Précautions d'utilisation

Le courant magnétisant est d'autant plus faible que la tension secondaire est faible, d'où l'importance de l'impédance de charge du secondaire (ampèremètre, circuit intensité de wattmètre, résistance de charge,...) qui doit être aussi faible que possible.

Remarque :

Si le courant secondaire est nul (transformateur non connecté au secondaire par exemple), alors que le primaire est alimenté, le courant magnétisant peut atteindre des valeurs très importantes puisque le courant primaire est imposé. On a alors :

$$N_1 . i_1 = N_1 . i_{10}.$$

Ceci a pour conséquences :

- d'engendrer un flux très important, produisant des pertes considérables dans le circuit magnétique et entraînant la destruction rapide du transformateur d'intensité,
- de donner une tension importante et dangereuse aux bornes du secondaire

C'est pourquoi, il ne faut jamais laisser le circuit secondaire d'un transformateur d'intensité ouvert lorsque le primaire est lui-même parcouru par un courant.

Enfin, on ne peut pas utiliser un transformateur d'intensité pour effectuer une mesure en courant continu. Dans ce cas, pour réaliser une mesure isolée il est possible d'utiliser un *capteur à effet Hall*.

8.3. Les machines tournantes

8.3.1. Principe général de fonctionnement

Les machines électriques comprennent toutes des circuits magnétiques constitués par des tôles ferromagnétiques empilées destinées à canaliser les lignes de force du champ d'induction magnétique créé par les circuits électriques ou, dans certaines machines de faible puissance, par un aimant permanent.
Nous rappellerons seulement qu'on utilise dans les machines électriques l'action d'une induction magnétique sur un conducteur parcouru par un courant.
Ce phénomène s'explique par les lois de Laplace et Faraday.

Loi de Laplace

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ d'induction magnétique est soumis à des forces.

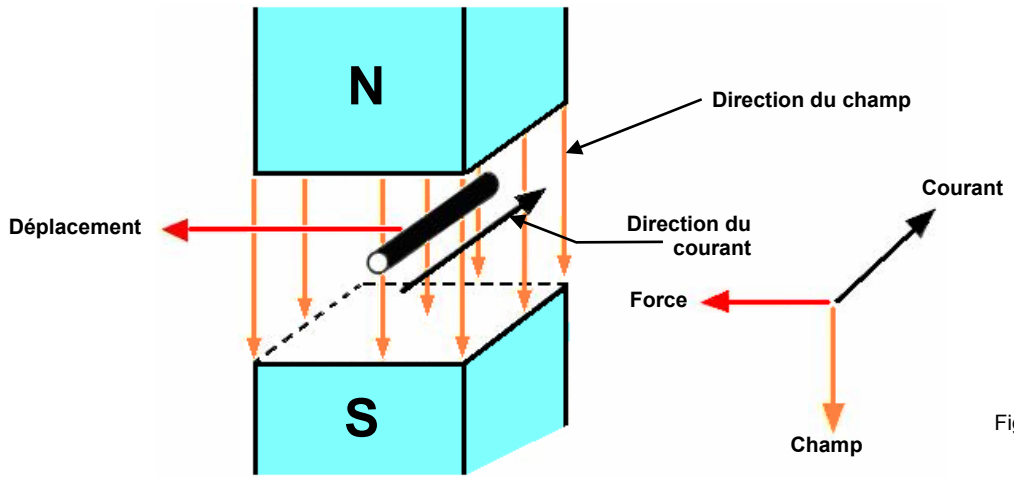

Fig. 8.3-1

La figure 8.3-1 illustre la loi de Laplace qui nous intéresse plus particulièrement, puisque c'est celle qui décrit la conversion électromécanique effectuée par les moteurs électriques. L'expression de la force exprimée en newtons est rappelée ci-dessous :

$$f = B \cdot i \cdot l$$

avec
- i est le courant en ampères,
- B le champ d'induction magnétique en webers/m^2,
- l la longueur en mètres.

La figure 8.3-1 montre également les directions relatives du courant, du champ et de la force. Cette dernière change de sens si on inverse le sens du champ ou du courant. Sa direction reste inchangée si on inverse champ et courant à la fois.

Loi de Faraday

Une force électromotrice est induite dans un circuit électrique par la variation avec le temps du flux du champ magnétique qui le traverse. Ce flux peut varier, soit par déplacement du circuit électrique, soit par modification du champ lui-même.

Ces deux lois indiquent bien comment se fait la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Un courant (énergie électrique) peut produire un déplacement (énergie mécanique) et vice versa.

Rappelons également que la puissance mécanique fournie par ce moteur élémentaire est égale au produit du courant i par la variation du flux d□ vue par l'élément du circuit :

$$P = i \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

d□/dt est aussi l'expression, au signe près, de la force électromotrice qui serait induite dans le circuit selon la loi de Faraday :

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} \qquad \Rightarrow \qquad e = -\varepsilon = \frac{d\varphi}{dt}$$

e est appelé force électromotrice, et on a :

$$P = e \cdot i$$

Ce produit **e. i** représente la puissance électrique convertie et restituée par le moteur, aux pertes près, en puissance mécanique :

$$P_m = e \cdot i - pertes$$

8.3.2. Description sommaire d'un moteur électrique

Un moteur utilisant les principes de la conversion électromécanique peut se présenter sous la forme d'une machine tournante ou d'une machine linéaire.
Les machines tournantes, qui sont de loin les plus répandues, comportent deux armatures cylindriques coaxiales, mobiles l'une par rapport à l'autre.
Considérées d'un point de vue électrique, ces deux armatures, qui comportent des circuits ou enroulements, sont appelées inducteur ou induit :

- inducteur, lorsqu'elles créent le champ d'induction magnétique principal,
- induit, lorsqu'elles sont le siège de forces contre-électromotrices induites par ce champ.

Si l'on se place, à présent, sur un plan mécanique, on peut distinguer :

- le stator qui est fixe;
- le rotor qui est mobile, porté par des paliers.

Le bon fonctionnement électrique exige que les deux parties du moteur possèdent des circuits magnétiques avec lesquels les circuits électriques vont se trouver en interaction. Il est donc fait appel à des matériaux ferromagnétiques analogues à ceux utilisés dans les transformateurs et, pour cette raison, le jeu entre rotor et stator, nécessaire au bon fonctionnement mécanique de la machine, s'appelle entrefer. Chacune de ces deux parties mécaniques peut jouer le rôle d'inducteur ou d'induit selon la machine considérée. Sur les moteurs, le stator joue généralement le rôle d'inducteur et le rotor le rôle d'induit.

