

Moteur Brushless à rotor externe (Brushless outrunner)

Son utilisation en aéromodélisme

Inspiré :

Livre : La propulsion électrique des modèles réduits d'avions et de planeurs.

*Livre de **Gilles Brocard***

*Site Web de Claude **Gueniffey** : <http://claud.gueniffey.free.fr>*

Sommaire :

Avantages et inconvénients

1^{ère} partie : Le moteur.

- 1°) Comment se présente le moteur?
- 2°) Quel est le rôle du contrôleur ?
- 3°) Comment le moteur tourne ?
- 4) Vocabulaire : Timing et Kv
- 5°) Puissance du moteur

En résumé. Exemple de calcul.

2^{ème} partie : Choisir la motorisation électrique de son avion.

- 1°) Choisir la puissance d'alimentation.
- 2°) Choisir le type d'avion et évaluer sa masse.
- 3°) Choisir le moteur.
- 4°) Choisir le contrôleur et la batterie.
- 5°) Refaire l'évaluation de masse.
- 6°) Choisir l'hélice.

Exemple de réalisation.

Attention :

Ce document est une synthèse d'informations d'après un certain nombre d'autres documents, avec quelques interprétations simplificatrices, en espérant que les formulations restent assez proches de la réalité.

Avantages :

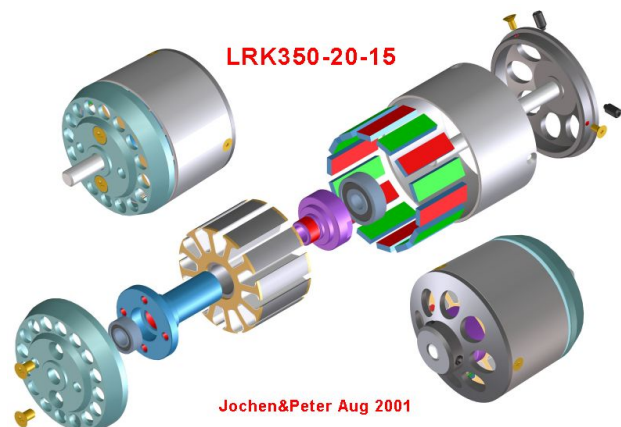
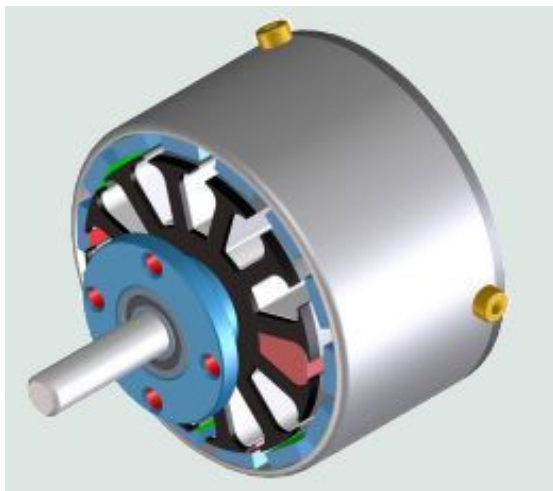
- **Bon rendement**. >70% pour les petits, >90% pour les plus gros.
- A puissance égale il **tourne moins vite et donne plus de couple** qu'un autre moteur électrique. L'hélice peut fonctionner au mieux sans réducteur.
- **Absence de balais** :
 - pas d'étincelles, donc moins de parasites électriques
 - souvent les balais sont les éléments qui se détériorent le plus vite.

Inconvénients :

- Absence de balais oblige à intercaler **un contrôleur** entre la batterie et le moteur. Dispositif complexe, **génère une tension triphasée** synchrone avec le rotor. Dispositif devenu fiable mais **plus onéreux** qu'un variateur de moteur classique.

1^{ère} partie : Le moteur.

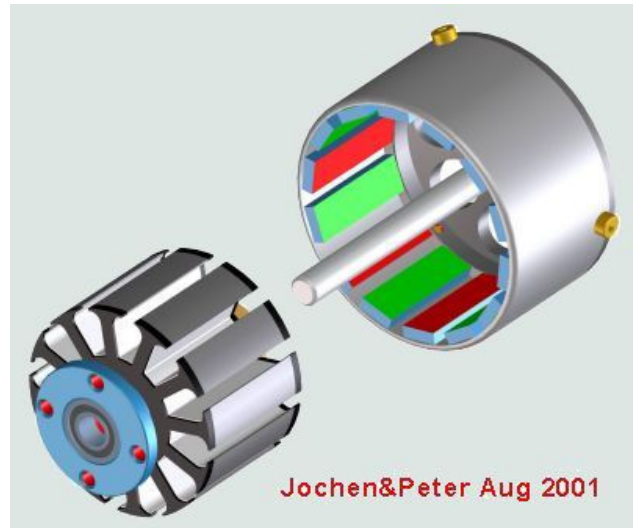
1°) Comment se présente le moteur ?



Le moteur, et une vue éclaté.



Le stator, matériau à haute perméabilité magnétique, souvent formé de 9 ou 12 dents porte le bobines.



Les aimants sont collés sur la cloche externe pour présenter une alternance Nord Sud forment le rotor.

Souvent 12 aimants pour 9 dents, et 14 aimants pour 12 dents.

Les enroulements de fil de cuivre peuvent être sur chaque dents, ou sur une dent sur deux.

Les fils de cuivres sur les dents sont reliés en série pour ne former que 3 bobines

Par exemple, dans le cas de 9 enroulements sur 9 dents :

Enroulements 1, 4, 7 forment la bobines L1

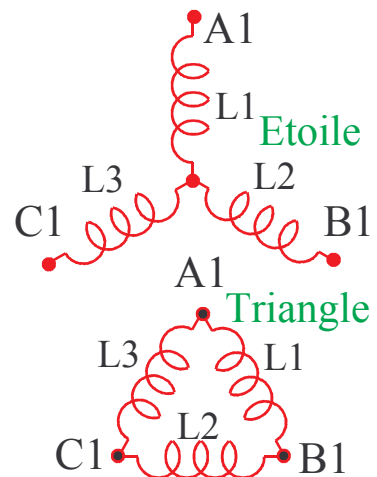
Enroulements 2, 5, 8 forment la bobines L2

Enroulements 3, 6, 9 forment la bobines L3

La connexion des bobines entre elles forme une disposition en étoile ou en triangle.

Dans la **disposition étoile**, les bobines en série présentent une **impédance plus grande**.

Dans la **disposition triangle**, les bobines en parallèle présentent une **impédance plus petite**.



On obtient la même puissance avec :

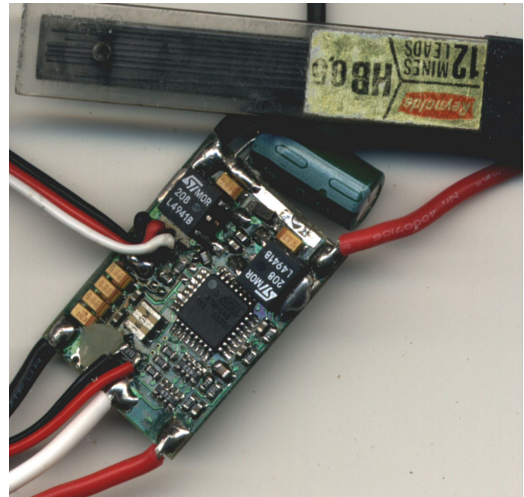
dans la **disposition étoile**, avec plus de tension pour **moins de courant**,

dans la **disposition triangle**, avec moins de tension pour **plus de courant**.

2°) Quel est le rôle du contrôleur ?

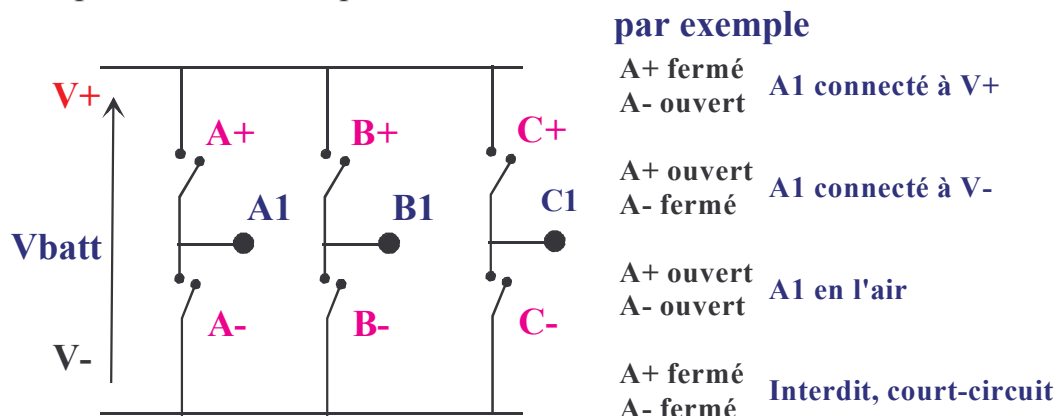
Toujours équipé d'un micro contrôleur il gère 3 fonctions :

La commande des "gaz". Il reçoit la voie "gaz" du récepteur, produit un découpage de la tension de batterie pour modifier la tension moyenne appliquée au moteur. **C'est la fonction classiquement gérée par le variateur.**



La commutation des tensions sur les bornes A1, B1, C1 du moteur.

