



TECHNOLOGIE  
D'ELECTRICITE

# LE MOTEUR PAS A PAS



Lycée L.RASCOL 10, rue de la République  
BP 218. 81012 ALBI CEDEX

# **SOMMAIRE**

## **PRINCIPE**

### **MOTEUR A AIMANTS PERMANENTS**

Constitution  
Fonctionnement

### **MOTEUR A RELUCTANCE VARIABLE**

Constitution  
Fonctionnement

### **MOTEUR HYBRIDE**

### **CARACTERISTIQUES DES MOTEURS PAS N'A PAS**

Mécaniques  
Electriques  
Courbe couple / vitesse

### **CRITERES DE QUALIT2 DES UNITES DE COMMANDE**

Alimentation directe par phase  
Alimentation par résistance série  
Alimentation à deux niveaux de tension  
Alimentation par pont complet travaillant en hacheur

### **COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPE DE MOTEURS**

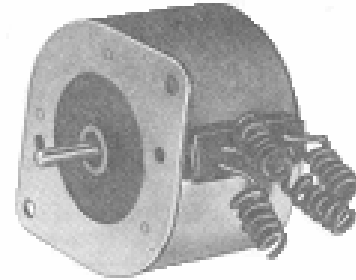
**PRINCIPE**

Le moteur pas à pas tourne d'un angle constant chaque fois qu'il reçoit une impulsion au stator.  
 La vitesse de ce moteur ne dépend donc que de la fréquence des impulsions reçues.

L'angle de pas est de:

- \$ 90° pour un moteur 4 p/tr
- \$ 0,9° pour un moteur 400 p/tr

Si  $f = 20 \text{ KHz}$        $n = 50 \text{ tr/s}$        $n = 3000 \text{ tr/min}$



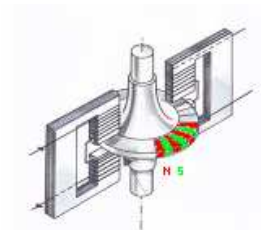
**MOTEUR A AIMANTS PERMANENTS**

**CONSTITUTION**

Il comprend:

\$ Un stator bobiné (électro-aimant) dont la polarité dépend du sens du courant alimentant la bobine ou la phase.

\$ Un rotor qui comporte en périphérie des pôles Nord et Sud successivement répartis et réalisés en général avec de la ferrite (Hc important)



**FONCTIONNEMENT**

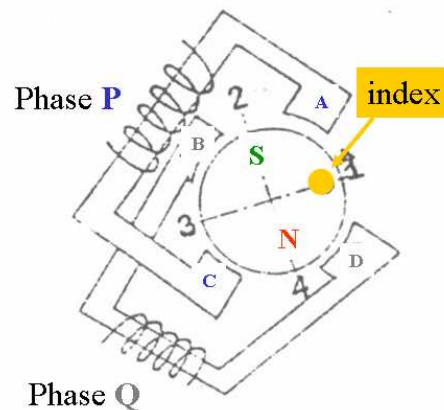
Considérons un moteur

- \$ Rotor bipolaire
  - 1 pôle Nord      N
  - 1 pôle Sud      S

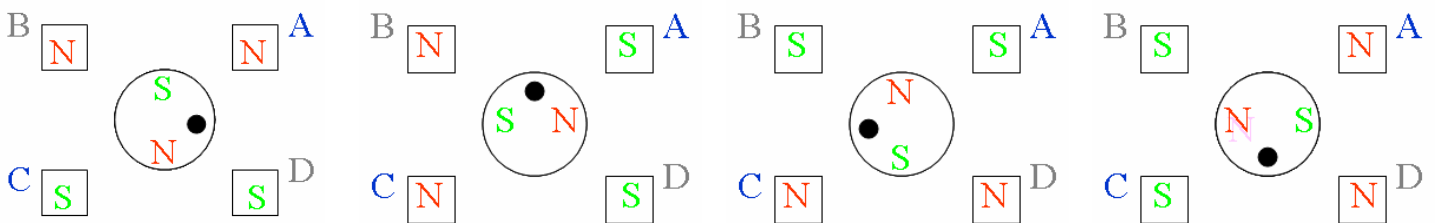
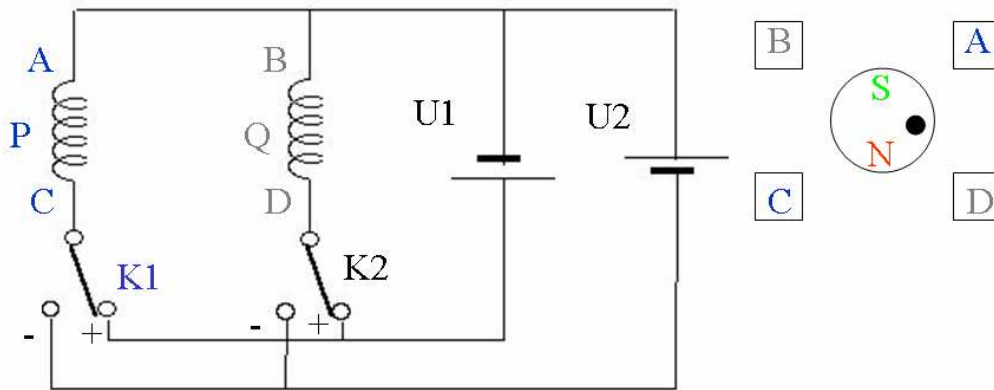
\$ Stator à 2 phases P et Q

Phase P (pôles A et C)

Phase Q (pôles B et D)



Alimentation du stator



Position 1

Position 2

Position 3

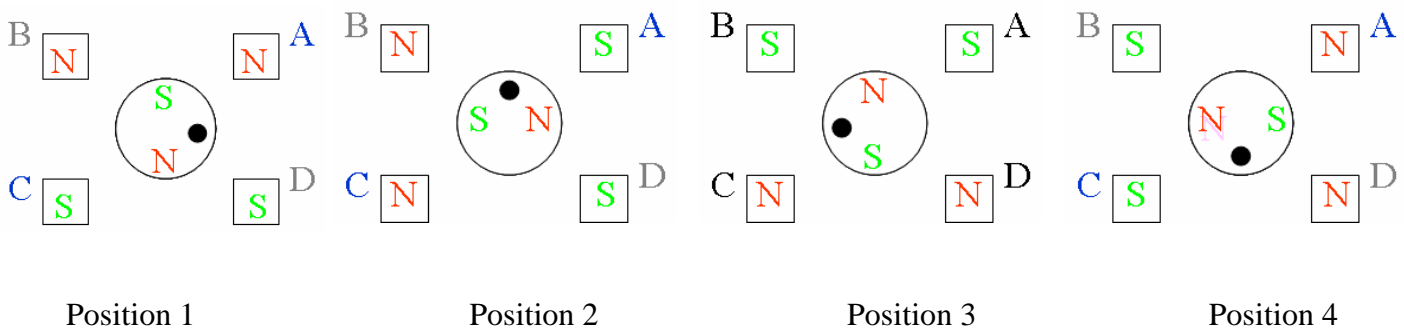
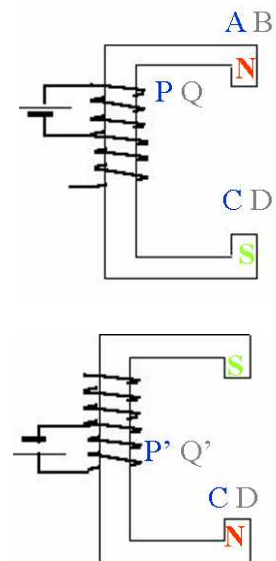
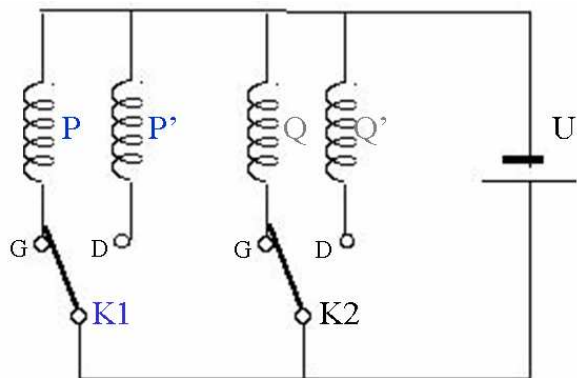
Position 4

