

Entraînements électriques, automatisation et processus électriques



Entraînements électriques, automatisation et processus électriques

Dans le secteur industriel, 60% de la consommation d'énergie électrique est le fait des entraînements électriques. Ceux-ci sont en général fortement surdimensionnés. Les conséquences en sont une consommation électrique trop importante et des coûts d'exploitation plus élevés. Une bonne adéquation de l'entraînement à l'organe entraîné et une commande adaptée sont les conditions d'un choix judicieux. Des économies jusqu'à 75% sont ainsi réalisables, tout en réduisant les coûts d'investissement et d'exploitation.

Cette publication est divisée en cinq parties permettant à l'ingénieur de projet ou d'exploitation d'aborder divers sujets concernant les entraînements électriques.

La première partie s'attache à définir l'entraînement électrique, en particulier les divers composants qui le forment. Les problèmes d'adaptation de l'organe entraîné sont abordés et les différents types de moteurs existants sont présentés.

La seconde partie est centrée sur la méthodologie de conception et sur la définition spécifique du cahier des charges.

L'alimentation et la commande font l'objet de la troisième partie.

Enfin, les quatrième et cinquième parties abordent la composante énergétique de l'entraînement, qui devient un des paramètres essentiels du choix et de la réduction des coûts. Par le biais d'exemples et de situations caractéristiques, une approche pragmatique restera au centre des préoccupations.

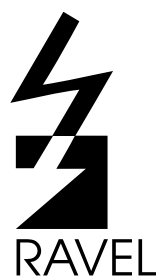
ISBN 3-905251-10-8

Edition originale: ISBN 3-905233-07-X

1996

N° de commande 724.331.1 f

Entraînements électriques, automatisation et processus électriques



Programme d'impulsions RAVEL
Office fédéral des questions conjoncturelles

Associations de soutien

ASE	Association suisse des électriciens
EPE	European Power Electronics
SIA	Société suisse des ingénieurs et architectes
UTS	Union technique suisse

Auteurs

1^{re} partie

Entraînements électriques: définition et bilans énergétiques

Prof. Marcel Jufer, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

2^e partie

Entraînements électriques: méthodologie de conception

Prof. Marcel Jufer, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

3^e partie

Electronique de puissance et convertisseurs statiques

Prof. Alfred Rufer et Prof. Hansruedi Bühler, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

4^e partie

Economie d'énergie, adéquation des composants et méthodologie de choix
Michel Bongard, 6991 Neggio

(adaptation et traduction du chapitre 4 de l'édition originale « Elektrische Antriebe, energie-optimal auslegen und betreiben », N° 724.331 d)

5^e partie

Utilisation rationnelle de l'énergie électrique finale dans les processus de production et dans l'exploitation industrielle

Michel Bongard, 6991 Neggio

Coordination du projet

Dr Yves Perriard, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

Mise en page et photocomposition

DAC, 1006 Lausanne
City Comp SA, 1110 Morges

ISBN 3-905251-10-8

Edition originale: ISBN 3-905233-07-X

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, octobre 1996.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source. Diffusion: Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N° de commande 724.331.1 f).

Form. 724.331.1 f 10.96 500 XXXXXXXX

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants:

PI BAT – Entretien et rénovation des constructions

RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité

PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Leur objectif est de favoriser une croissance économique qualitative. Celle-ci est caractérisée par une moindre utilisation de matières premières et d'énergies non renouvelables, ainsi que par des charges pour l'environnement réduites. En revanche, elle fait appel à un plus grand capital de savoir-faire.

Le programme RAVEL cherche principalement à améliorer la compétence des professionnels pour l'utilisation rationnelle de l'énergie électrique. Outre les aspects de la sécurité et de la production qui étaient jusqu'ici prioritaires, il est aujourd'hui indispensable de s'intéresser davantage aux rendements. RAVEL a établi un tableau des consommations qui définit dans leurs grandes lignes les thèmes à traiter. Les procédés utilisés dans l'industrie, le commerce et le secteur tertiaire doivent être considérés parallèlement aux utilisations de l'électricité dans les bâtiments. Dans ce contexte, les groupes-cibles sont les spécialistes de tous les niveaux de formation et les décideurs responsables des processus et des investissements liés à l'électricité.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Les objectifs de RAVEL sont poursuivis par des projets de recherche visant à élargir les connaissances de base, par des cycles de formation et de perfectionnement, ainsi que par le biais de l'information. La transmission des nouvelles connaissances est axée sur une utilisation dans la pratique quotidienne. Elle repose principalement sur des publications, des cours et des manifestations. Des journées d'information annuelles RAVEL consacrées chaque fois à un thème particulier permettent de présenter et de discuter les nouveaux résultats, développements et tendances de cette discipline encore jeune mais déjà fascinante qu'est l'utilisation rationnelle de l'électricité. Les personnes intéressées trouveront

dans le bulletin « Construction et Energie » de plus amples informations sur le vaste éventail des possibilités de perfectionnement destinées aux différents groupes-cibles. Ce bulletin paraît trois à quatre fois par an et peut être obtenu gratuitement auprès de la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne. En outre, chaque participant à un cours ou autre manifestation du programme reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues directement auprès de la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des différents domaines concernés. Ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles, et aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission comprenant également des représentants des associations, des écoles et des secteurs professionnels concernés. Cette commission définit le contenu du programme et assure la coordination avec les autres activités visant à l'utilisation rationnelle de l'électricité. Ce sont les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des manifestations d'information. La préparation de ces activités est assurée par une direction de projet composée de MM. Werner Böhi, Dr Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans Rudolf Gabathuler, Ruedi Messmer, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr Daniel Spreng, Felix Walter, Dr Charles Weinmann, Georg Züblin et Eric Mosimann. La réalisation concrète de ces activités est confiée à des groupes de travail responsables de tâches spécifiques (projets de recherche ou de mise en pratique) bien définies sur le plan du contenu, du calendrier et des coûts.

Documentation

En se fondant sur des exemples pratiques, cette documentation montre comment choisir ou calculer différents paramètres de l'entraînement électrique. Les paramètres quasi-statiques, dynamiques, thermiques et énergétiques font partie intégrante de la conception décrite dans cette publication. Elle entend aider les ingénieurs de projet et d'exploitation qui ont

la responsabilité ou collaborent à la planification, à la recherche, au développement, à la conduite et à la maintenance d'installations industrielles de service et de production qui font appel aux entraînements électriques.

Le contenu, subdivisé en cinq parties, est le suivant:

- l'organe entraîné: définition;
- la transmission et son adaptation;
- le moteur, lois fondamentales, principaux types et périphériques;
- les convertisseurs, structures et bases;
- la commande et le réglage;
- étude des processus de fabrication;
- importance de l'énergie grise, des procédés et de leur gestion.

Après avoir été soumise à une large consultation, la présente publication a été soigneusement revue et corrigée. Toutefois, les auteurs ont eu toute liberté d'analyser et d'évaluer différents aspects particuliers selon leur propres critères. Ils assument donc également la responsabilité des textes. Des lacunes qui se présenteraient lors de l'application pratique de ce document pourront être comblées dans le cadre d'une éventuelle réédition. Les suggestions sont à adresser à l'Office fédéral des questions conjoncturelles (cf. page 2). Nous remercions vivement tous les collaborateurs qui ont offert leur précieux concours à l'élaboration de cette publication.

Office fédéral des questions conjoncturelles
Service de la technologie
Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

Table des matières

1^{re} partie

Entraînements électriques : définition et bilans énergétiques	7
Table des matières	9
1. Résumé	11
2. Importance des entraînements électriques dans l'industrie des machines	12
3. Adaptation de l'entraînement électrique	13
4. Aspects énergétiques et économiques	19
5. Exemple : déplacement d'un chariot de poinçonneuse	22
6. Entraînement électrique intégré	24
7. Références bibliographiques	28
8. Annexes	29

2^e partie

Entraînements électriques : méthodologie de conception	33
Table des matières	35
1. Introduction	37
2. L'organe entraîné	38
3. La transmission	43
4. Conception globale d'un entraînement électrique	51
5. Prédimensionnement du moteur	57
6. Echauffement et limites thermiques	61

3^e partie

Electronique de puissance et convertisseurs statiques	65
Table des matières	67
1. Introduction	69
2. Convertisseurs de courant	79
3. Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue	82
4. Méthodes de réglage des entraînements à vitesse variable utilisant des machines à champ tournant	89
5. Références bibliographiques	96

4^e partie

Economie d'énergie, adéquation des composants et méthodologie de choix	97
Table des matières	99
1. Introduction	101
2. Développement, importance générale et potentiel d'économie d'énergie des entraînements électriques	102
3. Méthodologie pour une conception énergétiquement économique des entraînements électriques	103
4. Analyse et identification du processus et des composants des entraînements	126
5. Economie d'énergie dans les systèmes d'entraînement	136
6. Amélioration de l'exploitation des entraînements sur- et sous-chargés	148
7. Entraînements economico-énergétiques importants et solutions	159
8. Références bibliographiques	169

5^e partie

Utilisation rationnelle de l'énergie électrique finale dans les processus de production et dans l'exploitation industrielle	171
Table des matières	173
1. Introduction	175
2. Comptabilité énergétique	178
3. Une nouvelle approche	180
4. Valorisation énergétique de la récupération et du recyclage des matériaux	186
5. Exemple pratique de calcul des grandeurs caractéristiques appliqué à la fabrication des moteurs asynchrones normalisés	189
6. Détermination du contenu énergétique cumulé pour trois grandeurs de moteurs asynchrones normalisés	191
7. Les préceptes d'optimisation	194
8. Statistiques relatives aux entraînements électriques	195
9. Les pertes et le marché des moteurs électriques	200
10. Gestion de l'énergie (adaptation et compromis)	201
11. Exemples d'applications	203
12. Comparaison du point de vue énergétique des systèmes d'entraînements pneumatique, hydraulique et électromécanique	218
13. Références bibliographiques	220

Publications du programme d'impulsions RAVEL	221
-----------------------------------------------------	------------