Il possède 6 interrupteurs, qui en combinant leurs états connectent indépendamment chaque borne à la batterie, ou la laisse "en l'air".

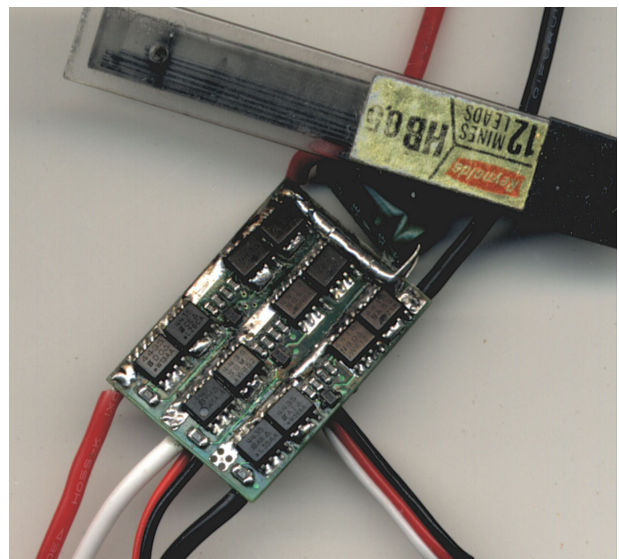


Les interrupteurs sont des **transistors MOS** pilotés par le micro contrôleur.

Leur tension d'utilisation détermine **la tension maximale d'utilisation** du contrôleur : 20 volts, ou 30 volts, ou 50 volts....

Leur courant d'utilisation maximum (de l'ordre de 10A) détermine **le courant d'utilisation maximum** du contrôleur. Pour l'augmenter chaque interrupteur est formé de plusieurs MOS en parallèle. On peut trouver $6 \times 12 = 72$ MOS dans un contrôleur de 100A.

Ici un contrôleur 18A avec 12 MOS.



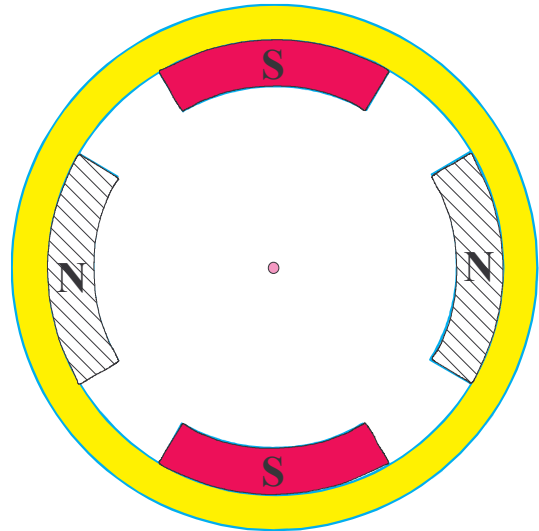
Le contrôleur mesure la tension induite dans la bobine laissée en circuit ouvert.

Il en déduit la position des aimants du rotor pour produire la commutation synchrone qui génère le courant triphasé que voit le moteur. (On reviendra sur ce point).

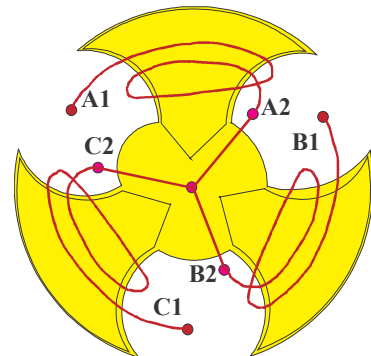
3°) Comment le moteur tourne ?

Pour avoir des **dessins plus simples**, et donc voir plus clair dans les **pôles de même nom** qui **se repoussent**, et les **pôles de noms différents** qui **s'attirent**, on choisit la configuration suivante :

- un stator à 3 dents et 3 bobines connectées en étoile,
- un rotor à 4 aimants.



L'étude du fonctionnement d'un moteur avec plus de dents et d'aimants est tout à fait analogue. Il en est de même du passage de la connexion en triangle à la connexion en étoile.



Premier mode de fonctionnement : le mode pas à pas.

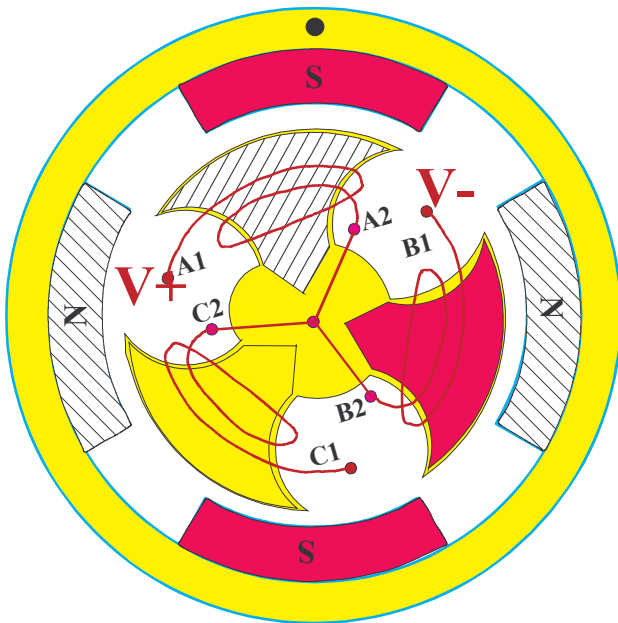
Le principe :

- On applique une tension entre 2 pôles des bobines, le troisième est "en l'air". On attend que le rotor vienne au repos, dite **position d'équilibre**.
- On **commute la tension** d'une des bornes vers la borne qui était "en l'air", changeant la polarité magnétique d'une dent du stator, et on attend que le rotor prenne sa nouvelle position d'équilibre. **Le moteur a tourné d'un pas**

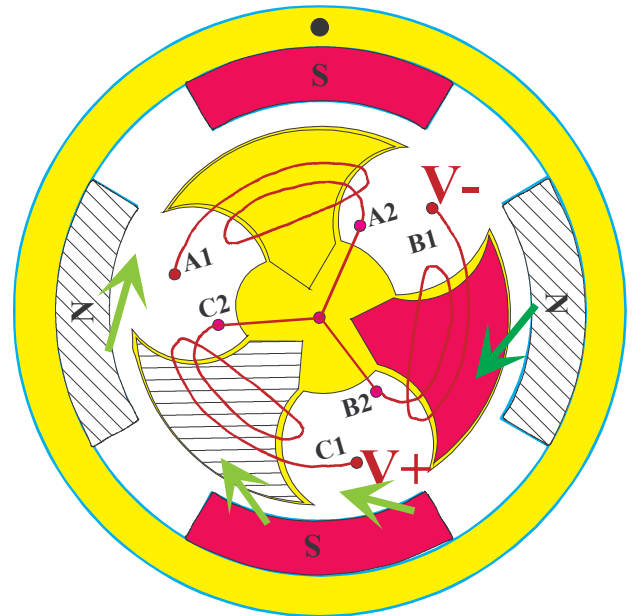
Et ainsi de suite, en commutant convenablement pour que **la suite de pas engendre une rotation** dans le même sens.

Les dessins suivants illustrent la suite des pas en montrant par des flèches les forces d'attraction et de répulsion qui apparaissent au moment de la commutation pour faire tourner le rotor.

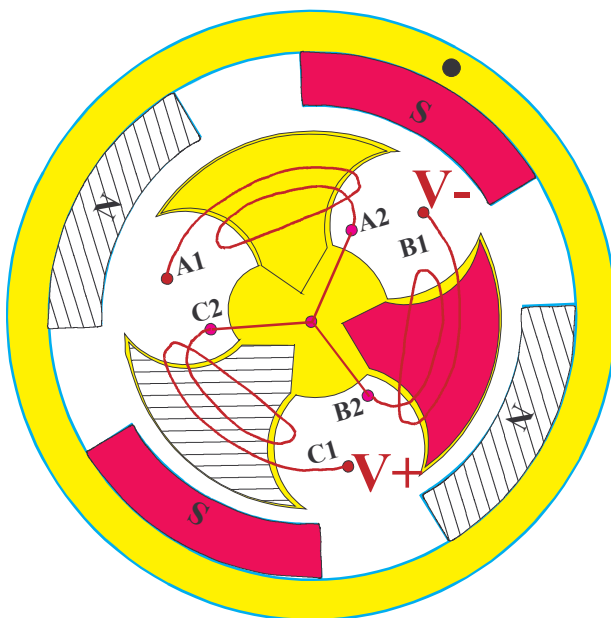
En GRIS le pôle NORD des bobines, en ROUGE le pôle SUD