Stator et rotor portent, dans des encoches, des conducteurs dirigés parallèlement à l'axe de la machine et reliés entre eux pour constituer le bobinage. Les enroulements peuvent être uniformément répartis sur toute la circonférence (Fig. 8.3-2a) ou bien concentrés comme sur les figures Fig. 8.3-2b (bobinage statorique concentré avec épanouissements polaires) et Fig. 8.3-2c (bobinage rotorique concentré appelé à pôles saillants) selon le type de machine.

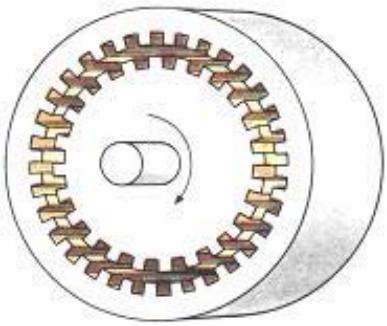

Fig. 8.3-2a

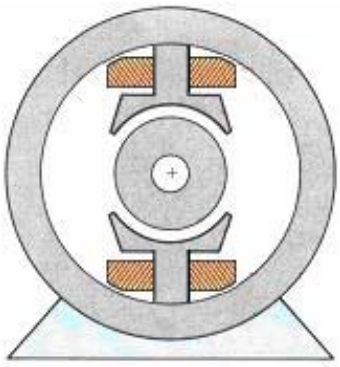

Fig. 8.3-2b

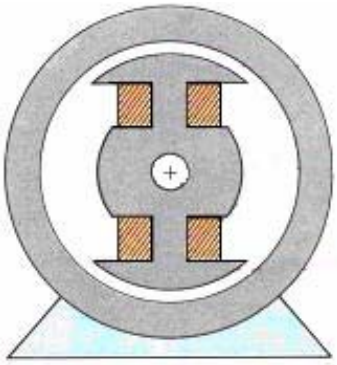

Fig. 8.3-2c

L'alimentation des moteurs peut se faire de différentes façons. Comme on vient de voir qu'un moteur a deux parties, l'alimentation peut être :

- simple : elle intéresse alors le stator,
- double : elle intéresse le stator et le rotor.

L'alimentation du rotor, partie mobile de la machine, peut se faire de deux façons :

- par bagues,
- par collecteur.

Selon le sens de la puissance imposée à l'induit et sur l'arbre, la machine peut fonctionner en moteur ou en générateur.
Dans le fonctionnement en moteur, l'induit est alimenté par une source extérieure, et on récupère une puissance motrice sur l'arbre : si C_m est le couple moteur et Ω la vitesse angulaire du rotor, la puissance motrice recueillie sur l'arbre est $C_m \Omega$. Par exemple, dans le cas d'entraînement des treuils de levage, pour une vitesse de montée de la charge uniforme, le couple à fournir pour déplacer la charge, et la puissance consommée est d'autant plus grande que la vitesse est élevée.

Dans le fonctionnement en générateur, le rotor est entraîné par un dispositif extérieur qui développe un couple mécanique C_m à la vitesse Ω. La puissance mécanique vue du rotor de la machine est encore $C_m \Omega$.

Le rôle des bobinages est d'assurer dans le premier cas l'addition des couples élémentaires, dans le second cas celle des forces électromotrices induites.

Selon la nature du courant principal d'alimentation, on distingue les machines à courant continu (MCC) et les machines à courant alternatif (MCA) qui elles-mêmes, se répartissent en machines monophasées ou polyphasées et en machines synchrones ou asynchrones. Dans cet ouvrage nous nous limiterons à la présentation des machines à courant continu et à celle de machines asynchrones triphasées qui sont le plus fréquemment rencontrés dans les applications de manutention-levage.

8.3.3. Classification des moteurs électriques

On peut classer les moteurs électriques de multiples façons et en particulier suivant les critères suivants.

8.3.3.1. Puissance

La valeur d'un cheval-vapeur (736 W) sépare ainsi les gros moteurs des petits moteurs. Pour ces derniers on parle aussi de moteurs fractionnaires (fraction de cheval), suivant en ceci l'habitude anglo-saxonne. Ces moteurs sont de loin les plus nombreux. Ils sont fabriqués en très grandes quantités par des procédés fortement automatisés.

8.3.3.2. Fonction

Dans ce cas, on donne au moteur des appellations qui indiquent la destination ou les conditions d'utilisation du moteur : c'est ainsi que l'on parle de moteur-couple, de moteur-frein, de servomoteur, etc.

8.3.3.3. Configuration électrique

Les moteurs sont ici classés en fonction de critères électriques. On trouvera la classification la plus usuelle sur la figure ci-dessous. Différents critères sont utilisés : disposition des enroulements (moteurs à courant continu), type de construction du rotor pour les moteurs à induction, ou technique de démarrage.

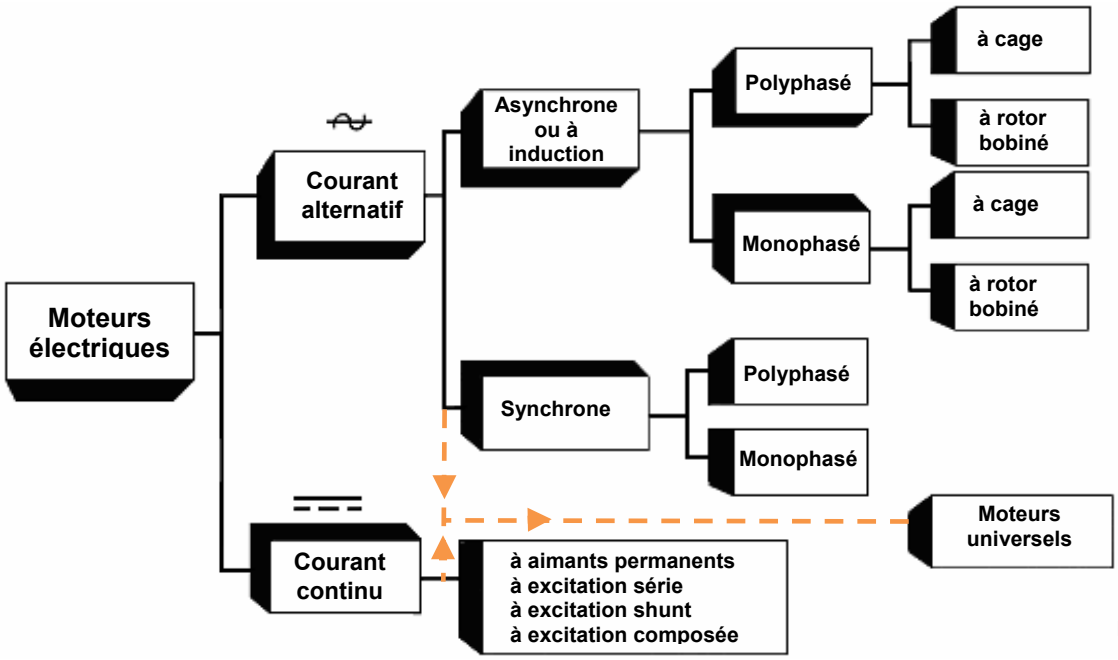

Fig. 8.3-3

8.3.3.4. Protection mécanique et réfrigération

On peut parler ainsi de construction étanche, à ventilation extérieure, semi-ouverte, ouverte, etc., ou de réfrigération par air, par eau, etc.
Les constructeurs proposent généralement en réalisation standard plusieurs niveaux de protection. Citons en particulier l'indice de protection IP 23X pour les moteurs ouverts et IP 55X pour les moteurs fermés.
En annexe A8.1. vous retrouverez la grille de définition des indices de protection.

