

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE AHMED ZABANA DE RELIZANE



INSTITUT DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

SUPPORT PÉDAGOGIQUE

Cours ; Travaux Dirigés (TDs) et Travaux Pratiques (TPs)

Rédigé par :

Dr. MILOUDI Mohamed

Maitre de Conférences A

mohamed.miloudi@cu-relizane.dz

Intitulé du Polycopié :

DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES INDUSTRIELS

Niveau : Master 2 en Génie Électrique

Option : Électrotechnique Industrielle



"إِنِّي رَأَيْتُ أَنَّهُ لَا يَكْتَبُ إِنْسَانٌ كِتَابًا فِي يَوْمِهِ؛ إِلَّا قَالَ فِي عَدِّهِ

لَوْ غَيَّرَ هَذَا كَانَ أَحْسَنَ، وَلَوْ زِيدَ كَذَا كَانَ يُسْتَحْسَنُ

وَلَوْ قَدَّمَ هَذَا كَانَ أَفْضَلَ، وَلَوْ تَرَكَ هَذَا كَانَ أَجْمَلَ

هَذَا مِنْ أَعْظَمِ الْعِبَرِ، وَهُوَ دَلِيلٌ عَلَى اسْتِيْلَاءِ الْمُتَقَصِّصِ عَلَى جُمْلَةِ الْبَشَرِ"

القاضي الفاضل، أحد الأئمة الكتاب، ووزير السلطان صلاح الدين الأيوبي



Afin de suivre le rythme du développement technologique, j'opte fournir aux étudiants de la deuxième année Master, option : Électrotechnique Industrielle du département de Génie Électrique dans le cadre des programmes officiels, des connaissances fondamentales dans plusieurs domaines, le dimensionnement des systèmes industriels est l'un de ces domaines.

Ce support pédagogique décrit les différents thèmes concernant la structure, le choix, les types de service et dimensionnement des moteurs électriques industriels.

Pour examiner le contenu de ce texte ce manuscrit recense le dimensionnement des systèmes industriels dans le monde de génie électrique, des travaux dirigés, des travaux pratiques et des références bibliographiques auxquelles l'étudiant doit se conformer pour des études approfondis dans cet axe de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	01
-----------------------	----

CHAPITRE I ÉLÉMENTS DES ÉQUIPEMENTS DES MÉCANISMES INDUSTRIELS

I.1	INTRODUCTION	03
I.2	PRINCIPES GÉNÉRAUX SUR LES SYSTÈMES INDUSTRIELS	03
I.2.1	Technologie des machines électriques	03
I.2.2	Lois générales de la conversion électromécanique	08
I.2.3	Champ tournant produit par des courants alternatifs	11
I.2.4	Théorème de Maurice Leblanc	12
I.3	STRUCTURE DES MACHINES ÉLECTRIQUES	14
I.3.1	Stator (inducteur)	16
I.3.2	Rotor (induit)	17
I.3.3	Principes de fonctionnement	18
I.3.4	Régime de fonctionnement d'une machine asynchrone	20
I.3.5	Bilan énergétique	21
I.4	CRITÈRES DE CHOIX D'UN MOTEUR	22
I.4.1	Critères électrique	22
I.4.2	Critères mécanique	23
I.5	GRANDEURS DU CHOIX D'UN MOTEUR DE L'ENTRAÎNEMENT	24
I.5.1	Intérêt de la variation de vitesse	24
I.5.2	Entraînements électriques à vitesse variable	25
I.5.3	Fonctionnement à quatre quadrants	28
I.5.4	Vitesses - Couples - Puissances	29
I.5.5	Moment d'inertie	30
I.5.6	Réducteurs - Multiplicateurs	31
I.6	CONCLUSION	33

CHAPITRE II TYPES DE SERVICE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

II.1	INTRODUCTION	34
II.2	PLAQUE SIGNALÉTIQUE OU PLAQUE D'IDENTIFICATION	35
II.3	TERMES ET DÉFINITIONS	36

II.3.1	Service de marche	36
II.3.2	Équilibre thermique	36
II.3.3	Repos	36
II.3.4	Fonctionnement à vide	36
II.3.5	Facteur de service	36
II.4	TYPES DE SERVICES	36
II.4.1	Service continu - service type S ₁	38
II.4.2	Service temporaire - service type S ₂	39
II.4.3	Service intermittent périodique sans démarrage - service type S ₃	39
II.4.4	Service intermittent périodique à démarrage - service type S ₄	40
II.4.5	Service intermittent périodique à freinage électrique - service type S ₅	41
II.4.6	Service ininterrompu périodique à charge intermittente - service type S ₆	42
II.4.7	Service ininterrompu périodique à freinage électrique - service type S ₇	43
II.4.8	Service ininterrompu à variations périodiques de charge/vitesse - service type S ₈	44
II.4.9	Service à variations non périodiques de charge et de vitesse - service type S ₉	45
II.4.10	Service à régimes constants distincts - service type S ₁₀	45
II.5	VALEURS MOYENNES DE PUISSANCE, COUPLE ET INTENSITÉ	46
II.6	PUISSANCE D'UN MOTEUR ET TYPES DE SERVICES	47
II.6.1	Augmentation de puissance par rapport au S ₁	48
II.6.2	Capacité limite mécanique	50
II.6.3	Réduction de puissance par rapport au S ₁	50
II.7	CONCLUSION	52

CHAPITRE III COURBES DE COUPLES CARACTÉRISTIQUES

III.1	INTRODUCTION	54
III.2	QU'EST-CE QU'UNE CARACTÉRISTIQUE ?	55
III.3	CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT EN CHARGE	55
III.4	ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU COUPLE	58
III.4.1	Évolution typique	58
III.4.2	Conception d'un moteur	61
III.5	COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DE LA VITESSE	63
III.5.1	Couple constant	64
III.5.2	Couple proportionnel	66
III.5.3	Couple parabolique	67
III.5.4	Couple hyperbolique	68

III.6	COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DE L'ANGLE	69
III.7	COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DU PARCOURS	70
III.8	COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DU TEMPS	70
	III.8.1 Couple de charge oscillatoire à une fréquence unique	70
	III.8.2 Couple de charge périodique avec intermittent	71
III.9	COUPLES INITIAL DE DÉCOLLEMENT	71
	III.9.1 Généralités	71
	III.9.2 Couple de démarrage direct	72
	III.9.3 Durée de démarrage	73
	III.9.4 Constante de temps d'inertie d'une machine	73
	III.9.5 Procédés de démarrages	73
III.10	CONCLUSION	76

CHAPITRE IV CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

IV.1	INTRODUCTION	78
IV.2	PUISSANCE DU MOTEUR	80
	IV.2.1 Données catalogue et paramètres d'application	81
	IV.2.2 Détermination de la puissance homologuée	81
	IV.2.3 Données des catalogues	82
	IV.2.4 Conditions de fonctionnement	84
	IV.2.5 Procédure de sélection des moteurs	85
IV.3	DIMENSIONNEMENT A L'AIDE DU COUPLE RÉSISTANT	85
IV.4	CALCUL A L'AIDE DU COUPLE OU DU TEMPS D'ACCÉLÉRATION	86
	IV.4.1 Couple d'accélération	86
	IV.4.2 Temps d'accélération	87
IV.5	CHOIX PRÉLIMINAIRE DU MOTEUR	89
IV.6	VÉRIFICATION DU MOTEUR	90
	IV.6.1 Détermination du type de service de fonctionnement	91
	IV.6.2 Vérification du moteur au démarrage	92
	IV.6.3 Vérification du moteur d'après l'échauffement	93
IV.7	CALCUL A L'AIDE DE LA FRÉQUENCE DE COMMUTATION	95
	IV.7.1 Commutations admissibles avec masse supplémentaire	95
	IV.7.2 Commutations admissibles avec couple de charge	95
	IV.7.3 Commutations admissibles avec charge supplémentaire et moment d'inertie	96
IV.8	SÉLECTION EN CONSULTANT LE CATALOGUE	96
IV.9	COUT DU CYCLE DE VIE	97

IV.10	CONCLUSION	98
-------	------------	----

CHAPITRE V APPLICATIONS DIVERSES

V.1	INTRODUCTION	99
V.2	CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOTEURS ÉLECTRIQUES	100
	V.2.1 Étude des mouvements	100
	V.2.1 Transformation du mouvement	102
V.3	APPLICATIONS INDUSTRIELLES	103
	V.3.1 Dimensionnement du moteur suivant l'alimentation	103
	V.3.2 Comportement en charge : aspect électrique et thermique	103
	V.3.3 Dimensionnement du moteur et l'inertie	105
	V.3.4 Dimensionnement et caractérisation électromagnétique du moteur	105
	V.3.5 Adaptation du bobinage à la tension d'alimentation	105
V.4	CONCLUSION	112

TRAVAUX DIRIGÉS

VI.1	TRAVAUX DIRIGÉS N° 1	113
VI.2	SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 1	114
VI.3	TRAVAUX DIRIGÉS N° 2	116
VI.4	SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 2	117
VI.5	TRAVAUX DIRIGÉS N° 3	119
VI.6	SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 3	120
VI.7	TRAVAUX DIRIGÉS N° 4	121
VI.8	SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 4	122
VI.9	TRAVAUX DIRIGÉS N° 5	124
VI.10	SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 5	125

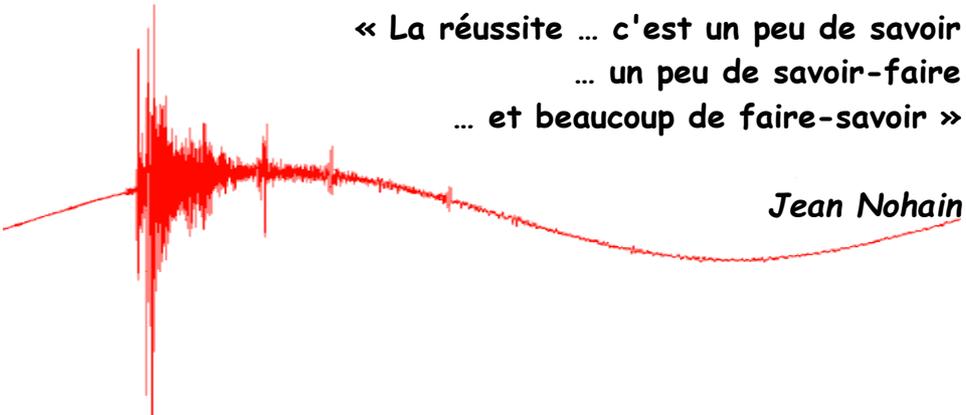
TRAVAUX PRATIQUES

VII.1	TP N° 1 : Étude d'un Monte-Charge	127
VII.2	TP N° 2 : Étude d'un Entraînement à Tapis Roulant	135
VII.3	TP N° 3 : Étude d'une Pompe Centrifuge	142

	<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	146
--	----------------------------	-----

	BIBLIOGRAPHIE	147
--	---------------	-----

INTRODUCTION GÉNÉRALE



« La réussite ... c'est un peu de savoir
... un peu de savoir-faire
... et beaucoup de faire-savoir »

Jean Nohain

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques décennies de recherche, nous pouvons dégager de grandes tendances méthodologiques dans la conception des composants et des systèmes industriels pour le génie électrique. Le système étant défini comme un ensemble de composants interagissant dans un but commun.

Les études avaient pour but d'étudier le contrôle, la commande et le diagnostic. Le système était alors étudié à l'aide de simulations dynamiques (systèmes d'états, approches nodales, etc.). À ce niveau, le composant était défini d'un point de vue fonctionnel. En parallèle, des méthodes de dimensionnement par optimisation se sont développées pour le composant seul, et sur des points de fonctionnement prédéfinis.

Ce polycopié s'adresse aux étudiants de la formation Master 2, pour l'option Electrotechnique Industrielle (ELT). Par extension, ce cours s'adresse à toute personne, étudiants ou chercheurs concernés par le domaine de génie électrique, et qui désirent avoir un document de base ou approfondir leurs connaissances en matière de dimensionnement des moteurs électriques.

Pour cela ce cours a été élaboré dans un esprit pédagogique de cours magistral, de manière à faciliter sa lecture et son assimilation, dans cet ordre j'exploite en plusieurs chapitres avec des travaux dirigés et pratiques.

Le polycopié s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre est une présentation des aspects fondamentaux des systèmes industriels. Je décris d'abord les principes généraux sur les systèmes industriels et les critères de choix d'un moteur. Puis je fais un rappel sur les lois

générales de la conversion électromécanique et de l'électromagnétisme. Nous expliquons le processus et la structure des machines électriques.

Le second chapitre débute avec les notions sur les différents types de service des moteurs électriques pouvant l'affecter, les valeurs moyennes de puissance, couple et intensité ainsi que la capacité limite mécanique sont ensuite présentées.

J'ai consacré le troisième chapitre au rappel sur les courbes de couples caractéristiques dans le monde des machines électriques. Le travail est présenté par étapes successives afin de mieux cerner la problématique. Je concentrerai d'abord sur les caractéristiques de fonctionnement en charge et l'évolution des caractéristiques du couple.

Le quatrième chapitre s'adresse sur le choix et dimensionnement des moteurs électriques. Ce dernier il utilise la méthode classique pour le dimensionnement et l'obtention des différents paramètres géométriques et électriques ainsi que les caractéristiques estimées suite aux contraintes imposées par le cahier des charges.

Le cinquième chapitre, je décris les applications visées sont des applications domestiques (élevateurs, monte-charges, machines-outils, ...) et des applications industrielles (fours électriques, équipements de soudure ...) pour lesquelles l'alimentation électrique se fait par le réseau triphasé 400V/50Hz.

L'avant dernière partie de ce polycopié s'adresse sur les travaux dirigés et la dernière partie s'occupe sur les travaux pratiques.

Enfin, je termine ce polycopié par une conclusion sur le dimensionnement de systèmes industriels.

CHAPITRE I

ÉLÉMENTS DES ÉQUIPEMENTS DES MÉCANISMES INDUSTRIELS



« Le succès c'est d'aller d'échec en échec
sans perdre son enthousiasme »

Winston Churchill

CHAPITRE I

ÉLÉMENTS DES ÉQUIPEMENTS DES MÉCANISMES INDUSTRIELS

I.1. INTRODUCTION

Les progrès scientifiques dans le domaine de l'électrotechnique ont été considérables durant ce siècle : pour ne parler que des machines électriques, nous avons évolué des machines à courant continu vers les machines à courant alternatif : les machines synchrones et asynchrones. Ces progrès sont en partie dus à l'essor considérable qu'a connu l'électronique de puissance.

Plus les équipements électriques deviennent perfectionnés, plus les exigences en matière de sécurité, de bruit et de vibrations deviennent fortes. C'est pourquoi, aujourd'hui, émergent des interrogations à propos de la discrétion électromagnétique qui n'étaient auparavant pas autant mises en exergue. La propulsion électrique est un des domaines qui s'intéresse fortement à la discrétion. C'est d'ailleurs autour de ce thème que gravite notre travail.

Nous présenterons dans ce chapitre, tout d'abord, le contexte initial de cette étude, à savoir les principes généraux sur les systèmes industriels et les critères de choix d'un moteur. Nous donnerons ensuite quelques définitions qui nous semblent essentielles pour la compréhension de cette étude.

I.2. PRINCIPES GÉNÉRAUX SUR LES SYSTÈMES INDUSTRIELS

I.2.1. Technologie des machines électriques

Les machines électriques comportent [1-3] :

1. des *matériaux magnétiques* chargés de conduire le flux magnétique ;
2. des *matériaux conducteurs* chargés de conduire et canaliser les courants électriques ;

3. des *isolants* ;
4. un *contenant* : carcasse d'un moteur, cuve d'un transformateur ;
5. un *système de refroidissement*.

I.2.1.1. Matériaux magnétiques

Les machines soumises à des champs magnétiques variables sont le siège de pertes par courants de Foucault et de pertes par hystérésis, la somme de ces pertes est appelée pertes fer.

Afin de réduire les pertes par courants de Foucault, on feuillète le circuit magnétique. Celui-ci est réalisé par assemblage de tôle de 2 à 3 dixièmes de millimètre d'épaisseur. Ces tôles sont recouvertes d'isolant électrique, cette opération est généralement réalisée en trempant les tôles dans un bain chimique qui réalise une phosphatation de la surface. Cela réduit la circulation des courants induits (les courants de Foucault). Toujours afin de limiter les courants de Foucault, on augmente également la résistivité de l'acier employé en réalisant un alliage acier-nickel-silicium, mais on ne sait pas mettre plus de 3 à 4% de silicium dans l'alliage. Cela permet de réduire la perméabilité des tôles au courant électrique en maintenant la perméabilité aux lignes de champ magnétique [4].

Pour réduire les pertes par hystérésis, les métallurgistes soumettent les tôles, qui serviront à confectionner les circuits magnétiques, à des cycles de laminage à des températures très précises. Le but étant d'obtenir des cycles d'hystérésis très étroits et d'orienter les domaines magnétiques afin d'obtenir une direction où la réluctance est minimale. Les pertes par hystérésis étant fonction de la surface du cycle et de la fréquence on les diminue ainsi considérablement.

Les rouleaux de tôles sont découpés par emboutissage en considérant l'axe de laminage indiqué par le métallurgiste. Le fabricant de tôles soumet celles-ci à des essais et indique les pertes en W/kg pour telle fréquence et tel champ magnétique maximum.

On utilise par exemple :

- des tôles au silicium : alliage de fer et de 3,4 % de silicium, saturée à 2 T, $\mu_r = 6500$;
- des tôles spéciales à grains orientés, saturées à 3 T, $\mu_r = 35000$.

I.2.1.2. Matériaux conducteurs

Le cuivre est généralement utilisé pour réaliser les bobinages des machines électriques car, à part l'argent, c'est le matériau dont la résistivité est la plus faible (Tableau I-1). Cependant, pour les lignes de transport de l'énergie électrique où l'on souhaite disposer de câble assez léger, on utilise l'aluminium. Certaines machines utilisent également l'aluminium en lieu et place du cuivre.

L'or et l'argent sont utilisés pour la réalisation de la surface de certains contacts électriques mobiles. Suivant les applications, on ajoute au cuivre quelques % de chrome, de béryllium, de cadmium ou encore de nickel [4].

Tableau I-1. Résistivité des matériaux conducteurs

Matériaux conducteurs	Résistivité à 20 Celsius en Ohm-mètre [$\Omega \cdot m$]
Cuivre	$1,72 \times 10^{-8}$
Or	$2,04 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2,63 \times 10^{-8}$
Argent	$1,59 \times 10^{-8}$
Laiton	$7,00 \times 10^{-8}$

I.2.1.3. Matériaux isolants et classe d'isolation

Les conducteurs sont isolés avec du papier, du coton, du bois, du PVC, du caoutchouc, des thermoplastiques ... etc. Une fois la machine construite, on l'étuve afin de supprimer l'humidité puis on l'imprègne avec des vernis ou des résines, suit éventuellement une phase de cuisson.

Les différents isolants répondent à un cahier des charges incluant la valeur de la tension électrique à supporter, la température de fonctionnement, les contraintes fonctionnelles et d'agencement de l'isolant dans la machine. Tous les facteurs de vieillissement thermique, électrique, mécanique et

environnementaux ont un impact sur la durée de vie de tout type de machine, mais l'importance de l'un vis-à-vis des autres varie avec le type de machine et les conditions d'utilisation. C'est la qualité de ses isolants qui fait la qualité d'une machine. C'est par vieillissement puis destruction par claquage (amorçage d'un arc à travers l'isolant) que prend fin la vie d'une machine électrique [5].

La norme admet que pour les petites machines basse tension bobinées en vrac, la dégradation est essentiellement due à l'effet de la température et de l'environnement ; les machines de moyennes à grandes dimensions, utilisant des enroulements préformés sont également affectés par la température et l'environnement, mais les contraintes électriques et mécaniques peuvent également constituer un facteur de vieillissement important.

La détermination de la capacité d'une machine à supporter un fonctionnement en régime permanent sous l'effet de la température est donc primordiale. Cette grandeur est définie comme étant sa *classe thermique* ou *classe d'isolation*. Dans notre cas, la classe d'isolation définira la température maximale de fonctionnement des bobinages. Les trois classes les plus utilisées et définies par les normes CEI 85 et CEI 34-1 ont été reportées dans le Tableau (I-2) ; elles fixent les valeurs limites de l'échauffement et de la température des bobinages (au point le plus chaud). La classe la plus courante est la classe F.

Tableau I-2. Classe et température d'isolement [6]

Classe d'isolation	A	E	B	F	H
Température limite °C	110	115	130	155	180

En fonction de la température ambiante dans laquelle fonctionne la machine, il en découle une réserve thermique de fonctionnement. Pour une température ambiante maximale fixée à 40 °C (température généralement prise en Europe), la Figure (I-1) fournit les réserves thermiques d'échauffement disponibles pour les trois classes définies dans Le Tableau (I-2).

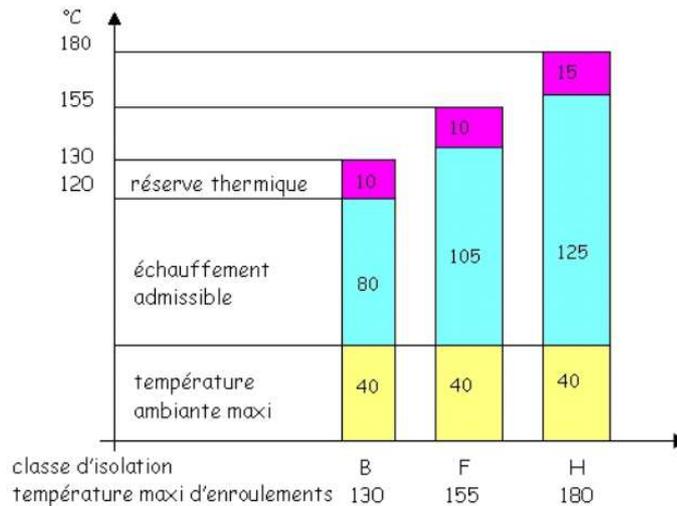


Figure I-1. Classes d'isolation les plus courantes

La réserve thermique permet un échauffement supplémentaire, à caractère transitoire si l'on souhaite augmenter la durée de vie de la machine ou permettant l'existence de points chauds dans les bobinages. Pour une classe thermique donnée, cette réserve peut être augmentée par un dimensionnement approprié produisant un échauffement inférieur au maximum autorisé. A titre d'exemple, la construction des moteurs Leroy Somer de classe F conduit à un échauffement de 80 °C au lieu des 105 °C autorisés. Il en résulte que la réserve thermique passe de 10 à 35 °C (dans des conditions normales d'utilisation : altitude inférieure à 1000 m, alimentation sous fréquence et tension nominales).

La température atteinte est liée à l'échauffement, lui-même lié à la puissance mise en jeu, et à la température ambiante. Il faut également tenir compte d'un déclassement éventuel dû à l'altitude si elle est supérieure à 1000 m, de l'ordre de 10 % par 1000 m. On se réfère en général à une température ambiante de 40 °C, par précaution, on se donne une marge de température de 10 °C (15 °C en classe H). On considère qu'un dépassement de 10 °C de la température maximum divise la durée de vie de la machine par 2 [7].

Les machines peuvent être refroidies par rayonnement, conduction et convection. Dès que la machine est de taille importante, c'est la convection qui permet d'évacuer les pertes vers l'extérieur (l'atmosphère). Pour des machines

de quelques kW, il est possible d'utiliser la convection naturelle : on munit le carter de nombreuses ailettes afin d'augmenter la surface d'échange carter/atmosphère.

I.2.2. Lois générales de la conversion électromécanique

Les machines électriques à courant alternatif (alternateurs, moteurs synchrones et asynchrones) reposent en grande majorité sur le principe du champ tournant, il est donc impératif de bien comprendre cette notion et ses caractéristiques avant d'aborder les différents types.

La première idée qui vient pour créer un champ tournant dans l'air est de prendre un aimant en fer à cheval et de l'entraîner en rotation autour de son axe vertical (Fig.I-2). Entre les pôles nord et sud de cet aimant nous observons que le champ magnétique est lui-même entraîné en rotation.

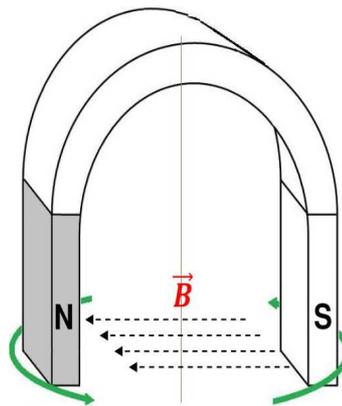


Figure I-2. Champ tournant [1,8]

Soit une aiguille aimantée (pouvant tournée autour d'un pivot) est soumise au champ magnétique de l'aimant en fer à cheval comme il est montré dans la Figure (I-3). En faisant tourner l'aimant avec un dispositif d'entraînement, l'aiguille tournera elle aussi à la même vitesse que l'aimant. Chaque pôle de l'aiguille suit le pôle inverse de l'aimant (Il y a attraction mutuelle des pôles de noms contraires : développement d'un couple moteur). Si l'aiguille est soumise à un couple résistant, elle continuera à tourner à la même vitesse que l'aimant mais avec un retard.

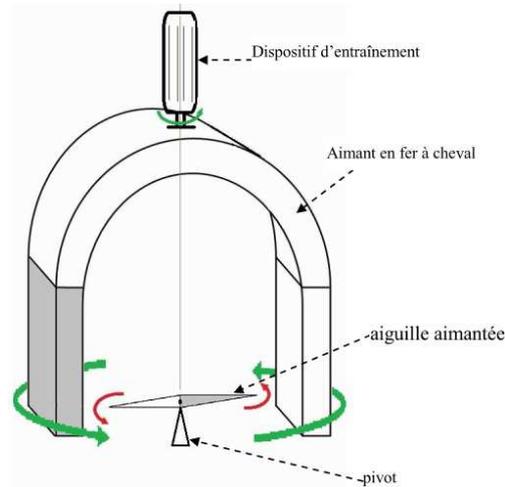


Figure I-3. Action d'un champ tournant sur une aiguille aimantée [1]

Ainsi, un champ tournant peut entraîner à la même vitesse que lui (vitesse dite de synchronisme) une aiguille aimantée, un aimant permanent ou un électro-aimant. Ceci est le principe de la machine synchrone.

Faisons tourner un aimant droit ou un électroaimant en face d'une surface délimitée par le contour d'une spire (Fig.I-4), tel que le pôle nord de l'aimant soit au début perpendiculaire à la surface de la spire ($\theta = 0$) puis parallèle de sorte que le pôle nord sera en face au conducteur AA' ($\theta = \frac{\pi}{2}$). Ensuite le pôle sud qui sera perpendiculaire à la surface ($\theta = \pi$) puis parallèle de sorte que le pôle nord sera en face au conducteur BB' ($\theta = \frac{3\pi}{2}$). Ensuite, l'aimant revient à son état initial ($\theta = 2\pi$).

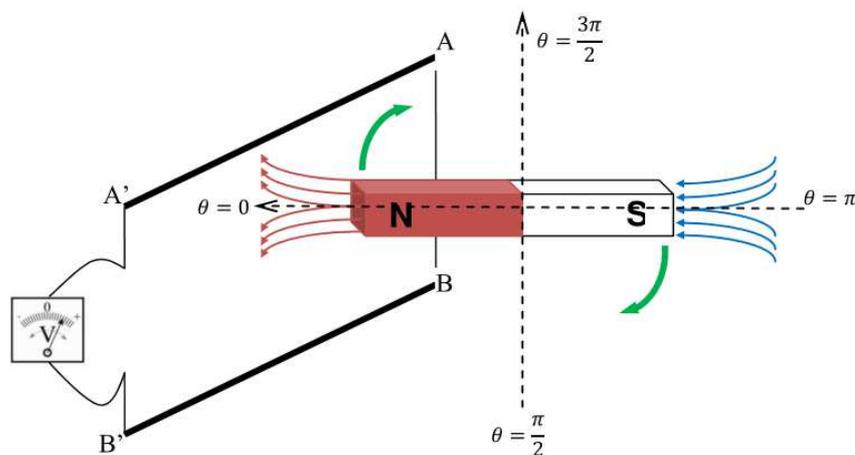


Figure I-4. Force électromotrice [1]

En supposant que la vitesse de rotation de l'aimant est constante, le flux traversant la surface droite de la spire est alternatif et possède la forme donnée par la Figure (I-5).

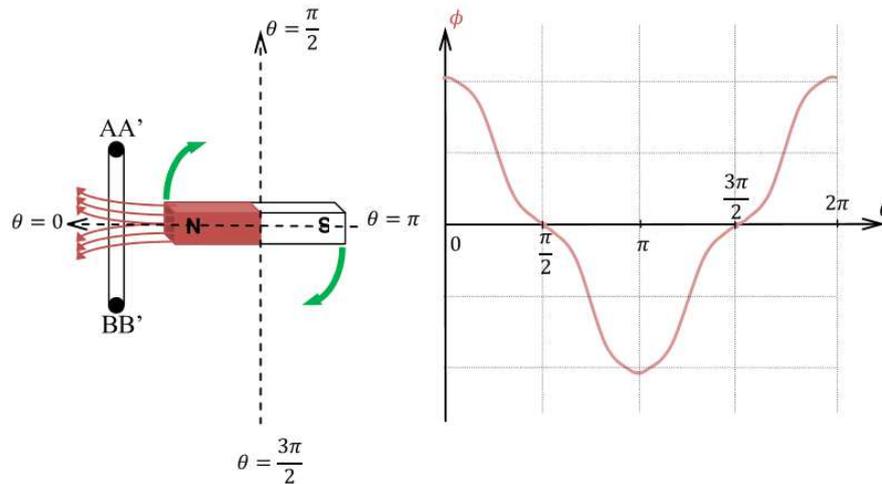


Figure I-5. Forme d'onde du flux traversant la spire [1,8]

La variation du champ magnétique de l'aimant applique une force sur les électrons de la bobine créant ainsi une tension électrique dite force électromotrice. D'après Faraday, tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître à ses bornes une force électromotrice donnée comme suit :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I-1})$$

La forme d'onde de la f.é.m est donc aussi alternative et est en quadrature arrière par rapport au flux comme le montre la Figure (I-6).

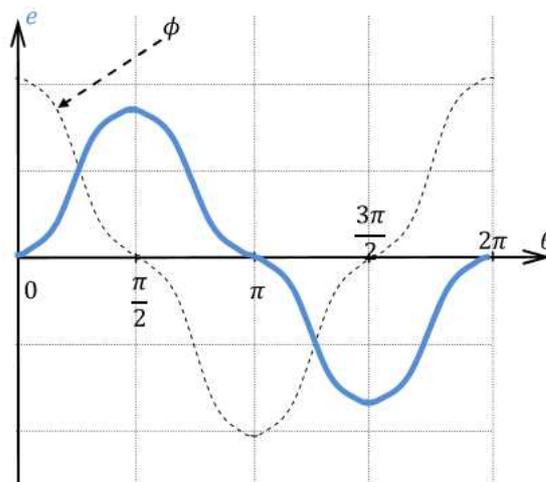


Figure I-6. Forme d'onde de la f.é.m entre les bornes de la spire

Les machines industrielles sont conçues afin que leurs f.é.m soit sensiblement sinusoïdale. Nous supposons donc par la suite que la répartition du flux est sinusoïdale et sa pulsation ω est constante comme suit :

$$\Phi = \Phi_{max} \cos(\omega t) \quad (\text{I-2})$$

Avec $\omega = 2\pi n$ et n est la fréquence de rotation de l'aimant en [tr/s].

Ceci rend la f.é.m égale à :

$$e = \Phi_{max} \omega \sin(\omega t) \quad (\text{I-3})$$

D'où :

$$e = E_{max} \sin(\omega t) \quad (\text{I-4})$$

I.2.3. Champ tournant produit par des courants alternatifs

Alimentons par une source de tension triphasée (u_1, u_2, u_3) équilibrée de fréquence fixe f , trois bobines identiques dont les axes sont à 120° l'un de l'autre (Fig.I-7).

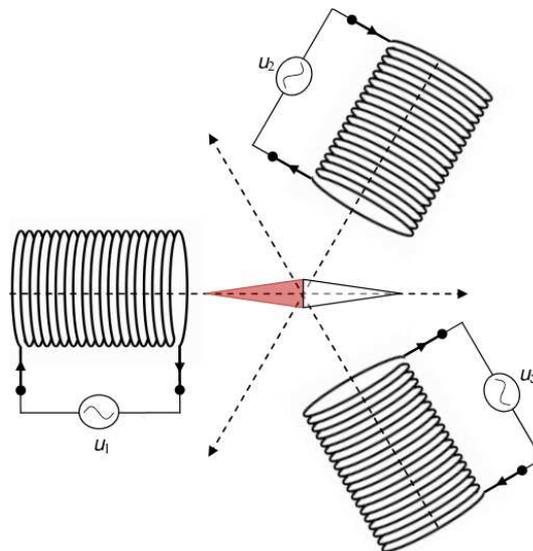


Figure I-7. Action d'un champ triphasé sur une aiguille aimantée

L'aiguille aimantée se met à tourner spontanément et atteint une fréquence de rotation égale à la fréquence d'alimentation f ($n=f$). De même que pour le cas d'un disque métallique au lieu de l'aiguille aimantée, le disque se met à tourner à une fréquence de rotation inférieure à la fréquence d'alimentation f .

I.2.4. Théorème de Maurice Leblanc

Un champ magnétique produisant une induction sinusoïdale de direction fixe ($b(t) = B_{max} \cos(\omega t)$) est équivalent à deux champs tournants en sens inverse l'un par rapport à l'autre à la vitesse angulaire ω et d'induction qui a pour valeur $\frac{B_{max}}{2}$.

Nous pouvons vérifier ce théorème par projection sur les axes vertical et horizontal (Fig.I-8) de l'équation vectorielle suivante :

$$\vec{b}(t) = \vec{b}_1 + \vec{b}_2 \quad (I-5)$$

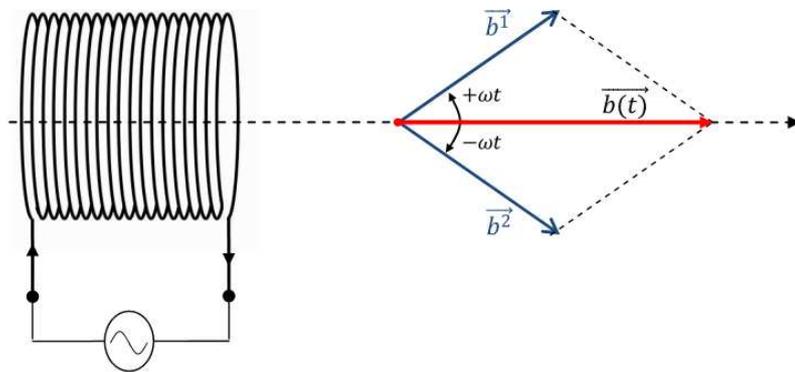


Figure I-8. Décomposition du champ monophasé [1]

Soit un système triphasé de trois bobines identiques décalées l'une de l'autre d'un angle 120° et alimenté par un système de tension triphasé équilibré directe. Les inductions produites par chaque bobine sont alignées sur leurs axes et de valeurs instantanées respectivement :

$$\begin{cases} b_a(t) = B_{max} \cos(\omega t) \\ b_b(t) = B_{max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ b_c(t) = B_{max} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (I-6)$$

Représentons la décomposition de Leblanc de chaque induction au centre des trois bobines à un instant donné ((Fig.I-9), (Fig.I-10) et (Fig.I-11)).

La somme des trois vecteurs d'induction sinusoïdales $\vec{b}_a(t)$, $\vec{b}_b(t)$ et $\vec{b}_c(t)$ égale à la somme des six vecteurs $\vec{b}_a^1, \vec{b}_a^2, \vec{b}_b^1, \vec{b}_b^2, \vec{b}_c^1$ et \vec{b}_c^2 qui sont tournants est ayant la même amplitude $\frac{B_{max}}{2}$.

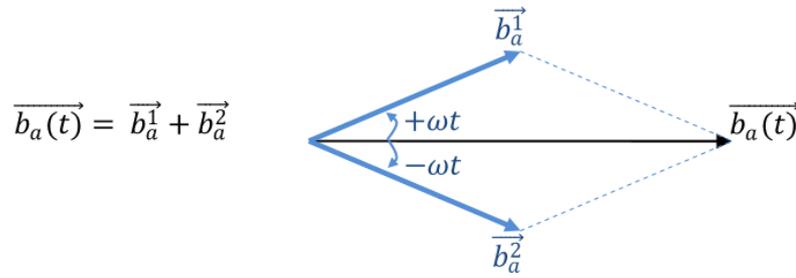


Figure I-9. Décomposition du champ de la phase 1

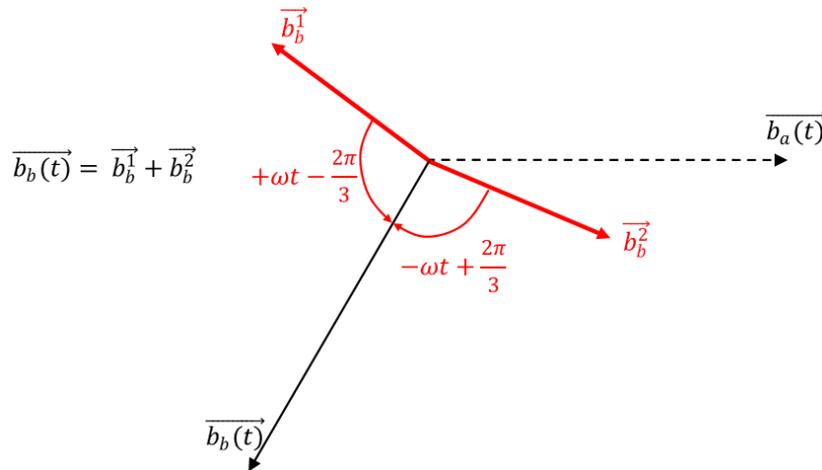


Figure I-10. Décomposition du champ de la phase 2

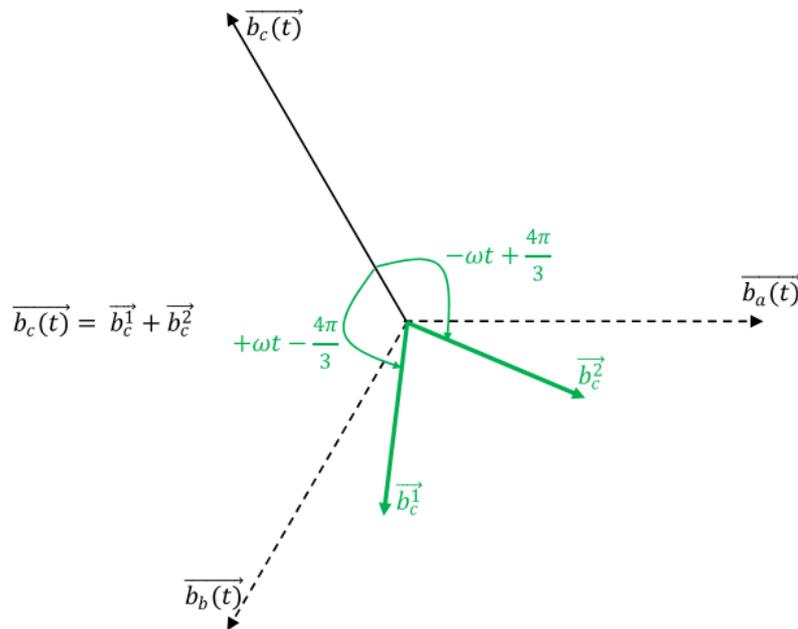


Figure I-11. Décomposition du champ de la phase 3

La somme instantanée des trois vecteurs \vec{b}_a^1 , \vec{b}_b^1 et \vec{b}_c^1 est nulle car ils sont de même amplitude et forment un angle de 120° l'un de l'autre à tout instant (Fig.I-12).

Alors que les vecteurs \vec{b}_a^2 , \vec{b}_b^2 et \vec{b}_c^2 sont tous confondus et forment un vecteur tournant à la fréquence de rotation $n = \frac{\omega}{2\pi}$ dans le sens directe (exactement comme le sens du système triphasé d'induction) et d'amplitude $\frac{3B_{max}}{2}$.

Si le système de tension d'alimentation était triphasé équilibré inverse, on obtient un vecteur tournant à la même vitesse de rotation mais dans le sens inverse.

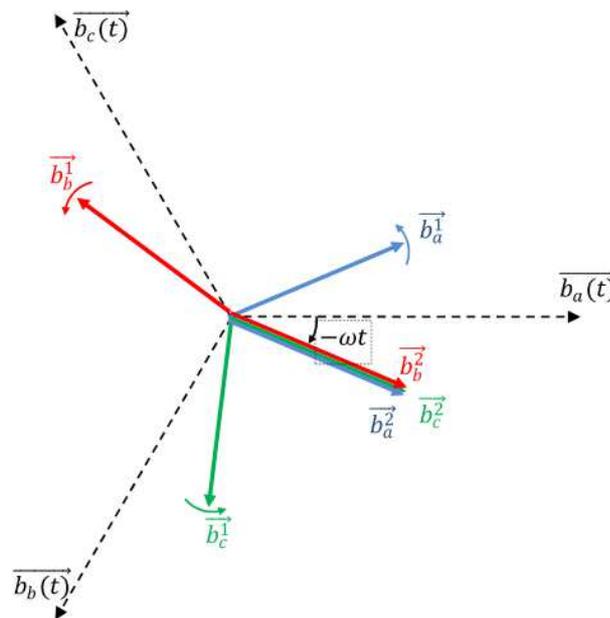


Figure I-12. Décomposition du champ des 3 phases

I.3. STRUCTURE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80 % des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible et de très nombreuses génératrices asynchrones de puissance inférieure à quelques 5 MW fournissent un surplus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires [9].

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude des machines asynchrones, en particulier des moteurs asynchrones triphasés puisqu'ils sont les plus utilisées dans toutes les applications industrielles.

Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice.

Les machines électriques prennent une place prépondérante dans l'industrie, le rôle qu'ils jouent dans les démarches de production industriel est important. On définit une machine électrique comme étant un dispositif de conversion (Fig.I-13) *Mécanique/Électrique (Générateurs)* ou *Électrique/Mécanique (Moteurs)*.

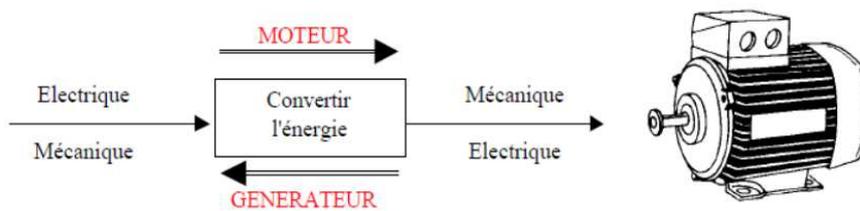


Figure I-13. Moteur et Génératrice

On appelle machine asynchrone, une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui a deux enroulements dont un seul (le primaire) est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω ; alors que la 2^{ème} (le secondaire) est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques, généralement ce type de machines est plus utilisée en moteur asynchrone (en triphasé).

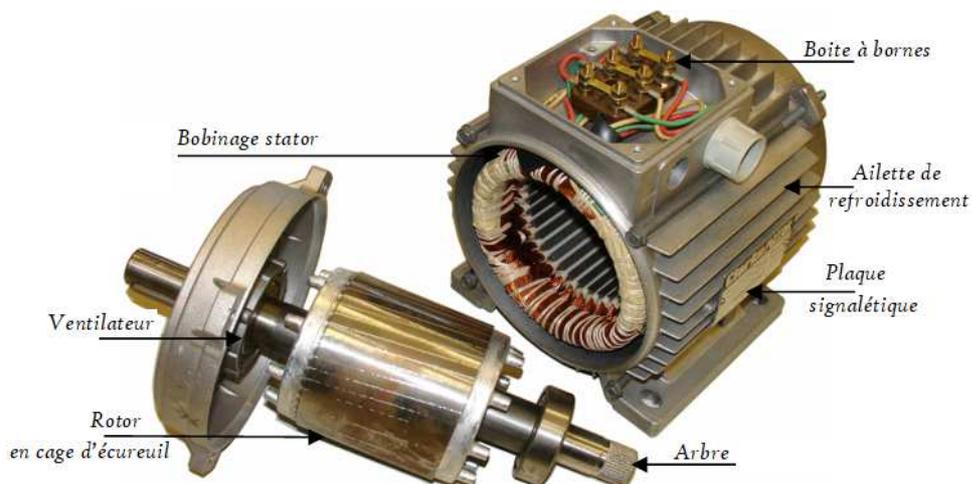


Figure I-14. Moteur asynchrone

Ce type de moteur (Fig.I-14) est basé sur l'enroulement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant et comportant deux armatures coaxiales l'une est fixe appelée *stator* et l'autre est mobile appelée *rotor* ; entre les deux armatures il y a l'entrefer.

