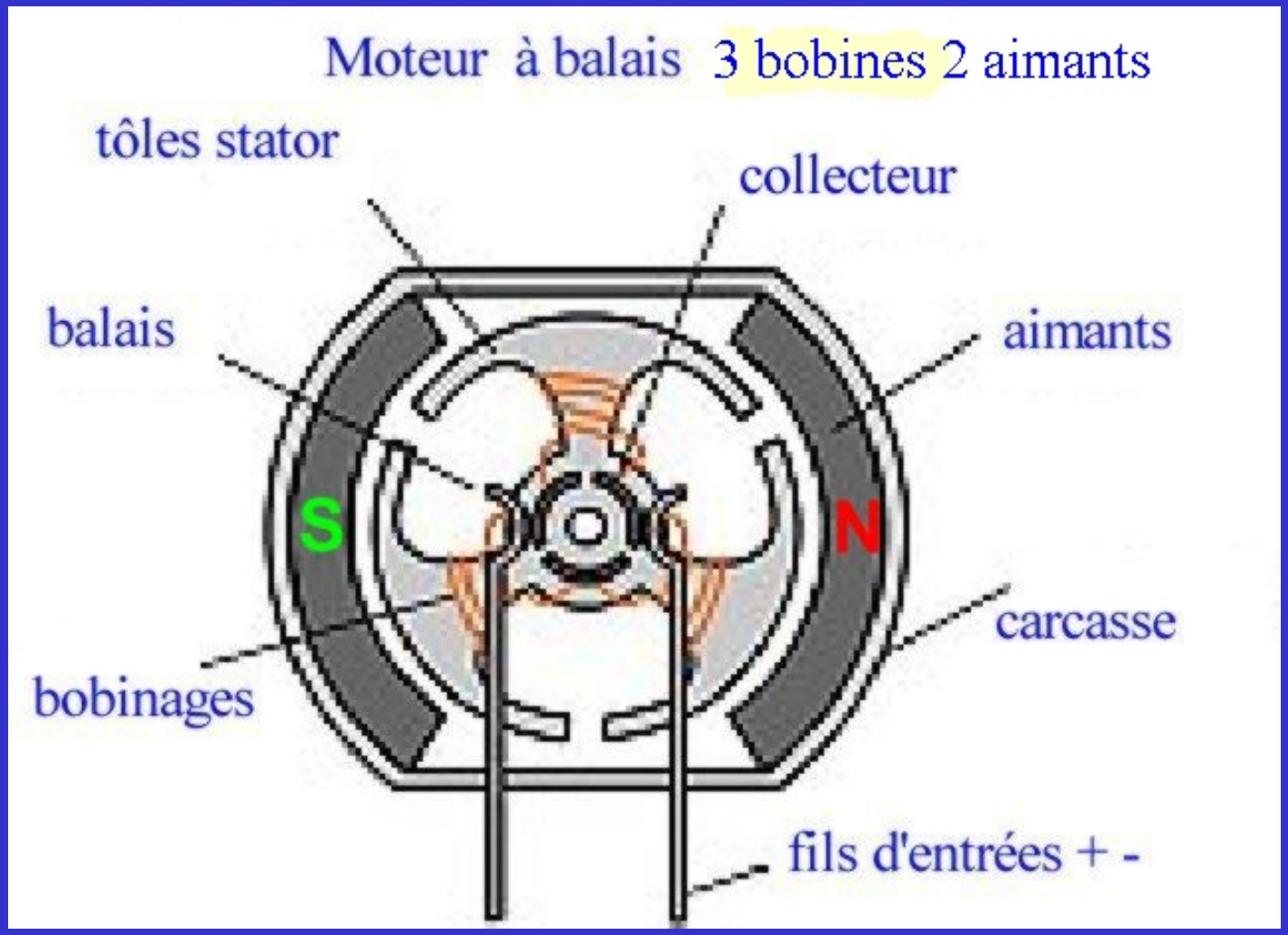
CONNAISSANCE DU MONDE DU BRUSHLESS

Louis FOURDAN Wissous Modélisme
(janvier 2005)

UN DINOSAURE



BRUSHLESS (contre BRUSHED)

- Pas de balais ni de collecteur = MEILLEURE FIABILITÉ (Durée de vie)
- Triphasé (Hexaphasé) = MEILLEUR RENDEMENT (moins d'ondulation de couple)
- Aimants puissants (NdFeB) , roulements à billes
- KITS ou RÉCUPERATION (DIY)

Inconvénient : CONTROLEUR + CHER

FAMILLES BRUSHLESS

- **ROTOR INTERNE (Champ magnétique radial)**

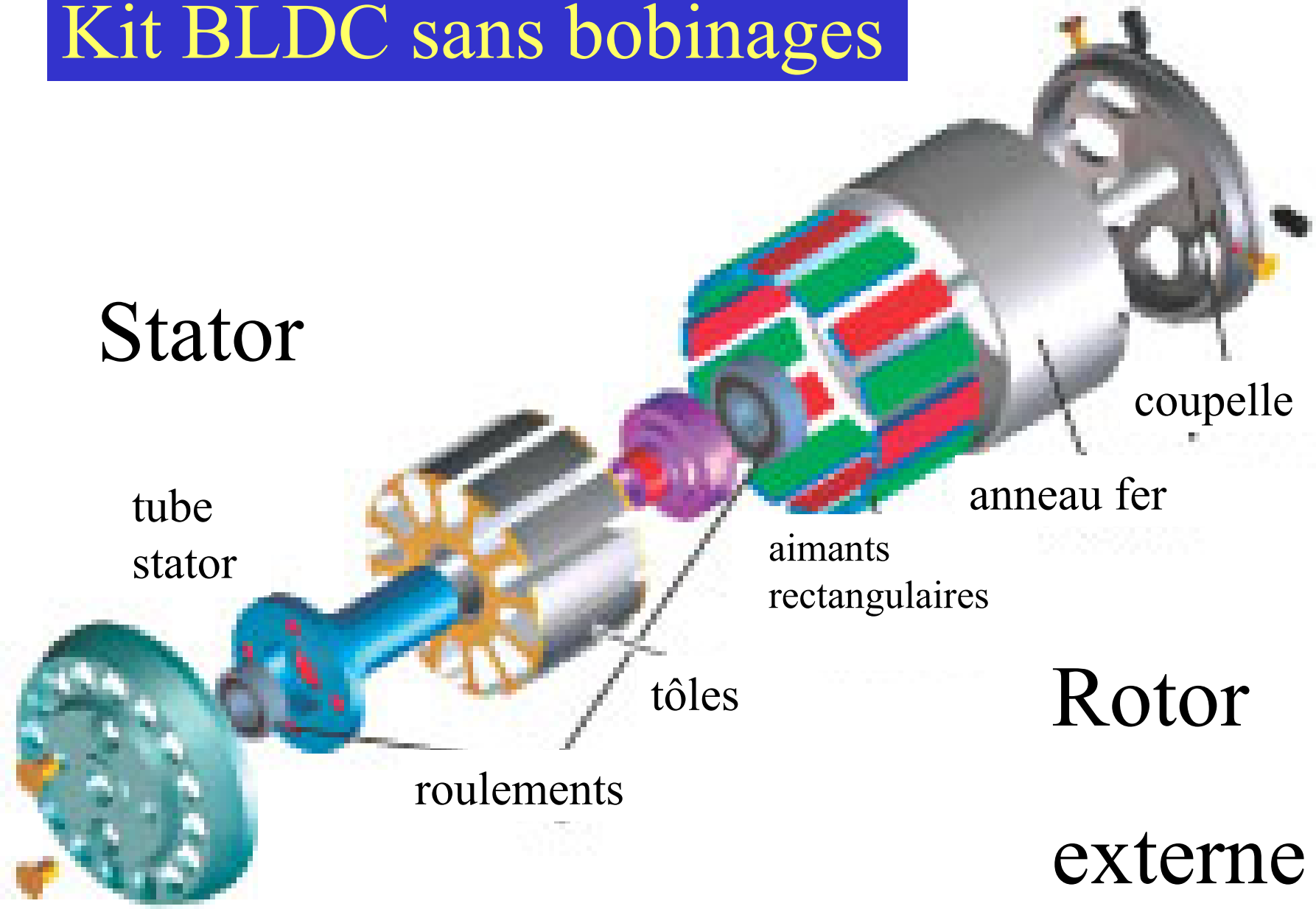
  Inrunner

- **ROTOR EXTERNE (Champ magnétique radial)**

  Outrunner

- **ROTOR DISQUE (Champ magnétique axial)**

Kit BLDC sans bobinages



Inrunner type PLETTENBERG

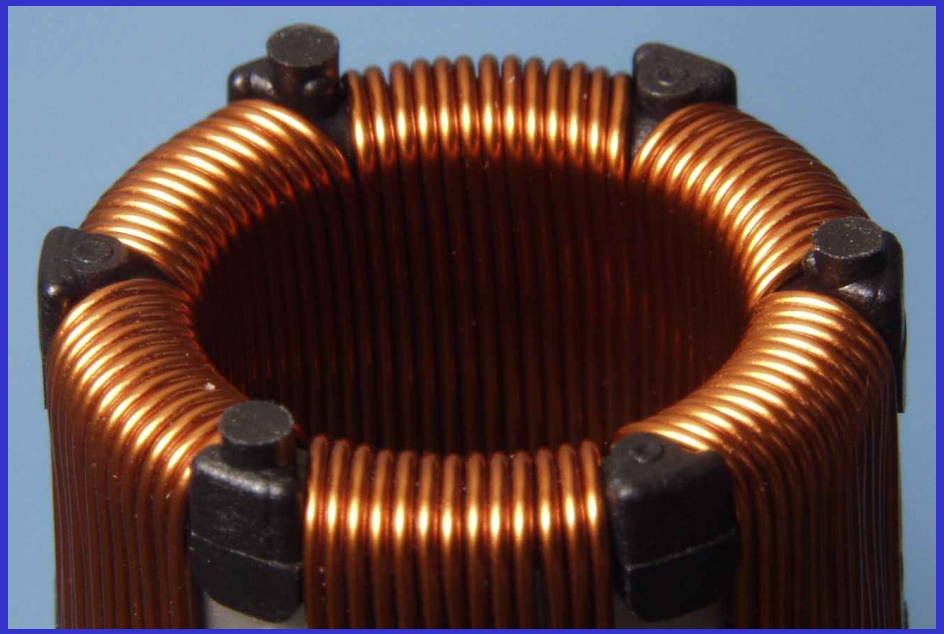
Stator externe 24 encoches

Bobinages en écheveaux

Rotor interne 8 pôles (+fil Kevlar)

(NN-SS-NN-SS-NN-SS-NN-SS-)

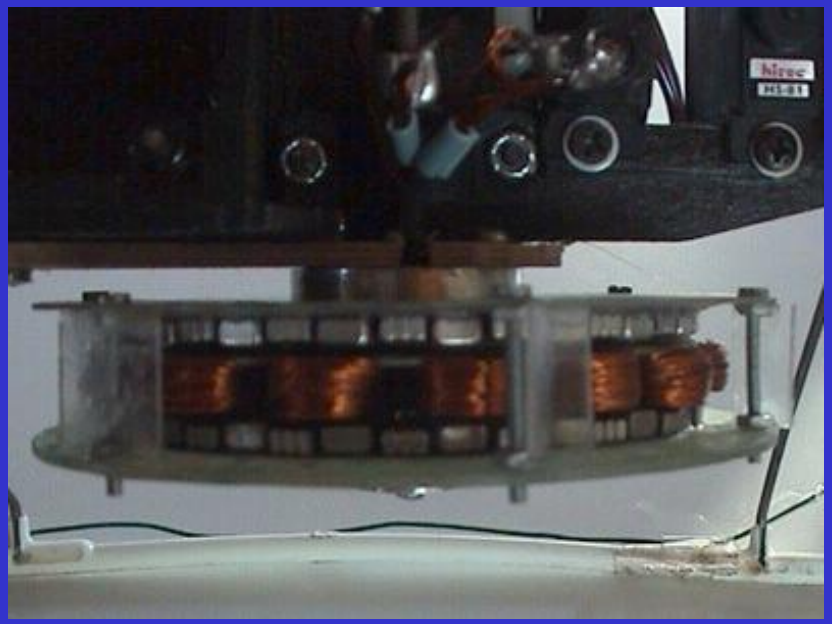
Inrunner type MP-Jet Mk2

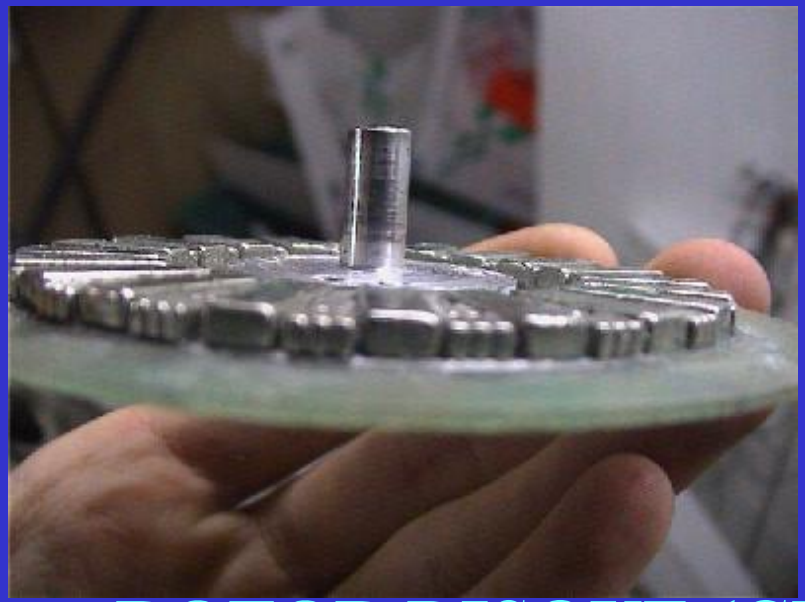


Stator externe

Bobinage toroïdal

Rotors internes monoblocs
NdFeB 2 pôles





ROTOR DISQUE (Champ magnétique axial)

