ou cire de démoulage pour que la résine n'accroche pas (ne pas en mettre là où la résine doit adhérer),
- Résine avec un récipient pour faire le mélange,
- Balance
- Talc,
- Silicone ou autre colmatant en tube,
- Equipements de protection : gants, lunettes, masque,
- Papier journal pour protéger la table et accueillir les surplus de résine.

Ne pas mettre de substances conductrices dans la résine (à part les bobines) sinon les aimants vont induire un courant entraînant des pertes et des échauffements.

Faites un montage à blanc avant de graisser le moule pour vérifier que tout est correct. Placez une feuille de fibre de verre au fond puis faites glisser doucement les bobines avec la sortie en position. Vérifiez que les points d'ancrage du stator soient bien éloignés des fils de cuivre. Plantez un clou ou une vis pour pouvoir attacher le fil de sortie des trois phases et empêcher que celui-ci baigne dans le surplus de résine. Placez l'autre bout de fibre de verre puis le couvercle à l'aide des trois points de positionnement. Vérifiez que vous avez les outils nécessaires pour serrer les vis (ou les boulons). Vérifiez qu'il y a des trous pour que l'air et l'excès de résine puissent s'échapper (les trous sur l'ilot central servent aussi à ça).

Quand vous êtes satisfaits, vous pouvez désassembler l'ensemble et graisser toutes les parties du moule : l'intérieur, les bords, l'ilot, le couvercle et le dessus de la partie intérieure. Soyez généreux surtout sur les bords et vers la partie où les câbles et le surplus de résine sortent. Couvrez aussi les têtes de vis qui risquent d'être sous la résine. Evitez de graisser les bobines et la fibre de verre. La vaseline est une bonne substance mais toutes les graisses (huile...), wax (cire d'abeille) semblent fonctionner. Vissez les bordures sur les bases (ainsi que l'ilot central) en mettant un filet de silicone entre les différentes parties.

Accordez-vous suffisamment de temps pour faire le coulage ça peut prendre une heure. Si le lieu est froid, vous aurez peut-être à chauffer pour aider la prise. Les résines vinyliques prennent quelle que soit la température.

Si la température est autour de 20 degrés, la résine risque de prendre rapidement donc ajoutez un peu moins de catalyseur. Il est prudent de diminuer la dose de catalyseur par deux. Faites un essai à côté pour voir le temps de prise.

En cas de doute, mélangez des petites quantités de résine pour éviter d'avoir un grand pot en attente. Les grandes quantités ont tendance à chauffer et prendre plus rapidement. Si vous êtes confiant faites un grand mélange. Je préfère toujours faire la résine en plusieurs fois.



Le solvant contient du styrène qui a une odeur désagréable et surtout qui peut causer des nausées, maux de tête et vertiges. Faites ce travail dans un endroit ventilé et même dehors si possible.

Mixez :

- ❖ 200 g de résine,
- ❖ 3 cc de catalyseur,

Mélangez énergiquement pendant 1 à 2 minutes. Vous n'avez pas besoin d'être super précis avec les ratios. Remplissez le bas du moule avec la mixture liquide. Placez un morceau de fibre de verre et saturez-le de résine avec un pinceau par exemple pour évacuer toutes les bulles d'air.

Maintenant vous pouvez placer les bobines dans le moule. Placez les bobines sur un morceau de contreplaqué que vous placerez au dessus du moule. Il ne vous reste plus qu'à tirer doucement le contreplaqué pour que les bobines tombent en place doucement. Si vous avez à déplacer les bobines, ne déplacez pas la fibre de verre. Mettez le surplus de résine sur les bobines.

Pendant ce temps-là, une autre personne peut mélanger :

- ❖ 400 g de résine,
- ❖ 6 cc de catalyseur,
- ❖ 200-300 g de talc

Mélangez d'abord résine et catalyseur, ajoutez ensuite graduellement les 200 à 300 g en remuant mais sans incorporer d'air. Si la résine est assez liquide, vous pouvez ajouter le même poids de résine et de talc. Remplissez le moule avec ce mélange et faites en un nouveau. Continuez jusqu'à ce que le moule soit presque plein.

Dans le même temps, mettez un filet de silicone autour du stator à 30 mm du bord du stator pour limiter la fuite de résine quand on place le couvercle. Ça permet d'éviter les vides dans la résine. Il vous faut aussi tapoter le moule avec un maillet pour faire sortir les bulles d'air.

Quand le moule est plein, rajoutez le deuxième morceau de fibre de verre. Faites un dernier mélange de 200 g de résine avec 3 cc de catalyseur sans talc pour saturer la fibre. Placez le couvercle doucement en vous aidant des 3 points de positionnement. Vissez fermement l'ensemble.

Laissez la résine polyester durcir pendant une nuit. La résine vinyle-ester durcit en 2 heures. Quand l'excès de résine est dur, enlevez le couvercle et renversez le moule. Tapez les angles du moule sur la table jusqu'à ce que le stator sorte. Nettoyez avant que la résine ne soit complètement dure.



Le rotor

La marche à suivre est la même que précédemment mais il faut d'abord fixer les aimants sur la plaque d'acier. Meulez légèrement la plaque d'acier dans la région où vont se placer les aimants pour enlever la rouille et assurer une meilleure prise. Enlevez toutes traces de graisse.

Le rotor extérieur a besoin d'être taraudé afin de mettre en place un système d'arrachemoyeu pour séparer les deux disques. **Les trous sont à faire avant de coller les aimants.**

Percez 3 trous également espacés suffisamment éloignés de la résine et des trous de montage. Les trous doivent être un peu plus petits que la taille du tarot (voir p.13 pour les tailles). Gardez le tarot perpendiculaire à la plaque lors du taraudage.



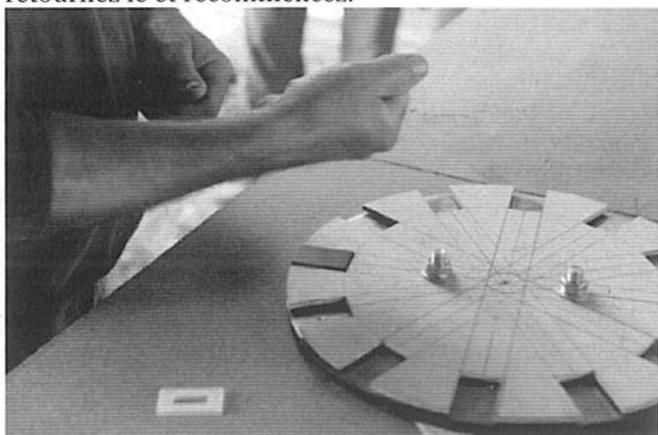
Choisissez un trou de référence pour chaque disque et alignez le avec le centre du premier aimant. Les deux premiers aimants sont ainsi en face l'un de l'autre et s'attirent. Marquez ce trou de référence avec un pointeau ou un trait de scie sur le cercle central par exemple (dans un endroit non couvert par la résine).

Mettez en place le gabarit des aimants. Fixez le avec deux écrous (ou plus) Il y a un risque que le gabarit se retrouve collé sur le disque s'ils sont en contact. Mettez des rondelles entre les deux pour créer un espace. Les colles cyanoacrylate (« super glue ») sont parfaites car elles prennent rapidement. J'aime bien en mettre sous chaque aimant mais d'autres personnes préfèrent mettre de la colle autour après le positionnement des aimants.

Dans un premier temps, vous pouvez placer l'aimant sans mettre de colle pour être plus à l'aise et avec beaucoup d'attention. Manipulez un seul aimant à la fois. Faites encore plus attention lorsque vous les détachez de la pile car ils ont tendance à sauter et

s'écraser contre d'autres aimants. Tenez-les à deux mains. Ne laissez pas traîner d'aimant seul sur une table car ils s'envoleront rapidement au moindre passage d'un objet métallique. Mettez tous les aimants solitaires sur un morceau de ferraille, de préférence sur un mur. Essayez de ne pas égratigner le revêtement. Enfin tenez éloignés tous les équipements électroniques, cartes de crédit, téléphone, montre, pacemaker.. pour éviter les perturbations magnétiques.

La polarité du premier aimant n'a pas d'importance. Placez le dans le rectangle prévu et poussez le à sa place exacte rapidement avant que la colle ne prenne. Chaque fois que vous positionnez un aimant, testez sa polarité. Tenez-le fermement au creux de votre main, avancez le dos de votre main proche de l'aimant voisin. S'ils se repoussent, l'aimant est dans la bonne position pour être placé tel quel sur la plaque. S'ils s'attirent retournez le et recommencez.



Lorsque vous avez quelques aimants en place faites une vérification de polarité. Vous devez être attiré puis repoussé, attiré, repoussé....

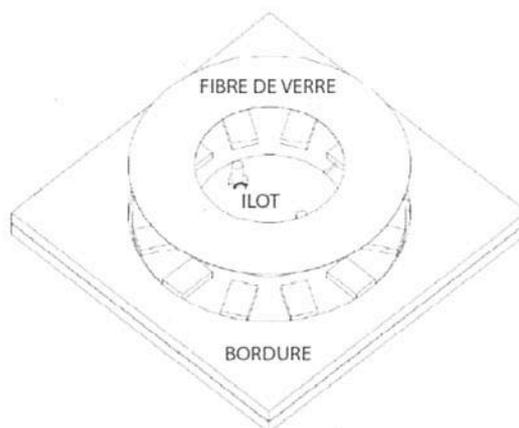
Pour le deuxième rotor, il vous faut commencer avec le trou d'indexage. Le premier aimant, aligné avec le repère du disque 1 doit attirer le premier aimant du disque 2. Autrement dit, le dos de l'aimant doit être repoussé donc le test est le même que pour des aimants adjacents. Quand le dos du premier aimant est repoussé par le premier aimant de l'autre plaque, placez l'aimant sans le retourner à la marque. Les faces des aimants des deux disques vont s'attirer.

Les rotors aimantés sont maintenant « des armes de «blessures massives» surtout s'ils viennent à se coller l'un à l'autre (chose qu'ils adorent, ce n'est pas pour rien qu'on les appelle des aimants). Vous pouvez perdre un doigt, votre cœur (non sauf en cas de pacemaker). Stockez les disques dans un endroit sûr, loin de toutes poussières métalliques car elles sont très difficiles à enlever une fois présentes.

Quand les aimants sont fixés, faites un montage à blanc. Il faut découper deux rondelles de fibre de verre correspondant à la surface entre le bord du moule et l'îlot.

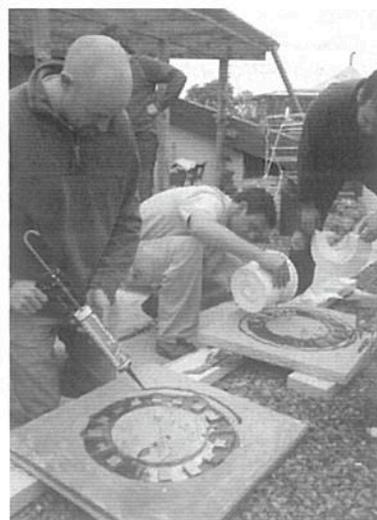
Dans un premier temps, placez le disque au fond du moule puis rajoutez l'îlot et fixez le tout avec les boulons. Rajoutez la fibre de verre puis le couvercle

par dessus et vérifiez que les aimants dépassent légèrement par rapport à la bordure. Les rondelles et les écrous doivent passer à travers le couvercle qui doit reposer sur l'îlot central. Calez le moule et vérifiez qu'il est plan et de niveau.



Démontez puis graissez toutes les parties du moule où vous ne voulez pas que la résine adhère notamment les deux côtés de l'îlot. Ne pas mettre de graisse sur la fibre de verre et ne pas toucher le rotor avec des doigts gras. Graissez le couvercle et les bords des trous. Lissez bien la graisse au fond du moule et dans les angles pour avoir une belle finition. Mettez le rotor et fixez les boulons sans trop serrer. Si vous serrez trop vous allez déformer l'îlot. Graissez les boulons et les écrous pour faciliter le démontage.

Faites un mélange de résine assez liquide (sans talc) et remplissez l'espace entre les aimants et le bord du moule. Soyez précis et essayez de chasser les bulles d'air. Mettez un filet de silicone pour canaliser les excès de résine. Faites un mélange plus épais (avec talc) pour le reste du moule. Martelez le moule pour chasser les bulles d'air. Finissez avec un mélange liquide pour saturer la fibre de verre de résine. Placez le couvercle sans déplacer la fibre de verre. La compression se fait en plaçant des gros objets métalliques sur le couvercle au niveau des aimants.



aime le fer.

Pour accélérer la prise de la résine polyester, vous pouvez placer le moule sous une lampe. Il est plus commode d'enlever le couvercle avant que la résine ne soit trop dure. Cela permet d'enlever l'excédent de résine sur l'îlot et sur les bords pour faciliter le démoulage. Faites attention lors du découpage de l'excès de résine, le rotor

Une fois le rotor sorti du moule, nettoyez les surplus de résine surtout dans la partie proche des trous de montage. Stockez le rotor dans un endroit sûr, loin des poussières métalliques.

Je vous conseillerais de peindre le(s) rotor(s) avec une peinture époxy. La corrosion des disques d'acier peut entraîner l'arrachement des aimants. Si l'enrobage des aimants est endommagé, ils se corrodent. Une protection imperméable autour de l'ensemble est un bon investissement. Si vous êtes dans un milieu très corrosif (bord de mer) il est conseillé de faire galvaniser les disques des rotors avant le collage des aimants.

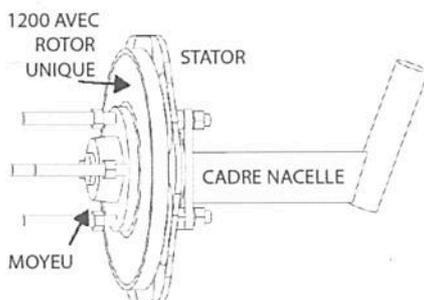
Montage et test de l'alternateur.

L'alternateur est assemblé à l'aide de tiges filetées. Ce sont les mêmes que pour le montage des pales. J'aime bien utiliser des tiges en inox (pas de corrosion et pas d'influence sur le champ magnétique). Les tiges filetées doivent avoir la même dimension que les trous du moyeu soit 10 ou 12 mm. **10 mm**, c'est suffisant pour les éoliennes jusqu'à la 2400. Je recommande du **14 mm** pour la 4200.