K1	K2	A	B	C	D	Position	Sens de progression	Sens de progression
+	+	N	N	S	S	1	↑ Sens Horaire	↓ Sens Anti-horaire
-	+	S	N	N	S	2		
-	-	S	S	N	N	3		
+	-	N	S	S	N	4		

Le sens de rotation du moteur dépend de l'ordre dans lequel on manoeuvre les interrupteurs.

La vitesse de rotation du moteur dépend de la vitesse avec laquelle on manoeuvre les interrupteurs

Ici l'angle de pas est 90°. Ce type de moteur n'est pas employé car il nécessite deux alimentations, on préfère diviser chaque phase en deux et réaliser ainsi un moteur quatre phases.



K1	K2	Phases excitées	A	B	C	D	Position	Sens de progression	Sens de progression
G	G	P Q	N	N	S	S	1	↓ Sens Anti-horaire ↓	↓ Sens Anti-horaire ↓
D	G	P' Q	S	N	N	S	2		
D	D	P' Q'	S	S	N	N	3		
G	D	P Q'	N	S	S	N	4		

## MOTEUR A RELUCTANCE VARIABLE

### CONSTITUTION

Le rotor est en fer doux feuilleté. Lorsqu'on excite une bobine du stator elle attire le pôle de fer doux le plus proche d'elle, ce qui fait tourner le rotor.

Cette attraction est de même nature que celle de l'armature en fer doux d'un relais par son électro-aimant.

Dans les deux cas elle a pour effet de diminuer l'entrefer afin de faciliter le passage du flux magnétique de la bobine en diminuant la réluctance du circuit magnétique, d'où le nom de réluctance variable.



L'entrefer est réduit 0,05 mm afin d'avoir un couple maximum. Le sens des courants dans les bobines est sans importance, le rotor se déplace jusqu'à une position où la réluctance est minimale

### FONCTIONNEMENT

§ L'angle de pas est ici

$$\alpha_s - \alpha_r = \alpha$$

angle du rotor  $\alpha_r = 360 / N_r$

angle du stator  $\alpha_s = 360 / N_s$

Il faut que le rotor ait un nombre de dents égal au nombre de pôles du stator plus ou moins un.  
 $N_r = N_s \pm 1$

$$\alpha = 360 (N_r - N_s) / N_r \cdot N_s$$

$$\alpha = \pm 360 / N_s (N_s \pm 1)$$

### Exemple

On alimente les bobines dans l'ordre A - B - C.

Stator à 3 pôles  $N_s = 3$

Rotor à 4 pôles  $N_r = 4$

$$N_r = N_s + 1$$

### Conclusion

Les moteurs à réluctance variable se prêtent bien à la réalisation de petits pas

### MOTEUR HYBRIDE

Il utilise simultanément les principes des moteurs à aimants permanents et à réluctance variable, afin d'obtenir un couple moteur plus grand.

On arrive à des pas angulaires faibles  $1,8^\circ$  avec un rapport couple inertie très élevé.

L'aimant permanent au rotor améliore le couple moteur ainsi que le couple de maintien.



### CARACTERISTIQUES D'UN MOTEUR PAS A PAS

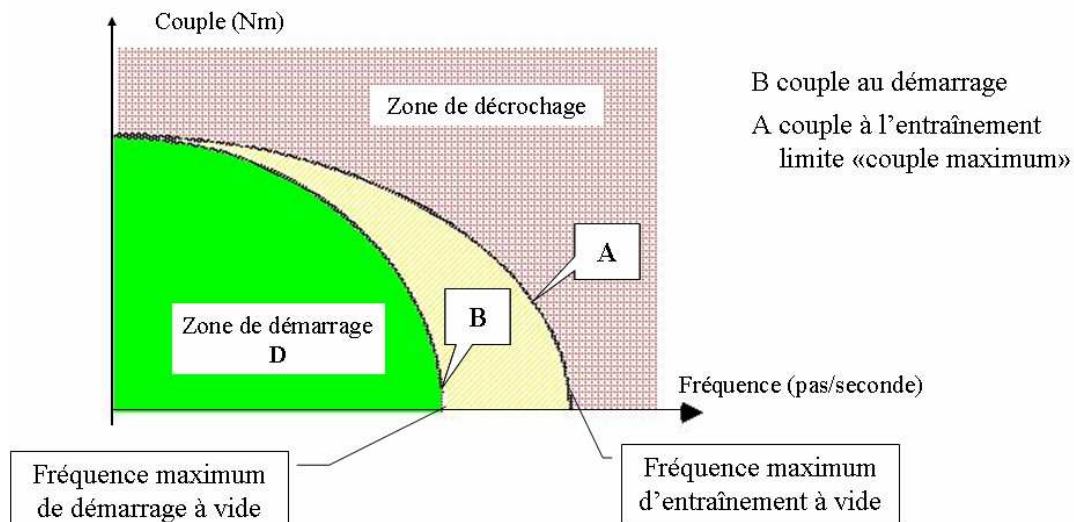
#### \$ Mécaniques:

- encombrement
- masse
- inertie du rotor
- angle de pas

#### \$ Electriques:

- caractéristique couple /fréquence
- résistance d'une phase
- intensité par phase
- tension d'isolement
- températures stockage/fonctionnement

La caractéristique la plus importante pour le choix d'un moteur pas à pas est la variation du couple utile en fonction de la vitesse.



A Couple à l'entraînement (limite "couple maximum")

B Couple au démarrage

Quand on est amené à travailler dans la zone jaune, il est nécessaire de prévoir:

- une rampe d'accélération pour démarrer dans la zone D.
- une rampe de décélération pour revenir en zone D avant de s'arrêter.

Si ces deux conditions sont remplies on ne perd aucun pas.

