

## Le moteur à courant continu

### I – Introduction

Le présent document s'inscrit dans le cadre de l'enseignement de la motorisation en BTS Conception de Produits Industriels (C.P.I). Le référentiel de formation stipule de traiter du choix des motorisations à un niveau d'expression pour les connaissances et à un niveau de maîtrise d'outil pour le choix proprement dit. Le niveau d'expression est relatif à l'acquisition de moyens d'expression et de communication, c'est-à-dire la capacité à utiliser les termes composants la discipline, dans ce cas : le moteur courant continu. Cette indication justifie en partie la présentation à partir de la constitution technologique, le but étant d'acquérir le vocabulaire spécifique.

Le niveau de maîtrise d'outil est relatif à la maîtrise de procédés et d'outils d'étude, c'est-à-dire la capacité à utiliser, à manipuler des règles, des principes, en vue d'un résultat à atteindre. Cette indication justifie l'apport succinct des relations et des lois qui régissent le moteur pour entrer dans la compréhension des spécifications techniques fournies par les constructeurs.

Le but de cette partie du cours est d'élaborer une représentation mentale aussi claire et fidèle que possible du moteur à courant continu.

### II – Constitution du moteur

#### 1. Le principe physique fondamental

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique. De ce principe il découle que tout moteur comporte deux circuits magnétiques, appelés stator (partie fixe) et rotor (partie mobile).

Dans le cas du moteur à courant continu le stator, aussi appelé inducteur, crée un champ magnétique  $B_s$ . Le rotor, aussi appelé induit, est alimenté par un courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ  $B_s$ , or le physicien Laplace découvrit que le conducteur est soumis à une force  $F = B_s \wedge I$  ( $\wedge$  = produit vectoriel entre les deux vecteurs). C'est cette force qui va faire tourner le rotor et créer le couple moteur.

La constitution technologique du moteur matérialise ce principe de fonctionnement.

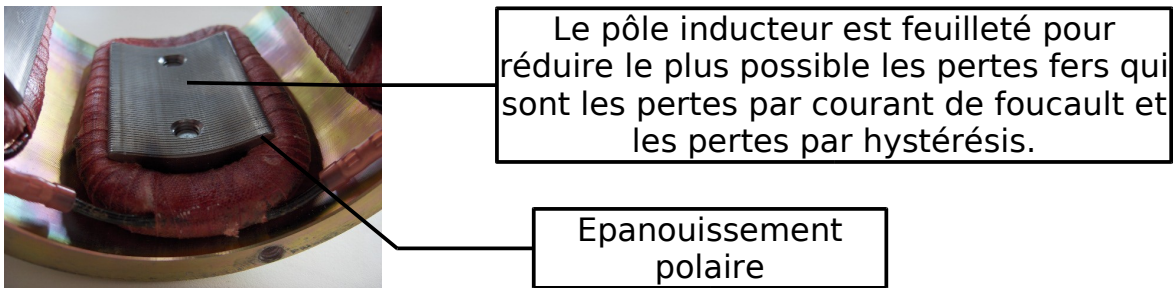
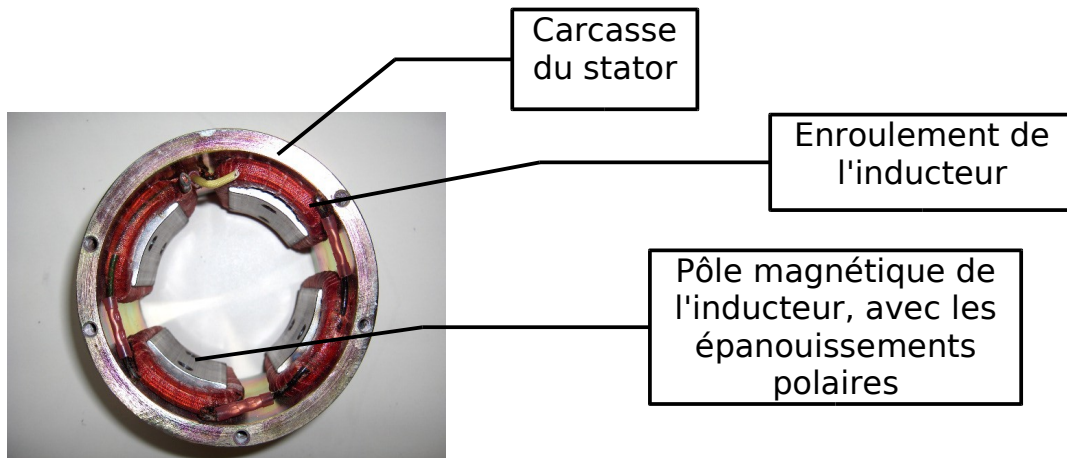
#### 2. Stator du moteur courant continu

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électro-aimant.

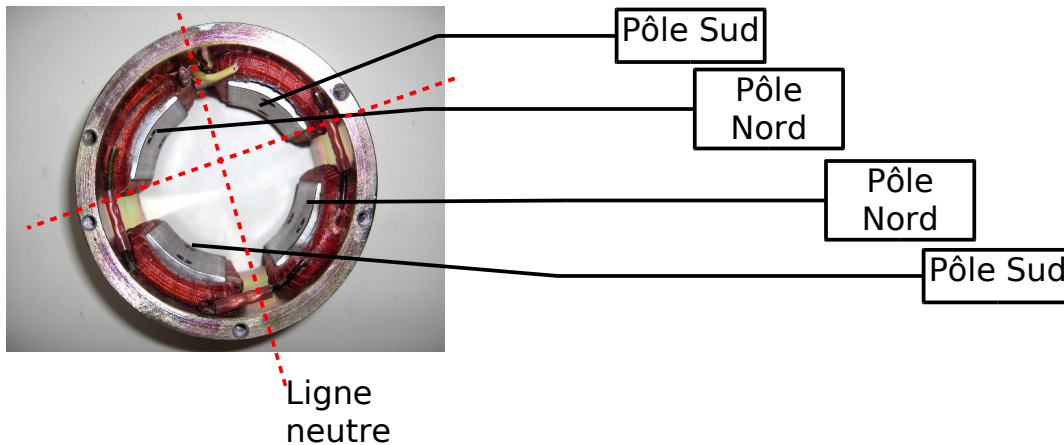
Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé « champ inducteur » ( $B_s$ ). L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique ( $\Phi$ ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques.