1^{re} partie

**Entraînements électriques :
définition et bilans énergétiques**

**Prof. Marcel Jufer
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

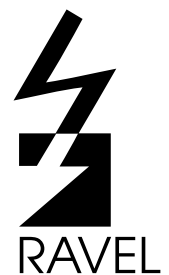


Table des matières

1.	Résumé	11
2.	Importance des entraînements électriques dans l'industrie des machines	12
3.	Adaptation de l'entraînement électrique	13
3.1	Transmission	13
3.2	Moteurs	13
3.2.1	Le moteur asynchrone	14
3.2.2	Le moteur à courant continu	14
3.2.3	Les moteurs synchrones	15
3.3	Alimentation	17
4.	Aspects énergétiques et économiques	19
4.1	Moteur – alimentation	19
4.1.1	Moteur asynchrone	19
4.1.2	Moteur à courant continu	19
4.1.3	Moteur synchrone	20
4.1.4	Comparaison	20
4.1.5	Freinage	20
4.2	Contrôle	20
4.3	Adaptation de la transmission	21
5.	Exemple : déplacement d'un chariot de poinçonneuse	22
5.1	Cahier des charges	22
5.2	Analyse de la solution choisie	22
5.3	Solution proposée	23
6.	Entraînement électrique intégré	24
6.1	Intégration du moteur à l'organe entraîné	24
6.2	Intégration des composants périphériques	24
6.3	Intégration de l'entraînement	25
6.4	Conclusions	27
7.	Références bibliographiques	28
8.	Annexes	29
8.1	Evolution des performances d'un moteur avec ses dimensions	29
8.2	Equations et caractéristiques des moteurs	29
8.2.1	Moteur asynchrone	29
8.2.2	Moteur à courant continu	29
8.2.3	Moteur synchrone	30
8.3	Bilan énergétique au démarrage	31
8.3.1	Moteur asynchrone	31
8.3.2	Moteur à courant continu	31
8.4	Transfert de position – Bilan énergétique	32

1. Résumé

Le présent chapitre se rapporte à des entraînements électriques d'une puissance de 100 W à 20 kW environ, tels qu'ils sont utilisés dans l'industrie des machines. Les principaux domaines d'application sont les machines-outils, la commande d'axes, la robotique, les entraînements spéciaux (hautes vitesses, dispositions spéciales), etc.

L'entraînement est décomposé en ses principaux sous-ensembles : moteur, transmission, alimentation, contrôle et capteur. Ils sont principalement examinés sous l'angle du bilan énergétique.

Les principaux moteurs analysés sont :

- le moteur asynchrone ;
- le moteur à courant continu ;
- les moteurs synchrones à commutation électronique.

Le bilan énergétique est examiné au régime nominal et au démarrage. L'incidence de l'alimentation sur cet aspect est mise en évidence. Le rôle particulièrement important du choix du rapport de transmission est souligné.

En conclusion, l'entraînement électrique intégré ou « Smart Motor » est décrit en relation avec les perspectives d'avenir.

2. Importance des entraînements électriques dans l'industrie des machines

L'industrie des machines englobe de nombreux dispositifs, appareils ou systèmes actionnés par des entraînements électriques. On peut citer:

- les machines-outils;
- les automates et les robots;
- les machines de conditionnement: impression, découpage, emballage;
- les machines de production de tout type: papier, aliments, chimie, etc.

L'évolution de toutes ces machines a été principalement conditionnée par l'introduction de commandes numériques. Il en résulte de nouvelles contraintes pour les entraînements électriques:

- une plus grande souplesse d'exploitation, impliquant une dynamique plus élevée et un contrôle dans un large domaine de vitesse;
- des exigences croissantes en matière de positionnement;
- une meilleure intégration de l'entraînement à l'organe entraîné;
- une plus grande fiabilité, impliquant un accroissement de la durée de vie des moteurs;

- une tendance à l'intégration de tous les composants de l'entraînement électrique, qui sera analysée en conclusion.

En matière d'économie énergétique, les principaux aspects à examiner sont les suivants:

- adaptation de l'entraînement à sa fonction, en particulier en ce qui concerne la transmission et le moteur;
- choix du dispositif d'alimentation permettant de réduire les pertes au démarrage et au freinage pour les entraînements à fonctionnement intermittent;
- adaptation optimale du processus.

Les aspects ci-dessus seront examinés dans les sections suivantes.

Par entraînement électrique, il faut entendre le moteur et l'ensemble de ses composants périphériques, tels que décrits à la figure 1, soit le moteur, la transmission, l'alimentation ou le convertisseur, le capteur d'asservissement et le système de contrôle et de réglage.

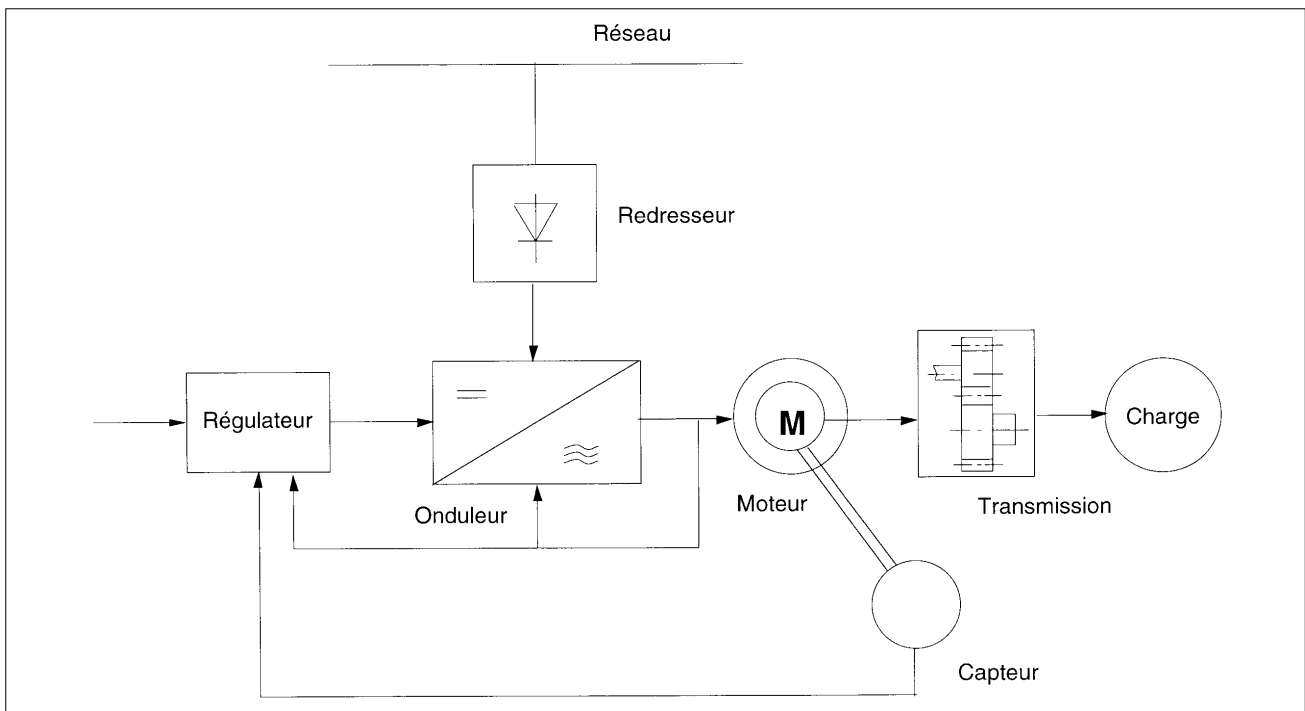


Figure 1: Composants d'un entraînement électrique.

3. Adaptation de l'entraînement électrique

L'adaptation de l'entraînement à sa charge est particulièrement importante pour des dispositifs avec de nombreuses variantes, périodiques ou non. Avant de choisir un moteur, certains périphériques doivent être choisis et dimensionnés judicieusement. Afin de bien préciser la terminologie, on se référera à la figure 1. Les principaux composants sur lesquels un choix judicieux permet un meilleur bilan énergétique sont :

- la transmission ;
- le moteur ;
- le type d'alimentation
- le système de contrôle.

3.1 Transmission

Deux principaux types de transmission sont envisageables :

- la transmission tournante-tournante, telle qu'engrenage, poulies-courroie ou poulies-câble ;
- la transmission tournante-linéaire, telle que vis, vis à billes, vis à rouleaux, poulie-câble, poulie-courroie, came, etc.

Le rôle de la transmission est lié à un objectif précis ou à la combinaison de plusieurs d'entre eux. On peut citer :

- l'adaptation de la vitesse. Celle-ci permet d'utiliser un moteur rapide (1500 à 6000 t/min) pour un entraînement lent, réduisant ainsi le poids et le coût du moteur. En se référant à l'annexe 8.1, on voit en effet que pour un moteur à aimants permanents, sa masse relative varie selon la loi suivante :

$$m^* = 1/\Omega^{*6/7} \quad \Omega^* = \text{vitesse angulaire relative}$$

- la conversion du mouvement en introduisant un changement de sens, un changement de direction ou une transformation d'un mouvement tournant en mouvement linéaire ;
- la démultiplication de la résolution de position, qui est nécessaire en particulier pour des moteurs à résolution intrinsèque, comme les moteurs pas à pas ou à courant continu sans collecteur. Ce type de transmission nécessite généralement un dispositif de rattrapage de jeu ;

- l'adaptation dynamique ou de l'accélération. Celle-ci présente un intérêt particulier pour des systèmes à fonctionnement intermittent, généralement associés à un transfert de position. Le paragraphe 3.4.2, « Equations dynamiques », de la 2^e partie de cette publication, présente les équations dynamiques d'un moteur avec une transmission. Les critères de choix du rapport de transmission dépendent de l'objectif visé, selon la vitesse maximum atteinte. En particulier, un fonctionnement limité au domaine linéaire de la caractéristique d'accélération présente un choix optimum du rapport de transmission tel que (sans frottement) :

$$r_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{J_e}{J_m}} \quad \left(k_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{m_e}{J_m}} \right)$$

Ceci permet le choix du rapport optimum pour un moteur donné. Lorsque le choix du moteur est ouvert, un processus d'itération prenant en compte le couple, l'inertie et le bilan énergétique associé au choix du moteur est nécessaire. Il est important de souligner que dans de telles conditions, le surdimensionnement du moteur peut entraîner un accroissement de l'énergie consommée et une réduction des performances.