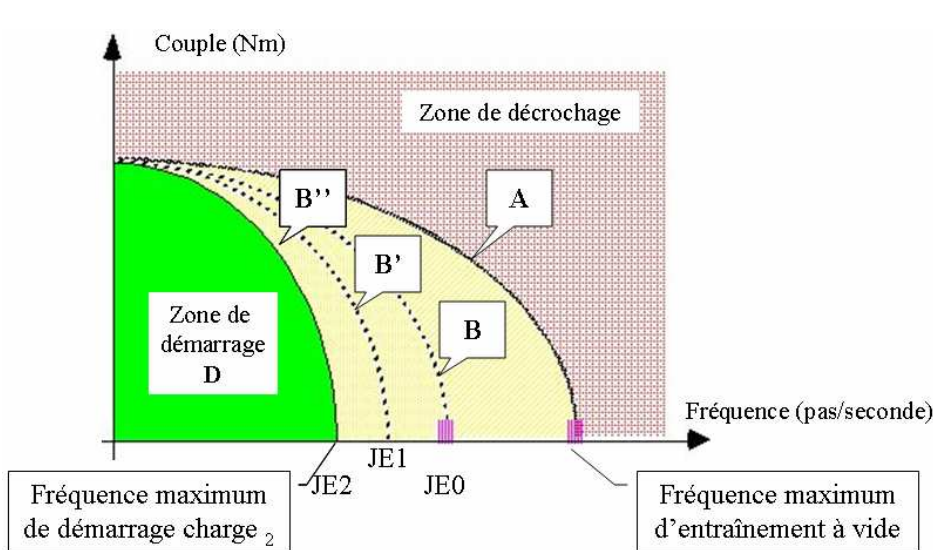
Si on est en charge:

La courbe A n'est pas modifié.

L'inertie extérieure JE (due à la charge) modifie la courbe d'arrêt démarrage B.

$$J_T = J_R + J_E$$

inertie totale = inertie du rotor du moteur + inertie extérieure



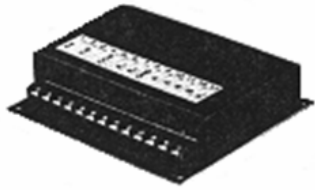
$J_{E0} = 0$   
 $J_T = J_R$  moteur seul  
  
 $J_{E1} = J_R$   
 $J_T = J_R + charge_1 = 2 J_R$   
  
 $J_{E2} = 2J_R$   
 $J_T = J_R + charge_2 = 3 J_R$

La fréquence maximum de démarrage décroît quand la charge augmente.

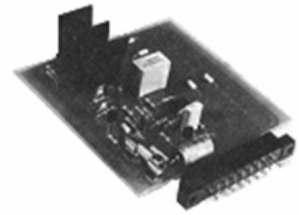
Le réseau de courbes ci-dessus correspond à l'ensemble (moteur plus électronique de commande). La commande utilisée influence fortement le réseau.



**CRITERES DE QUALITE DES UNITES DE COMMANDE**



$$P_{(w)} = C_{(Nm)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{(tr/s)}$$



Pour obtenir une puissance maximum il faut avoir simultanément:

\$ Le couple (donc le courant parcourant les bobinages) très élevé.

La limite pour le couple maximum est la limite de saturation des masses métalliques. C'est une caractéristique fixée à la construction.

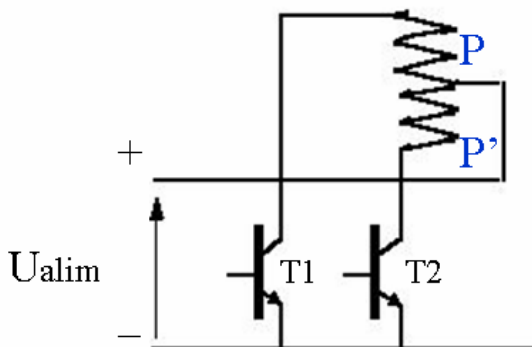
Le couple maximum (donc le courant maximum dans les bobinages) sera atteint plus ou moins rapidement en fonction des possibilités de la commande.

\$ La vitesse (donc la fréquence des commutations) très élevée.

La fréquence maximum de commutation est fonction des caractéristiques des bobinages du moteur et des composants de puissance utilisés.

Une unité de commande est d'autant plus intéressante

- qu'elle permet de conserver la valeur maximale du couple sur une plage de vitesse importante.
- que l'ensemble qu'elle forme avec le moteur pas à pas présente un rendement élevé.



Branchement de deux phases

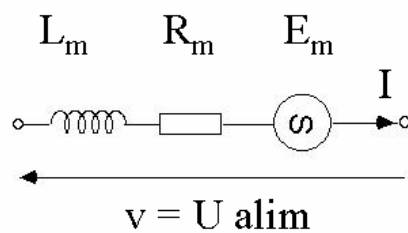


Schéma électrique d'une phase

### ALIMENTATION DIRECTE D'UNE PHASE

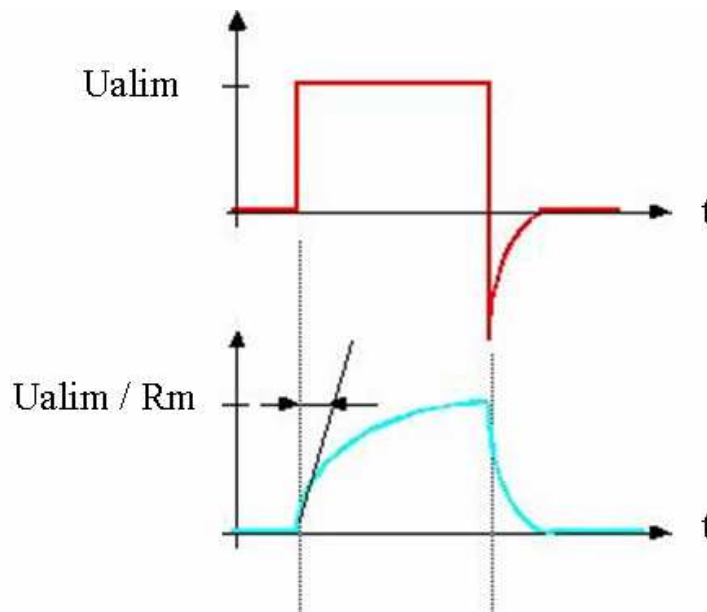
Au moment de la mise sous tension d'un enroulement, le courant prend un certain temps pour s'établir à une valeur voulue.

$$\tau = L_m / R_m$$

Au moment de la coupure du courant dans l'enroulement, l'inductance génère une tension inverse dangereuse pour les transistors du circuit de commutation (protection par diode ou par condensateur).

Quand la vitesse augmente, à cause du temps d'établissement du courant, la valeur moyenne du courant circulant pendant l'alimentation d'une phase diminue. Le couple procuré au moteur diminue lui aussi.

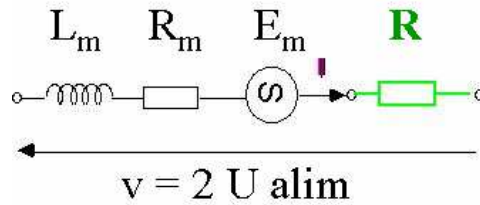
**On a donc intérêt à réduire le temps de montée du courant au minimum, c'est le rôle de l'unité de commande.**



On protégera l'électronique de puissance par diode de roue libre ou par condensateur.