Illustrons ce vocabulaire avec une photo.

Il s'agit du moteur courant continu qui assure l'entraînement du Scootelec de Peugeot.



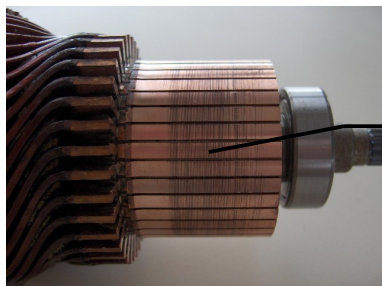
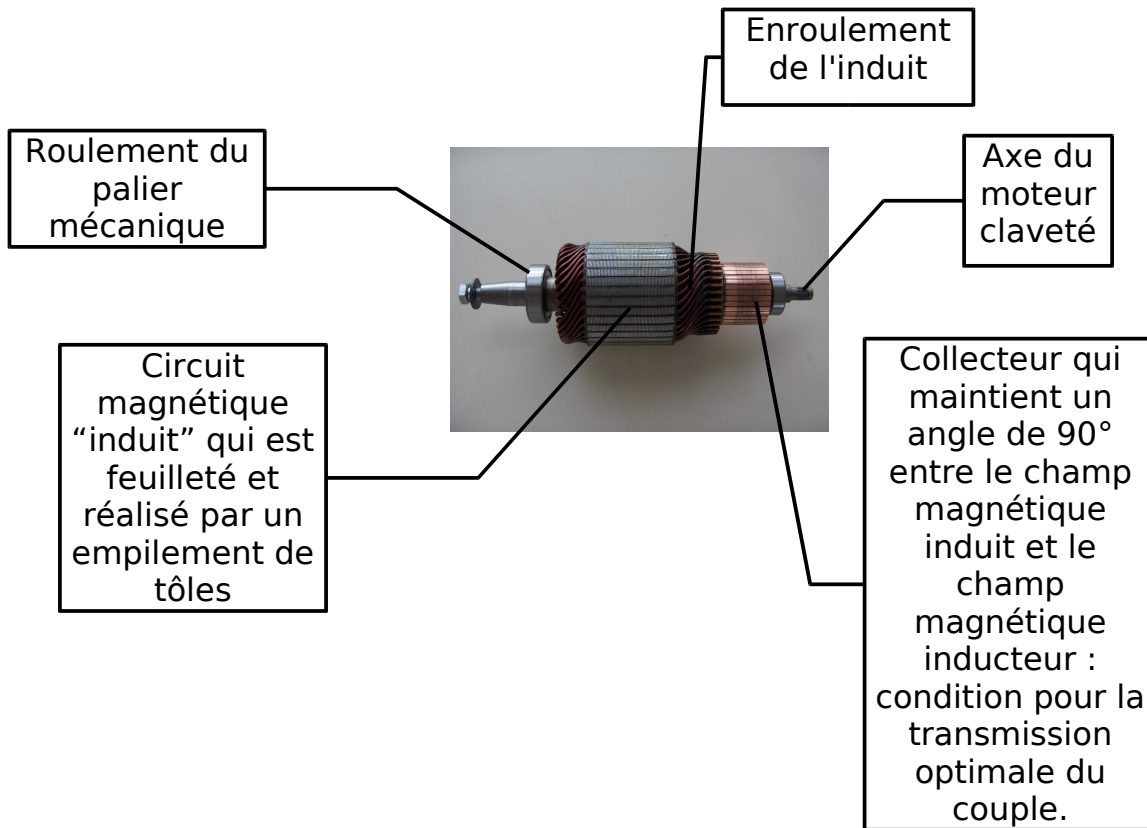
Revenons à la photo d'ensemble pour la commenter d'un point de vue magnétique :



Ce moteur possède 2 paires de pôles inducteurs (Nord – Sud) pour mieux répartir le flux magnétique dans la machine. Les lignes de champ magnétique vont du pôle Nord vers le pôle Sud. La configuration des pôles est donnée pour un sens du courant inducteur. Si le courant est inversé, le pôle Sud devient un pôle Nord et inversement. C'est une possibilité pour inverser le sens de rotation du moteur, mais elle est peu utilisée.

Lorsque la spire, ou section, de l'induit (paragraphe suivant) est sur la « ligne neutre », les forces électromotrices induites dans les conducteurs sont nulles et la spire est en court-circuit par les balais.

## 3. Rotor du moteur courant continu



Le collecteur est constitué de lames de cuivre isolées entre elles. L'isolant est de la mica. L'ensemble balais d'alimentation + collecteur assure la liaison entre les conducteurs tournants et la partie fixe.

Chaque lame est soudée au fil de sortie d'une section et à l'entrée de la section suivante. Une section est un ensemble de conducteurs qui passent sous un pôle Sud et sous un pôle Nord créent par le champ inducteur. La section baigne dans le champ magnétique inducteur.

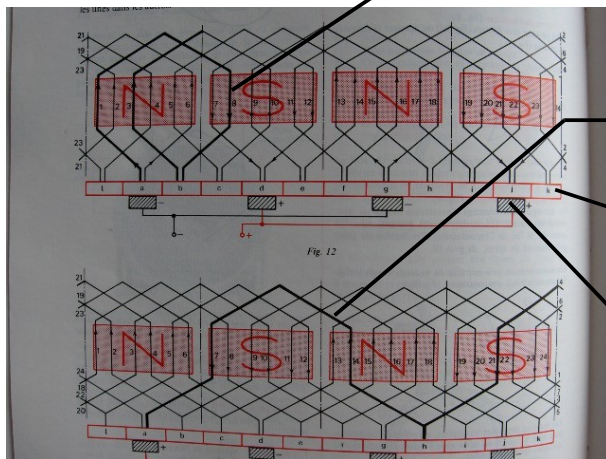




Encoche du rotor qui accueille les sections de l'enroulement d'induit.