8.3.3.5. Possibilité de variation de la vitesse

C'est un critère qui intéresse tout particulièrement l'utilisateur, car en fonction de l'application, la vitesse des moteurs peut être choisie constante, variable ou réglable. Un moteur peut avoir aussi plusieurs vitesses.

8.3.3.6. Conditions de montage

On considère ici la façon dont le moteur doit pouvoir être fixé et accouplé à la machine à entraîner : position verticale ou horizontale de fonctionnement, attache par pattes, par brides, le type d'accouplement avec la charge, etc.
Ces différentes façons de classer les moteurs électriques font apparaître la grande variété possible de ces appareils puisqu'il existe de toute évidence un très grand nombre de façons de combiner ces critères entre eux. En pratique, pour des raisons économiques, les moteurs sont normalisés, ce qui évite la multiplication anarchique des types de ces appareils.

8.3.4. Matériaux

On a vu qu'une machine électrique se composait de deux types de circuit :

- le circuit inducteur qui produit le champ magnétique (ce circuit n'existe pas sur les petits moteurs utilisant un aimant permanent),
- le circuit induit qui subit l'action du champ magnétique.

Ces circuits sont constitués soit par des bobines placées sur des pôles, soit par des barres logées dans des encoches. Ils constituent la partie sensible des moteurs. Pour les réaliser, on utilise des conducteurs en cuivre (éventuellement en aluminium). Ces conducteurs dont la section est limitée pour réduire l'effet des courants de Foucault parasites, sont toujours recouverts d'un isolant. Pour des petits conducteurs, comme les fils, l'isolement est produit par une ou plusieurs couches d'émail. Pour les conducteurs de section plus importante, on ajoute à la protection de l'émail une épaisseur de ruban imprégné d'un vernis isolant. La soie et le coton sont utilisés à cet usage pour les applications courantes. Les enroulements terminés sont, après leur mise en place sur la machine, enduits d'un compound destiné à assurer la cohésion des bobinages et à en parfaire l'isolement.
La vie d'un moteur fonctionnant à une température donnée est fonction de son aptitude à résister à l'humidité, à la tension et au vieillissement des isolants.

La principale cause de destruction d'une machine reste l'altération des isolants par la chaleur. L'expérience montre que le temps de vie d'un isolant est une fonction exponentielle de la température.

La norme UTE C-51-100 (Union technique de l'électricité) classe les isolants en fonction de la température maximale qu'ils peuvent supporter pendant plusieurs dizaines de milliers d'heures sans altération de leur pouvoir isolant :

Classe :	Y	A	E	B	F	H	C
□ °C max.:	90	105	120	130	155	180	180

La figure8.3-4 ci-dessous illustre l'effet de la température sur la durée de vie des isolants pour trois classes d'isolement.

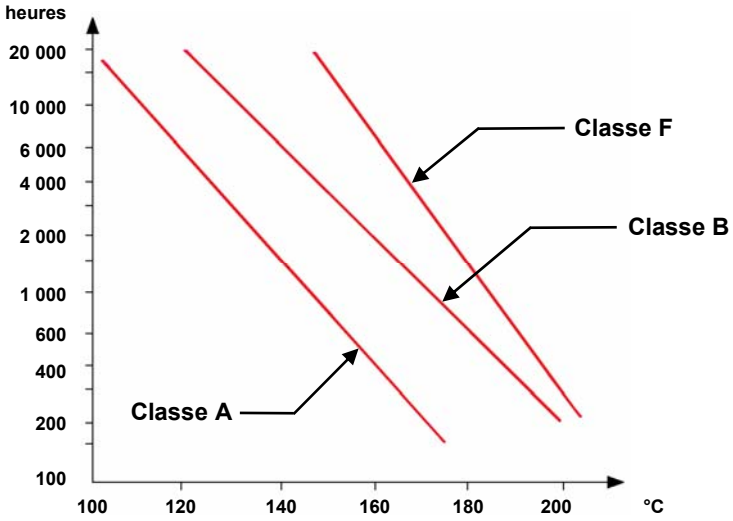

Fig. 8.3-4

On peut noter qu'en moyenne une réduction de la température de 10 °C se traduit par un doublement de la durée de vie.
Si un moteur est choisi conformément aux normes actuelles, sa durée de vie est approximativement de 35 000 h dans des conditions normales de fonctionnement. Pour une machine travaillant souvent à charge partielle ou de façon discontinue la durée de vie pratique est d'environ 20 ans.

8.3.5. Les conditions d'emploi des moteurs

8.3.5.1. Les classes d'isolation

Abstraction faite du remplacement des pièces d'usure telles que roulements, bagues, balais, etc., la durée de vie d'une machine électrique tournante est liée à celle des isolants de ses bobinages. Pour autant que l'échauffement limite ne soit pas dépassé, l'espérance de vie des matériaux isolants est élevée. Elle diminue approximativement de moitié pour une augmentation de température de 10 °C.
La température limite T_L de fonctionnement d'un isolant dépend de sa nature et résulte de la température de l'air ambiant T_A (air de refroidissement), de l'échauffement limite E_L et d'un échauffement supplémentaire estimé nécessaire parce que la mesure par variation de la résistance des enroulements ne détermine pas le point le plus chaud mais seulement une valeur moyenne.

Le diagramme ci-dessous précise les limites fixées pour différentes classes d'isolation. Dans tous les cas, la température ambiante normale de l'air de refroidissement est fixée à 40 °C.