**ALIMENTATION PAR RESISTANCE SERIE**

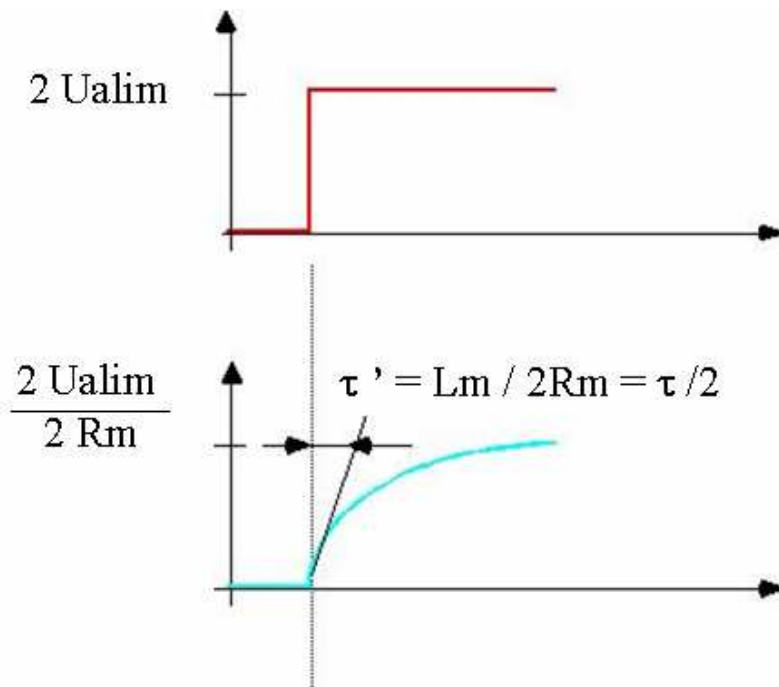
On travaille avec une tension double et une résistance série telle que  $R = R_m$



Le courant augmente deux fois plus vite donc possibilité de travailler à des fréquences doubles.

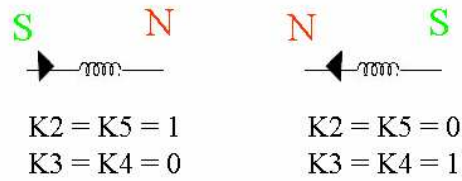
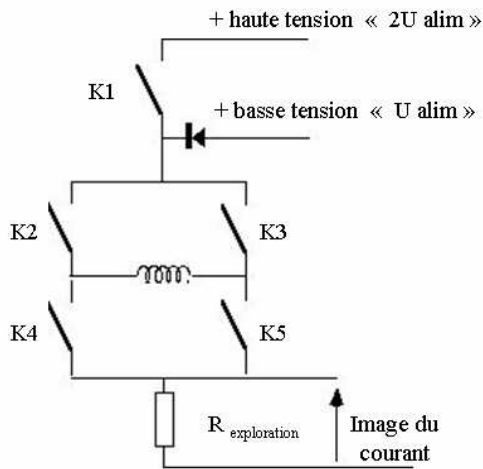
Inconvénient, on consomme de la puissance pour rien dans la résistance extérieure.

Les constructeurs vont jusqu'à  $R = 3 R_m$

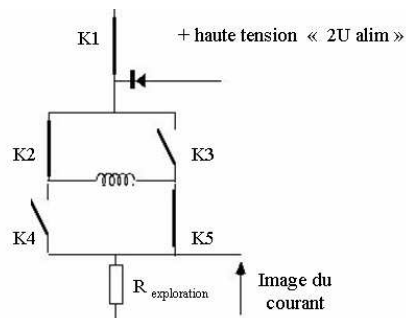
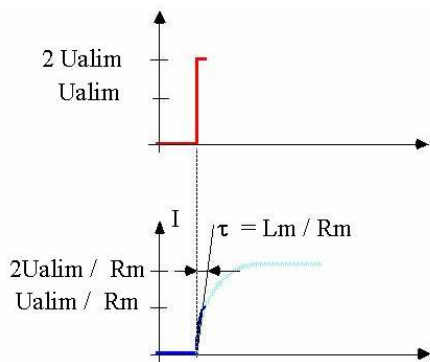


### ALIMENTATION A DEUX NIVEAU DE TENSION

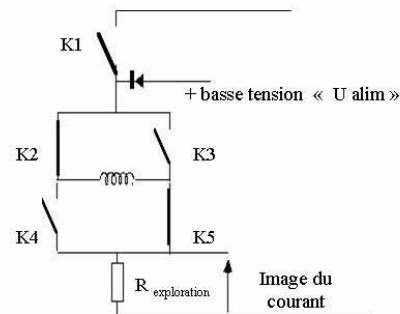
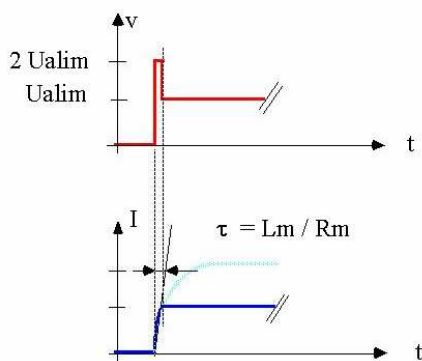
Commande bipolaire à deux niveaux à régulation de courant par transistor ballast



K1 est le transistor ballast



1<sup>er</sup> temps, on alimente avec la plus haute tension « 2 U alim » jusqu'à ce que le courant dans la phase atteigne la valeur nominale  $I_N = U_{alim} / R_m$

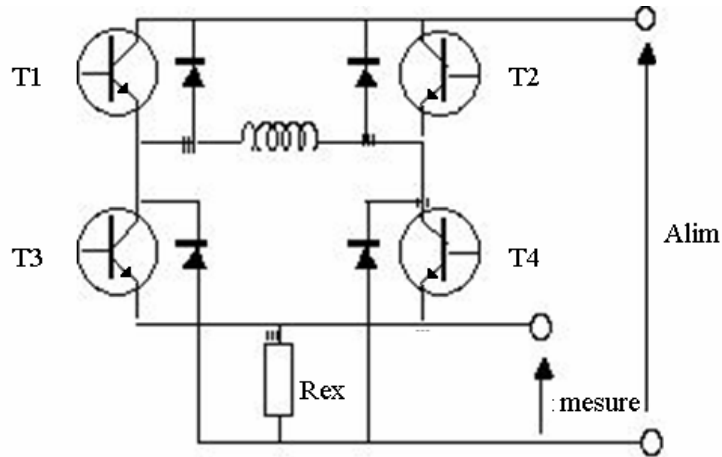


2<sup>em</sup> temps, dès que le courant dans la phase atteint la valeur nominale  $I_N = U_{alim} / R_m$  on alimente avec la plus basse tension « U alim ».