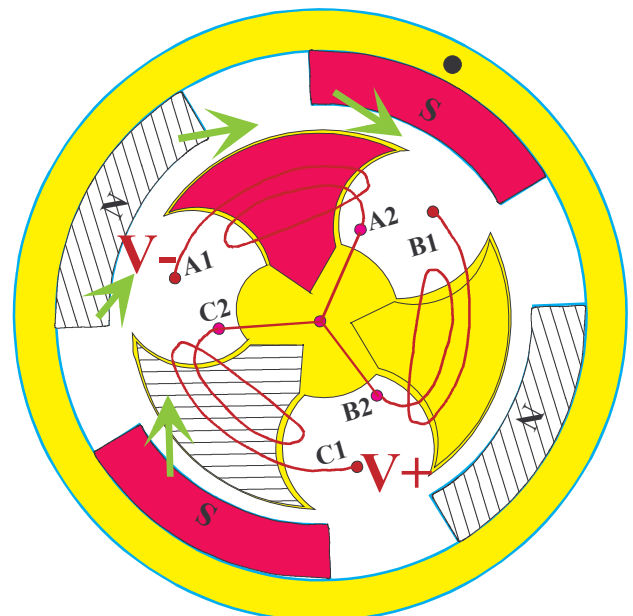
Equilibre 1



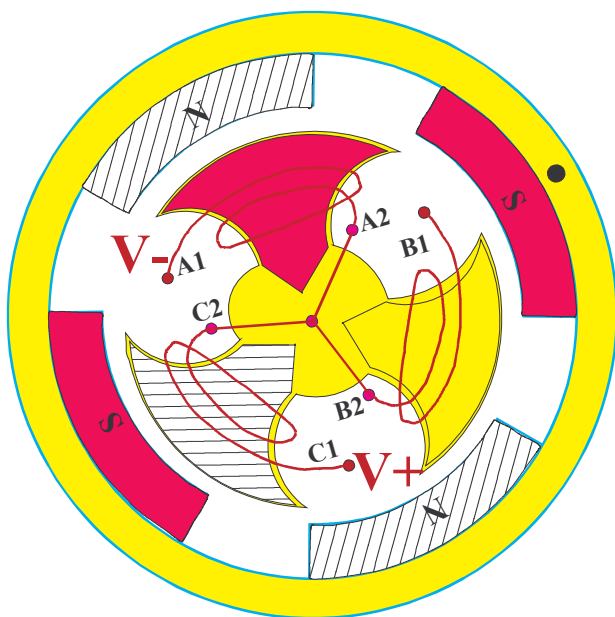
Commutation 1



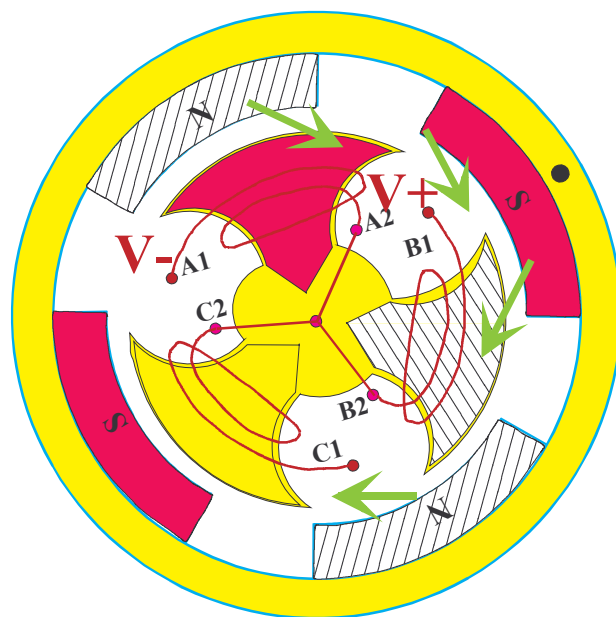
Equilibre 2



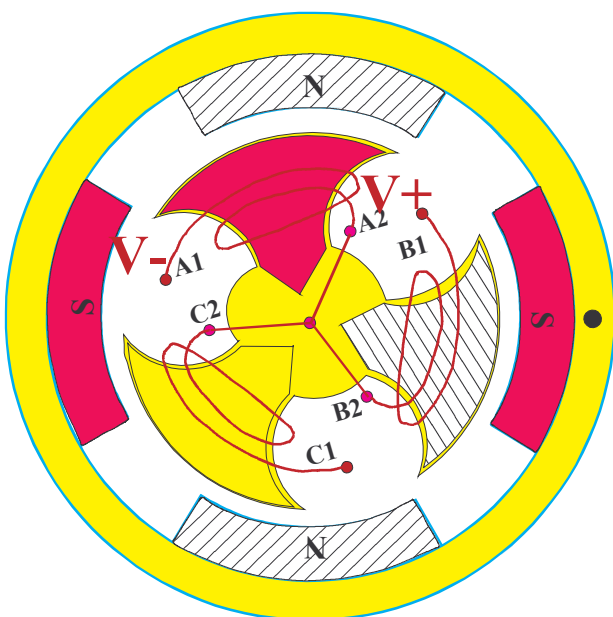
Commutation 2



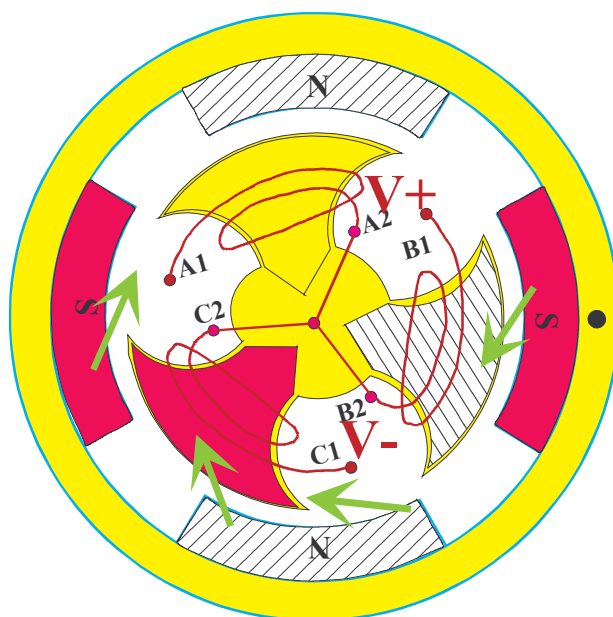
Equilibre 3



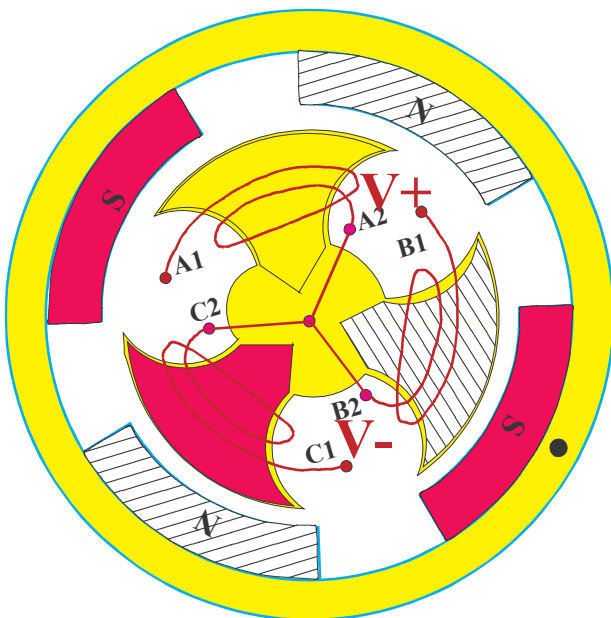
Commutation 3



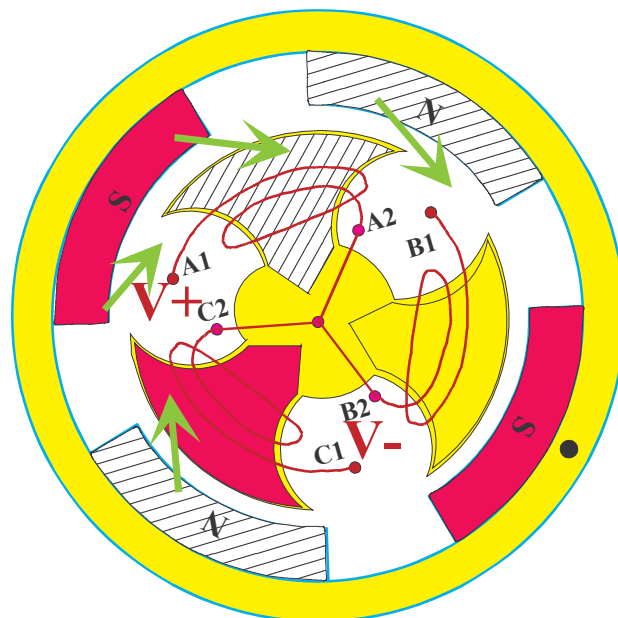
Equilibre 4



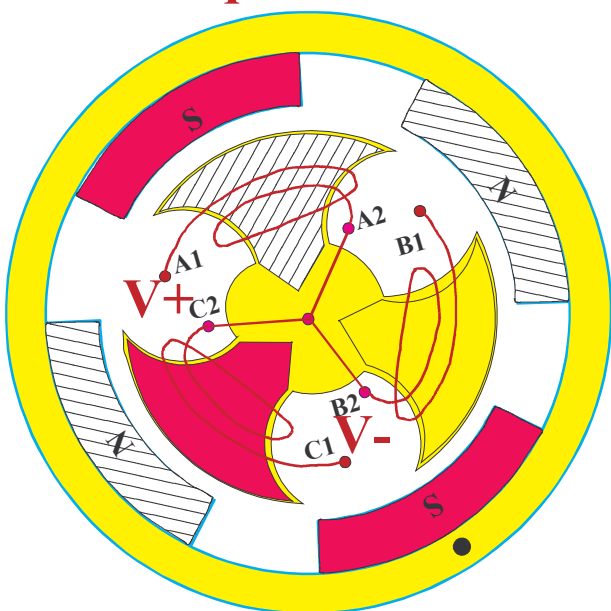
Commutation 4



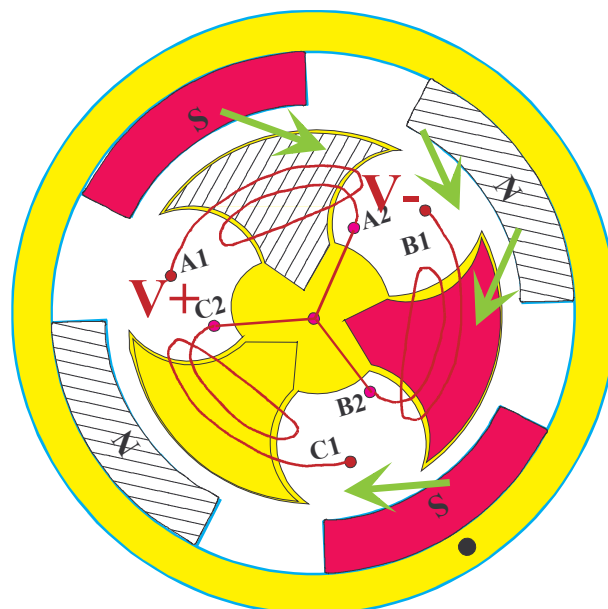
Equilibre 5



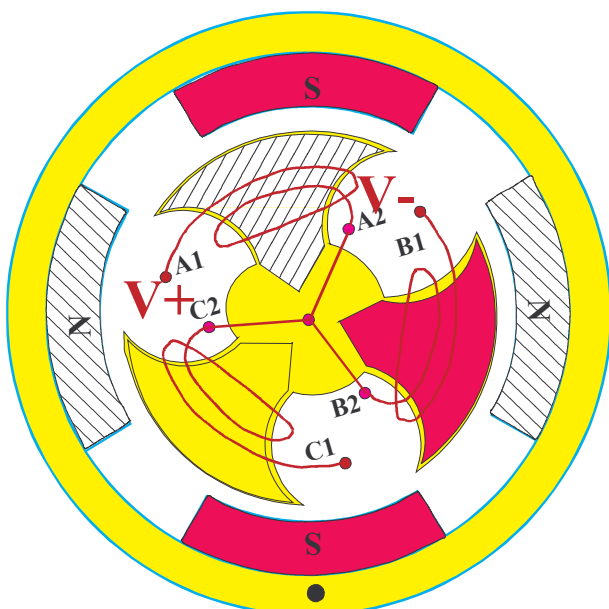
Commutation 5



Equilibre 6



Commutation 6



Equilibre 7

La **commutation électrique a effectué un cycle** : elle est dans la même situation que pour le dessin de l' "Equilibre 1".

Pour **un cycle électrique**, soit **un cycle de champ magnétique** du stator, on a obtenu **un demi-tour du rotor**.

Le fait qu'il faille **DEUX cycles** de champ magnétique du stator pour obtenir **UN tour du rotor** est parfois appelé "Effet réducteur".

Pour un moteur à **12 dents et 14 aimants** l'effet réducteur est de **7 : 1**.

Grand inconvénient du mode "pas à pas".

- le **couple moyen du moteur est faible** parce qu'à l'approche de chaque équilibre ce couple s'affaiblit rapidement pour devenir nul à l'équilibre.
- le **moteur ne peut pas tourner vite** parce qu'il faut assurer un temps minimum entre chaque commutation pour que le rotor finisse son mouvement.

Puisque la **puissance mécanique est le produit du couple par la vitesse de rotation**, la puissance obtenue est **médiocre**.

Cependant c'est **la meilleure de démarrer le moteur**.