I.3.1. Stator (inducteur)

C'est un anneau de tôles encoché à l'intérieur et portant un enroulement triphasé semblable à celui d'une machine synchrone. Cet enroulement est presque toujours relié à la source d'alimentation, il constitue le primaire. L'enroulement est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque à bornes de la machine, ce qui le permet de l'alimenter en couplage Y ou en Δ (Fig.I-16).

Le dispositif plaque à bornes (Fig.I-15) permettant de raccorder le moteur à son alimentation. On n'y retrouve chacune des deux extrémités de chacun des trois enroulements. Lorsque le moteur comporte des accessoires (protection thermique ou résistance de réchauffage), ceux-ci sont raccordés sur des dominos à vis ou des planchettes par des fils repérés [10].

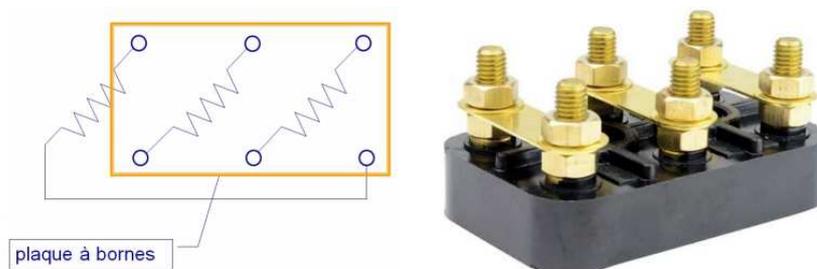


Figure I-15. Plaque à bornes d'un moteur asynchrone triphasé

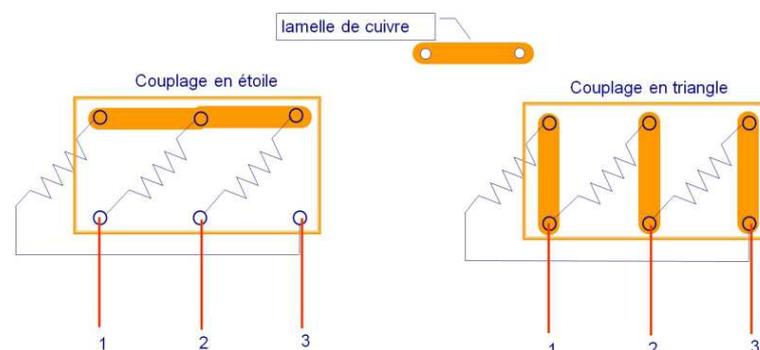


Figure I-16. Couplage du stator en étoile et en triangle d'un moteur asynchrone triphasé

I.3.2. Rotor (induit)

C'est un anneau de tôles rainuré à l'extérieur, concentrique au stator et séparé de lui par un entrefer constant. Le rotor porte un enroulement polyphasé mis en court-circuit constituant ainsi le secondaire. Le courant dans ses enroulements est induit uniquement par le champ statorique, car le rotor n'est lié à aucune source électrique extérieure ; on distingue deux types de rotor [11] :

I.3.2.1. Rotor à bagues (rotor bobiné)

C'est un rotor à pôles lisses qui comporte dans ses rainures, un enroulement identique à celui du stator. Le couplage de cet enroulement est toujours en étoile, le centre de l'étoile n'est pas accessible mais les trois extrémités libres sont reliées à trois bagues calées sur l'arbre (bobinage triphasé) sur laquelle appuyant trois balais (charbon) pour avoir accès aux phases rotoriques par l'intermédiaire d'un rhéostat qui est utilisé pour assurer les meilleures conditions du démarrage (Fig.I-17).

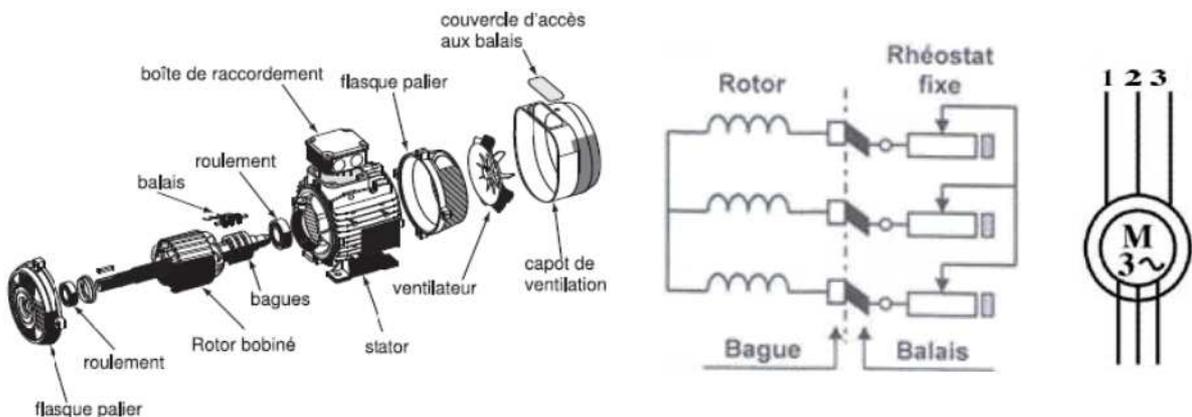


Figure I-17. Rotor à bagues (rotor bobiné)

I.3.2.2. Rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit)

L'enroulement est remplacé par des barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par deux couronnes en cuivre ou en aluminium. Généralement, ces barres sont inclinées afin de réduire les harmoniques de dentures. Le courant qui passe par une barre revient par la barre situé à une distance polaire et il n'est pas nécessaire d'isoler les barres de la

masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres (résistivités différentes : beaucoup plus faible pour le cuivre).

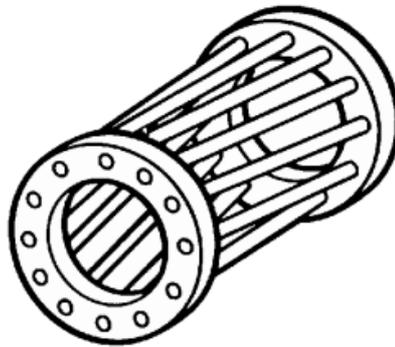


Figure I-18. Rotor à simple cage

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robuste et de coût beaucoup plus faible ; mais ils présentent l'inconvénient qui est l'impossibilité de faire varier la résistance du rotor, ce qui rend défavorable les conditions de démarrages avec la tension du réseau.

I.3.3. Principes de fonctionnement

On dispose sur le stator trois bobines identiques réparties géométriquement à 120° l'une de l'autre. Ces trois bobines alimentées par trois tensions décalées à 120° électrique, issues donc d'un système triphasé, produisent un champ magnétique tournant (champ inducteur), le rotor se trouvant au centre de ce champ. Tant que le rotor a une fréquence de rotation différente que celle du champ inducteur, chaque point de rotor voit une variation de champ. Les conducteurs rotoriques produisent donc une f.é.m. qui, dans le circuit fermé, va donner naissance à des courants induits. Ces courants vont à leur tour produire un champ magnétique induit qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Cela se traduit concrètement par un phénomène de poursuite du rotor vis à vis du champ tournant sans qu'il n'arrive jamais à le rattraper.

La réaction du courant secondaire sur le champ primaire provoquera un couple moteur qui entrainera la mise en mouvement du rotor dans les sens du champ tournant primaire. A fin et à mesure que le rotor augmentera sa vitesse

de rotation, la différence entre la vitesse angulaire du champ tournant et la vitesse angulaire du rotor diminuera. Et la pulsation des courants secondaires diminuera aussi.

Comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants rotoriques prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de Lenz, ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes. Il existe un couple de démarrage, le rotor se met à tourner si le couple est suffisant.

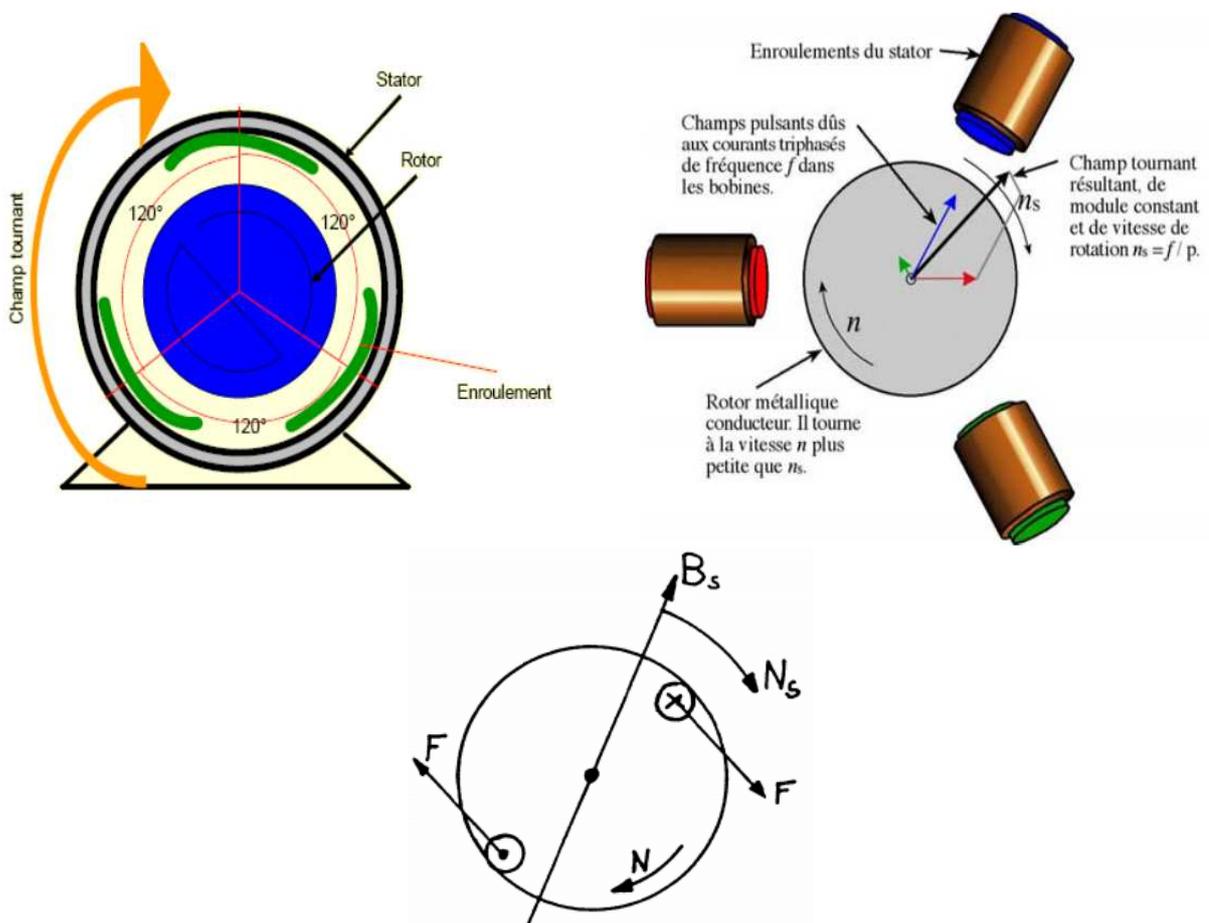


Figure I-19. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Supposons le rotor immobile : il est balayé par cette induction et des forces électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (loi de Faraday).

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I-7})$$

I.3.4. Régime de fonctionnement d'une machine asynchrone

I.3.4.1. Glissement

Soit n_s la vitesse de rotation du champ tournant ou vitesse de synchronisme :

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (\text{I-8})$$

Le glissement est défini par :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

f : fréquence du réseau ;

p : nombre paire de pole ;

n : la vitesse de rotation du rotor (mécanique).

La valeur du glissement relative précise la rapidité du glissement de l'onde de champ statorique par rapport au rotor.

I.3.4.2. Fonctionnement en moteur

Pour le fonctionnement moteur n est en retard par rapport à n_s ($n < n_s$). Les cas limites :

☞ au synchronisme : $n_s = n$ donc $g = 0$;

☞ au démarrage : $n = 0$ donc $g = 1$.

Ce qui donne :

$$0 < g < 1 \quad (\text{I-10})$$

I.3.4.3. Fonctionnement en génératrice

Les cas limites :

☞ au synchronisme : $n_s = n$ donc $g = 0$;

☞ lorsque la vitesse dépasse la vitesse de synchronisme : $n \rightarrow +\infty$ donc $g \rightarrow -\infty$.

n sera en avance par rapport à n_s car le rotor est entraîné par un moteur d'entraînement ($n > n_s$ donc $g < 0$).

I.3.4.4. Fonctionnement en frein électrique

La machine fonctionne en frein, lorsque la vitesse n est négative par rapport à n_s ; c'est-à-dire que le rotor tourne dans le sens inverse par rapport au champ tournant statorique.

Les cas limites :

- ☞ à l'arrêt : $n = 0$ donc $g = 1$;
- ☞ lorsque la vitesse dépasse la vitesse de synchronisme : $n \rightarrow -\infty$ donc $g \rightarrow +\infty$.

Ce qui donne $g \geq 1$.

On peut résumer ce qui suit par la Figure (I-20) :

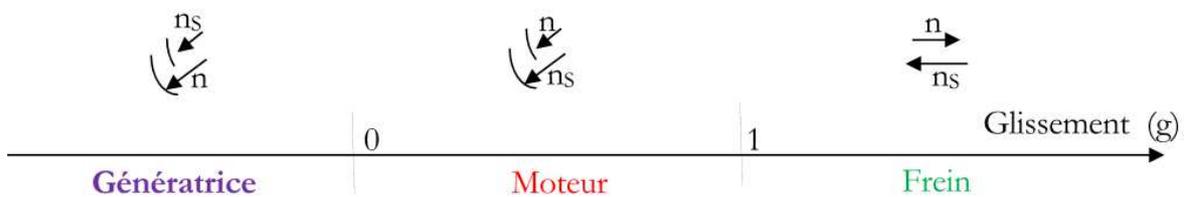


Figure I-20. Régime de fonctionnement d'une machine asynchrone

I.3.5. Bilan énergétique

On peut regrouper sur un diagramme de la Figure (I-21) les diverses pertes de puissance.

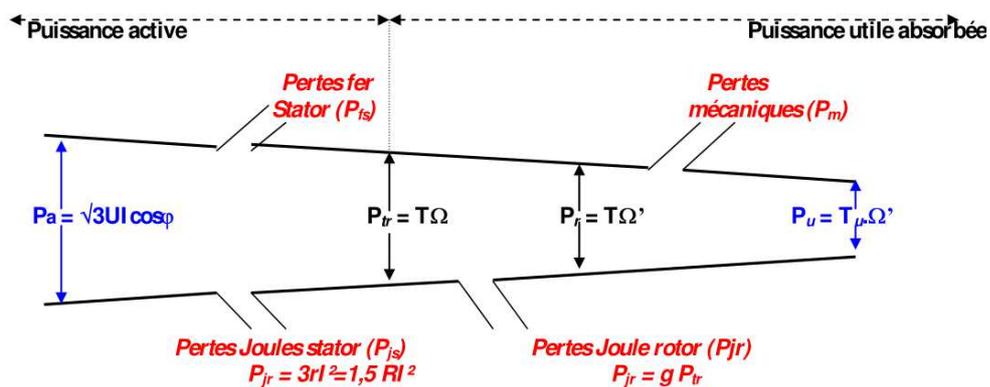


Figure I-21. Bilan de puissance

La pulsation au stator :

$$\omega = p\Omega \tag{I-11}$$

La fréquence au rotor :

$$f_g = gf \tag{I-12}$$

La puissance absorbée :

$$P = \sqrt{3} U I \cos\varphi \quad (\text{I-13})$$

Les pertes constantes :

$$P_C = \text{Pertes fer} + \text{Pertes mécaniques} \quad (\text{I-14})$$

Les pertes Joule au stator :

$$P_{js} = \frac{3}{2} R_a I^2 \quad (\text{I-15})$$

R_a : la résistance entre phase au stator.

La puissance transmise :

$$P_{tr} = P_{abs} - P_{js} - \text{Pertes fer stator} \quad (\text{I-16})$$

Les pertes Joule au rotor :

$$P_{jr} = g P_{tr} \quad (\text{I-17})$$

La puissance utile :

$$P_u = P_{abs} - \text{Pertes} \quad (\text{I-18})$$

Le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (\text{I-19})$$

Le couple électromagnétique :

$$T = \frac{P_{tr}}{\Omega} \quad (\text{I-20})$$

Le couple utile :

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega_s} \quad (\text{I-21})$$

I.4. CRITÈRES DE CHOIX D'UN MOTEUR

I.4.1. Critères électrique

Le choix d'un moteur dépend essentiellement du type de l'alimentation électriques et défient ses caractéristiques. Le choix de l'alimentation du moteur se fait en considérant les éléments suivants [7-12] :

- Le système doit-il fonctionner à différentes vitesses ?
- Doit-on pouvoir régler la vitesse de fonctionnement ?
- Doit-on contrôler la phase de démarrage ?
- Doit-on contrôler la phase d'arrêt ?
- Doit-on en permanence contrôler le couple ?
- **Nature de la tension** : selon la nature de tension de source continue ou alternative, la tension d'alimentation du moteur doit être compatible avec celle du réseau ;
- **Type de la tension alternative** : monophasé, triphasé avec ou sans neutre, multiphasé ;
- **Chute de tension** au démarrage doit être $\leq \pm 5\%$ de la tension réseau ;
- **Fréquence de la tension de source** : selon la fréquence du réseau et l'installation de l'industrie 50 Hz ou 60 Hz ;
- **Rendement nominal** : est alors défini comme le rapport de l'énergie utile ou mesurée en sortie et l'énergie théorique disponible à l'axe ;
- **Type de service** : (ex : S1, le service continu) ;
- **Courant de démarrage** : limiter le courant pendant le démarrage tout en conservant un couple moteur suffisant pour assurer le démarrage. Le mode de démarrage dépend de la puissance installée du réseau d'alimentation (qui définit l'appel du courant admissible) ;
- **Classe de température ou classe d'isolement** : la température maximale de fonctionnement des bobinages (voir le Tableau (I-2)).

I.4.2. Critères mécanique

Il faut que le moteur puisse fournir les grandeurs mécaniques suivantes :

- la **vitesse** à la gamme de vitesse requise pour l'application ;
- le **couple** en fonctionnement normal ;
- le **couple** maximal demandé en régime transitoire (accélération ou décélération). Le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple

résistant de la machine à entraîner. Le couple résistant d'une machine définit l'effort que la charge mécanique oppose au maintien de sa mise en mouvement ;

- efficacité énergétique, performances dynamiques, compacité ;
- investissement, maintenabilité ;
- *mode de refroidissement* : la désignation du mode de refroidissement comporte les lettres IC suivies des chiffres et des lettres représentant la disposition du circuit (Tableau (I-3)), le fluide de refroidissement et les modes de circulation de ce fluide (ex : IC 4 A I A I).

Tableau I-3. Code de refroidissement [13]

IC	<i>International Cooling (refroidissement)</i>
4	<i>Disposition du circuit : machine refroidie par la surface</i>
A	<i>Fluide primaire : Air</i>
I	<i>Mode de circulation du fluide primaire : Auto-circulation</i>
A	<i>Fluide secondaire : Air</i>
I	<i>Mode de circulation du fluide secondaire : Auto-circulation</i>

Ces grandeurs seront lues sur les profils de vitesse et de couple obtenus par application du principe fondamental de la dynamique.

I.5. GRANDEURS DU CHOIX D'UN MOTEUR DE L'ENTRAÎNEMENT

I.5.1. Intérêt de la variation de vitesse

Dans l'industrie, plus de la moitié de l'énergie électrique est utilisée pour la production de la force contre électromotrice destinée aux entraînements électriques à vitesse variable. Dès lors, la diversité de ces applications soutenues avec la recherche des solutions optimales entre performances au sens automatique et au sens énergétique en font un axe de recherche tant convoité aussi bien chez les scientifiques que les industriels.

Ces dernières décennies, les progrès enregistrés dans les technologies de l'électronique de puissance et de la microinformatique permettent l'utilisation

des machines à courant alternatif dans les applications à vitesse variables. Ainsi, il devient possible de contrôler à haute dynamique des systèmes de plus en plus puissants, de conception compacte et de rendement élevé. Désormais, les moteurs électriques sont excellents pour une variété de raisons :

- Gamme de puissance étendue : du Watt au Méga-Watt (pompes hydrauliques à couple élevé $> 10^6$ Nm, les laminoirs, etc) ;
- Gamme de vitesse variant de zéro jusqu'à des vitesses $> 10^5$ tr/min (centrifugeuses) ;
- Fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse avec les possibilités de récupération d'énergie ;
- Rendement élevé, spécialement en contrôle bouclé ;
- Disponibilité immédiate pour la mise en marche sans aucune étape préliminaire de marche en ralenti ou de préchauffage ;
- Puissance-massique élevée avec plus de fiabilité et de durée de vie ;
- Possibilités de surcharges transitoires relativement élevées ;
- Couple continu à faibles vibrations ;
- Adaptation environnementale (conditions ambiantes, submergées dans les liquides dangereux ou radioactifs, etc.) ;
- Maniabilité des commandes électriques avec réalisation de meilleures performances possibles (énergétiques et automatiques).

I.5.2. Entraînements électriques à vitesse variable

Actuellement l'industrie utilise la motorisation électrique à vitesse variable pour optimiser des processus fabrication, améliorer l'efficacité énergétique, augmentation la cadence de production, diminuer le temps de transport des voyageurs et des marchandises, et ... etc. On peut citer le contrôle du débit d'une pompe, la vitesse de coupe ou d'avance des machines-outils, la vitesse des systèmes de transport (train, tramway, TGV, ...).

Les entraînements électriques sont composés des éléments suivants [3] :

- ⊙ Source d'énergie ;
- ⊙ Convertisseur de puissance, qui permet d'adapter la source électrique primaire au moteur ;
- ⊙ La commande et le réglage qui assurent le contrôle du comportement dynamique du système (positionnement, vitesse, courant, couple, etc.) ;
- ⊙ Le moteur, défini par ses caractéristiques externes et de réglage ;
- ⊙ Le ou les capteurs qui fournissent les informations nécessaires au contrôle ;
- ⊙ La transmission, qui permet d'adapter le mouvement (conversion tournante-linéaire, par exemple) la vitesse, la résolution ou la dynamique du système ;

Pour bien choisir un système d'entraînement à vitesse variable, il est nécessaire de connaître les contraintes imposées par la charge à l'ensemble source d'énergie-convertisseur-machine électrique.

Selon la nature de la source d'énergie, on peut classer deux types d'entraînement électrique :

- ☞ À *courant continu* : leur vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation ;
- ☞ À *courant alternatif* : leur vitesse est proportionnelle à la fréquence d'alimentation.

1.5.2.1. Commandes DC à vitesse variable

Les commandes DC d'une machine électrique exigent un convertisseur de puissance capable de réaliser le passage de la tension du réseau alternative ou d'une tension continue constante (batterie d'accumulateurs) à une tension de commande réglable en amplitude et variable, comme le montre sur la Figure (I-22) [7].

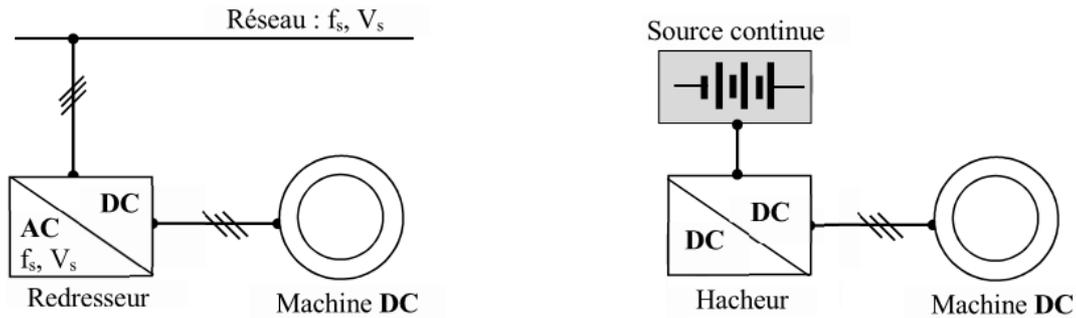


Figure I-22. Commande réglable de la vitesse en mode DC

I.5.2.2. Commandes AC à vitesse variable

Les commandes AC d'une machine électrique exigent un convertisseur de puissance capable de réaliser le passage de la tension du réseau à amplitude et fréquence constantes à une tension de commande réglable en amplitude et en fréquence est souvent exécutée en deux étages (AC-DC et DC-AC), comme le montre la Figure (I-23).

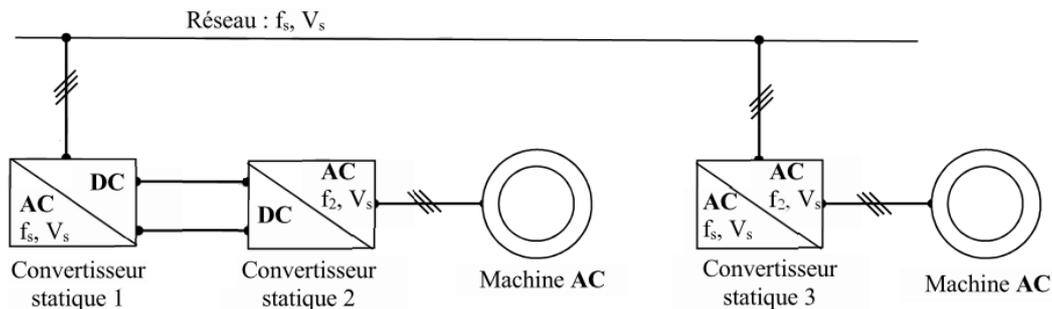


Figure I-23. Commande réglable de la vitesse en mode AC

Le convertisseur du côté réseau (AC-DC) est un redresseur contrôlé (à thyristors) ou non (à diodes). Celui du côté machine (DC-AC) est un onduleur pouvant produire des tensions alternatives d'amplitude et de fréquence variables. Ce convertisseur à deux étages peut être réversible, dans le cas de la génération d'énergie. Il est assez développé dans les commandes DC d'une machine électrique exigent un convertisseur de puissance capable l'industrie pour les différents types de machines d'autant plus que les cyclo-convertisseurs (à un seul étage de conversion) sont maintenant disponibles [8].

I.5.3. Fonctionnement à quatre quadrants

Les deux paramètres définissent le fonctionnement des moteurs sont le couple et la vitesse. Le couple dépend de la charge qui peut être entraînée ou entraînée. Le signe de la vitesse dépend du sens de rotation du moteur.

Lorsque le moteur entraîne une charge mécanique, il reçoit de l'énergie et la transforme en travail mécanique. Lorsque l'application le permet, la charge peut restituer de l'énergie mécanique. Souvent l'énergie récupérée correspond à l'inertie des masses en mouvement (Fig.I-24).

Lors de cette phase l'énergie est renvoyée au réseau électrique ou dissipée en chaleur dans un système de freinage rhéostatique par exemple.

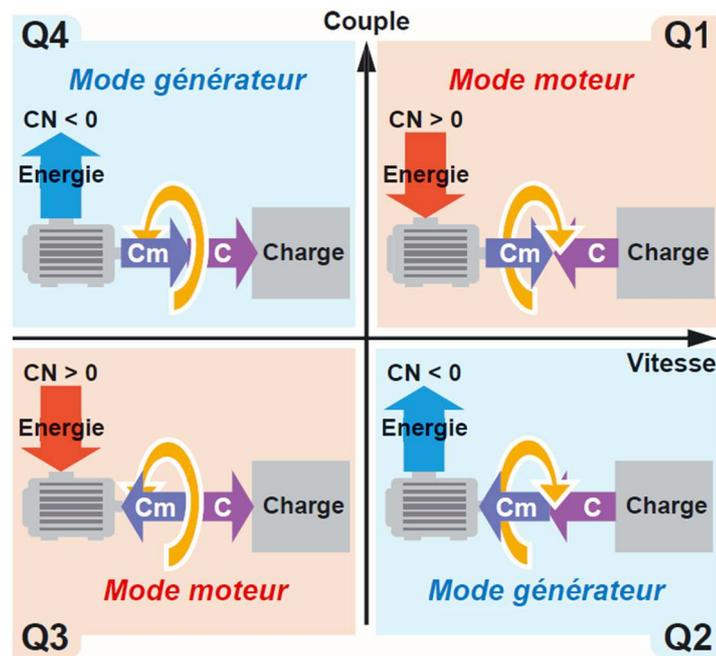


Figure I-24. Fonctionnement à quatre quadrants

Les variateurs de vitesses ont plusieurs fonctions parmi lesquelles (Fig.I-25) :

- ⊙ Le *démarrage* : le moteur passe de l'arrêt à la vitesse de consigne en un temps qui dépend de la constante du temps du système, en évitant les pics d'intensité excessifs ;
- ⊙ La *variation de vitesse* : la variation de la vitesse de rotation par accélération ou décélération en un temps donné ;

- ⊙ La *régulation* : la vitesse de rotation du moteur est maintenue fixe indépendamment des variations de la charge ;
- ⊙ Le *freinage* : le moteur passe d'une vitesse donnée à une vitesse inférieure ou à l'arrêt ;
- ⊙ L'*inversion du sens de rotation* : Le moteur peut tourner dans les deux sens de rotation ;
- ⊙ La *recupération d'énergie* : Lors du ralentissement ou du freinage le moteur peut transformer l'énergie mécanique en énergie électrique (mode générateur).

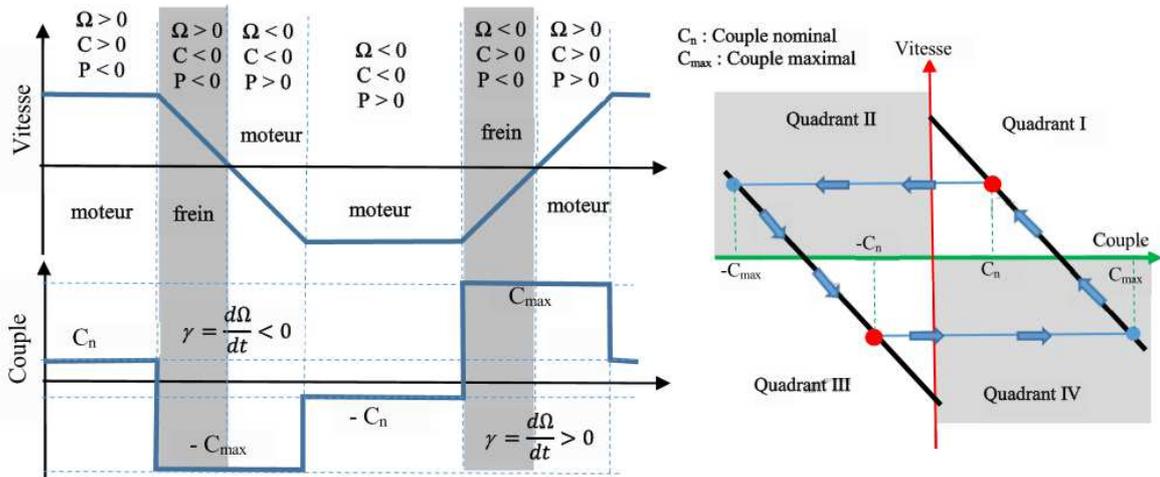


Figure I-25. Régimes de fonctionnement des moteurs électriques

I.5.4. Vitesses - Couples - Puissances

Le choix d'un moteur dépend essentiellement du type de charge : *couple, vitesse, accélération, puissance, moment d'inertie* et le cycle de fonctionnement (Fig.I-26).

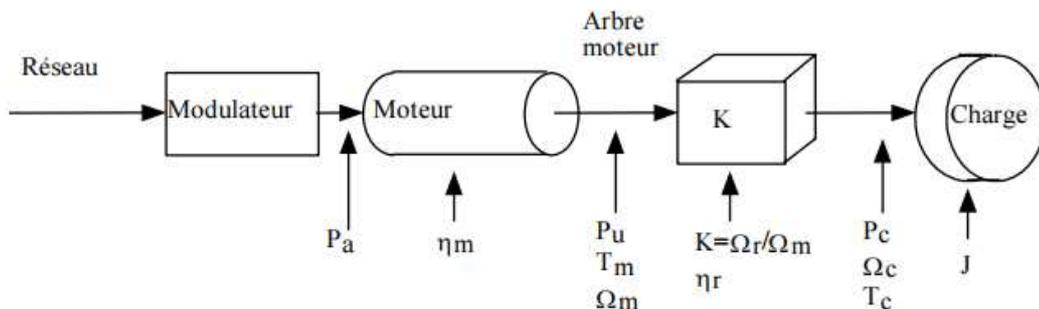


Figure I-26. Chaîne moteur

Avec :

P_a : la puissance absorbée par le moteur ;

η_m : le rendement du moteur :

$$\eta_m = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I-22})$$

P_u : la puissance utile fournie par le moteur sur l'arbre :

$$P_u = C_m \Omega_m \quad (\text{I-23})$$

C_m : le couple utile sur l'arbre du moteur ;

Ω_m : la vitesse de rotation de l'arbre du moteur ;

K : le rapport de réduction du réducteur :

$$K = \frac{\Omega_m}{\Omega_c} \quad (\text{I-24})$$

η_r : le rendement du réducteur :

$$\eta_r = \frac{P_c}{P_a} \quad (\text{I-25})$$

P_c : la puissance demandée par la charge ;

C_c : le couple résistant de la charge ;

Ω_c : la vitesse de rotation de la charge ;

J : le moment d'inertie.

I.5.5. Moment d'inertie

L'inertie caractérise les masses en mouvement (paramètre dynamique). C'est par son inertie qu'un système s'oppose aux changements de vitesse que l'on veut lui imposer. La grandeur physique associée à l'inertie est le moment d'inertie J , qui s'exprime en kg.m^2 (en régime établi la vitesse est constante. Donc le couple d'accélération n'existe plus).

$$C_m = C_a + C_r \quad (\text{I-26})$$

$$C_a = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{I-27})$$

Avec :

C_m : couple moteur ;

C_a : couple accélérateur ;

C_r : couple résistant opposé par la charge ;

J : moment d'inertie ;

Ω : vitesse de rotation.

I.5.6. Réducteurs - Multiplicateurs

Suivant l'utilisation qui est faite d'un *moteur asynchrone* (moteur triphasé ou monophasé), il est parfois nécessaire de *réduire* sa vitesse de rotation, ce qui a pour effet d'*augmenter* son couple [9].

Si vous avez besoin d'une réduction de vitesse importante, il vous faut installer un *réducteur* sur votre moteur électrique. Il existe également des moteurs asynchrones sur lesquels sont déjà intégrés des réducteurs, appelés *motoréducteurs* (Fig.I-27).

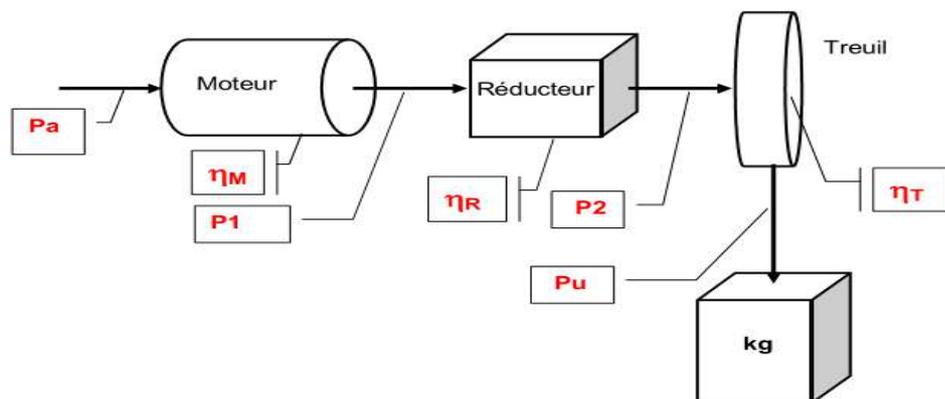


Figure I-27. Réducteur de vitesse

Une transmission de puissance est installée entre un moteur et une machine à commander. Un moteur à vitesse de fonctionnement unique et à couple nominal unique est utilisé, dans la majorité des cas, qu'il soit électrique, thermique, hydraulique ou pneumatique, car c'est la solution économiquement acceptable. Ces deux caractéristiques évoluent entre deux valeurs voisines : vitesse en charge ($n_m \pm \Delta n_m$), couple en charge ($C_m \pm \Delta C_m$), les variations

acceptées se situant entre 2 % et 10 % suivant le type de moteur et le rendement énergétique souhaité.

La machine à commander fonctionne en général à vitesse et à couple uniques dits caractéristiques d'utilisation : $(n_s \pm \Delta n_s)$, $(C_s \pm \Delta C_s)$, avec des variations de l'ordre de 2 % à 10 %.

Il est donc nécessaire d'adapter les caractéristiques du moteur à celles de la machine et pour cela l'élément d'adaptation entre moteur et machine est un *réducteur de vitesse* ou un *multiplicateur de vitesse* de rapport \mathfrak{R} constant. Il se nomme aussi réducteur de couple ou multiplicateur de couple de rapport constant \mathfrak{R} avec :

Rapport de réduction \mathfrak{R}_r :

$$\mathfrak{R}_r = \frac{n_m}{n_s} \quad (\text{I-28})$$

Rapport de multiplication \mathfrak{R}_m :

$$\mathfrak{R}_m = \frac{n_s}{n_m} \quad (\text{I-29})$$

Différents types de transmissions existent : mécaniques, hydrauliques, pneumatiques, électriques, etc ... Parmi les transmissions mécaniques, on rencontre les roues de friction, les poulies et courroies, les roues dentées et chaînes et les engrenages, utilisables suivant les critères de fonctionnement imposés.

Un réducteur sert à réduire la vitesse d'un moteur (hydraulique, pneumatique, thermique, électrique) avec transmission de la puissance motrice vers une machine réceptrice en absorbant le moins d'énergie. Il permet d'augmenter le couple moteur afin d'entraîner en rotation un organe récepteur sous l'effet d'un nouveau couple.

Le réducteur de vitesse est choisi pour réduire la vitesse des moteurs à notre besoin. Dans le même temps il pourra multiplier le couple fourni par le moteur (Fig.I-28).

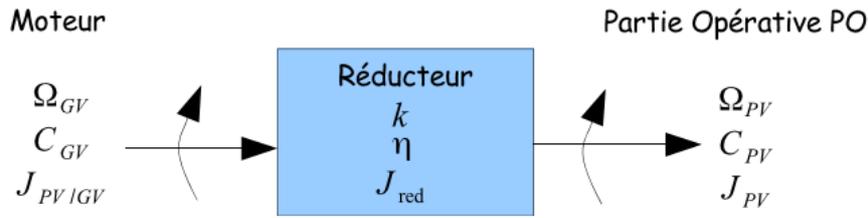


Figure I-28. Réducteur de vitesse

Rapport de réduction \mathfrak{R}_r :

$$\mathfrak{R}_r = \frac{\Omega_{GV}}{\Omega_{PV}} = \frac{n_{GV}}{n_{PV}} \quad (\text{I-30})$$

Conservation de la puissance :

$$\eta = \frac{P_{GV}}{P_{PV}} \quad (\text{I-31})$$

Relation entre les couples :

$$\eta \mathfrak{R}_r = \frac{C_{PV}}{C_{GV}} \quad (\text{I-32})$$

Conservation de l'énergie :

$$\eta = \frac{E_{c_{PV}}}{E_{c_{GV}}} \quad (\text{I-33})$$

Inertie PV (Petite Vitesse) ramenée coté GV (Grande Vitesse) :

$$E_C = \frac{1}{2} J \Omega^2 \quad (\text{I-34})$$

$$\eta \mathfrak{R}_r^2 = \frac{J_{PV}}{J_{PV/GV}} \quad (\text{I-35})$$

I.6. CONCLUSION

Après avoir eu les connaissances requises concernant le système mécanique et électrique de la machine empaqueteuse, il est évident que pour déterminer correctement un entraînement, les caractéristiques de la charge à entraîner (poids, vitesse, plage de réglage, etc.) sont indispensables.

Après avoir présenté les principes généraux et les critères de choix des systèmes industriels, on peut passer à l'étude des types de service de ces moteurs électriques.

CHAPITRE II

TYPES DE SERVICE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES



« Il est hélas devenu évident aujourd'hui que
notre technologie a dépassé notre humanité »

Albert Einstein

CHAPITRE II

TYPES DE SERVICE

DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

II.1. INTRODUCTION

La plupart des moteurs fonctionnent souvent en service non continu. Certains moteurs ne fonctionnent que pendant une brève période, d'autres tournent toute la journée mais avec une faible charge, et de nombreux moteurs doivent accélérer de fortes inerties ou sont commandés en mode commuté et freinés électriquement.

Dans tous ces divers types de service, un moteur ne chauffe pas comme en cas de service continu. Par conséquent, tous ces processus spécifiques d'échauffement doivent être pris en compte pour éviter une surcharge qui endommagerait les enroulements rotoriques et statoriques du moteur.

Le service des moteurs est indiqué sur la plaque signalétique. Il indique le cycle de fonctionnement d'un moteur, correspondant à sa puissance nominale. Un moteur devant être démarré le matin à 8 heures et arrêté le soir à 20 heures n'aura pas le même échauffement qu'un moteur d'ascenseur qui n'arrête pas de démarrer et de s'arrêter et donc pas le même type de service.

En principe, les moteurs triphasés à induction en service continu sont spécialement conçus pour tourner à la puissance nominale à une exception près : les actionneurs. La plupart des moteurs fonctionnent souvent en service non continu. Certains moteurs ne fonctionnent que pendant une brève période, d'autres tournent toute la journée mais avec une faible charge, et de nombreux moteurs doivent accélérer de fortes inerties ou sont commandés en mode commuté et freinés électriquement.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents types de service des moteurs électriques, les valeurs moyennes de puissance, couple et intensité ainsi que la capacité limite mécanique.

II.2. PLAQUE SIGNALÉTIQUE OU PLAQUE D'IDENTIFICATION

Tous les moteurs électriques doivent être équipés d'une plaque signalétique. Cette plaque est la carte d'identité d'un moteur électrique (Fig.II-1) [12].

* LEROY SOMER Mot. 3 ~ PLS 180 M-T CE N° 734570 GD 002 kg 102						
IP 23 IK08	I cl.F	40°C	S1	%	c/h	
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 380	50	2928	30	0.88	57.6	
Δ 400		2936		0.84	57.2	
Y 690		2936		0.84	33	
Δ 415	60	2942	34	0.81	57.3	
Δ 440		3537		0.88	54.3	
Δ 460		3542		0.87	54.2	
DE	6212 2RSC3				g	
NDE	6210 2RSC3				h	

* LEROY SOMER MOT. 3 ~ PLS 315 L CE N° 703 932 00 GF 01 kg 790						
IP23 IK08	I cl.F	40°C	S1	%	c/h	
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 380	50	2970	250	0.92	434	
Δ 400		2974		0.90	422	
Y 690		2974		0.90	244	
Δ 415	60	2976	288	0.88	415	
Δ 440		3568		0.92	418	
Δ 460		3572		0.91	417	
DE	6316 C3	035 g	ESSO UNIREX N3			
NDE	6316 C3	2900 h				

* **LEROY SOMER** Marque du moteur électrique **CE** Repère légal de la conformité du matériel aux exigences des Directives Européennes

MOT 3~ Moteur triphasé AC	kg Masse	DE Drive End : Roulement coté entraînement
PLS Série	IP23 Indice de protection	
180 Hauteur d'axe	IK08 Indice de résistance aux chocs	NDE Non Drive End : Roulement coté opposé à l'entraînement
M Symbole de carter	I Ci.F Classe d'isolement F	
T Indice d'imprégnation	40°C Température d'ambiante	
	S Service	g Masse de graisse à chaque regraissage en g
N° Numéro du moteur	% Facteur de marche	
734570 N° de série du moteur	c/h Nombre de cycle par heure	h Périodicité de graissage en heures
G Année de production	V Tension d'alimentation	
D Mois de production	Hz Fréquence d'alimentation	UNIREX N3 Type de graisse
002 N° d'ordre dans la série	min⁻¹ Nombre de tours par minute	
	kW Puissance assignée	
70393200 N° de série du moteur	cosφ Facteur de puissance	
G Année de production	A Intensité assignée	
F Mois de production	Δ Branchement triangle	
01 N° d'ordre dans la série	Y Branchement étoile	

Figure II-1. Plaque signalétique

II.3. TERMES ET DÉFINITIONS

II.3.1. Service de marche

Un service type est une forme simplifiée de service. Cela signifie qu'un service sera complètement défini par l'indication du service type et d'un régime constant. Toutefois, dans le cas particulier du service type S8, on considère plusieurs régimes constants [6,8].