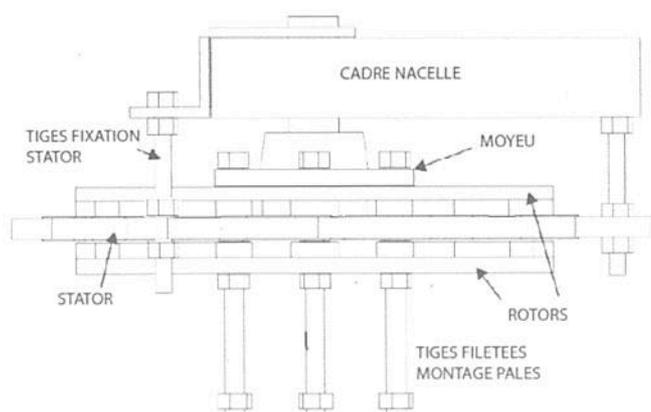
En cas de besoin, repérez les trous du moyeu pour les agrandir.

Les différentes options de montage

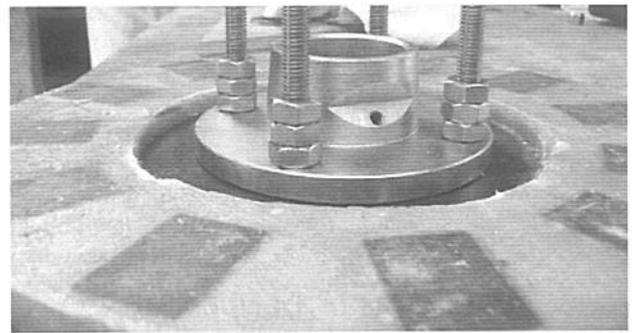
Le rotor de la 1200 est monté sur le dos du moyeu en face du stator.



Les autres machines ont deux rotors (un seul aimanté pour la 1800). Il y a plusieurs façons de monter les



deux rotors sur le moyeu. Vous pouvez les monter devant la collerette ou derrière. Dans cette vue de dessus les deux rotors sont montés sur le devant du moyeu.



Dans certains cas, la collerette du moyeu est montée à plat sur son derrière de telle sorte que vous pouvez monter un disque derrière et l'autre devant. Ca donne un alternateur plus compact avec des tiges de fixation du stator plus courtes.

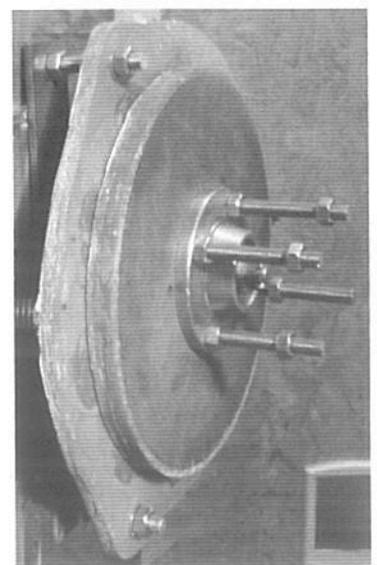
Généralement, il est plus facile de monter l'alternateur si le rotor de devant est situé sur le devant du moyeu. L'assemblage final est facilité avec le moyeu qui est déjà assemblé lui même. Vous pouvez également mettre les deux rotors derrière, cela fonctionne et réduit la distance de montage du stator. L'alternateur est plus difficile à assembler.

Le montage du stator avec des courtes tiges filetées est plus solide, mais des tiges plus longues semblent faire l'affaire. Les écrous fixant le stator ne doivent pas être trop serrés sinon cela risque de fragiliser la résine. Par contre ces écrous doivent être parfaitement bloqués avec du frein-filet ou avec un système écrou contre-écrou. Cette opération doit être réalisée à la fin du montage lorsque vous êtes satisfait de votre écart rotor stator.

Les tiges de fixation de l'alternateur

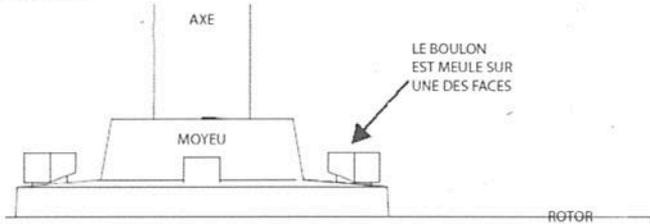
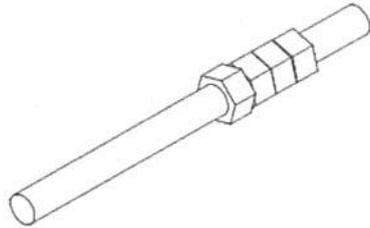
Les tiges qui servent pour fixer les rotors et les pales doivent être assez longues pour aller de l'arrière du moyeu, passer à travers l'alternateur et venir fixer les pales en n'oubliant pas tous les écrous. Il est bon de les faire un peu plus longues juste au cas où...

Les rotors ont besoin d'être espacés avec une grande précision pour qu'ils soient le plus proches possible du stator. Utilisez des écrous sur chaque tige filetée pour régler l'écartement. Vous pouvez rajouter des rondelles pour un ajustement plus précis. Vous aurez peut être à vérifier l'épaisseur des rondelles avec un pied à coulisse. Un espace de l'ordre de **40 mm** est une bonne première approximation.



Faites d'abord l'empilement des écrous dans la bonne position avant d'assembler l'alternateur. Serrez les écrous les un contre les autres avec la même force sur chaque tige pour avoir les mêmes écartements. Cela sera plus difficile quand ils seront proches des aimants.

Si le dos du moyeu n'est pas plat, il est utile de disquer le coin des écrous pour éviter de tordre les tiges filetées.



Dans ce cas, vous devez serrer les boulons du premier rotor avant de mettre le deuxième car l'écrou ne peut pas être serré plus tard. Si le dos est plat, vous pouvez serrer l'ensemble à la fin. Comme ça, il est plus facile de faire l'assemblage du deuxième rotor.

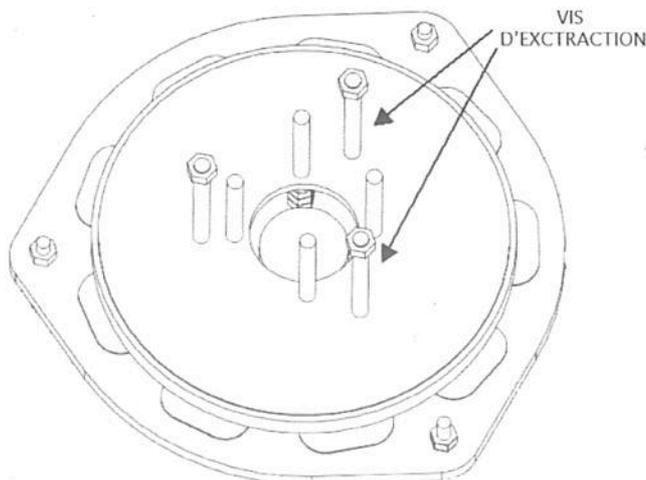
Montage

Vérifiez qu'il n'y a pas de poussière et de copeaux métalliques sur les rotors. Enlevez-les avec un pinceau ou avec un morceau de scotch.

Pour la petite machine 1200, commencez par monter le stator. Pour les autres, commencez par monter le rotor et le moyeu. Si le rotor se place derrière le moyeu, vous devez monter le rotor sur le moyeu et ensuite le moyeu sur la fusée. Sinon montez d'abord le moyeu sur la fusée.



Nettoyez et graissez le moyeu. Soyez généreux sur la graisse mais ne remplissez pas totalement le moyeu.



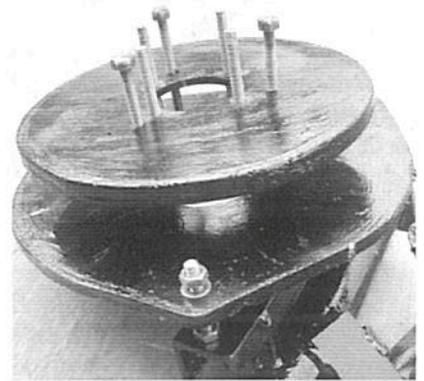
Serrez le moyeu de façon à ne pas avoir de jeu mais pas trop pour que la rotation soit facile. Serrez à la clé, arrêtez dès que vous sentez un blocage. Desserrez d'un quart de tour. Verrouillez avec le système de blocage.

Si vous mettez des roulements et des cages neuf, il faut serrez fortement à la clé jusqu'à entendre « clac ». Cette opération permet de mettre les roulements et les cages en place.

Placez le stator sur les tiges de fixation mais sans chercher à ajuster sa position avec les écrous. Plaquez le stator contre le premier rotor.

Maintenant, assemblez le deuxième rotor. Vérifiez que les deux trous d'indexage sont en face. Attention à vos doigts !!! Le meilleur moyen est d'utiliser les « jacking screws » ou vis d'ajustage pour descendre progressivement le deuxième rotor.

Vous pouvez assembler l'alternateur dans sa position normale ou couchée sur la nacelle comme sur la photo. Les vis d'extraction peuvent être fabriquées en découpant des tiges filetées et en



soudant un écrou par dessus. Leur longueur doit être supérieure à celles des tiges filetées de fixation pour faciliter le serrage/desserrage. Pour aller plus vite, j'utilise un embout sur une perceuse sans fil.

Lorsque le second rotor est en position contre les écrous, vous pouvez juger si l'écartement est bon ou pas. Ajustez



les écrous du stator de façon à le placer au milieu des deux rotors. Il devrait y avoir **1.5 mm** d'écart entre stator et rotor. Si la distance est inférieure enlevez le stator et rajoutez une rondelle sur chaque tige filetée. Serrez les rotors ensemble sur la pile d'écrous avec les écrous extérieurs. Vérifiez de nouveau l'espace en faisant tourner les rotors. Vérifiez que le rotor tourne rond et qu'il ne frotte le stator à aucun endroit. Une règle en plastique de 1.5 mm est idéale pour vérifier.

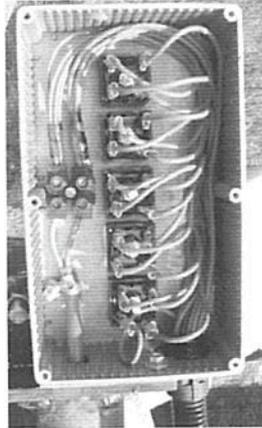
Remarque : L'alternateur va tourner librement tant que les fils ne sont pas en contact. Si vous mettez deux fils en contact il va y avoir une résistance pulsatile à la rotation. Si les 3 fils sont connectés ensemble, il va y avoir une résistance forte mais uniforme due au fort courant induit par le court circuit.

Redresseur pour l'alternateur en 12 Volt

Pour installer les ponts de diodes d'un système en 12V, on peut utiliser une boîte en alu (avec radiateur) monté sur le tube pivot. Chaque fil en courant alternatif sera connecté au terminal en AC sur une rangée de diodes. Toutes les sorties en courant continu sont connectées aux câbles positifs de la batterie. Il en va de même pour les pôles négatifs.

Le boîtier sera bien refroidi par le vent mais il faut le fermer efficacement contre l'humidité. Le trou de sortie du câble, situé sous la boîte, assurera un peu de ventilation.

Le câble qui descend à l'intérieur du mat doit être parfaitement ancré, sinon les connexions risquent d'être endommagées par le poids et la rotation du fil. Vous pouvez enrouler le câble de chatterton au niveau du point d'entrée dans la nacelle.



Test de l'alternateur

Vous pouvez tester le bon fonctionnement de l'alternateur en mesurant la tension de sortie pour différentes vitesses. Mesurez avec un multimètre sur la position ACV et placez les deux sondes sur deux fils. Vous voyez que le courant entre n'importe quelle phase est le même mais varie en fonction de la vitesse. Une vérification simple consiste à mesurer pour une vitesse de 60 tour/min soit un tour par seconde. Ci dessous vous trouvez un tableau avec les tensions de sortie pour cette vitesse en fonction du système de batterie. Vérifiez les trois phases, il se peut qu'il y ait de petites différences. Si vous avez placé une bobine à l'envers vous aurez une grande différence

Si la tension que vous observez est plus grande que la valeur dans le tableau, augmentez l'écartement entre les rotors afin d'éviter des difficultés de démarrage de l'hélice.



Les valeurs en DC seront supérieures de 40% environ mais le pont de diodes va consommer 1.4 Volt du total

Tension AC à 60tr/min			
Diamètre turbine	1200	1800	2400
12V	1.9	2.3	2.9
24V	3.4	4.2	5.3
48V	6.8	8.4	10.6
Diamètre turbine	3000	3600	4200
12V	3.5	4.2	5.2
24V	6.5	7.7	9.4
48V	12.9	15.6	18.8
350V	47	63	52

Le tableau ci dessous présente les vitesses de rotation à partir desquels la machine va charger soit les batteries, soit l'onduleur (pour les connexions réseaux) avant ces vitesse de rotations la machine tourne librement.

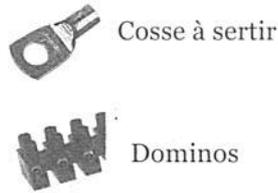
Vitesse de début de charge estimée			
Diamètre turbine	1200	1800	2400
	300-310	240-260	200-210
Diamètre turbine	3000	3600	4200
	160-170	140	110-120

Installation

Les câbles de l'installation doivent être suffisamment gros pour pouvoir supporter le courant.

Toutes les connexions doivent être propres et serties correctement.