Second mode de fonctionnement : détection de position du rotor suivie de commutation.

Méthode de détection : mesure de la tension induite dans la bobine en circuit ouvert.

La figure représente un circuit de relevé de tension sur la borne C1 "en l'air".

C'est un exemple, ce n'est pas la seule méthode possible.

Des circuits analogues se trouvent aussi sur les autres bornes pour le relevé de tension quand elles sont "en l'air".

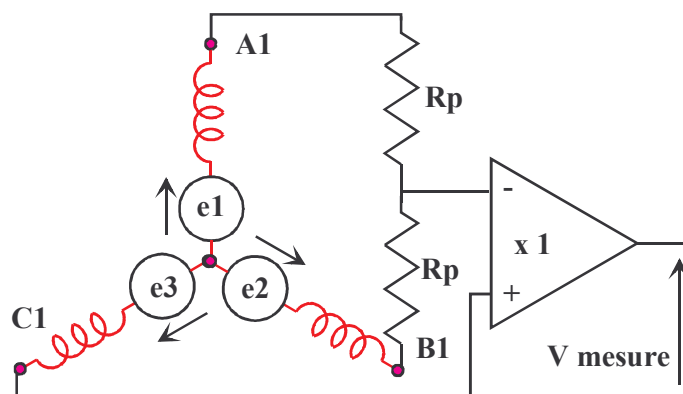
Pour faire une figure plus simple, ils ne sont pas représentés.

Les tensions e_1 , e_2 , e_3 , sont induites dans les bobines par le passage des aimants.

La symétrie de construction impose que ces tensions induites sont identiques mais déphasée l'une de l'autre de plus ou moins 120° .

Lorsque **A1 et B1 ne sont pas connectés ou lorsque qu'ils sont connecté à la tension d'alimentation**, par un développement trigonométrique on montre que la composante fondamentale mesurée est

$$V_{\text{mesure}} = 3 e_3 / 2.$$

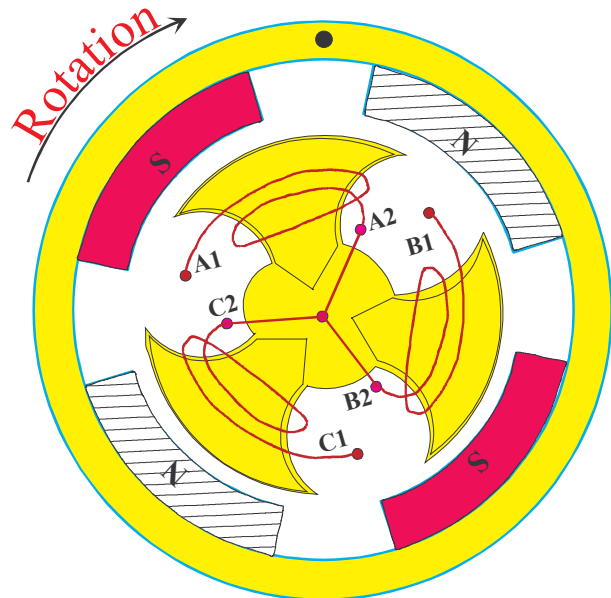


Après avoir lancé le moteur en mode pas à pas, le micro contrôleur laisse les bornes des bobines en l'air, et surveille la tension qu'elles développent par "effet dynamo" du au passage des aimants, puis au "bon moment" lance une nouveau cycle de commutation plus efficace qu'on va décrire.

Quand le rotor arrive dans cette position **le flux dans la bobine C1 C2 dans cette position passe par le maximum** parce que la dent et l'aimant sont au plus près.

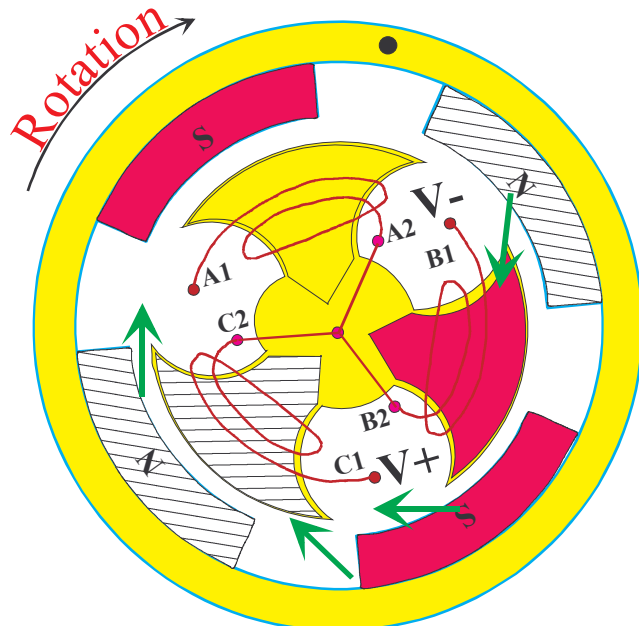
La **tension induite e_3** , (égale à la dérivée du flux) **passé par zéro**.