II.3.2. Équilibre thermique

Etat atteint quand les températures observées des diverses parties de la machine ne varient de plus de 20 °C par heure.

II.3.3. Repos

Suppression complète de tout mouvement et de toute alimentation électrique ou mécanique [6,8].

II.3.4. Fonctionnement à vide

Etat obtenu après suppression de la charge, sous la tension nominale (sauf indication contraire).

II.3.5. Facteur de service

Dans certains types de services, rapport entre le temps de fonctionnement en régime, y compris le démarrage et le freinage électrique, et la durée d'un cycle.

II.4. TYPES DE SERVICES

Le nombre de démarrages et le nombre de freinages par unité de temps à une incidence majeure sur l'échauffement des moteurs. La norme CEI 60034-1 (caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement) définit des services types qui permettent de calculer une image thermique et de dimensionner les moteurs en fonction de l'utilisation prévue. Les paragraphes qui suivent donnent un aperçu des services types.

Les fabricants de moteurs doivent assigner la capacité de charge du moteur à l'un de ces types de service et fournir, le cas échéant, les valeurs relatives au temps de fonctionnement, à la période de charge ou au facteur de service relatif.

Les descriptions et les diagrammes concernant les types de service de S_I à S₁₀ présentent les symboles dans le Tableau (II-1) :

Tableau II-1. Descriptions des notions des types de service [2]

P	puissance en kW	t_L	temps de fonctionnement à vide en s, min, ou h
P_V	pertes en kW	t_r	facteur de service relatif (%)
n	vitesse/min	t_s	durée du cycle en secondes
θ	température en °C	t_{st}	temps d'inactivité en s, min, ou h
T_{max}	température maximum en °C	T	constante de temps thermique en min
t	temps en s, min, ou h	t_A	temps de démarrage en s, min
t_B	période de charge	J_M	moment d'inertie du moteur en kgm ²
t_{Br}	temps de freinage en s, min	J_{Ext}	moment d'inertie de la charge / à l'arbre moteur kgm ²

La vitesse n est normalement exprimée en t/min. En général, la plaquette signalétique contient les données relatives à la vitesse nominale n et à la charge n nominale. Les types de service de S_I à S₁₀ couvrent bon nombre des applications qui se présentent dans la pratique. S'il était impossible d'assigner le type de charge à l'un des types de services cités auparavant, il est conseillé de faire parvenir au fabricant une description précise du cycle ou de sélectionner un type de service convenant au moins à la charge de l'application effective.

Aux fins de la conception, les informations relatives au type de service doivent être les plus précises possibles étant donné que le rendement de puissance peut diverger considérablement du rendement en cas de service continu.

Les types de service possibles sont théoriquement illimités. Pour permettre aux fabricants et aux opérateurs de parvenir à un accord, neuf types de services principaux, de S_I à S₁₀ ont été spécifiés dans la norme CEI 34. La plupart des cas qui se présentent dans la pratique peuvent être ramenés à l'un de ces types

de service. Il existe dix types de services différents, de S_1 à S_{10} , les plus courants sont les services S_1 , S_2 et S_3 .

II.4.1. Service continu - service type S_1

Mode de fonctionnement à charge constante, comme l'indique la Figure (II-2), avec un temps suffisant pour que l'équilibre thermique soit atteint. La période de charge t_B est nettement supérieure à la constante de temps thermique T . Fonctionnement à charge constante d'une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique.

N : fonctionnement à charge constante

T_{max} : température maximale atteinte

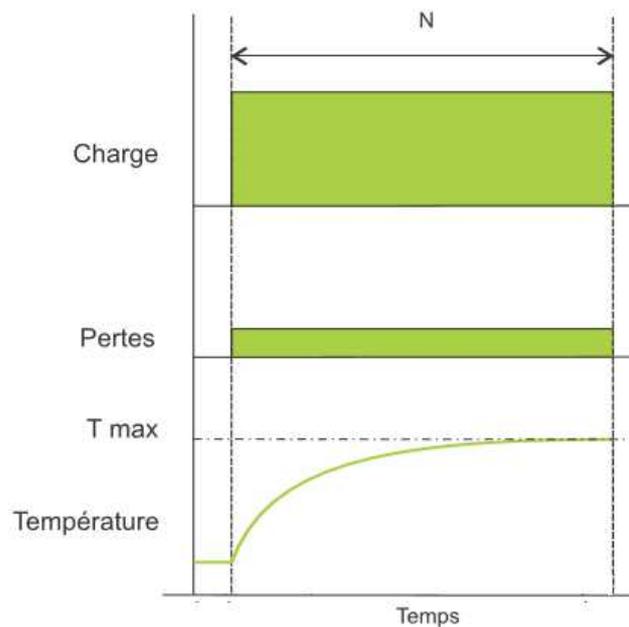


Figure II-2. Service continu/Service S_1 [2, 8, 13]

Un moteur standard qui sort de l'usine où il a été fabriqué est prévu pour fonctionner en service continu, service de type S_1 , c'est-à-dire à charge nominale constante avec moins de six démarrages (espacés dans le temps) par heure. Lorsque le régime de fonctionnement du moteur ne correspond pas à cette description, c'est à l'acheteur qu'incombe la responsabilité de spécifier le service. L'acheteur peut décrire le service par l'une des méthodes suivantes :

- numériquement, si la charge ne varie pas ou varie de façon connue ;
- graphiquement, par une représentation des grandeurs variables en fonction du temps ;

- en cherchant la description qui lui correspond le mieux dans les services types de la norme CEI 34-1 et en choisissant l'un des services types de S₁ à S₁₀ qui est au moins aussi sévère que le service prévu.

II.4.2. Service temporaire - service type S₂

Fonctionnement à charge constante pendant un temps déterminé, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un temps de repos permettant de rétablir un équilibre thermique à 20° près entre la machine et le fluide de refroidissement (Fig.II-3).

N : fonctionnement à charge constante

T_{max} : température maximale atteinte

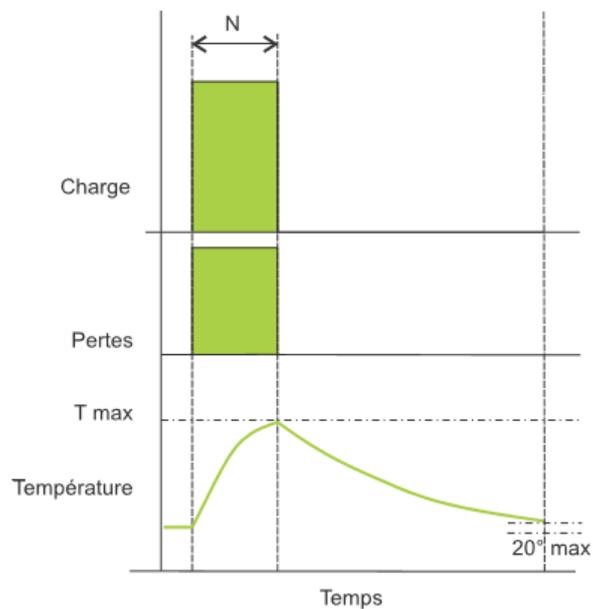


Figure II-3. Service temporaire /Service S₂ [2, 8, 13]

On parle de service temporaire, s'il affiche une période de charge de $t_B \leq 3 T$ (constante de temps thermique). Par rapport au service continu, le moteur doit fournir plus de puissance au cours de la période de charge. Prière de consulter le fabricant pour plus de détails.

II.4.3. Service intermittent périodique sans démarrage - service type S₃

Suite de cycles identiques comportant chacun une période de fonctionnement et de repos. Dans ce type de service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de manière significative (Fig.II-4).

N : fonctionnement à charge constante

T_{max} : température maximale atteinte

R : repos

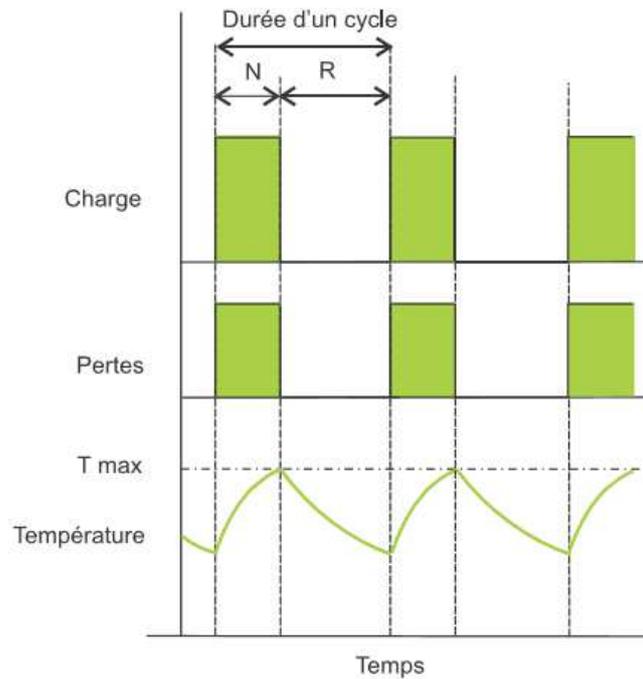


Figure II-4. Service intermittent périodique sans démarrage /Service S3 [2, 8, 13]

Le facteur de service F_S est donné par :

$$F_S = \frac{N}{N+R} \cdot 100\% \quad (\text{II-1})$$

II.4.4. Service intermittent périodique à démarrage - service type S4

Identique au service S3 mais avec une période de démarrage longue affectant suffisamment l'échauffement de moteur. Le cycle compte une période à marche constante et une période de repos. Les cycles sont trop courts pour que l'équilibre thermique soit atteint (Fig.II-5).

Forme de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant un temps D de démarrage, à un temps N de fonctionnement à un régime constant, et un temps R de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours du cycle.

Dans ces services, l'arrêt du moteur est obtenu, soit par ralentissement naturel après coupure de courant, soit par un moyen de freinage tel qu'un frein mécanique ne provoquant pas d'échauffement supplémentaire des enroulements.

N : fonctionnement à charge constante

T_{max} : température maximale atteinte

R : repos

D : démarrage

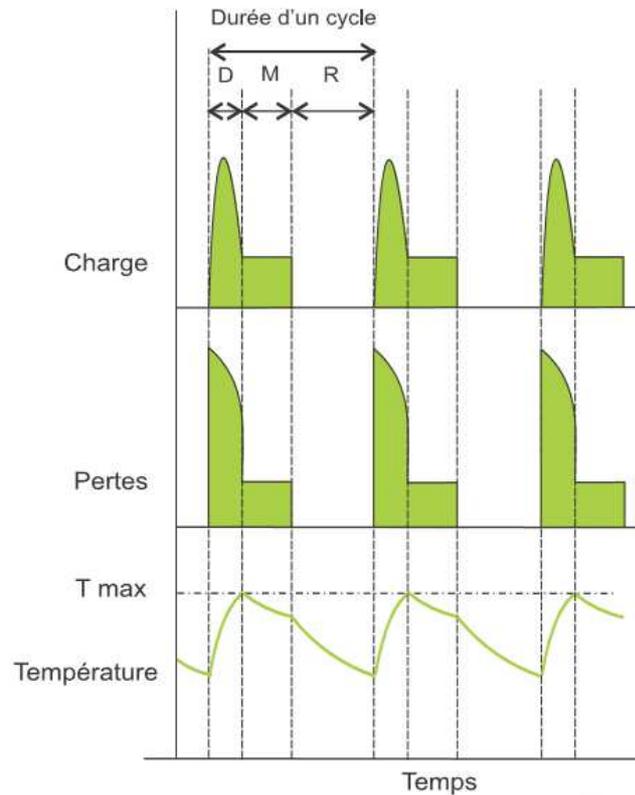


Figure II-5. Service intermittent périodique à démarrage /Service S4 [2, 8, 13]

Le facteur de service F_S est donné par :

$$F_S = \frac{D+N}{D+N+R} \cdot 100\% \quad (\text{II-2})$$

II.4.5. Service intermittent périodique à freinage électrique - service type S5

Suite de cycles de services comportant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante, une période de freinage électrique rapide et une période de repos (Fig.II-6).

Forme de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant un temps D de démarrage, à un temps N de fonctionnement à un régime constant, un temps F de freinage et un temps R de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours du cycle.

Le facteur de service F_S est donné par :

$$F_S = \frac{D+N+F}{D+N+F+R} \cdot 100\% \quad (\text{II-3})$$

N : fonctionnement à charge constante
T_{max} : température maximale atteinte
R : repos
D : démarrage
F : freinage électrique

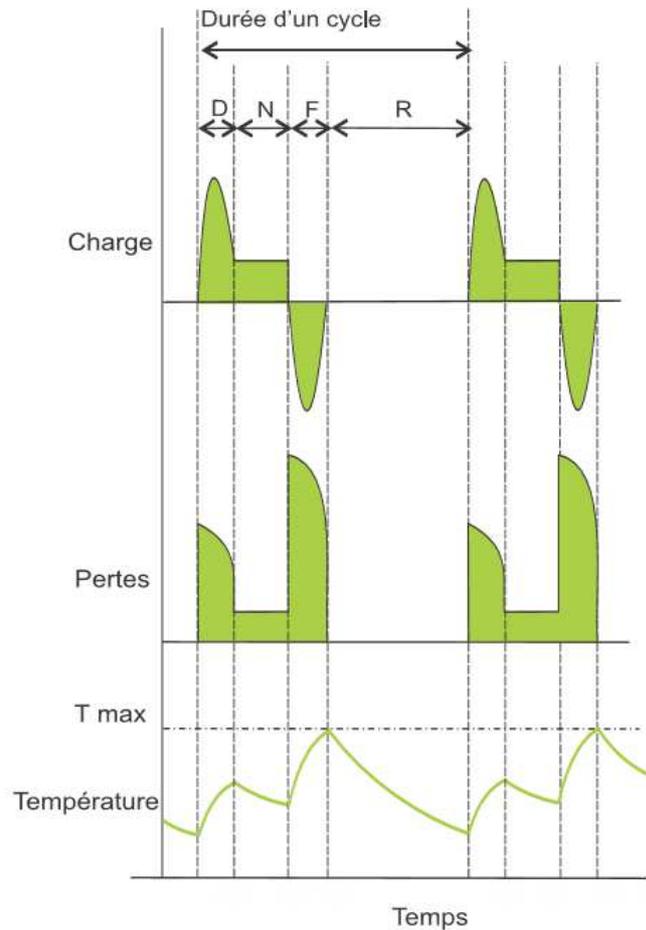


Figure II-6. Service intermittent périodique à freinage électrique /Service S5 [2, 8, 13]

II.4.6. Service ininterrompu périodique à charge intermittente-service type S6

Suite de cycles de services identiques comportant chacun une période de fonctionnement à charge constante et une période de fonctionnement à vide. Il n'existe pas de période de repos (Fig.II-7).

Forme de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps *N* de fonctionnement à un régime constant, et un temps *V* de fonctionnement à vide, ces temps étant insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

Le facteur de service F_S est donné par :

$$F_S = \frac{N}{N+V} \cdot 100\% \quad (\text{II-4})$$

N : fonctionnement à charge constante

T_{max} : température maximale atteinte

V : fonctionnement à vide

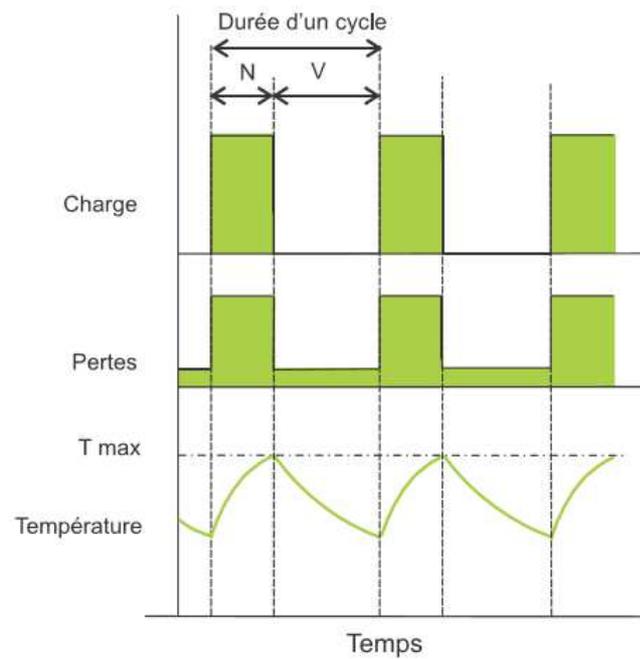


Figure II-7. Service ininterrompu périodique à charge intermittente /Service S6 [2, 8, 13]

II.4.7. Service ininterrompu périodique à freinage électrique - service type S7

Suite de cycles de services identiques comportant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante et une période de freinage électrique. Il n'existe pas de période de repos (Fig.II-8).

N : fonctionnement à charge constante

T_{max} : température maximale atteinte

D : démarrage

F : freinage électrique

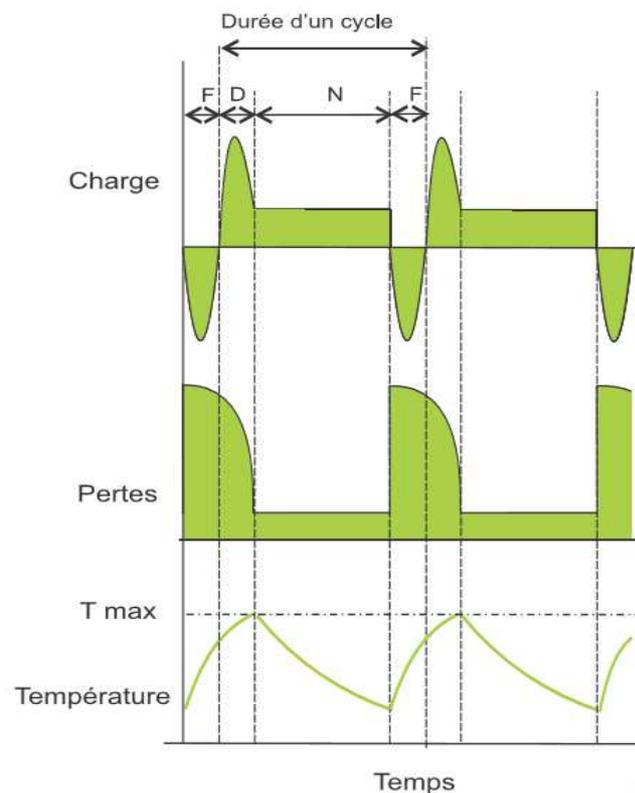


Figure II-8. Service ininterrompu périodique à freinage électrique /Service S7 [2, 8, 13]

II.4.8. Service ininterrompu à variations périodiques de charge/vitesse - service type S8

Suite de cycles de services identiques comportant chacun une période de fonctionnement à charge constante correspondant à une vitesse de rotation prédéterminée suivie d'une ou plusieurs périodes de fonctionnement à d'autres charges constantes correspondant à différentes vitesses de rotation (réalisées par le changement du nombre de pôles par exemple). Il n'existe pas de période de repos (Fig.II-9).

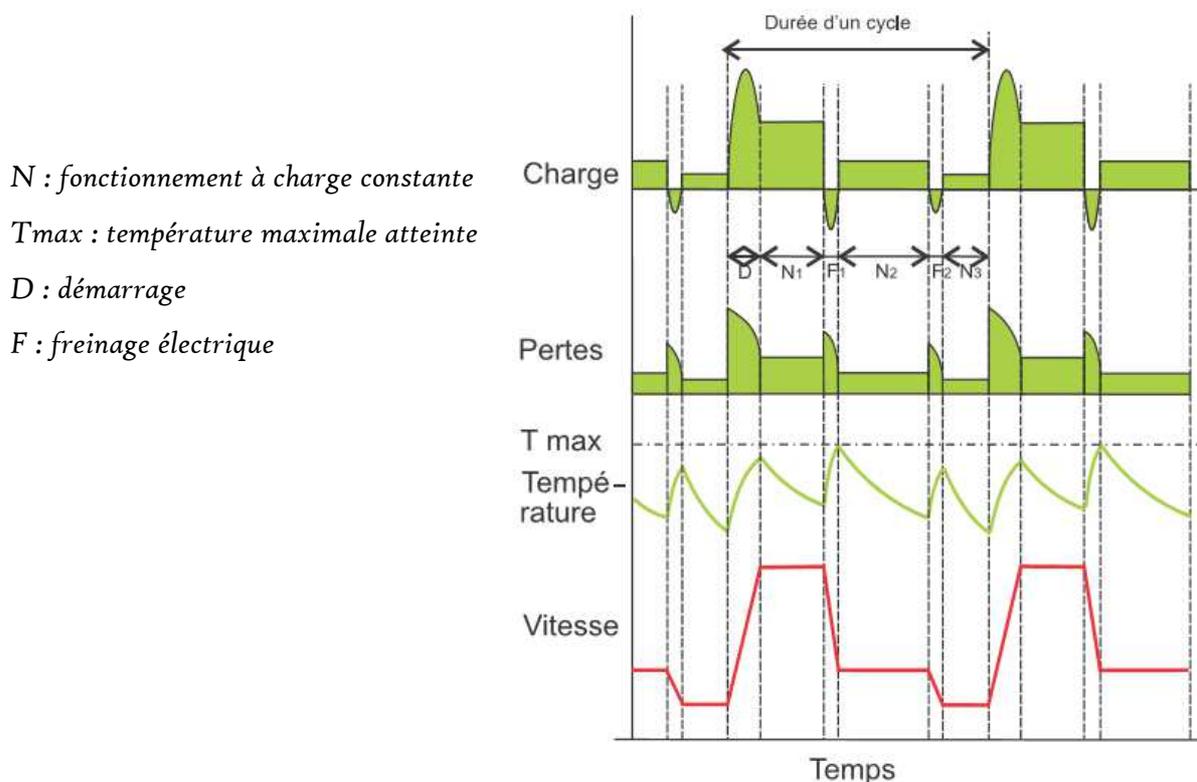


Figure II-9. Service ininterrompu à variations périodiques de charge/vitesse /Service S8 [2, 8, 13]

Forme de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à un régime constant correspondant à une vitesse de rotation déterminée suivi de temps de fonctionnement à d'autres régimes correspondant à de vitesses de rotation différentes réalisées par exemple par changement du nombre de pôles.

II.4.9. Service à variations non périodiques de charge et de vitesse - service type S9

Service dans lequel, généralement, la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge (Fig.II-10).

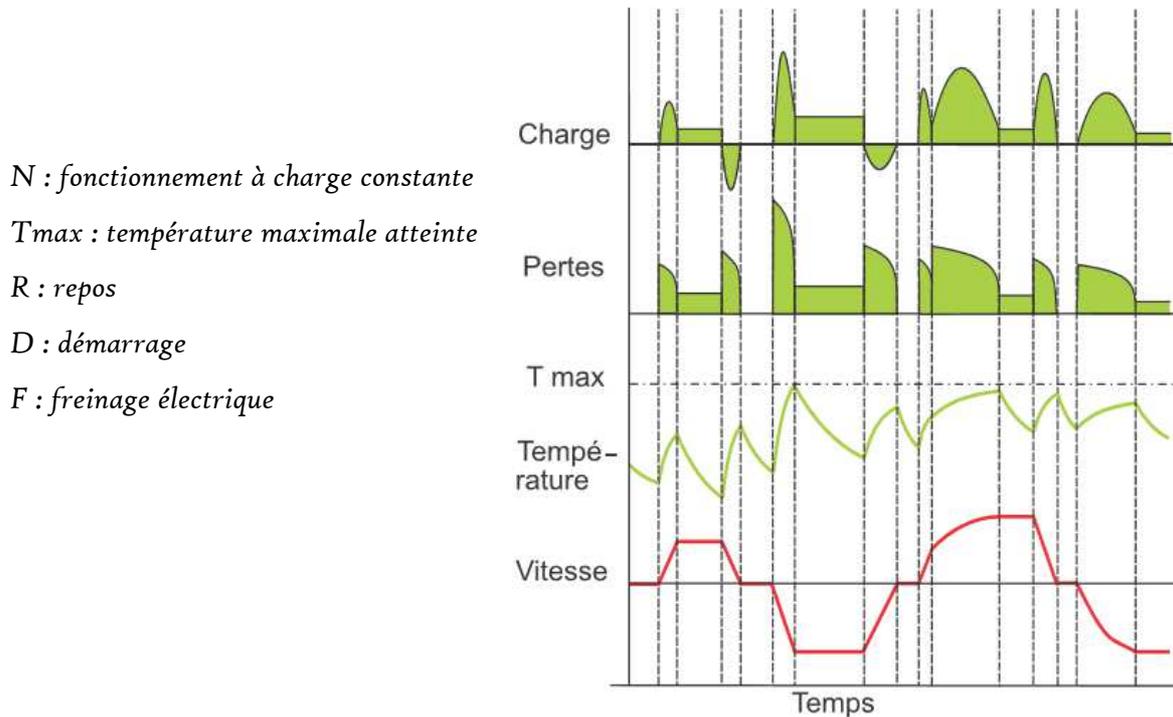


Figure II-10. Service à variations non périodiques de charge et de vitesse/Service S9 [2, 8, 13]

Service dans lequel la charge et la vitesse ont une variation périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges appliquées qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge. Pour ce service type. Des valeurs appropriées à pleine charge devront être considérées comme basses du concept de surcharge.

II.4.10. Service à régimes constants distincts - service type S10

Service comportant au plus quatre valeurs distinctes de charge (ou de charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un

cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos) (Fig.II-11).

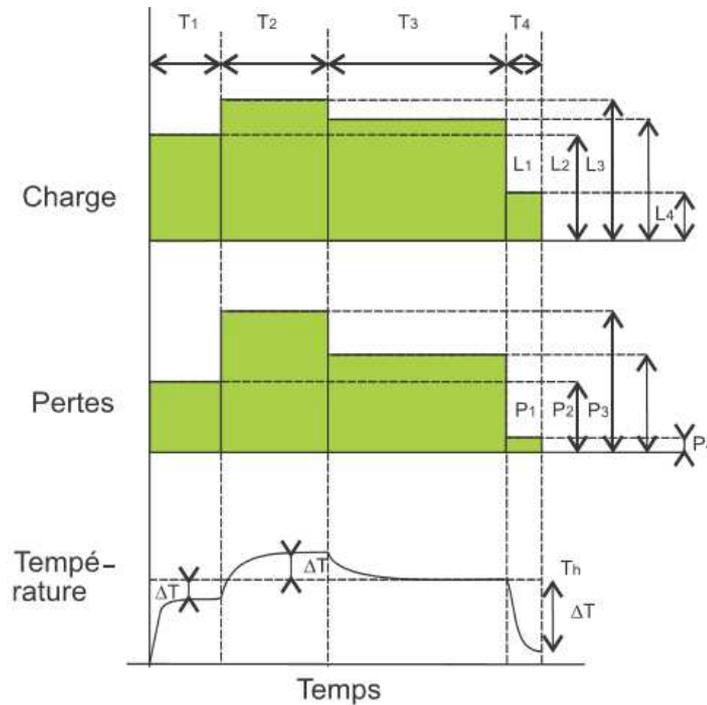


Figure II-11. Service à régimes constants distincts/Service S_{10} [2, 8, 13]

II.5. VALEURS MOYENNES DE PUISSANCE, COUPLE ET INTENSITÉ

L'utilisation réelle d'un moteur diffère bien souvent des types de service S_1 à S_9 décrits au préalable car la puissance requise P ou le couple M_L et donc l'intensité I ne sont pas constantes. Etant donné que les pertes P_V évoluent comme le carré de la charge, il est possible de remplacer les valeurs unitaires (puissances, couples et intensités) par une puissance moyenne P_{moy} .

Ces valeurs sont déterminées à l'aide d'une conversion du second degré, comme l'indique la Figure (II-12), en utilisant les puissances unitaires et les temps effectifs associés (la durée du cycle est $t_1+t_2+t_3$). Le couple maximal qui en résulte ne doit pas dépasser 80 % du couple maximal au démarrage pour un moteur à induction triphasé. Le calcul de la valeur moyenne n'est plus possible si l'on opte pour la configuration S_2 .

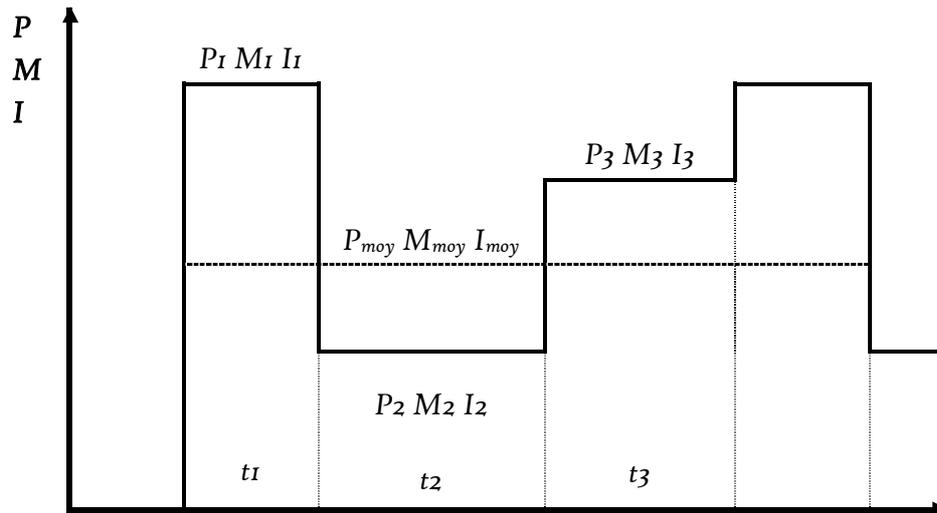


Figure II-12. Puissance moyenne, couple moyen et intensité moyenne [13]

Puissance moyenne :

$$P_{moy} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}} \quad (\text{II-5})$$

Couple moyen :

$$M_{moy} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}} \quad (\text{II-6})$$

Intensité moyenne :

$$I_{moy} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}} \quad (\text{II-7})$$

Lorsque les puissances diffèrent de plus d'un facteur 2, ce calcul de la valeur moyenne devient trop imprécis, et il faut utiliser l'intensité moyenne, figurant parmi les caractéristiques du moteur, pour exécuter les calculs prévus.

II.6. PUISSANCE D'UN MOTEUR ET TYPES DE SERVICES

Il est possible de diviser les types de service S₁ à S₉ en deux groupes, selon qu'une augmentation ou réduction de la puissance nominale par rapport à S₁ est possible ou nécessaire :

- ☞ *Augmentation de puissance* par rapport à S₁ : pour S₂, S₃ et S₆.
- ☞ *Réduction de puissance* par rapport à S₁ : pour S₄, S₅, S₇, S₈ et S₉.

II.6.i. Augmentation de puissance par rapport au S_1

Etant donné que dans les types de service S_2 , S_3 et S_6 la machine n'est pas actionnée continuellement à pleine charge, mais uniquement par intermittence, elle peut refroidir de nouveau pendant le temps d'inactivité t_{St} , et s'échauffer mécaniquement et thermiquement au cours de la période de charge t_B . Les variables suivantes jouent un rôle déterminant dans le calcul de l'augmentation maximum :

P_n : Puissance nominale du moteur en kW ;

P_{mech} : Capacité limite mécanique du moteur en kW ;

P_{th} : Capacité limite thermique du moteur en kW ;

M_n : Couple nominal en Nm ;

M_K : Couple maximal au démarrage en Nm ;

T : Constante de temps thermique en minutes (Tableau II-2) ;

k_o : Rapport des pertes équivalentes à vide/avec charge (Tableau II-3) ;

t_r : Facteur de service relatif en % ;

h : Rapport de dissipation de chaleur ventilée/non ventilée (Tableau II-4) ;

z_o : Fréquence de commutation à vide/heure (Tableau II-5).

Tableau II-2. Constante de temps thermique T en minutes [13]

P_n (kW)	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles
0.09 ... 1.1	7 ... 10	10 ... 11	12	--
1.5 ... 3	5 ... 8	9 ... 12	12	12 ... 16
4	14	11	13	12
5.5 ... 18.5	11 ... 15	10 ... 19	13 ... 20	10 ... 14
22 ... 45	25 ... 35	30 ... 40	40 ... 50	45 ... 55
55 ... 90	40	45 ... 50	50 ... 55	55 ... 65
110 ... 132	45 ... 50	55	60	75

Tableau II-3. Rapport des pertes équivalentes k_o à vide/avec charge [13]

P_n (kW)	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles
0.09 ... 1.5	0.35	0.45	0.5	0.5
2.2 ... 18.5	0.25	0.25	0.3	0.3
22	0.25	0.25	0.3	0.3
30 ... 55	0.25	0.3	0.3	0.3
75 ... 160	0.35	0.35	0.3	0.3

Les pertes équivalentes représentent la somme des pourcentages des pertes unitaires qui contribuent à l'échauffement de l'enroulement, comme les pertes en charge, les pertes fer et les pertes du rotor.

Tableau II-4. Rapport de dissipation de chaleur h ventilée/non ventilée [13]

P_n (kW)	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles
0.09 ... 18.5	0.4	0.45	0.5	0.5
22 ... 500	0.2	0.3	0.3	0.3

Tableau II-5. Fréquence de commutation à vide typique z_o par heure [13]

Dimension	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles
56	2 300	5 000	8 000	--
63	3 000	8 600	8 000	--
71	4 000	6 900	6 000	7 000
80	1 700	5 000	5 500	8 000
90S	2 000	3 000	7 900	11 000
90L	2 000	2 500	6 200	11 000
100L	1 000	1 700	3 200	2 500
112M	720	1 700	3 200	2 500
132S	450	850	2 200	2 800
160L	400	900	1 600	2 300
180L	-	550	800	1 200
200L	150	400	620	900
225S	-	280	-	700
225M	90	270	450	670
250M	60	200	320	500

II.6.2. Capacité limite mécanique

Lorsqu'on augmente la puissance dans les types de service S2, S3, et S6, il faut prendre en compte la capacité limite mécanique P_{mech} . D'après les normes en la matière. Il doit être possible de surcharger des moteurs à induction triphasés, quels que soient le type de service et la conception, pendant 15 secondes à la tension nominale et à la fréquence d'entrée jusqu'à 1,6 fois le couple nominal. Les données de catalogue doivent indiquer des tolérances allant jusqu'à - 10 % de manière à ce que le couple maximal au démarrage M_K soit plus élevé d'un facteur de $\leq 1,76$ par rapport au nouveau couple accru M_{max} . Il est donc nécessaire de définir la capacité limite mécanique, comme suit, en ce qui concerne les données de catalogue :

$$P_{mech} \leq \frac{M_K}{M_n} \cdot \frac{P_n}{1.76} \quad (\text{II-8})$$

Avec :

P_n : puissance nominale en W ;

M_n : couple nominal en Nm ;

M_K : couple maximal au démarrage en Nm.

II.6.3. Réduction de puissance par rapport au S1

Dans les types de service S4, S5, S7, S8 et S9, la puissance du moteur doit être réduite étant donné que les pertes au démarrage ou au freinage jouent un rôle essentiel dans ces cas.

La méthode de calcul se base sur la fréquence de commutation à vide maximum z_0 comme l'indique le Tableau (II-5). Il s'agit du nombre maximum de commutations admissibles par heure sans que le moteur surchauffe. Il est possible de déterminer la fréquence de commutation maximum admissible z pour une condition de charge donnée à l'aide de facteurs de réduction comme le facteur d'inertie, le facteur de contre-couple et le facteur de charge.

II.6.3.1. Facteur d'inertie

Le facteur d'inertie FI prend en considération des moments d'inertie externes comme le moment d'inertie du moteur J_{Mot} et le moment d'inertie de la charge J_{ch} .

$$FI = \frac{J_{Mot} + J_{ch}}{J_{Mot}} \quad (II-9)$$

II.6.3.2. Moment d'inertie de charge converti

Si les vitesses de la machine entraînée ne correspondent pas à celles du moteur, il faut convertir tous les moments d'inertie en vitesse du moteur n_{Mot} .

$$J_{ch} = \frac{J_1 n_1^2 + J_2 n_2^2 + \dots}{n_{Mot}^2} \quad (II-10)$$

Avec :

J : moment d'inertie en kgm^2 ;

n : vitesse tr/min.

II.6.3.3. Facteur de contre-couple

Le facteur de contre-couple k_g prend en considération un groupe de charge moyen présent au cours de l'accélération, devant être dépassé par le couple moyen du moteur M_{Mot} .

$$k_g = 1 - \frac{M_L}{M_{Mot}} \quad (II-11)$$

Avec :

M_L : couple de charge en Nm ;

M_{Mot} : couple du moteur en Nm.

II.6.3.4. Couples de charge convertis

Si l'on utilise des mécanismes à rendement η_G et que les vitesses sont donc différentes, les couples de charge de la machine entraînée doivent être convertis en vitesse de moteur n_n .

$$M_L = 1 - \frac{M_L n_1}{\eta_{G1} n_n} + \frac{M_L n_2}{\eta_{G2} n_n} + \dots \quad (\text{II-12})$$

Avec :

M : couple en Nm ;

n : vitesse tr/min ;

η : rendement mécanique.

II.6.3.5. Facteur de charge

Facteur de charge k_L à prendre en considération avec la charge pendant le fonctionnement, dans les cas où les caractéristiques de la charge ne seraient pas connues précisément.

$$k_L = 1 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 \frac{(1-k_0) t_r}{(1-k_0) t_r + (1-t_r)h} \quad (\text{II-13})$$

Avec :

k_L : Facteur de charge ;

P : Puissance requise en kW ;

P_n : Puissance nominale du moteur en kW ;

k_0 : Rapport des pertes équivalentes à vide/en charge (Tableau II-3) ;

h : Rapport de dissipation de chaleur ventilé/non ventilé (Tableau II-4) ;

t_r : Facteur de cycle relatif (voir types de service S1 à S9).

II.6. CONCLUSION

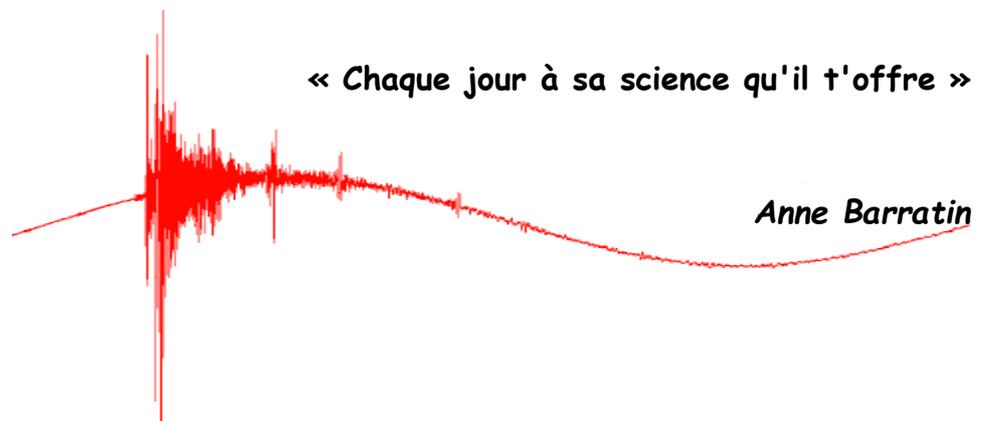
Les caractéristiques d'une machine électrique sont fournies par son constructeur pour une utilisation continue permettant d'atteindre l'équilibre thermique (correspond au service type S1). Par contre, si la même charge doit entraîner avec de nombreux accélération et freinage, le moteur aura tendance à chauffer, parfois jusqu'à se détériorer.

Il faudra donc choisir un moteur de puissance supérieure permettant d'évacuer correctement l'énergie calorifique. A l'opposé, si un moteur doit entraîner une charge de sur une durée très courte, avec très peu de démarrages à l'heure, la machine aura suffisamment de temps de refroidir entre chaque cycle, on pourra donc sous dimensionner le moteur pour un moindre coût à l'achat.

Enfin, nous avons donné les définitions indispensables à la compréhension des valeurs moyennes de puissance, couple et intensité, l'augmentation et la réduction de puissance par rapport au S_1 sont également été présentées. Elles faciliteront en particulier la lecture de l'étude des courbes de couples caractéristiques qu'il nous a fallu mener sur des moteurs représentatifs en matière de signatures industrielles et qui feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

COURBES DE COUPLES CARACTÉRISTIQUES



CHAPITRE III

COURBES DE COUPLES

CARACTÉRISTIQUES

III.1. INTRODUCTION

Les machines asynchrones sont des machines électriques à courant alternatif. Ce sont des machines permettant de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (dans le cas d'un fonctionnement moteur) ou de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique (en fonctionnement générateur). Le terme asynchrone vient du fait que la vitesse de rotation du rotor n'est pas fixée par la fréquence des courants qui traverse le stator.

Les moteurs consomment 60 à 70 % de l'énergie produite sur un réseau électrique [12]. La majorité des moteurs utilisés dans les secteurs industriel, commercial et domestique sont des moteurs asynchrones. Il est donc important, lors d'études des informations disponibles concernant la machine proviennent souvent de la plaque signalétique.

Ces informations sont, entre autres, la tension nominale, la puissance nominale de la machine, le courant nominal, le couple nominal, le courant au démarrage, le couple au démarrage, la fréquence d'opération, la vitesse nominale, la vitesse de synchronisme et le nombre de pôles magnétiques de la machine.

Dans d'autre cas, des courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse de la machine sont disponibles. Ces courbes fournissent plus d'informations sur les performances de la machine à tension nominale. Lorsque des courbes d'essais (à vide ou à rotor bloqué) sont disponibles, cela permet d'avoir des informations sur les performances de la machine à différents niveaux de tension qui feront l'objet de ce chapitre.

III.2. QU'EST-CE QU'UNE CARACTÉRISTIQUE ?

La *caractéristique* est l'ensemble des points donnant le couple C en fonction de la fréquence de rotation n . La caractéristique est donc liée aux valeurs déterminées expérimentalement, le registre de référence est donc empirique.

La deuxième définition est alors donnée par l'utilisation possible des tracés modélisés lorsqu'il dessine au tableau uniquement les parties utiles et idéalisées, qu'il appelle également caractéristiques, sans autre précision, pour argumenter les termes de ressemblance entre les deux machines (le registre est donc celui du modèle) [14].

On note donc que la définition de la caractéristique peut adopter deux statuts différents, l'un directement lié aux valeurs expérimentales, l'autre tenant compte d'aspects utilitaires et déjà modélisé.

III.3. CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT EN CHARGE

Traçons les courbes de ces différentes grandeurs en fonction de la puissance utile en y ajoutant celle de la vitesse (Fig.III-1).

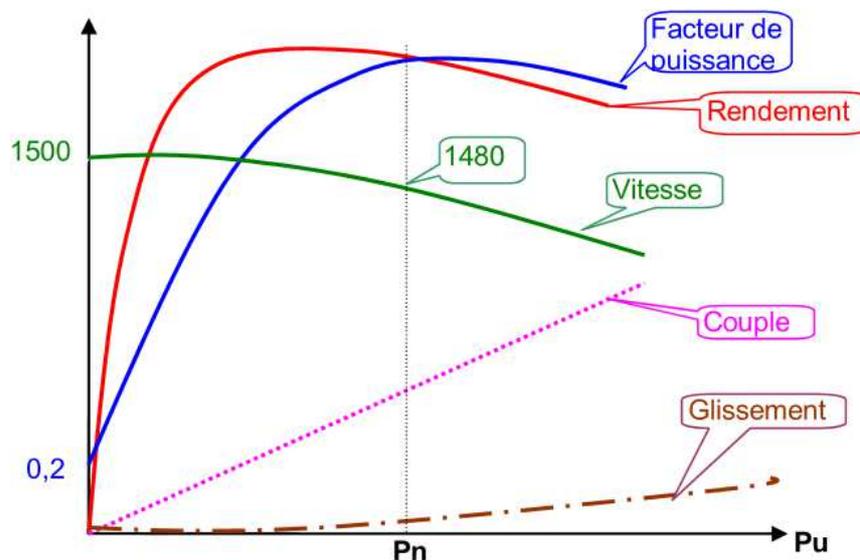


Figure III-1. Courbes caractéristiques en charge

Les caractéristiques obtenues mettent en évidence quelques-unes des propriétés essentielles du moteur d'induction à cage d'écureuil :

Le *facteur de puissance* : dépend en grande partie de la charge et atteint la valeur de crête pendant la surcharge. Ce facteur est relativement défavorable dans la plage de faible charge à cause d'une magnétisation pratiquement constante. sa valeur baisse beaucoup quand la charge diminue. A vide il est d'environ 0,2. Il faut donc éviter d'installer des moteurs plus puissants qu'il n'est nécessaire.

Le *rendement* : qui présente une courbe des caractéristiques relativement plate, est presque constant si la charge est au moins de 50%. En général, il atteint sa valeur crête à la puissance nominale. Le rendement est bon à partir de la demi-charge. Il est maximal au voisinage de la puissance nominale.