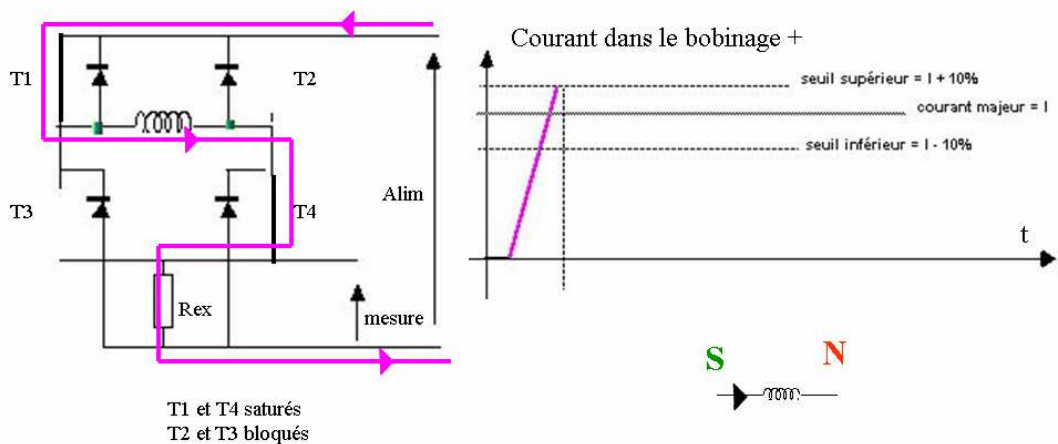
**ALIMENTATION PAR PONT COMPLET**

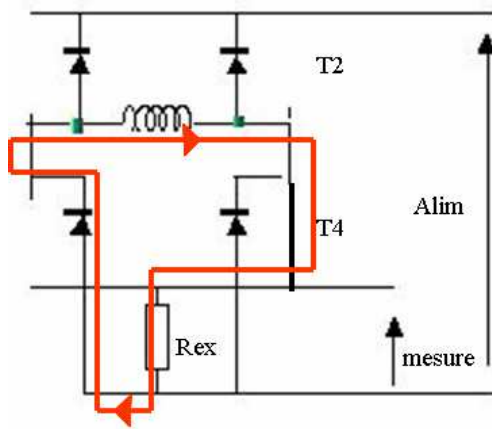
Utilisation de pont complet à transistors avec les deux transistors supérieurs (T1 et T2) travaillant en hacheur alors que les deux transistors inférieurs (T3 et T4) permettent la commutation selon le sens du courant requis.

Le moteur et l'alimentation présentent un bon rendement. En effet dès, que le courant atteint un seuil supérieur égal à  $( I + 10\% )$ , l'énergie emmagasinée par l'inductance du moteur est mise à profit pour faire circuler le courant dans le bobinage. L'alimentation est coupée tant que l'on a  $( I > ( I - 10\% )$ .

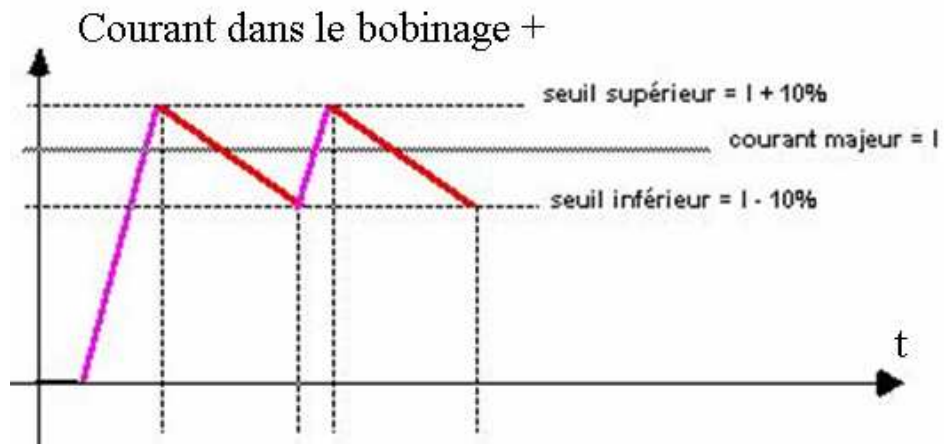
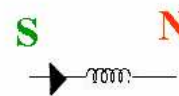
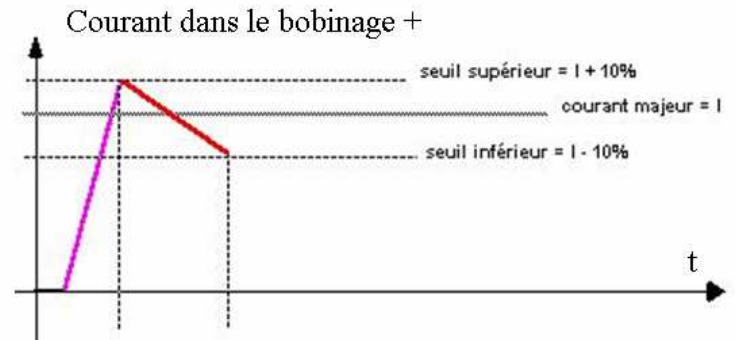


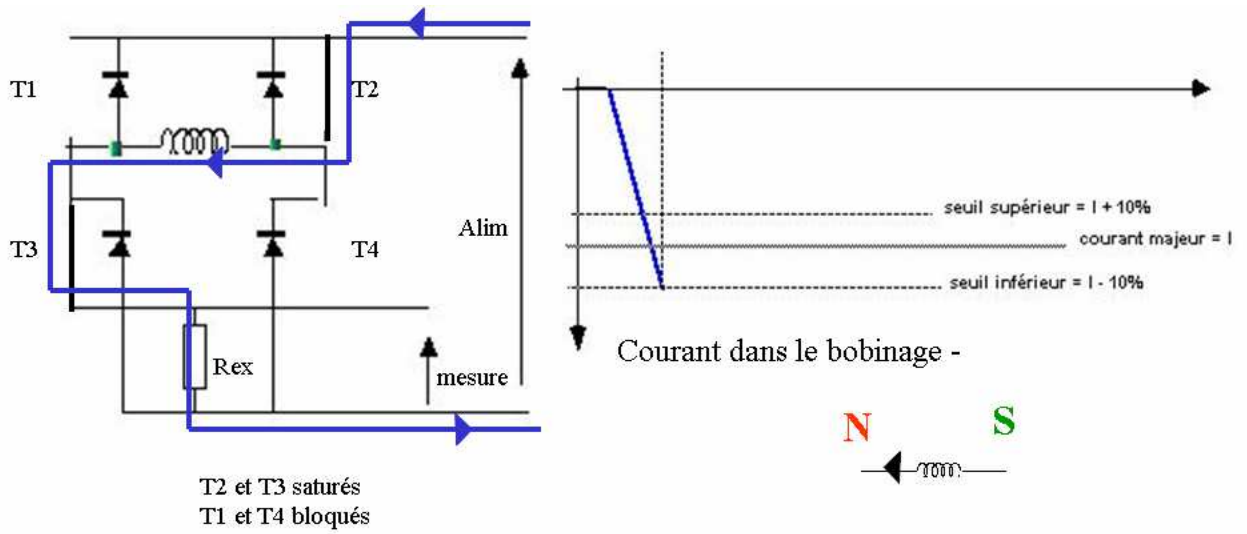
1<sup>er</sup> temps, on alimente la phase jusqu'à ce que le courant atteigne  $I_n + 10\%$ .