Le contrôleur **note cette position et laisse passer un délai** avant d'effectuer une commutation



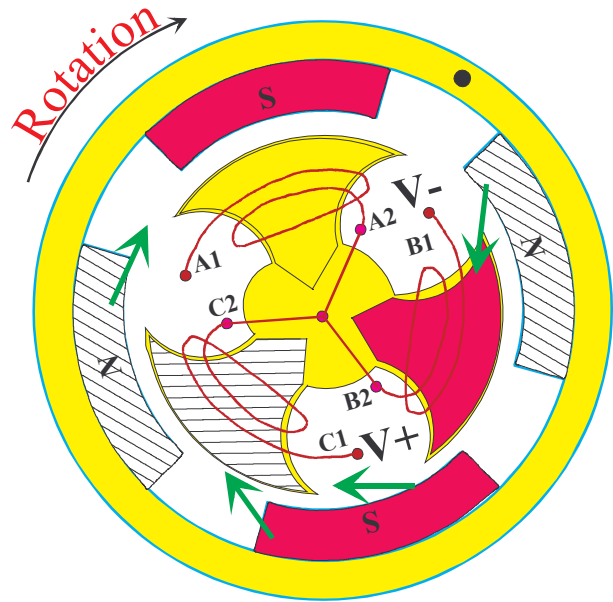
Bornes en l'air

Cette figure montre le moteur après ce délai au moment où s'établit la commutation. Le rouge figure le SUD des bobines et le grisé le NORD. Les flèches figures les forces de répulsion et d'attraction qui entraînent le rotor.



Après délai et commutation

Après cette commutation c'est la borne A1 qui est en l'air, le contrôleur surveille la tension sur cette borne et attend le passage à zéro de la tension induite. Il se produit au maximum de flux magnétique. Ceci correspond à la figure ci-contre. Les flèches représentent les forces qui entraînent le rotor.



Détection de zéro sur A1

Nouveau délai et nouvelle commutation.

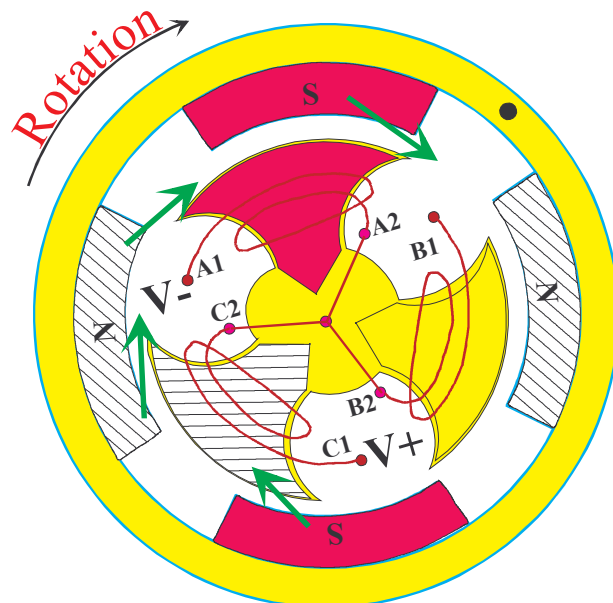
Et ainsi de suite....

On remarque :

- à chaque moment de l'évolution du rotor, les forces magnétiques sont toujours présentes, **gage d'un couple important sur le rotor**
- les commutations suivent les positions du rotor : celui-ci peut accélérer, les commutations le suivront.

Il peut donc tourner vite

Fort couple x grande vitesse = grande puissance.



Délai et commutation

4°) Vocabulaire :

- Le délai entre la détection du zéro de tension sur la borne "en l'air" et la commutation par le contrôleur est appelé **TIMING**.

On compare la durée t_d du délai et la durée T d'un cycle de commutation. On attribue la valeur de 360° à la durée du cycle et la valeur :

$$360 \frac{t_d}{T} = \text{Timing en}$$

degré.

Quelques valeurs :

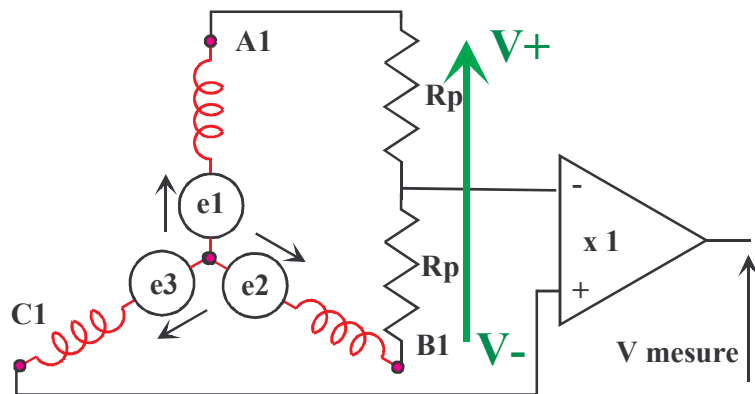
Timing bas $\sim 4^\circ$,

Timing moyen ~ 15

Timing fort $\sim 30^\circ$.

- En rappelant une figure précédente, lorsque l'alimentation est connectée à 2 bornes, on voit 2 tensions induites qui s'opposent à l'alimentation et réduisent le courant des bobines.

On appelle **coefficient K_v** du moteur le **nombre de tours par minute** nécessaire pour la **tension d'opposition** à l'alimentation développée soit de **1 volt**.



Note :

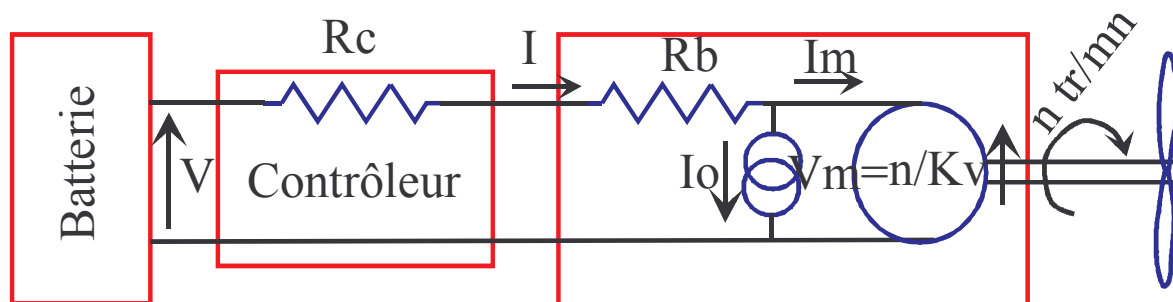
-En tant que moteur sa **vitesse limite est $V.K_v$** , car à cette vitesse la tension d'opposition égale la tension d'alimentation, **annulant le courant dans les bobines**. Les forces magnétiques du stator deviennent nulles, annulant tout couple d'accélération du rotor.

- **L'augmentation du timing** permet d'augmenter K_v , donc la vitesse du moteur, mais elle **augmente les pertes magnétiques, et le courant consommé**. Il faut l'adapter en fonction de la tension de batterie et de l'hélice.

5°)Quelle puissance consomme et fournit le moteur ? A quelle vitesse il tourne ?

On a regardé par le détail pourquoi et comment un moteur brushless fonctionne. Pour déterminer ses propriétés de puissance et d'entraînement d'hélices, c'est un **schéma électrique global** qui sera utilisé.

- Ce schéma débute à la sortie de **la batterie d'alimentation qui donne V volts**.
- Ensuite **le contrôleur** dont les interrupteurs MOS aiguillent le courant, tout en présentant une **résistance résiduelle R_c** (de 30 à 50 m Ω pour les contrôleurs de 15 à 20A, de l'ordre du m Ω pour 100A). On peut **inclure dans R_c les résistances de connecteurs et câble de liaisons** dont la valeur peut aller de quelques m Ω à plus de la dizaine de m Ω .
- Le **moteur** dont la **résistance R_b** des bobines s'oppose aussi au passage du courant, ainsi que **la tension d'opposition** engendrée par la vitesse de rotation (effet dynamo). Dans la suite des commutations elle se présente comme une tension **quasi continue de valeur n/K_v** , ou n est la vitesse de rotation en tours/minutes.



- Enfin le courant I_o . C'est le courant consommé par le moteur lorsqu'il tourne sans hélice. Il ne fournit aucune puissance mais le courant consommé n'est pas nul, parce qu'il faut un minimum de puissance pour vaincre les frottements, les pertes du circuit magnétique.

On pose ce **courant du moteur à vide égal à I_o** .

Avec cette représentation, les pertes de puissance magnétiques et de frottement étant pratiquement constante, sont figurées par le courant I_o , les pertes Joule par R_b , il s'en suit que la **puissance utile est donnée par :**

$$P_h = V_m I_m = n/K_v I_m \text{ en Watts.}$$

C'est la **puissance transmise à l'hélice**.

Beaucoup de nos moteurs ont une **valeur de I_o comprise entre 1 et 2A**.