3.2 Moteurs

Les trois principaux types de moteurs électriques sont utilisés dans l'industrie des machines :

- le moteur asynchrone, principalement pour les fonctions d'arrachement de matière pour les machines-outils ;
- le moteur à courant continu pour les commandes d'axes, le positionnement et les fonctions de mesures. Pour des raisons de fiabilité, d'entretien et de durée de vie, le moteur à courant continu sans collecteur est peu à peu remplacé par le moteur synchrone ;
- le moteur synchrone autocommuté ou à courant continu sans collecteur pour les fonctions de commande d'axes et le moteur pas à pas pour des fonctions de positionnement en circuit ouvert, dans les domaines de la machine-outils, de l'automate et de la robotique.

3.2.1 Le moteur asynchrone

La figure 2 présente la structure d'un moteur asynchrone à cage. Les chapitres D1-1 et D1-3 rappellent les caractéristiques principales du moteur asynchrone. L'annexe 8.2.1 précise quelques éléments d'équations nécessaires à un bilan énergétique.

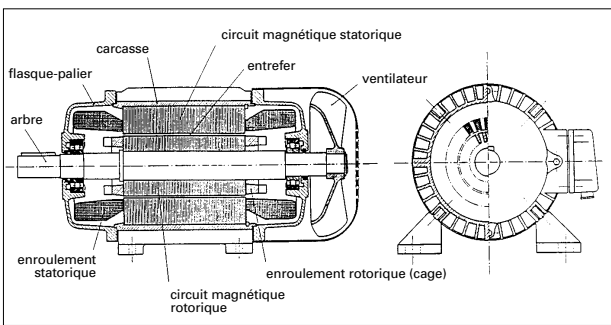


Figure 2: Moteur asynchrone à cage.

Dans le domaine des machines industrielles, la plupart de ces moteurs sont alimentés à fréquence variable, afin d'adapter la vitesse au type de matière à usiner. La figure 3 illustre l'évolution de la caractéristique de couple à fréquence variable pour un tel moteur. Le domaine de puissance s'étend de 0,5 à 50 kW environ.

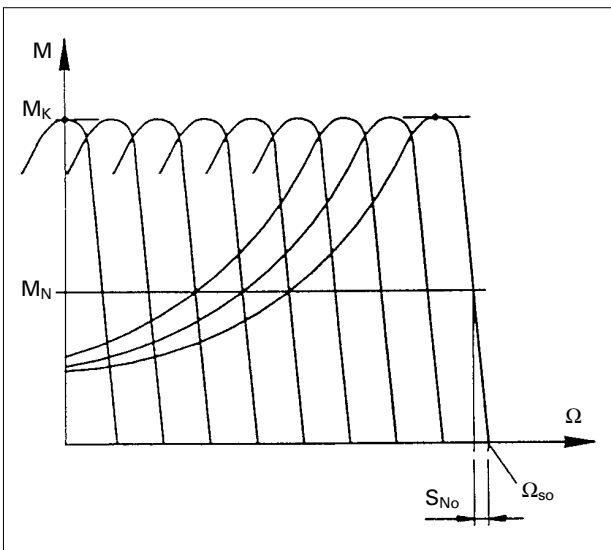


Figure 3: Caractéristique de couple d'un moteur asynchrone à fréquence variable.

3.2.2 Le moteur à courant continu

La plupart des moteurs à courant continu utilisés dans l'industrie des machines sont de type à aimant permanents.

Les figures 4 à 6 en montrent trois exemples:

- figure 4, moteur long à aimants à magnétisation radiale;
- figure 5, moteur à rotor sans fer, à rotor en forme de cloche, pour des puissances inférieures au kW, à faibles constantes de temps électrique et mécanique;
- figure 6, moteur à rotor disque de type circuit imprimé, présentant également des constantes de temps faibles et une dynamique élevée.

L'annexe 8.2.2 rappelle les équations du moteur à courant continu en vue de l'analyse du bilan énergétique. Pour le domaine d'application considéré, seul le démarrage à tension variable et le contrôle par un hacheur sont utilisés (§ 3.3). Le domaine de puissance s'étend d'environ 100 W à 20 kW.

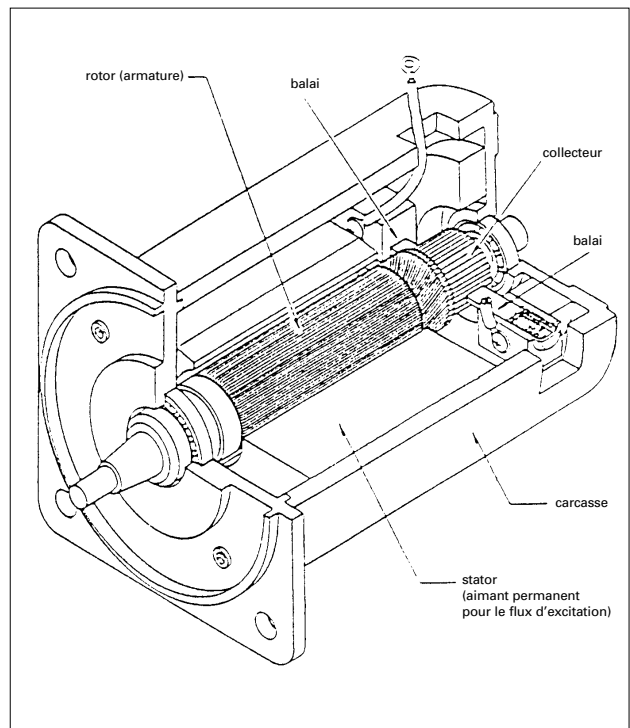


Figure 4: Moteur à courant continu à aimants permanents.

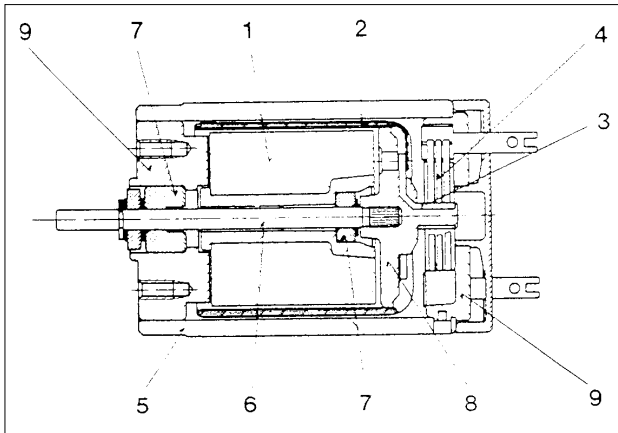


Figure 5: Moteur à courant continu.
 a) aimant; b) 2 bobines rotoriques; c) 3 collecteurs; 4) lames; 5) carcasses; 6) arbres; 7) paliers; 8-9) flasques.

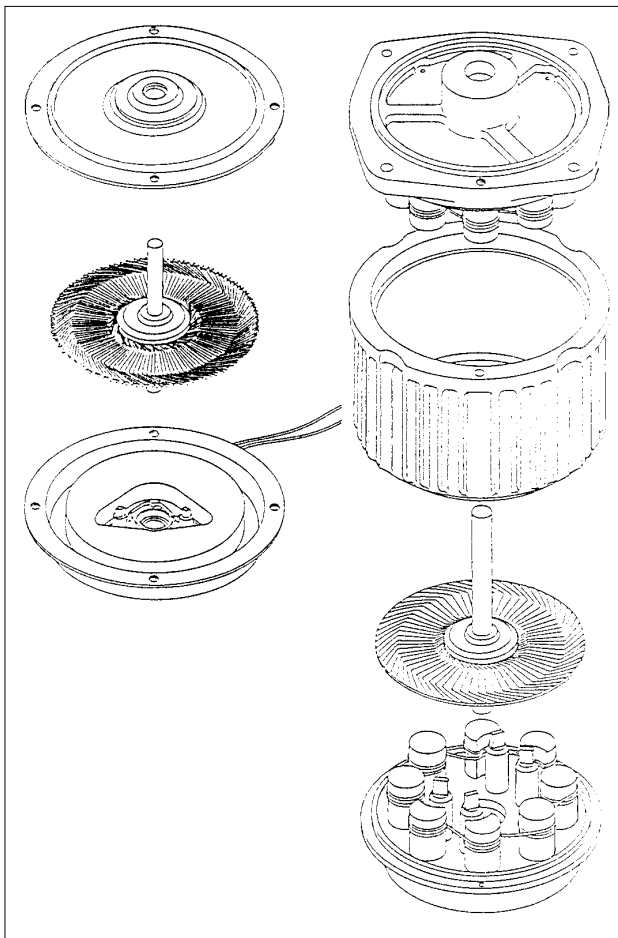


Figure 6: Moteur à courant continu à rotor sans fer.

3.2.3 Les moteurs synchrones

On distinguera principalement trois types de moteurs selon leur alimentation ou leur structure :

- le moteur à courant continu sans collecteur à aimants permanents, alimenté par un pont à six transistors (figure 7), commutés à 120° (figure 8) ou à 180° (figure 9);
- le moteur synchrone autocommuté, semblable au précédent, mais alimenté par une source de courant triphasé sinusoïdale, généralement associée à un capteur de type resolver. Pour ces deux types de moteur, la structure est basée sur un stator polyphasé (triphase) classique et un rotor à aimants permanents, selon l'une des quatre structures de la figure 10. La figure 10a) correspond à une magnétisation radiale. La figure 10b) correspond à une magnétisation tangentielle, permettant le renforcement du flux par pôle. La figure 10c) correspond à une structure massive isotrope magnétisée dans la masse. La figure 10d) est celle d'un moteur de type disque, à double entrefer axial, plus rare;
- le moteur pas à pas, qui est un moteur synchrone à démultiplication magnétique entre le champ tournant et le rotor, permettant une résolution élevée. La figure 11 en montre un exemple de structure la plus fréquemment utilisée dans le domaine des machines: le moteur hybride. La résolution naturelle (pas entier) est comprise entre 24 et 500 pas par tour. Ces moteurs ont généralement deux phases alimentées en bipolaire.