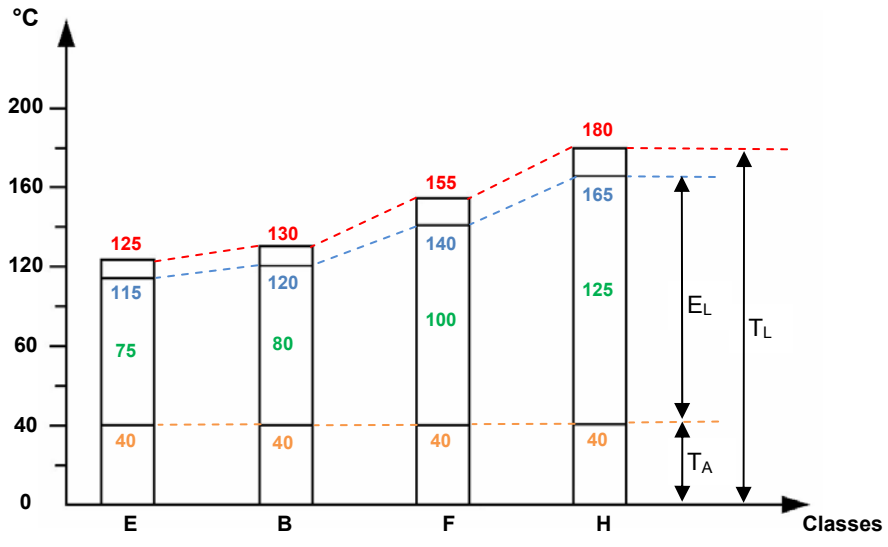

Fig. 8.3-5

La puissance nominale d'un moteur correspond à son échauffement limite pour une température ambiante de 40 °C. Les échauffements limites normalisées des différents organes d'une machine sont indiquées dans le tableau suivant, extrait de la publication CEI 34 – 1.

Classes d'isolation	B	F	H
Enroulement isolé (mesure par résistance)	80 °C	100 °C	125 °C
Collecteurs et bagues	80 °C	90 °C (1)	100 °C (1)
Roulements	60 °C	60 °C (2)	60 °C (2)

(1) Pour les échauffements limites de 90 °C et de 100 °C les balais doivent être choisis en accord avec les constructeurs des machines tournantes.

(2) Ces valeurs limites peuvent être dépassées en fonction de la qualité de la graisse utilisée et des charges appliquées.

Remarque :

Lorsqu'un moteur est utilisé avec une température ambiante différente de la valeur normale (40 °C), son échauffement limite doit être modifié pour respecter la température limite maximale de sa classe d'isolation. Il en résulte alors, que sa puissance d'emploi n'est plus égale à sa puissance nominale.

8.3.5.2. Le déclassement en fonction de l'altitude

A cause de la variation de pression atmosphérique, l'altitude d'installation des machines et des équipements électriques, influe directement sur les caractéristiques de la ventilation et par conséquent sur le niveau d'échauffement des matériels. A partir de 1000 mètres il est nécessaire d'en tenir compte.

Le tableau suivant donne, en fonction des conditions d'emploi, la valeur de puissance admissible en pour cent de la puissance nominale.

Altitude (m)	Température du fluide de refroidissement T_A (en °C)						
	30	35	40	45	50	55	60
1000	107	104	100	96	92	87	82
1500	104	101	97	93	89	84	79
2000	101	98	94	90	86	82	77
2500	97	95	91	87	84	79	75
3000	93	91	87	84	80	76	71
3500	89	86	83	80	76	72	68
4000	83	81	78	75	72	68	64

Ce tableau est valable pour la classe d'isolation B.

8.3.6. Les services normalisés appliqués aux engins de levage

8.3.6.1. Introduction aux services normalisés

L'équipement électrique d'un engin de levage doit être capable de développer le couple maximal nécessaire en régime transitoire.
De plus, il doit supporter sans dégradation ni usure prématurée le service intermittent correspondant à l'utilisation de l'appareil.
Ces considérations réagissent sur le dimensionnement des principaux organes tels que moteurs, contacteurs, variateurs de vitesse, résistances, etc.
L'échauffement constitue une contrainte susceptible de limiter la durée de vie du matériel ; aussi les normes définissent-elles des températures maximales à ne pas dépasser à partir d'une température ambiante qui, sauf indication contraire, est fixée à 40°C.
L'échauffement est provoqué par les pertes qui varient dans le temps en fonction des couples développés. On est ainsi amené à considérer pour chaque organe du dispositif de commande puissance, une valeur maximale de la puissance d'emploi ou du courant d'emploi correspondant à une utilisation parfaitement caractérisée pendant une période donnée.
Au point de vue thermique, cette valeur maximale d'emploi est définie de façon à ne pas provoquer, en cours d'utilisation, un échauffement qui dépasse à un moment quelconque la valeur prévue par les normes.
La détermination tient compte, bien entendu, de la durée de travail effectif et de la loi d'échauffement et de refroidissement relative au matériel considéré.
Les organes subissant une usure doivent, en outre, assurer une durée de vie minimale (par exemple, les pièces de contacts des contacteurs doivent effectuer plusieurs millions de manœuvres avant de nécessiter un échange).
Ce critère définit une deuxième limite d'emploi qui est prise en compte si elle est inférieure à celle établie à partir des considérations d'échauffement. L'utilisation généralisée aujourd'hui de la variation de vitesse pour la commande des moteurs d'entraînement a quasiment supprimé cette limite.
L'utilisation des engins de levage nécessite une succession de manœuvres élémentaires diversifiées et inégalement espacées.
Cependant, en général, on peut l'assimiler à un service intermittent régulier comportant une série pratiquement illimitée de cycles identiques.
Divers services de cette nature ont été normalisés pour les équipements électriques à moteurs asynchrones.

8.3.6.2. Terminologie utilisée

Les termes que nous utiliserons dans la suite de l'ouvrage correspondent aux définitions **34-1** de la **CEI**, relative aux machines tournantes électriques.
Le fonctionnement des moteurs est spécifié selon des services types conventionnels, comportant un ou plusieurs régimes constants, pendant des durées spécifiées, se succédant dans un ordre donné.
On entend par ***régime*** l'ensemble des grandeurs électriques et mécaniques caractérisant le fonctionnement d'une machine à un instant donné.
On dit également, que ***l'état thermique est à l'équilibre*** lorsque les températures observées sur les diverses parties du moteur ne varient pas plus de 2°C par heure.

Les services normalisés sont définis par :

- une classe de démarrage
- un facteur de marche

Chaque cycle comprend :

- une période de démarrage,
- une période de marche à vitesse établie ; et éventuellement :
- une période de freinage électrique et
- un certain nombre d'impulsions.

8.3.6.3. Classe de démarrage

La ***classe de démarrage*** est le nombre de démarrages équivalents d'un moteur pendant une heure, en faisant intervenir les démarrages complets normalisés et l'équivalence thermique entre démarrages normalisés et impulsions normalisées ou freinages électriques normalisés. Par convention, une impulsion équivaut à 0,25 démarrage normalisé, un freinage équivaut à 0,80 démarrage normalisé.
D'où : classe de démarrage = nombre de démarrages + 0,25 x nombre d'impulsions + 0,80 x nombre de freinages.
Il existe 3 classes de démarrages normalisés, qui comportent des nombres définis de démarrages, impulsions et freinages (voir tableau ci-dessous) :

Classe de démarrage normalisé	Démarrages	Impulsions	Freinages à contre-courant
150	150	0	0
	100	200	0
	65	130	65
300	300	0	0
	200	400	0
	130	260	130
600	600	0	0
	400	800	0
	260	520	260

8.3.6.4. Facteur de marche

Le ***facteur de marche*** est le rapport entre la durée de mise sous tension en charge du moteur et la durée totale du cycle. Il est exprimé généralement en pour cent.