Tête de bobine qui est en dehors du champ inducteur actif. Sur les moteurs de forte puissance les têtes de bobine sont frettées à cause de la force centrifuge.

Les deux figures ci-dessous représentent les deux types d'exécution des enroulements de l'induit.



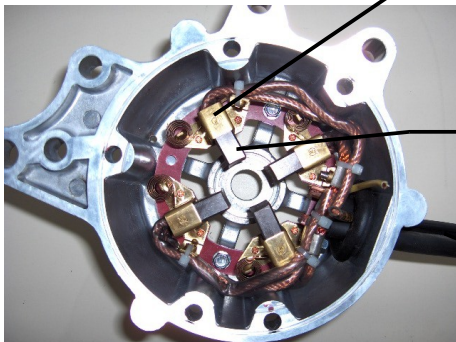
Enroulement imbriqué

Enroulement ondulé

Lame du collecteur

Balais borne + de l'alimentation continue

## 4. Balais et porte balais

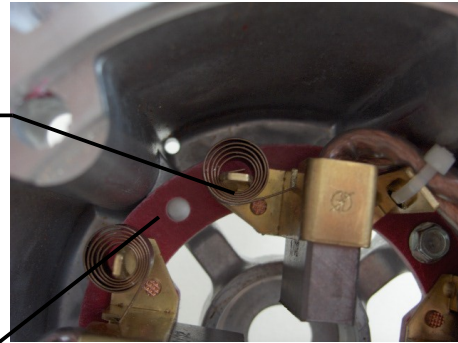


Porte balais relié électriquement par une tresse conductrice au câble d'alimentation

Balais à base de graphite, ni trop dur, ni trop tendre

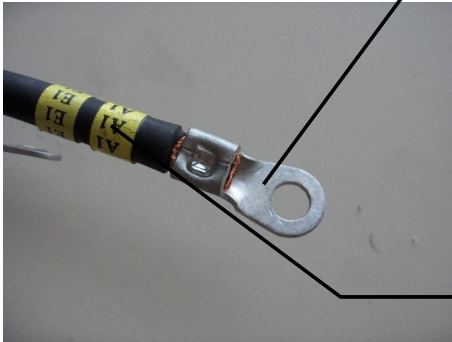
Câble d'alimentation en 16 mm<sup>2</sup>

Systeme à ressort qui assure une pression constante du balais sur le collecteur. Certains moteurs possèdent un capteur qui informe de l'usure du balais.



Isolation électrique de la carcasse du moteur par un support cartonné.

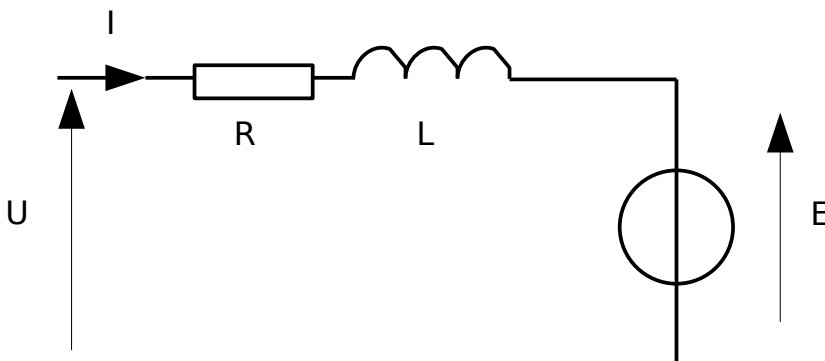
Câble d'alimentation du moteur avec la cosse sertie.



Repère du câble présent sur le schéma électrique et qui identifie clairement le câble.

## III – Relations électriques

### 1. Schéma équivalent



#### 1.1 Force électromotrice

La grandeur clé du moteur courant continu est la force contre-électromotrice E.

Son expression est :

$$E = \frac{p}{a} N n \text{ flux}$$

**p** : nombre de paires de pôles. Dans l'exemple du moteur du Scootelec  $p = 2$ .

**a** : nombre de paires de voies d'enroulement. Ce paramètre dépend de l'exécution du bobinage de l'induit.

**N** : nombre de conducteur dans une section de l'enroulement induit.

**n** : vitesse de rotation du rotor en tr/s

**flux  $\Phi$**  : flux magnétique inducteur créé par un courant inducteur ou un aimant permanent. En général, le flux est constant. L'unité du flux magnétique est le Weber (Wb).

**E** : force contre-électromotrice en Volt (V).

Le rapport  $K_v = pN\Phi/a$  est une donnée constructeur qui s'appelle en générale « constante de vitesse » pour les moteurs de faible puissance.

La relation générale se réduit dans cette situation particulière à :

$$E = K_v.n$$

### 1.2 Les impédances équivalentes

**R** : C'est la résistance totale : câble, balais, lame de collecteur et enroulement d'induit. La résistance s'exprime en Ohm ( $\Omega$ )

**L** : C'est l'inductance de l'enroulement d'induit. Elle intervient dans les régimes transitoires d'alimentation du moteur. L'inductance s'exprime en Henri (H)

**L/R** : la constante de temps électrique du moteur courant continu. Elle intervient pour déterminer les limites de fréquence lors d'une alimentation du moteur par une commande électronique de type hacheur (commande qui sera développée dans un autre cours).