Limitation du moteur:

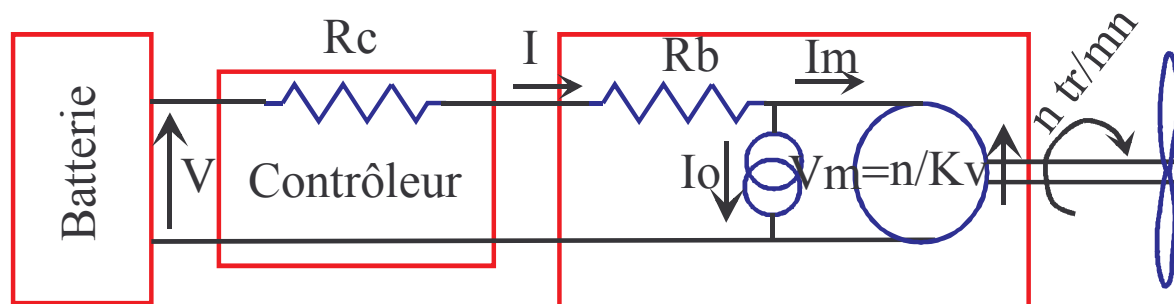
Elle est **essentiellement due à son échauffement**. Elle est produite par l'effet Joule $= R_b I^2$, par les frottements et les pertes magnétiques.

L'effet Joule est très important à fort courant. Un courant de 50A dans des bobines de 30mΩ développe une puissance de 75W. De bons fers à souder ont ce niveau de puissance : **il faut bien aérer le moteur !!!** Ne pas dépasser le courant maximum préconiser par le constructeur.

Une **température excessive** peut :

- détériorer les vernis de fixation des bobines, et entraîner des courts-circuits,
- décoller les aimants du stator
- démagnétiser partiellement les aimants. (Point de Curie pas très élevé).

Bilan des puissances:



Puissance fournie par la batterie : **$P_{batt} = V.I$** .

Puissance perdue par effet Joule : **$P_j = (R_c + R_b) I^2$** .

Puissance perdue par frottement et le circuit magnétique : **$P_f = V_m I_o$**

$$V_m = V - (R_c + R_b) I, \text{ soit } P_f = [V - (R_c + R_b) I] I_o$$

Puissance utile du moteur transmise à l'hélice **$P_h = V_m (I - I_o)$**

$$P_h = [V - (R_c + R_b) I] (I - I_o)$$

Un critère usuel de bon fonctionnement **est un bon rendement**, rapport de la puissance utile transmise à l'hélice sur la puissance fournie par la batterie.

$$\mathbf{Rend = P_h / P_{batt}}$$

En remplaçant P_h et P_{batt} par les expressions précédentes, dérivant par rapport à la variable I , on trouve que le rendement maximum est obtenu au courant optimum

$I_{opt} = (I_o I_{cc})^{1/2}$ où $I_{cc} = V / (R_c + R_b)$, un courant de court-circuit.

Le rendement maximum vaut **$Rend_{max} = (\sqrt{I_{cc}} - \sqrt{I_o})^2 / I_{cc}$**

Le rendement pour un courant voisin (développement limité au 2nd ordre) vaut

$$\text{Rend} = \text{Rend}_{\text{max}} - \frac{(I - I_{\text{opt}})^2}{I_{\text{opt}} I_{\text{cc}}}.$$

En fait le rendement ne décroît pas beaucoup pour des courants allant **de 1.5 à 2 fois le courant optimum**. C'est une **valeur à choisir à "plein gaz" au sol**, ensuite le courant diminue un peu et le moteur tourne au meilleur rendement.

Attention : ne pas dépasser le courant maximum préconisé par le constructeur !

En résumé :

Pour bien caractériser une motorisation il faut connaître :

- pour le **moteur** K_v , R_b , I_o .
- pour le **contrôleur** R_c (ou du moins une valeur estimée).
- pour **la batterie**, sa tension nominale, mais surtout la tension à fort courant.

Et les limites des tensions et courants d'utilisation.

Exemple :

Cyclon 40. (Timing bas) : $K_v = 1000 \text{ tr/mn/V}$. $I_o = 1.5 \text{ A}$, $R_b = 30 \text{ m}\Omega$.

$I_{\text{max}} = 45 \text{ A}$ pour 15 sec, $I_{\text{max permanent}} = 35 \text{ A}$.

Contrôleur Pilot 50 + connexions $= 12 \text{ m}\Omega$. (estimée). Max = 24V et 50A permanents. (pointes de 60A).

Batterie Lipo 4S 4000mAh 15C: tension à vide chargée 16,4V, sous fort courant environ 14.7V (courant 10C tension estimée à -10%)

On calcule :

$I_{cc} = 14.7 / (0.030 + 0.012) = 350 \text{ A}$ (ne pas essayer de mesurer !)

$I_{opt} = (1.5 \times 350)^{1/2} = 22.9 \text{ A}$

$Rend_{\text{max}} = (\sqrt{350} - \sqrt{1.5})^2 / 350 = 87.3\%$

On peut choisir un courant de 1.7 fois le courant optimum pour la puissance maximale demandée : $I = 1.7 \times 22.9 = 39 \text{ A}$. (Valeur admise pour près de 30 sec, largement le temps d'assurer le décollage).

Le rendement est alors : $Rend = 87.3\% - (39 - 22.9)^2 / (350 \times 22.9) = 84\%$ valeur encore excellente.

Avec ce courant : la puissance consommée est $P_{\text{batt}} = 14.7 \times 39 = 560.43 \text{ W}$

La puissance perdue dans le contrôleur et liaisons : $0.012 \times 39^2 = 18 \text{ W}$

La tension $V_m = 14.7 - (0.012 + 0.030) \times 39 = 13.06 \text{ V}$

Le moteur tourne à $1000 \times 13.06 = 13060 \text{ tr/mn}$,

Il a une puissance perdue $0.030 \times 39^2 + 1.5 \times 13.06 = 65.22 \text{ W}$

Puissance utile fournie à l'hélice : $13.06 \times (39 - 1.5) = 489.75 \text{ W}$

Choisir la motorisation électrique de son avion.

1°) Choisir une puissance d'alimentation d'après un critère, basé sur l'expérience modéliste.

En moyenne (mais on peut être d'un autre avis !), **on peut choisir** :

- **150 watts/kilo** pour un **avion calme**, capable de décoller d'une piste,
- **180-220 watts/kilo** pour un avion d'entraînement à **la voltige douce**,
- **250-300 watts/kilo** pour un avion de **voltige puissante**
- **350 watts/kilo ou plus** pour **la voltige 3D**, les montées verticales

Par exemple : le moteur Cyclon F3A destiné à la compétition sur des modèles dont la masse est limitée à 5 kg, peut développer 2500W, soit 500W/kg !!!

2°) Choisir le type de son avion, et évaluer la masse totale.

Ce n'est pas chose aisée. Si l'on peut **connaître la masse du modèle** sans la motorisation, en moyenne **la masse de la motorisation** (batteries, contrôleur, moteur, fixations, hélice) **voisine la moitié de la masse finale** du modèle avec des **batteries NiMH**, **le tiers** avec des batteries LiPo.

Suivant le type d'avion on **applique le critère du nombre de watts/kilo** pour **donner une valeur à la puissance d'alimentation**.

Pbatt = masse du modèle x watts/kilo

Il est probable qu'il **faudra revenir corriger cette valeur** après l'évaluation plus précise du 5°)

3°) Choisir le moteur qui correspond à ce niveau de puissance.

Parmi les catalogues des **fournisseurs retenir les moteurs qui peuvent développer la puissance demandée ou un peu plus**. Ne pas retenir un moteur pouvant donner beaucoup plus de puissance, il serait plus lourd et plus cher.

Il faut savoir que **à puissance égale un moteur à fort Kv et plus fort courant maximum** permet d'utiliser une **batterie à moins d'éléments**, mais **à plus forte capacité** si on veut une autonomie équivalente.

4°) Choisir un contrôleur et une batterie.

Le moteur étant choisi on peut décider de **le faire travailler près de son courant maximum dans la période où il consommera le plus**, c'est-à-dire, plein gaz et faible vitesse au décollage. Après le choix de la tension de batterie on peut revenir sur cette valeur pour chercher **un courant de l'ordre de 1.7 fois le courant de rendement maximum** (s'il est compatible avec le courant maximum spécifié par le constructeur). Le rendement de la motorisation sera meilleur au cours du vol.

La **batterie doit pouvoir fournir ce courant** : une **batterie spécifiée à 10C peut débiter un courant égal à 10 fois la valeur numérique de sa capacité**, spécifiée à 15C ce sera 15 fois cette valeur numérique, et à 20C ... ainsi de suite.

Exemple : Le courant prévu est de 50A, on prévoit une batterie de type 12C, la capacité minimale est $50/12 = 4.1$ Ah, ou plus si on veut plus d'autonomie (mais attention à l'augmentation de masse)

(Il semble qu'une batterie NiMH actuelle ne devrait pas être utilisée au-delà de 12C pour une meilleure durée de vie.

Le courant maximum utilisable d'une LiPo est généralement indiqué sur la batterie.)

La valeur du courant maximum et la puissance d'alimentation demandées étant spécifiées, la tension que doit fournir la batterie est calculée par la formule :

$V_{batt} = \text{Puissance} / \text{Courant}$.

Compte tenu de leurs résistances internes, **à fort courant** on estime une tension externe à la batterie de l'ordre de **1.05 volt par élément NiMH** et de **3.65 volts par élément LiPo**.

$\text{Nombre d'éléments} = V_{batt} / \text{tension par élément}$.

Il faut prendre **le nombre entier plus proche**.

L'entier supérieur permettra un excédent de puissance, l'entier inférieur laissera un défaut de puissance. **Faire un choix convenable d'après la manière dont on a choisi le nombre de watts/kilo du modèle.**

Il ne reste plus qu'à choisir dans le catalogue des constructeurs, **le contrôleur** qui accepte **la tension de batterie requise et le courant maximum envisagé**.