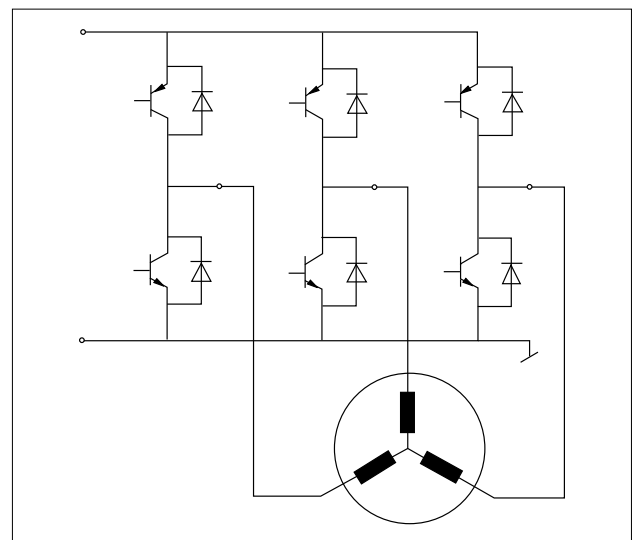


Figure 7: Pont à six transistors.

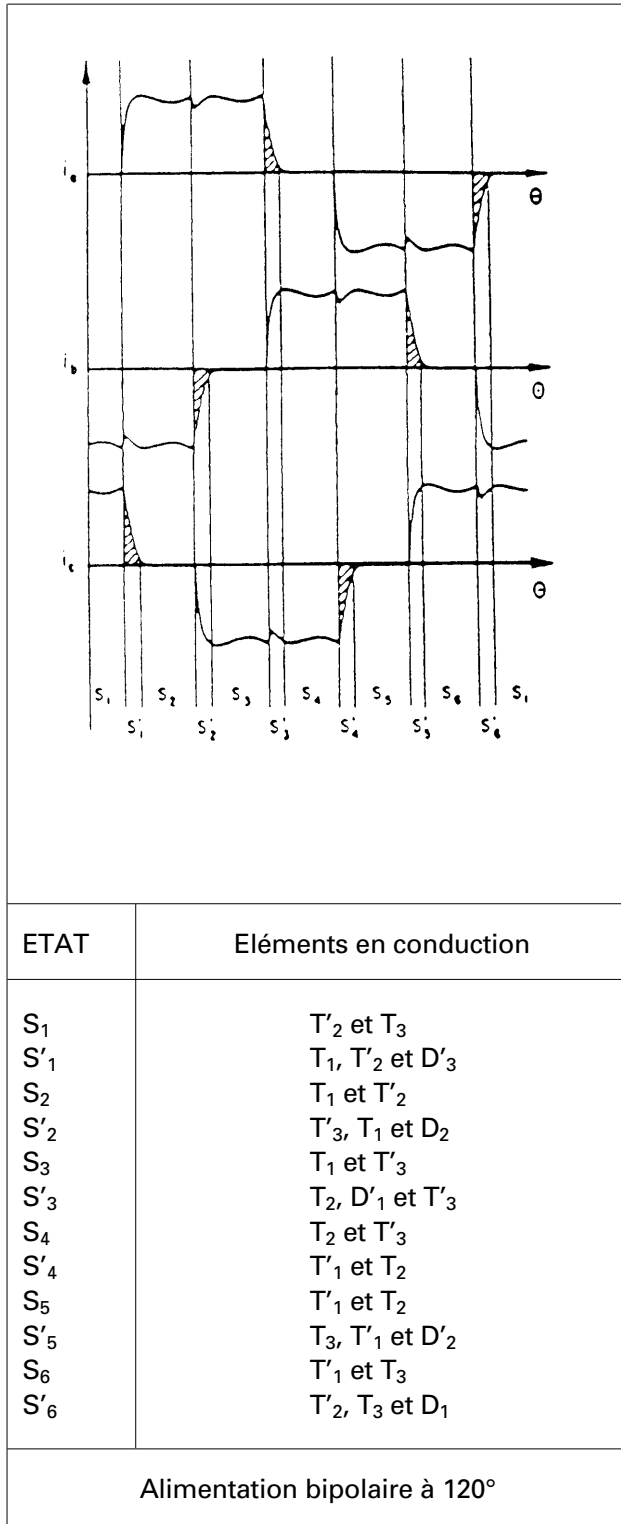


Figure 8: Commutation à 120° avec deux phases alimentées.

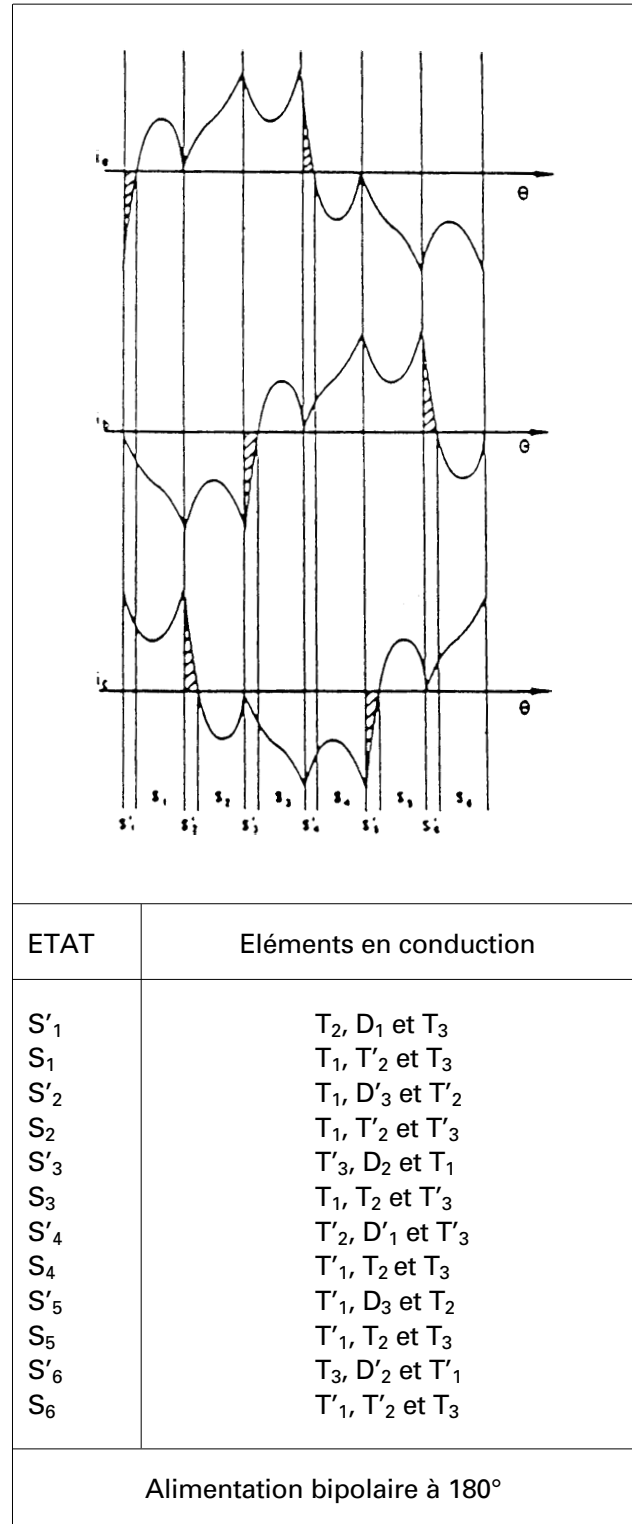


Figure 9: Commutation à 180° avec deux phases alimentées.

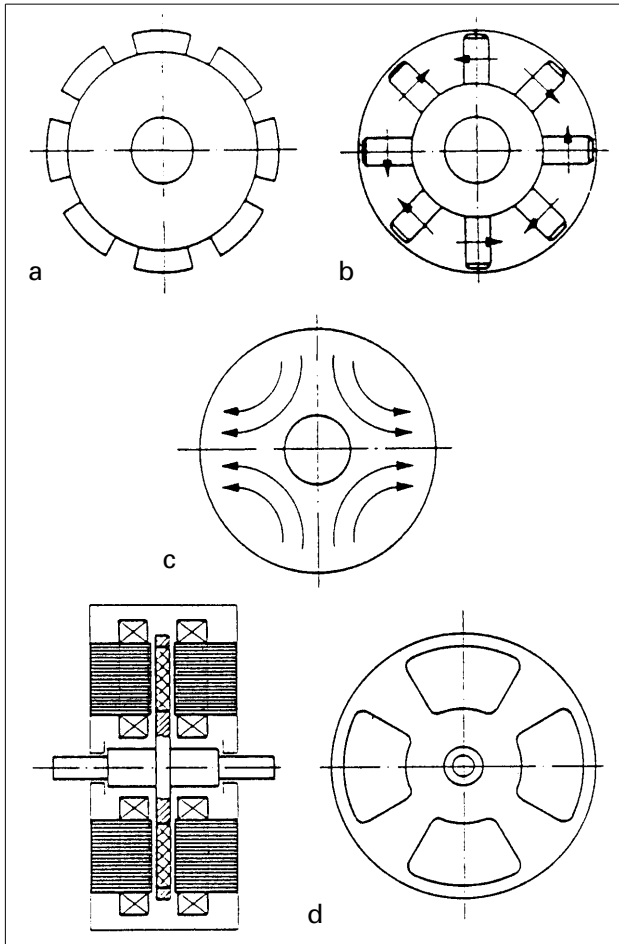


Figure 10: Structure rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents: a) magnétisation radiale; b) magnétisation tangentielle; c) magnétisation isotrope; d) rotor disque.

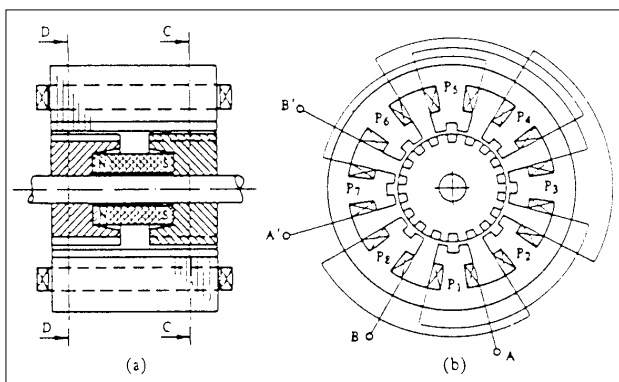


Figure 11: Moteur à pas hybride.

L'annexe 8.2.3 présente les équations de base de ce type de moteur. Le démarrage s'effectue à fréquence variable, par autosynchronisation: l'asservissement de l'alimentation à la position du rotor, sauf pour le moteur pas à pas, qui est fréquemment contrôlé en circuit ouvert. Le domaine de puissance va de 100 W à 20 kW (moteurs synchrones) et respectivement de 10 W à 2 kW (moteurs pas à pas). La caractéristique dynamique de couple de tels moteurs est présentée à la figure 12.