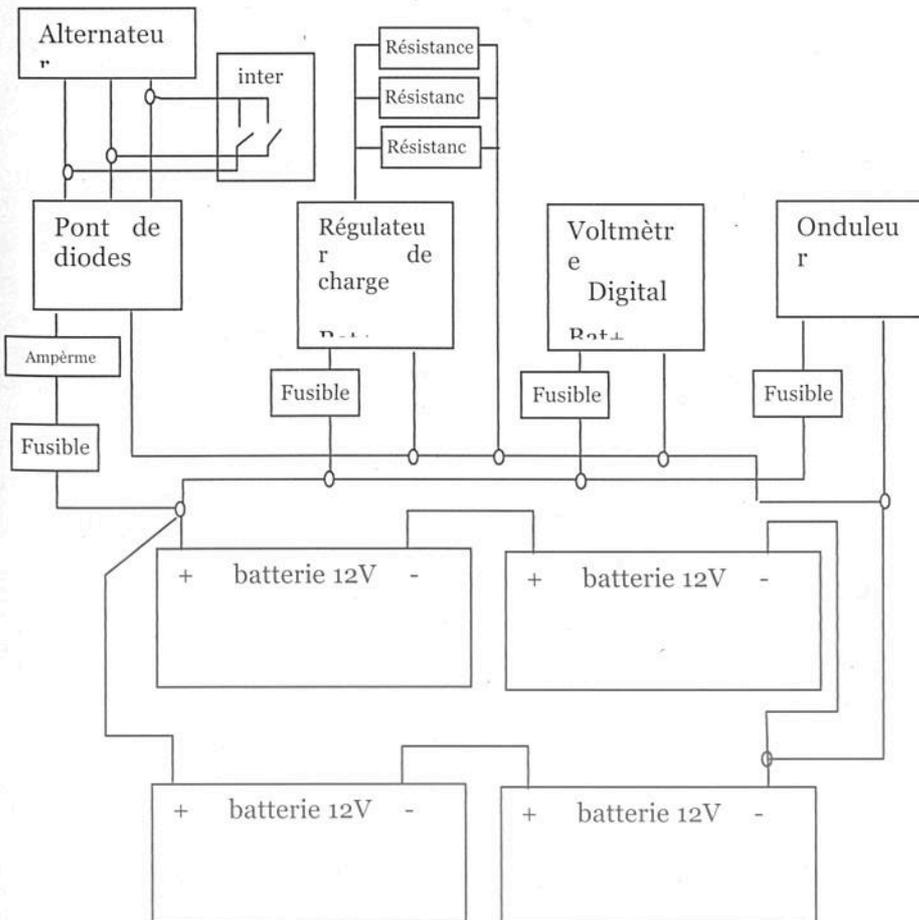
Si vous utilisez des dominos, assurez vous de serrer les vis aussi fort que vous le pouvez ! La meilleure des solutions reste quand même les embouts à sertir qui peuvent ensuite être boulonnés.



Ci dessous vous trouverez les sections de câbles recommandées supportant des surintensités ponctuelles :

Sections des câbles (mm ²)					
Diamètre	1200	1800	2400	3000	3600 +
P. nominale	200 W	350 W	700 W	1000 W	1,5 kW
12-V	4	10	25	35	50
24-V	2,5	4	10	10	16
48-V	1,5	2,5	4	4	6
350-V			2,5	2,5	2,5

Exemple d'un montage en 24 Volt



Dans la plupart des cas, plus les distances à parcourir sont grandes, plus vous avez besoin d'une section de câble importante.

Choisissez des fusibles qui fondent avant que vos câbles ne s'échauffent. Vérifiez leur capacité (...A)

Câblage des batteries

Raccordez les batteries en série jusqu'à obtenir la tension désirée (12/24/48V)

Pour un système en 24V, vous pouvez utiliser deux batteries de 12V branchées en série.

Pour augmenter la capacité du banc de batteries, ajoutez 2 autres batteries de même capacité en parallèle. Voir le schéma type ci-dessous.

La borne + et - de l'onduleur, du régulateur, etc. sont connectées aux deux extrémités du câble servant à la mise en parallèle des batteries de manière à équilibrer la résistance interne des câbles.

IMPORTANT: Ne jamais déconnecter les batteries et laisser l'éolienne directement branchée sur l'onduleur ou sur le régulateur seul. La tension augmenterait et causerait des dommages irréversibles à ces équipements.

Le régulateur n'est malheureusement pas capable de protéger l'installation en l'absence des batteries.

Tous les circuits reliés au parc batterie doivent impérativement être équipés de fusibles qui sont **choisis pour résister à de forts courants et doivent** impérativement fondre avant que les câbles ne s'échauffent trop.

Il serait tout à fait possible de placer le fusible sur le fil positif.

De manière générale (par convention), on place les fusibles du côté négatif à moins que cette borne ne soit raccordée à la terre.

Le redresseur et le frein électromagnétique

Si le pont redresseur (pont de diodes) se trouve à proximité de la batterie (par opposition à « sur la nacelle »), cela indique qu'il y a « 3 » fils provenant de l'éolienne.

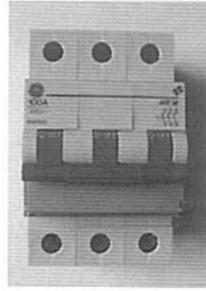
Il est de bon ton de raccorder ces trois fils à un interrupteur en amont du pont redresseur pour arrêter l'éolienne (mise en court circuit des trois phases du stator). Cette précaution permet de travailler sur le reste de l'installation sans risque (brûlure, électrocution,...)

ATTENTION : Ne jamais déconnecter l'éolienne des batteries avant d'avoir court-circuité ses phases ! (sous peine d'emballement)

Une solution rapide consiste à relier les trois fils provenant de l'éolienne grâce à un domino lorsqu'on désire arrêter la machine. Une autre solution, "plus professionnelle" cette fois, consiste à utiliser un gros interrupteur tripolaire provenant d'un

tableau de distribution électrique (matériel assez courant).

Le redresseur est composé de diodes qui sont souvent conditionnées en « pont de diodes » d'origine. Un pont redresseur triphasé aura 5 connectiques et ressemblera à quelque chose comme cela



Avec cette solution, vous aurez à fixer des cosses à œil au bout des câbles (à l'aide d'une pince à sertir) et ensuite les visser au pont de diodes.



Une autre solution moins coûteuse s'offre à vous : Achetez plusieurs ponts de diodes « monophasés » du même type que sur la photo

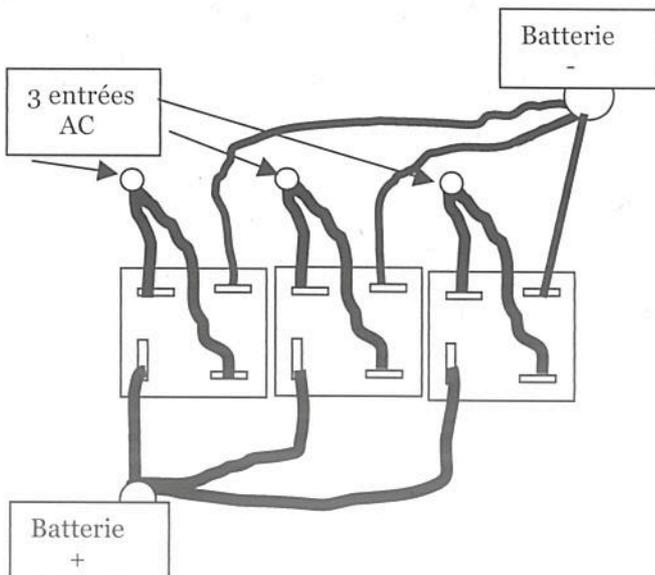
Les connectiques AC sont disposées dans les coins opposés mais avec la même orientation et les connectiques DC sont les deux restantes qui n'ont pas la même disposition (à 90° l'une de l'autre).



Vous pouvez utiliser des connectiques de bonne qualité type "Feston", à sertir ou à souder.



Il est impératif de réaliser des sertissages corrects pour éviter l'échauffement des contacts et la destruction des diodes. Le redresseur doit être fixé sur un « radiateur » en aluminium pouvant dissiper la chaleur produite. Un radiateur de récupération type « culasse de moteur deux temps » fera très bien l'affaire. Vous pouvez aussi en trouver dans le commerce si vous le souhaitez. Nous vous conseillons d'utiliser de la « graisse PTFE



contact électriques" sous le redresseur pour améliorer la transmission de chaleur au radiateur.

Le pont de diodes type monophasé est composé de 4 diodes et vous pouvez l'utiliser pour deux câbles d'entrée AC. Le troisième pouvant être monté sur un

deuxième bloc. Mais la solution la plus viable dans le temps est d'utiliser 3 blocs monophasés en raccordant les deux connectiques AC de chaque unité de manière à réduire le courant traversant chaque diode.

Appareils de mesure

Connecter un ampèremètre en série entre le redresseur et la borne de la batterie permet de connaître ce qui est effectivement injecté par l'éolienne.

Un ampèremètre analogique est la solution à envisager parce que le courant de charge évolue très rapidement (un modèle numérique n'a pas une vitesse de rafraîchissement d'affichage suffisante).

Pour plus de données, vous pourrez trouver des appareils de mesure comme le « Watts up » ou « Dr Watson » qui indiquent la quantité d'énergie injectée dans les batteries à un coût raisonnable.

Avoir un indicateur de tension de batterie (avec fusible intégré) de qualité est une chose essentielle. Le choix d'un écran digital est cette fois judicieux car les variations de tension sont beaucoup plus douces et de faible amplitude.

Régulateur

Vous aurez besoin d'un régulateur de charge pour protéger le parc batteries des surtensions. Le régulateur « Tristar 45A ou 60A » de chez Morningstar peut être configuré pour fonctionner en « régulateur de débordement » ce qui permettrait de délester de l'énergie dans des résistances si l'éolienne produit plus que ce que peuvent contenir les batteries

Nous utilisons en général des petites résistances de marque "Farmell" (voir liste des fournisseurs) comme résistances de débordement.

Une résistance d'un ohm convient bien pour un fonctionnement à 14 Volts et une résistance de 3 ohms est nécessaire pour une tension de 28 Volts.

Les valeurs citées ci dessus sont des tensions typiques de charge pour des systèmes en 12 et 24 Volts. Ces résistances évacueront jusqu'à 14 et 9 Ampères respectivement. Il suffit d'ajouter des résistances en parallèle jusqu'à avoir suffisamment de charge pour consommer ce que l'éolienne et toute autre source d'énergie additionnelle (Photovoltaïque, etc.) pourra produire.

Vous pouvez aussi fabriquer votre propre contrôleur de charge en utilisant les plans de circuits imprimés disponibles sur internet.

Voir le site d'Hugh Piggott:

<http://www.scoraigwind.com/circuits/chargecontrol.htm>

Onduleur

Il y a beaucoup de choix quand on décide d'acheter un onduleur permettant de fournir du courant Alternatif (AC) à partir de l'énergie contenue dans les batteries. Choisissez votre onduleur avant de décider de la tension de votre éolienne. Gardez à l'esprit que les systèmes utilisant des tensions plus hautes nécessitent moins de cuivre dans la fabrication des bobinages. Recherchez donc plutôt un onduleur en 48 ou 24V à moins que vous n'ayez de bonnes raisons d'opter pour du 12V.

Les onduleurs bon marché peuvent être une solution mais les modèles « pur sinus », plus chers, sont de meilleure facture (plus durables donc moins chers sur le long terme, moins d'usure des composants électroniques des appareils électroménagers, etc.) et si vous pouvez assumer la différence de prix ne vous privez pas.

Achetez le suffisamment puissant pour qu'il puisse fournir de l'électricité à l'appareil le plus gourmand que vous détenez! Gardez à l'esprit que certains appareils (réfrigérateurs par exemple) ont besoin de beaucoup de courant au démarrage même s'ils n'en utilisent que très peu en fonctionnement.

Gardez l'onduleur à proximité des batteries et utilisez des câbles de forte section. Evitez de faire reposer l'onduleur sur les batteries ou de le loger dans un petit endroit clos avec celles-ci (phénomènes de corrosion).

La meilleure des solutions pour éviter ces problèmes est de les séparer physiquement par un couvercle ou un mur.

Si vous utilisez un onduleur d'injection réseau (sans batteries), alors prenez garde à ce que la tension de l'éolienne ne dépasse pas son seuil de tension et le détruit.

L'éolienne ne chargera pas l'onduleur tout le temps (au démarrage par exemple ou en cas de problème). Vous aurez alors besoin d'un régulateur qui commutera des résistances pour éviter ces surtensions. Câblez en priorité les batteries, le régulateur et n'oubliez pas le frein électromagnétique avant d'ériger l'éolienne pour la première fois.

Vous n'essaieriez pas de voiture sans freins, souvenez vous-en !

L'éolienne se retrouvera en survitesse si elle n'est pas connectée à une charge.

Cette situation ne causera pas immédiatement sa destruction mais engendrera une usure prématurée des pièces mécaniques (vibrations + force centrifuge, etc.) .C'est aussi très effrayant à regarder!

Si vous laissez tourner l'éolienne sans batteries, alors la tension élevée détruira n'importe quel onduleur ou pièce électronique sur son passage.

Mise en route

Finissez le câblage de la partie électrique, ajustez le mât en position verticale puis redescendez celui-ci.

Assurez-vous que tous les écrous de l'éolienne soient suffisamment verrouillés pour qu'ils ne puissent pas être desserrés par les vibrations. Prenez aussi garde à ce que les pales soient équilibrées correctement.

Fixez la nacelle sur le mât et vérifiez que la génératrice tourne librement (sans effort). Vérifiez ensuite le fonctionnement du frein électromagnétique en le commutant puis en vérifiant l'effet sur la génératrice (elle doit être dure à tourner). Vous pouvez maintenant ériger l'éolienne.

Désactivez le frein et contemplez le fruit de votre travail !

Mât

Câblage dans le mât

Le câblage à l'intérieur du mât doit être à la fois solide et souple pour résister aux rotations de l'éolienne en haut du mât.

Nous recommandons l'utilisation de 3 câbles souples HO7RNF (souple). Un câble gainé (composé de trois fils) serait plus à même à résister à l'abrasion mais serait

moins approprié pour résister à des centaines de tours de torsion. Pour les machines raccordées au réseau, utilisez du 3G souple.

Laissez beaucoup de mou. Vous pouvez glisser un gros tube en plastique autour des câbles au pied de l'éolienne pour les protéger à la fois contre le contact avec une pièce métallique et pour leur éviter d'être mâchés par du bétail!

Ne coincez pas les câbles dans le tube, gardez les visibles de manière à pouvoir observer leur état d'enroulement et éventuellement y remédier.

Sur des sites turbulents, connectez une prise entre le câble de l'éolienne et le coffret du frein en pied de mât. Elle permettra de débrancher les câbles rapidement et sans outils.

Dans la plupart des bons sites (peu turbulents), le câble ne s'entortillera que très lentement et vous pourrez dormir sur vos deux oreilles pendant au moins quelques années.

Utilisez plutôt du câble "armé" entre le pied de mât et le redresseur (dans local batteries) ou une gaine en TPC. Les conducteurs en cuivre situés dans ce câble doivent être aussi gros que possible. Il est possible de trouver des petites longueurs de câbles de ce type chez les ferrailleurs.

Un bon moyen de connecter ces gros câbles (bon marché et efficace) est de les insérer dans des tubes de cuivre d'une longueur d'environ 3 cm (petit diamètre: 10/8 ou 8/6).

Dénudez les bouts des deux câbles, insérez les de part et d'autre du tube de cuivre puis sertissez en plusieurs



points. Vous aurez aussi à sertir trois autres câbles en parallèle dans les mêmes cosses pour le frein électromagnétique.