Soit la relation :

$$F_m = \frac{\text{Durée de mise sous tension}}{\text{Durée totale du cycle}} \times 100$$

avec
- la durée de mise sous tension comprend le temps de démarrage, le temps de marche à vitesse établie et éventuellement les temps de freinage électriques et impulsions,
- la durée totale du cycle comprend en outre les temps d'arrêt.

8.3.6.5. Définition des principaux services normalisés

Les services retenus en levage correspondent aux cinq premières catégories de la classification :

a) Le service continu **S1**

Ce service consiste en un fonctionnement à régime constant, d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique du moteur soit atteint.
A ce service, correspond la puissance nominale $\mathbf{P_n}$ du moteur. Les valeurs différentes, indiquées par le constructeur pour les autres services, représentent les puissances d'emploi $\mathbf{P_e}$ relatives au service considéré. Ce service ne s'applique pas aux mouvements principaux des engins de levage.

b) Le service temporaire **S2**

Il est caractérisé par un fonctionnement à régime constant (puissance d'emploi), pendant un temps déterminé, moindre que celui qui est requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir à 2°C près l'égalité de température avec celle du milieu ambiant.
Un service S2 est défini par un temps dont les valeurs recommandées sont 10 - 30 - 60 - 90 et 120 minutes.

c) Le service intermittent périodique **S3**

Il se compose d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de repos.
On considère souvent six démarrages au plus dans l'heure. Si ces derniers sont courts par rapport à la constante de temps d'échauffement, l'élévation de température correspondante est négligeable.

d) Le service intermittent périodique à démarrage **S4**

Ce service se compose d'une suite de cycles identiques comprenant chacun :

- un temps appréciable de démarrage,
- un temps de fonctionnement à régime constant et,
- un temps de repos.

Dans ce cas, l'arrêt du moteur est obtenu soit par ralentissement naturel après la coupure du courant d'alimentation, soit par un moyen de freinage tel qu'un frein mécanique ne provoquant pas d'échauffement supplémentaire des enroulements.
Un service S4 est défini par le facteur de marche de chaque cycle et par le nombre de démarrages rapportés à un temps déterminé (de préférence 1 heure).

e) Le service intermittent périodique à démarrage et freinage électrique **S5**

Il se compose d'une suite de cycles identiques comprenant chacun :

- un temps appréciable de démarrage,
- un temps de fonctionnement à régime constant
- un temps de freinage électrique rapide et,
- un temps de repos.

Un service S5 est défini comme un service S4 en précisant en plus le régime de freinage ainsi que sa durée. Les cycles peuvent également comporter des impulsions, c'est à dire des démarrages incomplets.
Les services intermittents S4 et S5, applicables aux cadences élevées sont ceux les plus fréquemment rencontrés en levage. Par hypothèse, la puissance développée en régime établi est égale à la puissance d'emploi.

La figure ci-dessous représente les services normalisés rencontrés habituellement dans les applications de levage.

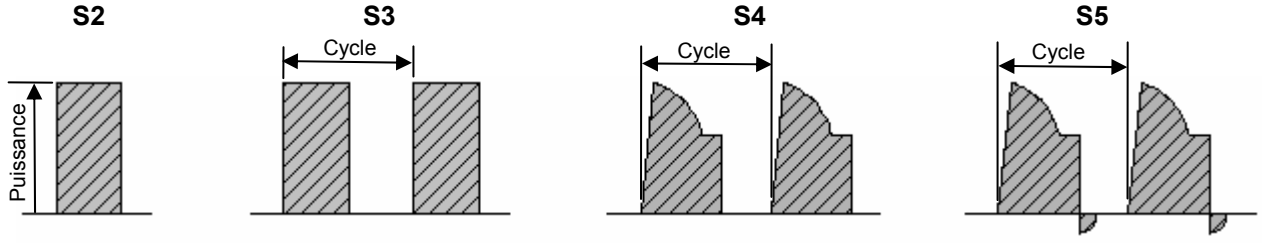

Fig. 8.3-6

Service temporaire	Service intermittent périodique		Service intermittent périodique à démarrage		Service intermittent périodique à démarrage et freinage électrique	
Durée du service	6 démarrages / heure		Classe de démarrage	**150**	**300**	**600**
10 minutes 30 minutes 60 minutes 90 minutes 120 minutes	Facteur de marche en %	25 40 60 100	Facteur de marche en %	25 40 60 100	25 40 60 100	25 40 60 100

Les moteurs conformes à la norme NFC 51-157 ont une puissance nominale en service S4 – classe 150, facteur de marche 60 % égale à leur puissance en service continu S1.

Le service temporaire S2 – 60 minutes peut être utilisé pour les essais de contrôle et de réception en vue de simplifier la vérification de l'échauffement des moteurs.

Remarque :

Pour les moteurs à courant continu, aucun service intermittent n'est normalisé. Toutefois les services S3 - S4 et S5 sont parfois utilisés par analogie.

8.3.6.6. Démarrage complet normalisé

Un démarrage représente pour le moteur un régime variable comportant souvent une série de pointes de couples et de courant.
Compte tenu des temps courts, il est d'usage de considérer un régime constant équivalent correspondant au couple moyen de démarrage C_{am}.
Le démarrage est entièrement déterminé lorsque la durée est connue.

Les constructeurs de moteurs ont fixé, par convention, des valeurs normales qui permettent de définir le démarrage complet normalisé.

Les diagrammes ci-après illustrent les conventions de couples retenues :

- P_r représente la puissance fournie pendant le fonctionnement à régime constant.
- C_r représente le couple correspondant.
- P_n représente la puissance nominale en service continu (S1) qui provoquerait le même échauffement.
- C_n représente le couple correspondant.

Il est important de remarquer que :

- pour les services légers, $P_r \geq P_n$.,
- pour les services sévères, $P_r < P_n$.

Cette distinction conduit à considérer deux valeurs différentes pour C_{am} et les couples de pointes.
Dans tous les cas, le couple maximum des moteurs est considéré comme au moins égal à 2,8 C_n.