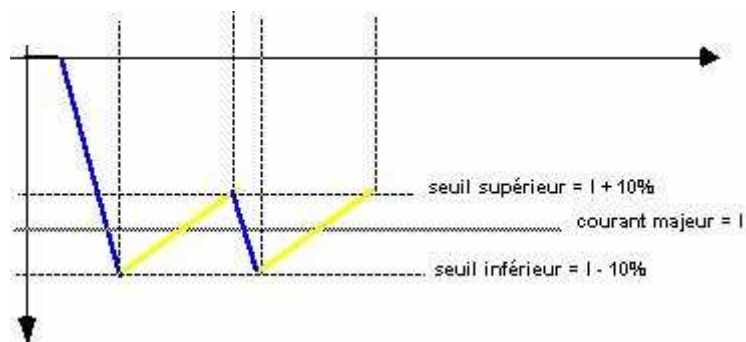
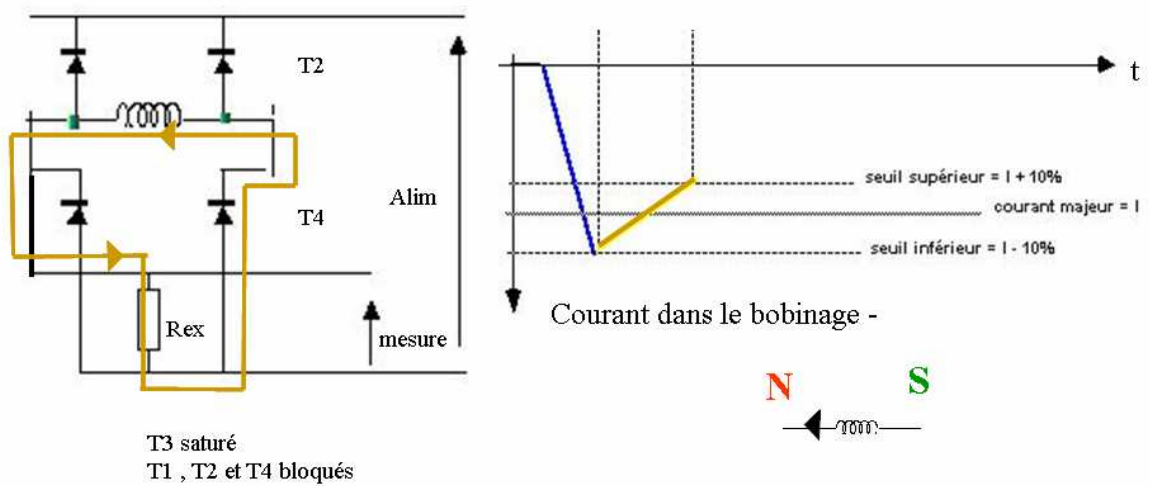


T4 saturé  
T1, T2 et T3 bloqués





2<sup>em</sup> temps, on coupe l'alimentation de la phase, jusqu'à ce que le courant atteigne  $I_n - 10\%$ .



## COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE MOTEURS PAS A PAS

Type	Avantages	Inconvénients
Moteurs à aimants permanents	Couple de maintien résiduel Bon amortissement.	Inertie élevée au rotor. Vieillessement des aimants, variation des performances avec le temps
Moteurs à réluctance variable	Rapport couple/inertie intéressant Possibilité de fonctionnement à haute fréquence.	Pas de couple résiduel. Affecté par les phénomènes de résonances.
Moteurs hybrides	Couple résiduel disponible Grande résolution. Possibilité de fonctionnement à haute fréquence.	Inertie élevée du rotor. Résonance à certaines vitesses.

Les systèmes d'entraînement avec moteurs pas à pas, permettent un positionnement exact en boucle ouverte (sans signal de retour) , par un nombre défini d'impulsions de commande. Ils peuvent utiliser des signaux qui sont issus des systèmes de commande numérique.

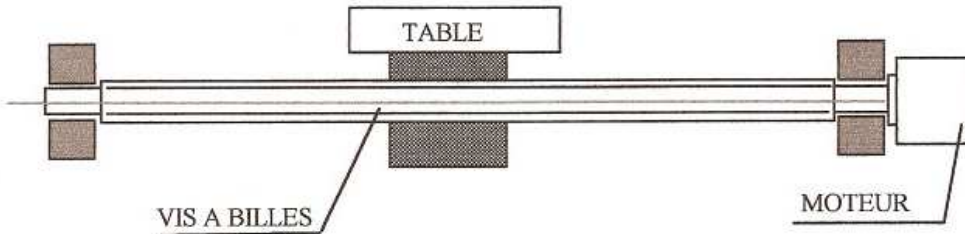
- Couple moteur élevé pour des vitesses angulaires faibles même en fonctionnement pas à pas.
- Couple de maintien important quand le moteur est excité au repos qui provoque l'arrêt.



**EXERCICE**

Une unité de câblage comporte un positionnement numérique par moteur pas à pas, l'axe est constitué par :

- une vis à billes au pas de 5 mm
- une table liée à un écrou.
- un moteur pas à pas.



Les caractéristiques du positionnement a réaliser sont les suivantes:

- course utile 240 mm.
- tolérance de positionnement 0.03 mm.
- vitesse de déplacement de 120 mm / s.
- inertie de la charge ramenée sur l'arbre du moteur  $200 \cdot 10^{-7} \text{ Kg.m}^2$ .

1) A l'aide du document **D1**, en tenant compte de la tolérance de positionnement donner la référence du moteur pas à pas à retenir.

2) A l'aide du document **D1**, pour tenir la vitesse de déplacement, calculer la fréquence de commutation de l'électronique de puissance et indiquer si le moteur précédent peut fournir son couple nominal sur toute la plage de vitesse (on considère que l'intensité dans une phase est stabilisée, au bout de  $3 \tau$  " 3 fois la constante de temps" ).

3) A l'aide du document **D2**, calculer la valeur et la puissance de la résistance à mettre en série avec chacune des phases pour que le moteur puisse fournir son couple nominal jusqu'à la vitesse maximum, donner la valeur de l'alimentation de puissance **Vcc**.

Document D1

Références	82 940 014	89 908 302
<b>Caractéristiques</b>		
Nombre de phases	4	4
Résistance par phase	5,2 Ω	5 Ω
Inductance par phase	1,6 mH	2,5 mH
Intensité par phase	1,1 A	1 A
Tension aux bornes du moteur	5,7 V	5 V
Angle de pas	7,5°	1,8°
Inertie du rotor	180 gcm <sup>2</sup>	110 gcm <sup>2</sup>
Tension d'isolement	600 V	500 V
Température maxi de fonctionnement	120°	130°
Température maxi de stockage	-40 à +80°	-40 à +80°

Document D2



Commande électronique à tension constante pour moteurs pas à pas

Présentation

La réalisation de la fonction "commande des moteurs pas à pas" est faite par la réunion d'éléments suivant le diagramme bloc ci-contre : La boîte de commande Crouzet est composée de la partie "séquenceur" et de la partie commutation de puissance.