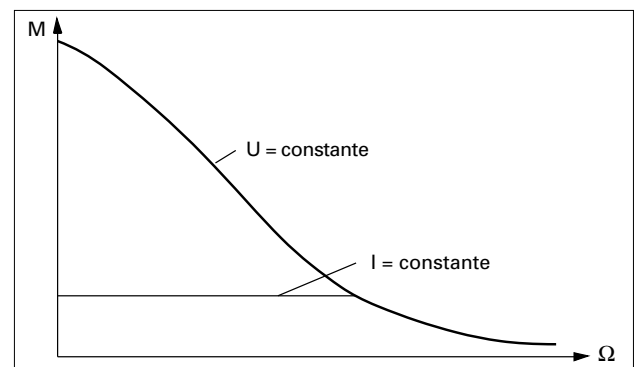


Figure 12: Caractéristique de couple d'un moteur synchrone.

3.3 Alimentation

L'alimentation des moteurs décrits ci-dessus est réalisée par le biais de trois principaux types de circuits:

- le variateur de courant continu à pulsation ou interrupteur unipolaire (figure 13). L'élément de commutation peut être un transistor, un GTO, un thyristor ou un IGBT. Ce moteur permet un contrôle de courant unipolaire;
- le pont en H à quatre éléments de commutation, permettant une alimentation à contrôle de courant bipolaire (figure 14);
- le pont à six transistors (ou autres composants non linéaires) permettant une alimentation triphasée en moteur ou en récupération (figure 7).

Le fonctionnement de tous ces montages en mode de commutation à haute fréquence en hacheur (technique PWM) permet un contrôle de courant avec un bon rendement. Cette technique est préférable à toute autre en termes de rendement.

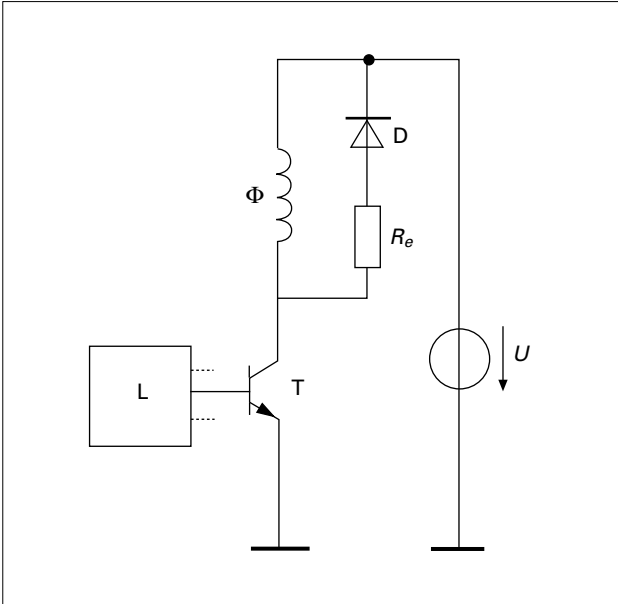


Figure 13: Variateur de courant unipolaire à pulsation ou hacheur.

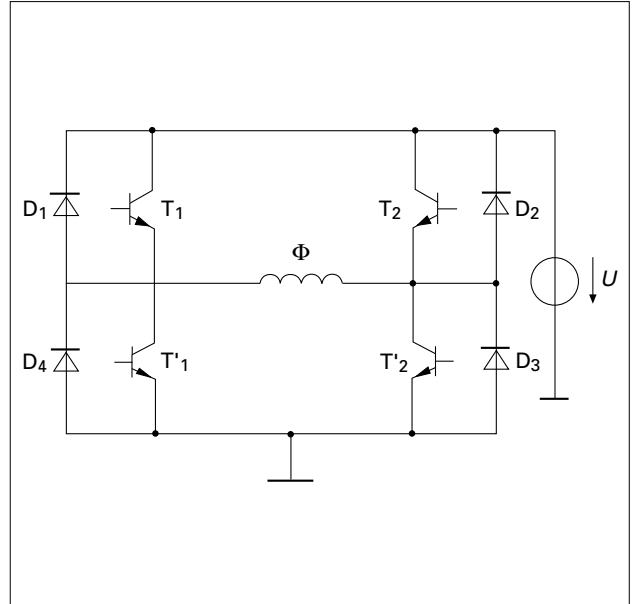


Figure 14: Pont en H ou hacheur bipolaire.

4. Aspects énergétiques et économiques

Les gains énergétiques peuvent être associés à plusieurs aspects de la chaîne entraînement électrique-transmission-machine-processus. On citera principalement :

- la combinaison moteur-alimentation ;
- le système de contrôle ;
- l'adaptation de l'entraînement à la machine (la transmission) ;
- le processus.

Le concept d'énergie grise – l'énergie nécessaire à la fabrication des composants eux-mêmes, associée à leur durée de vie – est également à considérer dans un bilan global.

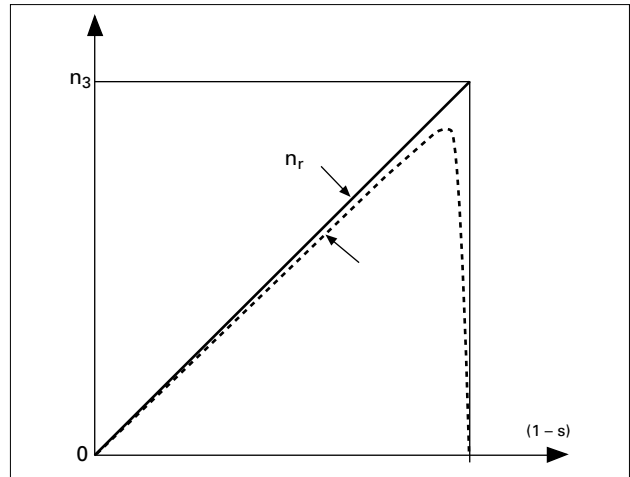


Figure 15: Rendement d'un moteur asynchrone.

4.1 Moteur – alimentation

Les gains énergétiques liés au choix du moteur ne sont vraiment significatifs que pour un fonctionnement quasi-permanent. En revanche, la combinaison moteur-alimentation permet des gains appréciables pour des régimes discontinus. Parmi les facteurs principaux de gains, on relèvera :

- le réglage de vitesse et le démarrage par fréquence variable (moteurs synchrones ou asynchrones) et par tension variable (moteur à courant continu) plutôt que par rhéostat.

4.1.1 Moteur asynchrone

Le rendement du moteur asynchrone peut se décomposer comme suit :

$$\eta = \eta_s \eta_{mec} \eta_r$$

- η_s = rendement statorique ;
 η_{mec} = rendement mécanique ;
 η_r = rendement rotorique.

On a par l'annexe 8.2.1 :

$$\begin{aligned} \eta_r &= P_{mec} / (P_{mec} + P_{Jr}) \\ &= 1 - s = \Omega / \Omega_s \end{aligned}$$

A fréquence variable, on a :

$$\eta = 1 - s = 1 - \Delta\Omega / \Omega_s$$

Dans cette expression, $\Delta\Omega$ est une constante et Ω_s une variable.

On a donc $\eta < 1 - s$ (cf. figure 15).

L'énergie rotorique dissipée au démarrage (W_{Jdr}) vaut, selon l'annexe 8.3.1, pour une alimentation à fréquence constante :

$$W_{Jdr} \geq W_{cin}$$

W_{cin} = énergie cinétique totale

Pour une alimentation à fréquence variable :

$$W_{Jdr} \geq 2 s_N \cdot W_{cin}$$

s_N = glissement nominal à la fréquence maximale
 ($s_N = 0,02$ à $0,08$ selon la puissance)

L'énergie Joule totale dissipée au stator et au rotor est pratiquement de 1,25 à deux fois les valeurs ci-dessus. Ainsi l'énergie économisée par une alimentation à fréquence variable peut être très importante pour des démarrages fréquents.

4.1.2 Moteur à courant continu

Le rendement rotorique du moteur à courant continu vaut :

$$\eta_r = P_{mec} / (P_{mec} + P_J)$$

$$P_{mec} = M \cdot \Omega = k_i \Omega$$

$$P_J = Ri^2$$

$$\eta_r = U_i / (Ri + U_i) = U_i / U = k\Omega / U$$

Pour une alimentation à tension constante, le rendement varie proportionnellement à la vitesse, selon la figure 16.

Pour une alimentation à tension variable, on a pour un courant constant égal à i_N :

$$\eta_r = \frac{k\Omega}{R_{i_N} + k\Omega}$$

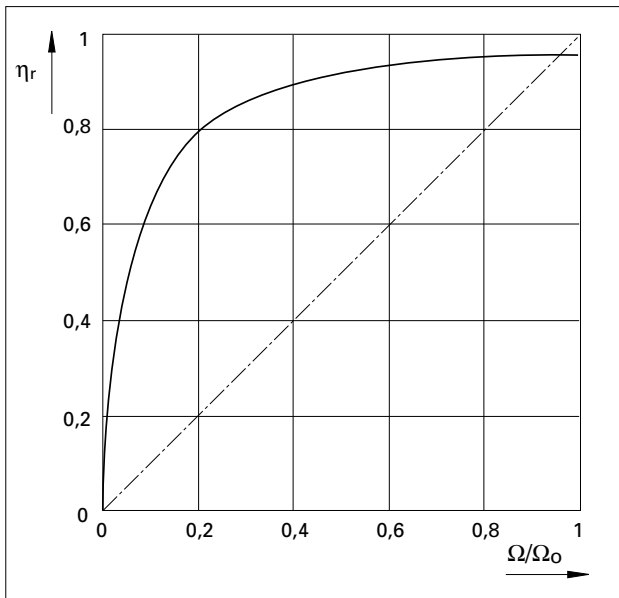


Figure 16: Rendement d'un moteur à courant continu alimenté à tension variable.