La *vitesse* : la vitesse décroît quand la charge augmente. Toutefois la variation est faible puisqu'elle est seulement de 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge. La vitesse n ne diminue que légèrement si la charge augmente.

Le *glissement* g augmente presque proportionnellement par rapport à la charge. Le glissement des gros moteurs est plus faible encore.

Le *couple nominal* : c'est le couple que le moteur peut développer en permanence, sans excès de température. C'est donc le couple fourni à pleine charge.

Le *couple de démarrage* : ce couple est proportionnel au flux magnétique du stator et au courant dans le rotor, lui-même proportionnel au glissement qui est maximum au démarrage. Pour un moteur courant, le couple de démarrage vaut environ deux fois le couple nominal.

Le *couple maximum* : il correspond à un glissement d'environ 20 %.

Le *courant nominal* : c'est le courant absorbé par le moteur fonctionnant à pleine charge. Le courant de démarrage c'est le courant absorbé par le moteur au

moment précis du démarrage à vitesse nulle. En démarrage direct, le courant représente une pointe de 5 à 6 fois le courant nominal.

L'intensité I commence à augmenter proportionnellement à partir de la demi-charge environ. Au-dessous de cette valeur elle ne diminue que lentement jusqu'à égaler le courant à vide I_0 (magnétisation constante).

La puissance absorbée diminue plus ou moins proportionnellement à la charge à partir de la puissance à vide. Elle augmente un peu plus rapidement dans la plage de surcharge étant donné que les pertes sont également plus importantes.

Compte tenu que le rendement η et le facteur de puissance $\cos\varphi$ sont les éléments qui influencent principalement l'efficacité économique d'un moteur, la connaissance des valeurs à charge réduite est indispensable. Ces deux valeurs déterminent l'efficacité économique pendant le fonctionnement et diminuent toutes les deux sous charge réduite. De plus, en cas de moteur à faible vitesse, le facteur de puissance $\cos\varphi$ est inférieur à celui des moteurs à haute vitesse. En conclusion, les moteurs à haute vitesse convenablement dimensionnés s'avèrent plus avantageux sur les plans économique et fonctionnel.

C'est parce que les moteurs d'induction n'ont pas une vitesse rigoureusement constante et surtout parce que cette vitesse ne résulte pas seulement de la fréquence du courant d'alimentation qu'on les nomme moteurs asynchrones.

Mais une variation de la vitesse de 2 à 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge est négligeable dans la plupart des cas d'emplois industriels de moteurs.

Les performances d'un moteur sont présentées généralement sous forme de courbes, car elles varient en fonction du régime du moteur. Les caractéristiques techniques d'un moteur sont fournies soit par le constructeur, soit à partir d'essais réalisés par des institutions indépendantes.

III.4. ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU COUPLE

III.4.1. Évolution typique

La Figure (III-2) montre la courbe de couple typique des moteurs à cage du couple en fonction de la vitesse. Le concept de couple d'accélération englobe toute la gamme des caractéristiques de couple de l'arrêt au plein régime [12-15].

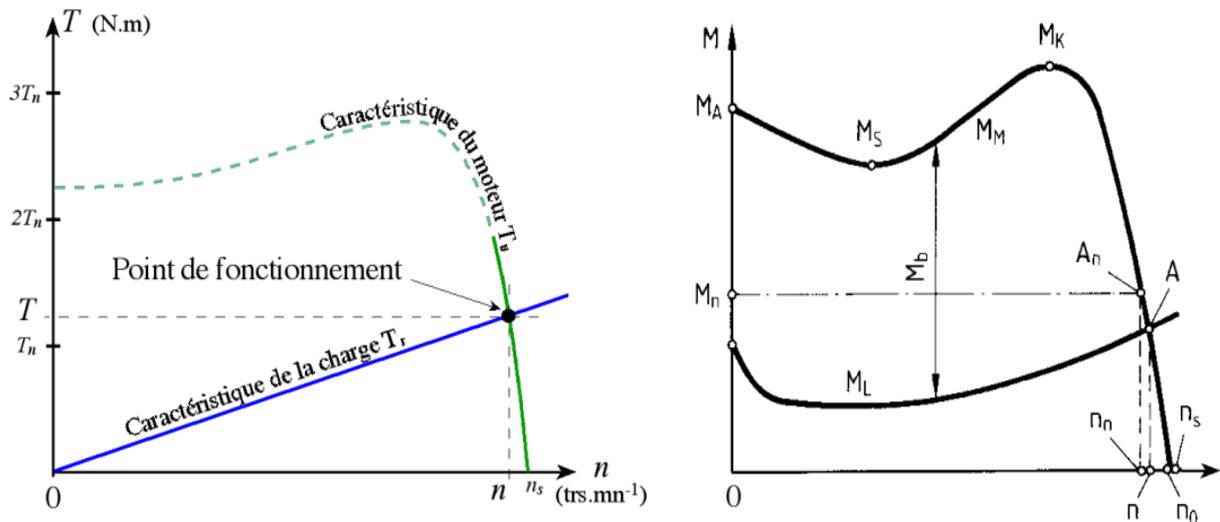


Figure III-2. Courbe caractéristique du couple du moteur en fonction de la vitesse

Avec :

- M_n : couple nominal ;
- M_L : couple résistant ;
- M_K : couple maximal ;
- M_M : couple du moteur ;
- M_A : couple initial de décolllement ;
- M_B : couple d'accélération ;
- M_S : couple minimal ;
- n_n : vitesse nominale ;
- n : vitesse de fonctionnement ;
- n_s : vitesse synchrone ;
- n_o : vitesse à vide ;
- A_n : point de fonctionnement nominal ;
- A : point de fonctionnement.

Le *couple initial de décollement* M_A . Les valeurs fournies par les fabricants du moteur doivent présenter des tolérances comprises entre -15% et +25%.

Le *couple nominal* M_n au cours du fonctionnement à une puissance P_n et à une vitesse n_n nominale. A vide, le couple est très faible et compense les frottements internes. Lorsque le moteur est chargé, sa vitesse diminue légèrement de la valeur de glissement g alors que couple augmente. Un moteur standard doit pouvoir garantir le couple nominal dans des conditions de fonctionnement continu sans avoir à dépasser sa valeur de température limite.

Dans certains modes de fonctionnement (S2, S3 et S6), le couple nominal peut être dépassé dans une certaine mesure à condition que la température limite ne soit pas dépassée au sein de la plage de fonctionnement.

Le *couple maximal* M_K , c'est le couple maximum que le moteur peut développer. Si la puissance dépasse la charge nominale P_n , le glissement g ne cesse pas d'augmenter, la vitesse n diminue et le moteur développe un couple plus élevé. Ce couple peut atteindre la valeur de crête M_K (couple maximal) et l'instabilité, du moteur, ce qui signifie que sa vitesse diminue brusquement jusqu'à une valeur qui peut être nulle.

Conformément aux normes, le couple maximal doit être $M_K \geq 1,6 M_n$, avec la possibilité de surcharger le moteur pendant 15 secondes minimum à cette valeur, la tension et la fréquence étant nominales. Les données du catalogue peuvent présenter une tolérance allant jusqu'à - 10%.

Etant donné que le couple maximal au démarrage est nettement supérieur dans certains moteurs où il atteint normalement des valeurs de $M_K = 2 \dots 3,5 M_n$, les moteurs à induction s'adaptent spécialement aux charges intermittentes pourvu que l'échauffement qui en résulte puisse être évacué.

Le *couple minimal* M_S , également dit couple d'entraînement qui est le plus petit couple possible pendant l'accélération. Il doit nécessairement dépasser le couple résistant effectif simultané M_L pour que le moteur puisse être accéléré. Les valeurs minimums relatives au couple minimal de démarrage sont spécifiées dans les normes en matière de fonctionnement à la tension nominale.

Le *couple résistant* M_L , soit le couple résistant de la charge pendant l'accélération.

Le *couple d'accélération* M_B , soit la différence entre le couple du moteur M_M et le couple résistant M_L .

Au cours du démarrage, le couple initial de décollement M_A doit être supérieur au couple résistant. De plus, le couple du moteur M_M doit rester supérieur au couple résistant M_L , pendant la phase d'accélération, comme l'indique la Figure (III-2). A l'intersection des deux lignes de couple (point de travail A), le moteur fonctionne à la vitesse constante n .

Dans le cas de surcharge, le point de fonctionnement A dépasse le point de fonctionnement nominal A_n . Un tel état n'est possible que pendant une brève période de temps pour éviter la surcharge du moteur. Le point de travail A ne doit pas être trop bas non plus, ce qui signifie qu'il ne faut pas choisir un moteur surdimensionné. Au-dessous de 50 % de la charge nominale, le rendement η ainsi que le facteur de puissance $\cos\varphi$ diminuent à tel point que les moteurs ne fonctionnent plus de manière économique.

D'autre part, un moteur plus grand présente un courant de démarrage supérieur I_A étant donné que ce type de courant n'est pas fonction du couple résistant. Seulement le temps d'accélération résulterait plus bref si l'on optait pour un moteur plus grand.

III.4.2. Conception d'un moteur

Les caractéristiques du couple peuvent être facilement adaptées à l'application en cas de moteurs triphasés à induction. Les deux facteurs importants sont, dans ce cas, un *faible courant de démarrage* I_A et un *couple de démarrage élevé* M_A . La caractéristique de couple ainsi que l'intensité du courant de démarrage sont déterminées essentiellement par le type de cage rotorique et la forme de l'encoche du rotor [16].

Il est possible d'obtenir un couple initial de décollement élevé M_A et un faible courant de démarrage I_A par le biais d'une résistance rotorique ohmique relativement élevée au niveau du couple de démarrage. En principe, un effet pelliculaire (également dit de Kelvin) a lieu au démarrage indépendamment du type de conception du rotor. Les conceptions de rotor sont de types suivants :

III.4.2.1. Rotors standard à cage

Rotors standard à cage avec une seule encoche et des conducteurs ronds, rectangulaires ou trapézoïdaux normalement réalisés en aluminium ; ils présentent un couple de démarrage relativement élevé de $1,8 \dots 2,5 \times M_n$ et un courant de démarrage élevé de $5 \dots 10 \times I_n$.

III.4.2.2. Rotors à déplacement de courant

Rotors à déplacement de courant (ou à *effet pelliculaire*), également dits rotors à encoches profondes. Si les barres de la cage sont hautes et étroites, l'effet pelliculaire se produit au démarrage, du fait de la fréquence rotorique élevée. Dans ces conditions, le courant circule à l'extérieur du rotor également appelé "peau".

Ce type de circulation réduit la section effective du conducteur tout en augmentant la résistance ohmique. Ils en résultent un bon couple de démarrage M_A et un courant de démarrage I_A faible et avantageux.

Cet effet pelliculaire disparaît pendant le fonctionnement lorsque la fréquence rotorique est très faible et le moteur présente une intensité et un couple standard.

III.4.2.3. Rotors à double cage

Rotors à double cage dont la barre se compose de deux barres unitaires normalement isolées électriquement. Ils sont caractérisés par une cage externe à faible résistance ohmique et une cage interne à haute résistance ohmique. Cette version est possible grâce à l'emploi d'un matériau approprié (Cu, Al, Ms) et au dimensionnement adéquat des sections transversales du conducteur. L'effet est même plus évident que dans un rotor à déplacement de courant : au démarrage, le courant ne circule pratiquement qu'au niveau de la cage externe ce qui réduit le courant de démarrage I_A et augmente relativement le couple de démarrage M_A . Il s'ensuit que le courant est distribué pendant le fonctionnement entre les deux cages, en raison de leurs résistances ohmiques [17].

III.4.2.4. Rotors à cage, haute résistance

Rotors à cage, haute résistance, également dit rotors de glissement, qui présentent la même forme à encoches qu'un rotor à cage standard, mais utilisent des conducteurs réalisés en laiton ou en alliage d'aluminium à haute résistance au lieu des conducteurs en Al ou en Cu. Cette configuration permet à la résistance ohmique d'augmenter. A la différence du rotor à déplacement de courant, cette résistance demeure constante sur toute la plage de vitesses et entraîne, pendant le fonctionnement, un glissement élevé avec caractéristiques flexibles et sans couple maximal au démarrage évident. Le couple de démarrage M_A est élevé grâce à la forte résistance rotorique tandis que le courant de démarrage I_A est diminué. Etant donné que la résistance ohmique reste élevée pendant le fonctionnement, des pertes relativement importantes se produisent et rendent le fonctionnement du rotor antiéconomique.

C'est pour cette raison que les rotors de ce type sont peu utilisés de nos jours, d'autant plus que l'on peut obtenir les mêmes caractéristiques avec des dispositifs électroniques tels que démarreurs et variateurs de vitesse.

La Figure (III-3) donne les différentes caractéristiques de couple typiques des divers types de cages.

K : cage standard (Al)

TN : rotor à encoche profonde (Al ou Cu)

DK : rotor à double cage (Al ou Cu ou Al à l'intérieur et Ms à l'extérieur)

W : rotor à cage, haute résistance M_s

M : couple

n : vitesse

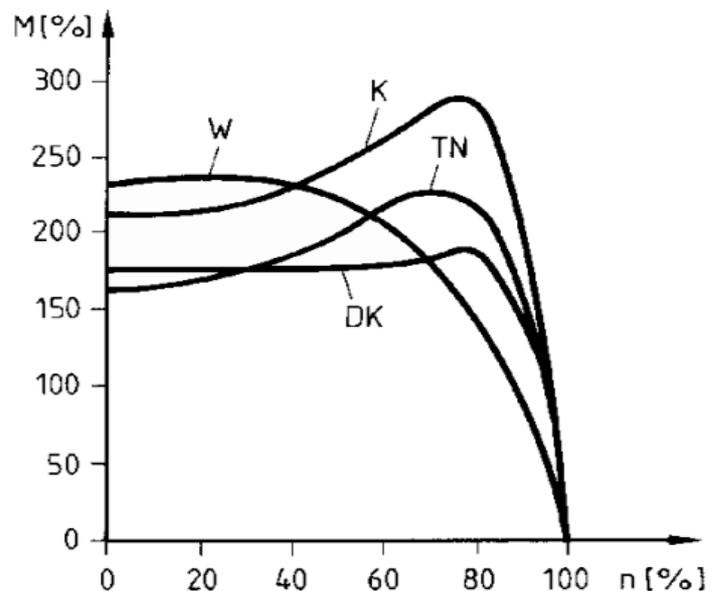


Figure III-3. Caractéristiques de couple typiques des divers types de cages [12]

III.5. COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DE LA VITESSE

Les moteurs sont dimensionnés correctement s'ils sont actionnés, en moyenne, au couple nominal M_n et à la vitesse nominale n_n leur permettant également de développer, la puissance nominale P_n et d'absorber l'intensité nominale I_n . Il est possible de ramener les caractéristiques de couple de la plupart des machines entraînées à des courbes typiques et donc caractéristiques, ce qui facilite énormément la conception du moteur.

La structure détaillée de la machine entraînée n'est pas habituellement prise en compte lors de la conception d'un moteur étant donné qu'on peut se limiter à préciser la courbe caractéristique de couple $T_r = f(n)$ ou $T_r = f(t)$, la vitesse en fonction du temps $n = f(t)$, l'accélération/décélération admissible maximum et le moment d'inertie total, ramené à l'arbre d'entraînement.

En principe, les caractéristiques diffèrent énormément entre les fonctionnements à vide et à pleine charge. Le moment d'inertie peut également varier suivant qu'il y a plus ou moins de matériaux à traiter dans la machine.

Il est impératif de connaître le comportement du couple résistant T_r en fonction de la vitesse afin de dimensionner le moteur et de vérifier les cycles de démarrage et de freinage.

Chaque machine entraînée oppose un couple déterminé au moteur, qui est normalement fonction de la vitesse. Il est appelé couple d'équilibre thermique et est essentiellement déterminé par le processus technologique. Il agit normalement dans le sens contraire du mouvement à une exception près : le mouvement de descente dans les mécanismes de levage. Lorsque la vitesse change, les couples d'accélération et de décélération, qui sont déterminés par le moment d'inertie, viennent s'ajouter à ce couple. La courbe caractéristique du couple de la charge étant connue dans la plupart des cas. On peut alors établir une classification des machines entraînées.

D'après les principes physiques d'ingénierie des moteurs, la puissance mécanique P d'un moteur est fonction du couple T_r et de la vitesse n ou de la vitesse angulaire ω .

Pour avoir un aperçu des différentes conceptions de machines, on doit les classer en fonction de leurs caractéristiques de couple ou de leurs courbes de puissances comme l'indiquent les paragraphes suivants :

III.5.1. Couple constant

La puissance demandée P est directement proportionnelle à la vitesse n . C'est le cas des machines-outils. En cas de couple T_r constant, la puissance P est proportionnelle à la vitesse n , $P \approx n$.

$$P = T_r \frac{2\pi}{60} n \quad (\text{III-1})$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (\text{III-2})$$

$$P = T_r \omega \quad (\text{III-3})$$

Le couple d'une machine entraînée résulte essentiellement du frottement mécanique qui demeure constant dans une vaste plage de vitesses comme l'indique la Figure (III-4). Dans ce cas, un frottement statique accru se présente lors du démarrage.

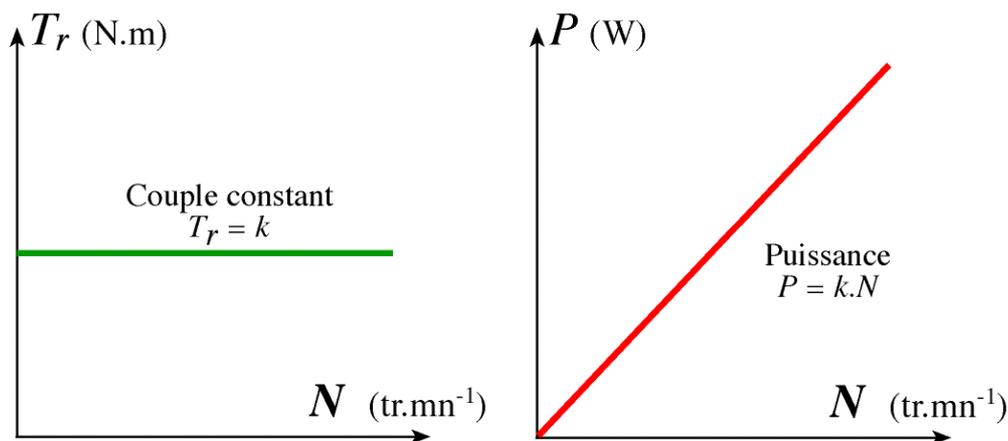


Figure III-4. Courbe caractéristique du couple constant

Le couple résistant moyen de ces applications correspond de façon approximative au couple nominal de la charge. Par conséquent, la puissance P peut être proportionnellement réduite dans ces applications en diminuant la vitesse n . Réduire la vitesse de moitié signifie réduire la puissance de moitié.

Voici des exemples de charges mécaniques à couple constant :

- mécanismes de levage, élévateurs, treuils ;
- machines-outils à force de coupe constante ;
- tapis transporteurs, moteurs d'alimentation ;
- rectifieuses sans ventilation ;
- pompes à pistons et compresseurs à pression constante ;

- laminoirs ou broyeurs à rouleaux ;
- en partie, les cisailles et les poinçons ;
- raboteuses ;
- roulements, engrenages.

III.5.2. Couple proportionnel

La puissance demandée est proportionnelle au carré de la vitesse. C'est le cas des machines à grande vitesse de fonctionnement.

Lorsque le couple T_r augmente proportionnellement à la vitesse n , et la puissance P augmente comme le carré de la vitesse n (Fig.III-5).

$$T_r = k n \quad (\text{III-4})$$

$$P = k n^2 \quad (\text{III-5})$$

Le couple résistant moyen de ces applications correspond de façon approximative à la moitié du couple nominal de la charge. En réduisant la vitesse n , la puissance P diminue du carré de sa valeur. Si la vitesse n est réduite de moitié, la puissance P n'est égale qu'à un quart de sa valeur.

Voici des exemples de charges mécaniques à couple constant :

- calandres, extrudeuses ;
- satinage du papier et fixage des textiles.

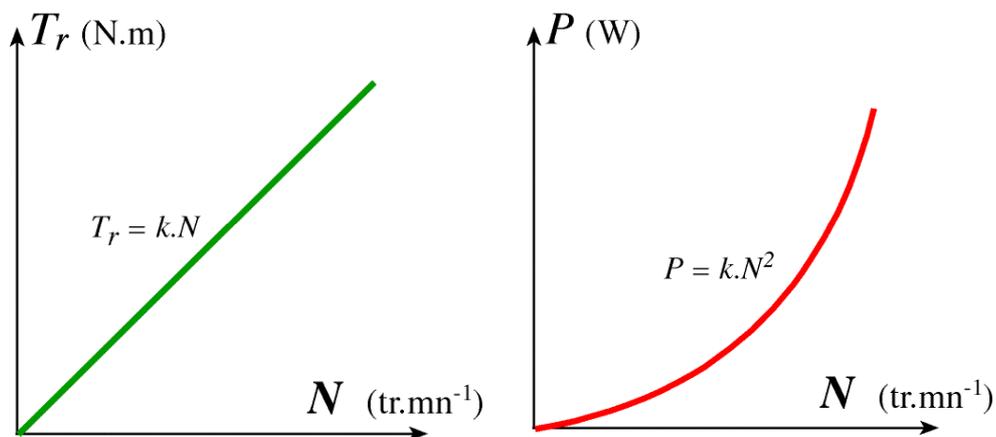


Figure III-5. Courbe caractéristique du couple proportionnel

III.5.3. Couple parabolique

La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. C'est le cas des ventilateurs et des pompes centrifuges.

Lorsque le couple T_r augmente comme le carré la vitesse n , $T_r \approx n^2$, la puissance P augmente comme le cube de la vitesse n , $P \approx n^3$ (Fig.III-6).

$$T_r = k n^2 \quad (\text{III-6})$$

$$P = k n^3 \quad (\text{III-7})$$

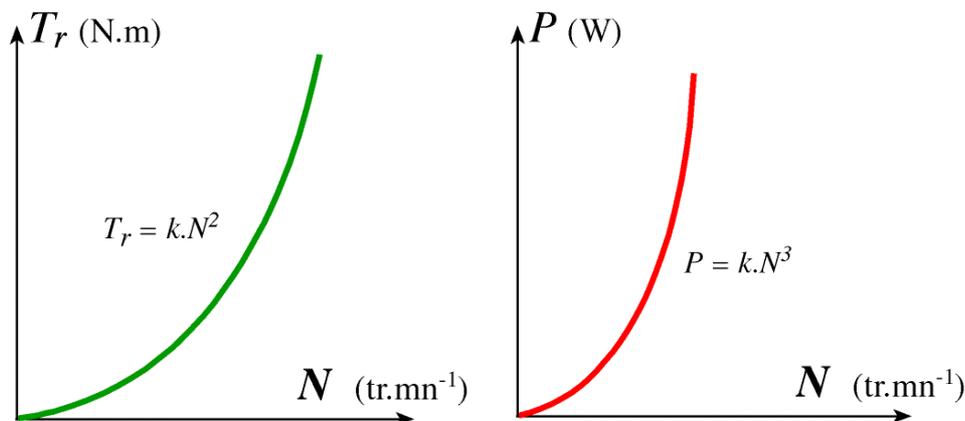


Figure III-6. Courbe caractéristique du couple parabolique

Le couple résistant moyen de ces applications correspond de façon approximative à un tiers du couple nominal de la charge. Etant donné que le couple T_r augmente en raison du carré de la vitesse n , la puissance P est fonction du cube de la vitesse. La réduction de la vitesse de moitié, nécessite un huitième de la puissance.

Ce rapport est important, par exemple, dans les moteurs des pompes et des ventilateurs pour le chauffage et la ventilation. Au lieu de réduire le débit de refoulement avec un robinet-vanne ou un robinet à papillon, il vaut mieux régler la vitesse du moteur d'entraînement [18].

Voici des exemples de charges mécaniques à couple constant :

- souffleries et ventilateurs de tous les types ;
- hélices ;
- machines à pistons avec refoulement dans un circuit de tubes ouvert ;
- pompes centrifuges.

III.5.4. Couple hyperbolique

La puissance demandée par le récepteur est constante. C'est le cas des machines à enrouler, ou à dérouler, et des machines de bobinages.

Si le couple T_r diminue de façon inversement proportionnelle à la vitesse n , $T_r \approx 1/n$, la puissance P demeure constante (Fig.III-7).

$$T_r = \frac{k}{n} \quad (\text{III-8})$$

$$P = k \quad (\text{III-9})$$

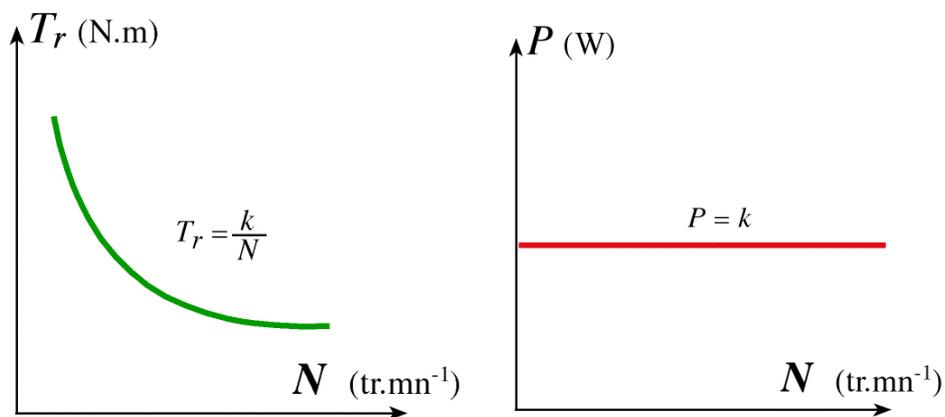


Figure III-7. Courbe caractéristique du couple hyperbolique

Voici des exemples de charges mécaniques à couple constant :

- tours en l'air ;
- décortiqueuses rotatives ;
- bobineuse ;
- enrouleuses.

III.6. COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DE L'ANGLE

Ces courbes caractéristiques se présentent dans les appareils avec un mouvement réciproque, par exemple les moteurs de table aussi bien que dans les appareils à piston (compresseurs dans les thermopompes) à cause de la charge intermittente. Le courant électrique que le moteur d'entraînement absorbe, suit le cycle du mouvement et peut créer dans la ligne une chute de tension fluctuant de façon rythmique. Il est réglé de tracer le soi-disant schéma de force de couple au moment de la conception de ces applications [19].

Nous avons représenté la Figure (III-8), la variation du couple électromagnétique en fonction de l'angle interne δ , les autres paramètres étant fixés à leurs valeurs nominales.

$$C_{EM} = \frac{V \sin \delta}{\rho L_d \Omega} [\rho \Phi_{ex} + (1 - \rho) \frac{V \cos \delta}{\rho \Omega}] \quad (\text{III-10})$$

Avec :

V : Tension induite [V] ;

ρ : Rapport de saillance ;

L_d : Inductance cyclique ;

Ω : Vitesse de rotation ;

δ : Angle interne, le déphasage entre la tension et la F.E.M ;

Φ_{ex} : Flux d'excitation magnétique [Wb].

Le fonctionnement moteur pour cette machine correspond à $\delta \in [0, \pi]$. Pour un couple de charge donné, deux points de fonctionnement sont possibles A et B. Si la machine n'est pas autopilotée, le point de fonctionnement B correspond à un fonctionnement instable. Une augmentation du couple résistant induit une décélération. Cette décélération se traduit par une augmentation de l'angle interne δ et donc une réduction du couple électromagnétique moteur.

La machine va ainsi décélérer et finalement décrocher. Seul le point A correspond à un point de fonctionnement stable.

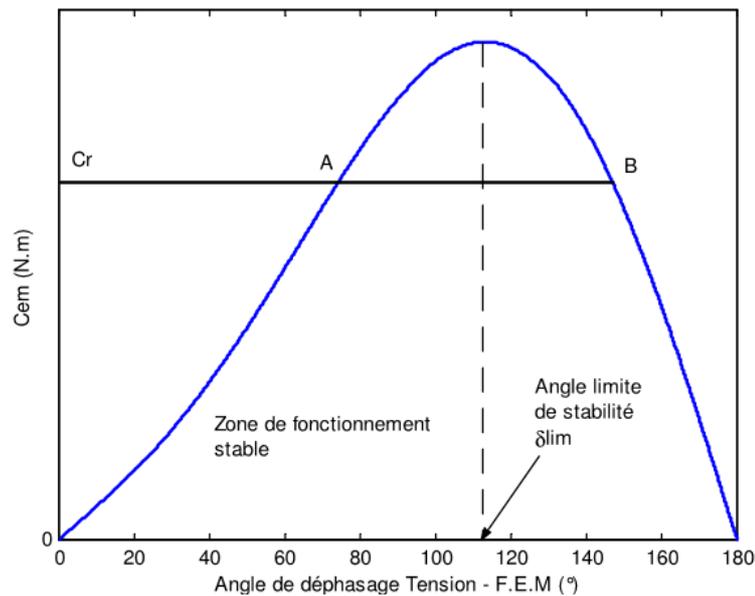


Figure III-8. Courbe caractéristique de couple en fonction de l'angle interne

III.7. COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DU PARCOURS

Ce sont les couples typiques, des véhicules, par exemple, ou des moteurs de table, des téléphériques et des tapis transporteurs.

III.8. COUPLES DE CHARGE EN FONCTION DU TEMPS

Ces moteurs sont chargés de façon intermittente ou périodiquement [I2] :

III.8.1. Couple de charge oscillatoire à une fréquence unique

Ce couple de charge peut être exprimé par :

$$C_r = C_{r,m} + C_{r,osci} \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$C_{r,m}$ est le couple de charge moyen ;

$C_{r,osci}$ est le terme oscillatoire du couple de charge ;

f_0 est la fréquence unique d'oscillation.

III.8.2. Couple de charge périodique avec intermittent

La perturbation périodique typique de la charge est sous forme des commutations dans le couple. Dans ce cas, le spectre du couple de charge, en supposant une période égale à $1/f_0$, contiendra une composante fondamentale à la fréquence f_0 , et une séquence d'harmoniques d'ordre élevé à des fréquences kf_0 , dont leurs amplitudes dépendent évidemment du rapport cyclique des commutations du couple.

III.9. COUPLES INITIAL DE DÉCOLLEMENT

Un autre concept fondamental est le soi-disant couple initial au décollément ou statique qui est dû au frottement statique. Pour qu'un moteur puisse démarrer de façon fiable, il faut connaître cette valeur le plus précisément possible et le couple de démarrage M_A du moteur doit dépasser le couple résistant. En cas de grandes machines équipées de paliers à glissement, il peut dépasser considérablement le couple nominal M_n .

III.9.1. Généralités

Le courant I_{dd} en démarrage direct varie entre 3 et 8 fois le courant nominal. Le couple C_{dd} en démarrage direct est toujours au moins égal au couple nominal ; le couple maximal est approximativement le double du couple nominal.

Les procédés de démarrage des moteurs se rangent en trois catégories :

- Par *action sur le circuit primaire* (applicable à tout moteur) ;
- Par *action sur le circuit secondaire* (applicable aux moteurs à bagues ou à rotor bobiné) ;
- Par *des procédés automatiques* (démarrateur électronique ou variateur de vitesse).

III.9.2. Couple de démarrage direct

La mesure du couple de décollage C_{dd} se fait en bloquant le rotor par un frein, le moteur étant alimenté sous la tension nominale. L'intensité de démarrage étant très élevée (4 à 8 I_n) cela risquerait de détériorer l'enroulement du stator. Pour ménager le moteur, on peut réduire la tension d'alimentation pendant la mesure et admettre que le couple est proportionnel au carré de la tension (Fig.III-9) :

$$C_{dd} = C_d \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \quad (\text{III-12})$$

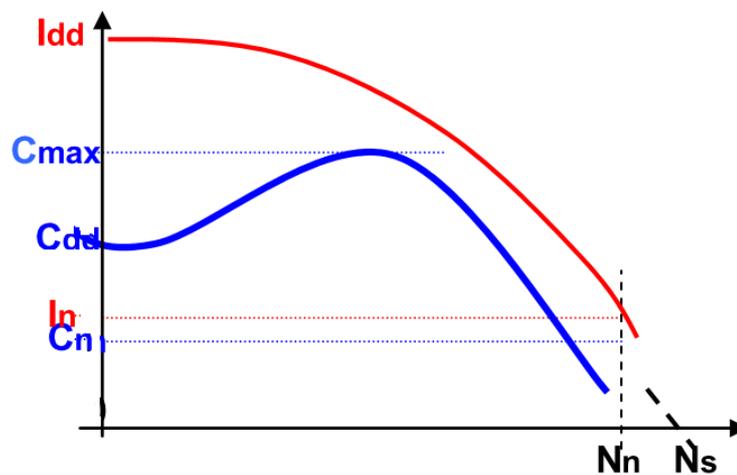


Figure III-9. Caractéristiques de démarrage direct

Le rapport des intensités est à peu près égal à celui des tensions. Puisque les intensités sont proportionnelles aux tensions, les couples produits sont proportionnels aux carrés des tensions.

Au démarrage $g=1$ et quelque soit le procédé de démarrage on a la relation suivante :

$$\frac{C_d}{C_{dd}} = \left(\frac{I_d}{I_{dd}} \right)^2 = \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2 \quad (\text{III-13})$$

Avec :

C_d et I_d : couple et intensité de démarrage quelque soit le procédé utilisé ;

C_{dd} et I_{dd} : Couple et intensité de démarrage direct ;

U_d : tension de démarrage quelque soit le procédé utilisé ;

U_n : tension nominale.

Le procédé de démarrage sera d'autant meilleur, que comparés aux valeurs nominales, I_d sera plus petit et C_d plus grand.

III.9.3. Durée de démarrage

Elle peut être déterminée par calcul ou par des abaques. L'équation fondamentale du couple d'accélération :

$$C_{ac} = C_{moy} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III-14})$$

Le temps mis pour passer du démarrage à la vitesse de régime :

$$t_d = \frac{J\Omega}{C_{moy} - C_r} \quad (\text{III-15})$$

Avec :

C_{moy} : Le couple moyen ;

C_r : Le couple résistant ;

J : Le moment d'inertie ;

Ω : La vitesse de rotation.

III.9.4. Constante de temps d'inertie d'une machine

Temps nécessaire pour faire passer la machine de l'arrêt à sa vitesse normale Ω_n avec son couple normal C_n :

$$T = \frac{J\Omega_n}{C_n} \quad (\text{III-16})$$

III.9.5. Procédés de démarrages

III.9.5.1. Démarrage par insertion de rhéostat statorique

A cause des pertes joules dans le rhéostat, ce procédé est anti-économique et ne peut être envisagé que pour les petits moteurs. Si au démarrage la tension appliquée au moteur est $U/2$, le courant est sensiblement $I_{dd}/2$ et l'on a :

$$\frac{C_d}{C_{dd}} = \left(\frac{I_d}{I_{dd}}\right)^2 = \frac{1}{4} \quad (\text{III-17})$$

Le courant a été divisé par 2 et le couple par 4. On ne pourra donc pas envisager de démarrer à pleine charge (Fig.III-10).

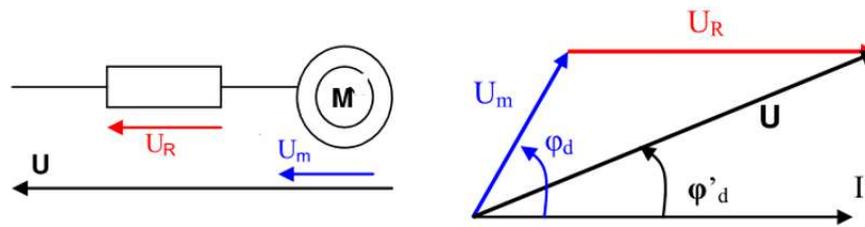


Figure III-10. Diagramme vectoriel

III.9.5.2. Démarrage par insertion de résistances rotoriques

Les Figures (III-11) et (III-12) donnent respectivement le couple et le courant de démarrage par insertion de résistances rotoriques.

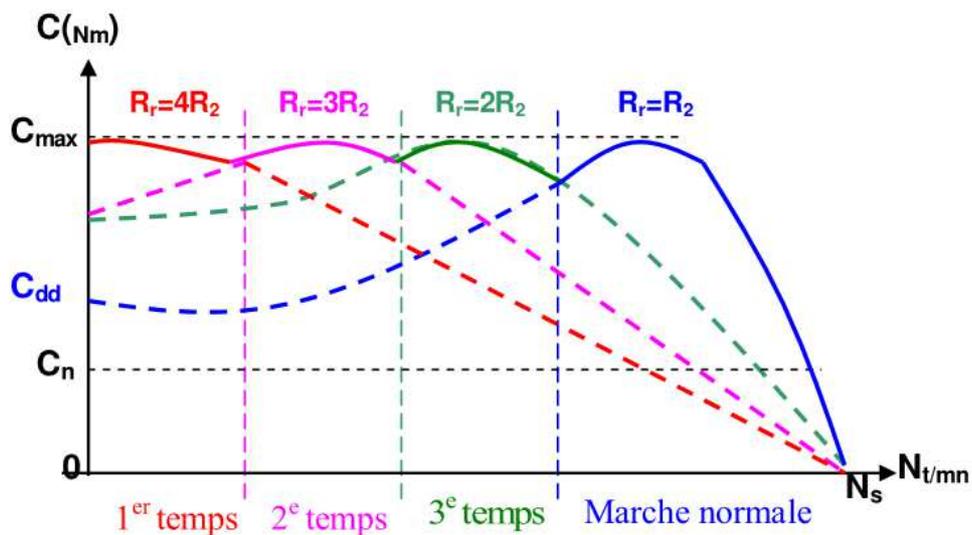


Figure III-11. Couple de démarrage par insertion de résistances rotoriques [18]

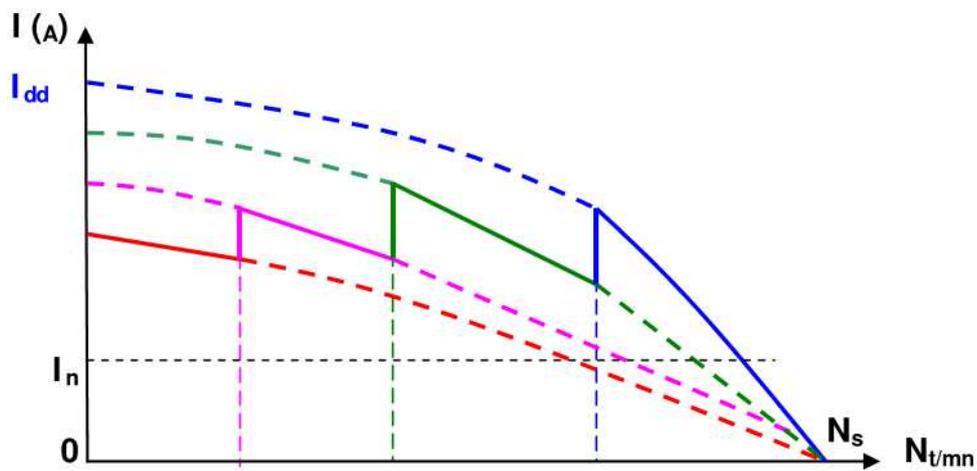


Figure III-12. Courant de démarrage par insertion de résistances rotoriques

III.9.5.3. Démarrage étoile-triangle

Les enroulements du stator sont couplés en étoile au démarrage puis en triangle pour le fonctionnement en charge.

Pour un démarrage en triangle, la tension appliquée à un enroulement est U (tension entre phase) et le courant dans cet enroulement est J_{dd} , mais le courant fourni par le réseau est :

$$I_{dd} = \sqrt{3} J_{dd} \quad (\text{III-18})$$

Pour un démarrage en étoile, la tension appliquée à un enroulement est $U/\sqrt{3}$ et le courant, identique pour un enroulement et le réseau, est :

$$I_d = \sqrt{3} J_{dd} \quad (\text{III-19})$$

$$\frac{C_d}{C_{dd}} = \left(\frac{J_d}{J_{dd}}\right)^2 = \frac{1}{3} \quad (\text{III-20})$$

Ce procédé a donc la même valeur que le précédent, puisque couple et courant sont divisés par le même nombre.

Bien entendu, lors du passage de l'étoile au triangle il y aura une nouvelle pointe de courant. Le démarrage à pleine charge est impossible puisque si $C_{dd} = 1,5 C_n$ on aura $C_d = 0,5 C_n$.

Ce procédé ne peut être utilisé que si le moteur est prévu pour le couplage triangle avec le réseau dont on dispose. Les moteurs offrant cette possibilité portent sur leur plaque l'indication de deux tensions, par exemple 220/380V et possèdent 6 bornes. On ne pourra leur appliquer que 220V en triangle, le réseau doit donc 127/220V.

Les Figures (III-13) et (III-14) donnent respectivement le couple et le courant de démarrage par insertion de résistances rotoriques.

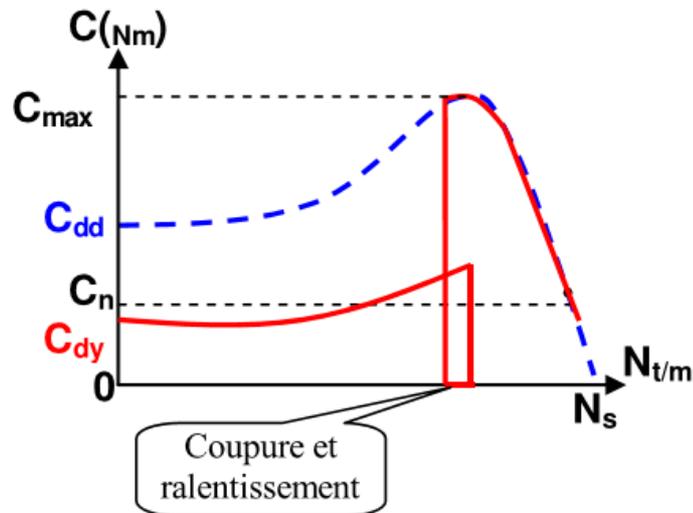


Figure III-13. Couple de démarrage étoile-triangle

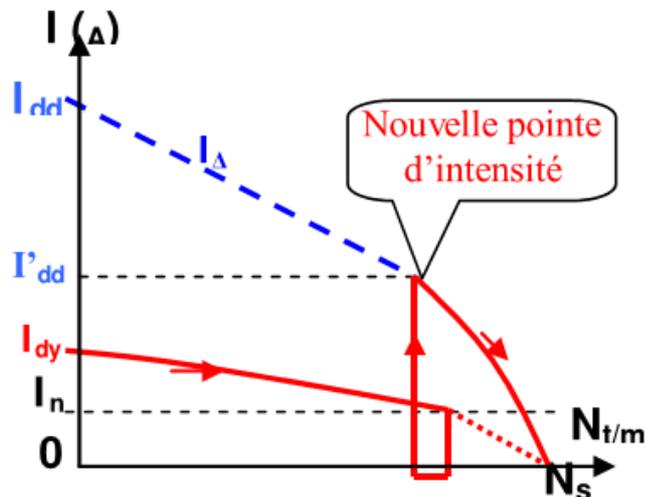


Figure III-14. Courant de démarrage étoile-triangle

III.10. CONCLUSION

En principe, les caractéristiques diffèrent énormément entre les fonctionnements à vide et à pleine charge. Chaque machine entraînée oppose un couple déterminé au moteur, qui est normalement fonction de la vitesse. Il est appelé couple d'équilibre thermique et est essentiellement déterminé par le processus technologique.

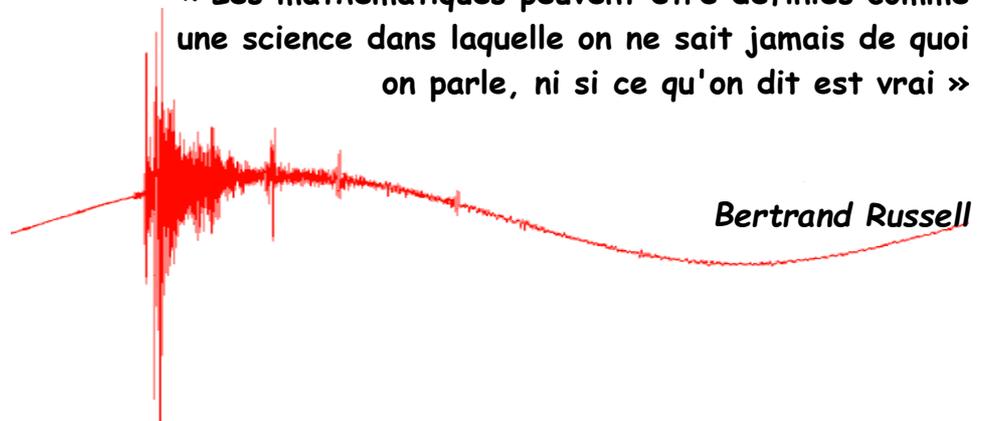
Il agit normalement dans le sens contraire du mouvement à une exception près : le mouvement de descente dans les mécanismes de levage. Lorsque la vitesse change, les couples d'accélération et de décélération, qui sont déterminés par le moment d'inertie, viennent s'ajouter à ce couple.