Note : Le calcul du **courant optimum** passe par **$I_{cc} = V_{batt} / (R_b + R_c)$** . R_c est la résistance du contrôleur auquel on peut ajouter une valeur de l'ordre de 5mΩ pour les câbles et prises. Avec **cette valeur de I_{cc} il faut vérifier s'il n'est pas utile de refaire les évaluations depuis le début de ce 3°**.

5°) Refaire l'évaluation de la masse.

Le **moteur et le contrôleur** sont choisis d'après catalogue de constructeurs, on a pu **noter leur masse**.

Le type et la capacité de **la batterie** sont aussi choisis. Il faut la choisir d'après catalogue et **noter sa masse**.

Ajouter approximativement **les masses du support moteur**, du **support d'hélice**, de **l'hélice**, **des câbles** électriques et **connecteurs**.

Faire **le bilan de poids du modèle d'avion complet**.

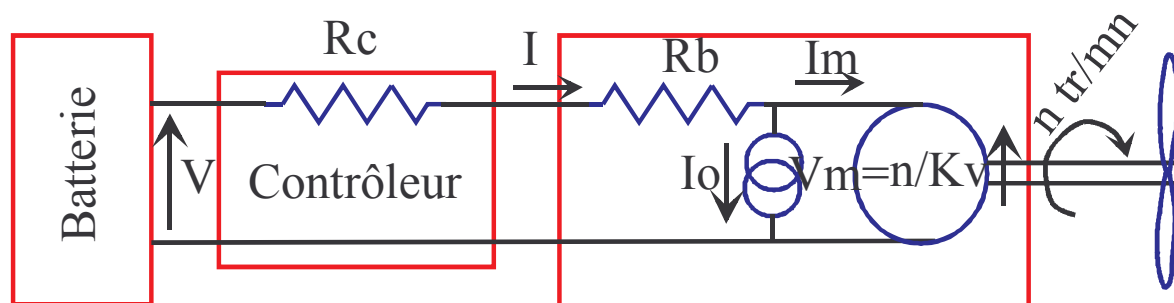
Voir si le nouveau résultat obtenu est compatible avec l'évaluation de départ pour ce type de modèle **compte tenu de la tolérance possible sur le nombre de watts par kilo**.

Sinon reprendre les évaluations depuis le 2°) jusqu'à obtenir un ensemble de valeurs homogènes.

6°) Choisir l'hélice.

Plusieurs étapes intermédiaires permettent de faire le bon choix.

1^{ère} étape : Puissance et vitesse de rotation.



D'après le schéma électrique global de la propulsion, en portant les valeurs numériques précédente au maximum de puissance,

calculer $V_m = V - (R_c + R_b)I$ et en **déduire $n = V_m \cdot K_v$** , vitesse de rotation prévue en tours/minute. (**V du schéma est la tension de batterie sous fort courant**).

2^{ème} étape : Trouver l'hélice adaptée.

Trouver une hélice qui recevant la **puissance utile maximum demandée** (on la note Ph) tourne à **la vitesse n tr/mn**.

$$Ph = V_m I_m = [V - (R_c + R_b)I](I - I_o)$$

Une façon possible de déterminer ce choix réside dans l'utilisation d'une formule aérodynamique (déduite de la formule de Boucher) qui relie vitesse et puissance.

$$Ph = 1.8 \cdot 10^{-7} D^4 Pa n^3 Np Kp$$

Ces 2 expressions doivent être égales.

- D est le diamètre de l'hélice en mètre,
- Pa est le pas en mètre,
- n est la vitesse de rotation en tr/mn,
- Np un coefficient qui vaut 2 pour une bipale, 3.2 pour une tripale, 4.4 pour une quadripale,
- Kp est un coefficient de forme des hélices, permettant d'ajuster cette formule issue d'un certain nombre de simplifications. On peut utiliser des valeurs approximatives de Kp = 1.06 pour des hélices Aeronaut, 1.1 pour des APC, 1.2 pour des Graupner Cam Prop, 1.3 pour de Top Flite ou Airscrew Master

A partir de ces formules un tableau de type Excel nommé Puissance&VitesseHelice.xls a été construit pour des hélices bipales avec deux entrées : **le nombre de tr/mn**, et les caractéristiques (**diamètre et pas**) des hélices les plus courantes. **Le coefficient Kp est à modifier suivant le type d'hélice.**

Compte des imprécisions des formules, choisir dans les colonnes voisines du nombre de tours par minute prévu, les hélices qui correspondent à la puissance requise, plus ou moins 15%.

Souvent **plusieurs hélices** peuvent satisfaire ce choix :
pour se décider 2 indications supplémentaires sont apportées :

- La **traction que produit l'hélice** sur l'avion à très faible vitesse (début du décollage, arrêt en position verticale...). Formule approchée :

$$\text{Traction} = 0.6 (0.6 \pi D^2 Ph^2)^{1/3} / 9.81, \text{ résultat en Kg poids.}$$

Pour assurer un **décollage facile**, la traction doit atteindre environ **le tiers du poids du modèle**. Décollage **très rapide** s'il atteint **la moitié du poids**.
Pour rester en **stationnaire vertical**, la **traction doit dépasser le poids**.

- **Le vent d'hélice** définit comme étant **la vitesse de l'écoulement** d'une veine d'air dans laquelle se **visserait l'hélice sans aucun glissement** :

Vent d'hélice = $n/60 \times \text{Pas}$.

n tr/mn est divisé par 60, et le pas exprimé en mètres pour que le vent d'hélice soit obtenu **en mètre par seconde (m/s)**.

L'hélice ayant les caractéristiques de traction suffisante permettra une vitesse de vol suffisant que si :

- le **vent d'hélice doit être supérieur à 2.2 la vitesse de décrochage** environ pour un avion lent, ou un 3D

- le **vent d'hélice doit se situer entre 2.5 et 3 fois la vitesse de décrochage** pour un avion classique

- le vent d'hélice peut dépasser 3 fois la vitesse de décrochage pour un avion rapide, voire beaucoup plus pour un racer.

La **vitesse de décrochage** du modèle est donnée par la limite de portance des ailes. Elle s'exprime par la formule :

$$V_{\text{décrochage}} = \sqrt{\frac{\text{Charge alaire} \times 0.981}{0.6 \times C_{z_{\text{max}}}}}$$

La **charge alaire en grammes par décimètres carrés**, 0.6 est environ la masse volumique de l'air divisée par 2.

Le **coefficient de portance $C_{z_{\text{max}}}$** est environ de 1 pour un avion de grande finesse, peut descendre à 0.6 pour avion "trapu", **autour de 0.8 pour avion usuel**.

Il faut cependant savoir qu'à partir du **rapport diamètre/pas inférieur à 1.5**, et en particulier lorsque la valeur du pas est égale ou très proche du diamètre, il se produit **un écoulement turbulent de l'air** autour des pales d'hélice. Les formules utilisées sont moins bonnes. Les **performances au décollage sont moins bonnes** que les prévisions.

Eviter aussi les hélices dont le **rapport diamètre/pas supérieur à 2**, le rendement aérodynamique est moins bon. Cependant ce type d'hélice **peut être choisi pour avion très lent ou 3D** où l'on recherche davantage la performance en traction qu'en rendement global.

Pour terminer :

- **Equiper le modèle** d'avion avec les éléments choisis.

- Il faut s'assurer que toutes les imprécisions qui entrent dans les estimations ne conduisent à une valeur **de courant trop forte ou trop faible. Il faut faire une mesure.**

- Dans le cas d'un courant trop fort choisir une nouvelle hélice un peu plus faible, en reprenant le tableau Excel des hélices.
- Dans le cas d'un courant trop faible (la puissance obtenue est plus faible que prévue) choisir une nouvelle hélice un peu plus forte, en reprenant le tableau Excel des hélices.
- **Et mettre en l'air !** La propulsion donnera ce que l'on attendait.

Note : L'étude théorique peut être affinée en utilisant des logiciels spécifiques comme **Motocalc, Electricalc...**

EXEMPLE DE REALISATION.

Avion d'entraînement à la voltige douce.

Envergure 150cm, surface alaire 42dcm², masse sans motorisation 1250g.

1°) Choisir le critère de puissance : 190 watts/kilo.

2°) Estimation de la masse totale.

Type de batterie choisie : NiMH.

Masse totale estimée : masse à vide x 2 = 1250 x 2 = 2.5 kg.

Puissance d'alimentation 2.5 x 190 = 475W.

3°) Choisir le moteur qui correspond à la puissance.

Je prends l'exemple sur catalogue Electronic Model qui donne les caractéristiques détaillées de ses moteurs sur le net.

Cyclon 40 , affiché pour 490W

Masse 175g, courant max permanent 35A, courant de pointe 45A, Kv 1000tr/mn, Io 1.5A, Rb 30mΩ, en "Timing low".

4°) Choisir la batterie et le contrôleur.

Il faut commencer choisir la valeur de courant voulu à la puissance maximale retenue.