Le courant circulant dans les câbles allant au redresseur crée une chute de tension. Vous trouverez ci après quelques sections (en mm²) qui conviennent pour des longueurs de 50m en considérant une chute de tension de 10% à puissance maximale:

Sections des cables pour 50 m (mm ²)						
Diamètre turbine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
12-V	25	50	95	95	120	120
24-V	6	10	25	25	35	35
48-V	1.5	2.5	6	6	10	10

Si la longueur est supérieure à 50m, alors les câbles doivent être plus gros.

Exemple: pour un câble de 70m avec une éolienne de 3,6m de diamètre en 24V nous avons : $35 \times (70/50) = 49$ donc 50mm².

L'idée est de trouver un compromis entre la perte d'énergie par échauffement du câble et le prix de celui ci.

Dans certains cas il est préférable d'accepter des pertes en lignes supérieures pour atteindre un site plus venteux et dans d'autres cas il sera préférable de faire des économies en évitant d'utiliser des grosses sections de câble, spécialement quand on opte pour des tensions plus faibles (12V par exemple).

La chute de tension dans les câbles conduit à une augmentation importante de la tension interne de l'alternateur. Cette situation amène les pales à "travailler" plus durement mais elle leur permet aussi de tourner un peu plus vite. Ce n'est pas une si mauvaise situation car les pales tendent souvent à décrocher dans les hauts régimes de vent à cause de la vitesse trop réduite de l'alternateur. Un fil de cuivre plus fin peut donc aider à contrecarrer ce phénomène en permettant aux pales de tourner plus vite.

On peut gagner ainsi de la puissance en améliorant l'efficacité de l'hélice et de l'autre côté on en perd dans l'acheminement de l'électricité.

Taille des tubes pour mâts haubanés

Vous trouverez ci dessous les tailles minimales recommandées pour les tubes hydrauliques à utiliser pour les différentes éoliennes.

Tailles mini des tubes pour le mat (mm)						
Diamètre turbine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
Diam tube	48,3	60,3	76	88,9	114,3	114,3
Diam cable	4	4	6	6	8	8

Les tubes les plus gros ont un coefficient de sécurité plus important que les petits. Nous vous conseillons de fixer les haubans juste en dessous des pales (pour ne pas qu'il y ait collision) en respectant un angle suffisamment ouvert (60° +/- 5°).

Ces précautions sont essentielles pour que les valeurs ci-dessous conviennent. Si l'angle formé par les

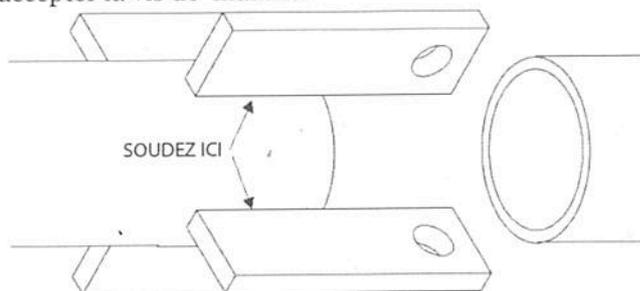
haubans est en deçà de ces valeurs, alors vous devrez utiliser des tubes de section supérieure.

La longueur standard des tubes est 6m. Utilisez au moins une nappe de haubans par section de tubes même si les haubans supérieurs supporteront quasiment toute la charge.

Les câbles des haubans inférieurs peuvent être plus fins car ils ne sont là que pour maintenir le mât en position verticale.

Le meilleur moyen d'attacher les câbles est d'utiliser des manilles qui viendront s'assembler sur des taquets soudés au mât.

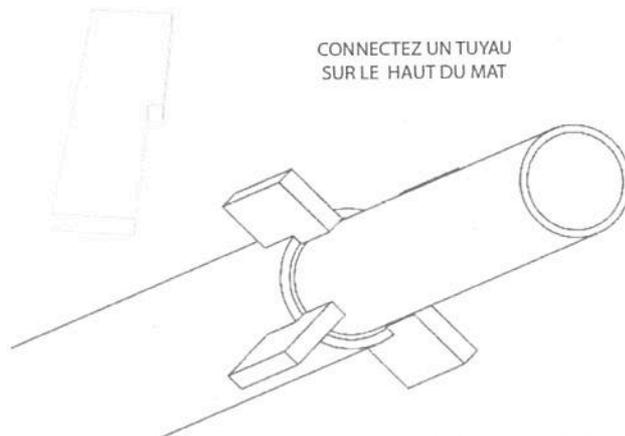
Pour les taquets, utilisez des fers plats de 8 à 10 mm d'épaisseur et percez des trous suffisamment grands pour accepter la vis de manille.



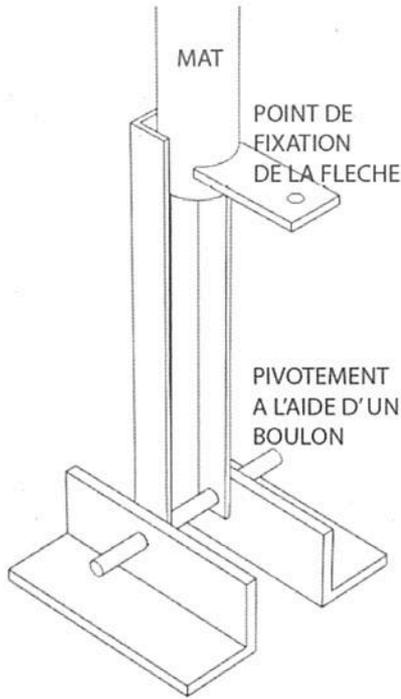
Positionnez les taquets inférieurs à la jointure des deux tubes de manière à ce qu'ils dépassent autant sur l'un que sur l'autre. Commencez par les souder sur un des tubes. Enfilez ensuite le deuxième tube entre les taquets et finissez les soudures en vous assurant que les deux tubes sont bien concentriques. Cette méthode permet d'éviter que le retrait des soudures ne désaxe les deux tubes. Enfin, vous pouvez souder les deux tubes ensemble. Le résultat final est très solide et permet un bon arrimage des haubans.

A l'endroit où le tube se réduit en haut du mât (pivot de la nacelle) vous pouvez assembler les deux tubes en taillant une encoche dans des bouts de fer plat puis en les soudant comme expliqué ci dessous.

Une deuxième solution consiste à souder le tube de pivot et le tube du mât à une plaque préalablement percée (pour le passage du câble). Cette solution est moins solide.



Un système de pivot sera réalisé en pied de mât. Nous recommandons de surélever légèrement du sol le tube



du mât pour permettre au câble de s'entortiller sans contraintes. Une bonne solution est de réaliser des sortes de "jambes" en utilisant deux cornières en acier comme sur le schéma suivant.

Vous pouvez fabriquer une charnière en bas de ces "jambes" en utilisant un morceau de tige filetée ou une longue vis.

Faites reposer l'ensemble sur deux larges cornières fixées dans la roche, sur un socle en béton ou simplement sur un châssis métallique. Le choix de l'une ou l'autre des solutions se justifie en fonction du type de sol. Il n'est pas nécessaire de réaliser un ancrage important sous le mât. Par contre, les ancrages des haubans doivent être réalisés avec soin.

Remarque : sur le schéma un crochet est soudé à 90 degrés sur le mat. Sur le crochet est attaché un tuyau qui servira au levage du mat.

Ancrages de reprise de haubans

Pour faciliter la manœuvre du mât, il est préférable d'opter pour un système à quatre haubans. Arrimez-les à une distance équivalente à la hauteur du mât depuis sa base. Pour cela attachez une barre de fer (tube, cornière,...) en bout d'une grosse chaîne et enterrez là, directement dans la terre ou noyez là dans un bloc de béton.

Dans certains cas, vous pouvez aussi ancrer les chaînes à des rochers quand ils

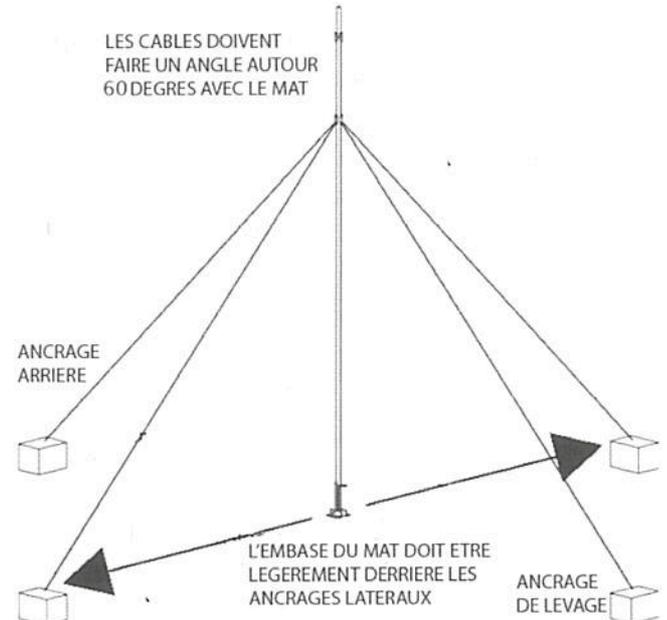


sont suffisamment gros. Vous pouvez aussi sceller des équerres métalliques aux rochers pour ensuite attacher les chaînes et les câbles à l'aide de manilles.

Deux des ancrages doivent être au même niveau que le pivot du pied de mât. Si l'installation est réalisée dans un champ en pente, alors le mât doit reposer du côté le plus haut de la pente, à 90° de la droite définie par les deux ancrages latéraux. Ceux ci doivent être disposés à égale distance du pied de mât et sur une même courbe

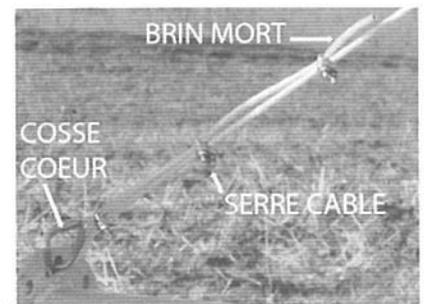
de niveau pour que la tension des haubans latéraux soit équilibrée pendant le levage.

Si vous avez un doute, reculez l'embase de quelques centimètres (10-15) du côté de l'ancrage de manœuvre pour que les haubans latéraux se tendent automatiquement pendant le levage et qu'ils se détendent quand on bascule le mât.



Le câble en acier galvanisé est ce qui est le plus utilisé pour la réalisation de haubans. Cependant, vous pouvez aussi utiliser du fil de fer agricole servant à la tension des clôtures (de résistance suffisante) ou encore des chaînes, etc. Quand vous utilisez du fil de fer comme hauban, nous nous conseillons de les doubler, voire de les tripler pour éviter toute mésaventure. Cette solution a pour avantage d'être à la fois solide, résistante à l'usure du temps et très bon marché.

Les câbles en acier peuvent être coupés à la disqueuse à l'aide d'un disque à tronçonner très fin (1mm environ). On attache ces câbles en le doublant tout en laissant une boucle au bout de celui ci. Le câble est maintenu dans cette position grâce à trois serre-câbles.

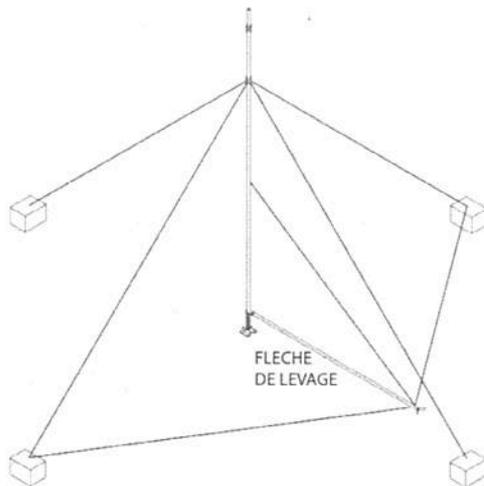


Fixez la "selle" du serre-câble à la partie "vivante" du câble (brin le plus long) et le "U" sur le brin "mort" (côté proche du bout de câble). Cette règle est à suivre **impérativement** car la partie en "U" du serre-câble est lisse et tend à détériorer le câble.



Erection du mât

Utilisez une flèche de manœuvre fixée sur l'embase pour lever et descendre le mât.



Si le mât n'est pas très grand (<=9m), vous pouvez le lever en utilisant un hauban qui passerait dans un "V" situé en haut de la flèche de manœuvre. La flèche a besoin elle même de 3 haubans: un qui sera relié au mât et deux autres liés aux ancrages latéraux. Une liaison pivot maintien cette flèche en partie basse.



cette opération.

Voir photo.

Mâts de grande hauteur

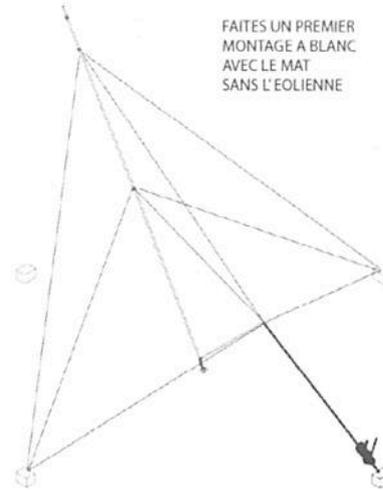
Si la hauteur du mât dépasse 12m et qu'il y a plusieurs nappes de haubans alors vous aurez aussi besoin de haubaner la flèche en plusieurs points sur le mât.

Attachez le ou les câbles de levage en haut de la flèche de manœuvre (pas de "V" dans ce cas là). L'angle entre le mât et celle ci doit être légèrement inférieur à 90° pour que le treuil reste tendu même quand le mât est en

position verticale. Utilisez des câbles différents pour arrimer le mât aux ancrages.

Réglage des haubans

N'essayez pas de régler les haubans avant d'avoir effectué le premier levage. Vous pouvez commencer par fixer un seul serre-câble sur chaque hauban pour le réglage de la verticalité.



ATTENTION: Le réglage de la verticalité du mât doit s'opérer à blanc, cad **sans avoir fixé l'éolienne!**

Prenez garde à ce que les haubans ne se tendent pas trop pendant le levage, donnez un peu de mou dans les haubans si besoin.

Quand le mât est entièrement levé,

ajustez les haubans en commençant par les nappes inférieures. Vous aurez besoin de placer un niveau à bulle contre le mât pour vérifier sa verticalité.

Sachez que quand vous tendez un hauban d'un côté, l'autre subira automatiquement le même sort (le mât est souple sur sa base!). Prenez garde à ce que le mât reste relativement droit à mesure que vous réglez les haubans supérieurs. La tension doit être suffisamment importante pour que le mât n'oscille pas par grand vent mais aussi suffisamment lâche pour ne pas induire une charge trop forte sur la structure.