UN PEU DE THÉORIE …

- **<u>FORCE DE LAPLACE (LORENTZ)</u>**

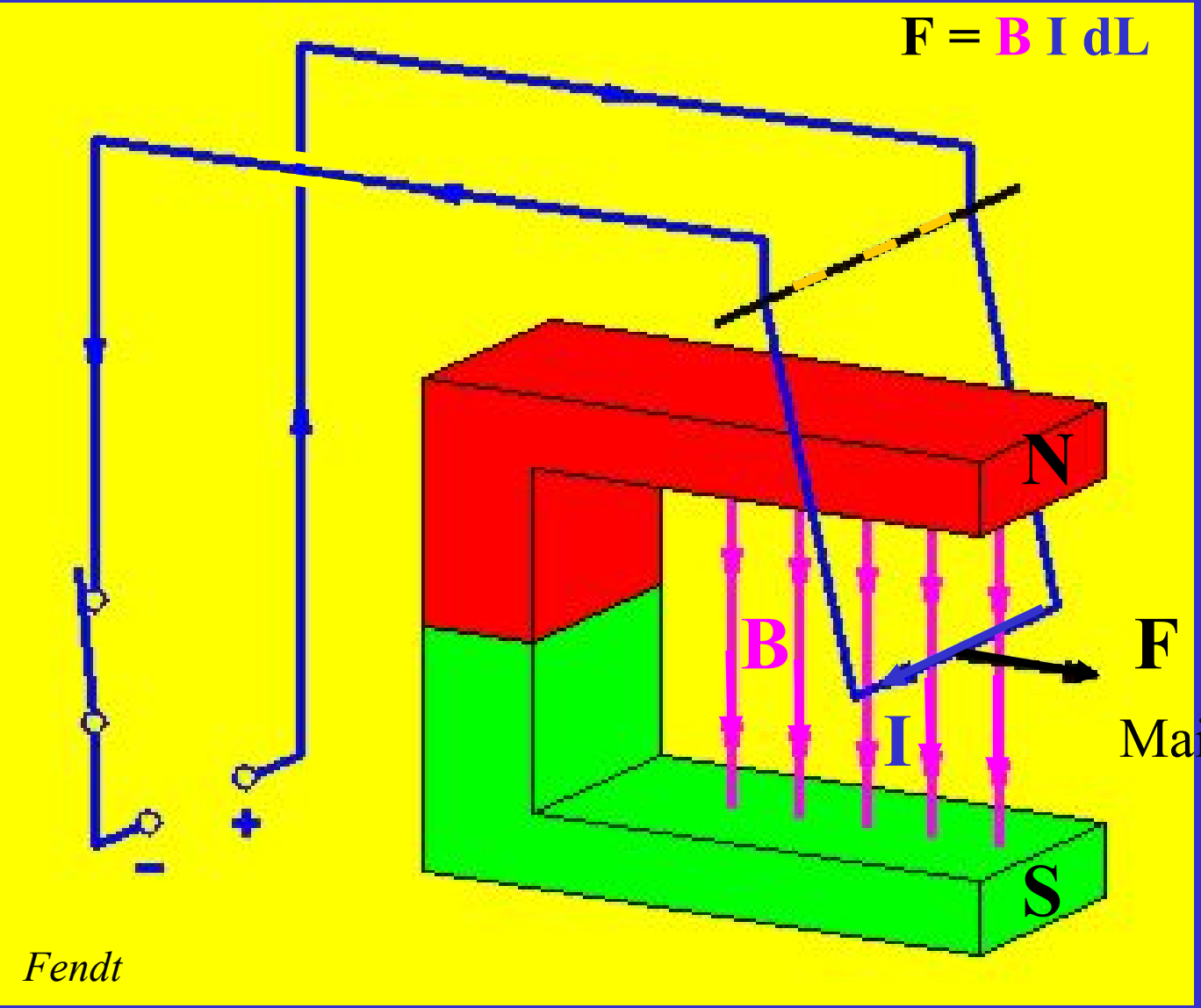
OU

- **INTERACTIONS MAGNÉTIQUES**

Rotor (aimants permanents)

Stator (Champ magnétique « tournant » par commutation d'excitation des bobines, en général triphasée)

FORCE DE LAPLACE (LORENTZ)

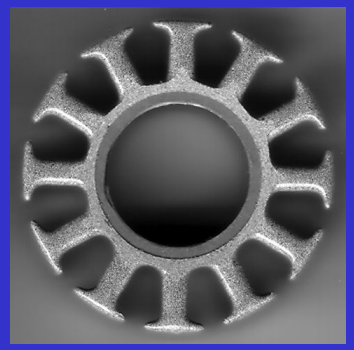


http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/forcelaplace.html

BL à ROTOR EXTERNE

Stator 9 d

- **Moteurs de CD-Rom (9 dents)**



- **LRK Outrunners (12 dents)**

Stator 12 d

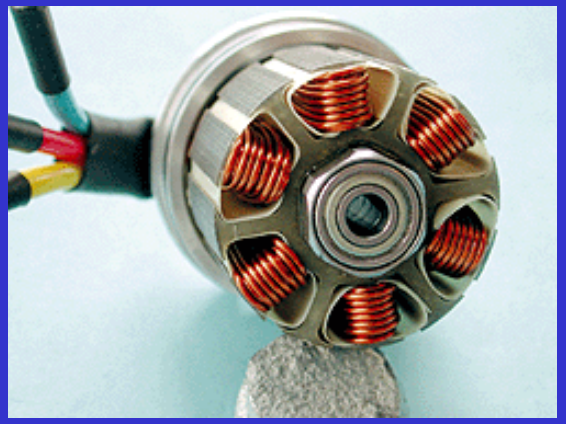
PHYSIQUE STATOR

- **Nombre de dents (teeth) ou encoches (slots)**
- **Diamètre (radial)**
- **Epaisseur (axiale)**

12 dents MFLY

BOBINAGES STATOR

- Nombre de bobines (coils)
- Nombre de tours (windings)
- Diamètre du fil (gauge)
- Etoile ou triangle



LRK 12 dents 6 bobines

DLRK 12 dents 12 bobines

Fil de Litze

Brushless CD-Rom « 9/ 9/ 12 »

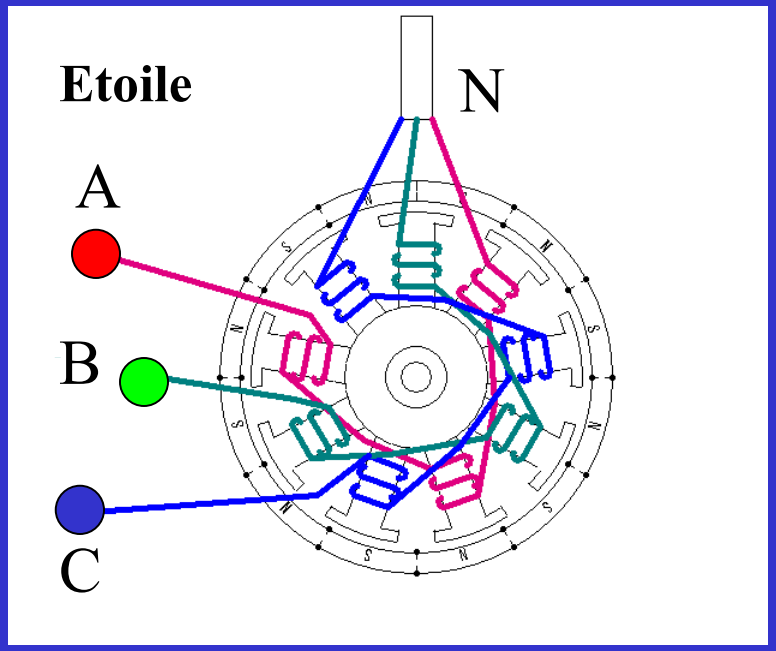
9 encoches 9 bobines 12 pôles magnétiques

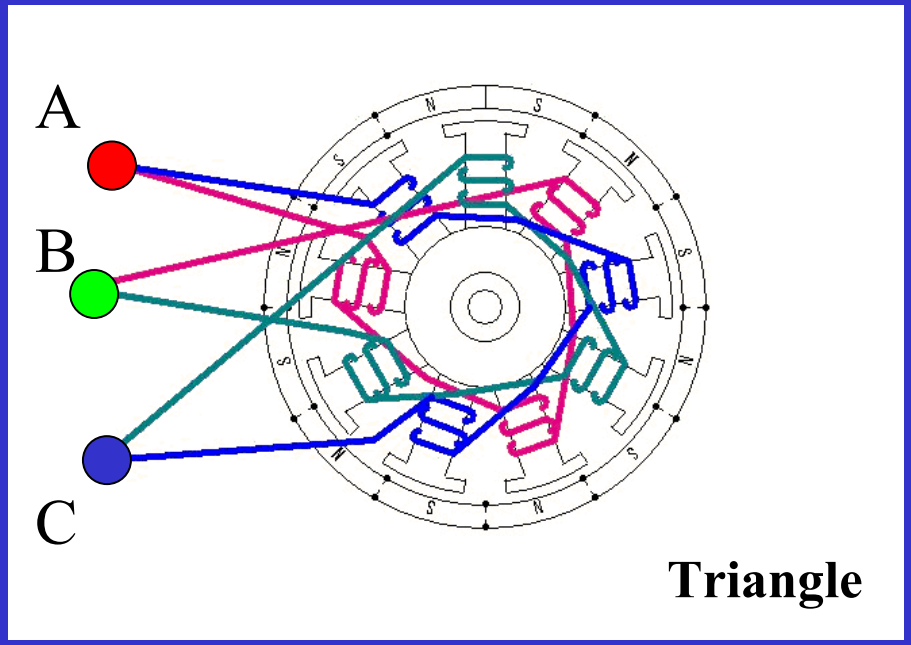
Schéma ABCABCABC

ou abcabcabc

Majuscule = CW (sens horloge)

minuscule = CCW (anti-horaire)





Brushless LRK 12/6/10P 12/6/14P

12 encoches 6 bobines 10 ou 14 pôles magnétiques

Schéma A-b-C-a-B-c-

Majuscule = CW (sens horloge)

minuscule = CCW (anti-horaire)

— = vide

Brushless DLRK 12/12/14P

12 encoches 12 bobines 14 pôles magnétiques

Schéma AabBCcaABbcC

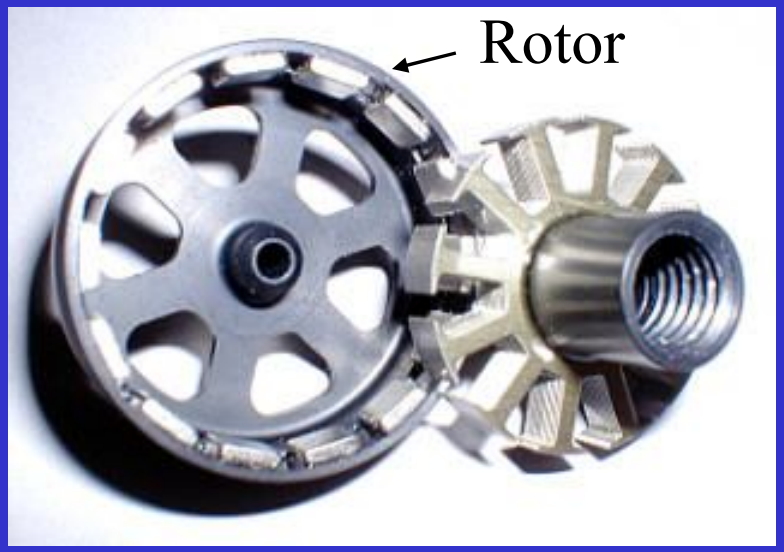
Majuscule = CW (sens horloge)

minuscule = CCW (anti-horaire)

— = vide

PHYSIQUE ROTOR

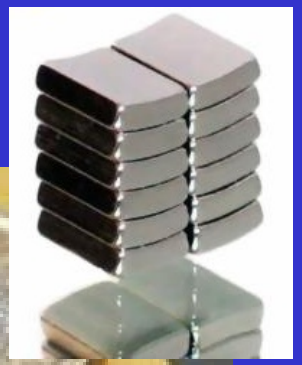
- Nombre de pôles magnétiques (pair)
- Groupes d'aimants / pôle (1 ou +)
- N.S.N.S ou NN.SS.NN.SS etc ..
- Intervalles (gaps)
- Anneau fer (ring)
- Cloche (bell)
- Diamètre, axe



14 aimants N.S.N.S.N.S...