La courbe caractéristique du couple de la charge étant connue dans la plupart des cas. On peut alors établir choix et dimensionnement des moteurs électriques dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

« Les mathématiques peuvent être définies comme
une science dans laquelle on ne sait jamais de quoi
on parle, ni si ce qu'on dit est vrai »



Bertrand Russell

CHAPITRE IV

CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

IV.1. INTRODUCTION

Dans le vaste champ de l'électromécanique, une des plus anciennes disciplines est l'ingénierie des machines électriques. En fait les premières tentatives de construction de machines électriques commencèrent avec la découverte des phénomènes d'induction et la mise en évidence des forces issues de l'interaction entre les champs électromagnétiques et les courants de conduction (lois de : Lenz, Laplace, Faraday ... etc.).

Ainsi et désormais le domaine de conception des machines électriques est l'une des plus prestigieuses découvertes du siècle dernier et reste aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherche. L'objectif visé par cette recherche est toujours le dimensionnement des nouvelles machines adaptées à la demande du marché.

La caractérisation de ces machines entraîne à formuler des méthodes de dimensionnement qui s'appuie sur les équations tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et qui aboutit à une définition globale, le résultat obtenu est par la suite simulé grâce à un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ses performances à partir et électriques ainsi que les caractéristiques estimées suite aux contraintes imposées par le cahier des charges.

Plusieurs types de moteurs électriques sont disponibles (Fig.IV-1) [19,20].

- Les *moteurs à induction à cage d'écureuil monophasés et triphasés (AC)* sont les moteurs électriques les plus utilisés aujourd'hui. Le moteur polyphasé est privilégié pour son efficacité, sa faible dimension, sa simplicité de construction et sa fiabilité.
- Les *moteurs synchrones (AC)* sont essentiellement réservés aux fortes charges et aux applications à vitesse parfaitement constante.
- Les *moteurs à courant continu (DC)* sont souvent réservés aux applications où la vitesse doit être contrôlée avec précision.

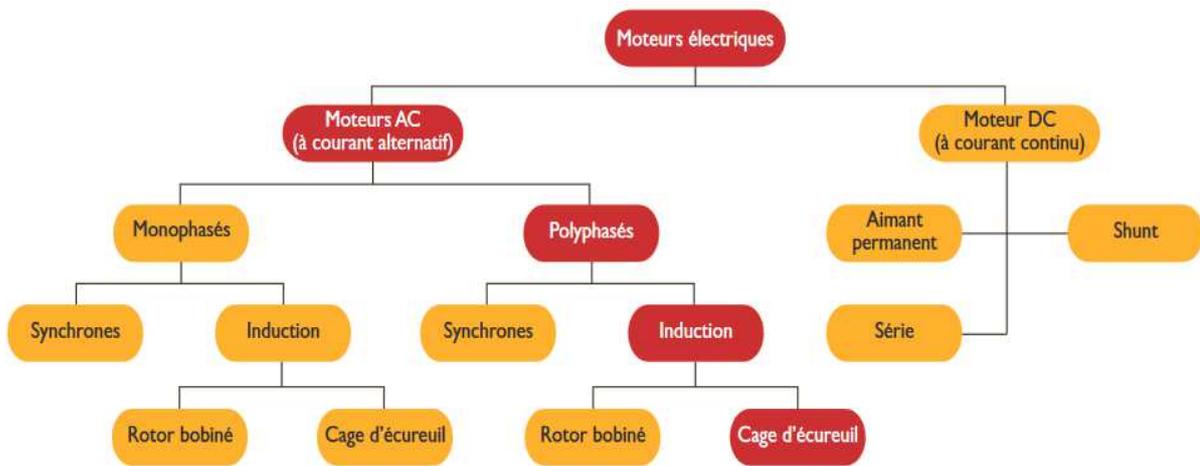


Figure IV-1. Différents types de moteurs électriques

Dans ce chapitre, on présentera des généralités sur les données catalogue et paramètres d'application des machines asynchrones pour faire la différence entre cette dernière, et les autres machines à partir de sa constitution, les procédures de sélection des moteurs. On situera en suite la procédure de calcul et de dimensionnement d'une machine asynchrone, ainsi que l'étude en vue de la vérification et de la validation de l'approche adoptée. En effet il n'existe pas de théorie précise pour le calcul des machines, ou plutôt des méthodes de calcul plus au moins précises basées sur des diagrammes établis à partir d'études statistiques. Nous nous sommes efforcés de choisir l'approche la plus appropriée, avec la meilleure précision possible.

IV.2. PUISSANCE DU MOTEUR

Le moteur triphasé est utilisé principalement dans les technologies d'entraînement à cause de la simplicité de sa structure mécanique et électrique et de sa fiabilité élevée. En effet, seules les caractéristiques de couple et de vitesse peuvent en limiter l'application [12].

Le passage de courant génère de la chaleur au niveau de l'enroulement du stator et au niveau du rotor ; cette chaleur peut ne pas dépasser les températures spécifiées pour les matériaux d'isolation de la classe IP. Les températures qui en résultent dépendent du niveau de la charge du moteur, de son oscillation dans le temps et des conditions de refroidissement. Les moteurs sont dimensionnés de sorte à ce que les températures limites ne soient pas dépassées si la charge est constante, à la puissance et aux conditions de fonctionnement nominales [21].

Le couple requis pour accélérer la masse centrifuge augmente le temps d'accélération du moteur. Le courant de démarrage qui circule pendant ce temps chauffe énormément l'enroulement.

La fréquence de commutation maximale, c.-à-d. que le nombre de démarrages consécutifs est limité. En effet, le moteur atteint sa température limite lors des démarrages fréquents, même à vide, sans couple résistant ni masse centrifuge supplémentaire.

Le facteur de service est un autre facteur important pour la sélection. Lors des intervalles de commutation, le temps de refroidissement doit être suffisamment long pour que la température limite ne soit pas dépassée au démarrage suivant. En cas de facteur de service court, le moteur peut accepter une charge supérieure étant donné l'impossibilité d'atteindre sa température limite à cause d'un temps trop bref et il peut refroidir de nouveau lors des intervalles [22].

Les moteurs surdimensionnés peuvent être surchargés thermiquement si le temps de démarrage est trop long alors que les moteurs surdimensionnés provoqueraient la surchauffe de la transmission et de la machine entraînée au moment du démarrage.

IV.2.1. Données catalogue et paramètres d'application

Un moteur dit *standard*, habituellement à induction, répond à la plupart des exigences techniques des applications modernes. Les informations ci-après concernent ce type de moteur, sauf indication contraire. Il est possible d'utiliser les moteurs à induction dans une vaste gamme d'applications. Pour pouvoir sélectionner le moteur qui s'adapte le mieux aux spécifications du fabricant, il est indispensable d'établir une configuration de base. Le but de la conception est de parvenir à la conformité aux conditions suivantes [12,23] :

- *l'alimentation ;*
- *les caractéristiques électriques et mécaniques d'un moteur ;*
- *les conditions de fonctionnement ;*
- *les coûts d'investissement, de fonctionnement et d'entretien ;*
- *la durée de vie ;*
- *les mesures de protection environnementale et de prévention des accidents.*

Il est possible de choisir sur la base de ces conditions, un moteur adéquat et des dispositifs auxiliaires appropriés.

IV.2.2. Détermination de la puissance homologuée

La puissance *homologuée* ou *nominale* d'un moteur peut être déterminée selon divers facteurs, étant donné que les conditions à remplir diffèrent d'une application à l'autre.

L'aperçu du Tableau (IV-1) indique quels sont les facteurs de sélection importants :

Tableau IV-1. Facteurs de sélection pour le type de moteur et la puissance nominale [12]

<i>Facteur de sélection</i>	<i>Caractéristique moteur</i>
<i>Couple</i>	<i>Puissance</i>
<i>Moment d'inertie</i>	<i>Temps de démarrage</i>
<i>Couples résistants typiques</i>	<i>Couple moteur</i>
<i>Analyse de conception par</i>	<i>Optimisation</i>
<i>Couple de charge</i>	<i>Couple du moteur</i>
<i>Couple d'accélération</i>	<i>Temps de démarrage</i>
<i>Temps d'accélération</i>	<i>Capacité d'accélération</i>
<i>Fréquence de commutation</i>	<i>Echauffement moteur</i>
<i>Modes de fonctionnement</i>	<i>Echauffement moteur</i>
<i>Conditions de démarrage</i>	<i>Courbe caractéristique couple</i>
<i>Freinage et commutation</i>	<i>Echauffement</i>
<i>Processus thermiques</i>	<i>Capacité de charge</i>

IV.2.3. Données des catalogues

Il est possible de déterminer le degré de conformité d'un moteur aux conditions requises en le comparant aux données du catalogue du fabricant. Le Tableau (IV-2) répertorie les paramètres les plus importants à respecter, en fonction de l'application. Certains de ces paramètres ont été standardisés tandis que d'autres sont spécifiques au fabricant ou à la discrétion du client qui peut les choisir parmi plusieurs alternatives.

Par conséquent, le concepteur dispose toujours d'une certaine marge de liberté lorsqu'il définit un moteur. Plusieurs fabricants proposent des configurations de moteurs modulaires. En général, les spécifications ci-après peuvent être définies au moment de la commande :

- *conception du rotor et donc caractéristiques de couple*
- *système de refroidissement*
- *classe d'isolation des enroulements*
- *forme de construction*
- *type d'installation*
- *degré de protection.*

Tableau IV-2. Données de catalogue pour moteurs [12]

Données à définir	Remarques
Conditions électriques requises	
Type de Tension	Tension de fonctionnement, pour les
Tension triphasé, Tension monophasé	V
Fréquence	Hz
	moteurs multi tension indiquer toutes les valeurs et les tolérances possibles
Données de catalogue	
Désignation de type	Spécifications du fabricant
Régime	Pour moteurs multi-vitesse, indiquer la puissance pour chaque vitesse
Vitesse	Pour moteurs multipolaires, indiquer la vitesse par puissance
Courant nominal	A
Courant initial de démarrage/nominal	Spécifications du fabricant
Couple	Nm
Couple initial de démarrage/nominal	Spécifications du fabricant
Couple initial de décollement/nominal	Spécifications du fabricant
Couple maximal de démarrage /nominal	Spécifications du fabricant
Moment d'inertie	kgm ²
Rendement η	%
Temps de blocage maxi	s
Temps de démarrage maxi	s
Tolérances	Spécifications du fabricant
	Conformément aux normes
Type de conception	
Commutation	Pour démarrage étoile, triangle toujours spécifier triangle
Triangle, étoile	
Type de rotor	
Rotor à cage, rotor bobiné	
Modèle	IM..
Type de protection	IP..
Type de refroidissement	
Refroidissement naturel/interne	
Refroidissement automatique/de surface	
Refroidissement à circuit fermé, séparé	
Classe d'isolation	
B, F, H	Indiquer la limite de température, si nécessaire
Amplitude vibrations	
Niveau de bruit	dB
Réglages spéciaux	Normale ou réduite
Bornier	Réglages électriques et mécaniques
Extrémités d'arbre	Indiquer type de protection et conception si nécessaire
Composants ajoutés et incorporés	Indiquer type de protection et conception si nécessaire
Freins, dynamo-tachymétrique	
Ventilation, radiateur ambiant	Indiquer l'interrupteur/la fiche, si nécessaire
Instruments de mesure de température	
- Protection thermistance	Pour roulements ou enroulements statoriques
- Interrupteur bilame	
- Sonde PTC	Contacts d'enclenchement/déclenchement
- Résistances PTC	

IV.2.4. Conditions de fonctionnement

Aux fins de la conception, les conditions de fonctionnement et les paramètres de la charge entraînée sont aussi importants que les données relatives au moteur. Le Tableau (IV-3) indique les données principales à respecter pour la conception. Dans des cas critiques, il est préférable de sélectionner le moteur d'entraînement convenant aux spécifications de l'entraînement donné en collaboration avec le fournisseur du moteur.

Tableau IV-3. Données importantes pour la conception d'un moteur [12]

Données à définir	Remarques
Contre-couple ou couple résistant Nm - constant - augmentant en raison du carré vitesse - courbe spéciale	A convertir pour arbre moteur A convenir avec le fabricant si nécessaire
Moment d'inertie de la charge kgm ²	A convertir pour la vitesse du moteur maximale
Type de démarrage - étoile-triangle - démarrage à pleine charge - démarrage à vide - autres méthodes	Démarrage intensifié étoile-triangle, éventuellement. Démarreurs à vitesses variables ou variateurs de vitesse, éventuellement.
Freinage électrique	Par inversion de phase ou injection de courant continu
Mode de fonctionnement	
S ₁	Service continu
S ₂ min	Service temporaire
S ₃ %	Service périodique intermittent sans démarrage
S ₄ %, c/h	Service périodique intermittent avec démarrage
S ₅ %, c/h	Service périodique intermittent avec démarrage et freinage électrique
S ₆ %	Service continu à charge intermittente
S ₇ c/h	Service ininterrompu avec démarrage et freinage électrique
S ₈ %, c/h	Service ininterrompu à variations périodiques de charge et de vitesse
S ₉	Service ininterrompu à variations non périodiques de charge et de vitesse
Température ambiante °C	mètres au-dessus du niveau de la mer
Altitude	horaire, anti-horaire ou les deux
Sens de rotation	méthodes et de ... à ...
Réglage de la vitesse	Considérer également l'humidité relative
Influences climatiques	
Charge de roulement et d'arbre	
Force axiale N	Direction de la force par rapport à la position de l'arbre
Force radiale N	Indiquer la distance de l'épaulement de l'arbre
Forces rotatives N	

IV.2.5. Procédure de sélection des moteurs

Bon nombre des moteurs sont en service continu S1. Le premier facteur à prendre en compte pour la sélection est la puissance en service continu. Étant donné que la durée de vie des appareils électriques dépend en grande partie de la température dans des conditions de fonctionnement continu, la sélection d'un moteur doit être exécutée très attentivement. La deuxième étape de la procédure de sélection consiste en l'évaluation de l'aptitude du moteur à remplir les conditions de démarrage requises, en particulier en ce qui concerne le temps ou le couple de démarrage. Ces considérations sont essentiellement valables pour les moteurs aux modes de fonctionnement complexes (S2 à S9), pour lesquels l'avis des fournisseurs est normalement nécessaire à cause des conditions de charge variables et de la fluctuation des températures au niveau des enroulements.

IV.3. DIMENSIONNEMENT A L'AIDE DU COUPLE RÉSISTANT

Le couple résistant C_r résulte du contre-couple de la machine entraînée augmenté du rendement η avec lequel toutes les pertes mécaniques sont calculées. Selon les courbes des caractéristiques de la charge, ce couple peut lors de l'accélération :

- évoluer graduellement (par exemple, les ventilateurs) ;
- atteindre la valeur nominale au démarrage (par exemple, les appareils de levage) ;
- n'apparaître qu'après l'accélération (par exemple, les machines d'usinage du bois) ;
- être présente de façon constante ou intermittente.

$$P = \frac{n C_r}{9,55 \eta} \quad (\text{IV-1})$$

Avec :

P : puissance en W ;

C_r : couple en Nm ;
 n : vitesse en t/min ;
 η : rendement.

En cas d'appareil de levage, pour la puissance de levage P à une vitesse donnée v et à la force F , compte tenu du rendement η , on obtient :

$$P = \frac{F v}{\eta} \quad (\text{IV-2})$$

Avec :

P : puissance de levage en W ;
 F : force de levage en N ;
 v : vitesse de levage en m/s ;
 η : rendement.

Le couple résistant C_r doit être inférieur, au couple de moteur correspondant C_M à tout moment pendant l'accélération. Dans le cas contraire, aucune accélération à des vitesses supérieures n'aurait lieu.

IV.4. CALCUL A L'AIDE DU COUPLE OU DU TEMPS D'ACCÉLÉRATION

IV.4.1. Couple d'accélération

Une charge ne peut être accélérée que si le moteur d'entraînement fournit un couple supérieur à celui que la charge nécessite. On appelle cette différence couple d'accélération M_B . Le couple d'accélération et les moments d'inertie relatifs au moteur, à la transmission, et au système à accélérer forment le temps d'accélération t_A . Dans plusieurs cas, on se limite à supposer tout simplement que le couple de charge reste constant au cours de l'accélération. On parvient alors à cette supposition en calculant un couple de charge moyen et en remplaçant le couple du moteur variable par un couple d'accélération moyen constant résultant des caractéristiques.

Pour un temps de démarrage donné t_A , le couple d'accélération requis M_B est calculé comme suit :

$$M_B = M_m - M_L \quad (\text{IV-3})$$

$$M_B = J \times \alpha \quad (\text{IV-4})$$

$$\alpha = \frac{\omega}{t_A} \quad (\text{IV-5})$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{IV-6})$$

D'où :

$$M_B = \frac{J \times n}{9,55 t_A} \quad (\text{IV-7})$$

$$t_A = \frac{J \times n}{9,55 M_B} \quad (\text{IV-8})$$

Avec :

M_M : couple du moteur en Nm ;

M_L : couple résistant en Nm ;

t_A : temps de démarrage en s ;

α : accélération angulaire/s² ;

n : vitesse moteurs/min ;

ω : vitesse angulaire/s ;

M_B : couple d'accélération moyen en Nm ;

J : moment d'inertie en kgm² par rapport à l'arbre moteur.

IV.4.2. Temps d'accélération

Il est possible de déterminer le temps d'accélération t_A en utilisant le rapport ci-après, si l'on connaît le couple d'accélération moyen M_B . Une méthode relativement simple de calculer ce temps est indiqué dans la Figure (IV-2). Le couple du moteur M_M et le couple résistant M_L sont tracés sur du papier millimétré en vue de définir graphiquement les couples moyens, par exemple en comptant les carrés. L'abaque final mettra en évidence le couple d'accélération moyenne M_B .

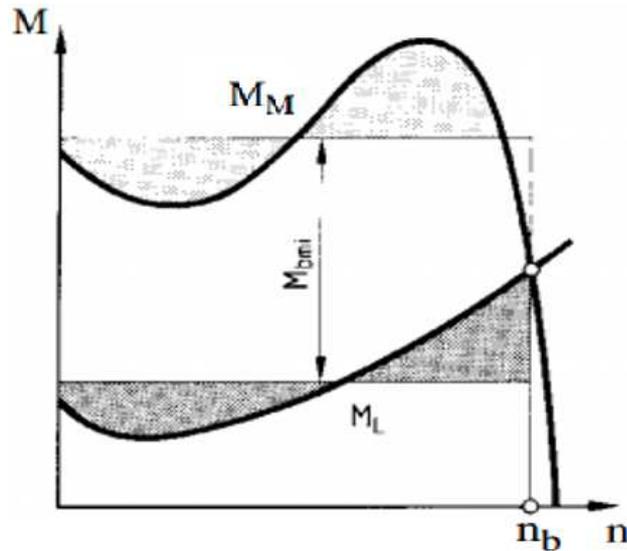


Figure IV-2. Détermination du couple d'accélération moyenne

Lorsque l'on choisit un moteur, le temps d'accélération t_A doit être, compte tenu de la fréquence de commutation, plus court que le temps maximum spécifié par le fabricant. Les moteurs à vide et ceux qui présentent de faibles masses centrifuges supplémentaires comme les embrayages ... etc. atteignent leur vitesse à vide très facilement. Cela est aussi vrai en ce qui concerne le démarrage avec une charge. En effet, les temps de démarrage ne sont très longs qu'en cas d'accélération de masses centrifuges importantes.

On parle dans ce cas de démarrage lourd comme par exemple, dans les centrifuges, le broyeurs à boules, les calandres, les systèmes de transport et les grands ventilateurs. Ces applications nécessitent souvent des moteurs spéciaux ainsi que des réducteurs appropriés. La Figure (IV-3) indique les valeurs de référence de temps de démarrage en fonction de la puissance.

Si la courbe du couple résistant M_L est complexe et que le couple du moteur M_M n'est pas constant, il est avantageux de diviser le calcul en zones individuelles comme l'indique la Figure (IV-4). De cette façon, les temps d'accélération relatifs aux zones unitaires plus les couples d'accélération moyens qui prennent effet dans le segment sont calculés et ajoutés pour les segments de vitesse unitaire (par exemple, 20% d'augmentation de vitesse par segment).

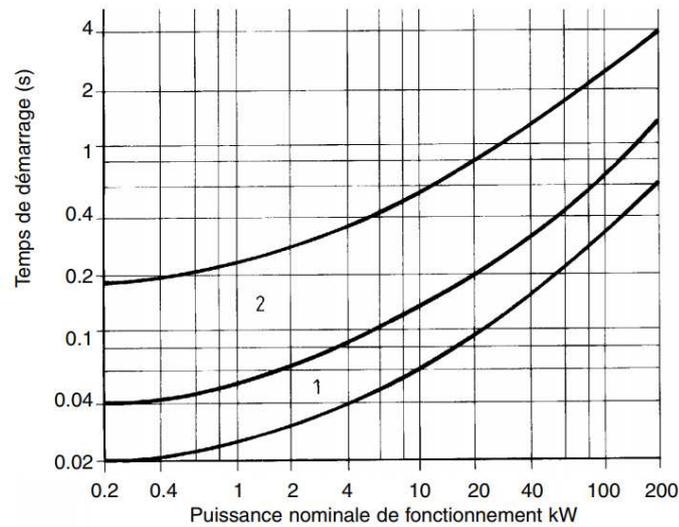


Figure IV-3. Valeurs de référence typiques dues au démarrage de moteurs en fonction de la puissance nominale

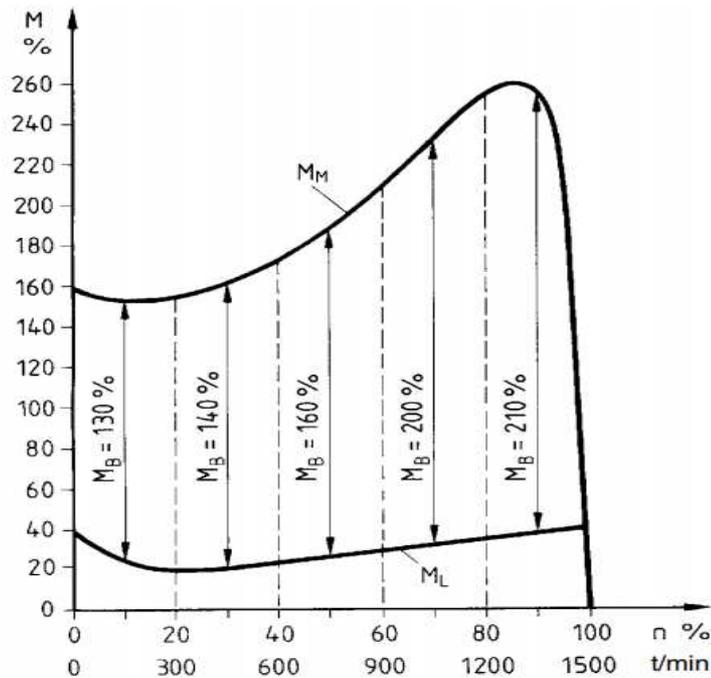


Figure IV-4. Couple d'accélération pour calculer le temps d'accélération lorsque le couple du moteur M_M et le couple résistant M_L ne sont pas constants et que leurs courbes sont très différentes

IV.5. CHOIX PRÉLIMINAIRE DU MOTEUR

Une fois que la puissance exigée du mécanisme à entraîner est déterminée et que les corrections nécessaires lui ont été apportées, on effectue un choix préliminaire du moteur. Ce dernier doit développer une puissance supérieure ou égale à celle de la charge et une vitesse proche de celle du mécanisme. Néanmoins, le choix définitif de la vitesse de rotation du moteur électrique

s'opère en considérant simultanément le moteur et la transmission, notamment au niveau du coût. Les moteurs rapides, plus petits, sont, en principe, meilleur marché que les lents, mais ils exigent des rapports de transmission plus élevés, présentent des rendements très faibles et des facteurs de puissance défavorables. La recherche du réducteur adéquat doit prendre en compte le côté encombrement.

Parfois, il est plus commode de ne pas passer par un réducteur pour transmettre la puissance désirée, si la vitesse d'entraînement exigée est proche de la vitesse de régime du fonctionnement du moteur.

Les réducteurs sont normalement déterminés pour une charge uniforme et pour une cadence de démarrage faible. Dans le cas contraire, il est nécessaire de multiplier le couple de sortie par un facteur d'utilisation (ce facteur dépend du type de service du moteur ; se reporter aux diagrammes constructeur correspondants), et d'augmenter ainsi la puissance du moteur. La sélection d'un réducteur ou d'un motoréducteur doit tenir compte de l'application.

IV.5. VÉRIFICATION DU MOTEUR

Après le choix préliminaire du moteur, il faut s'assurer que ce dernier peut fournir la puissance d'entraînement requise sans pour autant être affecté par les régimes transitoires (accélération, décélération, changement de vitesse ou variation de charge).

Une vérification des critères de démarrage et d'échauffement est donc obligatoire ; elle nécessite en premier lieu la connaissance du type de service de fonctionnement de la charge.

L'organigramme de la Figure (IV-5) résume la vérification principale du moteur.

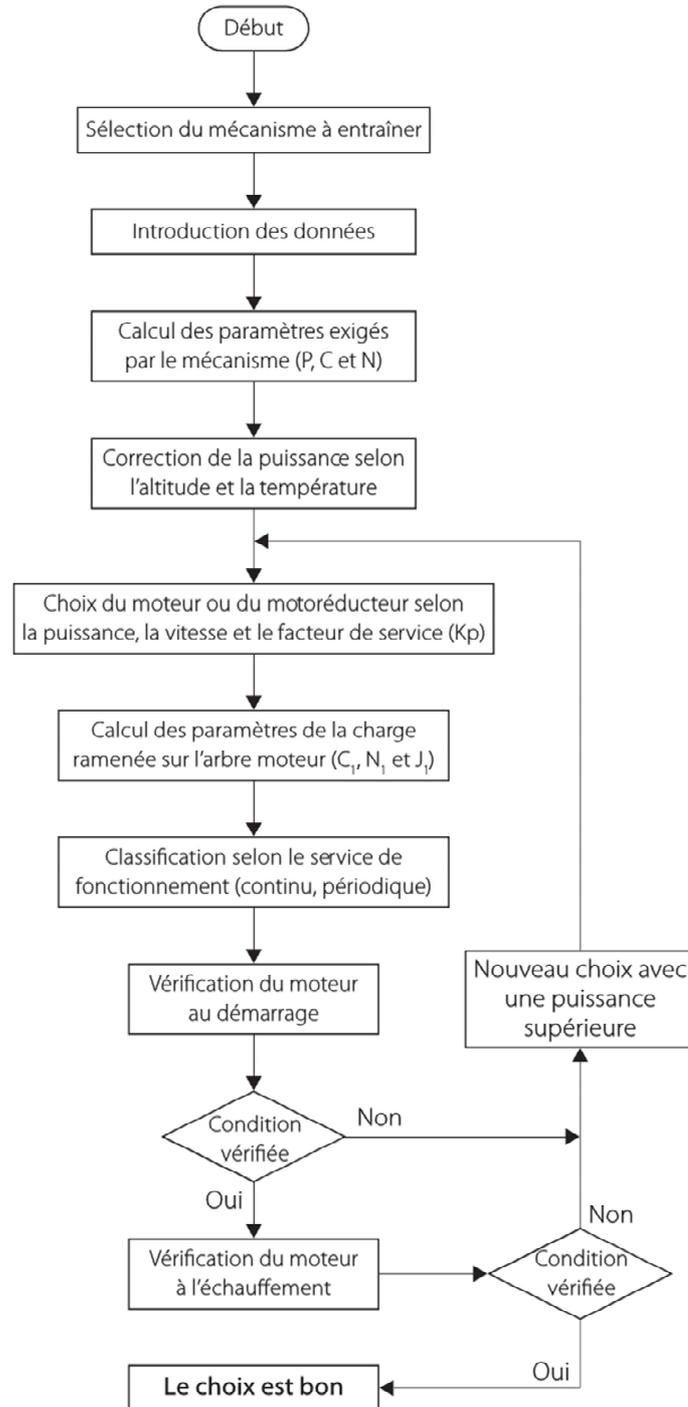


Figure IV-5. L'organigramme de la vérification principale du moteur

IV.5.1. Détermination du type de service de fonctionnement

La norme CEI 60034-1 prévoit dix types de service de fonctionnement, qui peut être continu, temporaire ou périodique, comprenant une ou plusieurs charges qui restent constantes pendant la durée spécifiée, ou non périodique, pendant lequel, généralement, la charge et la vitesse varient dans la plage de

fonctionnement admissible. C'est à l'utilisateur qu'incombe la responsabilité de spécifier le type de service :

- *numériquement*, si la charge ne varie pas ou varie de façon connue ;
- *graphiquement*, par une représentation des grandeurs variables en fonction du temps.

IV.5.2. Vérification du moteur au démarrage

Le moteur doit fournir un couple au démarrage supérieur au couple résistant pour qu'il y ait entraînement (Fig.IV-6), une condition qui est vérifiée si le couple accélérateur moteur est positif ; mais il faut aussi que le moteur puisse entraîner le mécanisme dans un temps limite exigé par le cahier des charges.

Le couple accélérateur moteur est donné par la formule suivante :

$$C_{ac} = C_M + C_r \quad (\text{III-9})$$

Avec :

C_r : couple résistant de la charge ;

C_M : couple moteur durant le démarrage.

Les constructeurs donnent une valeur moyenne du couple moteur durant la phase de démarrage avec la formule :

$$C_M = \frac{C_d + C_n + 2(C_{max} + C_{min})}{6} \quad (\text{III-10})$$

Avec :

C_d : couple de démarrage du moteur ;

C_n : couple nominal du moteur ;

C_{min} : couple d'accrochage du moteur ;

C_{max} : couple de décrochage du moteur.

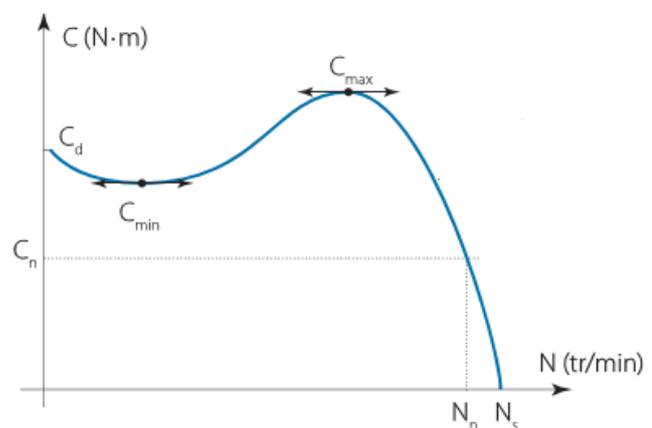


Figure IV-6. Couples moteur

L'organigramme de la Figure (IV-7) résume la vérification du temps de démarrage du moteur.

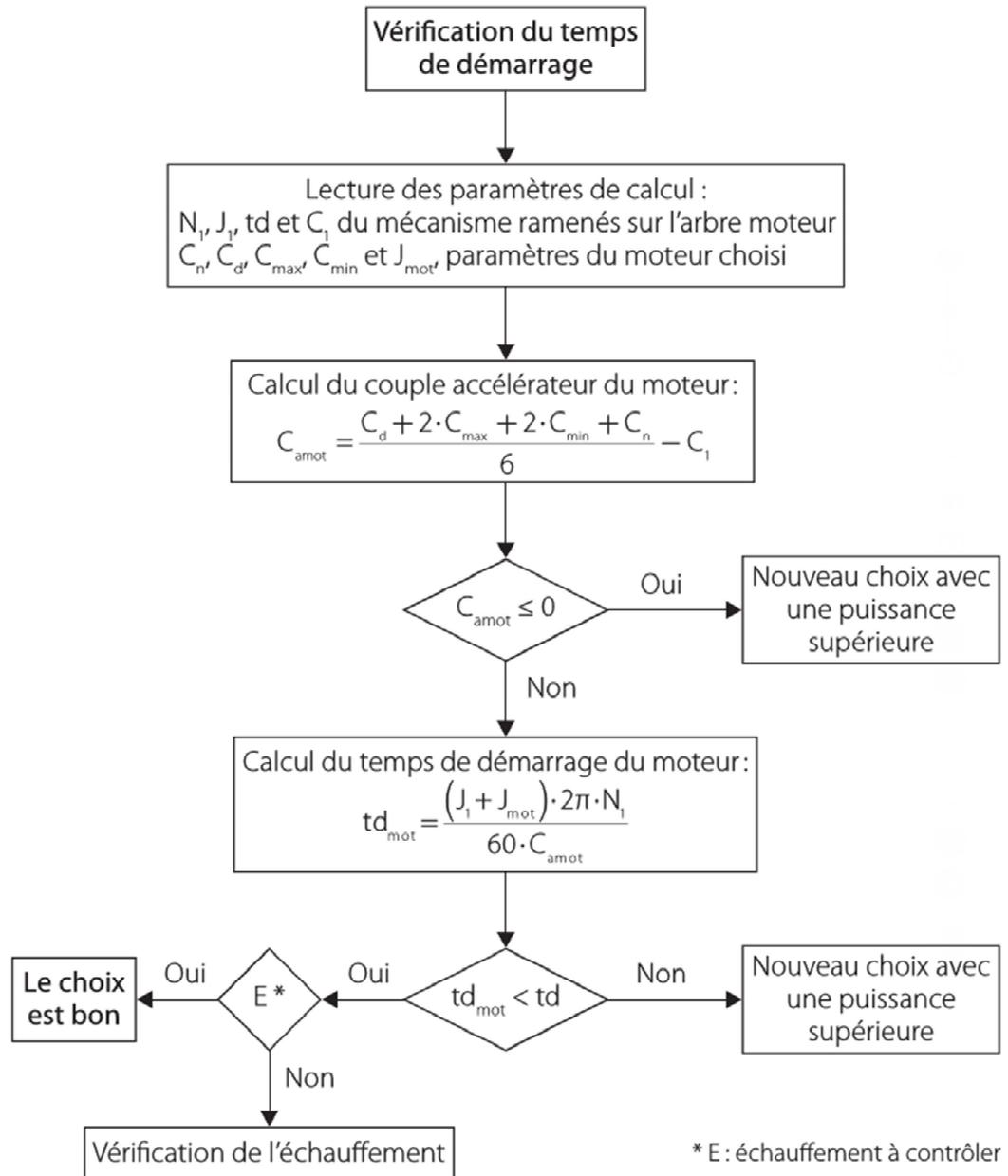


Figure IV-7. L'organigramme de la vérification du temps de démarrage du moteur

IV.5.3. Vérification du moteur d'après l'échauffement

La vérification du moteur d'après l'échauffement se fait par l'estimation de la puissance équivalente pendant une heure en prenant en considération la puissance utile de la charge durant les différents cycles de travail ainsi que la puissance des régimes transitoires :

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{P_{tr}^2 t_{tr} + P_u^2 t_u}{3600}} \quad (\text{III-II})$$

Avec :

P_{tr} : puissance des régimes transitoires (pour un calcul simplifié, on prend comme référence la puissance de démarrage) ;

t_{tr} : temps des régimes transitoires (on utilise le temps de démarrage) ;

P_u : puissance utile du moteur pendant le cycle d'utilisation hors démarrage ;

t_u : temps de fonctionnement utile.

L'organigramme de la Figure (IV-8) résume la vérification du temps de démarrage du moteur.

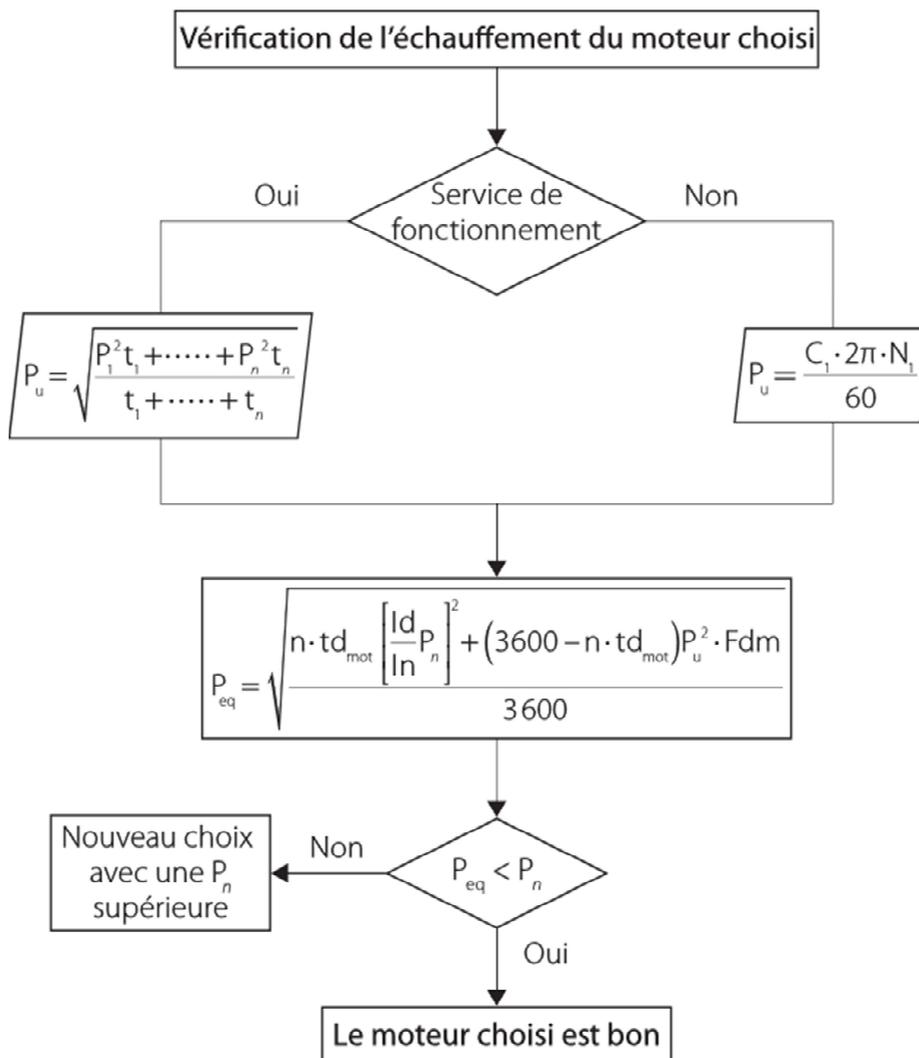


Figure IV-8. L'organigramme de la vérification du moteur d'après l'échauffement

IV.6. CALCUL A L'AIDE DE LA FRÉQUENCE DE COMMUTATION

Le démarrage fréquent de moteurs est appelé mode de commutation pour lequel on doit tenir sous contrôle la fréquence de commutation horaire maximum. Les données du fabricant indiquent habituellement la fréquence de commutation à vide horaire admissible, c'est-à-dire le nombre de commutations aux quelles le moteur atteint sa température à vide maximum. La fréquence de commutation joue un rôle déterminant dans le mode de fonctionnement S4.

La fréquence de commutation d'un moteur est déterminée à l'aide de sa valeur de température limite. Il résulte de la valeur moyenne carrée du courant dérivé des caractéristiques du cycle. Cette valeur moyenne ne doit pas dépasser le courant nominal de la machine.

Les commutations excessives responsables du déclenchement des dispositifs de protection voire de la destruction du moteur se produisent souvent au cours de la mise en service, des réglages et du fonctionnement par impulsions. Une masse d'inertie supplémentaire est souvent la cause d'une condition de charge. Dans ce cas, le nombre de commutations admissibles Z_z par heure peut être calculé selon le principe d'énergie du mode de commutation :

IV.6.1. Commutations admissibles avec masse supplémentaire

$$Z_z = \frac{Z_0 \cdot J_M}{J_M + J_z} \quad (\text{IV-12})$$

Avec :

Z_z : commutations admissibles horaires avec masse supplémentaire ;

Z_0 : commutations admissibles horaires à vide ;

J_M : moment d'inertie de la masse du moteur en kgm^2 ;

J_z : moment d'inertie masse supplémentaire réduit en kgm^2 .

IV.6.2. Commutations admissibles avec couple de charge

Dans le cas d'un service de commutation avec un moment de charge existant M_L , le nombre de commutations admissibles Z_L par heure est déterminé comme suit :

$$Z_L = \frac{Z_0 \cdot (M_M - M_L)}{M_M} \quad (\text{IV-13})$$

Avec :

Z_L : commutations admissibles par heure avec couple de charge ;

Z_0 : commutations à vide admissibles par heure ;

M_M : couple du moteur moyen pendant l'accélération en Nm ;

M_L : couple résistant moyen pendant l'accélération en Nm.

On trouve dans les applications pratiques, une masse d'inertie supplémentaire J_z et un couple de charge additionnel M_L . C'est pourquoi la formule suivante se rapporte au nombre Z_{zul} de commutations admissibles par heure [12] :

$$Z_{zul} = Z_z \frac{Z_L}{Z_0} \quad (\text{IV-14})$$

IV.6.3. Commutations admissibles avec charge supplémentaire et moment d'inertie

$$Z_L = Z_0 \frac{1 - \frac{M_{Lmi}}{M_{Mmi}}}{1 + \frac{J_z}{J_M}} \quad (\text{IV-15})$$

Avec :

Z_L : commutations admissibles horaires avec moment d'inertie et couple résistant ;

Z_0 : commutations admissibles à vide

M_{Mmi} : couple de moteur moyen pendant l'accélération en Nm ;

M_{Lmi} : couple résistant moyen pendant l'accélération en Nm ;

J_z : moment d'inertie masse supplémentaire réduit en kgm^2 ;

J_M : mass moment of inertia of the motor in kgm^2 .

IV.7. SÉLECTION EN CONSULTANT LE CATALOGUE

En utilisant les valeurs moyennes relatives à la puissance P_{mi} , au couple M_{mi} et à l'intensité I_{mi} calculées au préalable pour des conditions moins sévères, on peut

choisir un moteur sur la base des données de catalogue, compte tenu que ces données ne peuvent pas être inférieures aux moyennes calculées [12] :

$$\begin{cases} P_{mi} \leq P_n \\ M_{mi} \leq M_n \\ I_{mi} \leq I_n \end{cases} \quad (\text{IV-16})$$

Il est possible de ramener la plupart des applications relatives au moteur, aux 9 types de services décrits au préalable, c.-à-d. de S₁ à S₉. Dans des situations plus complexes ne permettant pas de sélection plus précise, on peut définir un type de service semblable et le convertir en S₁. Cette méthode demande toutefois une connaissance détaillée des constantes de temps thermiques et des conditions de refroidissement. Ces données peuvent être fournies par le fabricant du moteur.

IV.8. COUT DU CYCLE DE VIE

Le *coût du cycle de vie* (CCV) (en anglais *life cycle cost* ou LCC) est le *coût cumulé d'un produit tout au long de son cycle de vie*, depuis sa conception jusqu'à son démantèlement.

Le cycle de vie représente la succession des phases de développement, de fabrication, de distribution, d'exploitation, de maintenance et de mise au rebut du produit.

De manière générale, le coût total d'un moteur (on parle également de TCO pour *Total Cost of Ownership* ou de coût d'usage pour les entreprises gérant un parc de moteur) reprend l'ensemble des dépenses et frais liés à son achat et son utilisation. Il s'agit notamment des éléments suivants [25] :

- ☞ prix d'achat ;
- ☞ frais d'immatriculation ;
- ☞ frais d'assurance ;
- ☞ frais d'entretien ;
- ☞ fiscalité (notamment pour les entreprises) ;
- ☞ coût de revente.

L'accumulation de ces coûts a d'ailleurs permis le développement de services liés à l'optimisation du TCO, en intervenant sur toutes les étapes du cycle de vie du véhicule : achat, gestion des contrats d'entretien, d'assurance, de maintenance, mise en œuvre d'une politique automobile, etc.

IV.9. CONCLUSION

Suivant l'augmentation continue du coût de l'énergie et de la pression causée par le souci de la protection de l'environnement, les fabricants des machines électriques ainsi que les consommateurs s'intéressent à la réduction de la consommation d'énergie des systèmes électriques. Ce qui a conduit au lancement d'importants travaux à travers le monde, particulièrement pour l'amélioration de performances des machines. Cela est dû principalement à la place qu'elles occupent.

En effet, la caractérisation de ces machines entraîne à formuler des méthodes de dimensionnement qui s'appuie sur les équations tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et qui aboutit à une définition globale. Après avoir présenté les choix et dimensionnement des moteurs, on peut passer aux diverses applications industrielles comme dernier chapitre.