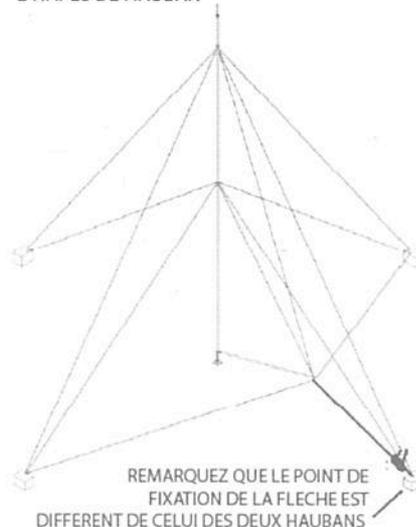
Utilisez des tendeurs à œil (attention évitez les crochets) pour tendre les haubans sans efforts.

Quand vous voulez abaisser le mât, commencez par attacher le treuil à l'ancrage



de levage d'un côté et aux haubans de levage de l'autre. Pensez à verrouiller le treuil avant de dévisser complètement le tendeur. Maintenant vous pouvez engager la descente en "cassant" le hauban opposé à l'aide d'une corde.

MONTAGE AVEC 2 NAPES DE HAUBAN



Toutes les manilles et les tendeurs doivent être verrouillés pour éviter d'être desserrés par les vibrations. Pour cela faites passer les terminaisons des haubans à l'intérieur des tendeurs

Conception de l'alternateur

Dans ce livre, j'ai essayé de vous fournir un choix assez large de modèles d'alternateurs (puissance/tension) pour ne pas que vous ayez à concevoir un modèle spécifique à votre projet. Cependant je pense qu'il est intéressant de comprendre quels éléments je prends en considération pour leur conception.

Correspondance pales/alternateur

L'alternateur doit être conçu pour absorber la puissance que les pales peuvent lui transmettre dans leur gamme de vitesses de fonctionnement.

Dans un cas idéal, la vitesse des pales (tr/mn) sera proportionnelle à la vitesse du vent. A chaque vitesse de vent, on peut prévoir la puissance que peuvent délivrer les pales ainsi que leur vitesse de rotation optimale.

Tip speed ratio (lambda λ ou TSR)

Le TSR correspond au rapport entre la vitesse linéaire du bout des pales et la vitesse du vent arrivant sur l'hélice.

La plupart des pales présentées dans ce livre sont conçues pour fonctionner à un TSR de 7. En clair, cela signifie que le bout des pales tourne 7 fois plus vite que la vitesse du vent.

Une vitesse de vent de 3 m/s (vitesse de démarrage) est souvent nécessaire pour commencer à produire du courant. Dans ces conditions, le bout des pales doit idéalement évoluer à : $3 \times 7 = 21$ m/s

Avec un vent de 10 m/s, l'éolienne doit atteindre approximativement sa puissance maximale, le bout des pales évolue à 70 m/s. Au delà de 80 m/s les pales ont tendance à s'éroder prématurément.

Calcul de la vitesse de rotation du rotor (tr/min)

$$\text{Tr/min} = (\text{Vitesse bout de pale} \times 60) / (\text{diamètre} \times 3,14)$$

La vitesse de rotation idéale à pleine puissance est par conséquent plus de trois fois supérieure à la vitesse de démarrage.

Ceci est problématique parce que la plage de vitesse caractéristique de l'alternateur entre le démarrage et la pleine puissance est d'à peine le double.

Puissance de l'hélice

La puissance théorique du vent soufflant sur la surface balayée par les pales est assez facile à calculer:

$$P = 0,5 \times \rho \times S \times V^3$$

P: Puissance du vent en Watts

ρ : Densité de l'air (1.225Kg/m³ environ)

S: Surface balayée par les pales:

$S = (\text{Diamètre pales}^2 \times 3,14) / 4$

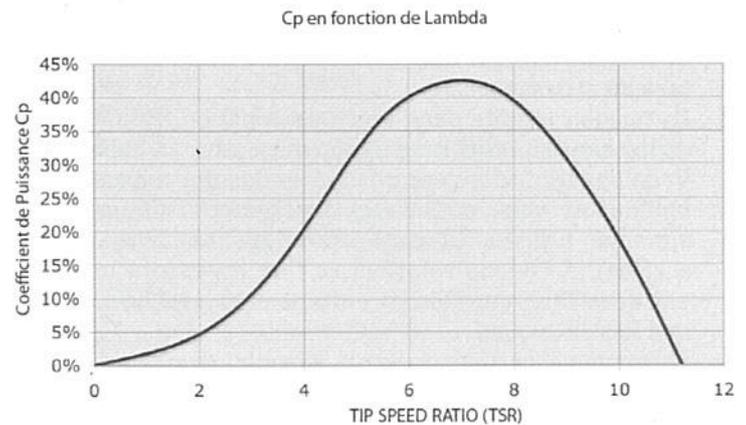
V: Vitesse du vent (m/s)

Malheureusement, il est physiquement impossible de capturer la totalité de la puissance de ce vent. En réalité, la puissance mécanique que les pales peuvent produire représente seulement un certain pourcentage de ce que l'hélice reçoit. Ce rapport est connu comme le coefficient de performance "Cp".

Le "Cp" le plus haut pouvant être atteint est 59,3% (limite de BETZ).

Si vous essayez de capturer plus d'énergie que dans cette proportion alors le vent tend à éviter l'hélice de l'éolienne. La récupération de cette énergie ralentit le flux d'air et le bloque.

Le coefficient de performance des pales dépend du TSR. Vous trouverez dans le tableau ci dessous comment il varie théoriquement pour une hélice conçue pour travailler à un TSR de 7. Le Cp max est obtenu au TSR de conception (ici 7) mais il est toujours acceptable pour des TSR compris entre 5 et 9 (Cp 30% env.)



En dessous d'un TSR de 5, les pales décrochent. Le vent frappe le bord d'attaque de la pale avec un angle trop important et ne suit pas la courbe du profil. Le flux d'air se sépare même et crée des turbulences et de la trainée.

Au dessus d'un TSR de 9, les pales génèrent énormément de trainée à cause de la vitesse trop élevée. Le vent frappe cette fois le bord d'attaque avec un angle d'attaque trop petit. Quand l'alternateur est simplement connecté à des batteries via un redresseur il n'est pas possible de maintenir les pales à leur TSR idéal sur toute la plage de vitesses de vent.

Les batteries ont tendance à maintenir l'éolienne à vitesse quasi constante. La meilleure option dans ce cas est d'opérer un compromis en choisissant une vitesse de démarrage de charge légèrement supérieure à celle idéalement utilisée pour que le TSR devienne optimal dans les classes de vent moyennes (les plus productives sur l'année, car plus fréquentes) et n'augmente pas de trop dans les classes de vents plus forts (quand les pales aiment à tourner relativement vite et que l'alternateur les retient).

Rappel: la vitesse de démarrage de charge est la vitesse à laquelle l'éolienne commence à charger la batterie,

c'est.à.dire quand la tension de l'alternateur atteint la tension de batterie (12/24/48V suivant le système).
 Quand on conçoit un alternateur pour qu'il corresponde à des pales qui fonctionnent idéalement à un TSR de 7, nous préférons essayer de régler la vitesse de l'alternateur pour que les pales évoluent à un TSR de 8,5 ou un peu plus. Le démarrage se fait à 3 m/s.
 A ce moment précis, le vent est juste assez fort pour vaincre la friction induite par les roulements, etc.

machine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
TSR Conception	5	6	7	7	7	7
TSR démarrage	6.25	7.5	8.75	8.75	8.75	8.75
Vit.démarrage tr/min	300	240	210	167	140	120

Tension de sortie/vitesse de rotation

La meilleure façon de trouver la vitesse de démarrage de l'alternateur est de calculer la tension que l'on obtient en fonction de la vitesse de rotation. Si la tension de l'alternateur atteint la tension de batterie à une vitesse "x", cela signifie qu'il s'agit de votre vitesse de démarrage, qui doit correspondre aux objectifs du tableau ci dessus.

La tension induite dans un fil est fonction du nombre d'alternance du flux magnétique traversant la bobine. Vous pouvez facilement calculer le flux qui traverse les bobines si vous connaissez les caractéristiques des aimants utilisés (densité du flux magnétique et surface). A chaque rotation, ce flux traversera les fils par deux fois: une fois en entrant dans une bobine et une fois en sortant.

La tension sera obtenue par la formule:

$$U_{moyen} = 2 \times \text{flux total} \times n \text{ (Nb d'enroulements)} \times N \text{ (Nombre de tours par seconde)}$$

Flux total = A (Surface aimants en m²) x β (Densité du flux magnétique en Tesla).

n (Nb d'enroulements) = Nb d'enroulements par bobines x Nb de bobines en série.

N = Tours par seconde = tours par minute/60 = rpm/60

Donc tension moyenne = 2 x A x β x n x N

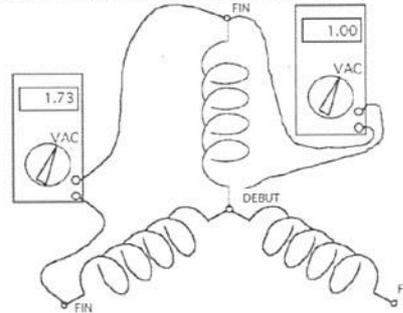
Surface d'un aimant: 46 x 30 mm = .00138 m²

machine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
Nb aimants	8	8	12	12	16	16
A (m ²)	.011	.011	.017	.017	.022	.022
B (tesla)	.3	.44	.62	.62	.62	.62

La densité du flux magnétique dépend de la façon dont les aimants sont utilisés. S'ils sont disposés sur deux disques opposés et que l'entrefer est approximativement égal à l'épaisseur des aimants (2x10=20mm dans ce cas), alors β sera équivalent à la moitié du "flux rémanent : βr" des aimants (en fait 0,62 Tesla ou 620 milliTesla). L'éolienne de 1200mm de diamètre possède seulement 1 disque. Celle de

1800mm en a 2 avec seulement 8 aimants. Ces petites machines ont une densité de flux magnétique inférieure. Les mesures réelles vérifient ces suppositions.

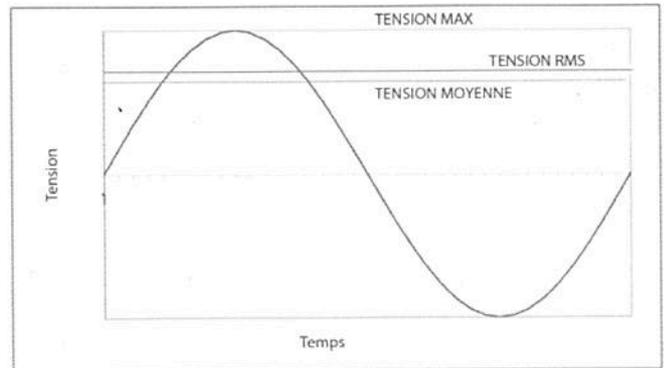
L'équation peut nous renseigner sur la tension moyenne d'un ensemble de bobines à une vitesse de rotation définie, mais ne donnent pas la tension continue (DC) en sortie de redresseur.



Dans un montage triphasé nous avons une augmentation de cette tension moyenne d'un facteur égal à racine de 3 ou 1,73 entre deux phases en

sortie d'alternateur.

De plus, la tension max sera supérieure à la tension moyenne d'un facteur de 1,57 (en supposant que la tension soit de forme sinusoïdale).



(La tension moyenne est un peu plus faible que la valeur RMS que nous utilisons généralement pour mesurer les tensions AC)

La tension de sortie provenant d'un système triphasé aura une valeur max 2,72 fois plus grande que la valeur moyenne de la tension d'une seule phase. (2,72 = 1,73 x 1,57).

La tension DC en sortie du redresseur sera juste en dessous de cette valeur max. Elle sera effectivement réduite par la chute de tension créée dans ce composant (1,4V). Cette perte est beaucoup plus significative pour un système 12V qu'en 24 ou 48V.

L'équation de la tension de sortie DC est donc:

$$U_{DC} = (2 \times A \times \beta \times n \times N \times 2.72) - 1.4$$

Pour déterminer le nombre d'enroulements nécessaires à une vitesse de rotation donnée, nous avons besoin de l'équation suivante:

Nb total d'enroulements en série:

$$n = (U_{DC} + 1.4) \times 11 / (A \times \beta \times N \times 60)$$

Exemple: pour obtenir une tension de démarrage de 24V pour l'éolienne de 1200mm de diamètre, on a:

$$U_{DC} = 24V$$

$$A = .011 \text{ m}^2$$

$$\beta = .3 T$$

$$N = 5 \text{ tr/s}$$

$$n = (24 + 1.4) \times 11 / (.011 \times .3 \times 5 \times 60)$$

$$= 280 \text{ tours (total par phase)}$$

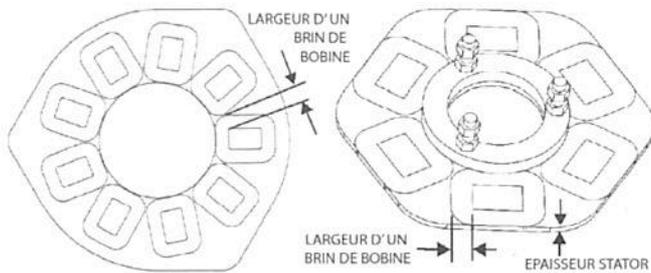
Il y a deux bobinages en série par phase, contenant chacun 140 enroulements.

Section de câbles et pertes de puissance

Sections de câbles à utiliser

Choisissez un câble le plus épais possible tout en vous assurant que les bobinages rentrent toujours dans le volume imparti.

Rappel: Plus le câble est de section importante, moins les pertes de puissance sont conséquentes et moins le stator s'échauffe.



L'espace disponible pour les bobinages dépend de la taille et de l'épaisseur du stator. L'épaisseur des bobines doit être légèrement inférieure à celle du stator pour laisser de la place aux tissus de fibre de verre placés de part et d'autre de celle-ci. Vous devez trouver les autres dimensions des bobines en considérant le diamètre extérieur du disque d'aimants et en dessinant le stator.

Un rapport de trois bobines pour quatre aimants est un bon compromis, mais la largeur des bobines dépend énormément de l'espacement entre chaque aimant.