AIMANTS

- Néodyme (NdFeB)
- Poudre frittée + protection Nickel ou Or
- Taille/forme : exemple 10x4x2 mm (plat ou incurvé)
- Grade .. N40, N45, N48, N50
- Magnétisation dans l'épaisseur
- Gamme de température
- www.supermagnete.de



Principales configurations

voir le site www.powerditto.de

N-C-P		
3-3-2	ABC	
3-3-4	ABC	
6-6-4	ABCABC = (ABC)x2	
6-6-8	(ABC)x2	
9-9-6	(ABC)x3	
9-9-8	AaABbBCcC	
9-9-12	(ABC)x3	
12-6-10	A-b-C-a-B-c-	(LRK SPS)
12-6-14	A-b-C-a-B-c-	(LRK SPS)
12-12-8	(ABC)x4	
12-12-10	AabBCcaABbcC	(LRK distributed)
12-12-14	AabBCcaABbcC	(LRK distributed)
15-15-10	(ABC)x5	
18-9-12	(A-B-C-)x3	
18-18-12	(ABC)x6	
24-24-16	(ABC)x8	
30-30-20	(ABC)x10	
36-36-20	(ABCbcaCABabcBCAcab)x2	

Conventions

N = nuts(branches, encoches) C = Coils (bobines) P = Pôles magnétiques

Majuscule = CW Minuscule = CCW

(motif) x n motif répété n fois

Isomorphismes (peut inverser le sens)

Permuter majuscules et minuscules

Echanger 2 lettres, B et C (échanger b et c aussi) etc ..

PRINCIPALES MARQUES

- ELECTRONIC MODEL (seul français)
- MODEL MOTORS (AXI)
- FLYWARE
- TORCMAN
- KONTRONIK
- PLETTENBERG
- MEGA MOTORS
- MP-JET
- ACTRO, ASTROFLIGHT, AVEOX
- MFLY
- FreeAir
- CEMECH
- PJS
- Potensky
- HIMAX
- HYPERION
- FEIGAO , TOWER PRO
- ALIGN

Tchéquie, ↔
Allemagne, ↓
Chine ↑
USA

PRINCIPAUX KITS

- Go-Brushless Efly-Power Slofly
- AirCraft World (Japon)
- Brushless Kit (Allemagne)
- Komodo-Hobby
- Little Screamers
- Strong RC Motors
- Causemann
- Batman
- MicroDan

Du plus petit 5.8 gramme

Jusqu'au plus gros

> 1 kg

PARAMETRES DE BASE

- **Kv** *rpm/V* **coefficient de vitesse**
- **Rm** *ohm* **résistance phase-phase**
- **Io** *A* **courant à vide (@ tension V)**
- **dIo / dV** **pente de Io fonction de V**
- **(Kt** *mNm/A***)** **coefficient de couple**
- **Produit Kv Kt = CONSTANTE (environ 9500)**

REGLE DE BASE N° 1 (Kv)

Plus le Kv (rpm/V) est petit, plus il y a de couple/A

Pour avoir du couple/A et moins de vitesse par volt :

- **Plus de tours par encoche (mais fil plus fin)**
- **Connexion Etoile**
- **Augmenter la force(volume) des aimants**
- **Augmenter le diamètre, la longueur axiale**
- **Choisir une bonne configuration (plus d'encoches)**
- **Tendance : Outrunner**

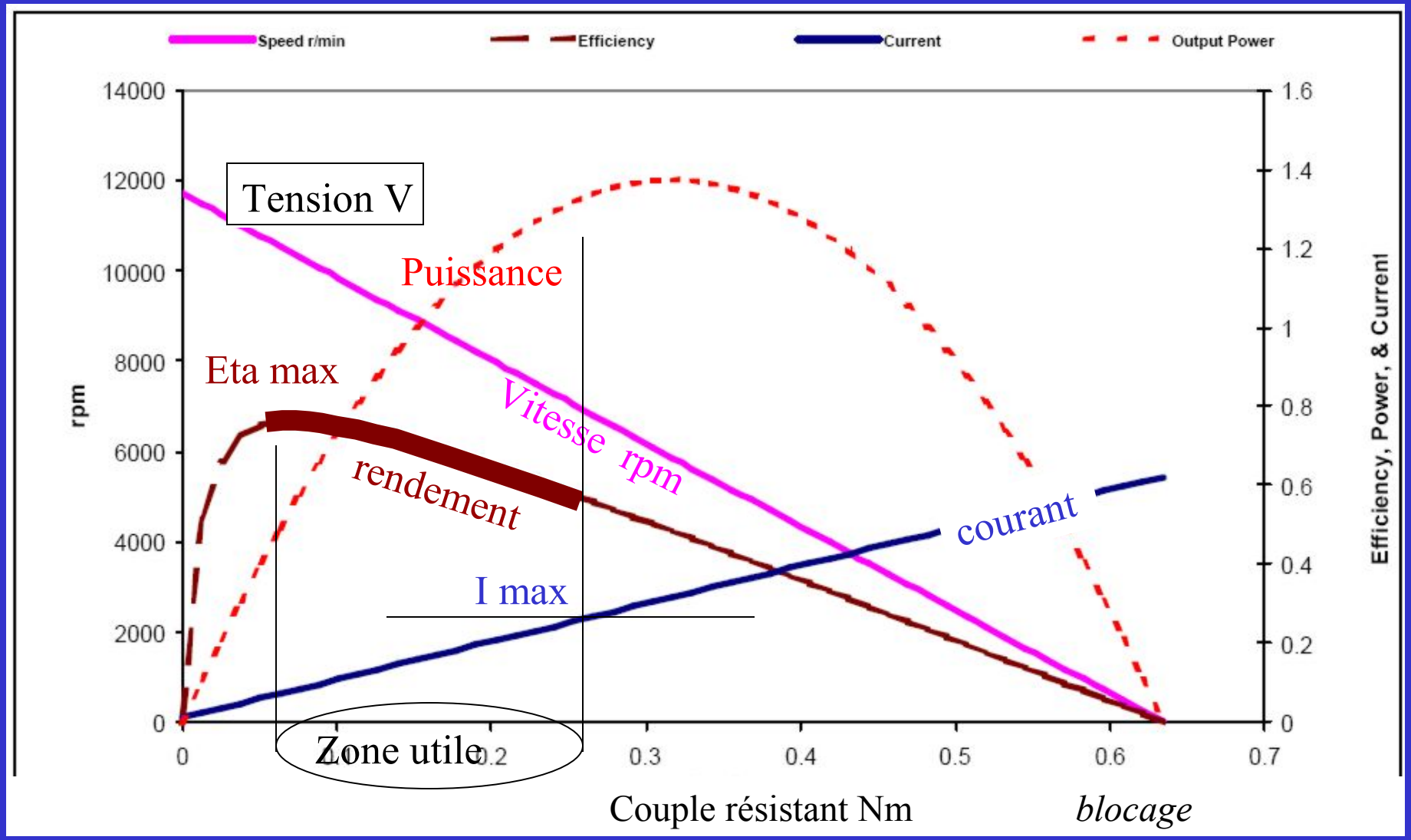
REGLE DE BASE N° 1bis (Kv)

Plus le Kv (rpm/V) est grand, moins il y a de couple/A

Pour avoir plus de vitesse par volt :

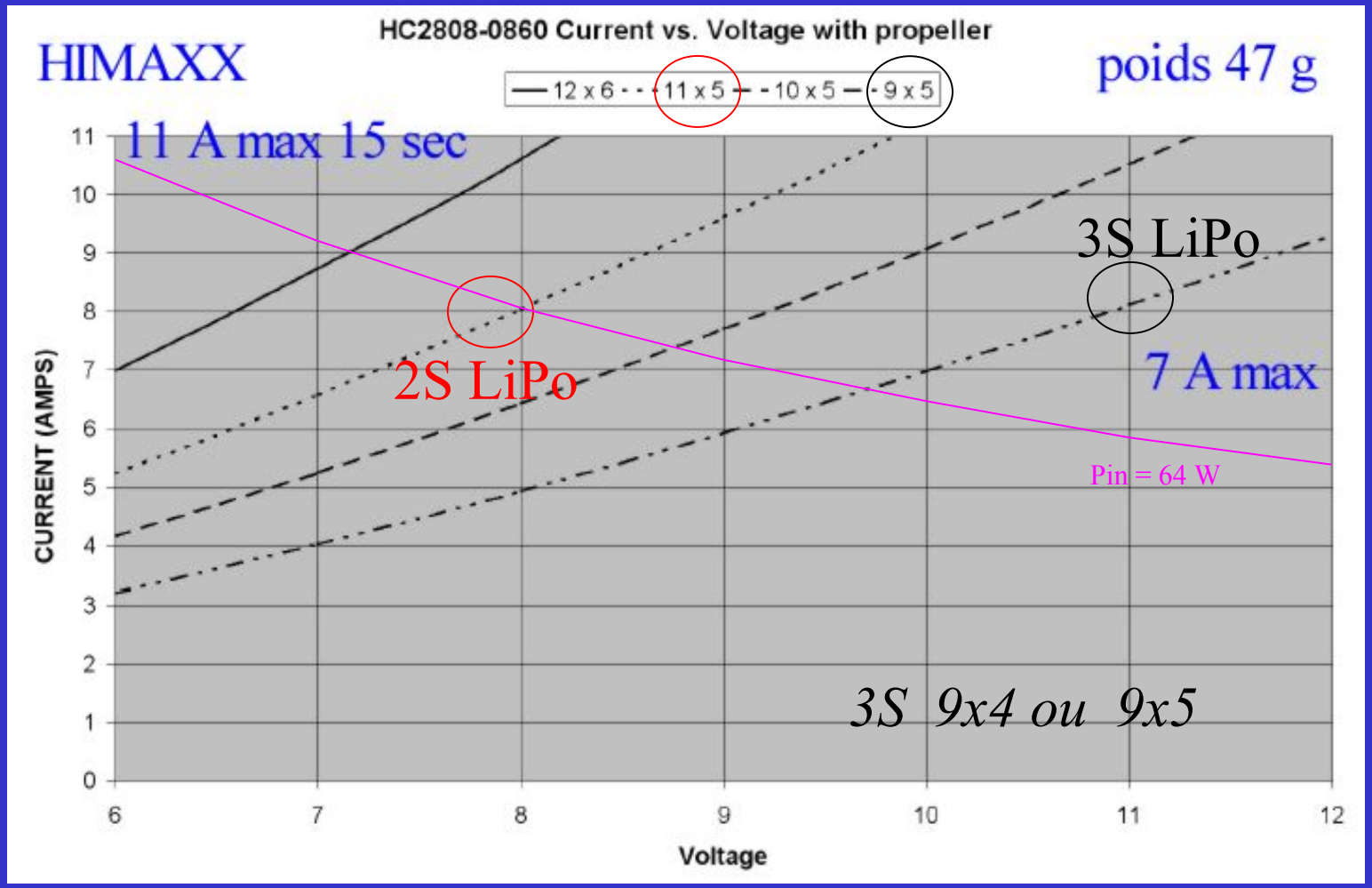
- **Moins de tours par encoche (mais fil plus gros)**
- **Connexion Delta**
- **Diminuer la couverture des aimants**
- **Diminuer le diamètre, la longueur axiale**
- **Choisir une bonne configuration (moins de pôles)**
- **Tendance : Inrunner**

Point de fonctionnement (couple ou courant I)



REGLE DE BASE N° 2

Adapter la charge au courant « adequat »



REGLE N°3

- **Essai de température T°C**
- **Sur table, avec l'hélice .. Observer**

  et la consommation I (ampères)

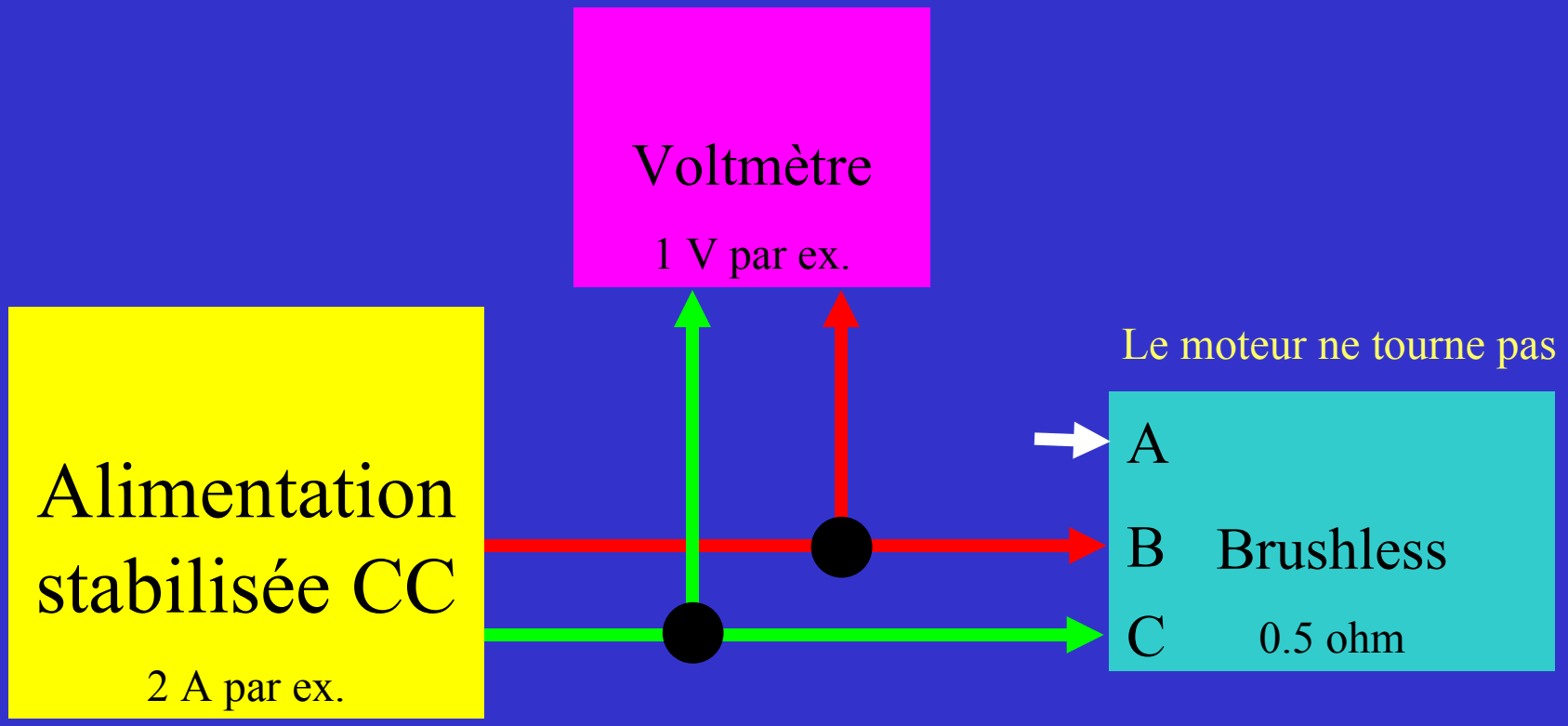
T°C

- **Sachant qu'en vol ce sera moins dur**

  (sauf « cochon pendu » maintenu)