CHAPITRE V

APPLICATIONS DIVERSES

« Tout obstacle renforce la détermination.
Celui qui s'est fixé un but n'en change pas »

Léonard De Vinci

CHAPITRE V

APPLICATIONS DIVERSES

V.i. INTRODUCTION

Lors de ces dernières décennies, le monde industriel a connu une évolution importante grâce à l'utilisation des aimants permanents dans de nombreuses applications comme les machines électriques, les mécanismes de levage ainsi que les accouplements et les réducteurs de vitesse magnétiques. Ces derniers ont été proposés afin de pallier les problèmes que rencontrent les systèmes de transmissions mécaniques comme la lubrification, les transferts de vibration et le décrochage avec endommagement, permettant ainsi une amélioration des performances des systèmes d'entraînement électromécaniques.

De nos jours, l'objectif est de trouver de nouvelles technologies dont l'utilisation permettra de préserver l'environnement et d'améliorer la qualité de la vie. Aux vues de leurs avantages, les engrenages magnétiques associés aux moteurs électriques peuvent être une solution applicable dans les véhicules et les moyens de production en réponse à la problématique environnementale.

Les engrenages magnétiques permettent de transmettre un mouvement entre un élément d'entraînement et un élément entraîné sans contact. L'entraînement n'est pas susceptible à l'usure mécanique du fait de l'interaction magnétique entre les éléments, de plus, il y a peu de pertes mécaniques et moins de bruit acoustique. La lubrification n'est plus nécessaire, par conséquent, les engrenages magnétiques nécessitent un entretien minimal. Un autre avantage est la possibilité d'engager et de désengager facilement un membre moteur et un membre entraîné, en plus de leur protection intrinsèque contre les surcharges mécaniques.

Afin de valider ce concept novateur, nous allons dans ce chapitre étudié un entraînement fort couple faible vitesse. Les applications visées sont des *applications domestiques* (élevateurs, monte-charges, machines-outils, broyeur, concasseur ...) et des *applications industrielles* (fours électriques, équipements de soudure ...) pour lesquelles l'alimentation électrique se fait par le réseau triphasé 400V/50Hz.

V.2.CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Concernant le dimensionnement du moteur, une étude du système mécanique a permis d'explicitier le lien entre la raideur du capteur de couple intégré à la colonne de direction et l'inertie du moteur. Cette contrainte inertielle associée à une température ambiante élevée constitue des points forts du dimensionnement pour un encombrement donné. Il est montré que le choix d'un capteur de couple à raideur élevée permet de réduire ces contraintes de dimensionnement en réduisant la contrainte inertielle [26].

Des modèles électromagnétiques analytiques et un modèle thermique couplés ont été développés et exploités suivant une méthodologie définie par la spécificité du cahier des charges. L'étude des différentes techniques de minimisation des ondulations de couple et la caractérisation électromagnétique ont été menées par calcul des champs avec FLUX2D™. Une solution basée sur une structure à nombre fractionnaire d'encoche par pôle et par phase et un bobinage original est proposée. La réalisation d'un prototype et les essais réalisés ont permis de valider certains aspects de ce dimensionnement.

V.2.1. Étude des mouvements

V.2.1.1. Grandeurs mécaniques

Le Tableau (V.1) résume les grandeurs mécaniques, leurs définitions et significations :

Tableau V-1. Grandeurs mécaniques

	Translation	Rotation
Position	x [m]	θ [rad]
Vitesse : variation de la position par rapport au temps	$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$ [m/s] vitesse linéaire	$\Omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$ [rad/s] vitesse angulaire
Accélération : variation de la vitesse par rapport au temps	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$ [m/s ²]	$\alpha = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta}$ [rad/s ²]
Inertie : l'inertie d'un corps est sa résistance à une variation de vitesse.	L'inertie est fonction de la masse et de la géométrie du corps : plus celle-ci est grande, plus la force requise pour modifier son mouvement sera importante	
	Masse M [kg]	Moment d'inertie J [kg.m ²]
	moment d'inertie d'un cylindre (R rayon du cylindre) : $J_{cyl} = \frac{1}{2}MR^2$ moment d'inertie d'une masse en translation ramené sur l'axe de rotation (R rayon de la roue) : $J_{tr,rot} = MR^2$	
Action extérieure : permet de modifier l'état de repos ou la vitesse d'un objet.	Force F [N]	Moment d'une force par rapport à l'axe de rotation $M_F = F \times R$ (R : bras de levier)
	Poids : $P = m \times g$; $g=9,81$ [m/s ²] accélération de pesanteur	
	Couple de forces : 2 forces de même intensité, de même direction mais de sens opposé => mouvement de rotation uniquement - pas de translation ; moment d'un couple de force $C = F \times D$ [N.m] (D diamètre)	
Travail d'une force : permet de déplacer l'objet sur lequel s'applique la force	$W_F = \vec{F} \times \vec{d} = F d \cos\alpha$ [J] (\vec{d} déplacement ; α angle entre \vec{F} et \vec{d}) $W_F = 0$ si \vec{F} est perpendiculaire à \vec{d} ; $W_F > 0$: la force aide au déplacement «travail moteur» ; $W_F < 0$: la force s'oppose au déplacement «travail résistant»	
Énergie cinétique	$E_C = \frac{1}{2}m \times v^2$ [J]	$E_C = \frac{1}{2}J \times \Omega^2$ [J]
Conservation de l'énergie cinétique	Tout travail d'une force sur un objet se traduit par une variation de son énergie cinétique : $\Delta E_C = \sum W_F$ $\Delta E_C < 0$: à vitesse augmente, l'objet accélère, les forces exercent un travail moteur ; $\Delta E_C > 0$: la vitesse diminue, l'objet décélère, les forces exercent un travail résistant	
Puissance : Variation de l'énergie d'un système par rapport au temps	$P = \frac{dW}{dt}$ [W]	
	Deux systèmes de puissances différentes pourront fournir le même travail (la même énergie), mais le système le plus puissant sera le plus rapide.	
	$P = F \times v$	$P = C \times \Omega$
	$P > 0$ Si l'action (F ou C) permet un déplacement dans le sens de la vitesse (v ou Ω) « travail moteur » ; $P < 0$ « travail résistant »	

V.2.1.2 Principe fondamental de la dynamique

Le Tableau (V.2) résume les Principaux Fondamentaux de la Dynamique (PFD) :

Tableau V-2. Principe fondamental de la dynamique

	Translation	Rotation
Le PFD permet de faire le lien entre les actions extérieures et l'accélération	La résultante des actions extérieures modifie la vitesse (donc l'accélération) d'un objet. Son effet dépend de l'inertie de l'objet	
	$M \frac{dv}{dt} = \sum F$	$J \frac{d\Omega}{dt} = \sum C$
	Si la résultante des actions extérieures est nulle, la vitesse de l'objet est constante ; Si la résultante des actions s'oppose au mouvement, la vitesse de l'objet diminue ; Si la résultante des actions aide au mouvement, la vitesse de l'objet augmente	

V.2.1.3. Équations horaires

Les relations sont valables pour les mouvements de translation (x, v, a) et pour les mouvements (θ, Ω, α) de rotation. Le Tableau (V.3) donne les équations horaires :

Tableau V-3. Équations horaires

	Accélération	Vitesse	Position
Mouvement uniforme : vitesse constante	$a=0$	$v=cte$	$x=v \times t + x_0$
Mouvement uniformément accéléré : accélération constante	$a=cte$	$v=a \times t + v_0$	$x=(1/2)a \times t^2 + v_0 \times t + x_0$

V.2.2. Transformation du mouvement

Cet élément (cylindre masse M_R , rayon R) permet de transformer un mouvement de rotation (vitesse Ω_R , effort C_R) en un mouvement de translation (vitesse v , effort F) déplacer un objet de masse M (Fig.V-1).

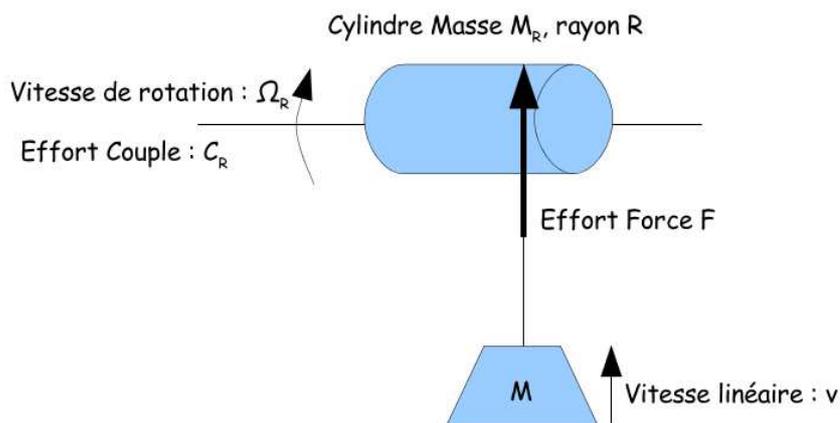


Figure V-1. Translation/rotation : roue - poulie - treuil

La vitesse est donnée par la relation :

$$v = R \Omega_R \tag{V-1}$$

L'effort : le couple à fournir permet de soulever la charge :

$$C_R = F R \quad (V-2)$$

Le moment d'inertie cylindre + masse à soulever :

$$J = J_R + J_M = \frac{1}{2} M_R R^2 + M R^2 \quad (V-3)$$

V.3. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

En ce qui concerne le choix de la machine et de son alimentation, le cahier des charges a mis en évidence l'aspect primordial du couple et de ses ondulations dans cette application. Dans la gamme des moteurs alternatifs, le choix est vaste avec les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à rotors bobinés, à aimants permanents ou à réluctance variable. *L'étude proposée concerne sur le dimensionnement d'un moteur pour automobile.*

V.3.1. Dimensionnement du moteur suivant l'alimentation

Les équations de dimensionnement diffèrent suivant le mode d'alimentation. En considérant le même point de fonctionnement et un échauffement donné, le calcul du rapport entre les deux rayons d'alésage et celui entre les épaisseurs de culasse conduisent aux expressions suivantes :

Couple électromagnétique développé pour des courants de forme rectangulaire [27] :

$$C_{rect} = \sqrt{\frac{8}{3}} \pi r_s^2 l_r \hat{B}_g K_s \quad (V-4)$$

Couple électromagnétique développé pour des courants de forme sinusoïdale :

$$C_{sin} = 2\pi r_s^2 l_r B_{1g} K_w K_s \quad (V-5)$$

$$B_{1g} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \hat{B}_g \sin\alpha \quad (V-6)$$

Avec :

l_r : la longueur active [m] ;

r_s : le rayon d'alésage [m] ;

B_{1g} : la densité de flux dans l'entrefer [T] ;

\hat{B}_g : la composante fondamentale de la densité de flux dans l'entrefer [T] ;

K_s : la valeur efficace de la charge linéique de courant [A/m] ;

K_w : le coefficient de bobinage ;

α : la largeur angulaire de l'arc polaire [rad].

A partir des équations précédentes, on obtient le rapport des expressions des deux couples à échauffement équivalent :

$$\frac{C_{rect}}{C_{sin}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3} K_w \sin\alpha} \quad (V-7)$$

L'expression de l'épaisseur des culasses dy se déduit de la loi de conservation du flux entre les dents et la culasse, nous obtenons [28] :

$$dy_{rect} = \frac{\pi r_s \hat{B}_g}{2 p B_y} \sqrt{C_{rect}} \quad (V-8)$$

$$dy_{sin} = \frac{r_s \hat{B}_g}{p} \alpha \frac{1}{B_y} \sqrt{C_{sin}} \quad (V-9)$$

$$\frac{dy_{rect}}{dy_{sin}} = \frac{\pi}{2\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3} K_w \sin\alpha}} \quad (V-10)$$

Avec :

p : le nombre de pôles ;

B_y : la valeur maximale de l'induction dans la culasse [T].

Le passage d'une alimentation sinusoïdale à une alimentation rectangulaire modifie peu le rayon d'alésage. En revanche, en fonction de la largeur de l'arc polaire, l'alimentation sinusoïdale permet de diminuer l'épaisseur de la culasse et donc le diamètre extérieur (Fig.V-2).

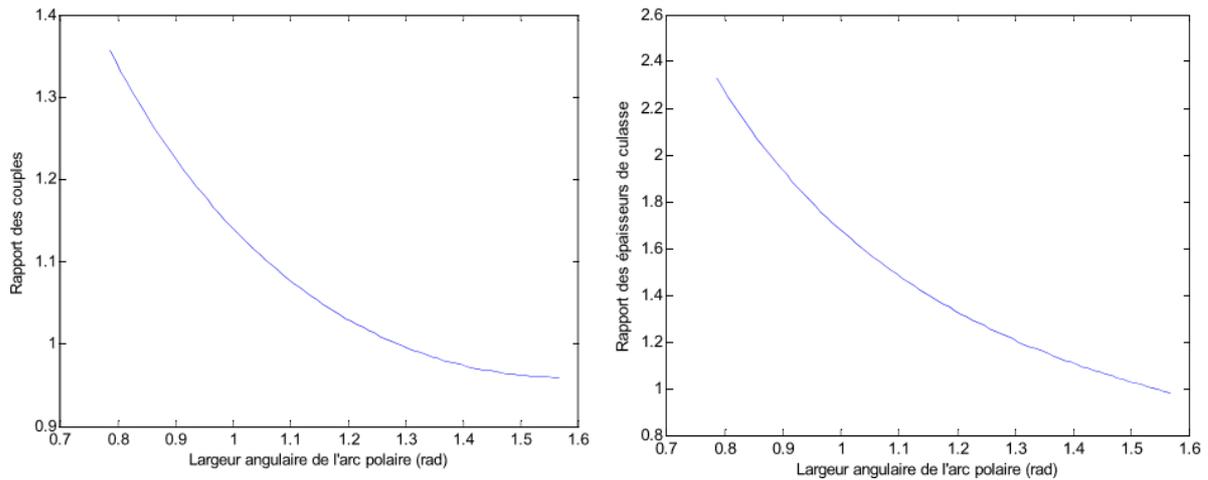


Figure V-2. Différences de dimensionnement du moteur suivant l'alimentation [29]

V.3.2. Comportement en charge : aspect électrique et thermique

Les comparaisons relatives au comportement en charge peuvent s'effectuer à partir d'une simple analyse théorique relative au couple en charge pour le comportement électrique d'une part, et aux pertes par effet Joule pour le comportement thermique d'autre part.

Dans le cas des machines à pôles lisses, le couple développé est exprimé par le produit des forces électromotrices et des courants d'alimentation.

V.3.3. Dimensionnement du moteur et l'inertie

Le pas de la vis est déterminant pour la charge admissible et pour le couple d'entraînement c'est-à-dire le couple dimensionnant de l'actionneur. A ce stade, le couple délivré par le moteur et son moment d'inertie peuvent s'exprimer de manière simplifiée par les relations de similitude suivantes [26] :

$$\begin{cases} J_{moteur} \approx b r_s^4 l_r \\ C_{moteur} \approx a r_s^4 l_r \end{cases} \quad (V-II)$$

Avec :

a, b : des constants ;

l_r : la longueur active [m] ;

r_s : le rayon d'alésage [m].

Pour un taux d'assistance de 97%, le couple exercé par le conducteur (C_V) est négligeable devant le couple fourni par le moto-réducteur. Nous pouvons donc écrire que le couple C nécessaire pour diriger les roues vaut :

$$C = C_{moteur}k_{red} + C_V \approx C_{moteur}k_{red} \quad (V-12)$$

L'inertie ramenée au volant s'exprime en fonction de l'inertie du moteur et du rapport de réduction par :

$$J_m = J_{moteur}k_{red}^2 \quad (V-13)$$

Ce qui permet d'exprimer le couplage entre l'inertie ramenée au volant et les dimensions du moteur par l'équation :

$$J_m = \frac{b C^2}{a l_r} \quad (V-14)$$

Il apparaît donc que, pour un couple donné, l'inertie ramenée au volant est inversement proportionnelle à la longueur du moteur et ne dépend pas du rapport de réduction. Le choix du réducteur sera donc lié au respect des contraintes d'encombrement.

Pour respecter les contraintes d'encombrement, le couple dimensionnant du moteur doit être le plus faible possible, ce qui impose un faible pas de vis. D'après les caractéristiques des fabricants, la charge dynamique de base fixe une valeur minimale du pas à 5 mm/tr. Ayant déterminé le pas de vis, le diamètre le plus faible sera choisi afin de bénéficier du meilleur rendement (Fig.V-3).

Il est maintenant possible de ramener la caractéristique du cahier des charges du plan effort crémaillère/vitesse crémaillère dans le plan couple /vitesse de l'actionneur (Fig.V-4).

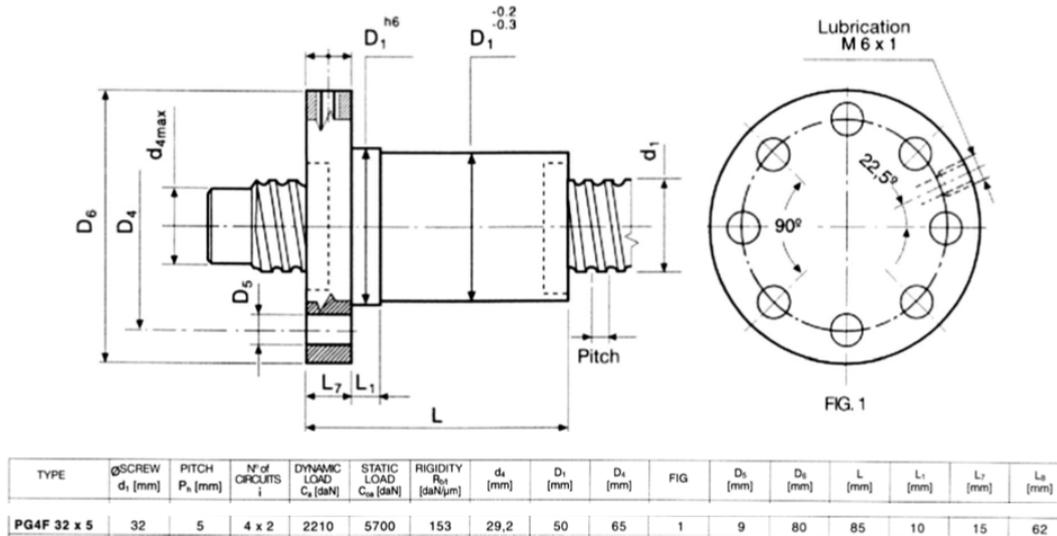


Figure V-3. Caractéristique de la vis à billes [26]

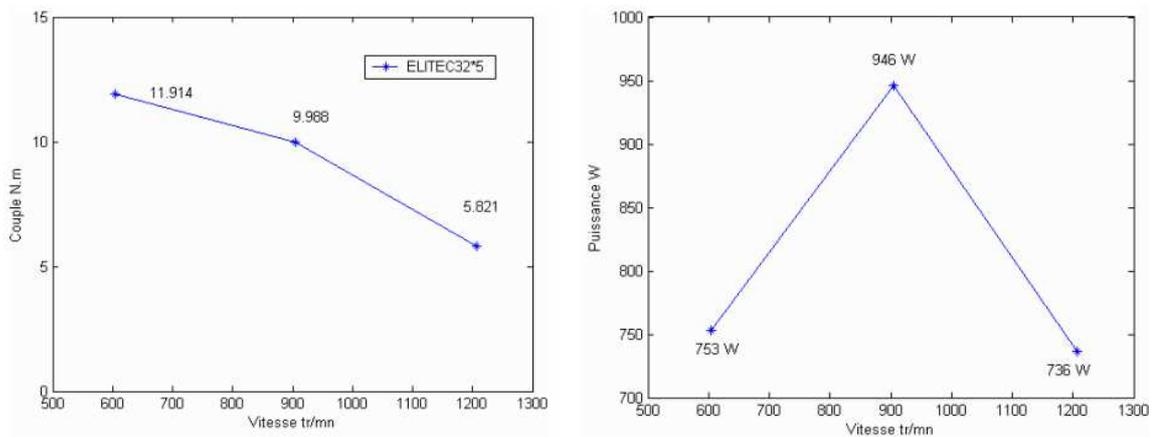


Figure V-4. Caractéristique Couple / vitesse du moteur pour un pas de vis de 5 mm/tr

V.3.4. Dimensionnement et caractérisation électromagnétique du moteur

Le principe du dimensionnement repose donc sur le choix de plusieurs paramètres d'entrée que l'utilisateur modifie à son gré. Nous allons montrer qu'à partir d'un choix judicieux des paramètres d'entrée, les relations analytiques permettent de déterminer toutes les dimensions définissant la machine. L'étude du système mécanique a permis d'établir un lien entre la raideur du capteur de couple et la valeur maximale de l'inertie du moteur, ce qui rajoute des spécifications au cahier des charges. En effet, connaissant la valeur de l'inertie admissible et les dimensions extérieures, les équations analytiques relatives à l'inertie, au couple électromagnétique et au diamètre extérieur permettent de déterminer successivement le rayon d'alésage, la charge de

courant et a densité surfacique de courant. La connaissance de ces grandeurs permet donc de déterminer l'ensemble des grandeurs caractéristiques du moteur.

Pour un couple et un échauffement donnés, le dimensionnement consiste à faire varier la longueur active et le diamètre extérieur en ayant fixé au préalable le nombre de paires de pôles et l'épaisseur d'aimant (Fig.V-5).

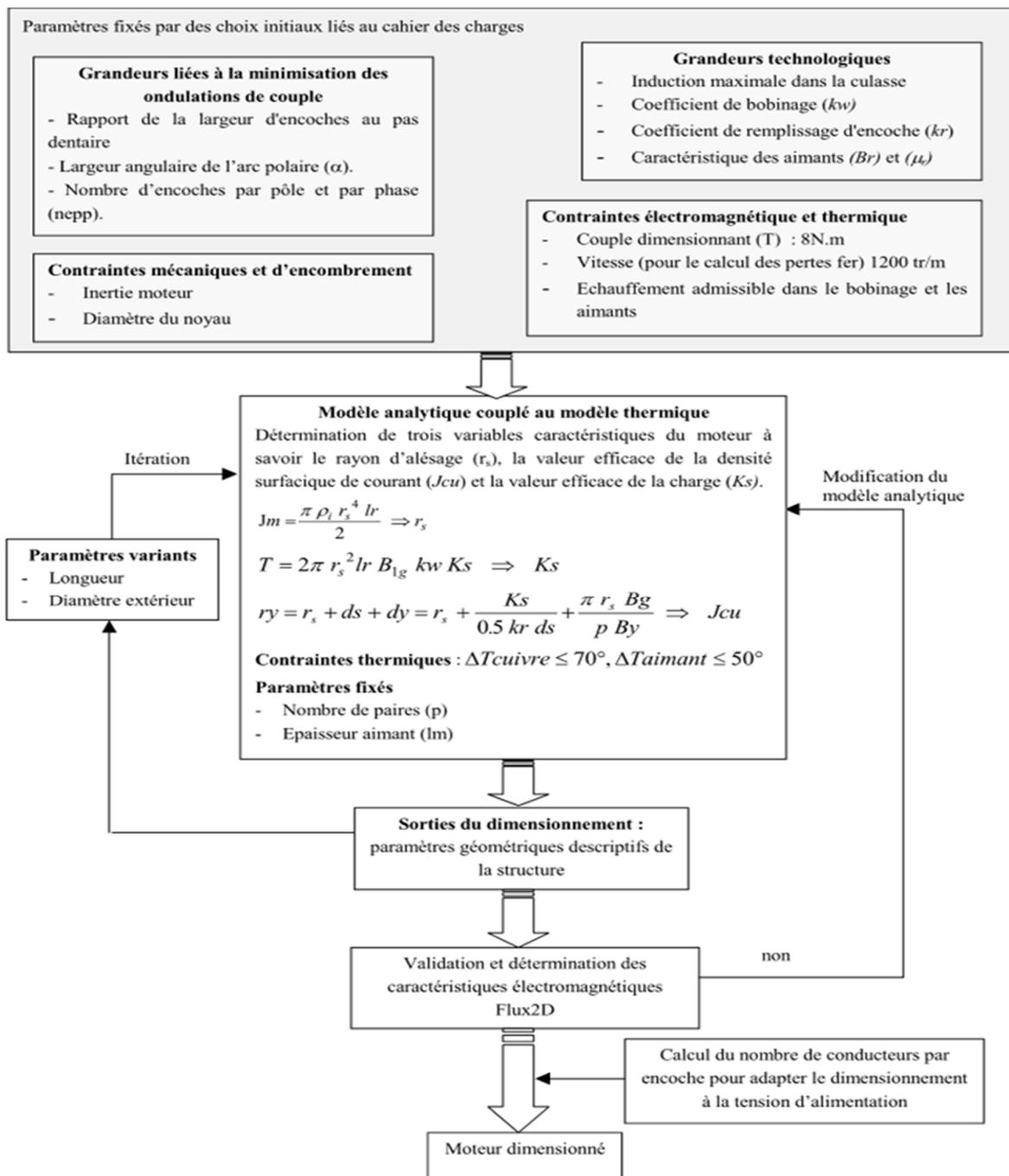


Figure V-5. Démarche de dimensionnement du moteur [27]

L'ensemble des contraintes permet de ramener le dimensionnement en un système d'équations. Cette spécificité du cahier des charges nous dispense de l'emploi d'algorithmes d'optimisation car dans notre cas, beaucoup de paramètres initialement considérés comme des entrées du dimensionnement sont fixés par le cahier des charges.

V.3.5. Adaptation du bobinage à la tension d'alimentation

Le dimensionnement, basé sur le couple dimensionnant, détermine le courant total d'encoche. Il doit être complété en calculant le nombre de conducteurs par encoche pour permettre une adaptation en termes de tension et de vitesse. L'alimentation est constituée d'un onduleur de tension contrôlé en courant délivrant une tension maximale de valeur efficace :

Pour une MLI régulière :

$$V_{eff_{max}} = \frac{E}{2\sqrt{2}} \quad (V-15)$$

Pour une MLI triphasée :

$$V_{eff_{max}} = \frac{E}{\sqrt{6}} \quad (V-16)$$

Avec E : la tension du bus continu [V].

En MLI pour un fonctionnement à couple maximum (fondamental du courant en phase avec la fem), les équations qui déterminent le nombre de conducteurs par encoches s'écrivent :

$$\tan\varphi = \frac{L_0 I_{tot}}{\phi_0} \quad (V-17)$$

$$V_{eff_{max}} \geq \frac{n_e \phi_0 p \Omega_b}{\cos\varphi} \quad (V-18)$$

D'où :

$$n_e \leq \frac{V_{eff_{max}} \cos\varphi}{\phi_0 p \Omega_b} \quad (V-19)$$

Avec :

I_{tot} : le courant total d'encoche [A] ;

ϕ_0 : le flux à vide pour un conducteur par encoche [Wb] ;

Ω_b : la vitesse mécanique de base [rad/s].

En considérant une machine virtuelle de référence à un seul conducteur par encoches de paramètres L_0 (inductance pour un conducteur par encoche), R_0 (résistance statorique pour un conducteur par encoche), ϕ_0 (flux à vide pour un conducteur par encoche). Le nombre de conducteurs par encoches influe sur les caractéristiques électromagnétiques du moteur suivant les relations de similitude :

$$L = n_e^2 L_0 \quad (\text{V-20})$$

$$R = n_e^2 R_0 \quad (\text{V-21})$$

$$\phi = n_e \phi_0 \quad (\text{V-22})$$

$$I = \frac{I_{tot}}{n_e} \quad (\text{V-23})$$

Avec I : le courant nominal [A].

Il est intéressant d'analyser l'impact du passage de 14 à 42 V sur le dimensionnement. L'ondulation de courant due à la MLI dépend de la tension bus continu, de l'inductance du moteur et de la fréquence de découpage. Cette ondulation est régie par l'équation :

$$\Delta I = \frac{E}{12 n_e^2 L_0 f_d} \quad (\text{V-24})$$

Avec f_d : la fréquence de découpage [Hz].

Pour une même géométrie de rotor et un même encombrement, le nombre d'encoches par pôle et par phase permet de définir le rang du premier harmonique du couple de détente : plus ce rang est élevé, plus l'amplitude de cet harmonique est faible. A cet égard, on peut donc distinguer particulièrement les machines à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase ainsi que l'illustre la Figure (V-6).

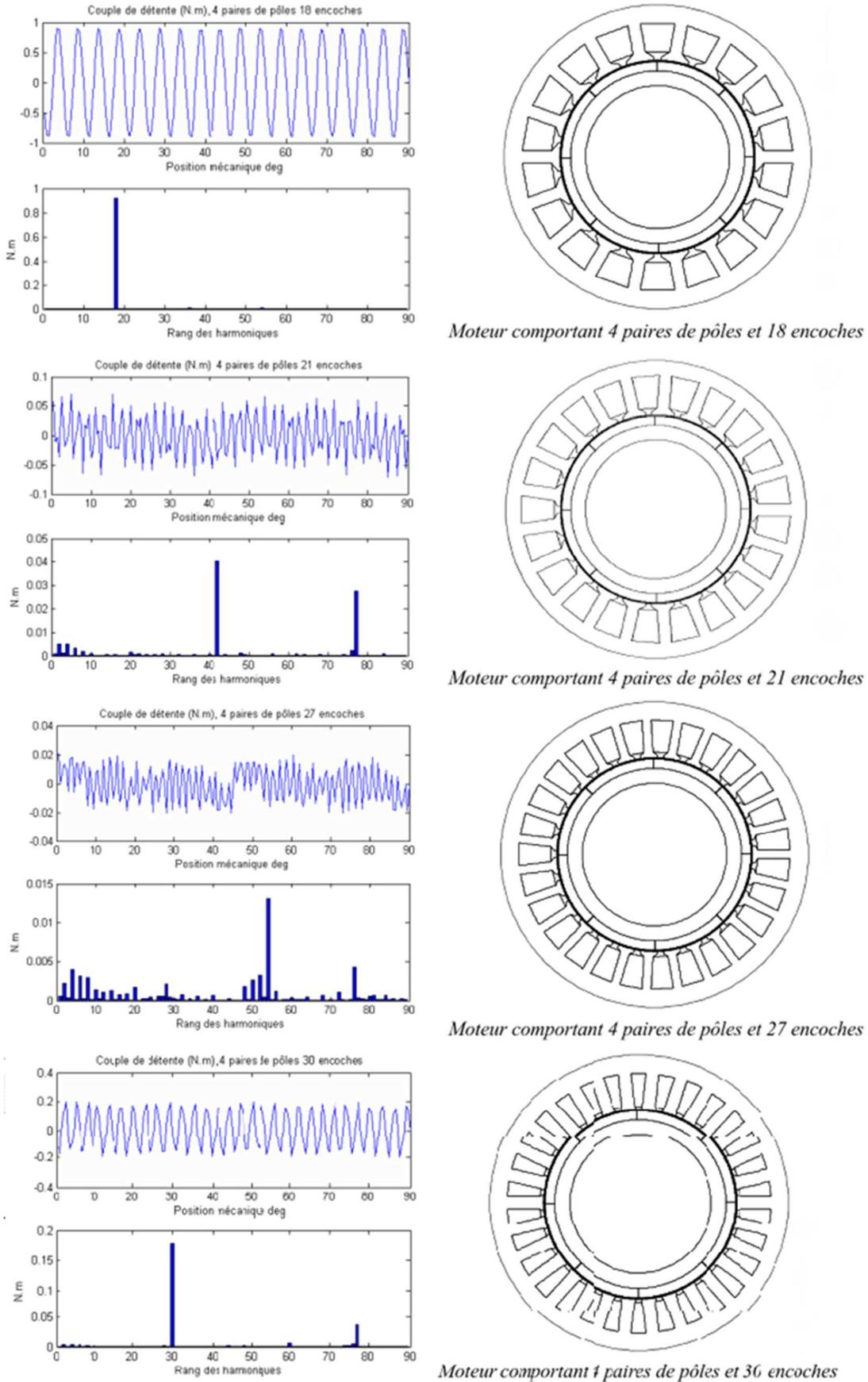


Figure V-6. Couples de détente en fonction du nombre d'encoches

La largeur d'aimant modifie également le contenu harmonique de la forme d'onde. Pour une largeur de l'arc polaire de 150° électrique (aimants non jointifs), nous obtenons une diminution de l'amplitude du premier harmonique ce qui conduit à un effet de lissage sur l'ensemble des raies ainsi que l'illustre la Figure (V-7).

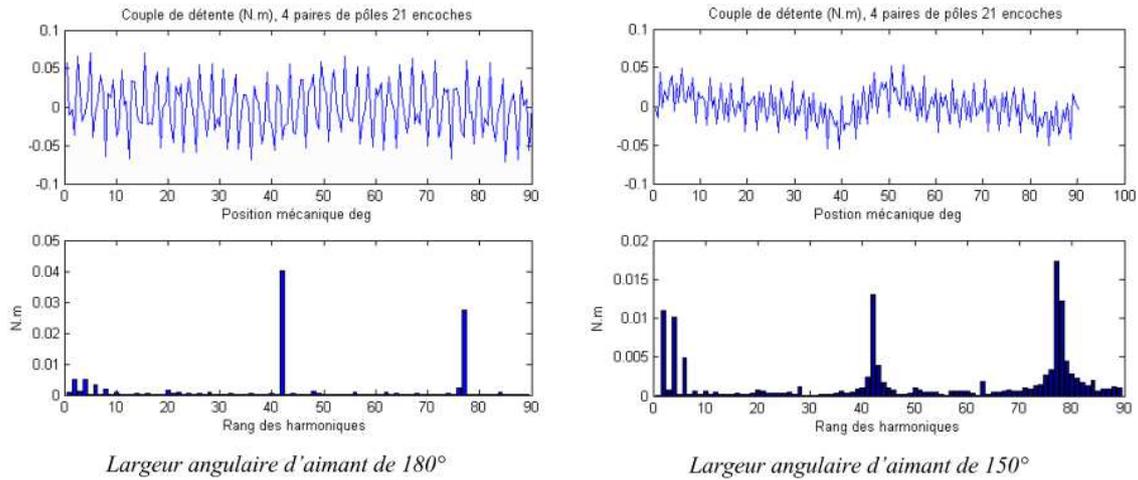


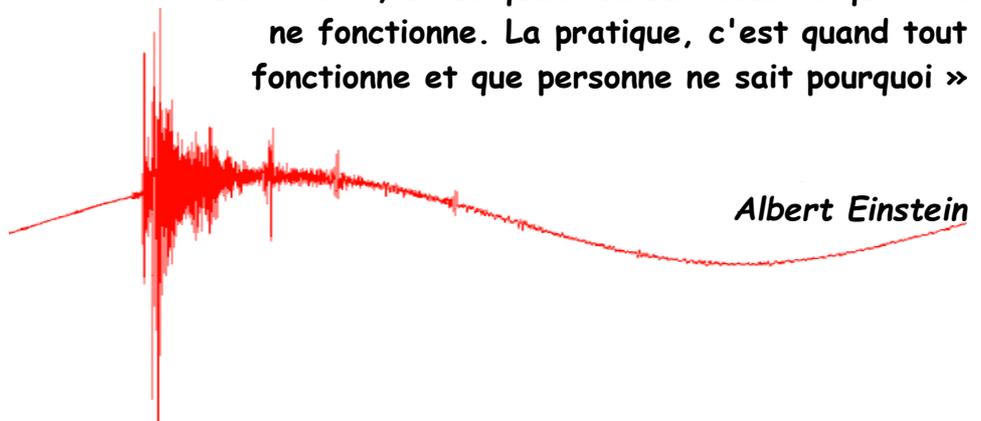
Figure V-7. Couple de détente en fonction de la largeur d'aimants

V.4. CONCLUSION

Le travail décrit dans ce chapitre a consisté à concevoir un moteur synchrone à aimants permanents à fem de forme sinusoïdale. L'environnement thermique et la nécessité de minimiser les ondulations de couple sont les contraintes fortes du cahier des charges. Une étude du système mécanique a permis d'explicitier le lien entre la raideur du capteur de couple intégré à la colonne de direction et l'inertie du moteur ramenée au volant. Cette contrainte inertielle ajoutée à la température ambiante élevée constituait une autre contrainte forte du dimensionnement pour un encombrement donné. Le choix d'un capteur de couple à raideur élevée a permis de réduire les contraintes de dimensionnement en réduisant la contrainte inertielle.

TRAVAUX DIRIGÉS

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi »



Albert Einstein

TRAVAUX DIRIGÉS N° 1

Exercice N° 1 :

Un moteur asynchrone tourne à 965 tr/min avec un glissement de 3,5 %. Déterminer le nombre de pôles du moteur sachant que la fréquence du réseau est $f = 50$ Hz.

Exercice N° 2 :

Les enroulements d'un moteur asynchrone triphasé sont couplés en triangle. La résistance d'un enroulement est $R = 0,5 \Omega$, le courant de ligne est $I = 10$ A. Calculer les pertes Joule dans le stator.

Exercice N° 3 :

Les tensions indiquées sur la plaque signalétique d'un moteur triphasé sont : 400V/690V 50 Hz ; Quel doit être le couplage du moteur sur un réseau triphasé 230V/400V ? Et sur un réseau triphasé 400V/690V ?

Exercice N° 4 :

La plaque signalétique du moteur asynchrone d'une fraiseuse porte les indications suivantes :

$$3 \sim 50 \text{ Hz} \quad \Delta 220\text{V } 11\text{A} \quad Y 380\text{V } 6,4\text{A} \quad 1455 \text{ tr/min} \quad \cos\varphi = 0,80$$

- 1- Le moteur est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz, 380 V entre phases. Quel doit être le couplage de ses enroulements pour qu'il fonctionne normalement ?
- 2- Quel est le nombre de pôles du stator ?
- 3- Calculer le glissement nominal (en %).
- 4- Un essai à vide sous tension nominale donne :

- puissance absorbée : $P_a = 260$ W
- intensité du courant de ligne : $I = 3,2$ A

Les pertes mécaniques sont évaluées à 130 W.

La mesure à chaud de la résistance d'un enroulement du stator donne $r = 0,65 \Omega$. En déduire les pertes fer.

- 5- Pour le fonctionnement nominal, calculer :
 - les pertes par effet Joule au stator
 - les pertes par effet Joule au rotor
 - le rendement
 - le couple utile T_u

SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 1

Solution de l'exercice N° 1 :

Un moteur asynchrone tourne à 965 tr/min avec un glissement de 3,5 %. Déterminer le nombre de pôles du moteur sachant que la fréquence du réseau est $f = 50$ Hz.

$$\text{Vitesse de synchronisme : } g = \frac{N_S - N}{N_S} \Rightarrow N_S = \frac{N}{1-g}$$

$$\Rightarrow N_S = \frac{965}{1-0,035} = 1000 \text{ tr/min}$$

$$\text{Nombre de paires de pôles : } p = \frac{f}{N_S} = \frac{50 \times 60}{1000} = 3 \Rightarrow 6 \text{ pôles}$$

Solution de l'exercice N° 2 :

Les enroulements d'un moteur asynchrone triphasé sont couplés en triangle. La résistance d'un enroulement est $R = 0,5 \Omega$, le courant de ligne est $I = 10$ A. Calculer les pertes Joule dans le stator.

$$3R I^2 = 3 \times 0,5 \times 10^2 = 150 \text{ W}$$

Solution de l'exercice N° 3 :

Les tensions indiquées sur la plaque signalétique d'un moteur triphasé sont : 400V/690V 50 Hz ; Quel doit être le couplage du moteur sur un réseau triphasé 230V/400V ? Et sur un réseau triphasé 400V/690V ?

400V/690V : (Cela signifie que la tension nominale aux bornes d'un enroulement est de 400V).

230V/400V : Couplage triangle (avec un couplage étoile, la tension aux bornes d'un enroulement n'est que de 230 V).

400V/690V : Couplage étoile (avec un couplage triangle, la tension aux bornes d'un enroulement est trop importante : 690 V).

Solution de l'exercice N° 4 :

La plaque signalétique du moteur asynchrone d'une fraiseuse porte les indications suivantes :

$$3 \sim 50 \text{ Hz} \quad \Delta 220\text{V} / 11\text{A} \quad Y 380\text{V} / 6,4\text{A} \quad 1455 \text{ tr/min} \quad \cos\varphi = 0,80$$

1- Le moteur est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz, 380 V entre phases.
Quel doit être le couplage de ses enroulements pour qu'il fonctionne normalement ?

Couplage étoile

2- Quel est le nombre de pôles du stator ?

$$p = \frac{f}{N_s} = \frac{50 \times 60}{1500} = 2 \Rightarrow 4 \text{ pôles (vitesse de synchronisme : 1500 tr/min)}$$

3- Calculer le glissement nominal (en %).

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0,03 = 3\%$$

4- Un essai à vide sous tension nominale donne :

- puissance absorbée : $P_a = 260 \text{ W}$
- intensité du courant de ligne : $I = 3,2 \text{ A}$

Les pertes mécaniques sont évaluées à 130 W.

La mesure à chaud de la résistance d'un enroulement du stator donne $r = 0,65 \Omega$.

En déduire les pertes fer.

$$\text{Pertes par effet Joule au stator : } 3R J^2 = 3 \times 0,65 \times 3,2^2 = 20 \text{ W}$$

$$\text{Pertes par effet Joule au rotor : négligeables}$$

$$\text{Pertes fer : } P_{fer} = P_a - (P_{mec} + P_{js} + P_{jr}) = 260 - (130 + 20 + 0) = 110 \text{ W}$$

5- Pour le fonctionnement nominal, calculer :

- les pertes par effet Joule au stator

$$3R J^2 = 3 \times 0,65 \times 6,4^2 = 80 \text{ W}$$

- les pertes par effet Joule au rotor

$$\text{Puissance absorbée : } \sqrt{3} U_l I \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 6,4 \times 0,80 = 3370 \text{ W}$$

$$\text{Puissance transmise au rotor : } P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) = 3370 - (80 + 110) = 3180 \text{ W}$$

$$\text{Pertes Joule au rotor : } P_{jr} = g P_{tr} = 3180 \times 0,03 = 95,4 \text{ W}$$

- le rendement

$$\text{Puissance utile : } P_u = P_{tr} - (P_{mec} + P_{jr}) = 3180 - (130 + 95) = 2955 \text{ W}$$

$$\text{Rendement : } P_a / P_u = 2955 / 3370 = 87,7 \%$$

- le couple utile T_u

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{2955,6}{1455 \times \frac{2\pi}{60}} = 19,4 \text{ Nm}$$

TRAVAUX DIRIGÉS N° 2

Exercice N° 1 :

Un moteur triphasé tétrapolaire à cage d'écurie possède les caractéristiques suivantes : 230V/400V 50 Hz. La résistance d'un enroulement statorique, mesurée à chaud, est $R = 0,70 \Omega$. Ce moteur est alimenté par un réseau 400V entre phases.

- 1- Déterminer : - le couplage du moteur - la vitesse de synchronisme
- 2- A vide, le moteur tourne à une vitesse proche de la vitesse de synchronisme, absorbe un courant de 5,35 A et une puissance de 845 W. Déterminer :
 - les pertes Joule statoriques à vide
 - les pertes fer statoriques sachant que les pertes mécaniques est de 500W.
- 3- A la charge nominale, le courant statorique est de 16,5 A, le facteur de puissance de 0,83 et la vitesse de rotation de 1400 tr/min (les pertes fer statoriques sont sensiblement les mêmes qu'à vide) Calculer :
 - les pertes Joule statoriques en charge
 - la puissance absorbée
 - la puissance transmise au rotor
 - le glissement
 - les pertes Joule rotoriques en charge
 - la puissance utile
 - le moment du couple utile
 - le rendement.

Exercice N° 2 :

1- Ce moteur entraîne un compresseur dont le couple résistant est constant et égal à 4 Nm.

1-1- Le démarrage en charge du moteur est-il possible ?

1-2- Dans la zone utile, vérifier que $T_u = -0,12 n + 120$

1-3- Déterminer la vitesse de rotation de l'ensemble en régime établi.

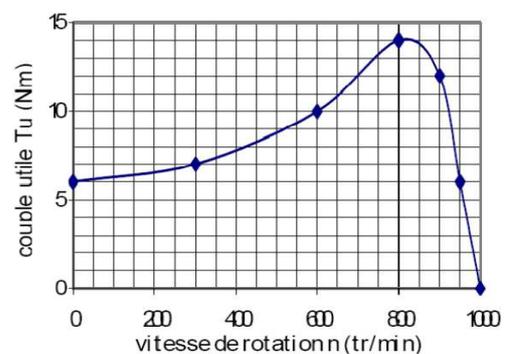
1-4- Calculer la puissance transmise au compresseur par le moteur.

2- Ce moteur est maintenant utilisé pour entraîner une pompe dont le couple résistant est donné en fonction de la vitesse de rotation par la relation suivante : $T_r = 10^{-5} n^2$ avec T_r en Nm et n en tr/min.