Turbine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
nb. aimants	8	8	12	12	16	16
Diamètre rotor	230	250	300	350	400	450
Épaisseur bobine	10	13	13	13	13	13
Largeur bobine	23	28	21	30	25	32
Surface bobine (mm²)	230	364	273	390	325	416

La largeur d'un brin de la bobine est limitée par la taille de cuivre qu'il est possible de mettre côte à côte. Ce facteur évoluera en fonction de la qualité de fabrication du bobinage (densité de cuivre dans un volume donné). Une densité de 55 à 60% semble être une valeur raisonnable même si en s'appliquant on peut aller au-delà. L'utilisation de fils très fins crée un gaspillage important d'espace à cause de l'épaisseur relativement importante d'émail qui les enrobe (0,06mm en plus sur le diamètre).

La section de cuivre que vous pouvez insérer dans une bobine peut être calculée grâce à la formule suivante:

Diamètres Câbles standard				
Diam mm	Section mm²	Correspondence US		
		AW G	D mm	Metrique mm²
0.71	0.40 mm²			
0.75	0.44 mm²	21	0.72	0.41 mm²
0.8	0.50 mm²	20	0.81	0.52 mm²
0.85	0.57 mm²	19	0.91	0.65 mm²
0.9	0.64 mm²	18	1.02	0.82 mm²
0.95	0.71 mm²	17	1.15	1.04 mm²
1.00	0.79 mm²	16	1.29	1.31 mm²
1.06	0.88 mm²	15	1.45	1.65 mm²
1.12	0.99 mm²	14	1.63	2.08 mm²
1.18	1.09 mm²	13	1.83	2.62 mm²
1.25	1.23 mm²	12	2.05	3.31 mm²
1.32	1.37 mm²	11	2.31	4.17 mm²
1.40	1.54 mm²	10	2.59	5.26 mm²
1.50	1.77 mm²			
1.60	2.01 mm²			
1.70	2.27 mm²			
1.80	2.54 mm²			

S (mm²) = Largeur bobine x Epaisseur x 0.55

Dans l'exemple de la machine de 1200mm de diamètre avec 140 enroulements par bobine, nous pouvons dire que la surface de cuivre disponible est de:

Surf. Cuivre (mm²) = 230x0.55 / 140 = 0.9 mm²

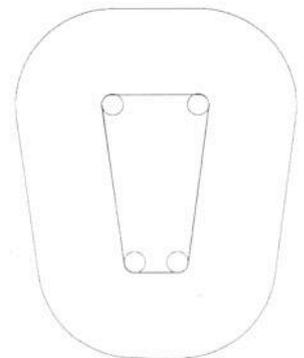
Il n'y a que certaines tailles de fil disponibles. Il faudra donc choisir la taille la plus proche. Nous opterons donc pour du fil de 1,06mm de diamètre.

Il y a pas mal de marge de manœuvre, en effet vous pouvez utiliser un fil légèrement plus gros ou plus fin pour faire varier la taille des bobines de manière à ce qu'elles s'ajustent dans le stator. Ceci aura un léger effet sur l'épaisseur du stator et donc sur l'entrefer qui influe sur la densité du champ magnétique.

Une autre astuce existe pour "disposer" plus de cuivre dans le stator. Elle consiste à réduire l'espace vide au milieu de la bobine.

On peut utiliser par exemple un gabarit en forme de trapèze qui serait légèrement moins large qu'un aimant sur un côté. Cela vous permettra d'optimiser un peu l'espace et donc d'utiliser plus de cuivre ou d'utiliser un fil de section supérieure.

Le flux reçu par les enroulements les plus proches du centre est ici plus faible qu'il ne devrait, il y aura donc une légère chute de tension par rapport à une solution avec une forme rectangulaire centrale.



Résistance d'un enroulement

La résistance d'un enroulement est une donnée importante pour déterminer le rendement de l'alternateur quand il délivre un courant. Plus longs et plus fins sont les câbles, plus ils seront résistifs (contrairement à des câbles courts de grosse section). Nous connaissons déjà la section de nos fils mais il nous reste à calculer leurs longueurs. La longueur moyenne d'un fil dans un enroulement est de:

$$L = 2 \times (\text{longueur Aimant} + \text{largeur Aimant}) + 3,14 \times (\text{largeur de cuivre de la bobine})$$

Exemple: Si la largeur de cuivre de la bobine est de 23mm, alors la longueur correspondant à un enroulement sera de 224mm.

$$\text{Longueur totale de fil} = \text{Nb d'enroulements} \times \text{longueurs d'un enroulement (ex: } 140 \times 224 = 31400\text{mm} = 31,40\text{m)}$$

$$\text{Masse de cuivre dans une bobine} = \text{longueur} \times \text{surface de la section} \times 0,009 \text{ (ex: } 250\text{g)}$$

$$\text{Résistance } (\Omega) = (\text{longueur/surface section}) / 56000$$

(Ex: $R = 31400 / 0,88 / 56000 = 0,64 \text{ ohms}$)

Cette résistance dépend aussi de la température, il n'y a donc pas de réponse précise unique. Ces calculs sont exacts pour une température de 20°C, à 70°C la résistance aura une valeur 25% supérieure.

Résistance du stator

Une solution simplifiée peut être utilisée pour évaluer le courant dans le stator:

Considérons que ce courant ne traverse que deux des trois fils à un instant donné c'est à dire passe au travers de deux des phases en série.

En réalité, le courant se répartit entre les 3 phases.

Nous pouvons donc déterminer la résistance du stator:

$$R_{\text{stat}} = 2 \times \text{Nb bobines par phase} \times \text{Résistance par phase.}$$

$$\text{(Exemple} = 2 \times 2 \times 0,64 = 2,6 \text{ ohms)}$$

Pour les stators en 12V, les bobines sont connectées en parallèle. Dans ce cas il y a un autre moyen pour calculer la résistance du stator: On divise par le nombre de bobines en parallèle:

$$R_{\text{stat}} = 2 \times (\text{Nb bobines en série} / \text{Nb de bobines en parallèle}) \times \text{Résistance d'une bobine.}$$

Courant et pertes de puissance

$$\text{Courant} = \text{Puissance} / \text{Tension}$$

Exemple: Si la puissance en sortie d'alternateur est 200 Watts et que la tension est de 24 Volts, alors le courant est égal à 8,3 Ampères.

$$\text{Perte de puissance} = \text{Résistance} \times (\text{Courant})^2$$

$$\text{(exemple } P = 2,6 \times 8,3 \times 8,3 = 180 \text{ Watts de perte)}$$

En d'autres termes, à 200 Watts de puissance en sortie d'alternateur, notre petite éolienne de 1200 mm de diamètre aura des pertes équivalentes à 180 Watts

dans les enroulements du stator. Les pales devront donc générer au moins 380 Watts pour fournir cette puissance (200W).

Pertes dans le redresseur

Il y aura aussi quelques pertes dans le redresseur à cause de la chute de tension créée par les diodes.

Chaque diode créera une chute de tension d'environ 0,7 V, donc:

$$\text{Pertes redresseur} = 2 \times 0,7 \times \text{Courant}$$

(exemple = $2 \times 0,7 \times 8,3 = 12 \text{ watts}$)

Notez que les pertes du redresseur sont plus problématiques sur des systèmes en basse tension avec des courants importants.

Les pertes stator sont les mêmes quelle que soit la tension du système. En effet, la résistance est bien plus faible pour des fils courts de forte section comme ceux utilisés pour des stators en basse tension.

Rendements

Clairement, cet exemple n'est pas très efficace car l'alternateur a besoin de 392W (200+180+12) en puissance mécanique pour fournir 200W de puissance électrique. Le rendement est donc de : $200/392 = 51\%$, ou encore moins si l'on considère l'ensemble des pertes (frottements mécaniques, etc.)

C'est cependant le cas le plus défavorable. A puissance inférieure, vous serez capable de montrer que le rendement est bien meilleur. (Par exemple à 48W, 2A, les pertes sont d'environ 13W).

Il y aura aussi des pertes à considérer liées au frottement dans les roulements et sur les portées de joints. Par contre, dans notre cas il n'y a aucune perte fer stator (il n'y a pas de noyaux ferromagnétiques dans le stator). Ce type d'alternateur est donc meilleur dans les régimes de vents faibles, là où l'on a besoin de plus d'efficacité.

Vitesse du vent

En connaissant la puissance nécessaire à entraîner l'alternateur, vous pouvez déterminer la vitesse de vent correspondante. Considérez que le « Cp » (Coefficient de Performance ou rendement global) est de 35% ce qui correspond à multiplier par 0,35.

Nous avons donc:

$$\text{Puissance pales} = 0,35 \times (1,2/2) \times \text{Surface de révolution} \times (\text{Vitesse du vent})^3$$

$$\text{La surface de rév.} = (\text{Diamètre des pales})^2 \times 0,785$$

$$(\text{Vitesse du vent})^3 = \text{Puissance des pales} / (0,165 \times \text{diamètre pales}^2)$$

$$\text{Par exemple: } V^3 = 392 / (0,165 \times 1,2^2) = 1651$$

$$\sqrt[3]{1651} = 11,8 \text{ mètres par seconde de vitesse de vent.}$$

C'est la vitesse nominale pour l'éolienne de 1200 mm de diamètre (vitesse de vent à laquelle elle atteint sa puissance nominale).

Les éoliennes de taille supérieures présentes dans ce livre atteignent leurs puissances nominales aux alentours de 10 - 11 m/s.

Refroidissement du stator

Il est utile de calculer le refroidissement nécessaire par cm² de surface de stator pour éviter qu'il ne s'échauffe trop et ne fonde.

La résine est un faible conducteur de chaleur. Regardez les endroits où les bobines sont proches de la surface. La surface exposée d'une bobine sur les deux faces peut se calculer en connaissant la largeur de cuivre (largeur d'un brin de la bobine) et la longueur moyenne d'un enroulement. Formule:

Surface exposée = 2 x largeur de cuivre x longueur moyenne enroulement.

(exemple en cm = 2 x 22.4 x 2.3 = 103 cm²)

Chaque bobine fonctionnera 2/3 du temps d'après notre analyse approchée du courant traversant le stator.

Perte par bobine = 2/3 x Résistance d'une bobine x Courant²

(Exemple = 2/3 x .64 x 8.3 x 8.3 = 32 watts)

(Vous pouvez aussi diviser les pertes totales du stator par le nombre de bobines, le résultat sera identique).

Echauffement stator = 32/103 = 0,3W/cm²
 Ce "trop plein" de chaleur conduira à une augmentation rapide de la température si l'on procède à un essai en atelier, mais dans des conditions réelles c.a.d en haut d'un mât sur un site venté, l'échauffement est contrôlé. Un échauffement bien supérieur est un pari risqué.

Estimation de la vitesse de rotation

Nous connaissons déjà la vitesse de démarrage, il reste à estimer le rapport entre la vitesse de l'alternateur et la puissance générée. Cela donnera des informations pour déterminer le TSR des pales, etc.

La tension à vide de l'éolienne (sans charge) est plus ou moins proportionnelle à la vitesse de rotation de l'hélice. On appelle cette tension "FEM" pour Force Electromotrice. En réalité, cette FEM n'est pas complètement proportionnelle à cause de la chute de tension induite par le pont de diodes (1,4V), mais la modification est mineure.

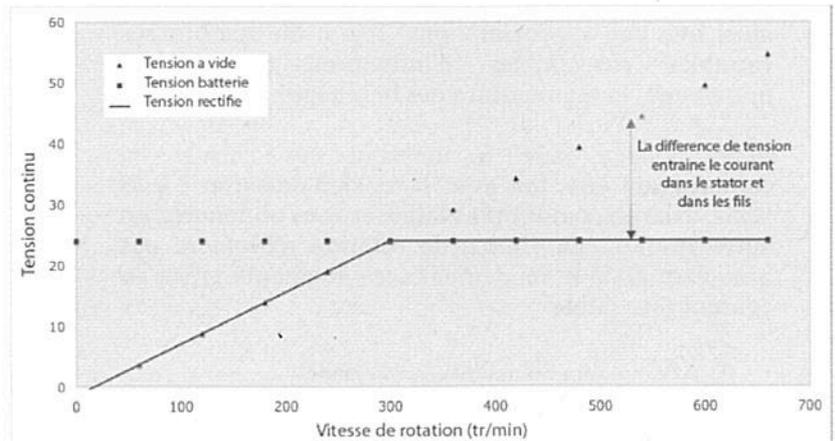
Si l'alternateur est connecté à une batterie, alors sa tension continue est "accrochée" à la tension de batterie. Cette tension est bien plus stable que la FEM de l'alternateur. Quand on connecte les batteries à l'alternateur, c'est la batterie qui s'impose!

L'alternateur essaie de faire évoluer la tension batterie à la hausse à mesure qu'il accélère mais cette évolution est relativement lente. Dès que la FEM dépasse la tension de la batterie, l'alternateur commence à injecter du courant ce qui aura pour effet d'élever légèrement la tension des accumulateurs (seulement si les batteries ne sont pas soumises à de fortes

consommations). La "FEM", c.a.d force électromotrice est une force qui met les électrons en mouvement, et donc crée une circulation de courant dans les batteries. La "Loi d'Ohm" nous dit que la soustraction à la FEM de la tension de batterie, divisée par l'impédance du circuit, détermine le courant. "I = (E - U)/Z"

L'impédance ne correspond pas exactement à une "Résistance" mais s'en approche fortement. Pour plus d'informations, reportez vous à des manuels d'électricité.

L'impédance du stator n'est pas simplement sa résistance interne. Il y a des phénomènes d'auto induction qui créent aussi de la puissance réactive. Le redresseur rend l'analyse encore plus complexe.



Une règle simple consiste à multiplier la résistance par un facteur de correction de 1,3 pour obtenir une valeur approchée de l'impédance. Cela permet aussi d'avoir une idée de la courbe "puissance/vitesse de rotation" Pour connaître la vitesse de rotation, nous allons devoir estimer la hausse de tension nécessaire pour produire le courant désiré et l'ajouter à la tension des batteries.

Nous voulons 8,3 A en sortie de la petite éolienne 24V utilisée dans les exemples (1200 mm diam.). En multipliant la résistance par 1,3 nous obtenons 3,3 Ω (Ohms). Ajoutez à cela la résistance correspondant au câble allant de l'éolienne au parc batteries, par exemple un câble de 50m d'une section de 6mm² aura une résistance de 0,3 Ω. L'impédance totale sera d'environ 3,6 Ω.