Si **$P_r > P_n$**

- Couple moyen de démarrage : $C_{am} = 1{,}9\ C_n$
- Couple de pointe : 2,5 C_n
- Pour la classe 150 ⇒

  Facteur de marche (FdM) = 15, 25, 40 ou 60 %

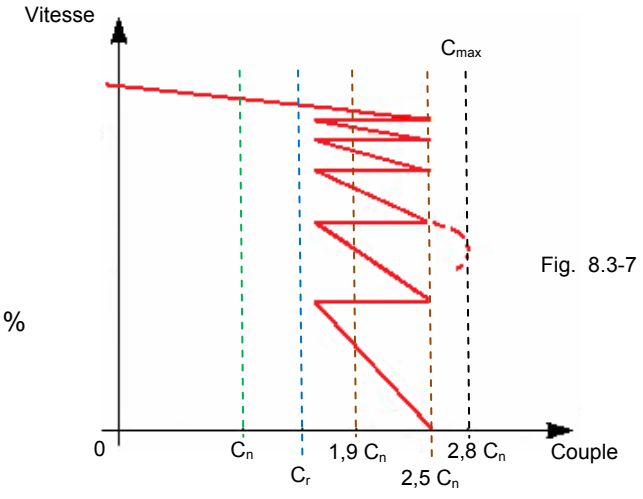

Fig. 8.3-7

Si $P_r < P_n$

- Couple moyen de démarrage : $C_{am} = 1,9\ C_r$
- Couple de pointe : $2,5\ C_r$
- Pour la classe 150 $\Rightarrow$ FdM = 100 %

  classe 300
  classe 600
  } tous les FdM

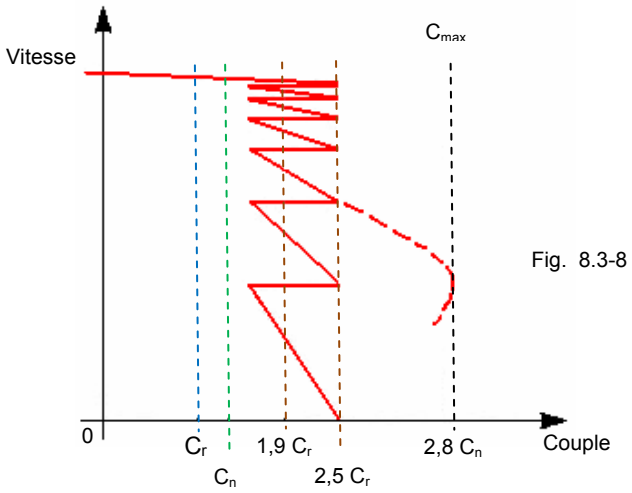

Fig. 8.3-8

Par ailleurs, les constructeurs ont retenu des facteurs d'inertie qui apparaissent dans leur catalogue sous forme de valeur maximale de l'inertie ($M.r^2$) entraînée. Cette considération fixe la durée du démarrage complet normalisé.

8.3.7. Caractéristiques déterminantes pour le choix

Choisir un moteur pour une application donnée, c'est trouver le moteur qui satisfait sans exagération à toutes les exigences cinématiques (vitesse et accélération) du récepteur, sans que pour autant ce moteur dépasse ses limites admissibles de couple et de température.

8.3.7.1. Couple

Deux valeurs sont à considérer : le couple de démarrage et le couple à la marche nominale. Durant la phase de démarrage, le couple « moteur » doit toujours rester supérieur au couple résistant du récepteur, sinon le démarrage ne peut pas s'effectuer. L'accélération de l'ensemble moteur-récepteur est d'autant plus grande que la différence entre couple de démarrage et couple résistant est importante.
On conçoit que la variation du couple en regard de la vitesse revête une grande importance. La relation entre ces deux grandeurs apparaît immédiatement sur un diagramme (N, C) comme ceux représentés sur la figure ci-dessous.

Caractéristique type "dérivation"

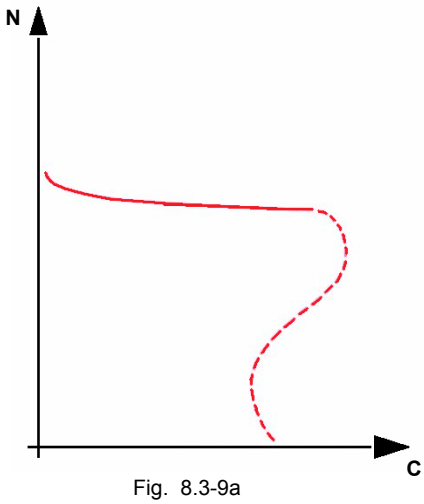

Fig. 8.3-9a

Caractéristique type "série"

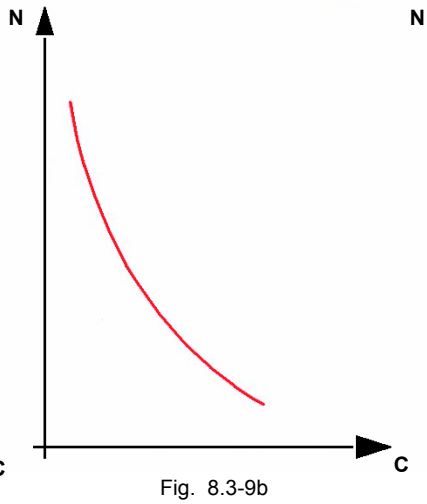

Fig. 8.3-9b

Caractéristique type "compound

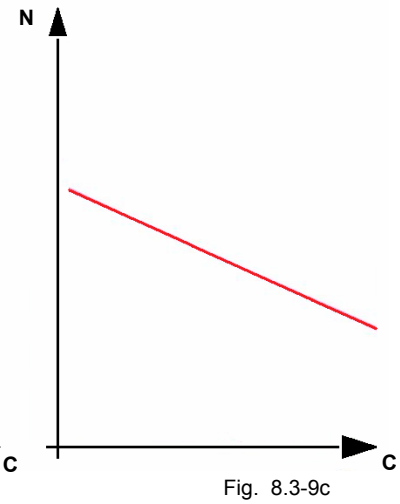

Fig. 8.3-9c

Les électriciens ont l'habitude d'utiliser comme références pour décrire une courbe caractéristique (N, C) celles des moteurs à courant continu. C'est ainsi que l'on parle des courbes suivantes.

- Type « dérivation » (ou shunt). La variation de vitesse en fonction de la charge est faible. Ce type de caractéristique convient bien si l'on souhaite une vitesse constante alors que la charge varie.

- Type « série ». Le couple est très élevé à vitesse nulle; il décroît quand la vitesse augmente. Le moteur peut s'emballer à charge nulle. Ce type de caractéristique convient bien aux applications du type « traction » qui ont besoin d'un fort couple au démarrage, charge croissante avec la vitesse.

- Type « composé » (ou compound). Cette caractéristique diffère du type shunt par une plus grande variation de la vitesse avec le couple.

De la même façon, on peut caractériser les courbes (N, C) des machines réceptrices (voir figures suivantes).