2-1- Représenter sur le graphique précédent la courbe $T_r(n)$.

2-2- En régime établi, déterminer la

vitesse de rotation de l'ensemble ainsi que le couple utile du moteur.



SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 2

Solution de l'exercice N° 1 :

1-

- le couplage du moteur : *Couplage étoile*
- la vitesse de synchronisme : $N_S = \frac{f}{p} = \frac{50}{2} = 25 \text{ tr/s} = 1500 \text{ tr/min}$

2- A vide :

- les pertes Joule statoriques à vide : $3RI^2 = 3 \times 0,70 \times 5,35^2 = 60,1 \text{ W}$
- les pertes fer statoriques :
à vide, la puissance utile est nulle
à vide, les pertes Joule au rotor sont négligeables (glissement quasiment nul)
- $P_{fer} = P_a - (P_{mec} + P_{js0} + P_{jr0}) = 845 - (500 + 60,1) = 284,9 \text{ W}$

3- A la charge nominale :

- les pertes Joule statoriques en charge : $3RI^2 = 3 \times 0,70 \times 16,5^2 = 571,525 \text{ W}$
- la puissance absorbée : $\sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi = \sqrt{3} \times 400 \times 16,5 \times 0,83 = 9488,174 \text{ W}$
- la puissance transmise au rotor : $P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) = 9488,174 - (571,525 + 284,9) = 8631,749 \text{ W}$
- le glissement : $g = \frac{N_S - N}{N_S} = (1500 - 1400) / 1500 = 6,67 \%$
- les pertes Joule rotoriques en charge : $P_{jr} = g P_{tr} = 0,0667 \times 8631,75 = 575,45 \text{ W}$
- la puissance utile : $P_u = P_{tr} - (P_{mec} + P_{jr}) = 8631,75 - (500 + 575,45) = 7556,3 \text{ W}$
- le moment du couple utile : $T_u = \frac{P_u}{\Omega} = 7556,3 / (1400 \times 2\pi / 60) = 51,54 \text{ Nm}$
- le rendement : $P_u / P_a = 7556,3 / 9488,174 = 79,64 \%$

Solution de l'exercice N° 2 :

1-1- Oui car le couple utile au démarrage du moteur (6 Nm) est supérieur au couple résistant (4 Nm).

1-2- Dans la zone utile, la caractéristique est une droite : l'équation est donc linéaire.

Pour $n = 1000 \text{ tr/min}$, $T_u = 0 \text{ Nm}$

Oui car le couple utile au démarrage du moteur (6 Nm) est supérieur au couple résistant (4 Nm).

Pour $n = 950 \text{ tr/min}$, $T_u = 6 \text{ Nm}$

L'équation est donc vérifiée.

1-3- Déterminer la vitesse de rotation de l'ensemble en régime établi.

En régime établi, le couple utile compense exactement le couple résistant : $T_u = T_r$.

$$T_u = -0,12n + 120 = T_r = 4 \text{ Nm d'où } n = 967 \text{ tr/min}$$

1-4- Calculer la puissance transmise au compresseur par le moteur.

$$\text{C'est aussi la puissance utile du moteur : } P_{tr} = T_u \times N = 4 \times 967 \times 2\pi / 60 = 405,05 \text{ W}$$

2-

$$T_u = T_r$$

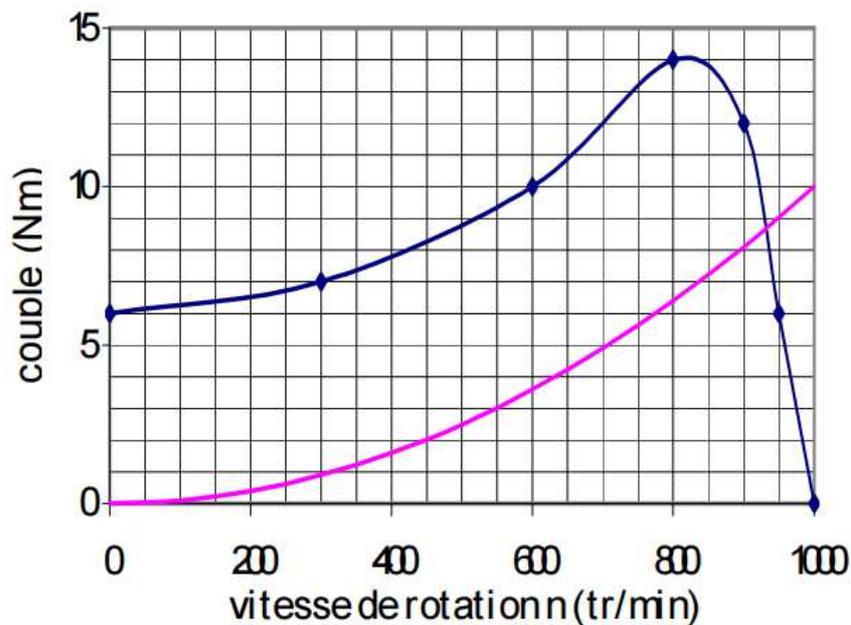
$$-0,12n + 120 = 10^{-5} n^2$$

$$10^{-5} n^2 + 0,12n - 120 = 0$$

Cette équation possède deux solutions dont une physiquement acceptable :

$$(-0,12 + \sqrt{(0,12)^2 + 4 \times 10^{-5} \times 120}) / (2 \times 10^{-5}) = 928 \text{ tr/min}$$

$$T_u = T_r = 10^{-5} n^2 = 10^{-5} \times 928^2 = 8,61 \text{ Nm}$$



TRAVAUX DIRIGÉS N° 3

Exercice N° 1 :

Sur la figure des couples moteur et résistant en fonction de la vitesse ci-dessous indiquer les points :

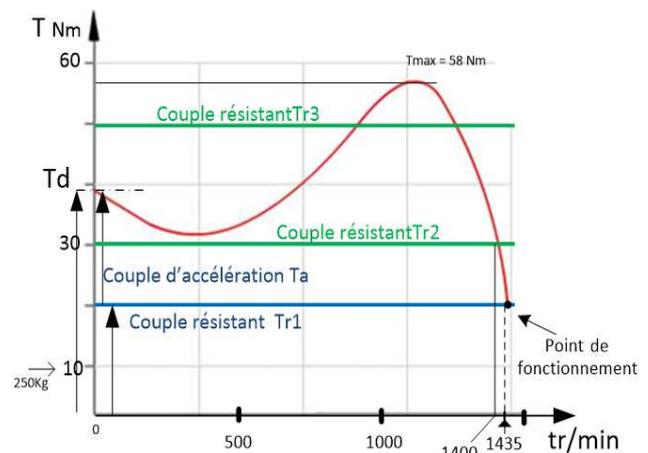
- 1- Le couple de démarrage T_d
- 2- Le couple moteur max T_{max}
- 3- Donner l'équation du couple de démarrage T_d
- 4- Donner la valeur de T_{r1}
- 5- Le moteur démarre-t-il ?
- 6- Quel point de la figure permet de dire que le démarrage est fini ?
- 7- En ce point (régime établi), à quoi est égal T_a et n ; que vaut le couple moteur ?

Le couple T_{r1} représente une charge équivalente à 500 Kg :

- 8- Représenter sur la figure T_{r2} pour une charge de 750 Kg ; le moteur démarre-t-il ?

Le couple T_{r3} représente une charge de 1.25 tonne :

- 9- Représenter T_{r3} ; le moteur démarre-t-il ?



Exercice N° 2 :

Calcul du couple d'accélération d'un moteur devant entrainer une machine dont le moment d'inertie est de 0,25 kg.m². La vitesse devant passer de 0 à 1435 tr/min en 5 s. L'inertie du moteur est comprise dans le moment d'inertie de la machine. ($n = 1435$ tr/min vitesse réel du moteur).

Exercice N° 3 :

Pour un moteur entrainant une machine on donne :

$$P_n = 5 \text{ kW} \quad n = 1435 \text{ tr/min} \quad T_d = 1,8 T_n \quad T_r = 0,3 T_n \quad J_{\text{machine} + \text{moteur}} = 5 \text{ kg.m}^2$$

- 1- Calcul du couple nominal
- 2- Calcul du couple d'accélération
- 3- Calcul du temps de démarrage

SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 3

Solution de l'exercice N° 1 :

- 1- Le couple de démarrage $T_d = 39 \text{ Nm}$ (à $n = 0$)
 - 2- Le couple moteur max $T_{max} = 58 \text{ Nm}$
 - 3- L'équation du couple de démarrage T_d ; $T_d = T_a + T_{r1}$
 - 4- La valeur de $T_{r1} = 20 \text{ Nm}$
 - 5- *Le moteur démarre car $T_d > T_{r1}$*
 - 6- *Le point de fonctionnement*
 - 7- En ce point (régime établi) : $T_a = 0 \text{ Nm}$ et $n = 1435 \text{ tr/min}$; $T_a = T_{r1} = 20 \text{ Nm}$
- Le couple T_{r1} représente une charge équivalente à 500 Kg :
- 8- *Le moteur démarre car $T_d > T_{r2}$*
- Le couple T_{r3} représente une charge de 1.25 tonne :
- 9- *Le moteur ne démarre pas car $T_d < T_{r3}$*

Solution de l'exercice N° 2 :

$$T_a = J \frac{d\Omega}{dt} = 0,25 \frac{2\pi \times 1435}{60 \times 5} = 7,514 \text{ Nm}$$

Solution de l'exercice N° 3 :

- 1- Calcul du couple nominal

$$T_n = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{5000 \times 60}{2\pi \times 1435} = 33,27 \text{ Nm}$$

- 2- Calcul du couple d'accélération

$$T_d = T_a + T_{r1} \text{ d'où } T_a = T_d - T_{r1} = 1,8 T_n - 0,3 T_n = 1,5 T_n = 1,5 \times 33,27 = 49,91 \text{ Nm}$$

- 3- Calcul du temps de démarrage

$$T_a = J \frac{d\Omega}{dt} \Rightarrow dt = J \frac{d\Omega}{T_a} = 5 \times \frac{2\pi \times 1435}{60 \times 49,91} = 15,07 \text{ s}$$

TRAVAUX DIRIGÉS N° 4

Exercice N° 1 :

Soit le système industriel de la figure ci-dessous : la vitesse V de montée de la plateforme est de $0,4 \text{ m/s}$:

- 1- Calculer la masse à monter
- 2- Calculer la force de la pesanteur $F = mg$ (avec gravité $g = 10$)

Sachant que la puissance nécessaire à la montée de la charge P_{charge} est égale à $P_{charge} = F.V$:

- 3- Calculer P_{charge}

Le réducteur de vitesse à un rendement de 80% :

- 4- Donner l'équation du rendement en fonction de P_{charge} et P_u (la puissance utile du moteur = puissance absorbé du treuil)

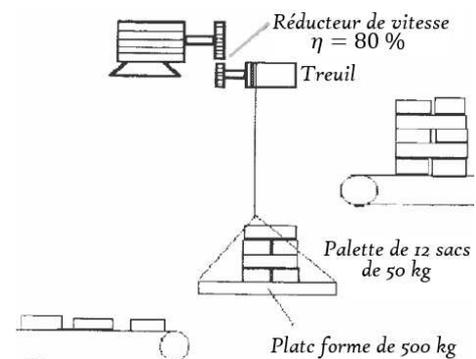
- 5- Calculer la puissance utile du moteur

Le couple utile (T_u) ici est le couple du moteur donc T_m . Si le moteur tourne en régime établi :

- 6- Donner la relation entre le T_m (T_u) et le couple résistant T_r

Sachant que le moteur à 4 pôles et un glissement de 4% :

- 7- Calculer le couple résistant T_r (ici $T_r = P_u / \Omega$) ; $f = 50 \text{ Hz}$.



Exercice N° 2 :

Pour élever une charge de 100 kg à 10 m de hauteur, on utilise un treuil accouplé à un moteur par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique.

Caractéristiques des appareils :

- treuil diamètre du tambour $d = 20 \text{ cm}$, $\eta_t = 0,9$; diamètre de l'axe $d = 20 \text{ mm}$;
- réducteur : rapport de réduction = 60 , $\eta_r = 0,85$;
- moteur : vitesse de rotation en charge = 1450 tr/min , $\eta_m = 0,85$;

1 - Calculer le travail utile effectué ($g = 9,81$) ; 2 - Calculer la puissance utile.

3 - Calculer le travail fourni par l'axe du moteur.

4 - Calculer la puissance mécanique fournie par le moteur.

5 - Calculer le total d'énergie consommée et la puissance totale nécessaire.

6 - Calculer la vitesse angulaire du tambour du treuil et le couple correspondant à la force motrice.

7 - Calculer le couple ramené sur l'axe moteur et la force exercée par le moteur sur l'axe du réducteur.

SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 4

Solution de l'exercice N° 1 :

- 1- la masse à monter : $m = (12 \times 50) + 500 = 1100 \text{ kg}$
- 2- la force de la pesanteur $F = m \times g = 1100 \times 10 = 11\,000 \text{ N}$
- 3- la puissance $P_{charge} = F \times V = 11000 \times 0.4 = 4\,400 \text{ W}$
- 4- l'équation du rendement $\eta = \frac{P_{charge}}{P_u}$
- 5- la puissance utile du moteur $P_u = \frac{P_{charge}}{\eta} = \frac{4\,400}{80\%} = 5\,500 \text{ W}$
- 6- la relation en régime établi entre le T_m (T_u) et le couple résistant $T_u = T_r = T_m$
- 7- le couple résistant T_r :

$$n_s = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/mn}$$

$$n = n_s(1 - g) = 1500(1 - 0,04) = 1440 \text{ tr/mn}$$

$$T_r = P_u / \Omega = (60 \times 5500) / (2\pi \times 1440) = 36,47 \text{ Nm}$$

Solution de l'exercice N° 2 :

1 - Travail utile effectué :

$W = F.L$, dans ce cas F correspond au poids de la charge, soit $M.g = 100 \times 9,81$ et L au déplacement $L = 10 \text{ m}$.

$$W_u = MgL = 100 \times 9,81 \times 10 = 9\,810 \text{ J}$$

2 - Puissance utile :

$P_u = W_u/t$: nous venons de calculer W_u , il faut déterminer t :

Nombre de tours de tambour nécessaire pour élever la charge de 10 m :

$$10/\pi d = 10/0,2\pi = 16 \text{ tours}$$

- Temps mis pour faire un tour de tambour : $(60/1\,450) \times 60 = 2,5 \text{ s}$

- Temps mis pour effectuer le travail : $2,5 \times 16 = 40 \text{ s}$

$$P_u = W_u/t = 9\,810/40 = 245,25 \text{ W}$$

3 - Travail fourni par l'axe du moteur :

- Attention, les rendements se multiplient

$$\eta_t \times \eta_r = 0,9 \times 0,85 = 0,765$$

$$W_u = 9\,810/0,765 = 12\,823,53 \text{ J}$$

4 - Puissance mécanique fournie par le moteur :

$$12\,823,5 / 40 = 320,6 \text{ W}$$

Le travail a été effectué en 40 s

5 - Total de l'énergie consommée :

- Il faut tenir compte du rendement du moteur :

$$12\,823,5 / 0,85 = 15\,086,5 \text{ J}$$

- Puissance nécessaire :

$$15\,086,5 / 40 = 377 \text{ W}$$

Vérification :

$$245,25 / 0,9 / 0,85 / 0,85 = 377 \text{ W}$$

6 - Vitesse angulaire du treuil et couple :

$$\omega = 2\pi/n = 6,28 / 2,5 = 2,5 \text{ rad/s}$$

$$C = Pu/\omega = 245,25 / 2,5 = 98,1 \text{ N.m}$$

7 - Couple ramené sur l'axe du moteur :

- Avec un réducteur, ce que l'on gagne en vitesse on le perd en couple. La vitesse côté moteur a augmenté de 60, le couple diminue donc de 60, soit :

$$98,1 / 60 = 1,63 \text{ N.m.}$$

Force exercée sur l'axe du réducteur par le moteur :

$$1,63 / 0,01 = 163 \text{ N.}$$

TRAVAUX DIRIGÉS N° 5

Exercice N° 1 :

Un moteur asynchrone à cage est alimenté par un réseau triphasé de fréquence 50 Hz, de tensions entre phases égales à 380 V :

A vide : Puissance absorbée : $P_V = 360 \text{ W}$; Intensité du courant de ligne : $I_V = 3,6 \text{ A}$; Fréquence de rotation : $n_V = 2995 \text{ tr/min}$.

En charge : Puissance absorbée : $P = 4560 \text{ W}$; Intensité du courant de ligne : $I = 8,1 \text{ A}$; Fréquence de rotation : $n = 2880 \text{ tr/min}$.

Les enroulements du stator sont couplés en étoile ; la résistance de chacun d'eux vaut $0,75 \Omega$. Les pertes fer sont évaluées à 130 W .

1- Quelle est la vitesse de synchronisme ? En déduire le glissement en charge.

2- Pour le fonctionnement à vide :

- Calculer les pertes Joule au stator.
- Justifier que les pertes Joule au rotor sont négligeables.
- En déduire les pertes mécaniques.

3- Calculer pour le fonctionnement en charge :

- les pertes Joule au stator et au rotor
- la puissance utile
- le moment du couple utile T_u
- le rendement du moteur

4- Le moteur entraîne une pompe dont le moment du couple résistant T_r est proportionnel à la fréquence de rotation et vaut 18 Nm à 3000 tr/min . Dans sa partie utile, la caractéristique mécanique $T_u(n)$ du moteur peut être assimilée à une droite. Déterminer la vitesse de rotation du groupe moteur-pompe.

Exercice N° 2 :

Le rendement d'un moteur est par définition : $\eta = P_{\text{utile}} / P_{\text{absorbée}}$.

1- A partir du bilan de puissance du moteur, montrer que le rendement peut s'écrire :

$$\eta_n = \frac{(1 - g)(P_a - P_{\text{fer}} - P_{\text{js}}) - P_{\text{mec}}}{P_a}$$

2- Applications numériques.

Un moteur possédant deux paires de pôles est alimenté par un réseau de fréquence 50 hertz.

Au fonctionnement nominal, on mesure : Vitesse de rotation : 1425 tr/min ; Puissance absorbée : $1,9 \text{ kW}$; Pertes fer : 90 W ; Pertes mécaniques : 60 W ; Courant absorbé : $3,4 \text{ A}$

2-1- Calculer le glissement g .

2-2- Calculer les pertes Joule au stator sachant que la résistance d'un enroulement statorique est de $5,5 \Omega$ et que le couplage est en étoile.

2-3- En déduire le rendement nominal.

3- Montrer que le η d'un moteur asynchrone est toujours inférieur à $(1 - g)$.

SOLUTION DES TRAVAUX DIRIGÉS N° 5

Solution de l'exercice N° 1 :

1- la vitesse de synchronisme : 3000 tr/min

En déduire le glissement en charge : $(3000 - 2880)/3000 = 4 \%$

2- Pour le fonctionnement à vide :

- les pertes Joule au stator : $3RI_s^2 = 3 \times 0,75 \times (3,6)^2 = 29,16 \text{ W}$

- Justification que les pertes Joule au rotor sont négligeables :

A vide, le glissement est négligeable ainsi que la puissance transmise au rotor : $P_{jr} = g \times P_{tr}$. Les pertes Joule au rotor sont donc négligeables.

- En déduire les pertes mécaniques :

$$P_m = P_v - P_{js} - P_{fer} = 360 - 29,16 - 130 = 200,84 \text{ W}$$

3- le fonctionnement en charge :

- les pertes Joule au stator et au rotor :

$$P_{js} = 3RI_s^2 = 3 \times 0,75 \times (8,1)^2 = 147,622 \text{ W}$$

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} = 0,04 \times 4282,378 = 171,3 \text{ W}$$

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) = 4560 - 147,622 - 130 = 4282,378 \text{ W}$$

- la puissance utile et le moment du couple utile T_u .

$$P_u = P_{tr} - P_{jr} - P_m = 4282,378 - 171,3 - 200,84 = 3910,238 \text{ W}$$

$$T_u = P_u / N = 3910,238 / (2880 \times 2\pi / 60) = 12,965 = 13 \text{ Nm}$$

- le rendement du moteur : $P_u / P_a = 3910,238 / 4560 = 85,751 \%$

4- Le moteur entraîne maintenant une pompe :

$$T_u = 0 \text{ Nm à } 3000 \text{ tr/min}$$

$$T_u = 13 \text{ Nm à } 2880 \text{ tr/min}$$

$T_u = A \times n + B$: équation d'une droite :

$$A = (0 - 13) / (3000 - 2880) = -0,108$$

Pour ($T_u = 0 \text{ Nm}$ à 3000 tr/min) : $0 = -0,108 \times 3000 + B \Rightarrow B = 324$

D'où : $T_u = -0,108 \times n + 324$

Point de fonctionnement : $T_u = T_r$

$324 - 0,108 n = 18 \Rightarrow n = 2833 \text{ tr/min}$

Solution de l'exercice N° 2 :

1-

$\eta = (P_{\text{absorbée}} - P_{\text{fer}} - P_{\text{mécaniques}} - P_{\text{joule stator}} - P_{\text{joule rotor}}) / P_{\text{absorbée}}$

avec : $P_{\text{joule rotor}} = g \times P_{\text{transmise au rotor}}$

et : $P_{\text{transmise au rotor}} = P_{\text{absorbée}} - P_{\text{fer}} - P_{\text{joule stator}}$

2-1- Calculer le glissement g .

Vitesse de synchronisme : $50/2 = 25 \text{ tr/s} = 1500 \text{ tr/min}$

Glissement : $(1500 - 1425) / 1500 = 5\%$

2-2- Calculer les pertes Joule au stator sachant que la résistance d'un enroulement statorique est de $5,5 \Omega$ et que le couplage est en étoile :

$3RI^2 = 3 \times 5,5 \times 3,4^2 = 190,74 \text{ W}$

2-3- En déduire le rendement nominal :

$$\eta_n = \frac{(1 - 0,05)(1900 - 90 - 190,74) - 60}{1900} = 77,805 \%$$

3-

Le rendement théorique maximal est obtenu quand :

- $P_{\text{fer}} = 0$ (circuit magnétique parfait)
- $P_{\text{mécaniques}} = 0$ (pas de frottement)
- $P_{\text{joule stator}} = 0$ (résistance des enroulements nulle)

On a alors : $\eta_n = \frac{(1-g)(P_a - P_{\text{fer}} - P_{\text{js}}) - P_{\text{mec}}}{P_a} = (1 - g)$

Le rendement réel est donc inférieur à $(1 - g)$.

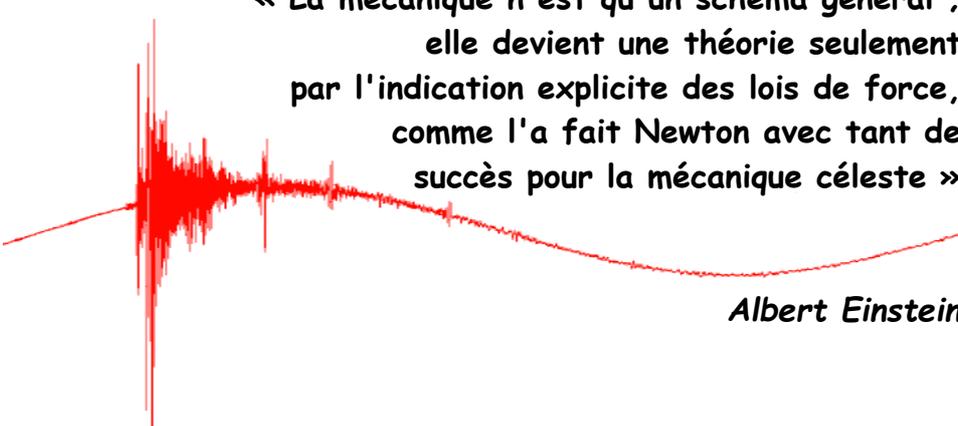
Remarque :

- on aurait pu s'attendre à un rendement théorique de 100 %.

Ce n'est pas le cas car à cause du glissement, il y a nécessairement des pertes Joule dans le rotor.

- on vérifie que : $78 \% < (1 - 0,05) = 95 \%$

TRAVAUX PRATIQUES



« La mécanique n'est qu'un schéma général ;
elle devient une théorie seulement
par l'indication explicite des lois de force,
comme l'a fait Newton avec tant de
succès pour la mécanique céleste »

Albert Einstein

TRAVAUX PRATIQUES N° 1

Étude d'un Monte-Charge

I.1. INTRODUCTION

Le monte-charge est un appareil élévateur installé à demeure, desservant des niveaux définis, comportant une cabine inaccessible aux personnes par ses dimensions et sa constitution, se déplaçant au moins partiellement le long de guides verticaux ou dont l'inclinaison sur la verticale est inférieure à 15 degrés.

I.2. PRÉSENTATION D'UN MONTE CHARGE

I.2.1. Gaine

Un monte-charge (Fig.I-1) est constitué d'une gaine recevant l'ensemble des éléments composant l'installation. La gaine est suivant la taille des monte-charge soit une trémie en béton pour les charges importantes soit une structure autoporteuse en acier pour les montes plats et monte documents.

A la partie supérieure et inférieure de la gaine, ces rails reçoivent des butées qui assurent l'arrêt de la benne en cas de non fonctionnement des sécurités électriques.

De deux portes palières montées à l'intérieur de la gaine et qui équipe la face de service à chaque niveau. De capteurs de position et de sécurité répondant aux fonctions élémentaires citées ci-dessus.

La fermeture des portes est contrôlée par des serrures de sécurité qui en interdisent l'ouverture lorsque la benne n'est pas au niveau.



Figure I-1. Monte-charge industriel

Les serrures sont équipées de contacts qui interdisent le déplacement de la benne lorsque la porte n'est pas fermée.

I.2.2. Treuil

On appelle treuil (Fig.I-2) le motoréducteur-frein équipé d'un volant pour les manœuvres de secours. Le motoréducteur entraîne, sur son arbre lent, un tambour sur lequel viendra s'enrouler le câble de traction de la benne.



Figure I-2. Treuil

I.2.3. Moto réducteur

Un moteur électrique de type triphasé à cage, équipé d'un électrofrein à freinage par manque de courant. Un réducteur à roue et vis sans fin. En cas de coupure de courant, une commande manuelle permet de neutraliser l'action du frein. Un levier implanté sur le châssis autorise au moyen du volant, les manœuvres de secours de la benne.

Le réducteur est composé d'un ensemble arbre et vis sans fin guidé par un montage de roulements à billes et est emmanché sur l'arbre du moteur électrique.



Figure I-3. Moto réducteur

Le réducteur est composé d'un ensemble arbre et vis sans fin guidé par un montage de roulements à billes et est emmanché sur l'arbre du moteur électrique.

I.2.4. Armoire de manœuvre

Elle regroupe les éléments de puissance, de sécurité et de gestion de l'automatisme de l'application monte-charge. On trouvera des armoires (Fig.I-4) faisant appel à des technologies à relais ou à microprocesseur suivant l'âge de l'appareil. Pour la partie puissance et suivant la charge on trouvera des solutions très diverses allant de l'inverseur classique à la variation de vitesse sans oublier les monte charges oléo dynamiques.



Figure I-4. Armoire de manœuvre

I.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MONTE-CHARGE

Le fonctionnement automatique du déplacement de la benne pourrait être représenté suit (Fig.I-5) :

Il met en évidence les trois phases gérées par le variateur de vitesse. La phase d'accélération, la phase à vitesse stabilisée, et la phase de décélération.

Le variateur est réglé en usine, la distance de décélération définie par la position des contacts de ralentissement RAL1 et RAL2 sera associé étroitement au paramètre de règle de la pente de décélération.

De la valeur des distances de ralentissement dépend la qualité de la souplesse de l'arrêt de la benne.

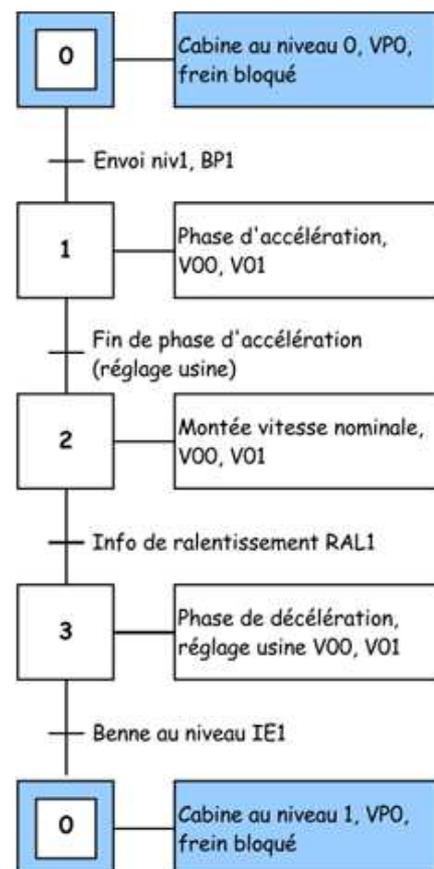


Figure I-5. Grafset de fonctionnement

I.4. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME MONTE CHARGE

I.4.1. Plans 2D : Plans d'ensemble

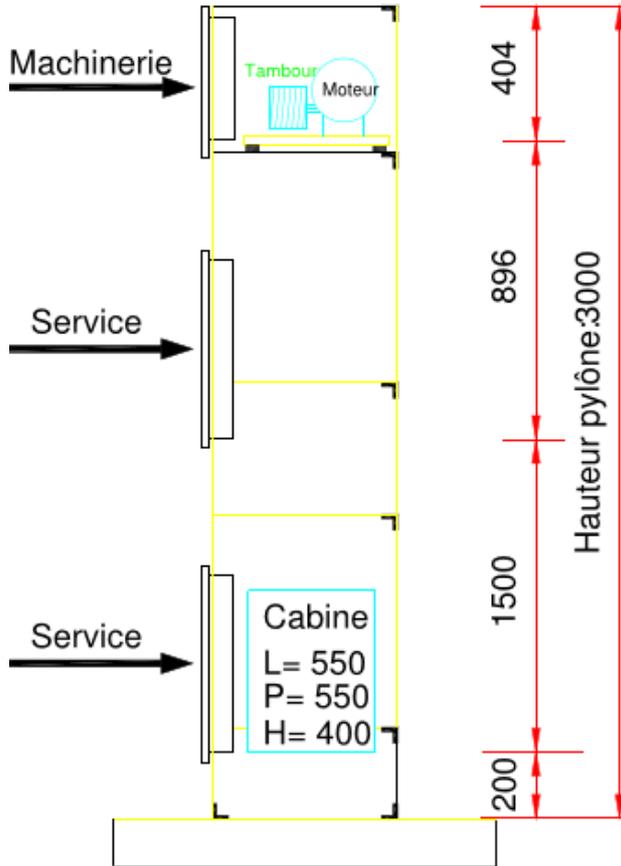


Figure I-6. Vue du châssis en profil

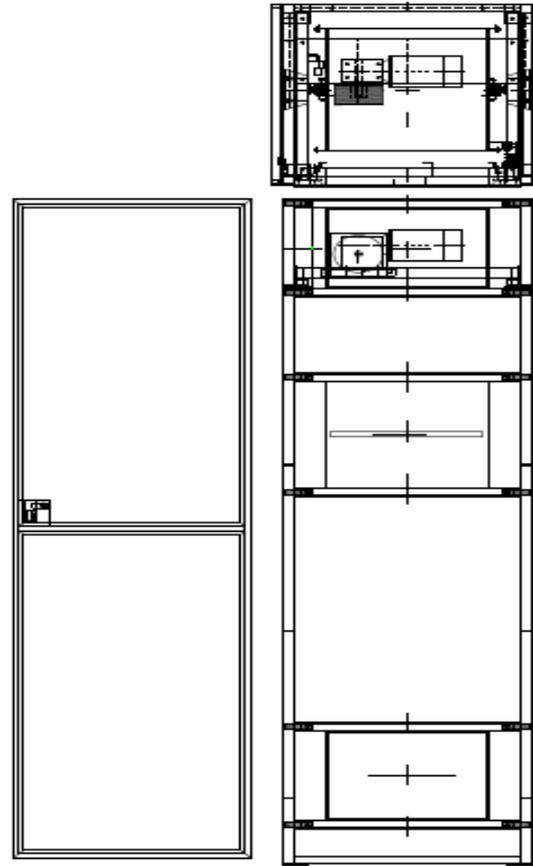


Figure I-7. Vue du châssis

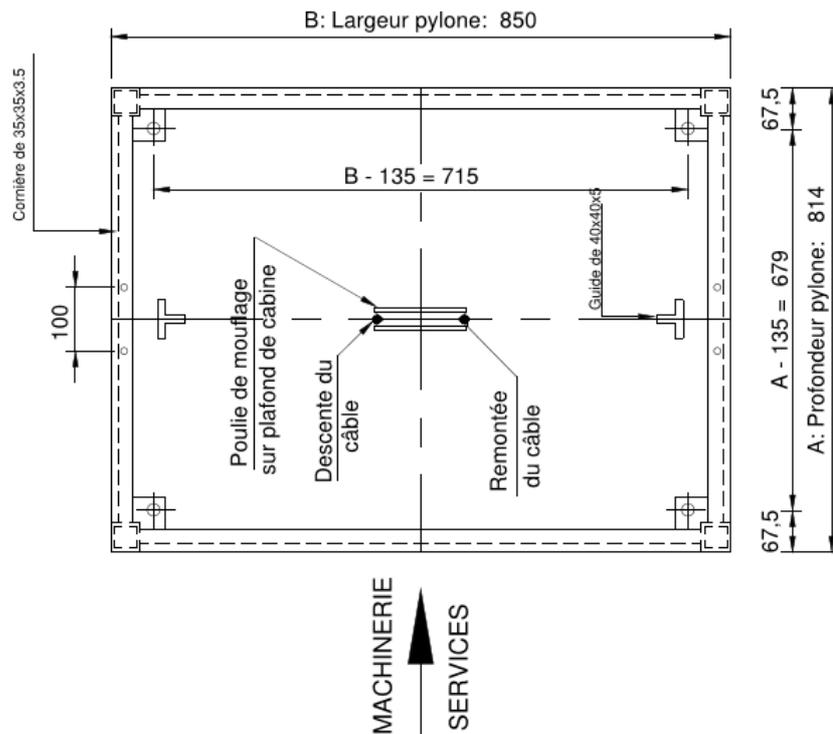


Figure I-8. Vue en plan élément pylône / Treuil attelé 25 kg / Traction mouflée / 2 guides 40x40x5

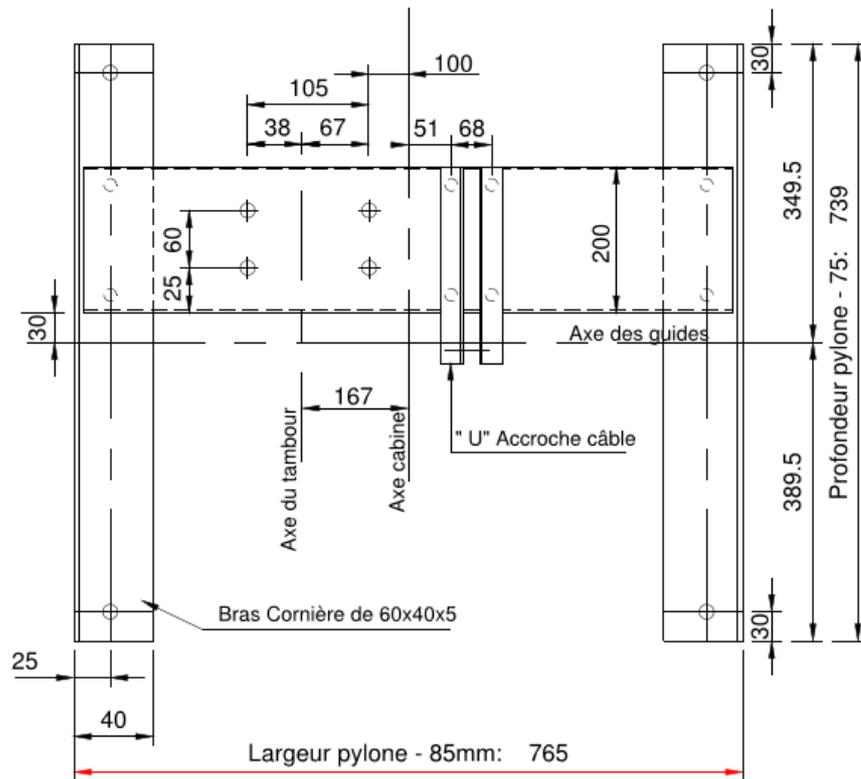


Figure I-9. Support moteur 0,55 kW / Tambour D : 165 mm

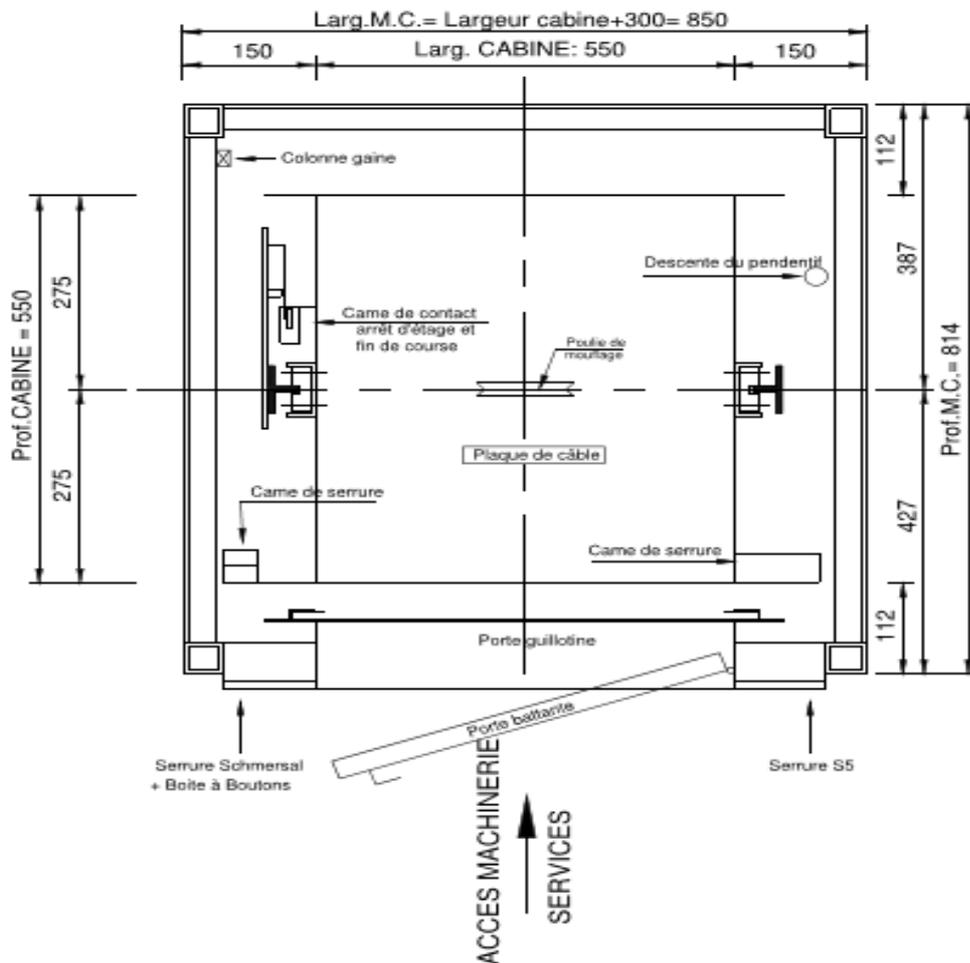


Figure I-10. Vue de la cabine - Poulie - Guide - Came

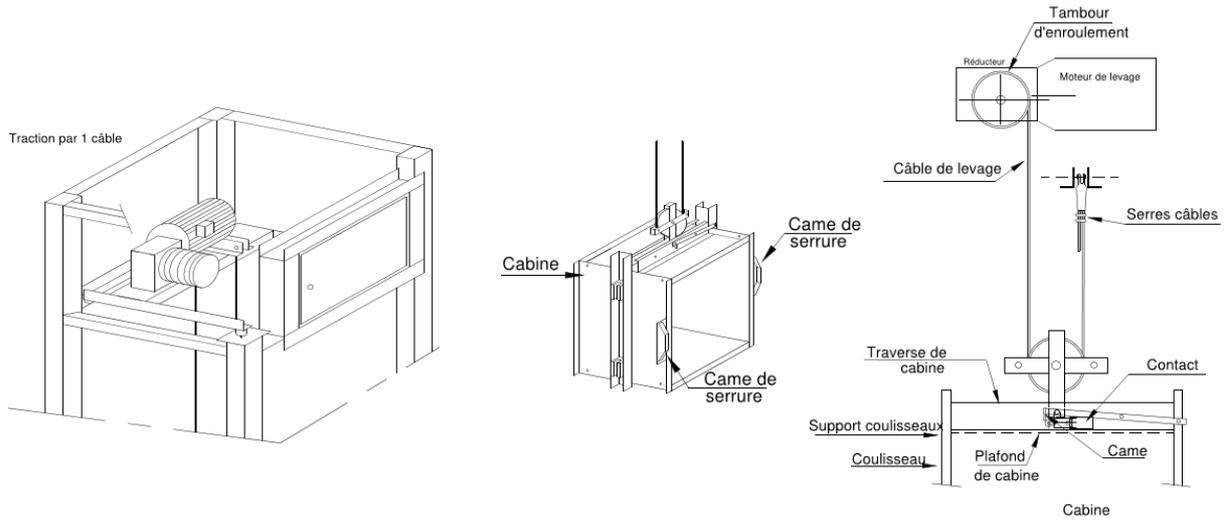


Figure I-11. Partie dynamique

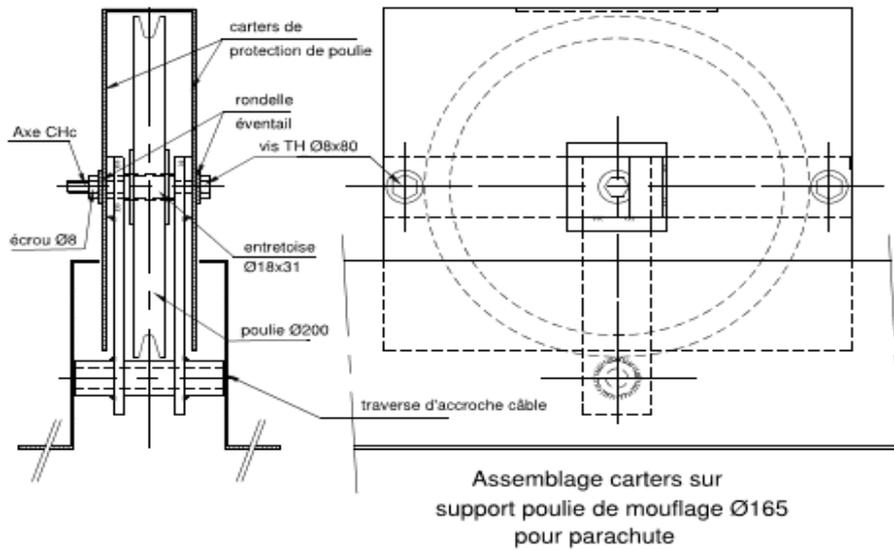


Figure I-12. Poulie

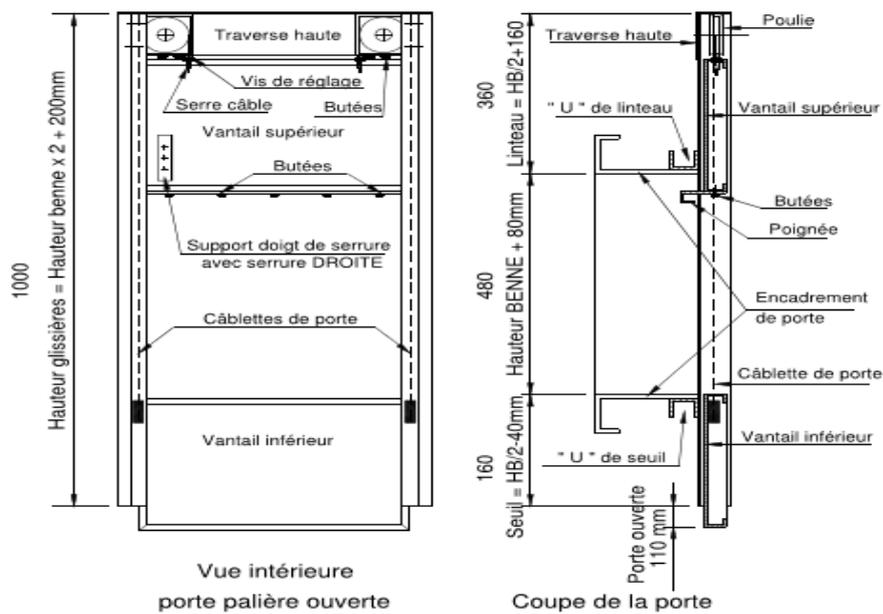


Figure I-13. Porte guillotine

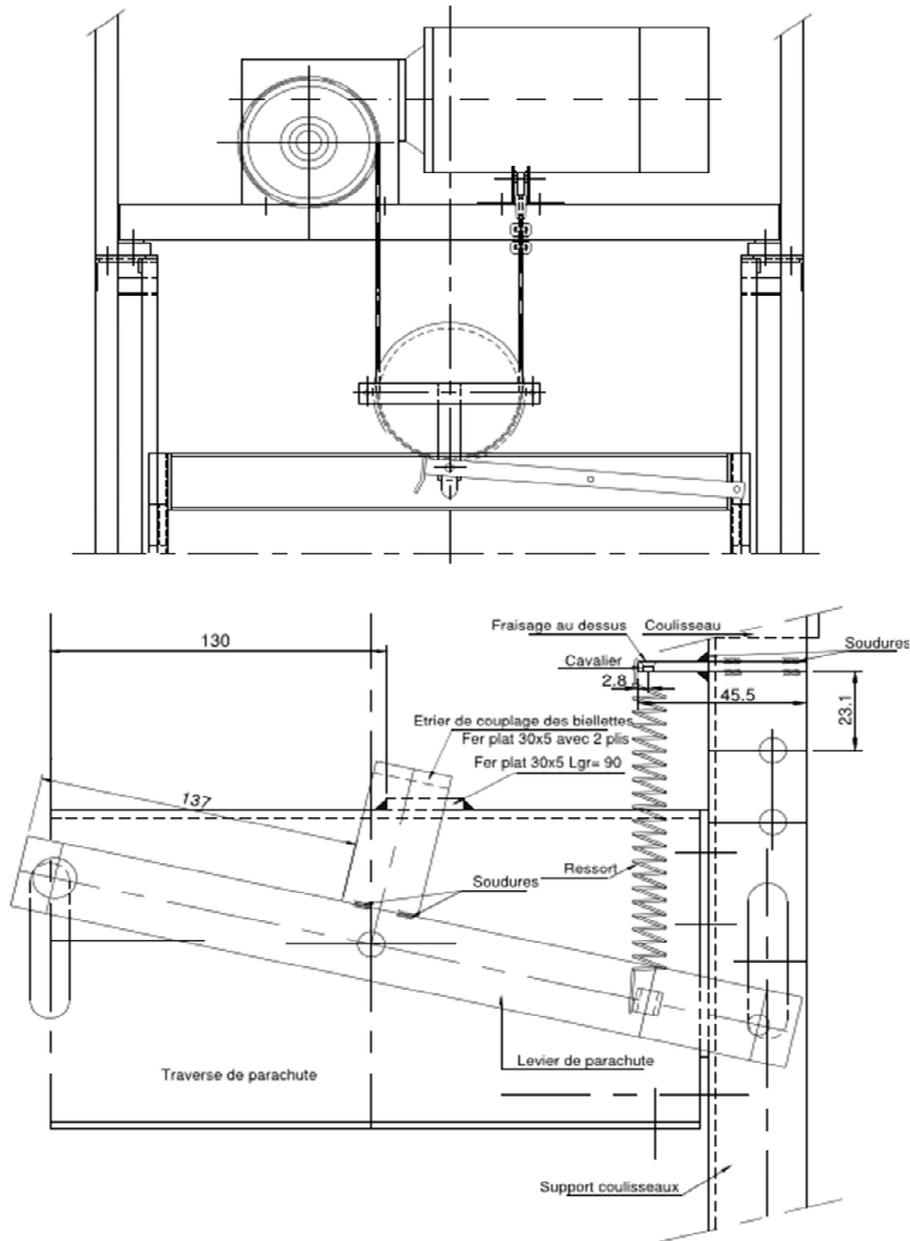


Figure I-13. Parachute A

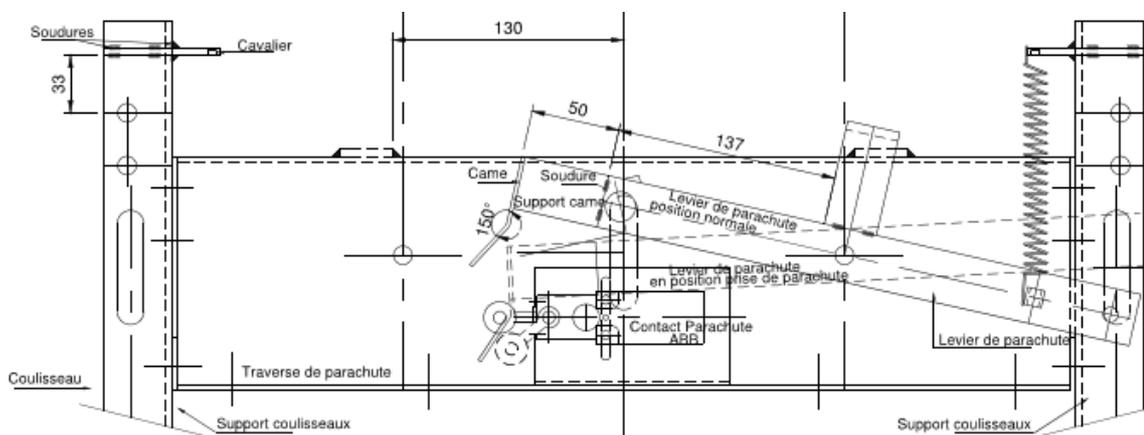


Figure I-13. Parachute B

TRAVAUX PRATIQUES N° 2

Étude d'un Entraînement à Tapis Roulant

II.1. INTRODUCTION

Le tapis de course (Fig.II-1) est un système complet de fitness à domicile. Il permet de courir quand à l'extérieur les conditions atmosphériques sont particulièrement difficiles, quand on a peu de temps à disposition ou plus simplement quand on en a envie.