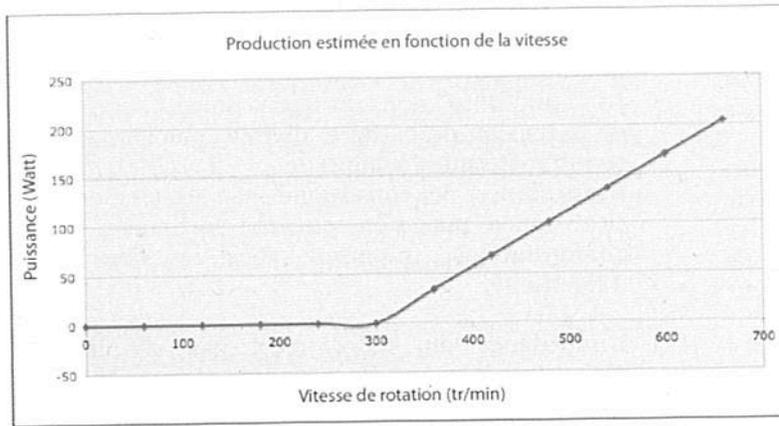
La hausse de tension voulue sera donc de:

$$U = 3,6 \times 8,3 = 30\text{Volts.}$$

La tension de batteries est 24V. La FEM totale devra être égale à: 24 + 30 = 54Volts.

$$\text{tr/mn} = (V_{DC} + 1,4) \times 11 / (A \times B \times n)$$

$$= 55.4 \times 11 / (0,011 \times 0,3 \times 280) = 630 \text{ tr/mn}$$



Rappelez vous cependant que cette méthode de calcul est très approximative et comporte des suppositions ainsi que des approximations. Il y a de nombreuses variables susceptibles d'influencer ce résultat, notamment la température des bobinages.

Vous pouvez faire à nouveau ces calculs en commençant cette fois avec la tension de batterie à 28 Volts, avec un courant plus faible et vous obtiendrez un autre résultat. La vitesse de rotation n'évoluera pas beaucoup mais le rendement sera augmenté grâce au courant plus faible.

Vitesse de pale à pleine puissance

On peut calculer la vitesse du vent nécessaire à pleine puissance (voir exemple précédent : 11,8m/s) ainsi que la vitesse de rotation correspondante (630 tr/mn). A partir de ces valeurs, il est possible de calculer approximativement le TSR à pleine puissance pour vérifier si l'éolienne «décroche» ou non.

$Tr/s = (630 / 60) = 10,5$ mètres par seconde
 Le périmètre du cercle décrit par les pales : $1,2 \times 3,14 = 3,77m$.

Vitesse bout de pale = $10,5 \times 3,77 = 39,6$ m/s

$TSR = 39,6 / 11,8 = 3,35$

Ce ratio est relativement bas mais acceptable en considérant que le TSR de conception de cette petite machine est de 5.

Eléments de conception d'un alternateur

Espacement des aimants

Si vous voulez obtenir le maximum de puissance à partir d'une taille d'alternateur définie, disposez beaucoup d'aimants proches les uns des autres.

Au contraire, si vous voulez optimiser la puissance pour un nombre d'aimants défini, utilisez un rotor de grande dimension et espacez les aimants au maximum. Vous pourrez mettre plus de cuivre dans les bobines tout en minimisant les fuites de flux magnétique entre les aimants.

Effets de la vitesse

Si l'on double la vitesse de l'alternateur, alors nous pouvons:

- Garder le stator identique et la tension sera multipliée par deux. Si le courant reste le même, vous obtiendrez deux fois plus de puissance.
- doubler le courant et donc quadrupler la puissance, avec comme inconvénient quatre fois plus de pertes. Le rendement reste inchangé. Par contre l'échauffement peut s'avérer problématique.
- Diviser par deux le nombre d'aimants et récupérer la même puissance avec le même rendement.

Effet de la tension de batterie sur le rendement

Pour un alternateur donné fonctionnant à une vitesse connue, la tension de sortie dépendra du nombre d'enroulements par bobine et du type de connexion entre celles ci (série/parallèle).

En laissant les connexions entre les bobines dans la même configuration et en faisant varier le nombre d'enroulements par bobine.

Vous pouvez doubler la tension de l'alternateur à la fois en ajoutant plus de tours par bobine et en utilisant un fil plus fin dans le but d'obtenir la vitesse de démarrage souhaitée. Vous devriez grossièrement doubler le nombre d'enroulements dans chaque bobine. Si vous suivez ces prescriptions, alors vous aurez à utiliser un fil ayant une section deux fois plus petite (en mm²).

La résistance de la bobine augmentera donc d'un facteur 4 (2 fois par la longueur et 2 fois par la section).

Le courant sera divisé par deux et la tension plus haute. Les pertes dans le stator sont régies par la loi d'Ohm: Pertes joules = Résistance x Courant².

Le courant élevé au carré augmentera de 25% quand la résistance sera multipliée par 4. Les pertes dans le stator seront exactement les mêmes quelle que soit la tension choisie.

Le choix de la tension batterie n'influera pas sur le rendement des bobines du stator si la vitesse reste inchangée. Nous aurons à peu près le même performance, que ce soit un alternateur en 12, 24 ou 48V avec la même vitesse de démarrage. (quoique les pertes dans le redresseur agissent en défaveur du système 12V).

Faire varier la tension avec la vitesse

Jusqu'ici, nous avons considéré que la tension de l'alternateur était "accrochée" à la tension des batteries. Nous pouvons aussi imaginer une solution qui conduirait à changer la tension de fonctionnement en réponse à une variation de vitesse de l'alternateur. Cette option est appelée "maximum power point cracking" (MPPT) en anglais pour "recherche du point de puissance maximum". C'est sur ce point que devrait se faire les développements futurs du petit éolien.



Pour des vents faibles, l'alternateur délivre une tension faible, alors que pour des vents forts il a les capacités de produire une tension beaucoup plus importante. Le fait que l'alternateur soit connecté à une batterie handicape le rendement à cause de la tension quasi fixe qu'elle impose. L'utilisation d'un convertisseur permet d'augmenter la tension lorsque les vents sont forts. Cela présente plusieurs avantages:

- Les pertes de l'alternateur sont proportionnelles au carré du courant. Pour une puissance donnée, l'augmentation de la tension entraîne une diminution du courant. Les pertes diminuent dans les bobines, on évite ainsi les risques de surchauffe.
- Les pales fonctionnent mieux à un TSR constant : la vitesse de rotation des pales doit évoluer en fonction de la vitesse du vent. Travailler avec une tension constante impose aux hélices une vitesse de fonctionnement quasi constante. Le convertisseur permet une plage de vitesse plus large.

Ce livre ne prétend pas offrir une conception spécifique à tel ou tel convertisseur bien que ceux-ci ont été fabriqués pour les éoliennes commerciales et pour celles auto construites. La question que vous pouvez vous poser peut être la suivante: est ce que l'ajout d'un élément plus complexe, plus cher, plus fragile se justifie par rapport au gain de performance du système?

Le système de charge batterie basique (sans convertisseur) a un rendement assez faible par vents forts à cause de la résistance importante du stator (imposée par le besoin d'une faible vitesse de démarrage) mais a aussi tendance à faire "décrocher" aérodynamiquement les pales (pour la même raison). Par contre, il a l'avantage d'être simple et durable. La fiabilité est le principal problème reproché aux petites éoliennes, surpassant de loin les problèmes de rendement. Les pales qui tournent "lentement" (dans le cas de systèmes sans convertisseur couplés directement sur batterie) sont très silencieuses et résistent mieux à l'usure du temps.

Transmission en haute tension

Si le site le plus adéquat pour l'installation d'une éolienne se trouve relativement loin du local technique et que la tension des batteries est basse 12/24/48V, alors vous pouvez fabriquer un alternateur en haute tension pour éviter l'utilisation de câbles de grosse section. Vous aurez ensuite à réduire la tension à proximité des batteries grâce à un transformateur triphasé (ou 3 transfo. Monophasés).

Assurez-vous que le transformateur que vous voulez utiliser ne sature pas à basse fréquence. La fréquence est égale au nombre de pôles d'un rotor multiplié par la vitesse de rotation (tr/mn) divisé par 120. Si un

transformateur est conçu pour 240V et 50Hz par exemple, et que notre fréquence est de 25Hz, alors la tension maximale doit être de 120V.

Vous aurez peut être besoin d'utiliser un relai pour découpler les transformateurs pour que l'éolienne fasse ses premiers tours d'hélice, parce que le courant qu'ils demandent au démarrage est trop important et empêche la machine d'accélérer.

En théorie, vous pouvez aussi changer les transfos pour faire varier la plage de tension de fonctionnement pour effectuer une sorte de "MPPT" grossier (recherche du point maximum de puissance).

Mais il n'est pas facile de concevoir un circuit qui permette cette modulation en temps réel.

Glossaire

AC - 'Courant Alternatif' comme celui produit par l'alternateur. Tension AC signifie tension alternative.

Acétone – Solvant malodorant utilisé pour certaines résines (Polyester et vinylesther).

Aimants Neodymium – Type d'aimants permanents contenant du néodyme, du fer et du bore (NdFeB). Ils sont très puissants et deviennent de plus en plus abordables. La puissance est exprimée par le grade. Grade 40 est le meilleur compromis prix/puissance aujourd'hui.

Alternateur – C'est un appareil qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les aimants en rotation induisent une tension alternative (FEM) dans des bobines (fixes). Cette tension est proportionnelle à la vitesse de rotation. Si une charge est connectée à ces bobines, alors il y a création d'un courant alternatif. L'alternateur devient alors plus dur à tourner et absorbe de l'énergie mécanique quand du courant est généré, la FCEM (force contre électromotrice).

Ampèremètre – Instrument qui sert à mesurer le courant traversant un conducteur (en ampères – A).

ATH – trihydrate d'aluminium, utilisé en poudre comme une alternative au talc pour épaissir la résine et modérer la température pendant la phase de polymérisation.

Bobine – Les aimants passant devant un fil de cuivre induiront une tension en ses bornes mais pour que cette tension puisse être utilisée il faudra beaucoup de fil de cuivre enroulés en forme de bobine. Les enroulements sont connectés en série les uns avec les autres ce qui conduit à une augmentation de la tension.

Bord d'attaque – C'est la partie de la pale qui frappe l'air en premier quand l'hélice tourne. Elle a une forme arrondie contrairement au bord de fuite qui est presque "tranchant".

Bord de fuite – C'est le bord de la pale opposé au bord d'attaque. Cette partie est fine, presque tranchante pour ne pas perturber le flux d'air (créer des turbulences) quittant la pale.

Catalyseur ou durcisseur – Produit chimique utilisé pour activer le processus de polymérisation. Ce catalyseur réagit avec l'accélérateur de prise déjà présent dans la résine pour produire de la chaleur et durcir la résine.

Charge – Une charge électrique est quelque chose qui permet au courant de circuler dans un circuit. Il peut

s'agir d'une résistance, d'une lampe ou de n'importe quel récepteur.

Chute – Mot utilisé ici pour décrire une mesure pendant la fabrication des pales d'une éolienne. La chute du bord de fuite est repérée à chaque section pour matérialiser l'angle à obtenir.

Circuit ouvert – désigne portion d'un circuit électrique qui n'est reliée à aucune résistance ou aucun élément électrique, et par conséquent où aucun courant ne passe.

Couple – Force de pivotement. La puissance mécanique est égale au couple par la vitesse.

Courant – Flux d'électrons circulant sur le pourtour d'un fil de cuivre depuis un générateur jusqu'à un récepteur pour transférer de l'énergie.

Court circuit – Un court circuit électrique comprend une alimentation qui produit une tension. Quand cette alimentation est connectée à une charge, alors du courant circule dans le circuit, atteints le récepteur et l'alimente. Si à la place, le circuit est fermé (sans charge cette fois), le courant est seulement limité par la résistance interne de l'alimentation. Ce courant est souvent trop important et crée des problèmes de surchauffe dans le circuit. Il doit donc être protégé grâce à des fusibles. Dans le cas d'une éolienne, le courant est limité par la puissance de l'hélice. Le court circuit surcharge les pales ce qui les fait décrocher aérodynamiquement, abaissant très fortement la vitesse de rotation de l'éolienne.

DC – "Courant continu" - Circulation d'électrons d'une charge positive vers une charge négative. Se retrouve principalement dans le cas d'utilisation de batteries. Le terme "DC" est aussi utilisé pour les tensions qui ne fluctuent pas (du + au – et ainsi de suite).

Diamètre – Le **diamètre** est la longueur du segment de droite passant par le centre et limité par les points d'un cercle. Dans notre cas, le diamètre des pales correspond à leur envergure, c.a.d la largeur du cercle décrit par celles ci en rotation.

Effacement (latéral/vertical) – C'est un dispositif de protection automatique qui permet de réduire l'exposition de l'éolienne aux vents violents en désaxant l'ensemble du rotor par rapport à la direction du vent (on dit que l'éolienne s'efface). Dans ce livre, ce mouvement d'effacement est amené par un décalage latéral de l'axe du rotor par rapport au pivot d'orientation de l'éolienne. Le Safran et son pivot contrôlent l'orientation de l'éolienne tout en limitant sa puissance, c'est la mise en drapeau.

Eolienne à axe vertical – Type d'éolienne sans système d'orientation au vent parce que les pales tournent autour d'un axe vertical.

Entrefer – C'est un espace dans un circuit magnétique entre lequel il n'y a ni fer ni acier. Celui ci

peut être plein de cuivre, de résine, etc. Dans notre cas l'entrefer est l'espace situé entre deux aimants opposés.

FEM – Force Electromotrice. Autre nom donné à la tension en "circuit ouvert" d'un générateur quand aucun courant n'est produit.

Fibres du bois – Elles servent à donner de la résistance au bois. Plus elles seront longues, plus le bois aura une résistance à la flexion importante. Le sens des fibres est un point important à étudier lors de la fabrication des pales.

Fil de cuivre émaillé – Fil enrobé d'une fine couche de résine isolante lui permettant d'être enroulé en bobines sans qu'il n'y ait aucun contact électrique entre les enroulements.

Flux – Lié au magnétisme. Il est similaire au courant en électricité. Il peut être visualisé par des lignes sortant d'un pôle et retournant dans un second. Unités: Le Flux en Tesla est équivalent au Flux en Weber/m². Un Weber par seconde traversant un fil conducteur génère un Volt.

Frein électromagnétique – C'est un interrupteur utilisé pour court-circuiter les câbles de l'alternateur et arrêter l'éolienne.

Fréquence – Equivalent au nombre de fois qu'une tension AC alterne chaque seconde. Unité: Hertz (Hz).

Fusible – C'est un composant qui sert à protéger les fils d'un circuit contre les surcharges. Si le courant est trop haut, le fusible fond et ouvre le circuit, empêchant ainsi le courant de circuler.

Gabarit – C'est un modèle qui est utilisé pour disposer correctement les aimants sur les rotors en acier.