L'énergie rotorique dissipée au démarrage (W_{Jd}) vaut, selon l'annexe 8.4.2, pour une alimentation à tension constante:

$$W_{Jdr} \geq W_{cin}$$

Pour une alimentation à tension variable:

$$W_{Jdr} \geq 2 \alpha W_{cin}$$

avec $\alpha = R_{i_N} / U_N$

4.1.3 Moteur synchrone

L'expression du rendement du moteur synchrone alimenté à fréquence variable présente une plus grande complexité, par sa dépendance de l'angle de

commutation. Il y a néanmoins beaucoup de parenté avec le moteur à courant continu. On peut poser:

$$\eta_{Joule} \cong \frac{k\Omega}{R_s i_N + k\Omega}$$

R_s = résistance statorique

De même, l'énergie dissipée au démarrage à courant constant, à vide, vaut:

$$W_{Jd} \geq 2 \beta W_{cin}$$

avec $\beta \cong R_s i_N / (k\Omega_o)$

4.1.4 Comparaison

Le tableau 1 présente un bilan comparatif des rendements et des énergies dissipées au démarrage, pour les principaux types de moteur. Pour le moteur asynchrone, les variantes portent sur une fréquence constante ou variable. Pour le moteur à courant continu, l'alimentation est à tension constante ou variable.

4.1.5 Freinage

Un freinage actif peut être réalisé par un moteur asynchrone à fréquence variable, un moteur à courant continu à tension variable ou un moteur synchrone autocommuté. Le principal problème réside dans le coût d'une chaîne de récupération capable de renvoyer de l'énergie à la source primaire.

4.2 Contrôle

En termes d'énergie, le système de contrôle peut apporter des gains substantiels par deux biais différents:

- l'adaptation optimale, en termes de rendement, des paramètres d'alimentation.
On peut citer:
 - la fréquence et la tension d'un moteur asynchrone alimenté à fréquence variable;
 - la tension et l'angle de commutation d'un moteur synchrone en fonction de la fréquence et de la charge.
- l'adaptation des conditions d'accélération et de freinage lors d'un transfert de position, de façon

	Moteur asynchrone		Moteur à courant continu		Moteur synchrone
	$f = cste$	f variable	$U = cste$	U variable	f variable
Rendement	$1 - s$	$1 - \Delta\Omega/\Omega_s$	$k\Omega/U$	$k\Omega/(R_i N + k\Omega)$	$\sim k\Omega/(R_s i_N + k\Omega)$
Energie dissipée Démarrage rotor	W_{cin}	$2 s_N W_{cin}$	W_{cin}	$2 \alpha W_{cin}$	—
Energie dissipée totale (à vide)	1,25 à 2 W_{cin}	2,5 à 4 s_N W_{cin}	W_{cin}	$2 \alpha W_{cin}$	$2 \beta W_{cin}$
s_N = glissement nominal à la fréquence maximale α = $R_i N / U_N = R_i N / (k\Omega_0)$ β = $R_s i_N / (k\Omega_0)$					

Tableau 1

à minimiser les pertes du moteur. L'annexe 8.4 met en évidence le fait qu'un profil présentant des taux d'accélération, de vitesse constante et de décélération égaux conduit à un minimum d'énergie perdue.

4.3 Adaptation de la transmission

L'adaptation de la transmission est l'un des moyens les plus importants de réduire l'énergie consommée. Tout choix erroné conduit à un moteur utilisant nettement plus d'énergie à sa propre accélération qu'à celle de l'organe entraîné. En la matière, tout surdimensionnement du moteur va à fin contraire, l'inertie croissant plus rapidement que le couple. Afin de déterminer l'optimum, un processus d'itération est indispensable, l'inertie du moteur étant inconnue a priori. L'exemple décrit à la section 5 met en évidence la démarche correspondante.

5. Exemple : déplacement d'un chariot de poinçonneuse

5.1 Cahier des charges

Un industriel a équipé une poinçonneuse avec un chariot mû par une vis à billes d'un pas de 4 mm (transformation tournante linéaire). Cette vis est directement accouplée à un moteur à courant continu. Le cahier des charges du système choisi était le suivant:

- Charge

Inertie de la vis	$57 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$
Inertie de l'accouplement	$114 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$
Course type	30 mm
Résolution	0,05 mm
Masse du chariot et de la tôle	30 kg
Profil de déplacement trapézoïdal avec un temps de	0,2 s
Temps mort	0,175 s
Pas de vis	4 mm

- Choix du constructeur

Moteur à courant continu

Constante de couple	K_M	0,36 Nm/A
Vitesse maximale	N	4000 t/min
Résistance interne	R	0,95 Ω
Couple nominal	M_N	3 Nm
Couple impulsif	M_o	15 Nm
Courant nominal	I_N	8,5 A
Résistance thermique du moteur	R_{th}	1,3 K/W
Inertie du moteur	J_m	$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$

Les deux premiers moteurs installés ont été détruits en quelques minutes. Cause et solution.

5.2 Analyse de la solution choisie

Coefficient de transmission:

$$k = \Omega_m / v_e = \alpha_m / x_e = 2\pi / 0,004 = 1571 \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

x_e = pas de la vis

Masse du moteur et de la transmission rapportée à la charge:

$$m'_m = (J_m + J_{vis} + J_{acc}) k^2 = 4124 \text{ kg}$$

La masse équivalente du moteur est 137 fois plus élevée que celle du chariot et de la tôle ! L'essentiel de l'énergie est utilisée pour accélérer le moteur lui-même.

Le profil de vitesse est défini par la figure 17.

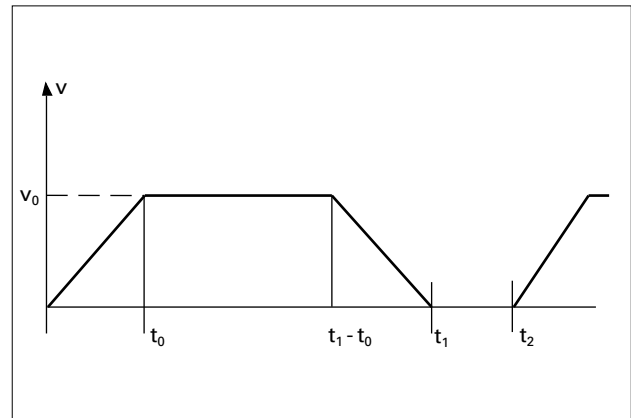


Figure 17: Profil de vitesse d'une poinçonneuse.

La distance d est la somme des distances d'accélération (d_a), à vitesse constante (d_v) et de ralentissement (d_r)

$$d = d_a + d_v + d_r = 2 d_a + d_v$$

$$d_a = \frac{1}{2} a t_0^2 \quad a = \text{accélération}$$

$$d_v = v_0 (t_1 - a t_0^2)$$

$$v_0 = a t_0$$

$$d = a t_0 t_1 - a t_0^2$$

De la dernière expression, il est possible de tirer t_0 .

Le constructeur avait choisi le couple M_0 pour l'accélération

$$F'_m = k \cdot M_0 = 2,357 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$a = F'_m / m_{tot} = 5,67 \text{ m/s}^2$$

$$t_0 = 31,4 \text{ ms}$$

$$v_0 = 0,178 \text{ m/s}$$

$$\Omega_0 = kv_0 = 279,7 \text{ rad/s} \approx 2670 \text{ t/min}$$

Calcul des pertes moyennes

Le courant n'existe qu'en régime d'accélération :

$$I = M_0 / K_M$$

$$K_M = 0,36 \text{ Nm/A}$$

$$I = 41,7 \text{ A}$$

$$P_2 = RI^2 = 0,95 \cdot 41,7^2 = 1649 \text{ W}$$

$$\text{Pertes moyennes} = \bar{P} = \frac{P_2 \times 2 \times t_0}{t_2} = 276 \text{ W}$$

$$t_2 = \text{période} = 0,375 \text{ s}$$

$$\text{Echauffement } \Delta T = \bar{P} R_{th} = 359 \text{ K}$$

Le moteur ne peut supporter un tel régime d'exploitation. La cause n'est pas la charge, mais le choix de la transmission et du moteur.

5.3 Solution proposée

L'amélioration doit porter sur deux objectifs différents :

- l'adaptation du rapport de transmission, dans la mesure où elle est compatible avec la précision de positionnement: le facteur k doit donc être réduit et le pas allongé ;
- la réduction de la puissance du moteur. En effet, le rapport couple/inertie varie avec la puissance $10/7$ (annexe 8.1) ;
- améliorer les conditions énergétiques pour un meilleur profil de vitesse (voir annexe 8.4).

Compte tenu de la dernière condition, le temps d'accélération vaut :

$$t_0 = t_1/3 = 0,0667 \text{ s}$$

$$a = \frac{d}{t_0(t_1 - t_0)} = 3,375 \text{ m/s}^2$$

Pour des raisons de faisabilité, on choisira le plus grand pas de vis possible compte tenu de ses dimensions, soit 12 mm.

$$k = 2\pi/0,012 = 523,6 \text{ m}^{-1}$$

Si l'on rapporte la masse au moteur, on obtient :

$$J_e' = m_e / k^2 = 1,09 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

En ajoutant l'inertie de la vis et de l'accouplement, on a pour l'inertie totale :

$$J_{tot} = J_e' + J_{vis} + J_{acc} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

L'équation de mouvement devient pour la zone d'accélération :

$$(J_m + J_{tot}) \varepsilon = M_0$$

$$\varepsilon = ka = 1767 \text{ rad/s}^2$$

$$\Omega_0 = \varepsilon t_0 = 117,8 \text{ rad/s}^2 \cong 1125 \text{ t/min}$$

Compte tenu de l'annexe 8.1, on a :

$$(M_0/M_{0r})^{10/7} = (J_m/J_{mr})$$

l'indice r correspond au moteur de référence

$$M_{0r} = 15 \text{ Nm} \quad J_{mr} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Les meilleures conditions d'accélération sont obtenues sans frottement pour :

$$J_m = J_{tot}$$

$$M_0 = M_{0r} (J_m/J_{mr})^{0,7} = 4,63 \text{ Nm}$$

Couple d'accélération au démarrage

$$M_d = \varepsilon (J_m + J_{tot}) = 0,990 \text{ Nm.}$$

En rapportant les chiffres ci-dessus au cas du moteur calculé précédemment, on peut montrer que l'échauffement atteindrait environ 35 K.

Pour un démarrage, le bilan énergétique donne :

- 1^{er} cas : (moteur choisi initialement)

$$W_{cin r} = 65,8 \text{ J}$$

- 2^e cas : (moteur bien choisi)

$$W_{cin} = 3,9 \text{ J}$$

Dans le deuxième cas, l'énergie dissipée au démarrage est de 5,9% de la valeur du premier cas avec un investissement nettement plus faible en ce qui concerne le moteur et son alimentation.