### 1.3 Application de la loi d'Ohm

**U** : tension d'alimentation du moteur en Volt (V)

$$U = E + R.I \text{ en régime continu}$$

Dans le cas d'un régime transitoire la relation devient :

$$U = E + R.I + \frac{L.dI}{dt} \text{ Voir le cours de physique appliquée sur les régimes transitoires.}$$

### 1.4 Application de la loi de la puissance

La puissance électromagnétique est :

$$P_e = E.I \text{ Pe s'exprime en Watt (W).}$$

La puissance absorbée sur le réseau est :

$$P_a = U.I \text{ Pa s'exprime en Watt (W).}$$

La puissance utile est la puissance disponible sur l'arbre moteur. C'est cette puissance qui est donnée dans les catalogues constructeurs.

$$P_u = C. \Omega \text{ Pu s'exprime en Watt (W)}$$

## 1.5 Relations du couple

A partir de la puissance électromagnétique il est possible de déduire la relation du couple électromagnétique transmis dans l'entrefer du moteur.

$C_e = K_c \cdot I$  dans le cas d'un flux constant le coefficient  $K_c$  s'appelle « constante de couple » dans la documentation constructeur.

Le couple utile sur l'arbre moteur peut être déduit de la relation de la puissance utile, soit :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

## 1.6 Rendement

Le rendement du moteur est donné par la relation :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

## 2. Règlage de la vitesse

La relation de la vitesse de rotation déduite de l'expression de la force électromotrice indique les deux possibilités de réglage de la vitesse.

$$n = \frac{U}{(K \cdot \Phi)}$$

$K$  est une constante de construction du moteur : nombre de paires de pôles, nombre de voies d'enroulement, nombre de conducteurs par section.

### 2.1 Action sur la tension d'alimentation

La relation ci-dessus montre que la vitesse est directement proportionnelle à la tension d'alimentation ( $U$ ) lorsque le flux magnétique ( $\Phi$ ) est constant.

La variation de la tension d'alimentation est obtenue par un montage redresseur d'électronique de puissance. Ce montage sera approfondi lors de l'étude des variateurs de vitesse pour moteur courant continu.

### 2.2 Action sur le flux

Lorsque le courant inducteur diminue, le flux magnétique dans le moteur diminue. Cette diminution provoque une augmentation de la vitesse, pouvant aller jusqu'à l'emballement du moteur et sa destruction.

Outre ce risque, la diminution du flux conduit aussi à une diminution du couple moteur qui est directement proportionnel au flux, selon la relation :

$$C_e = K \cdot \Phi \cdot I$$

L'action sur le flux permet une légère survitesse avec une diminution du couple utile. Son utilisation est très spécifique.

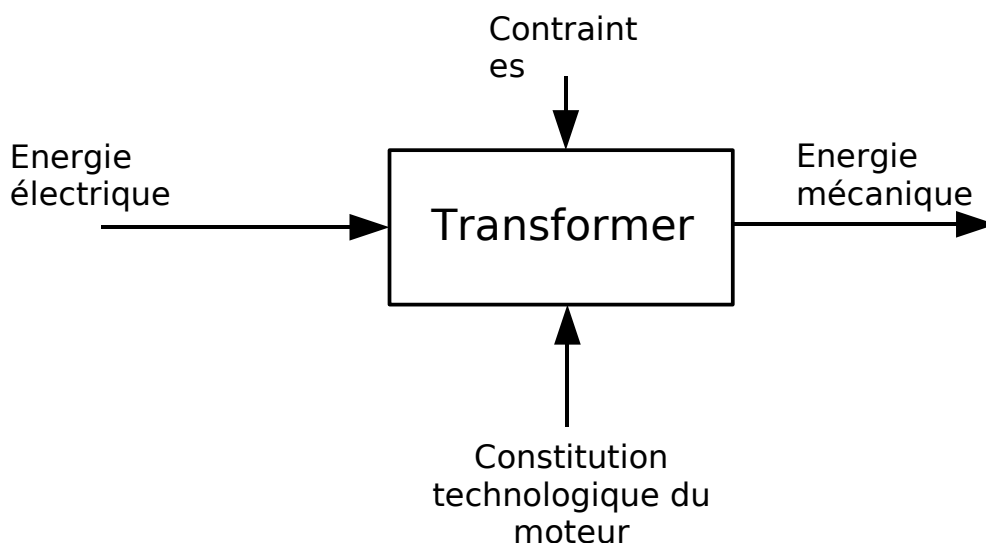
## IV – Décodage de la documentation constructeur

### 1. Actigramme

L'actigramme fonctionnel d'un moteur électrique, rappelé ci-dessous, peut être utilisé pour un décodage rapide de la documentation constructeur.

Cette présentation permet, en un coup d'oeil, de repérer les informations fournies par le constructeur et d'apprécier l'adéquation à la situation étudiée.

L'actigramme est considéré dans ce contexte comme un outil de lecture.



Cours

-

Synthèse

#### 1.1 Energie électrique

L'énergie électrique se caractérise par les grandeurs physiques électriques génériques :

- le type de réseau électrique, indication sur la source de l'énergie électrique : piles, alimentation continue, réseau redressé ...
- la tension ou différence de potentiel (V)
- le courant électrique ou intensité (I)
- la puissance absorbée (W)

La documentation constructeur peut spécifier différents courants suivant l'état de fonctionnement du moteur.

Du côté électrique il faut inclure la dimension sécurité :

- sécurité des personnes : schémas de liaison à la terre TT, IT, TN
- sécurité des biens : protection contre les surcharges, les surintensités, les surtensions

#### 1.2 Energie mécanique

L'énergie mécanique se caractérise par les grandeurs physiques mécaniques génériques :

- le type de charge : charge à couple constant, parabolique, hyperbolique ou linéaire en fonction de la vitesse de rotation
- la vitesse de rotation (rd/s ou tr/s ou tr/min)
- le couple (Nm)
- la puissance utile (W)

Comme pour le courant électrique, la documentation constructeur peut spécifier différents couples suivant l'état de fonctionnement du moteur. Rappelons qu'il existe une relation directe entre le couple et le courant absorbé dans le cas du moteur à courant continu (paragraphe 1.5).