Mât – Le mât est ce qui sert de support à l'éolienne.

Mise en Parallèle – Connexion entre des bobinages ou des batteries qui permet de partager le courant entre deux circuits sans que la tension aux bornes de ceux-ci ne soit changée.

Moule – C'est un objet creux dans lequel une résine est coulée puis se durcit. Le moule peut être détruit après la polymérisation de la résine ou réutilisé de nombreuses fois.

Multimètre – Matériel permettant de mesurer la tension, le courant ainsi que d'autres paramètres.

Nœud – C'est une perturbation des fibres du bois causé par un départ de branche. Essayez d'éviter de choisir des pièces de bois contenant des nœuds importants (ils affaiblissent les pales et sont difficiles à raboter).

Œuvre – C'est la pièce de bois ou de métal qui est modelée dans l'atelier.

Onduleur – C'est un appareil qui permet de transformer du courant continu provenant de batteries en courant alternatif, similaire à ce que vous pouvez avoir dans les prises de votre habitation.

Phase – C'est le rythme d'une oscillation (cyclique) de tension dans un circuit. Des phases différentes atteindront leurs tensions et courants max à des instants différents. Un ensemble de bobines soumises au même rythme électromagnétique est appelé "phase". Tous les alternateurs décrits dans ce livre ont trois phases qui se suivent de manière successives, ce qui stabilise le courant.

Pied – Partie la plus large de la pale située près de l'axe de rotation de l'hélice.

Pivot d'orientation – C'est la pièce située en haut du mât sur laquelle l'éolienne est montée et pivote. Le pivot d'orientation, combiné à l'action du safran, permet à l'éolienne de suivre la direction du vent.

Polyester – Type de résine souvent utilisée en complément de fibre de verre. Cependant, elle peut aussi être utilisée pour les pièces moulées. Voir aussi résine vinylester.

Portance – C'est une force exercée par le vent sur un objet. La portance s'exerce à 90° de la direction du vent vu par l'objet (voir trainée). Plus le rapport Portance/Trainée est important, plus les pales sont performantes.

Poussée – Force du vent s'exerçant sur le rotor de la machine.

Profiles aérodynamiques – Forme des sections de pale. Ils doivent être calculés pour avoir un bon rapport portance/trainée pour que les pales évoluent dans l'air avec le moins de pertes possibles.

Puissance – Capacité de transfert de l'énergie en Watts. Elle peut être d'origine électrique (Tension x Courant) ou mécanique (couple x vitesse).

Redresseur – C'est un ensemble de composants électroniques (diodes) qui permet de redresser un courant alternatif en courant continu pour charger des batteries (dans notre cas).

Régulateur – C'est un appareil électronique qui sert à dériver l'énergie excédentaire dans des résistances. Habituellement, il effectue cette opération au delà d'un seuil de tension. Le régulateur ajuste la quantité de courant dérivée dans les résistances pour que la tension ne dépasse pas un certain seuil. Une consommation de courant (d'une batterie ou d'un alternateur) tend au contraire à abaisser la tension.

Rendement – Dans ce livre, le mot est utilisé pour décrire le pourcentage de puissance converti par un

appareil. Par exemple: si l'alternateur absorbe 100 Watts de puissance mécanique pour produire 50 Watts de puissance électrique, alors le rendement est de 50%. Le reste est perdu en chaleur.

Réseau électrique – La fourniture d'électricité est assurée par une société de distribution (Enercoop, EDF, ...) ou une régie. L'utilisation d'un onduleur de "raccordement réseau" permet d'injecter du courant dans le réseau et de tirer un revenu de cette vente d'électricité.

Résistance – Phénomène qui s'oppose à la circulation du courant électrique qui se mesure en Ohms (Ω). La tension aux bornes d'un dipôle est égale à sa résistance multipliée par le courant qui le traverse ($U=RI$).

Résistance de délestage – C'est une résistance utilisée pour contrôler la tension. Elle la limite en absorbant l'excès de courant provenant de la source d'énergie (ici l'éolienne).

Rotor – Pièce en rotation d'un système. Le rotor de l'alternateur est composé de deux disques métalliques sur lesquels sont disposés des aimants. Le rotor de l'éolienne est un terme utilisé pour désigner l'hélice, c'est-à-dire les pales.

Safran – C'est une poutre métallique au bout de laquelle est fixée une plaque (de bois, métal) qui sert à la fois à orienter l'éolienne par rapport au vent (comme une girouette) et à la protéger dans les tempêtes (voir effacement).

Section – C'est en quelque sorte une "tranche" de pale prise à une distance donnée de l'axe de rotation du rotor. Chaque section a un profil aérodynamique et un angle particulier (par rapport au plan de rotation de l'hélice). La forme de la pale est établie en générant des surfaces autour de ces sections.

Série – Une connexion en série de bobines ou de batteries augmente la tension aux bornes de l'ensemble. (ex: deux batteries de 12V en série crée un parc batteries en 24V).

Soudure à l'étain – méthode de soudure servant à établir des connections électriques entre deux objets conducteurs (en cuivre généralement). La méthode à utiliser est la suivante: Commencez à chauffer les pièces à l'aide d'un fer à souder pour ensuite faire fondre le fil d'étain à leur contact. Celui-ci ira recouvrir ces pièces par capillarité et les liera aussi bien mécaniquement qu'électriquement.

Stator – C'est un ensemble de bobines assemblées entre elles en forme de disque grâce à de la résine. Il compose la partie fixe et centrale de l'alternateur (entre les deux disques d'aimants). Ces aimants induisent une tension dans les bobines qui sert à générer de la puissance électrique.

Taraud – Outil permettant de réaliser des taraudages à partir de trous lisses.

Tension – C'est la différence de potentiel entre deux points d'un circuit. Elle peut être comparée à la "pression" ou "hauteur manométrique" en hydraulique. La tension d'une batterie 12V peut varier entre 11 et 15V en fonction de la charge ou de la décharge qu'on lui applique.

Tension Sauvage – Quand l'éolienne tourne à vide, c'est-à-dire sans être raccordée à une batterie ou à un onduleur, la tension peut être décrite comme étant "sauvage" parce que celle-ci varie beaucoup. La fréquence de l'éolienne varie aussi avec la vitesse de rotation et donc la tension de sortie de la machine est aussi décrite comme "tension sauvage AC" contrairement au réseau électrique qui a une fréquence fixe (50HZ) et une tension quasi constante.

Trainée – Force exercée par le vent sur un objet. La trainée est parallèle à la direction du vent sur cet objet. (voir Portance)

Tr/mn – Tours par minute. C'est la mesure de la vitesse de rotation d'un objet. Cette vitesse est un élément important pour la conception des pales et de l'alternateur.

Vinylester – La résine vinyl Esther est plus cher et plus dure à trouver que la résine polyester, mais elle a de meilleures propriétés. Elle est plus pratique d'utilisation, étanche, résistante aux hautes températures et plus adhésive.

Annexes

Annexes 1 : liens internet

Autoconstruction d'éoliennes individuelles :

www.scoraigwind.com

Site de Hugh Piggott, initiateur de la démarche de construction d'éolienne qui porte son nom. Connue et respectée dans son pays écossais et à l'étranger, il dispense son savoir-faire depuis une quinzaine d'années un peu partout dans le monde.

Site extrêmement complet. Mises à jour fréquentes.

Site à son image où vous trouverez toutes les informations et les liens dont vous aurez besoin.

www.tripalium.org

Association Fondée en 2007, ayant pour but de diffuser les moyens et les savoirs faire techniques nécessaires à l'auto construction d'éoliennes individuelles de type Piggott. Annonces et organisations de stage et d'interventions diverses.

www.tieole.com

Société basée en Rhône Alpes, d'installation de petit éolien. Fournitures et conseils pour l'autoconstruction Piggott.

www.otherpower.com

Ressource gratuite américaine de bricolages déclinant la démarche Piggott.

Expériences d'alternateurs discoïdes à aimants permanents sous toutes leurs formes... Discussions très actives en anglais !

Autres sites de référence dédiés aux autoconstructeurs partageant leurs connaissances et leurs convictions :

www.homepower.com

www.windstuffnow.com

www.thebackshed.com/Windmill/default.asp

www.blueenergygroup.org

Et bien d'autres encore que vous découvrirez en explorant les sites précédents.

Et puis, plus largement :

Energie Eolienne :

www.homepower.com

Association de l'industrie éolienne danoise (DWIA) fondée en 1981. Site référence sur l'énergie éolienne et le grand éolien industriel. Riche en informations et en supports pédagogiques.

Site météo éolienne :

www.windfinder.com

Ce site donne gratuitement la vitesse et la direction du vent aux quatre coins de notre planète. Conditions de vent quotidiennes, prévisions pour la semaine et moyenne annuelle. Maillage limité mais c'est fun !

Groupe de discussion :

fr.groups.yahoo.com/group/petit-eolien/

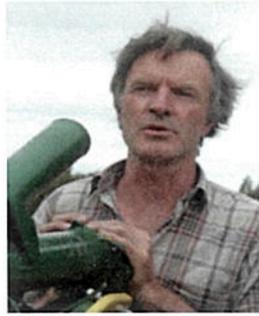
Groupe de découverte et de promotion de l'éolien individuel dans les pays francophones. Ressource documentaire et technique. Parfois sources de confusion et de confrontation. A l'image de l'éolien individuel en France...

Annexes 2 : Coût détaillé d'un système complet

Diamètre turbine	1200	1800	2400	3000	3600	4200
EOLIENNE	350	550	800	1000	1350	1500
MAT	500	700	900	1150	1400	1650
BATTERIE	300	500	1000	1800	2400	3000
ONDULEUR	350	450	800	1200	1500	2000
REGULATEUR	30	80	350	350	350	350
DIVERS	200	230	300	500	700	800
TOTAL	1 730 €	2 510 €	4 150 €	6 000 €	7 700 €	9 300 €

Annexes 3 : Liste et quantité de matériels nécessaire à la construction d'une éolienne

		1200	1800	2400	3000	3600	4200
<i>Rotor Stator</i>	Moyeu	Golf, remorque	Golf	Golf	Ford courrier	Boxer 5 points	Boxer 5 points
	Diamètre disque (mm)	1*230	2*250	2*300	2*350	2*400	2*450
	Epaisseur disque(mm)	6	6	8	10	10	10
	Aimants 46*30*10 mm NdFEB	8	8	24	24	32	32
	Fil cuivre	1,5 kg	2,6 Kg	3 Kg	5 Kg	5 Kg	7 Kg
Bois Pales	Largeur	95	95	125	145	195	225
	Epaisseur	35	35	40	45	60	75
	longueur totale	1800	2700	3600	4500	5400	6300
Tube Pivot	33,4 mm	1000					
	42,3 mm	200					
	48,3 mm		1400	1700	2000	1600	1800
	60,3 mm		340	430	530		
	76 mm					800	900
	88,9 mm					600	700
Contreplaqué Moules Safran	6 mm	1/4	1/2	1/2	1/2	1	1/4
	9 mm	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1
	12 mm	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1
	18 mm	1/4	1/2	1/2	1/2	1	1
Acier Nacelle	Cornière 50*50*6	200	800	900	1100	1500	1500
	Fer plat 30*8	200	700	700	900	100	120
	50*8		700	600	600	1500	1700
	100*8	100				800	900
Boulonnerie inox	Tiges filetées + boulon écrou	M10*1000	M10*1500	M12*1500	M12*1500	M14*2000	M14*2000
	Vis inox	5*30 mm	5*30 mm	5*50 mm	5*60 mm	5*60 mm	5*75 mm
Résine Rotor Stator	Résine polyester (g)	700	1,4	1,7	2,3	2,5	3,2
	Talc (g)	400	700	800	1200	1200	1600
	Fibre de verre (m2)	1	1	1,5	2	2,5	3
	Cire d'abeille	1	1	1	1	1	1
	Silicone	1	1	1	1	1	1
Electricité	Gaine thermo (m)	1	1	1	1	1	1
	Boitier électrique	1	1	1	1	1	1
	Dominos	1	1	1	1	1	1
	Etain soudure	1	1	1	1	1	1
Consommables	Electrodes	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5 et 3,2	2,5 et 3,2
	Disques meuleuses	10	10	12	12	18	18
	Peinture antirouille	1	1	1	1	1	1
	Papier de verre	2	2	5	5	5	5
	Lames scies sauteuses	2	2	2	3	4	4
	Graisse	1	1	1	1	1	1
	Loctite	1	1	1	1	1	1
	Colle époxy	1	1	1	1	1	1
	Huile de lin	1	1	1	1	1	1
	térébenthine	1	1	1	1	1	1
	Acétone	1	1	1	1	1	1
	White spirit	1	1	1	1	1	1



Hugh Piggott est un écossais qui habite sur l'île de Scoraig. Isolé de tout réseau électrique, il s'est improvisé constructeur d'éoliennes. Après sept tentatives, il a conçu une machine fonctionnelle.

Ses voisins l'ont alors sollicité. Il dispense son savoir faire depuis une quinzaine d'années un peu partout dans le monde à travers des manuels et des stages d'auto-construction.

Le processus de développement est comparable à Linux.

Les stagiaires s'approprient la technique : Ils fabriquent des machines et font partager leurs expériences. Ainsi, les performances et les techniques de fabrication de ce type d'éoliennes évoluent constamment.

La fibre de la retransmission est au cœur de cette démarche. L'objectif est de simplifier le procédé pour qu'il reste accessible au plus grand nombre.

C'est en novembre 2003 que le premier stage a été organisé en France. L'entreprise Krug invite Hugh Piggott. Cette opération se renouvellera en 2005, 2007, et 2008.

Très rapidement, des ex stagiaires se sont mobilisés pour multiplier les stages et les réalisations.

Ceci a abouti à la création de **l'association Tripalium.**



Tripalium est un mot latin désignant un instrument de torture à trois pieux qui était utilisé par les Romains de l'antiquité pour punir les esclaves rebelles. Ce même instrument servait aussi à ferrer de force les chevaux rétifs. Ce vocable a donné naissance au mot travail, lui conférant ainsi un caractère pénible, de contrainte, d'assujettissement.

L'instrument de torture : Pour inverser l'image du travail qui asservit l'homme en un travail qui le libère : produire son outil de production d'électricité c'est conquérir un pouvoir.

Les chevaux rétifs : C'est le vent qui ne se laisse pas facilement apprivoiser. Fabriquer une éolienne qui résiste dans la durée n'est pas une mince affaire.

Depuis trois ans, nous travaillons ensemble sur l'organisation de stages, l'intervention sur des foires, salons, festivals.... la création et l'animation du site internet et la traduction de ce manuel.