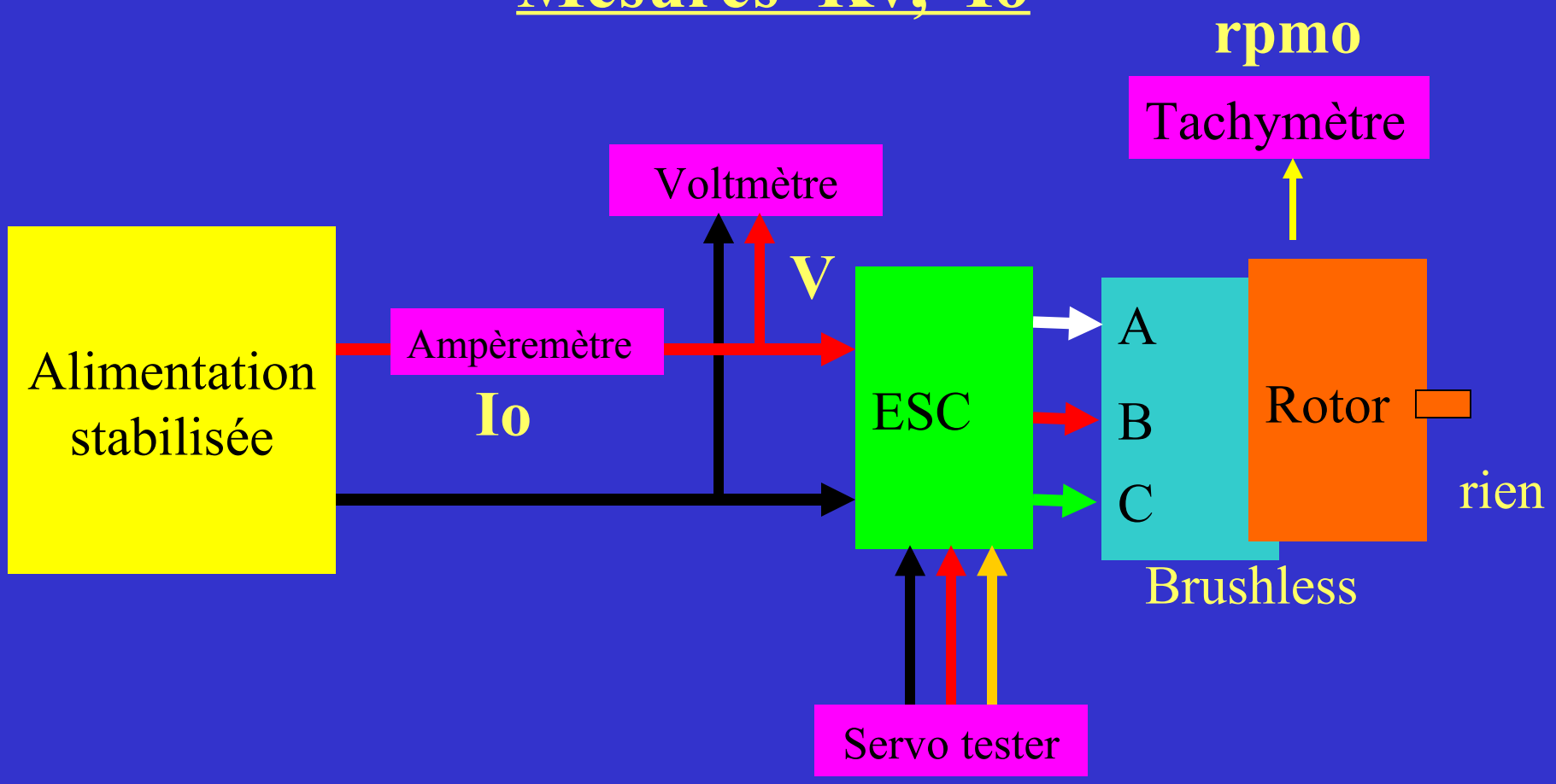
Mesures Rm (résistance interne)

(Loi d'ohm)



⚠ Minimiser les résistances de contact !!

Mesures Kv, Io



On mesure Io et rpmo à vide f (V)

Mesures Kv, Io à vide

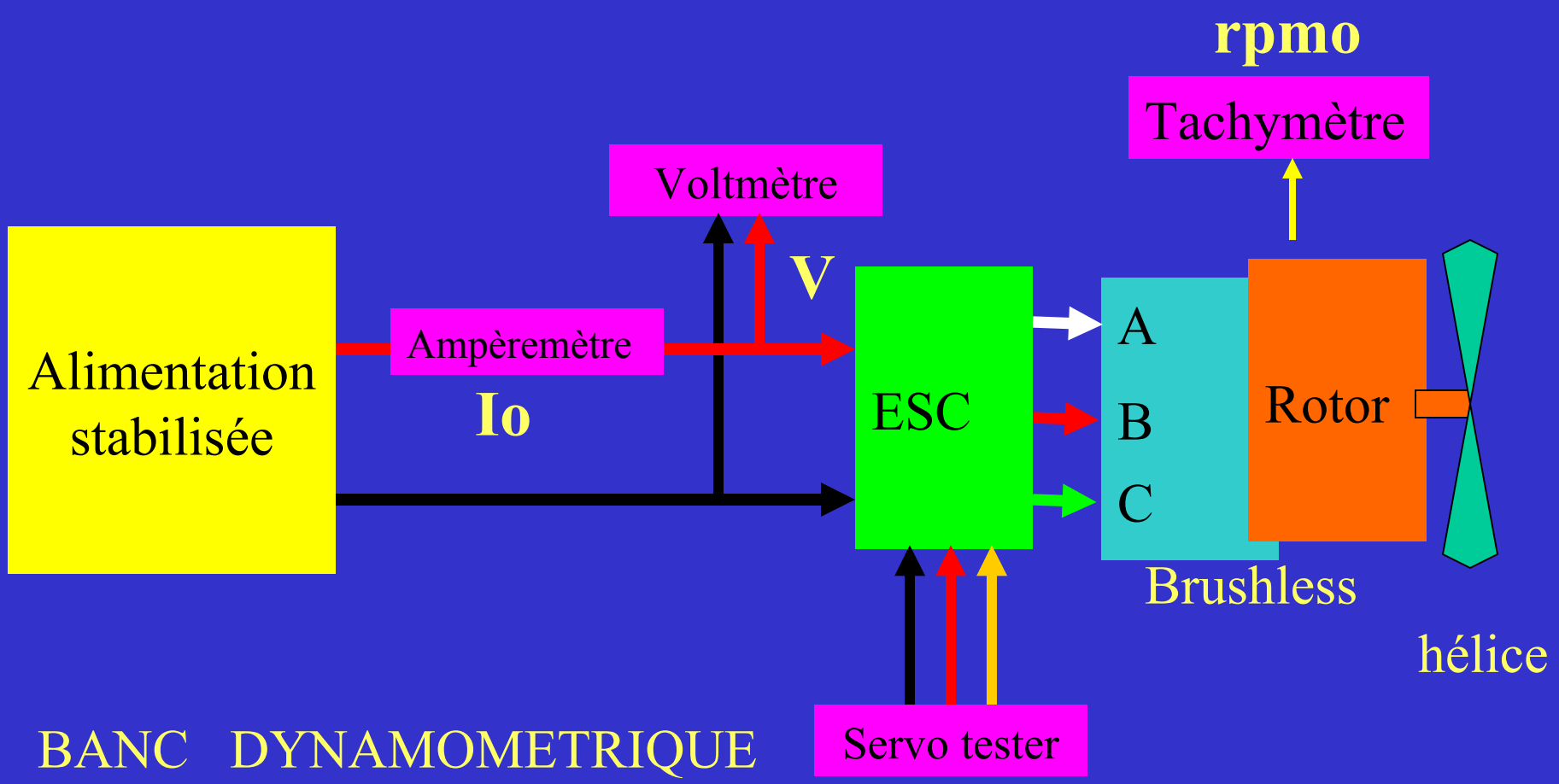
- **Tableau Io et rpmo @ V de 8 à 12 V**
- **Kv = rpmo / (V – Rm Io)**

alim	Io	rpmo	Kv	Eta max	I Eta max
V	A		rpm/V	%	A
8	0.210	3680	471	71.6	1.366
9					
10	0.240	4600	470	72.8	1.633
11					
12	0.260	5520	469	74	1.862