Le microprocesseur ou l'automate fournit des impulsions à une fréquence égale à la fréquence de rotation du moteur exprimée en pas par seconde; de plus il fournit un signal binaire donnant le sens de rotation du moteur.

L'interface transforme l'information reçue du microprocesseur pour la fournir suivant la rotation désirée aux bornes 2, 3 (sens horaire) et aux bornes 4, 5 (sens anti-horaire) de la carte de commande.

L'alimentation de puissance est ici une alimentation à tension constante.

Réglage de la tension d'alimentation Vcc

Dans le but d'obtenir des performances maximales de la part du moteur, il faut que l'intensité dans le bobinage soit maximale, c'est-à-dire égale à celle indiquée dans les caractéristiques des moteurs (intensité par phase).

$$V_{cc} = (R + R_s) I$$

Ajuster les Vcc afin de ne pas dépasser le courant admissible par les cartes (3 ou 6 A).

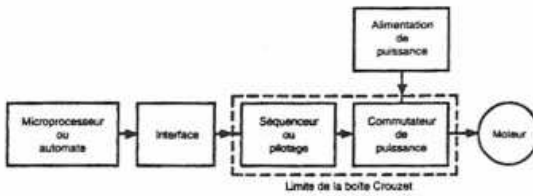
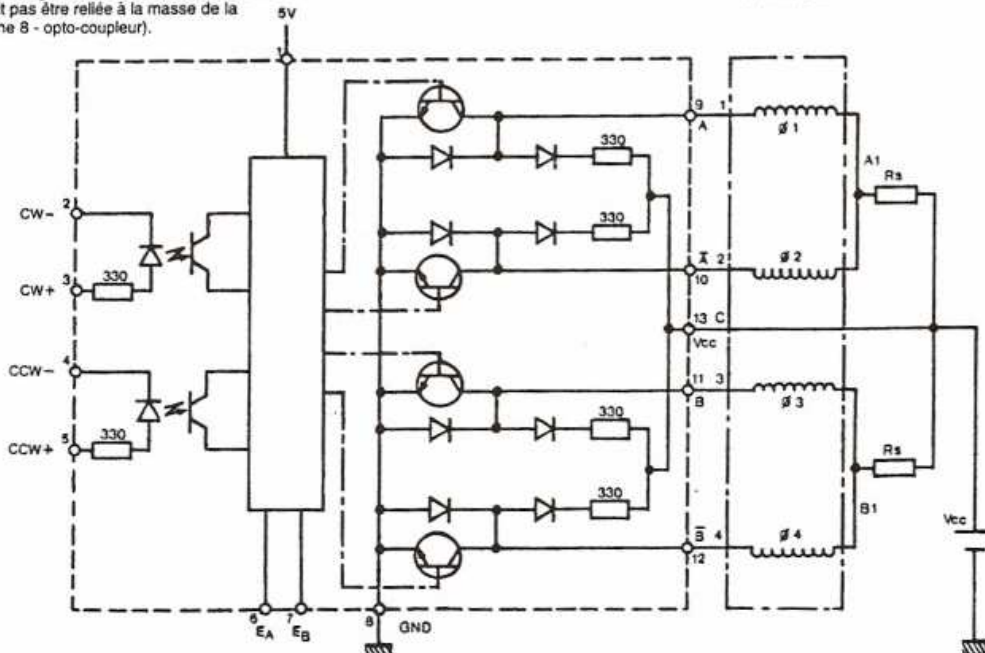


Schéma de câblage et de principe

La masse des signaux de commande (broche 2 et 4) ne doit pas être reliée à la masse de la carte (broche 8 - opto-coupleur).



Références

89 990 101 - 89 990 601

Caractéristiques

Bornes	4	—	4	—
Nombre de phases	4	—	4	—
Tension d'alimentation de la logique	V 5 ±10%	1	5 ±10%	1
Tension d'alimentation de la puissance	V max. 50	13	50	13
Intensité maxi par phase	A 3	—	6	—
Impulsion de commande (entre 3 ou 5)		9.10.11.12		9.10.11.12
Niveau *1*	V 3/5	2,3,4,5	3/5	2,3,4,5
Niveau *0*	V 0,5	—	0,5	—
Intensité d'entrée niveau *1*	A max. 5/20	—	5/20	—

Modes de branchement

Types	Autres moteurs hybrides
89 908 0	
89 908 3	
89 908 6	
A rouge	A rouge
A rouge/blanc	A bleu
A1 noir	A1 blanc
B vert	B jaune
B vert/blanc	B vert
B1 blanc	B1 blanc

	Ea	Eb
1 phase à la fois	1	0
2 phases à la fois	0	1
Alternativement	0	0
1 phase - 2 phases	1	1
Fonctionnement en demi-pas		

1) A l'aide du document **D1**, en tenant compte de la tolérance de positionnement donner la référence du moteur pas à pas à retenir.

### Détermination de l'angle de pas que doit avoir le moteur retenu

1 tour moteur = 1 tour de la vis = 5mm  
 Tolérance de positionnement 00,3 mm

→ Nombre de pas pour 1 tour =  $5/0,003 = 166,66$

Angle de pas du moteur =  $360 / 166,66 = 2,16^\circ$  MAXI

Document D1

Références	82 940 014	89 908 302
<b>Caractéristiques</b>		
Nombre de phases	4	4
Résistance par phase	5,2 Ω	5 Ω
Inductance par phase	1,6 mH	2,5 mH
Intensité par phase	1,7 A	1 A
Tension aux bornes du moteur	5,7 V	5 V
Angle de pas	7,5°	1,8°
Inertie du rotor	180 gcm <sup>2</sup>	110 gcm <sup>2</sup>
Tension d'isolement	600 V	500 V
Température maxi de fonctionnement	120°	130°
Température maxi de stockage	-40 à +80°	-40 à +80°

Angle de pas du moteur =  $2,16^\circ$  MAXI

**OK**

Nombre de pas pour faire 1 tour =  $360/1,8 = 200$

Précision de positionnement obtenue =  $5/200 = 0,025$  mm

Vérification que dynamiquement le moteur peut assurer un axe bien réactif (dur)