Il existe d'autres paramètres qui spécifient la sortie accouplée à la charge à entraîner :

- les quadrants de fonctionnement : charge entraînée – charge entraînée
- le facteur de marche
- le type de service : continu (S1) à intermittent (S8) conditionne l'échauffement du moteur
- le moment d'inertie ramené sur le rotor du moteur ( $\text{kg.m}^2$ )

### 1.3 Contraintes

Les contraintes sont les conditions qui permettent de remplir la fonction dans les meilleurs conditions. Nous trouvons :

- l'environnement : influences externes, encombrement ...
- la ventilation forcée pour les puissances importantes

### 1.4 Constitution technologique du moteur

Dans cette partie sont regroupés toutes les informations inhérentes à la construction du moteur :

- le rendement
- la résistance ( $\Omega$ ) ou Ohm
- l'inductance (H) ou Henri
- la position de montage
- le nombre de lames au collecteur
- ...

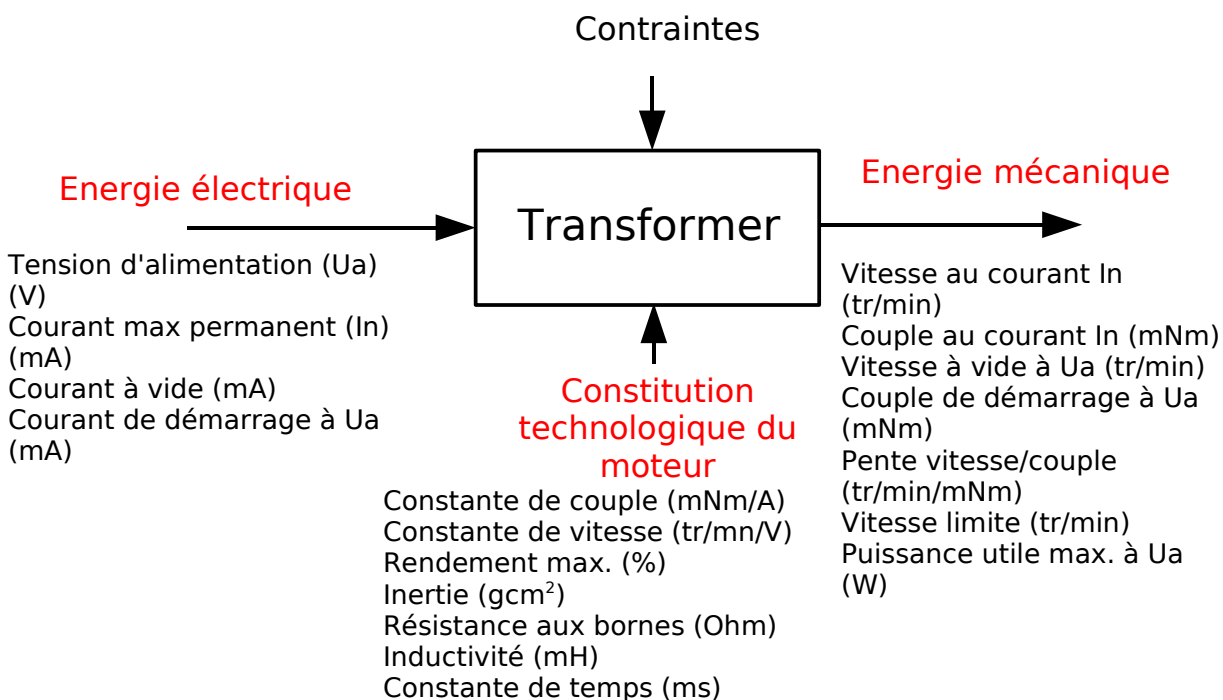
## 2. Exemple pour un moteur courant continu de faible puissance

Extrait du catalogue du constructeur MDP (site : <http://www.mdpmotor.com/>)

Généralités	
• Commutation	Graphite
• Nombre de lames au collecteur	12
• Paliers	Roulements à billes
• Aimants	Ferrite
• Charge axiale maximum (dynamique)	180 N
• Jeu axial minimum	0,15 mm
• Jeu axial maximum	0,15 mm
• Charge radiale maximum	200 N
à une distance de la face de :	20 mm
• Jeu radial	0,015 mm
• Force de chassage maximum (statique)	200 N
• Température ambiante mini de fonctionnement	-20 °C
• Température ambiante maxi de fonctionnement	85 °C
• Température max. rotor	120 °C
• Poids	4000 g

Spécifications techniques			Version
			40 V
1	Tension d'alimentation (Ua)	V	40
2	Vitesse au courant In	tr/mn	2857
3	Couple au courant In	mNm	714
4	Courant max permanent (In)	mA	5950
5	Vitesse à vide à Ua à +/- 10%	tr/mn	3100
6	Courant à vide à +/- 50%	mA	365
7	Couple de démarrage à Ua	mNm	6120
8	Courant de démarrage à Ua	mA	51000
9	Constante de couple	mNm/A	120
10	Constante de vitesse	tr/mn/V	77,5
11	Pente vitesse/couple	tr/mn/mNm	0,34
12	Vitesse limite	tr/mn	5000
13	Puissance utile max. à Ua	W	497
14	Rendement maximum	%	85
15	Constante de temps électromécanique	ms	11,5
16	Inertie	gcm <sup>2</sup>	3200
17	Résistance aux bornes	Ohm	0,54
18	Inductivité	mH	3,78
19	Résistance thermique Boîtier/Ambiant	K/W	1,9
20	Résistance thermique Rotor/Boîtier	K/W	0,85