Rm = 0.9 ohm EXCEL (pratique) ou logiciel dédié

Noter que Io augmente avec V, ainsi que le rendement

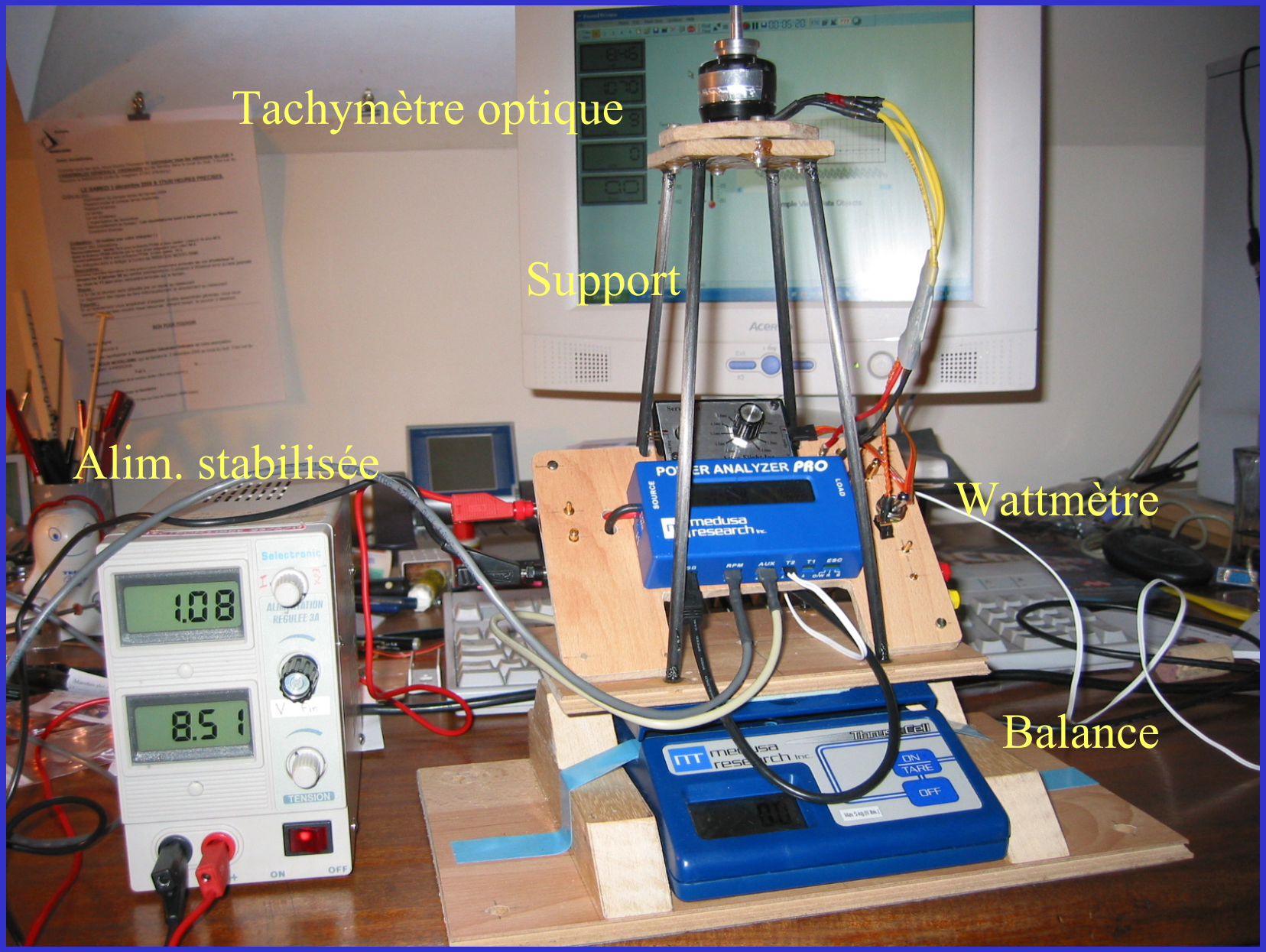
Mesures sur hélices



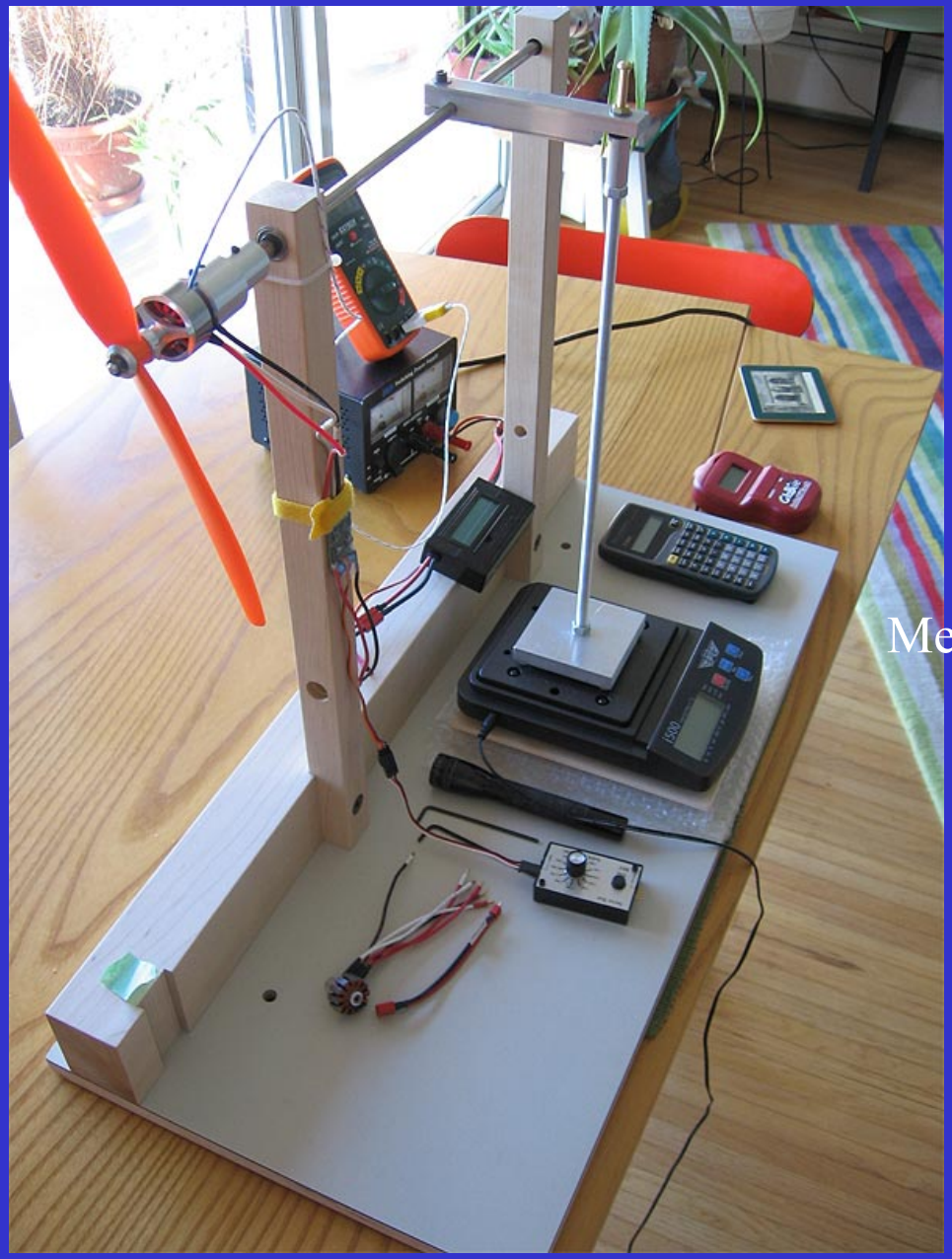
BANC DYNAMOMETRIQUE

@V conso (A) , vitesse(rpm) , traction statique(gf) , rendement

BANC « Medusa Research» – liaison PC



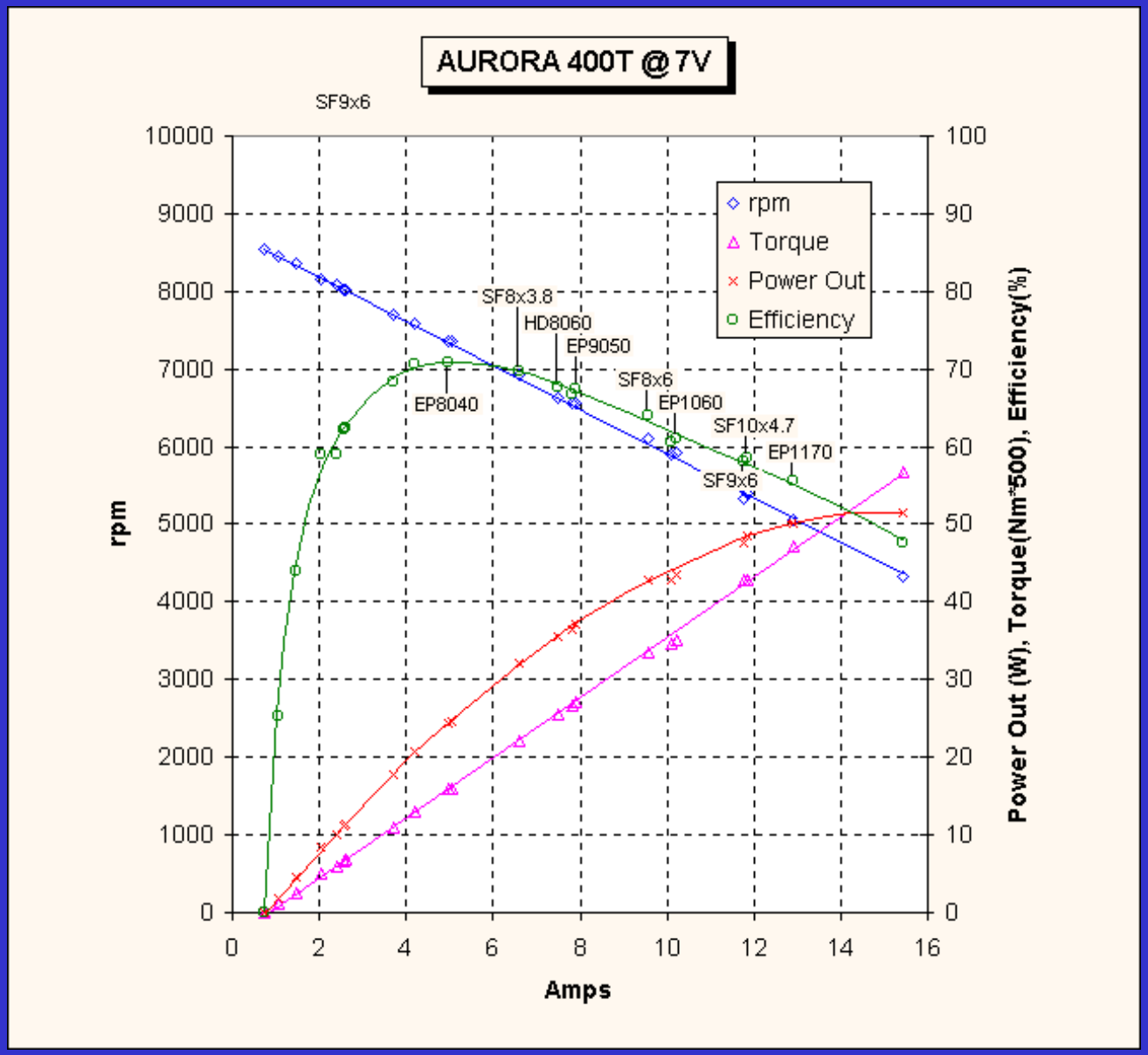
BANC DYNAMOMETRIQUE



Mesure du couple sur boîtier moteur

monté flottant sur roulements

COURBES PRATIQUES (sur hélices)



Il manque juste la traction statique pour chaque hélice

Influences de certains paramètres

<u>Pour baisser le Kv (rpm/V) = augmenter le couple par ampère</u>

2) Augmenter le nombre de tours par encoche

3) Passer de Delta à Etoile

3) Augmenter la force, l'épaisseur, la largeur des aimants

4) Augmenter la longueur axiale du stator (et les aimants)

5) Adopter une configuration avec plus d'encoches

6) Augmenter le diamètre du stator

<u>Pour augmenter la « puissance » du moteur</u>

9) Augmenter la taille et le poids du moteur

10) Utiliser le fil le plus gros possible

Paramètres d'un kit brushless

Pour un kit donné (stator , rotor et aimants)

Le produit KW = (Kv * nb de tours) est pratiquement constant

Le nombre de tours va en conjugaison avec un diamètre de fil adapté (en rapport avec la surface d'encoche)

Exemple Komodo Hobby KH 283 v2:

KH-283 Outrunner Motor Kit Version 2							
Turns	6	7	8	9	10	11	12
Komodo Wire	22guage	22guage	22guage	23guage	23guage	23guage	23guage
Strand(s)	One	One	One	One	One	One	One
Configuration	Wye	Wye	Wye	Wye	Wye	Wye	Wye
Kv	1296	1122	1005	912	823	750	694
Internal Resistance (Ω)	0.0718	0.0817	0.0941	0.1284	0.1433	0.1604	0.1755
No Load Current / 8V	1.7A	1.4A	1.2A	0.9A	0.7A	0.7A	0.6A
No Load Current/ 10V	2A	1.6A	1.3A	1.1A	0.9A	0.8A	0.7A
Weight Back Mount Style	2.18oz 62g	2.24oz 63.5g	2.26oz 64g	2.22oz 63g	2.22oz 63g	2.28oz 65g	2.28oz 65g
Weight Stick Style	2.03oz 57.5g	2.08oz 59g	2.10oz 59.5g	2.06oz 58.5g	2.06oz 58.5g	2.13oz 60.5g	2.13oz 60.5g

Simulation

- **MOTOCALC (brushed et brushless)**
  - **Complet (Batterie, Motorisation, Avion)**
  - **Version complete 1 mois gratuit**
  - **35 US $**

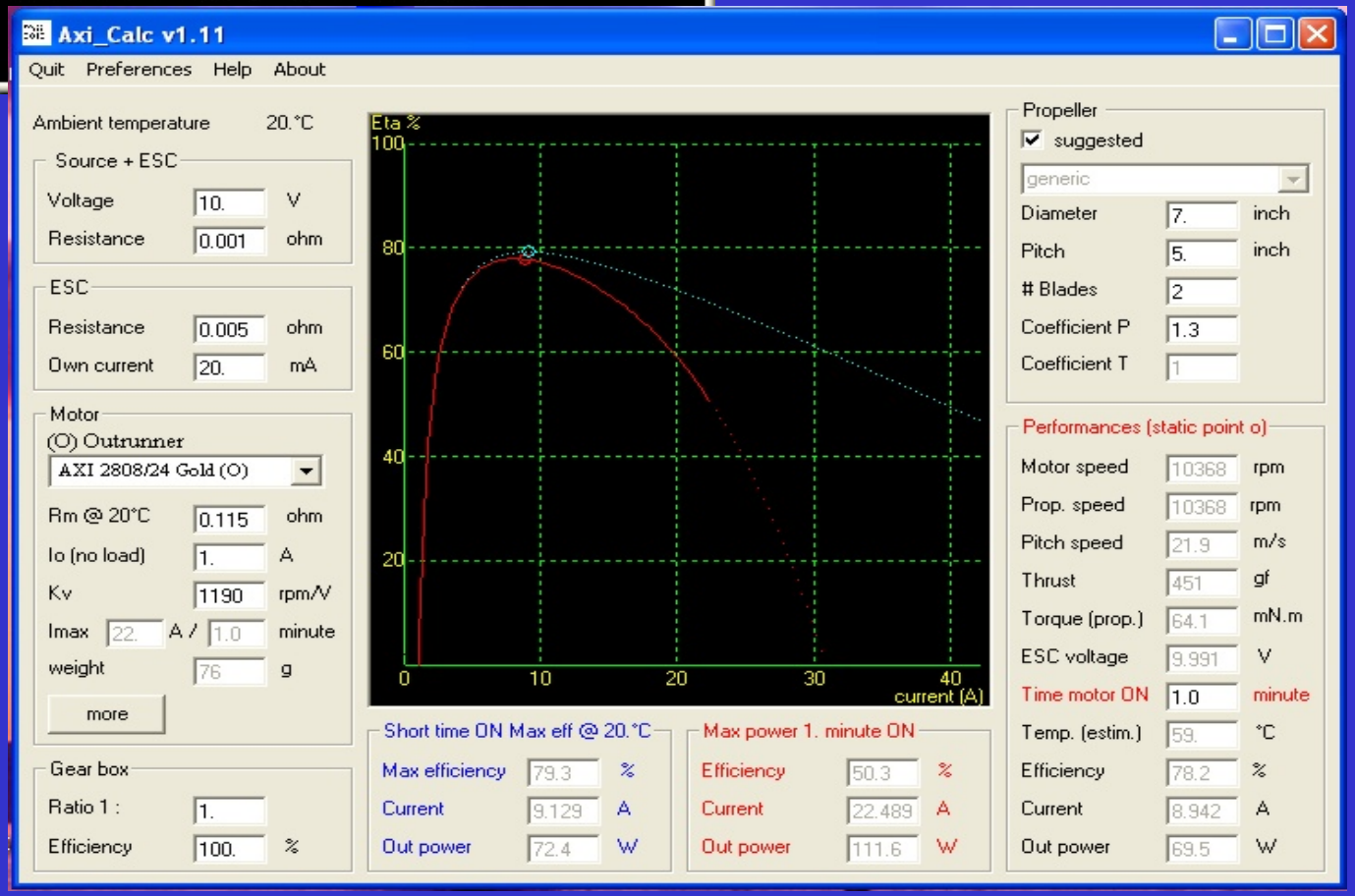
- **Perso**

Gratuits !!

```
G:\APPLIC~1\VB6app\RCmodels\ASTROBOB.EXE
SIMULATION D'UNE MOTORISATION d'AVION RC (non compatible Win XP)
Auteur louis.fourdan@wanadoo.fr

ENTRER LE DIAMETRE EN POUCES [exemple  8.0]
? 9
ENTRER LE PAS EN POUCES [exemple  5.0]
? 6
ENTRER LA VITESSE DE ROTATION rpm tour/min  [exemple  5000]
? 4500
ENTRER LA TENSION D'ALIMENTATION (volt) facultatif? 10
ENTRER LE COURANT CONSOMME (ampère) facultatif? 2

Simulation
Puissance consommée =   20.0 W
Hélice  9 *  6 pouces
Vitesse =  4500 rpm
K = coefficient d'hélice (Bob BOUCHER)
P(uissance hélice watt), Eta(rendement), T(raction) et Vitesse max
K = 1.10  P =   15.9 W Eta =   79.3 % T =  141 g  Vm =  11.4 m/s
K = 1.30  P =   18.7 W Eta =   93.7 % T =  167 g  Vm =  11.4 m/s
K = 1.60  P =   23.1 W Eta =  115.3 % T =  206 g  Vm =  11.4 m/s
Continue (any) or Quit (Q)?
```



Microsoft Excel - AntriebsrechnerV22_011.xls

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?