6. Entraînement électrique intégré

6.1 Intégration du moteur à l'organe entraîné

Les machines-outils de type manuel étaient caractérisées par une liaison homme-machine composée d'éléments tels que manivelles et leviers. L'automatisation par commandes numériques s'est effectuée dans un premier temps en substituant des moteurs à ces organes manipulés par la main. Les moteurs sont ainsi devenus des espèces de prothèses dont les performances ont été principalement limitées par l'absence d'une adéquation de l'entraînement à sa fonction.

Le premier pas vers l'intégration de l'entraînement consiste en l'intégration du moteur à l'organe entraîné. Le moteur doit être placé à l'endroit le plus adéquat pour remplir sa fonction ce qui implique un certain nombre de contraintes :

- la prise en considération de l'ensemble moteur-transmission et son adéquation à l'organe entraîné ;
- la tendance à l'entraînement direct chaque fois qu'il est possible, ce qui conduit à des moteurs lents à géométrie particulière ou au contraire à des moteurs à hautes vitesses (broches par exemple) ;
- le recours à des géométries particulières telles que moteurs plats de grand diamètre ou au contraire à des moteurs longs de faible diamètre ;
- le recours à des exécutions spéciales telles que moteurs à rotor creux ou à rotor externe ;
- les conditions d'intégration à des endroits difficilement accessibles impliquent une fiabilité accrue. Le recours au collecteur est ainsi pratiquement exclu pour de tels cas. La fiabilité de l'électronique d'alimentation devient également une condition essentielle.

6.2 Intégration des composants périphériques

L'intégration des composants périphériques peut être comprise à deux niveaux :

- l'intégration des composants eux-mêmes dans le sens d'une réduction de leurs dimensions ou de leur remplacement par un composant équivalent mieux intégrable ;

- l'intégration des composants dans le moteur.

Ces deux objectifs sont concourants, dans la mesure où la réduction de la taille des composants permet leur intégration dans ou contre le moteur.

Les circuits intégrés de commutation de puissance sont intégrables sous formes de ponts monophasés bipolaires ou triphasés à 6 transistors. Des puissances jusqu'à 500 W par phase deviennent courantes et la tendance est à la hausse. Les techniques IGBT (Transistors bipolaires à grille intégrée) sont prometteuses pour les prochaines années, dans le sens de l'accroissement de la tension et du courant. Les capteurs, par le recours à des techniques d'intégration spécifiques, à des matériaux et à des composants nouveaux, ont des encombrements qui tendent à diminuer.

Les composants de commande et de réglage, déjà fortement intégrés, évoluent vers deux tendances liées aux quantités de produits :

- l'intégration de composants spécifiques sous forme de « puces », de circuits hybrides ou de technologies SMD ;
- le recours à des microprocesseurs de type micro-contrôleurs, programmables en fonction de l'objectif à réaliser ;

La transmission doit pouvoir se montrer en porte à faux contre le flasque du moteur. Si cette technologie est tout à fait courante pour de petites puissances, elle l'est moins pour la gamme de moteurs au-delà de 1 kW.

Le montage des moteurs à proximité de l'organe entraîné correspondant, tout en conservant les éléments d'alimentation et de commande dans une armoire spécifique, implique de longs câbles de liaison, difficiles à intégrer dans la machine. En temps normal, les liaisons suivantes sont nécessaires

- l'alimentation de puissance du moteur (2 à 4 conducteurs) ;
- le capteur (3 à 8 conducteurs) ;
- la protection thermique (2 conducteurs).

Tous ces éléments de liaison occupent un volume très important et introduisent un accroissement important de la résistance et de l'inductance du moteur, au détriment de ses performances.

L'amélioration de la situation passe par la suppression du plus grand nombre possible d'éléments de liaison. Deux voies permettent d'atteindre un tel objectif :

- le rapprochement du moteur et de ses périphériques ;
- le recours à des capteurs indirects de position et de vitesse.

6.3 Intégration de l'entraînement

Pour bien mettre en évidence le concept d'entraînement intégré, on peut comparer une conception traditionnelle à celle qui se dessine pour un futur proche.

De façon classique, l'ensemble des périphériques électriques : l'alimentation, la commande et le réglage sont concentrés dans une « armoire électronique » qui assure la gestion du système (cf. figure 18). C'est cette concentration qui accroît le nombre de liaisons et qui entraîne les inconvénients déjà signalés.

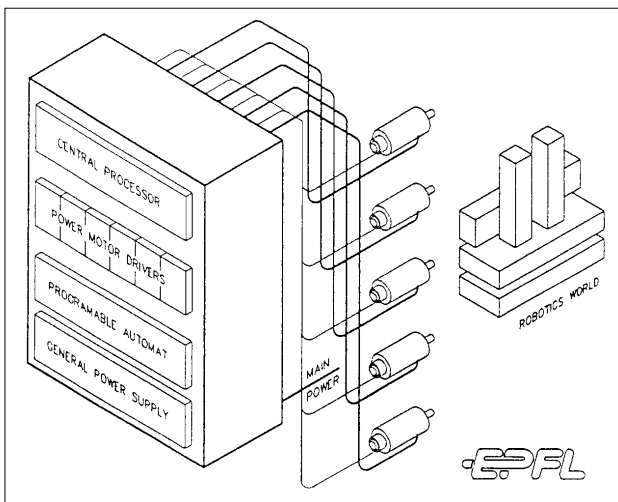


Figure 18: Alimentation et commande centralisée de moteurs, impliquant des liaisons nombreuses.

La solution intégrée conserve une centralisation de l'information liée à la finalité de l'organe entraîné : la coordination des fonctions. Toutes les autres actions sont décentralisées et associées au moteur (figure 19).

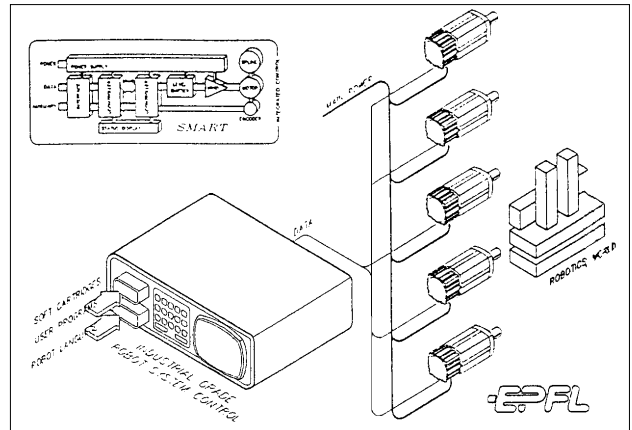


Figure 19: Entraînements électriques intégrés à alimentation et réglage décentralisés. Seule la coordination des mouvements est centralisée.

Parmi les liaisons, seules subsistent l'alimentation de puissance (alternative ou continue) et la circulation de l'information en vue de la coordination des mouvements :

- ordres, consignes de mouvements, de vitesse et de position ;
- informations sur l'état du moteur.

La transmission de l'information est réalisable par le biais de fibres optiques associées au multiplexage de l'ensemble des grandeurs à transmettre ou par un bus plus classique.

Le moteur intégré prend alors la structure décrite à la figure 20.

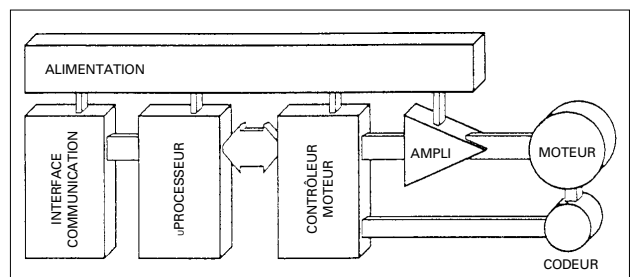


Figure 20: Schéma bloc d'un entraînement intégré (smart motor).

Le contrôle du système s'effectue à deux niveaux :

- le contrôle spécifique du moteur, ou système de contrôle de bas niveau, est strictement lié à l'ensemble moteur-alimentation. Il réalise le contrôle

du courant et, sur la base d'une consigne externe, assure le réglage de vitesse;

- le microprocesseur, ou système de contrôle de haut niveau, est lié à la fonction de l'entraînement, donc à l'organe entraîné. Il est micro-programmé en fonction de l'application: contrôle de position, prise en compte de la coordination des mouvements.

Le système interface assure le codage et les échanges d'information avec le système de contrôle centralisé.

Sous sa forme intégrée (smart motor), l'entraînement électrique comprend les éléments suivants décrits par la figure 21:

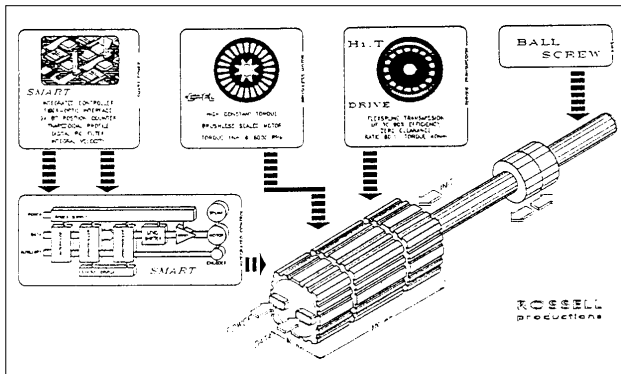


Figure 21: Composants d'un entraînement intégré.

- le moteur jouant plusieurs fonctions telles que conversion d'énergie, conversion d'information, support ou enveloppe d'autres composants (alimentation, commande, capteur, transmission) etc.
- l'alimentation, utilisant la carcasse du moteur comme radiateur, avec un montage interne ou externe;
- la transmission, montée sur l'un des flasques d'extrémité;
- le capteur, intégré à l'intérieur du moteur (resolver, capteur optique) ou de type indirect sous forme d'un composant électronique;
- l'électronique de commande ou de réglage, montée à l'intérieur du moteur ou, pour de plus grandes puissances, contre la carcasse à l'extérieur.

La figure 22 montre une photographie d'un tel moteur pour lequel tous les périphériques électroniques sont montés à l'intérieur d'un flasque d'extrémité.