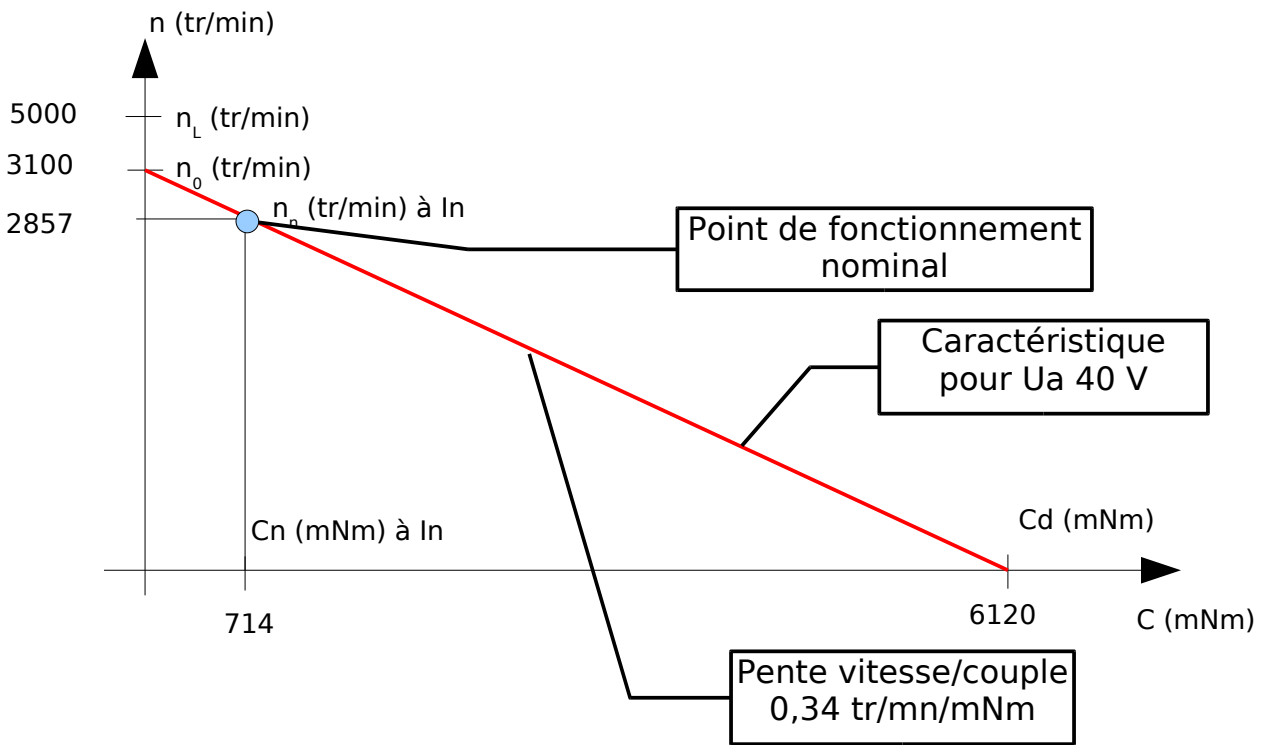
Établissons l'actigramme pour ce moteur.



### 3. Caractéristique Couple – Vitesse

Il est possible à partir des informations ci-dessus de retrouver la modélisation du moteur à courant continu. Nous laissons le soin à l'étudiant d'établir les schémas de la modélisation.

Nous limiterons l'exploitation des informations à la caractéristique Couple – Vitesse.

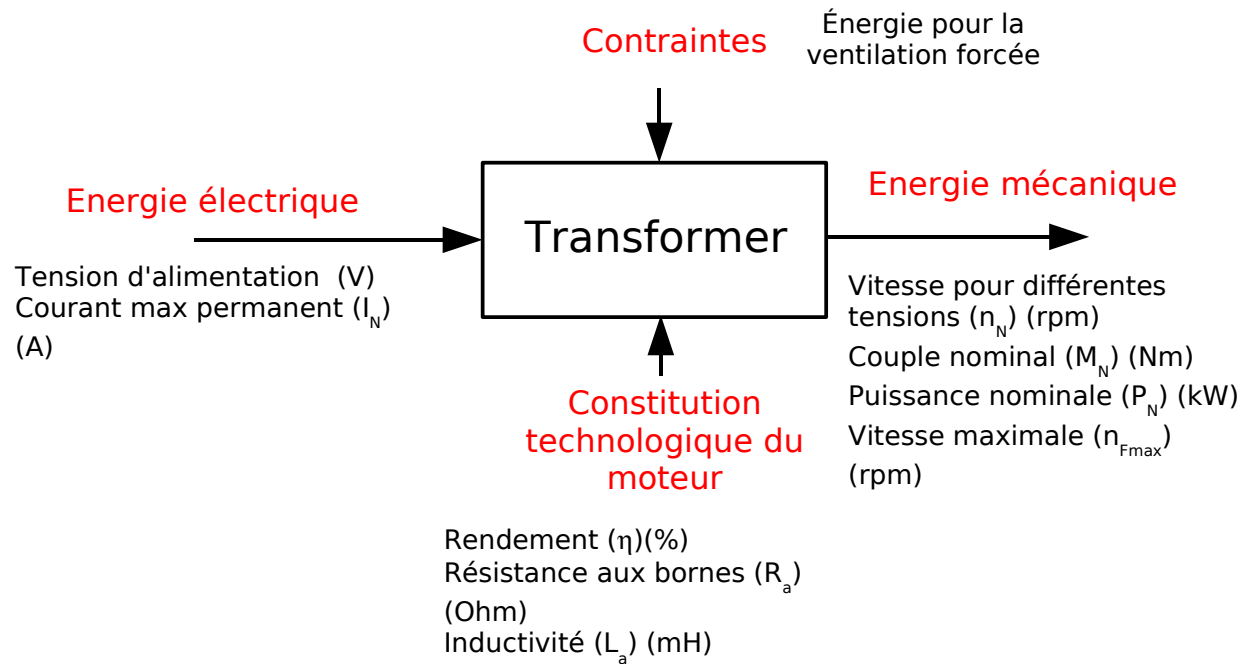


### 4. Exemple pour un moteur courant continu de forte puissance

Extrait du catalogue moteur courant continu du constructeur Siemens.