Drive calculator

Version 2.2, data base 011

Deutsch English

© Helmut Schenk 2/2004, Christian Persson 10/2005

New Version download from elektromodellflug.de

Discussion and mailing list at Yahoo

This tool determines the characteristics of an electric motor from a few measured data points and computes the operating point for the selected propeller.

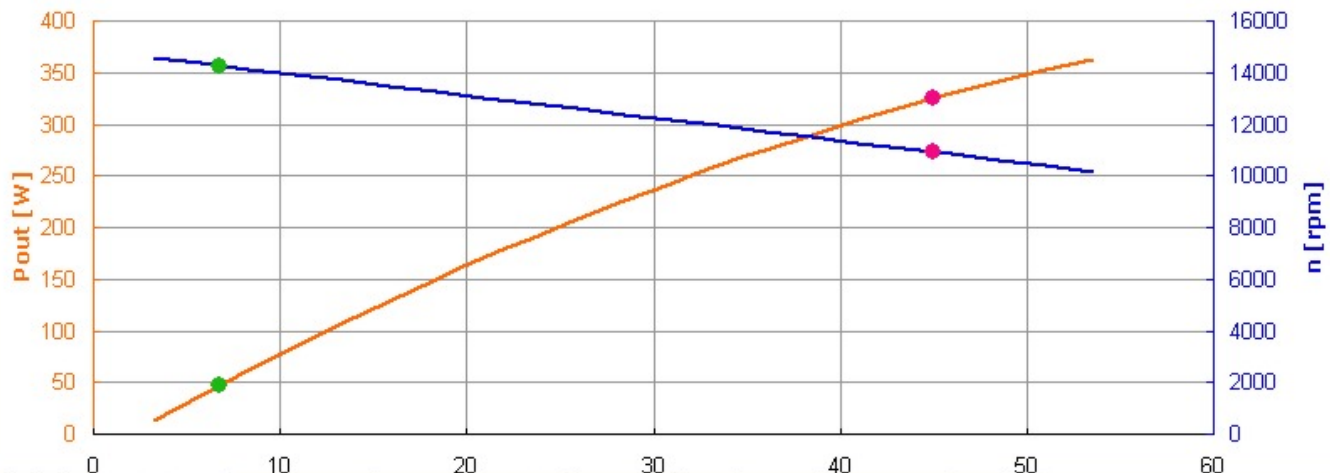
AXI 2814-12

Help

KD-Modelltechnik (GeGi Prüfst.) 105 g

	U [V]	I [A]	n [rpm]	I-Diff.
Unloaded 1	6,97	1,60	10020	1,67%
Unloaded 2	9,00	1,85	13020	
Loaded 1	9,13	14,49	12038	0,09%
Loaded 2	9,08	30,10	10563	-1,28%
Loaded 3	9,03	32,22	10370	1,12%
Motor voltage for calculation [V]			10,20	

	Jazz80	
k_e =	0,66	Ncm/A
R =	60	mOhm
n_{sid} =	1457	rpm/V
ns =	1440	rpm/V
s =	134	rpm/Ncm
Mv0 =	1,30	Ncm
Eta_max =	80,1%	
Imax =	45	A



Calculator / Comparison / Comparison (Pin) / Tools / Motors / Props / Gear boxes

Prêt Calculer NUM

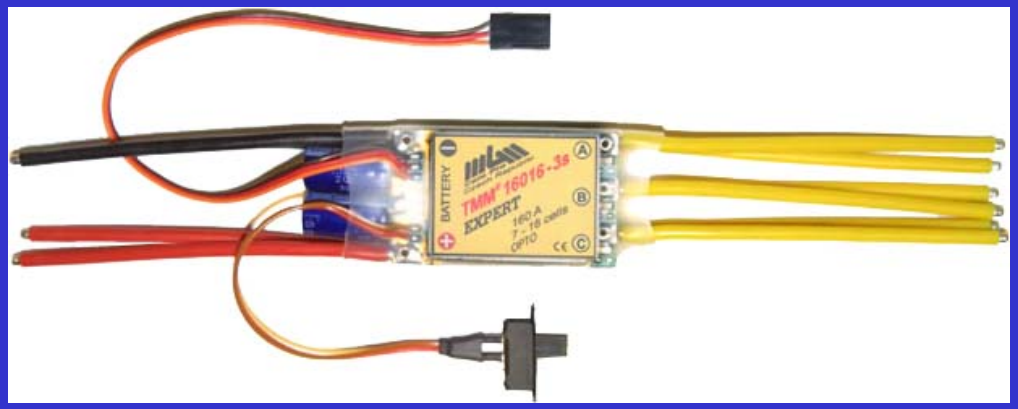
démarrer FR 23:07

Logiciel de configuration Configurator

- Torcman
- Go Brushless
- Perso

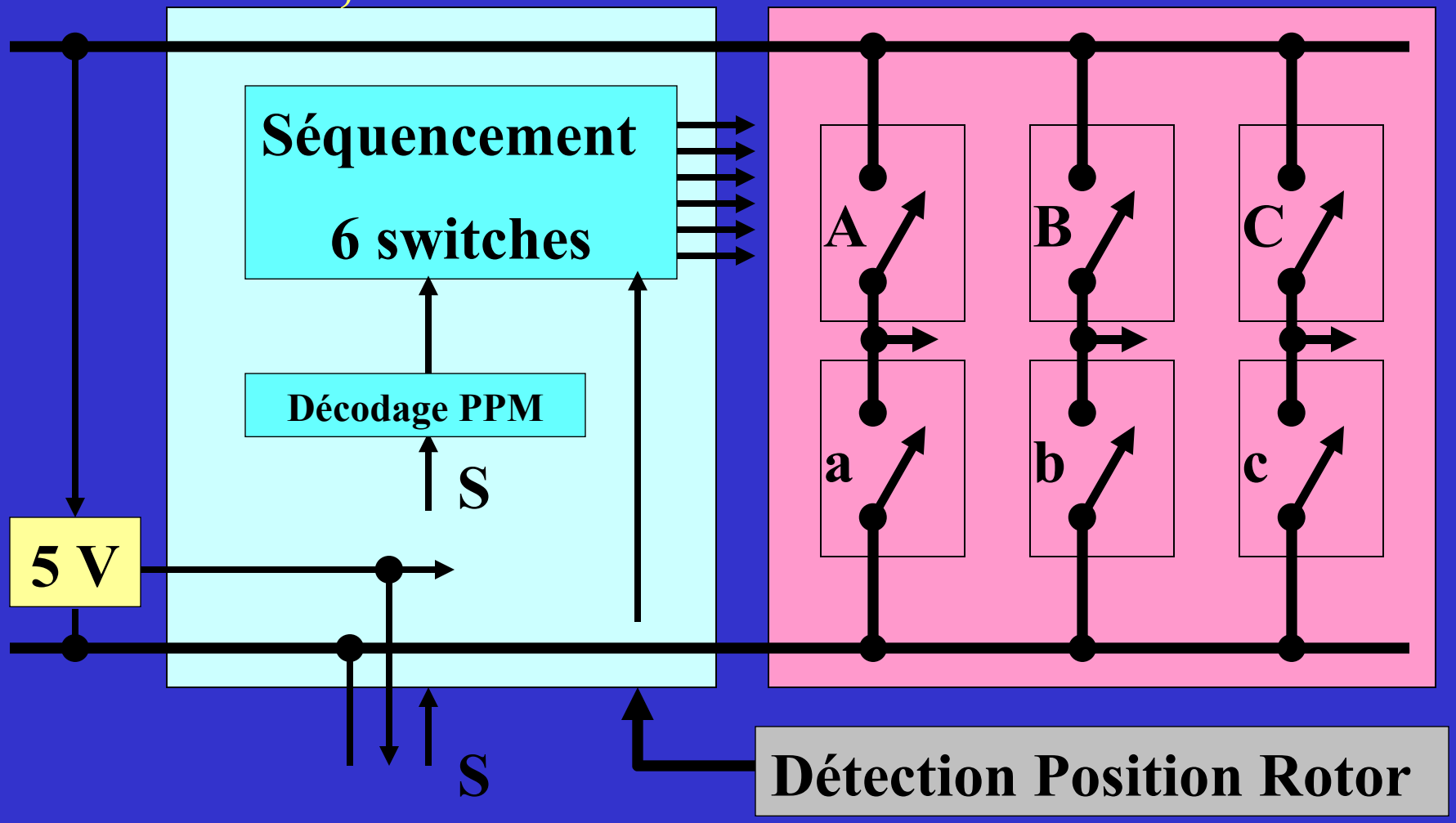
CONTROLEURS DE VITESSE

- Difficile à faire soi-même
- Prix de 30 à 100 euros et +
- MGM-ComPro
- Castle Creation
- Jeti
- TowerPro (Chine)



Programmation USB par câble

ESC



Séquence 6x60° Ab , bC , Ca , aB , Bc , cA

DIY - ESC

- **Frédéric BRAME**

  http://frederic.brame.free.fr/

- **Mattias MISERA & Julian WINGERT**

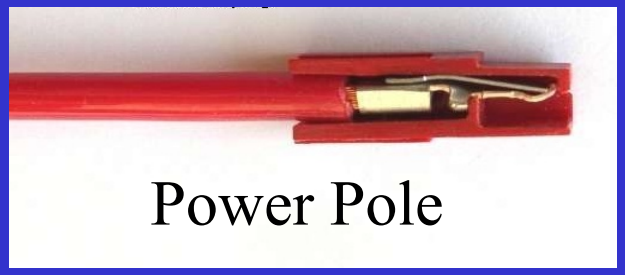
  http://www.bldc.de/

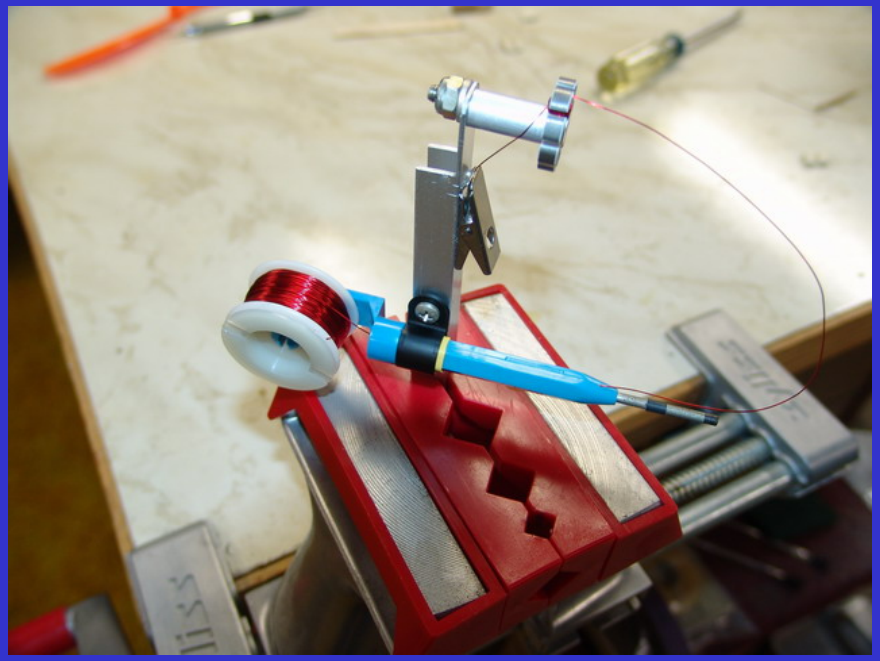
- **Bernhardt KONZE**

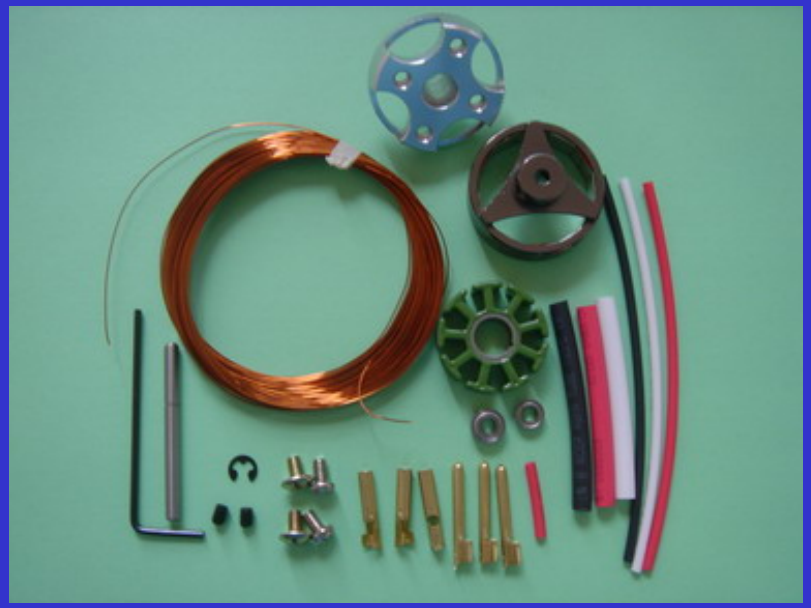
  http://home.versanet.de/~b-konze/

+ Groupes de discussion, forums

Connecteurs







Concept DIY = à faire soi-même

Fil de bobinage (magnet wire)