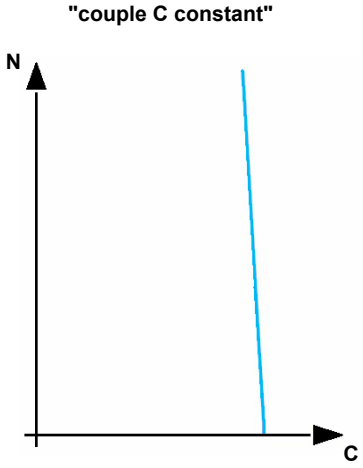

Fig. 8.3-10a

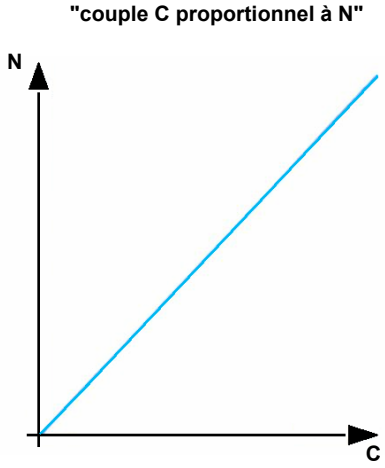

Fig. 8.3-10b

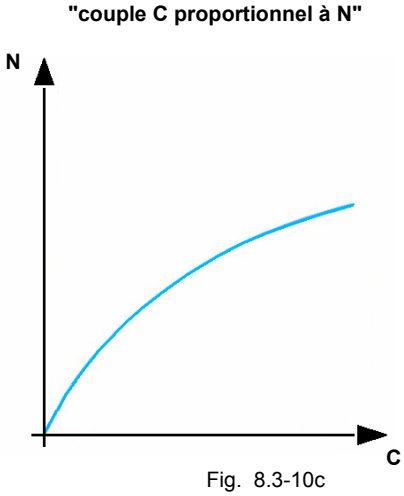

Fig. 8.3-10c

Les relations les plus habituelles sont les suivantes.

- Couple constant. Dans ce cas, la puissance est proportionnelle à la vitesse. Il existe de nombreuses machines fonctionnant à couple sensiblement constant. Les mécanismes d'entraînement des mouvements verticaux des engins de levage appareils élévateurs (palans, treuils, monte-charge, ascenseurs, etc.) en sont de bons exemples.). La puissance varie proportionnellement avec la vitesse de la charge déplacée.

- Couple proportionnel à la vitesse. Ce cas, le moins fréquent, se rencontre par exemple sur les machines à cylindres chauffants destinées à lustrer ou à sécher les étoffes et les papiers (calandres). La puissance croît alors comme le carré de la vitesse.

- Couple proportionnel au carré de la vitesse. Cette relation se rencontre sur la plupart des turbomachines pompes centrifuges par exemple. La puissance est alors proportionnelle au cube de la vitesse.

Il faut noter qu'il s'agit ici de courbes types représentant des caractéristiques de machines, aussi bien motrices que réceptrices, fonctionnant sans autre régulation que celle introduite par les phénomènes naturels qui régissent leur fonctionnement. Il est possible, bien évidemment, de fabriquer toutes autres sortes de caractéristiques par des régulations appropriées.

8.3.7.2. Fixation du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement d'un mécanisme est déterminé par l'intersection de la caractéristique mécanique $C_m = f(N)$ du moteur avec la caractéristique mécanique $C_r = f(N)$ de la charge entraînée.

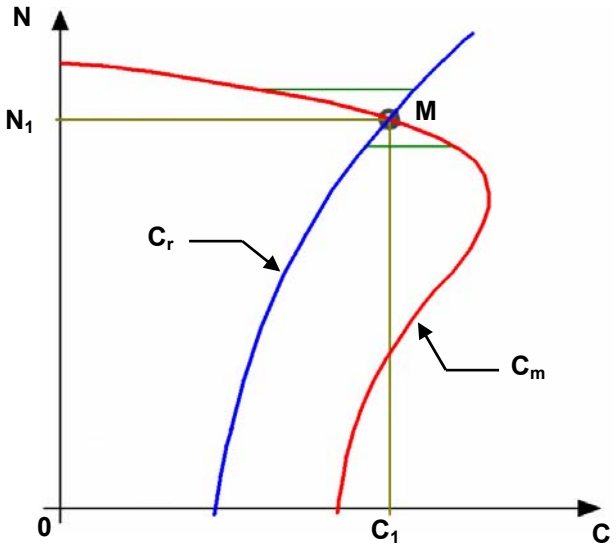

Fig. 8.3-11

A vitesse nulle, le couple moteur C_m doit être plus grand que C_r pour démarrer la chaîne cinématique.
La montée en vitesse dépend de l'inertie totale de la chaîne cinématique et du couple accélérateur $C_m - C_r$.
La vitesse se stabilise quand $C_m - C_r$ devient nul, c'est à dire au point d'intersection des deux caractéristiques.
Un point de fonctionnement est dit stable lorsque tout écart accidentel de vitesse dû à une perturbation tend à se résorber dès que celle-ci disparaît.
Le point M de la figure ci-contre est stable.

Si la vitesse N augmente, C_m est inférieur à C_r. ⇒ le groupe ralentit

Si la vitesse N diminue, C_m est supérieur à C_r. ⇒ le groupe accélère

La condition de stabilité d'un point de fonctionnement est qu'autour de celui-ci on ait :

$$\frac{\delta(C_m - C_r)}{\delta N} < 0$$

8.3.7.3. Accélération

L'accélération conditionne directement le temps de démarrage du moteur. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{(C_m - C_r)}{J_T} < 0$$

avec
- $\mathbf{C_a}$ = $C_m - C_r$. le couple accélérateur
- $\mathbf{J_T}$ l'inertie totale équivalente de l'inertie ramenée à l'arbre moteur

Le temps d'accélération est d'autant plus grand que le couple d'accélération (couple moteur moins couple récepteur) est petit et que l'inertie totale équivalente vue du rotor du moteur est grande.
L'obtention d'un faible temps de démarrage est primordiale dans de nombreuses applications de manutention

8.3.7.4. Puissance

La puissance, le couple et la vitesse sont liés par la relation :

$$P = C \cdot \Omega$$

avec
- P est la puissance exprimée en watts,
- C le couple en Newton . mètre,
- W la vitesse de rotation en radians par seconde