1GF5, 1GG5, 1GH5 Size 160									
Rated speed $n_N$ rpm	Rated output $P_N$ kW	Rated torque $M_N$ Nm	Maximum field weakening speed $n_{Fmax}$ rpm	Order No.	Rated current $I_N$ A	Efficiency $\eta$ %	Armature Resistance at 120 °C $R_a$ $\Omega$	circuit inductance $L_a$ mH	Series inductance mH
Overall length 4									
685	16	223	1500	1G 5 164-0GB	-6VV1	48,5	76	1,62	21,5
785	18,3	223	1500		-6WV1	48,5	78		-
885	20,6	222	1500		-7MV1	48,3	80		-
1050	24,4	222	1500		-7NV1	48,3	82		-
850	19	213	1800	1G 5 164-0GC	-6VV1	55,5	79	1,18	15
970	21,6	213	1800		-6WV1	55,5	81		-
1090	24,2	212	1850		-7MV1	55,5	83		-
1280	28,5	213	1850		-7NV1	55,5	84		-
1040	23	211	2150	1G 5 164-0GD	-6VV1	65,5	82	0,832	10,5
1180	26,2	212	2150		-6WV1	65,5	83		-
1330	29	208	2150		-7MV1	64,5	84		-
1560	33,7	206	2200		-7NV1	64	86		-

Établissons l'actigramme pour ces moteurs.



Nous constatons que les informations fournies sont moins nombreuses. En effet, les applications de forte puissance nécessitent moins de détails. Les grandeurs génériques sont suffisantes.

### 5. Exemple d'application dans l'aciérie

#### Cahier des charges :

Le pont roulant lève une poche de fonte de 80 tonnes maximum.

La vitesse linéaire de levage est de 0,05 m/s max. Dans un premier temps nous négligeons la phase d'accélération.

Cette situation impose l'utilisation d'une motorisation courant continu pour pouvoir avoir un couple à l'arrêt.



Les rendements mécaniques estimés sont :

- ensemble treuil – poulie – câble = 0,95
- réducteur = 0,85

Le diamètre primitif du treuil est de 30 cm.

Le réseau d'alimentation électrique est de 3 x 400 V et le schéma de liaison à la terre (SLT) : TN

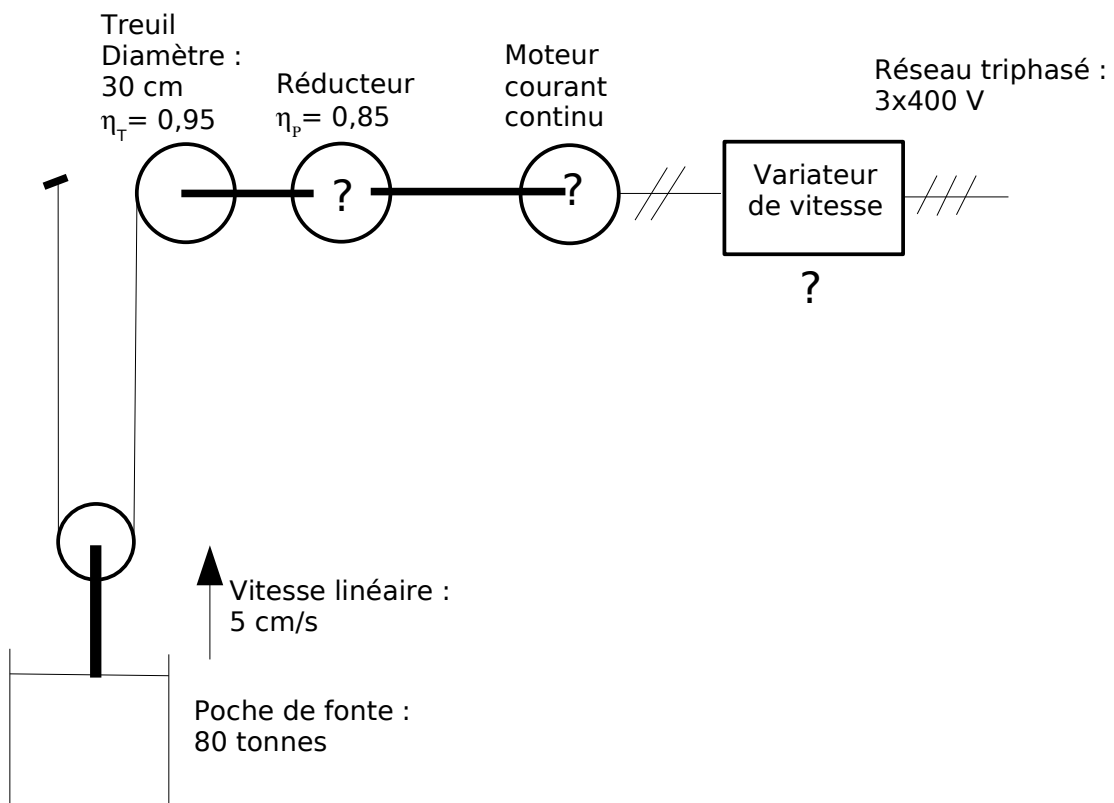
Cours

Synthèse

## Exploitation des informations du cahier des charges :

- Le moteur à courant continu doit être alimenté par un réseau de tension continue, or nous sommes pour l'instant en présence d'un réseau alternatif : 3 x 400 V. Il faudra donc prévoir un convertisseur alternatif/continu : variateur de vitesse.
- Le mouvement de translation linéaire est transformé en mouvement de rotation au niveau du treuil. Là encore pour simplifier l'étude, nous considérerons seulement deux brins dont un fixé au bâti du pont roulant.

## Traduction du cahier des charges sous la forme d'un synoptique :



## Détermination de la puissance au niveau de la charge :

La relation générique de la puissance pour un mouvement linéaire est  $P = F \cdot v$ .