On décide une valeur de départ pour l'analyse de **95% de maximum du courant permanent : 35 x 0.95= 33.25A.**

(Ce **choix économise le moteur**, il restera à une température plus basse. Mais si l'on estime que **le maximum de courant** ne sera **pas fréquemment utilisé**, on peut viser **90% ou 95% du courant de pointe**).

Pour disposer des 475W demandés il faut une tension de batterie :

$$V_{\text{batt}} = \text{Puissance/Courant} = 475/33.25 = 14.28 \text{ volts}$$

On a choisi des éléments NiMH, (tension 1.05 volts par éléments sous fort courant).

$$\text{Nombre d'éléments} = 14.28/1.05 = 13.36.$$

Le choix se porte sur une **batterie de 14 éléments**, pour une tension sous fort courant estimée à **14x1.05=14.7volts**.

Restant dans le catalogue Electronic Model le contrôleur qui permet facilement cette tension et courant est le Pilot 50, spécifié pour 6 à 18 NiMH ou 2 à 6 Lipo. Masse 50 grammes.

Avant de poursuivre comparons le courant choisi au courant de rendement optimum. Il faut calculer le courant de court-circuit **$I_{cc} = V_{\text{batt}}/(R_b + R_c)$** .

La **résistance du contrôleur n'est pas donnée** : on prend arbitrairement **12 mΩ**, valeur statistique moyenne pour 5 mΩ de câbles et connexions et 7 mΩ pour les contrôleurs de cette gamme.

$$\text{Soit } I_{cc} = 14.7/(0.030 + 0.012) = 350A, \text{ avec } I_o = 1.5A$$

$$\text{Courant rendement maximum} = (350 \times 1.5)^{1/2} = 22.9 A.$$

$$\text{Le rapport courant choisi/courant rendement max} = 33.25/22.9 = 1.45.$$

Cette **valeur est très proche de la zone préconisée** entre 1.5 et 2.

Nous conservons ce choix.

Le **pack de batterie** sera donc un pack de **14 NiMH 3300mAh**. Le courant demandé sera de **33.25/3.300 = 10.07C**, **tout à fait raisonnable** pour la durée de vie de la batterie.

5°) Refaire l'évaluation de masse.

Une cellule NiMH est donnée pour 62g environ dans les catalogues commerciaux : soit un **pack de 62x14=868g**.

Le **modèle** sans motorisation à une masse de **1250g**.

La masse du **contrôleur** est de **50g**.

La masse du **moteur** est de **175g**.

Pour **câbles, hélice, fixation hélice** on ajoute **60g**.

On arrive à **une estimation de masse totale du modèle : 2403g**.

C'est **un peu moins que l'estimation de 2500g**. On espère disposer à peine d'un peu plus de watts/kilo. **Il n'est pas utile de recommencer** les étapes à partir de 2°) avec cette nouvelle évaluation de la masse totale.

6°) Choisir l'hélice.

1^{ère} étape:

Calculer $V_m = V_{batt} - (R_c + R_b) I = 14.7 - (0.012 + 0.030) 33.25 = 13.3 \text{ volts}$

Vitesse du moteur et de l'hélice $n = K_v V_m = 1000 13.3 = 13300 \text{ tr/mn}$.

2^{ème} étape:

Puissance utile du moteur transmise à l'hélice :

$$P_h = V_m (I - I_0) = 13.3 (33.25 - 1.5) = 422 \text{ watts}$$

Encadré à 15% par 485W et 358W

Le tableau Excel proposé est **calculé avec $K_h = 1.1$** , c'est-à-dire des hélices de type APC.

Dans les colonnes disponibles on va **rechercher les hélices** consommant une puissance comprise **entre 358 et 485 watts**, dans les **colonnes 13000 et 14000 tr/mn** qui encadrent la valeur calculée de 13300tr/mn.

On relève :

- **hélice 8x8, 376W** à 14000 tr/mn, traction statique 1.36kg, vent 47.4m/s
- **hélice 9x5, 377W** à 14000 tr/mn, traction statique 1.47kg, vent 29.6m/s
- **hélice 9x6, 405W** à 13500 tr/mn, traction statique 1.55kg, vent 34.29m/s
- **hélice 9x7.5, 452W** à 13000 tr/mn, traction statique 1.66kg, vent 41.3m/s
- **hélice 10x4, 412W** à 13500 tr/mn, traction statique 1.68kg, vent 22.8m/s
- **hélice 10x5, 460W** à 13000 tr/mn, traction statique 1.80kg, vent 27.5m/s

Du point de vue traction statique toutes ces hélices dépasse la moitié (1.2Kg) du poids de l'avion.

La masse alaire de l'avion est $2400 : 42 = 57.14 \text{ g/dm}^2$.

La **vitesse de décrochage** estimée est $(57.14 \times 0.981 / (0.6 \times 0.8))^{1/2} = 10.8 \text{ m/s}$

Les valeurs 2.5 et 3 fois cette vitesse sont : **27m/s et 32.4m/s**.

Les hélices **8x8, 9x7.5, 10x4, sont éliminées**.

L'hélice 10x5 risque de demander **une puissance plus forte** que prévue.

Les **hélices 9x5 et 9x6** tournant en fait à un peu moins de 13500tr/mn, ont une **traction est un vent d'hélice convenable**.

On retient l'hélice 9x6, proche de la puissance désirée et un peu plus "puissante" que la 9x5.

Une hélice APC 9x6 est montée sur le modèle, la consommation en statique mesurée **est de 29 ampères**, un peu en dessous de la valeur désirée.

Une hélice Bolly 9.5x6 est disponible, elle est montée sur le modèle. La consommation en statique **est de l'ordre de 32.5 ampères**.

C'est cette hélice que l'on essaie en vol, et elle nous convient très bien.



**Envergure : 1.5m, corde 28cm, Masse 2.4kg,
Moteur Cyclon 40, pack 14 NiMH 3300 mAh,
Hélice Bolly 9.5x6**

En supplément :

En partant de l'équation électrique donnant la puissance utile du moteur

$$P_h = V_m I_m = [V - (R_c + R_b)I](I - I_0)$$

Et l'équation de la puissance aérodynamique de l'hélice,

$$P_h = 1.8 \cdot 10^{-7} D^4 P_a n^3 N_p K_p$$

On peut écrire l'égalité de ces deux expressions.

En remplaçant la vitesse de rotation n par sa valeur $n = K_v(V - (R_c + R_b)I)$.

L'équation obtenue est du second degré, elle se résout sans trop de difficulté.

On peut obtenir l'expression du courant consommé **avec $N_p = 2$**

En posant : $3.6 \cdot 10^{-7} K_p K_v^3 P_a D^4 = C_{st}$ on obtient :

$$I = \frac{0.5 + C_{st}(R_c + R_b)V - \sqrt{0.25 - C_{st}((R_c + R_b)^2 I_0 - (R_c + R_b)V)}}{C_{st}(R_c + R_b)^2}$$

En prenant cette solution on peut construire un autre tableau Excel dans lequel on entre les caractéristiques du moteur et la tension de batterie. On peut ensuite, après avoir défini le K_p de l'hélice, utiliser les valeurs de diamètre en colonne et de pas sur une ligne pour revenir examiner plus en détail des caractéristiques de motorisations que l'on a déjà présélectionnées.

Le fichier Excel s'appelle : Tension_Moteur_Helice.xls

Commentaires sur la valeur du coefficient K_v des moteurs.

Les valeurs calculées sont d'autant plus proches des valeurs expérimentales que les données introduites pour le calcul sont exactes.

Une grandeur des plus importantes est K_v . Très couramment, comme il est fait dans tout le texte précédent, on suppose que la magnétisation du moteur est le seul fait des aimants permanents et la contribution du courant des bobines négligeable. Aux forts courants des moteurs utilisés à la propulsion de nos modèles l'approximation n'est plus très bonne.

D'après des mesures effectuées sur plusieurs moteurs, et en suivant les idées exprimées sur le site : http://www.aerodesign.de/peter/2001/LRK350/WL-Kennzahl_eng.htm, on voit que la valeur de K_v décroît linéairement avec le courant du moteur sous la forme : $K_v = K_{v0} - K_{vs} I$. Dans cette expression I

est le courant de fonctionnement du moteur, K_{v0} est la valeur de K_v à courant nul. Elle est très voisine de la valeur du K_v donné par le constructeur. La constante de correction K_{vs} en fonction du courant n'est pratiquement jamais communiquée. D'après des mesures faites sur le Cyclon 40, et en faisant aussi le calcul à partir des mesures communiquées dans le très intéressant **article de Marck Kriel** (revue **RC Pilot**, novembre 2006, page 23) on obtient pour ce moteur **$K_v = 1008 - 5.616 I$** .

A la valeur du courant maximal permanent de 35 A, la valeur de K_v n'est plus que 811 tours/minutes, environ 80% de la valeur initiale.

Sans en faire une règle générale, on constate pour plusieurs moteurs que les mesures conduisent à une valeur du K_v aux courants forts, (voisins des courants maxima préconisés par les constructeurs), qui n'est plus qu'aux environs de 80% de la valeur spécifiée pour K_v .

C'est cette dernière valeur de K_v , réduite en fonction du courant, qui permet de faire les meilleures prévisions, aussi bien dans les calculs préconisés pour choisir sa motorisation que dans le dernier fichier Excel : **Tension_Moteur_Helice.xls** précédemment cité.