Dans le domaine de la manutention, la marche du moteur n'est pas régulière et continue. Ceci est particulièrement vrai pour les mouvements principaux où le cycle de travail impose fréquemment aux moteurs des démarrages et des freinages répétitifs. L'énergie nécessaire pour démarrer (ou pour freiner en cas de charge entraînante) étant en général très supérieure à celle de la marche normale en régime établi pour une même période de temps, les fréquentes opérations de démarrage et de ralentissement vont donc entraîner des élévations températures importantes. Ces conditions particulières de marche deviennent souvent le critère principal de dimensionnement du moteur (hauteur d'axe).
C'est pourquoi, pour les services intermittents S4 et S5, il est nécessaire de déterminer au préalable le couple moteur moyen équivalent pour déterminer la puissance moyenne demandée par le mécanisme.
Le couple moyen équivalent est donné par la relation :

$$C_{moy} = \sqrt{\frac{C_{m1}^2 \cdot t_1 + C_{m2}^2 \cdot t_2 + C_{m3}^2 \cdot t_3 + \cdots + C_{mi}^2 \cdot t_i}{t_1 + t_2 + t_3 + \cdots + t_i}}$$

Remarque :

Il faut veiller à ce que tout au long de la succession des cycles de fonctionnement, le couple maximum à fournir reste toujours inférieur au couple maximum délivrable par le moteur. Ceci est particulièrement critique au cours des fonctionnements à grande vitesse avec désexcitation, car alors, le flux inducteur réduit entraîne également une réduction du couple moteur (fonctionnement à puissance constante).

8.3.7.5. Les quadrants de fonctionnement

Une indication très importante à donner pour caractériser un entraînement électrique à vitesse variable est celle du nombre de quadrants du plan couple-vitesse dans lesquels le moteur doit fonctionner.
Les axes de couple et de vitesse délimitent quatre quadrants de fonctionnement comme nous le montre la figure 8.3-12 ci-dessous :

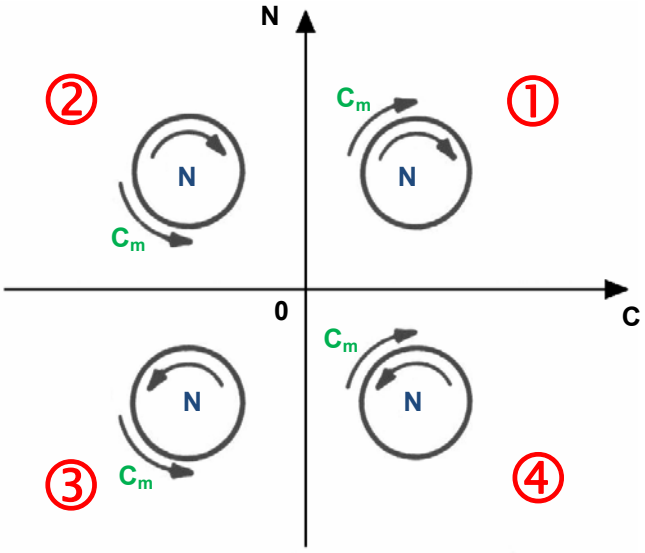

Fig. 8.3-12

- Dans le **quadrant 1**, le couple moteur C_m et sa vitesse sont positifs : la machine fonctionne en moteur tournant dans le sens direct.

- Dans le **quadrant 2**, N est positif mais C_m est négatif : la puissance qui est proportionnelle au produit N . C_m s'est inversée. La machine fonctionne maintenant en génératrice recevant de la puissance mécanique provenant de la charge et la transformant en puissance électrique qui est :

  - soit renvoyée au réseau d'alimentation. C'est le freinage par récupération d'énergie, avec rotation dans le sens direct.
  - soit dissipée par effet Joule par des dispositifs à résistances. C'est le freinage rhéostatique.

- Dans le **quadrant 3**, N et C_m sont tous deux négatifs. La machine fonctionne alors en moteur tournant dans le sens inverse.

- Dans le **quadrant 4**, N est négatif et C_m positif : la machine tournant dans le sens inverse fonctionne en génératrice donc assurant un freinage par récupération d'énergie ou rhéostatique.

Pour tout ensemble convertisseur-moteur, on indique si le fonctionnement est à 1 quadrant (quadrant 1), ou à 2 quadrants (quadrants 1 et 2, parfois 1 et 4) ou à 4 quadrants ce qui est le cas le plus fréquent pour les mouvements principaux des engins de levage.

8.4. Les machines à courant continu

8.4.1. Construction et principe de fonctionnement

8.4.1.1. Description succincte de la machine

Une machine à courant continu est composée des principaux éléments suivants :

- un stator ou inducteur qui porte le bobinage qui crée le flux dans le circuit magnétique formé par le fer du stator et le fer du rotor séparés par l'entrefer.

- un rotor ou induit qui porte à sa surface le bobinage. C'est dans cet enroulement que sont induites les forces électromotrices de la machine.

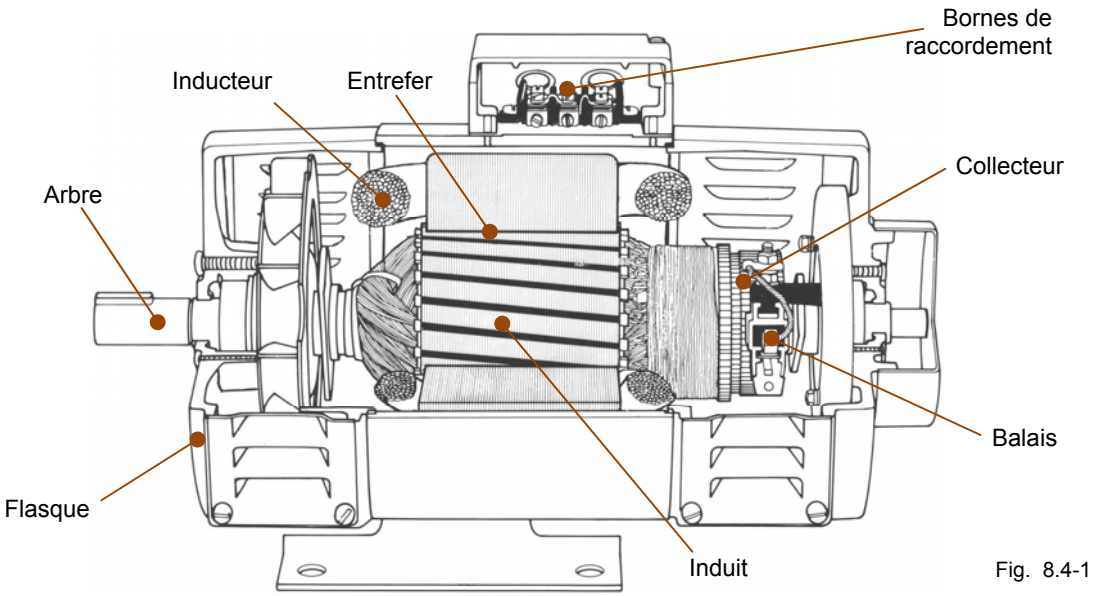

Fig. 8.4-1