Soit  $P_{charge} = F_{charge} \cdot v_{charge} = M_{charge} \cdot g \cdot v_{charge} = 80000 \cdot 9,81 \cdot 0,05 = 39240 \text{ W}$

## Détermination de la puissance au niveau du treuil :

La puissance au niveau du treuil est :

$$P_{treuil} = \frac{P_{charge}}{(\eta_{treuil})}$$

Soit l'application numérique :

$$P_{treuil} = \frac{39240}{0,95} = 41305 \text{ W}$$

## Détermination de la puissance au niveau du moteur :

La puissance au niveau du moteur est :

$$P_{moteur} = \frac{P_{treuil}}{(\eta_{réducteur})}$$

Soit l'application numérique :

$$P_{moteur} = \frac{41305}{0,85} = 48595 \text{ W}$$

### Détermination de la vitesse de rotation à la sortie du treuil :

La relation générique pour passer de la vitesse linéaire à la vitesse de rotation est :  $v = \Omega \cdot R$

Dans la situation étudiée, la vitesse linéaire du brin mobile est 2 fois plus grande que la vitesse linéaire de la charge, par le fait du point fixe relié au bâti.

$$(\Omega_{treuil}) = \frac{2 \cdot v}{\left(\frac{D_{treuil}}{2}\right)} = \frac{4 \cdot v}{D_{treuil}}$$

Soit l'application numérique :

$$(\Omega_{treuil}) = 4 \cdot \left(\frac{0,05}{0,3}\right) = 0,67 \text{ rd/s}$$

Transformons cette vitesse de rotation en tr/min, grandeur communément rencontrée dans les catalogues constructeurs.

$$N_{treuil} = \frac{(30 \cdot \Omega)}{\pi} = \frac{(30 \cdot 0,67)}{\pi} = 6,4 \text{ tr/min}$$

### Détermination du moto-réducteur + variateur

A ce stade de la résolution nous sommes en présence de l'ordre de grandeur des puissances utiles et de la vitesse de rotation à la sortie treuil.

Nous devons maintenant nous intéresser à l'aspect technologique pour poursuivre. Ce sont en effet les caractéristiques constructeurs qui vont définir les possibles de réalisation.

Recherche dans le catalogue électronique du constructeur Leroy Somer : <http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie2005/>

Pour un réseau d'alimentation triphasé de 3 x 400 V la tension maximale délivrée par un variateur DMV 2322 ou DMV 2342 est de 460 V.

Cette tension va permettre de sélectionner la tension d'induit dans le tableau de choix du moteur courant continu type LSK.

Afin de limiter le rapport de réduction du réducteur, nous allons choisir une vitesse de rotation du moteur proche de 1000 tr/min.

### Présélection du moteur :

Vous trouverez l'abaque de présélection dans le menu « SELECTION » à l'adresse : [http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie2005/2\\_MotCC/B03\\_LSK/Cadres.html](http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie2005/2_MotCC/B03_LSK/Cadres.html)

Les informations issues de cet abaque de présélection pour une tension d'induit de 460 V sont : un moteur type LSK 1604 directement supérieur au point d'intersection (1000 tr/min et 50 kW)

Lycée polyvalent <b>Louis COUFFIGNAL</b> 11, route de la Fédération 67025 STRASBOURG	<h1>Moteur courant continu</h1>	C.P.I 2006
---	---------------------------------	---------------

## Choix du moteur type LSK 1604

Le choix continu avec le menu « SELECTION » pour les moteurs LSK 1604 à l'adresse : [http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie2005/2\\_MotCC/B03\\_LSK/Cadres.html](http://www.leroy-somer.com/catalogueindustrie2005/2_MotCC/B03_LSK/Cadres.html)

Dans cette gamme il existe encore 4 modèles de construction. L'exploration des différents modèles oriente le choix sur le modèle LSK 1604L – LSK 1604CL

Pour la colonne « 460 V » nous trouvons un moteur de « classe de construction = 05 » qui présente les caractéristiques :  $P_u = 50,5 \text{ kW}$  à une vitesse  $N_n = 1060 \text{ tr/min}$ .

La désignation complète du moteur est :

**LSK 1604 L05 460V 1060tr/min 50,5kW IM1001 260V IC06 IP23S**

## Détermination du réducteur

Pour le choix du réducteur il est possible de consulter le site du constructeur MERGER qui fabrique des réducteurs pour fortes puissances et grand rapport de réduction, dans notre cas égal à  $N_{\text{moteur}}/N_{\text{treuil}} = 1060/6,4 = 165,6$  : [http://www.merger.fr/html\\_fr/gamme/gamme.htm](http://www.merger.fr/html_fr/gamme/gamme.htm)

Le présent exemple pourrait être complété par l'étude de l'implantation sur le pont roulant, le calcul de la tension d'induit délivrée par le variateur de vitesse pour obtenir la vitesse désirée, ...

## 6. Bibliographie

Vous trouverez dans la bibliographie ci-dessous des compléments sur le moteur courant continu vus par différents auteurs :

- <http://fr.wikipedia.org/> : portail électricité et électronique  
Complément sur les notions de base en magnétisme et électricité.
- Cours de physique appliqué BTS Électrotechnique 1ère année : machine à courant continu à l'adresse : <http://electrotechnique-couffignal.site2.ac-strasbourg.fr/coursphysique.html>
- Electrosystème 1ère STI de H.Ney – édition Nathan Technique, 290p Janvier 2000
- Electrotechnique : expérimentation et mesures de Freddy Ledoux et Patrick Tirfoin – édition Bertrand-Lacoste, 290p Août 2005
- Electrotechnique : équipements et installations électriques BEP Classe de Terminale – édition Delagrave, 210p Août 2002
- CAP ProElec Préparation et réalisation d'ouvrages électriques – édition Casteilla, 580p Février 2006

Cours

Synthèse