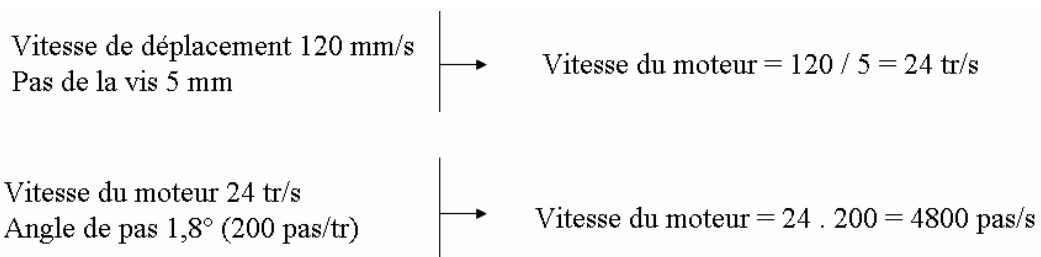
Références	89 908 302
<b>Caractéristiques</b>	
Nombre de phases	4
Résistance par phase	5 Ω
Inductance par phase	2,5 mH
Intensité par phase	1 A
Tension aux bornes du moteur	5 V
Angle de pas	1,8°
Inertie du rotor	110 gcm <sup>2</sup>
Tension d'isolement	500 V
Température maxi de fonctionnement	130°
Température maxi de stockage	-40 à +80°

$$J_{MAXI} \text{ de la charge ramenée au moteur} = 2 J_{Rmoteur} = 220 \text{ gcm}^2$$

$$\text{Ici } J_{\text{charge ramenée au moteur}} = 200 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 = 200 \cdot 10^{-4} \text{ gm}^2 = 200 \text{ gcm}^2$$

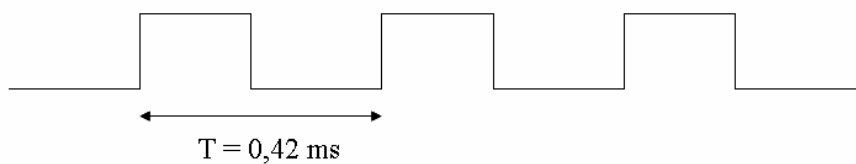
**OK**

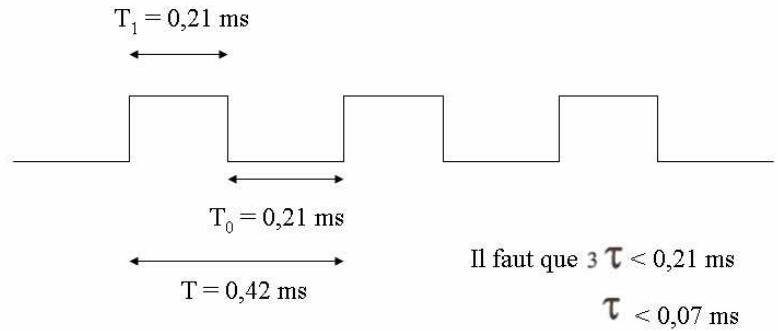
2) A l'aide du document **D1**, pour tenir la vitesse de déplacement, calculer la fréquence de commutation de l'électronique de puissance et indiquer si le moteur précédent peut fournir son couple nominal sur toute la plage de vitesse (on considère que l'intensité dans une phase est stabilisée, au bout de 3  $\tau$  "3 fois la constante de temps").



Vitesse de commutation de l'électronique = vitesse du moteur / 2

Vitesse de commutation de l'électronique =  $4800 / 2 = 2400 \text{ commutation/s} = 2,4 \text{ Khz}$





<b>Références</b>	89 908 302
<b>Caractéristiques</b>	
Nombre de phases	4
Résistance par phase	5 Ω
Inductance par phase	2,5 mH
Intensité par phase	1 A

$$\tau = L_m / R_m = 2,5 \cdot 10^{-3} / 5 = 0,5 \text{ ms}$$

**Problème**

Pour fournir le couple nominal sur toute la plage de vitesse, il faut diminuer  $\tau$  en rajoutant une résistance série.

$$\tau' = L_m / (R_m + R) < 0,07 \text{ ms}$$

$$R > (L_m - 0,07 \cdot 10^{-3} R_m) / 0,07 \cdot 10^{-3}$$

$$R > (2,5 \cdot 10^{-3} - 0,07 \cdot 10^{-3} \cdot 5) / 0,07 \cdot 10^{-3}$$

$$R > 30,72 \Omega$$

On va retenir  $R = 31 \Omega$

$$\tau' = L_m / (R_m + R) = 2,5 \cdot 10^{-3} / (5 + 31) = 0,069 \text{ ms} < 0,07 \text{ ms}$$

**OK**

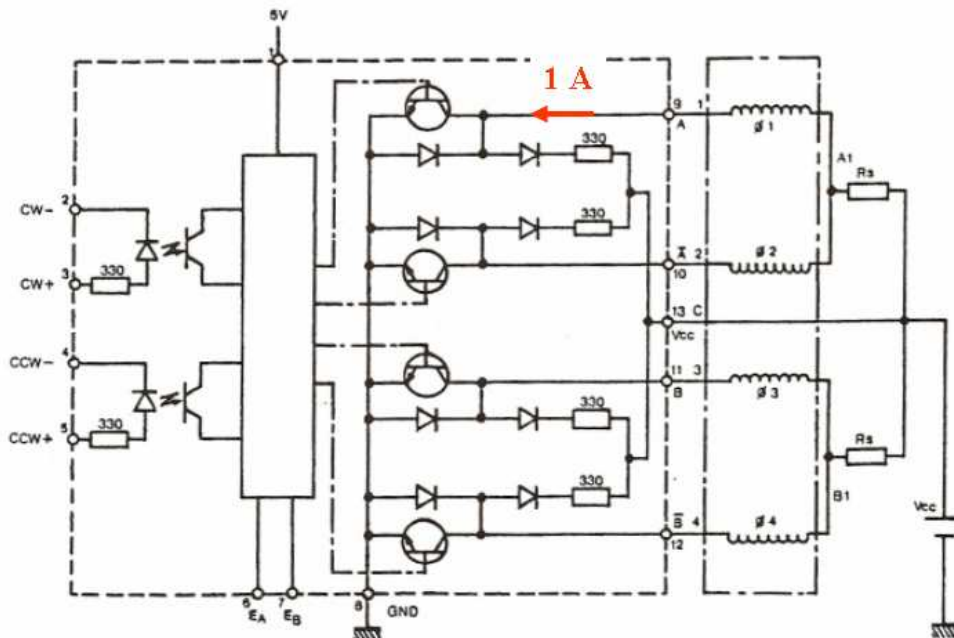


3) A l'aide du document D2, calculer la valeur et la puissance de la résistance à mettre en série avec chacune des phases pour que le moteur puisse fournir son couple nominal jusqu'à la vitesse maximum, donner la valeur de l'alimentation de puissance Vcc.

<b>Références</b>	89 908 302
<b>Caractéristiques</b>	
Nombre de phases	4
Résistance par phase	5 Ω
Inductance par phase	2,5 mH
Intensité par phase	1 A

$$P_R = R \cdot I^2 = 5 \cdot 1^2 = 5 \text{ W}$$

On va retenir une résistance R de 31 Ω et de 31W



$$V_{cc} = 31 + 5 + 0,7 = 36,7 \text{ V}$$

Références	89 908 302
<b>Caractéristiques</b>	
Nombre de phases	4
Résistance par phase	5 Ω
Inductance par phase	2,5 mH
Intensité par phase	1 A
Tension aux bornes du moteur	5 V
Angle de pas	1,8°
Inertie du rotor	110 gcm <sup>2</sup>
Tension d'isolement	500 V
Température maxi de fonctionnement	130°
Température maxi de stockage	-40 à +80°

$$V_{cc} = 31 + 5 + 0,7 = 36,7 \text{ V}$$

**OK**