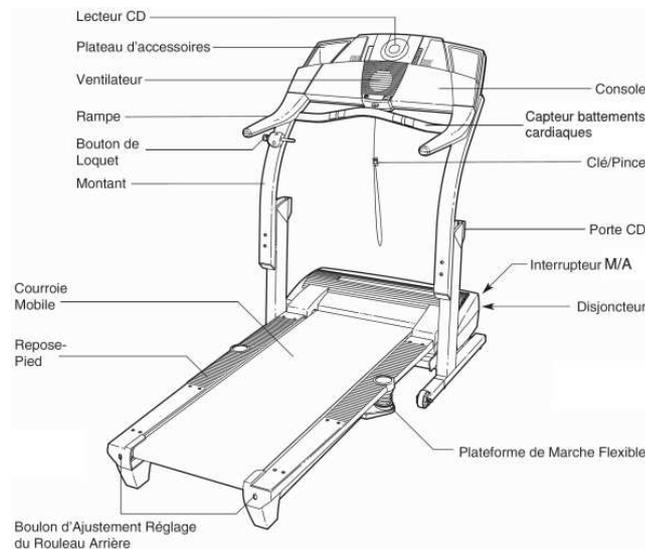


Figure II-1. Tapis roulant de course

II.2. FONCTIONNEMENT DU TAPIS DE COURSE

L'utilisateur court sur une courroie mobile qui est entraînée dans le sens inverse de la course. La vitesse de déplacement de la courroie mobile est réglable pour permettre au coureur de rester sur place.

Ce tapis de course propose un large choix de mode de fonctionnement. L'étude sera limitée à l'utilisation du programme de contrôle de la fréquence cardiaque. Avec ce programme, le système ajuste automatiquement la vitesse et l'inclinaison du tapis afin d'obtenir une fréquence cardiaque pré-réglée.

Techniquement, la gestion du tapis est réalisée comme décrit ci-dessous :

- Le tapis commence par augmenter la vitesse de déroulement de la courroie mobile pour atteindre la fréquence cardiaque préréglée ;
- Si la vitesse maximale ne suffit pas, alors le tapis de course s'incline pour augmenter encore l'effort ;
- La console informe en permanence l'utilisateur de sa fréquence cardiaque.

On se propose ici de vérifier les choix technologiques faits par le constructeur pour répondre à son cahier des charges fonctionnel.

II.3. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME TAPIS ROULANT

L'objectif de cette partie est de valider le choix de la motorisation et de sa commande afin de satisfaire la contrainte du cahier des charges : vitesse allant jusqu'à 19 Km/h.

Hypothèses :

- Le tapis est réglé à l'horizontale.
- La courroie mobile (15) s'enroule sans glisser sur le rouleau avant (7) avec un rendement $\eta_1 = 0,95$.

Le rayon d'enroulement de la courroie mobile (15) sur le rouleau avant (7) est $R_{r7}=24,5\text{mm}$ et le rayon primitif de la poulie du rouleau avant (7) est $R_{p7}=44\text{mm}$.

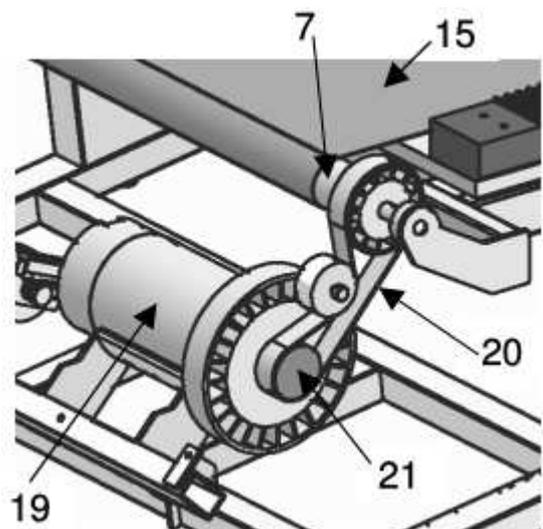


Figure II-2. Moteur du tapis roulant de course

- L'épaisseur de la courroie mobile (15) est négligée.
- Le rendement de la transmission par poulies-courroie (sans glissement) est $\eta_2 = 0,95$ et le rayon primitif de la poulie moteur 21 est $R_{p21} = 27 \text{ mm}$.

Une étude préliminaire du frottement de la courroie mobile (15) sur la plateforme de marche (8) a montré que pour entraîner un coureur de 115 kg il

fallait exercer un effort : $T=230\text{N}$. La nécessité de calcul de la puissance mécanique P_{19} que doit fournir le moteur (19).

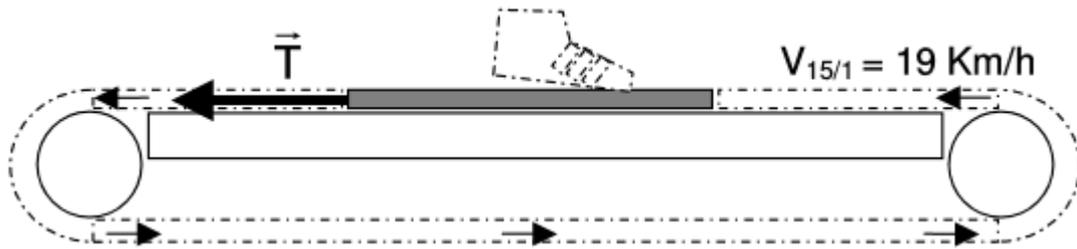


Figure II-3. Tapis de course

Pour la suite, on prendra $N_{19} = 3\,400$ tr/min comme vitesse de rotation du moteur (19) permettant d'obtenir la vitesse maximale de la courroie mobile (15), et $C_{u19} = 3,8$ N.m comme couple utile du moteur (19).

On souhaite déterminer la consigne de vitesse du moteur (19) pour qu'il tourne à la vitesse de 3 400 tr/min :

Quelle force contre-électromotrice E produit le moteur lorsqu'il tourne à la cette vitesse ?

En déduire la valeur de la tension moyenne $U_{m\,moy}$ à appliquer aux bornes de l'induit du moteur 19 pour obtenir cette vitesse de rotation.

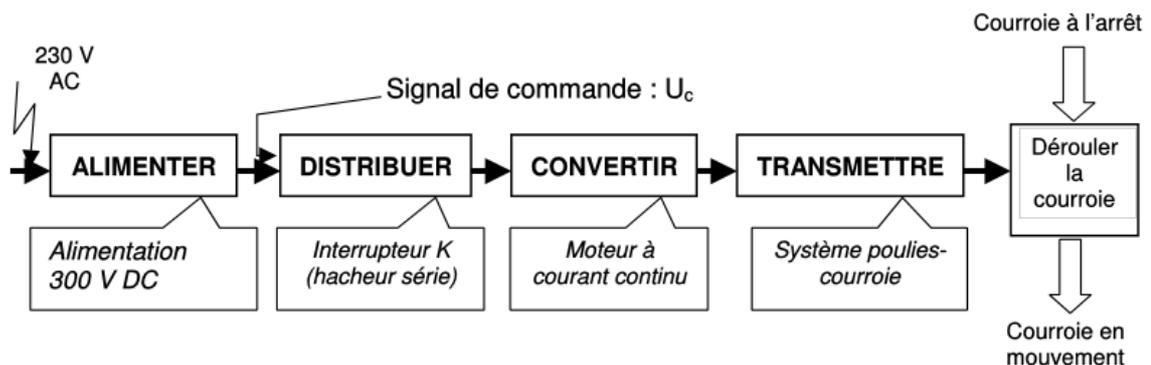


Figure II-3. Structure fonctionnelle de la chaîne d'énergie de l'entraînement du tapis

Pour que la fréquence cardiaque du coureur atteigne la valeur souhaitée, la console agit sur la vitesse de défilement de la courroie mobile. Pour cela, elle génère un signal U_c de type MLI qui est envoyé à la carte variation vitesse, il servira à commander un interrupteur K (Fig.II-4).

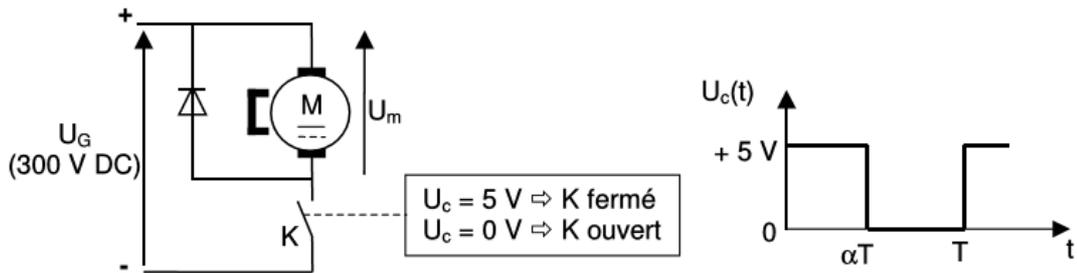


Figure II-4. Moteur et signal de la console

Le groupe moto-réducteur est de la chaîne d'énergie suivante :

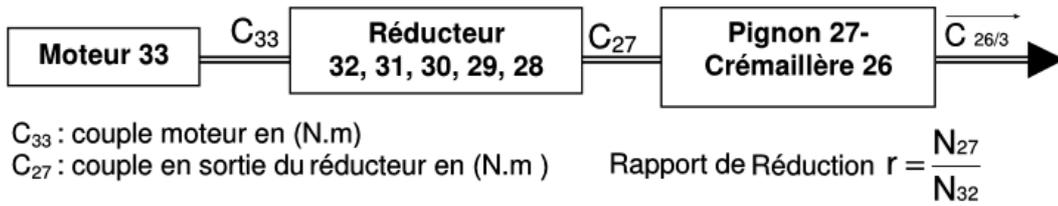


Figure II-5. Groupe moto-réducteur

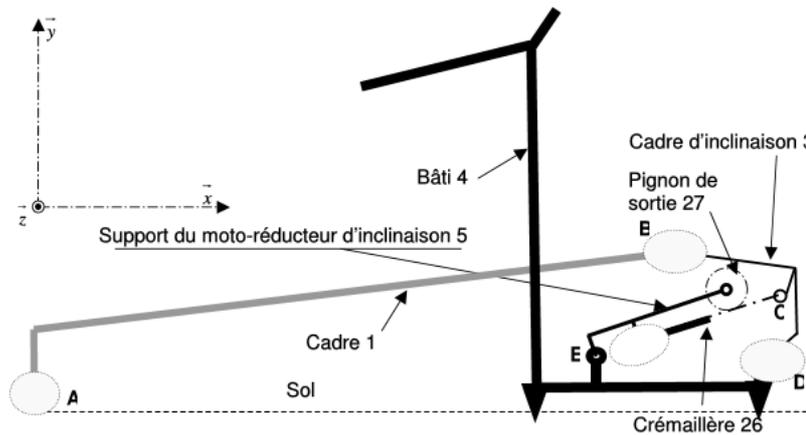


Figure II-6. Schéma cinématique

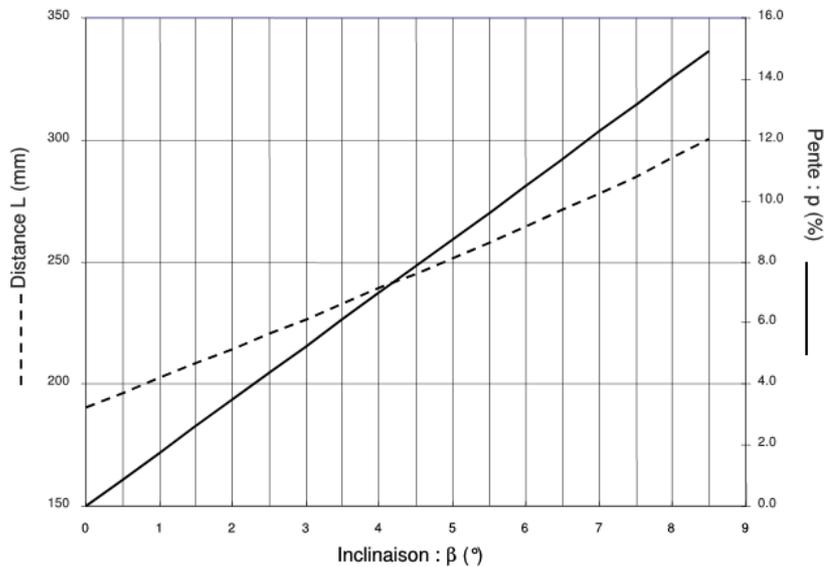
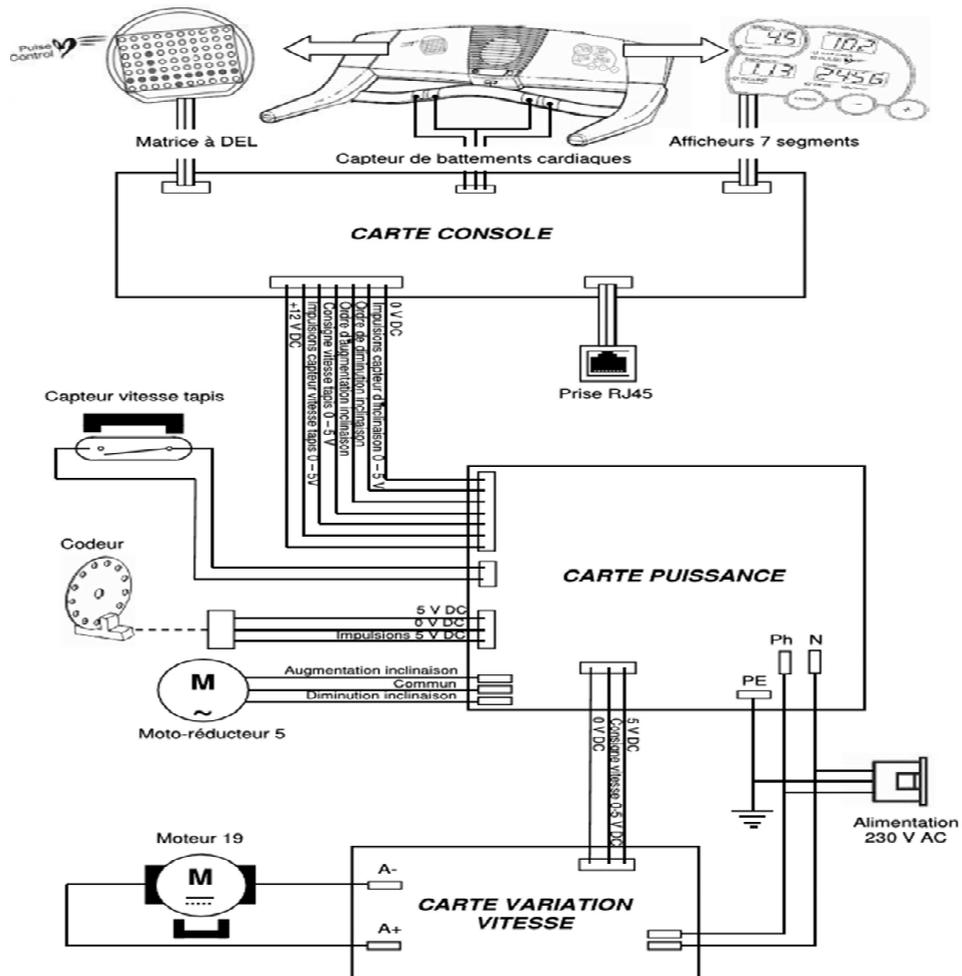
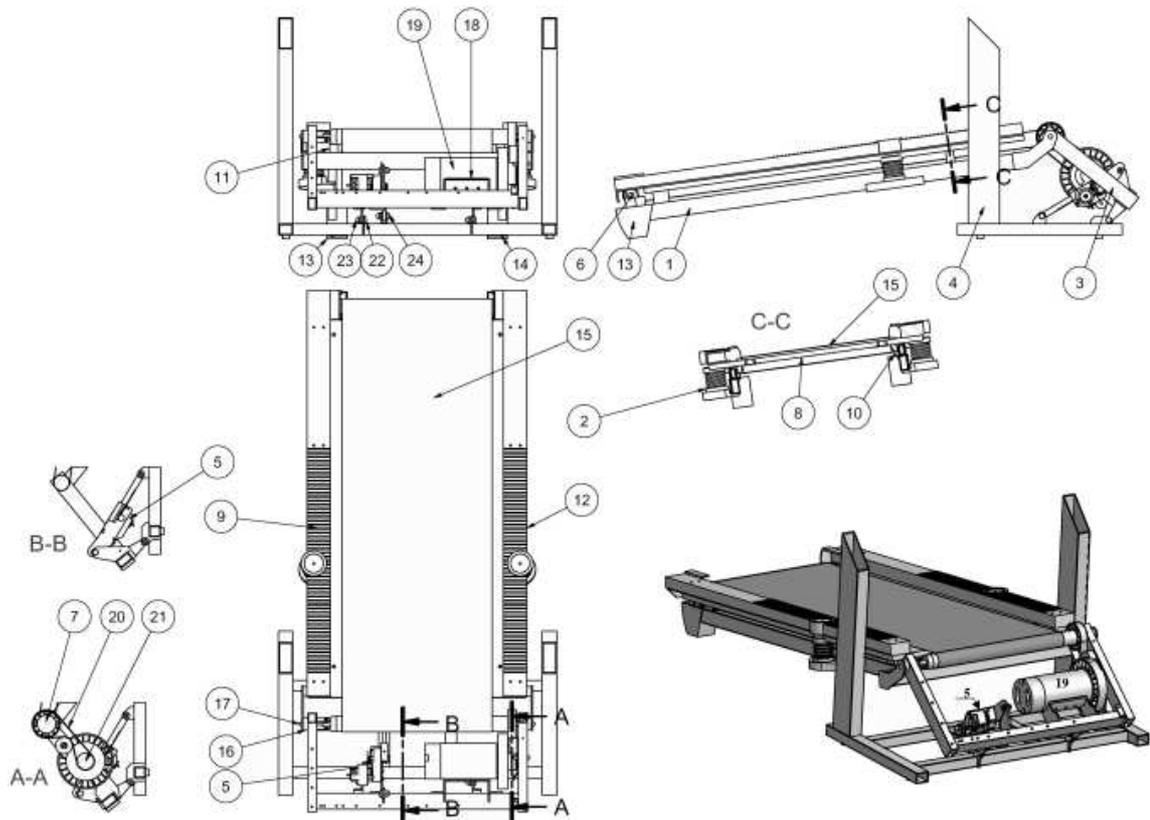


Figure II-7. Simulation informatique de l'inclinaison de la plateforme de marche

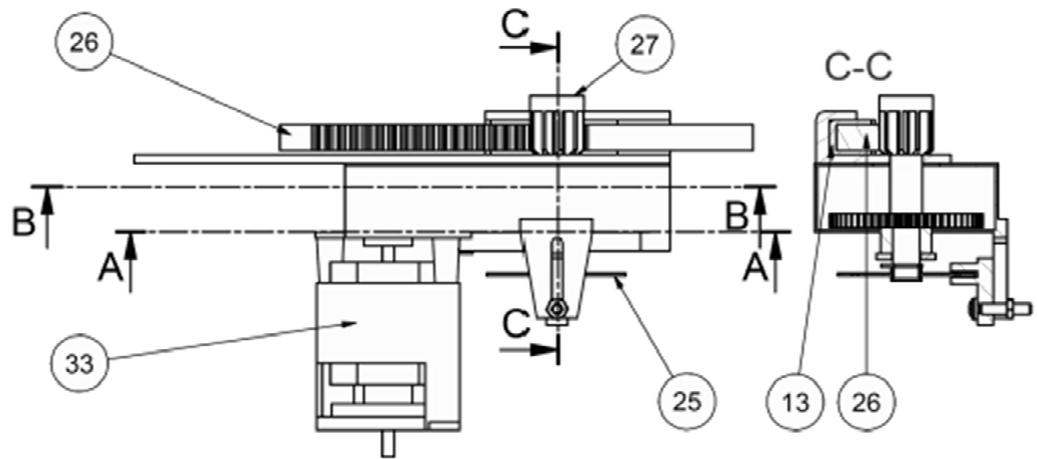
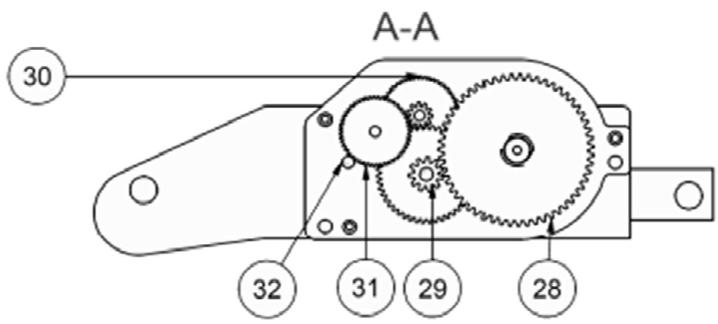
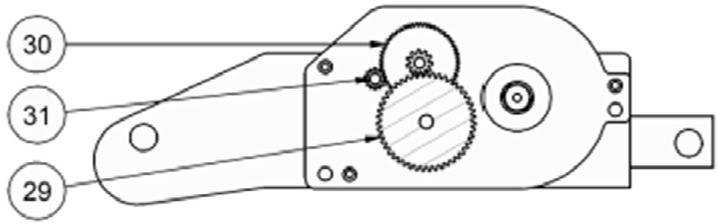
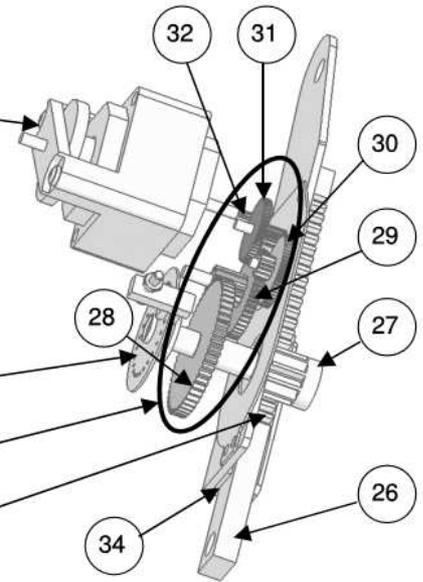


Moteur 33 :
 monophasé à deux sens de rotation
 Vitesse nominale = 2025 tr/min
 Couple moteur nominal = 0,2 N.m
 Tension nominale = 230 V AC
 Intensité nominale = 0,7 A

Codeur 26 trous

Réducteur

Pignon crémaillère



34	1	Palier de crémaillère	Téflon
33	1	Moteur AC	Voir DT5
32	1	Pignon moteur	7 dents m=0,5 mm
31	1	Premier étage	51 dents m=0,5 mm ; 14 dents m=0,5 mm
30	1	Deuxième étage	57 dents m=0,5 mm ; 11 dents m=0,75 mm
29	1	Troisième étage	47 dents m=0,75 mm ; 11 dents m=1 mm
28	1	Quatrième étage	55 dents m=1 mm
27	1	Pignon de sortie	10 dents m=1,5 mm
26	1	Crémaillère (longueur dentée de 105mm)	m=1,5 mm
25	1	Disque codeur	26 trous
24	1	Vis à tête hexagonale bombée à pans creux	M10 x 25
23	4	Ecrou borgne hexagonal à calotte	M10
22	3	Vis à tête hexagonale bombée à pans creux	M10 x 16
21	1	Poulie moteur	
20	1	Courroie	
19	1	Moteur	voir DT 4
18	1	Isolateur du moteur	
17	2	Boulon de pivot du cadre	
16	2	Bague pivot	
15	1	Courroie mobile	
14	1	Pied arrière gauche	
13	1	Pied arrière droit	
12	1	Repose pied Gauche	
11	2	Isolateur avant	
10	2	Guide de la courroie	
9	1	Repose pied Droit	
8	1	Plateforme de Marche	
7	1	Rouleau avant poulie	
6	1	Rouleau arrière	
5	1	Moto-réducteur d'inclinaison	voir DT5-DT6
4	1	Bâti	
3	1	Cadre d'inclinaison	
2	2	Isolateur	
1	1	Cadre	
Rep	Nbre	Désignation	Observation

TRAVAUX PRATIQUES N° 3

Étude d'une Pompe Centrifuge

III.1. INTRODUCTION

Les pompes sont généralement choisies selon la hauteur manométrique totale du puits (HMT). Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement : elles sont soit de type volumétrique ou bien de type centrifuge. Outre ces deux classifications, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : pompe à aspiration et pompe à refoulement.

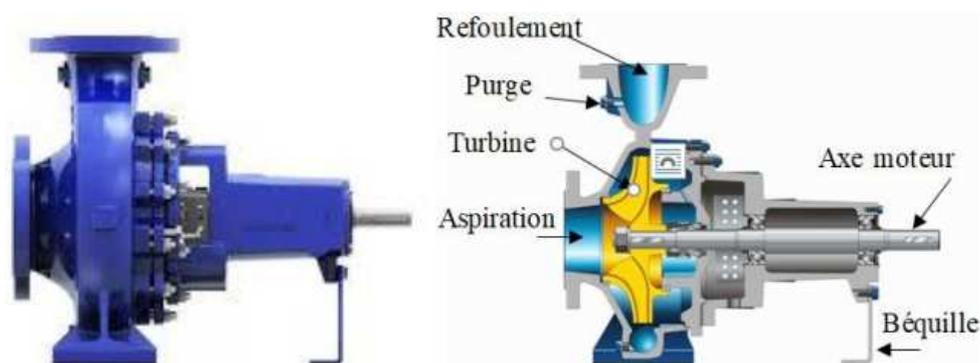


Figure III-1. Pompe centrifuge

III.2. HAUTEUR MANOMETRIQUE

La technologie des pompes centrifuges est la plus utilisée dans les systèmes de pompage. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et un rendement en eau qui augmente avec la vitesse de rotation. Ces pompes sont simples, à prix réduit et disponibles pour une large gamme de débit. La caractéristique débit-hauteur d'une pompe centrifuge peut être estimée par le modèle de « Pleider-Peterman », et peut être exprimée par la formule suivante :

$$HMT = a_0\Omega^2 + a_1\Omega Q + a_2Q^2 = H_g + \Delta P_c \quad (\text{III-1})$$

$$H_g = N_s + R \quad (\text{III-2})$$

Avec :

Ω : Vitesse de rotation de l'axe de la pompe [rad/s] ;

N_S : Niveau statique ;

R : Rabattement ;

ΔP_c : Pertes de charge.

III.3. PUISSANCE HYDRAULIQUE

La principale caractéristique de la pompe centrifuge consiste à convertir l'énergie d'une source de mouvement (le moteur) d'abord en vitesse (ou énergie cinétique) puis en énergie de pression. Le rôle d'une pompe consiste en effet à transférer de l'énergie au liquide pompé (énergie transformée ensuite en débit et en hauteur d'élévation) selon les caractéristiques de fabrication de la pompe elle-même et en fonction des besoins spécifiques à l'installation. La puissance hydraulique fournie par la pompe est donnée par la relation :

$$P_{Hyd} = \rho g HMT Q \quad (III-3)$$

Avec :

P_{Hyd} : Puissance hydraulique [W] ;

ρ : Densité du liquide [kg/m³] ;

g : Accélération de pesanteur soit 9,81 m/s² ;

HMT : Hauteur manométrique de la pompe exprimée [m] ;

Q : Débit volumique du liquide exprimé en [m³/s].

III.4. CARACTÉRISTIQUES DE LA POMPE

Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans les applications de l'énergie car le moteur peut fournir une vitesse rapide à peu près constante. La hauteur manométrique est la hauteur d'une colonne de liquide qui détermine la pression statique qui est égale à la pression de refoulement. La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur :

$$C_r = k_r \Omega^2 \quad (\text{III-4})$$

k_r : Coefficients de proportionnalité exprimée [$\text{Nm}/(\text{rad.s}^{-1})^2$]

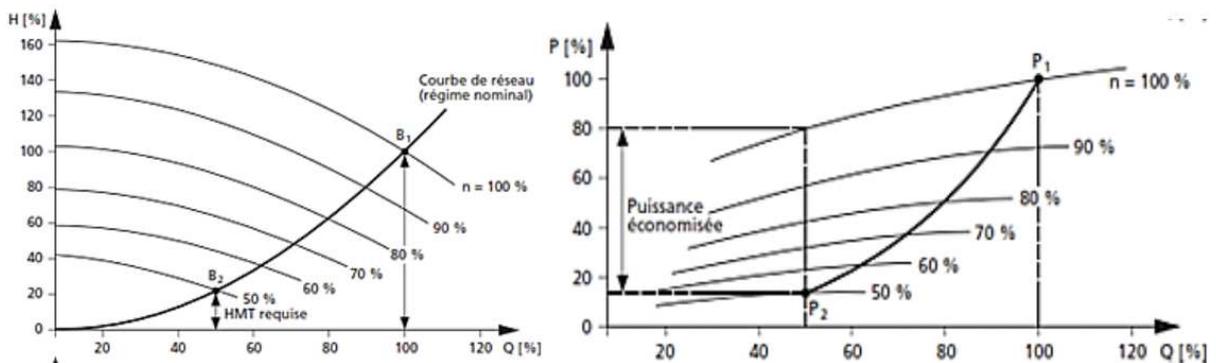


Figure III-2. Caractéristiques HMT et la puissance en fonction du débit

L'énergie mécanique à fournir de la machine est bien évidemment toujours supérieure l'énergie hydraulique fournie au liquide et on appelle rendement de la pompe le coefficient de proportionnalité qui lie ces deux paramètres. On a donc la relation :

$$\eta_p = \frac{P_p}{P_{mec}} \quad (\text{III-5})$$

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_p = k_p \Omega^3 \quad (\text{III-6})$$

III.5. SIMULATION DU DEBIT-VITESSE

En se basant sur la loi de similitude nous pouvons prévoir le fonctionnement de la pompe centrifuge en exploitant sa caractéristique d'origine, c'est à dire, celle qui est généralement connue ou sur les résultats obtenus expérimentalement. Pour cela, un ensemble de formules peut être utilisé, à savoir :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{III-7})$$

$$\frac{HMT_1}{HMT_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (\text{III-8})$$

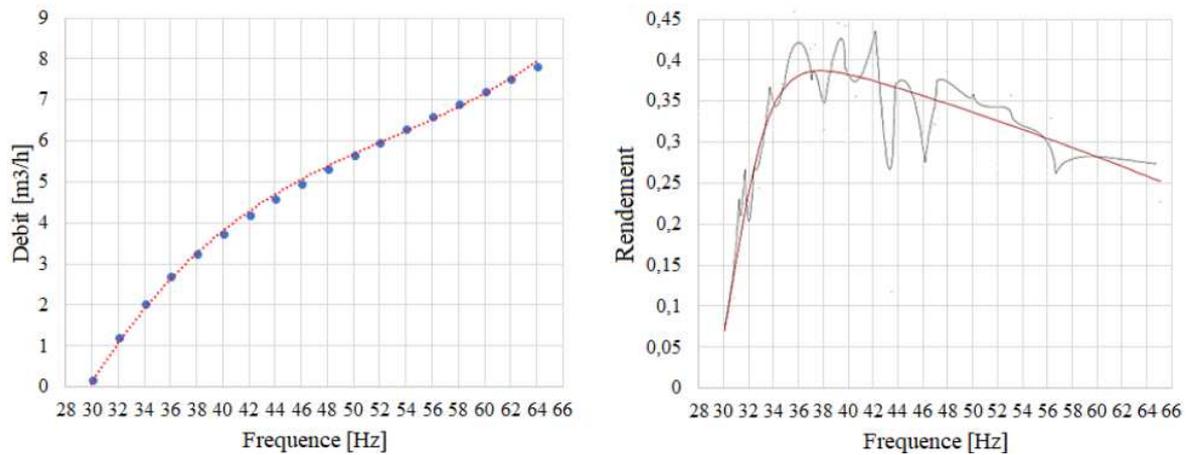
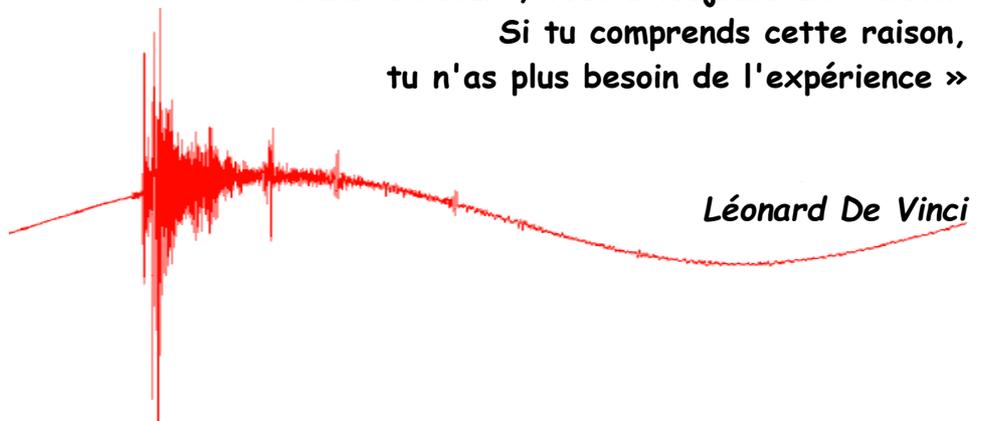


Figure III-3. Caractéristique du débit et le rendement en fonction de la fréquence

D'après la Figure (III-3), on remarque que l'augmentation de la fréquence statorique entraîne une augmentation du débit de l'eau à la sortie de la pompe. On déduit aussi que le système fonctionne d'une façon optimale à une fréquence d'environ 38 Hz, où le rendement est maximum.

CONCLUSION GÉNÉRALE

« Dans la nature, tout a toujours une raison.
Si tu comprends cette raison,
tu n'as plus besoin de l'expérience »



Léonard De Vinci

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail a consisté à concevoir des systèmes industriels. L'environnement thermique et la nécessité de minimiser les ondulations de couple sont les contraintes fortes pour le dimensionnement de ces moteurs. La minimisation des ondulations de couple passe par un choix judicieux de la structure du moteur mais aussi par la mise en œuvre de lois de commande adéquates. Suite à l'analyse technologique des différentes solutions pour l'association convertisseur – machine, nous nous sommes orientés vers un moteur à aimants permanents alimenté par des courants de forme sinusoïdale. L'alimentation par des courants sinusoïdaux définis en haute résolution rend possible la mise en œuvre de méthodes de compensation active liées à la commande.

Nous avons analysé le cahier des charges, d'une part pour dégager les caractéristiques déterminantes pour la fonctionnalité de l'actionneur, et d'autre part pour extraire les contraintes dimensionnantes. Le choix du réducteur mécanique a permis de définir la caractéristique couple/vitesse pour le dimensionnement du moteur. L'étude du système mécanique a permis d'explicitier le lien entre la raideur du capteur de couple et l'inertie ramenée au volant. Une approche système pour le dimensionnement a levé cette contrainte par l'augmentation de la raideur du capteur de couple. Cette analyse du cahier des charges permet d'éviter l'emploi d'algorithmes d'optimisation car, beaucoup de paramètres initialement considérés comme des entrées du dimensionnement sont fixées par le cahier des charges.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abdelfettah Kerboua, “*Machines Electriques a Courant Alternatif*”, Notes de Cours, Université de Mascara, 2015.
- [2] — —, “*Démarrage et Protection des Moteurs*”, Schneider Electric, —.
- [3] Boutchicha Abd Errahman et Lachache Abderrazek, “*Etude de la Conception d’une Machine Asynchrone a Encoches Rotoriques Ouvertes*”, Mémoire de Mater, Université de M’sila, 2018.
- [4] Adel Bagghi, “*Les Moteurs Asynchrones Triphasés*”, Notes de Cours, 2001.
- [5] Francis Binet, “*Le Dimensionnement d’une Motorisation d’Axe*”, Notes de Cours, 2007.
- [6] François Gauthier, “*Calcul des Paramètres de la Machine Asynchrone*”, Mémoire de Maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 2017.
- [7] Pierre Mayé, “*Problèmes Corrigés d’Electrotechnique*”, Edition Dunod, 2012.
- [8] Ammar Kamal et Mellal Makhoulf, “*Dimensionnement d’un Moteur Asynchrone Triphasé à Cage d’Ecureuil*”, Mémoire d’Ingénieur d’Etat de l’Université de Tizi-Ouzou, 2013.
- [9] Jean Dubuy, “*Dimensionnement d’un Moteur*”, Notes de Cours, 2019.
- [10] Bendaoud Abdelber, “*Machines Electriques a Courant Alternatif*”, Notes de Cours, Université de SBA, 2007.
- [11] Amari Mansour, “*Electrotechnique*”, Notes de Cours, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Janvier 2014.
- [12] E. Mahfoudi, “*Machine Asynchrone*”, Notes de Cours, Centre de Brevet de Technicien Supérieur, 2013.
- [13] — —, “*Notions Fondamentales d’Utilisation des Moteurs Triphasés à Courant Alternatif*”, Manuel Technique de Rockwell, 1997.
- [14] Fabien Casse, “*Electromagnétisme*”, Notes de Cours, Université de Paris, 2012.
- [15] Claude Chevassu, “*Machines Electriques*”, Notes de Cours, Ecole Supérieur Maritime, 2007.
- [16] Badr El Boudour Bidouche, “*Étude et Réalisation d’une Machine Asynchrone Basse Vitesse à Réducteur Magnétique Intégré*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Lorraine, 2019.
- [17] J.F. Debongnie, “*Conception et Calcul des Eléments de Machines*”, Notes de Cours, Liège, 2013.
- [18] Bapio Bayala, “*La Machine Asynchrone*”, Notes de Cours, 2010.
- [19] Laurent Gasc, “*Conception d’un Actionneur à Aimants Permanents à Faibles Ondulations de Couple pour Assistance de Direction Automobile Approches par la Structure et par la Commande*”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [20] Gwenaëlle Le Coat, “*Discrétion Electromagnétique des Machines Electriques Tournantes*”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.
- [21] — —, “*Electricité Industrielle Avancé*”, Schneider Electric, 2014.
- [22] — —, “*Dimensionnement de Moteurs*”, Note de cours, 2011.
- [23] — —, “*Intelligence et Performance au cœur des Machines*”, Gimélec, 2012.

- [24] Rahmoune Chemseddine, “*Contribution à la Surveillance des Systèmes Electromécaniques*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Boumerdes, 2015.
- [25] Caroline Doc, “*Contribution à la Conception et au Dimensionnement d’un Actionneur d’Embrayage*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Compiègne, 2010.
- [26] Gilles Rostaing, “*Diagnostic de Défaut dans les Entraînements Electriques*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Grenoble, 1992.
- [27] Nicolas Achotte, “*Conception, Optimisation et Dimensionnement d’un Micromoteur Planaires à Aimants Permanent pour Drones Miniatures en Vol Stationnaire*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Grenoble, 2005.
- [28] Yacine Amara, “*Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation Application au véhicule hybride*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Paris, 2001.
- [29] Vincent Reinbold, “*Méthodologie de Dimensionnement d’un Moteur Electrique pour Véhicules Hybrides Optimisation Conjointe des Composants et de la Gestion d’Energie*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Grenoble, 2006.