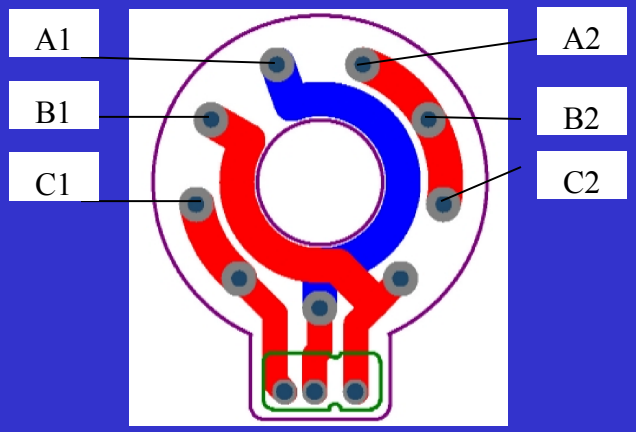
- Fil de cuivre émaillé (en simple, double, triple …)
- ou Fil multibrin sous gaine PA (Litze wire)
- Diamètres : de 0.1 mm à 1.2 mm
- Isolation renforcée Polyester G2
- Gamme de température (200°C)
- La résistivité augmente avec T°C
- http://www.wires.co.uk
- Calculateur http://www.mogami-wire.co.jp/e/cad/wire-gauge.html

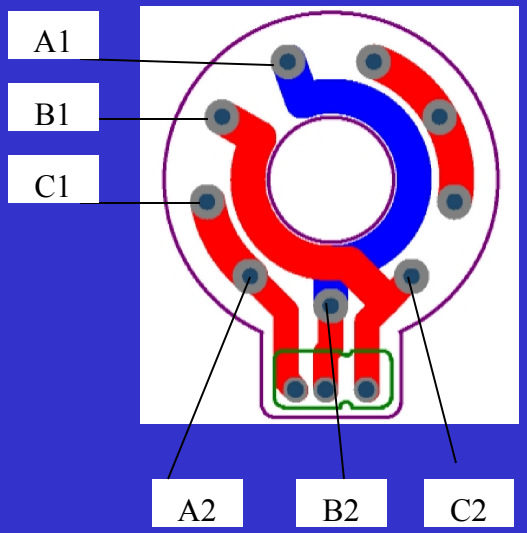
Attention aux courts-circuits / arêtes des tôles

Fil de bobinage (exemple)

- Fil de cuivre émaillé diamètre 0.5 mm AWG 25
- Diamètre + isolation renforcée Polyester G2 0.58 mm
- R = 88 mΩ /m
- section 2 mètres → Ri = 176 mΩ (étoile 352 mΩ)
- Gamme de température (200°C)
- R augmente avec T°C (20% pour delta 50°C)
- http://www.wires.co.uk
- Calculateur http://www.mogami-wire.co.jp/e/cad/wire-gauge.html

PCB de raccordement (kit)



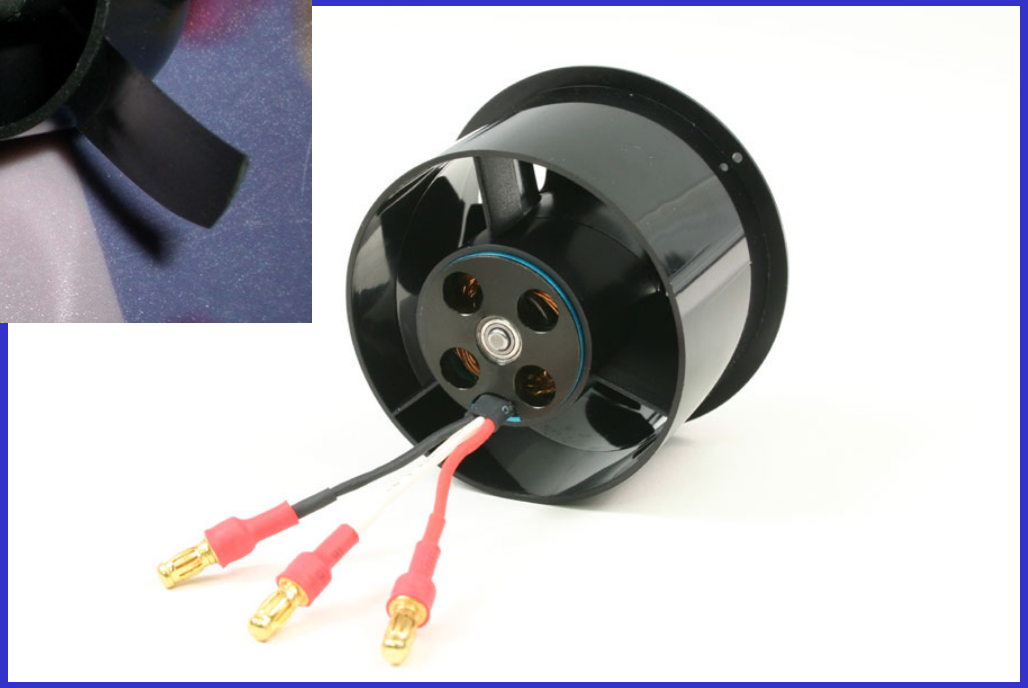


Etoile-Star **Triangle-Delta**

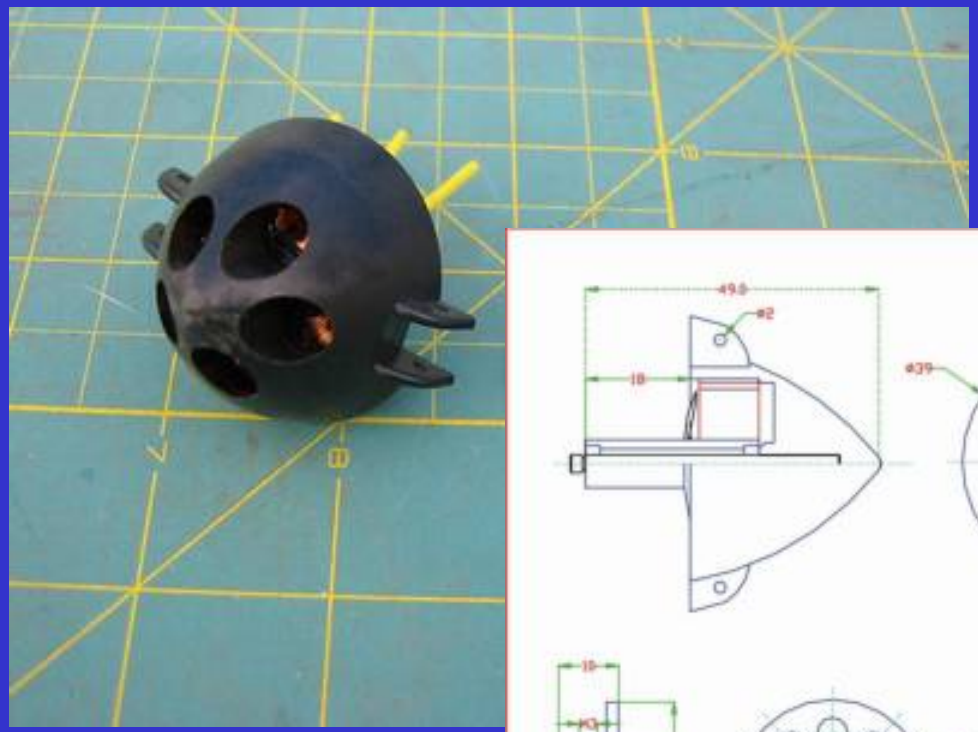
3 pastilles

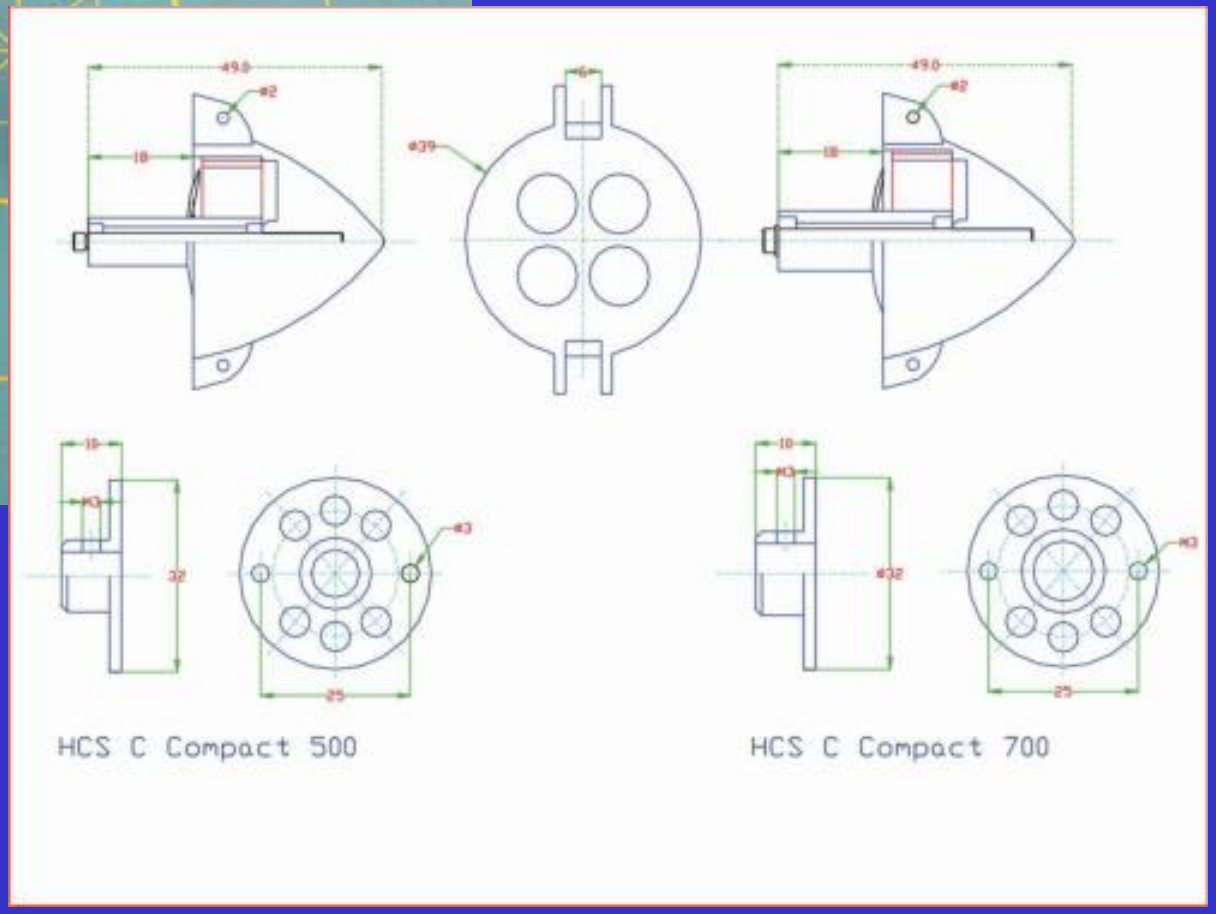
Double stator 9S-9C-6P

Mini turbine brushless



Rotor avec cône intégré



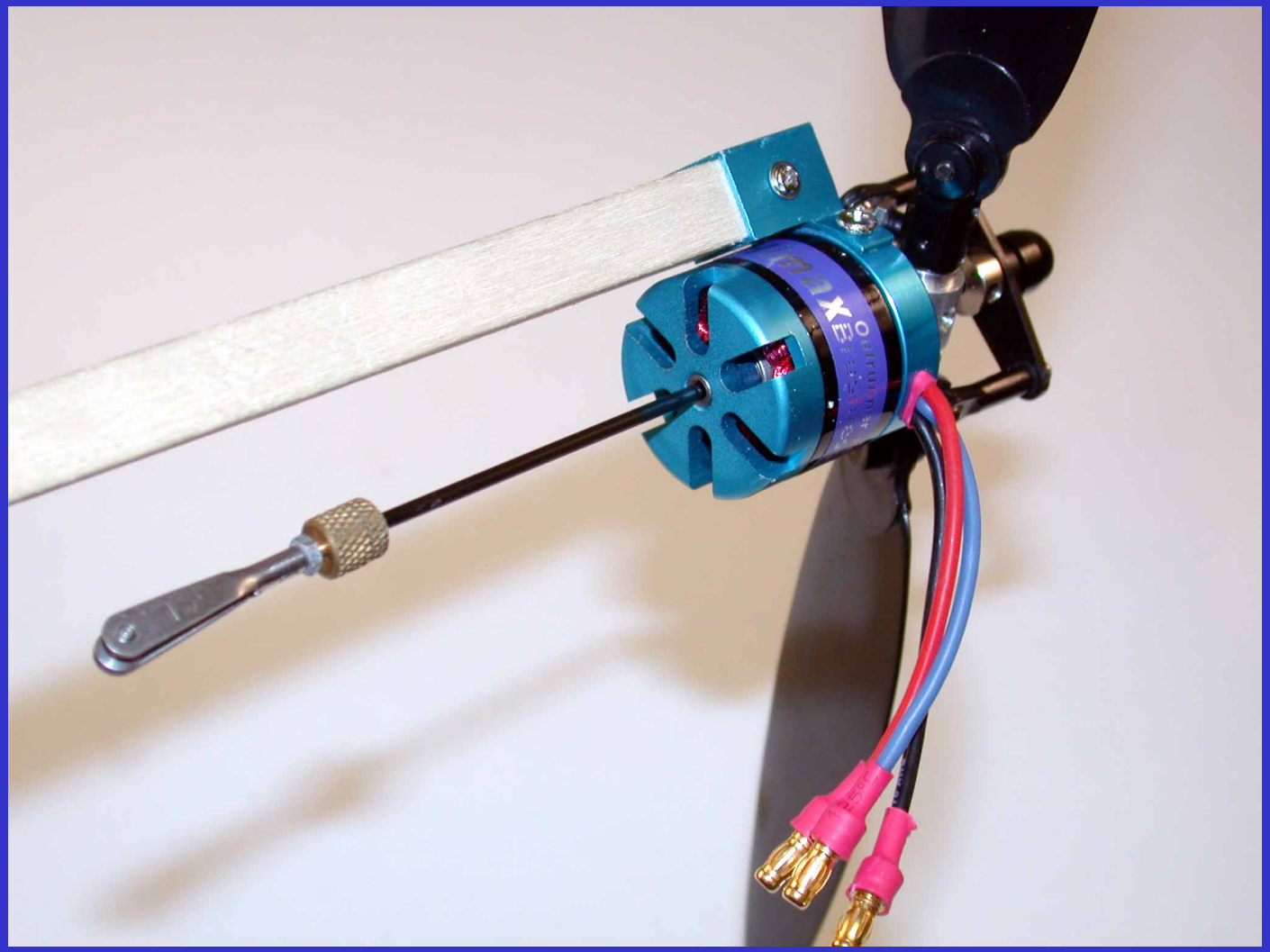


FreeAir

http://www.freeair.cz

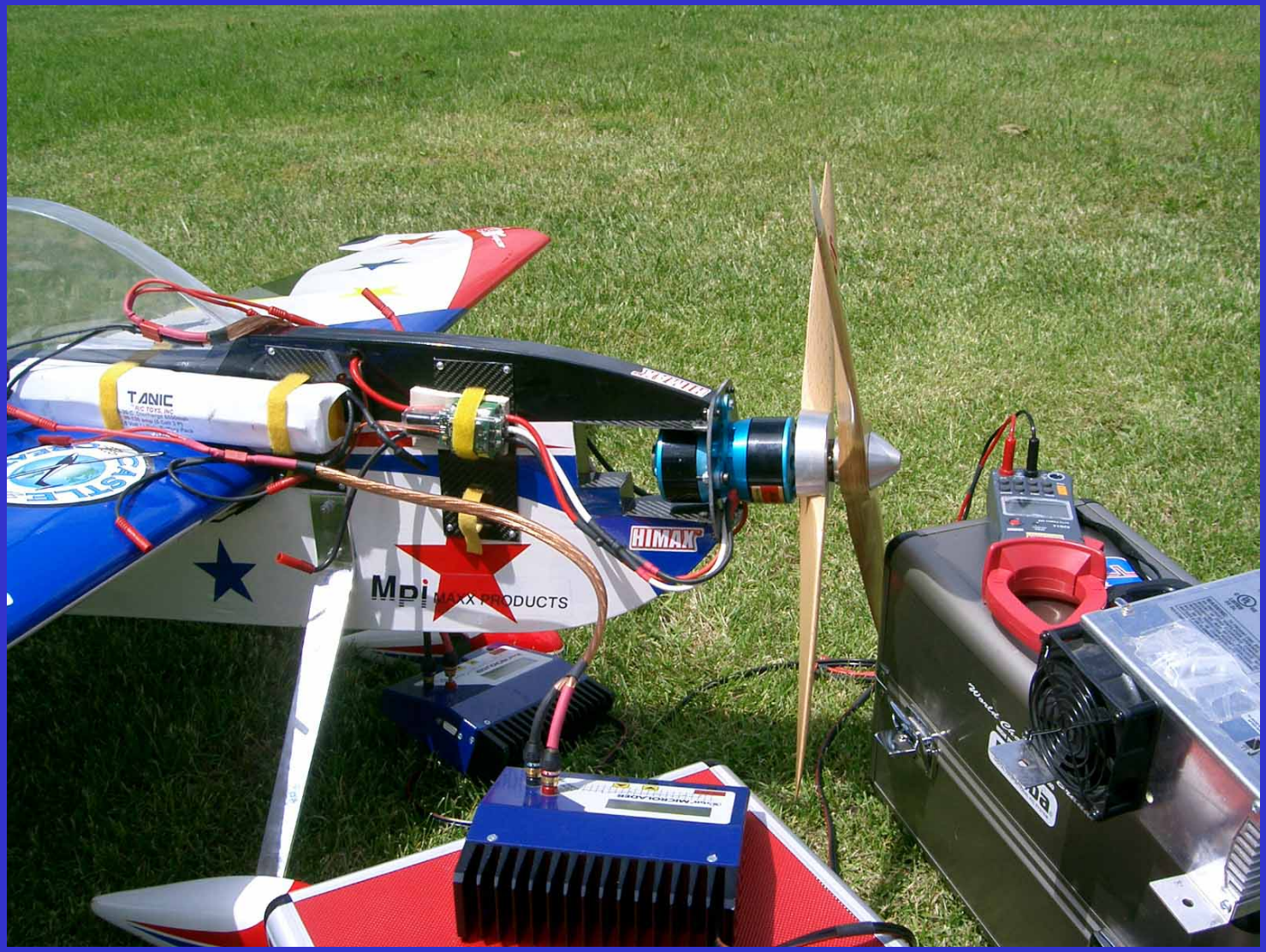
Inrunner + Gear-Box

Hélice à pas variable



Maxx Prod http://www.maxxprod.com

Hélices contra-rotatives (2 moteurs)



Quelques termes rencontrés

- **Entrefer (airgap)**
  - **typique 0.3 mm pour des diamètres usuels (20-30 mm)**
  - **un petit entrefer augmente la force magnétique et donc le couple (réduit la vitesse et le Kv)**
  - **des aimants incurvés permettent un entrefer moyen plus faible**
- **Cogging (points durs magnétiques)**
  - **en tournant le rotor à la main, on sent les « points durs »**
  - **ne semble pas être un défaut, ni agir sur le rendement**
  - **dépendrait surtout de la configuration stator+rotor**
- **Dead legs (useless windings heads)**
  - **extrémités des bobinages (parties non axiales des fils de cuivre)**

DOCUMENTATION

- GOOGLE « brushless », « outrunner »
- Sites français (« Electrofly », « Le Gallou », « Jorge Nolla »)
- Sites en allemand/anglais (Powerditto, ..)
- Groupes de discussion, forums

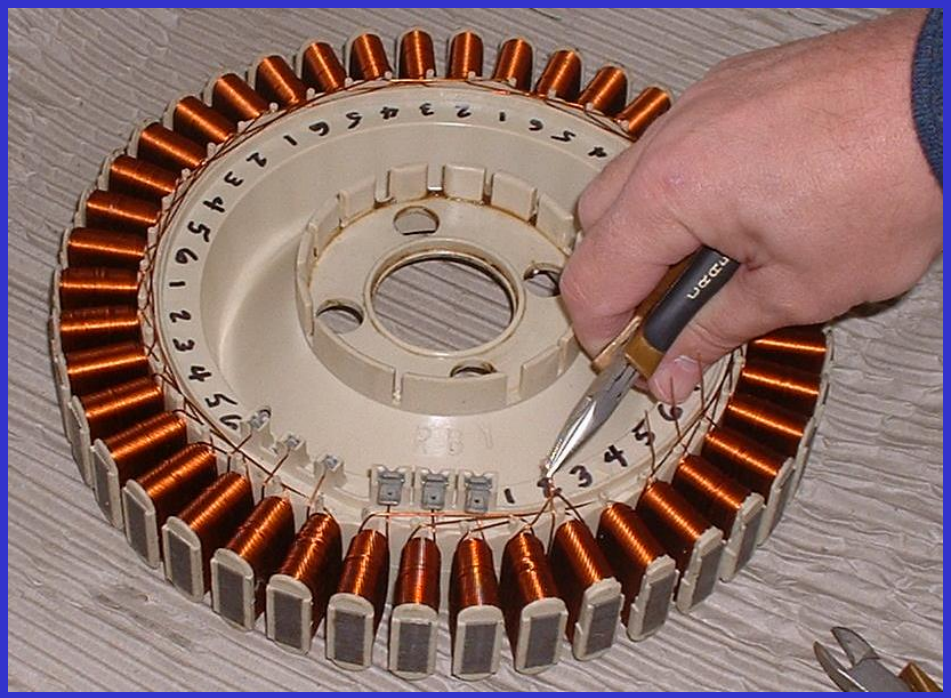
Moteur perso, Electron-libre (base de données EXCEL)

- LRK-Torquemax (Ron VAN SOMMEREN)
- RC-Groups

FIN

Question subsidiaire

D'ou vient ce **stator**, pour moteur à rotor externe ?

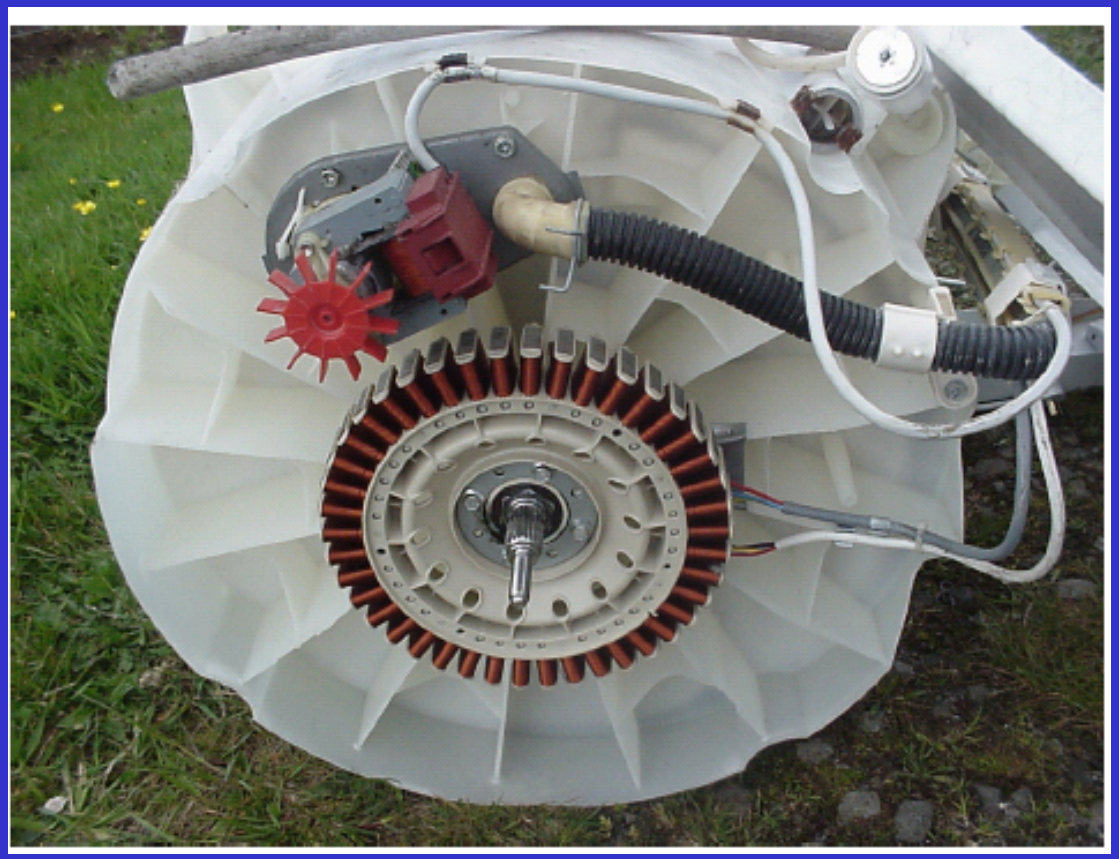


A) d'un vélo électrique

B) d'une machine à laver le linge « all black »

C) d'une mini turbine pour éolienne

Question subsidiaire (réponse B)



A) d'un vélo électrique

B) d'une machine à laver le linge « all black » (NZ)

C) d'une mini turbine pour éolienne