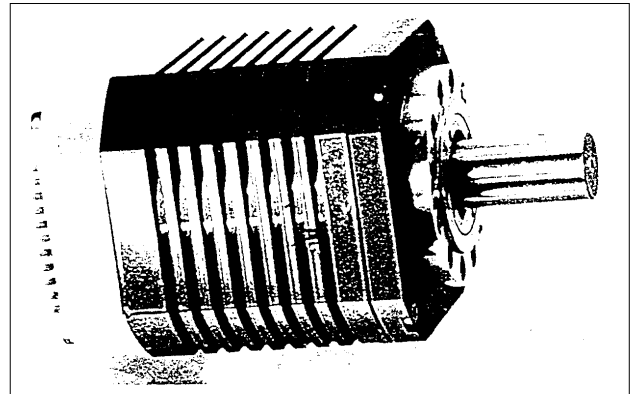


Figure 22: Photographie d'un moteur intégré. La partie de gauche comprend tous les composants électroniques.

Il est important d'insister sur les possibilités d'usage multiple du moteur:

- le moteur permet la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique;
- il permet, sous forme synchrone (moteur pas à pas, moteur à courant continu sans collecteur), la conversion d'impulsions de tension en une position. C'est donc également un convertisseur d'information;
- il peut être un capteur de position et/ou de vitesse par l'analyse de ses «défauts»: tension induite de mouvement, harmonique 3, saturation;
- il est un capteur de couple et, indirectement, d'inertie par l'analyse de la tension, du courant et, cas échéant, de l'angle de commutation. Il permet ainsi une connaissance précise de l'état de l'organe entraîné.

La réunion de toutes ces possibilités apparaîtra probablement dans une deuxième étape de l'évolution de l'intégration des entraînements, vers une tendance effective à « l'intelligence ».

6.4 Conclusions

Cette tendance vers l'intégration des composants périphériques dans le moteur lui-même est une évolution qui ira en se systématisant dans un futur proche. Les premières applications existent déjà, associées à des appareils à très grande diffusion (électroménager, climatisation).

Il est important que les principaux utilisateurs des entraînements électriques à hautes performances – commandes d'axes, robotique, périphériques d'ordinateurs – s'associent à ce développement.

Car en ce domaine, le futur a déjà commencé.

7. Références bibliographiques

- [1] M. Jufer: « Transducteurs électromécaniques ». Traité d'Electricité, Vol. IX, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1985.
- [2] J. Chatelain: « Machines électriques ». Traité d'Electricité, Vol. X, Editions Georgi, 1983.
- [3] M. Jufer: « Entraînements électriques ». Cours polycopié, EPFL 1981.
- [4] T. Kenjo: « Permanent Magnet and Brushless DC Motors ». Sogo Electronic Publishing Co, Tokyo, 1984.
- [5] M. Jufer: « Des premiers moteurs à l'électromécanique moderne ». Marché Suisse des Machines 19, 1989, pp 16-21.
- [6] M. Jufer: « Entraînements synchrones et autosynchrones ». Marché Suisse des Machines 21, 1989, pp 20-25.
- [7] P. Poffet, M. Jufer: « Entraînements hautes performances pour commande d'axes ». Marché Suisse des Machines 23, 1989, pp 16-21.
- [8] R. Osseni: « Modélisation et autocommutation de moteurs synchrones ». Thèse EPFL N° 767, 1989.
- [9] M. Jufer: « Moteurs à courant continu sans collecteurs et entraînements électriques ». ASE/UCS, t. 78, 19, 1986, pp 1194-1200.

8. Annexes

8.1 Evolution des performances d'un moteur avec ses dimensions

En se référant à [1], on peut définir l'évolution des performances d'un moteur en fonction de ses dimensions. Pour ce faire, on comparera deux moteurs homothétiques caractérisés par des diamètres de référence d et d^* avec:

$$d'/d = d^*$$

Des lois de similitude [1, chap. 4] permettent de mettre en évidence l'évolution d'un certain nombre de grandeurs mécaniques ou électriques. Pour un moteur à aimants permanents (moteur à courant continu ou à courant continu sans collecteur) à échauffement constant, on a:

- pour la masse:
 $m'/m = m^* = d^{*3}$
- pour l'inertie:
 $J'/J = J^* = d^{*5}$
- pour le couple:
 $M'/M = M^* = d^{*7/2}$
- pour l'accélération au démarrage:
 $a'_d/a_d = a^*_d = M^*/J^* = d^{*-3/2}$

On peut également établir une corrélation entre les dimensions d'un moteur et sa vitesse, pour une puissance constante:

$$M = P/\Omega$$

P = puissance mécanique [W]
 Ω = vitesse angulaire [rad/s]
 $\Omega^* = \Omega'/\Omega$

$$\text{Si } P' = P, P^* = 1$$

$$M^* = 1/\Omega^* = d^{*7/2}$$

$$d^* = \Omega^{*-2/7}$$

$$m^* = d^{*3} = \Omega^{*-6/7}$$

8.2 Equations et caractéristiques des moteurs

8.2.1 Moteur asynchrone

En se basant sur la figure 5 du chapitre 3 présentant le schéma équivalent du moteur asynchrone, on peut écrire les relations suivantes:

$$P_{\text{mec}} = 3 R'_r I'^2_f (1 - s)/s = \text{puissance mécanique}$$

s = glissement = $(\Omega_s - \Omega_r)/\Omega_s$

Ω_s = vitesse du champ tournant

R'_r = résistance rotorique rapportée

I'_r = courant rotorique rapporté

$$P_{Jr} = 3 R'_r I'^2_f$$

$$P_{\text{mec}} = P_{Jr} (1 - s)/s$$

$$M = P_{\text{mec}}/\Omega = \frac{R'_r I'^2_f}{s\Omega_s} = \frac{P_{Jr}}{s\Omega_s} = \text{couple}$$

A fréquence variable, on réalise une alimentation créant un couple maximum constant. Ceci conduit [2] à une tension approximativement proportionnelle à la fréquence et à un écart de vitesse $\Delta\Omega$ entre le rotor et le champ tournant constant (figure 3).

8.2.2 Moteur à courant continu

Le schéma équivalent de la figure 23 est représentatif du moteur à courant continu à aimants permanents avec:

R = résistance de l'induit

L = inductance de l'induit

k = coefficient de tension induite ou de couple

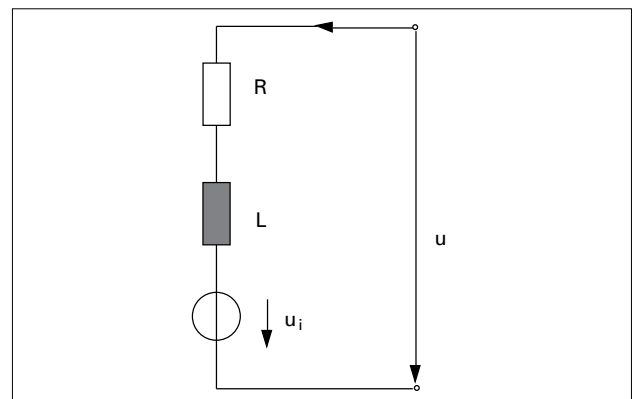


Figure 23: Schéma équivalent du moteur à courant continu.

Les équations caractéristiques sont alors:

- en régime transitoire

$$u = Ri + Ldi/dt + k\Omega$$

- en régime quasi-statique:

$$u = Ri + k\Omega$$

pour le couple:

$$M = ki$$

8.2.3 Moteur synchrone

Le schéma équivalent de la figure 24 correspond à une phase d'un moteur synchrone à pôles lisses, à aimants permanents.

En régime quasi-statique, on peut associer le calcul complexe avec:

$$\underline{U} = Ue^{j\varepsilon} = \text{tension d'alimentation}$$

$$U_i = \text{tension induite} = k\Omega$$

On a ainsi pour le courant:

$$I = \frac{\underline{U} - U_i}{Z} = e^{j\phi}$$

$$\underline{Z} = R + j\omega L = Ze^{j\phi}$$

Pour le couple d'un moteur triphasé:

$$M = \frac{3}{2} \frac{\hat{U}_i}{\Omega Z} [\hat{U} \cos(\phi - \varepsilon) - \hat{U}_i \cos \phi]$$

Ce couple est maximum pour $\varepsilon = \phi$

$$M = \frac{3}{2} \frac{\hat{U}_i}{\Omega Z} [\hat{U} - \hat{U}_i \cos \phi]$$

ε est l'angle d'avance à la commutation.

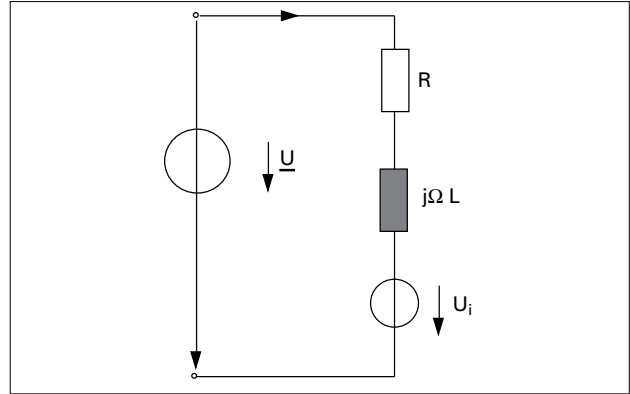


Figure 24: Schéma équivalent d'une phase du moteur synchrone à aimants permanents.

La figure 25 montre l'évolution du couple en fonction de la vitesse à tension constante pour $\varepsilon = 0$ (M_0), $\varepsilon = \phi$ (M_{max}) et pour l'angle correspondant au meilleur rendement (M_δ).

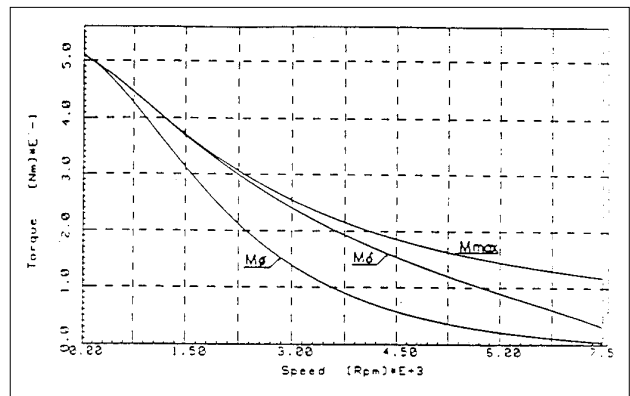


Figure 25: Caractéristique de couples d'un moteur asynchrone en fonction de l'angle de commutation M_0 angle nul; M_{max} couple maximum; M_δ couple à rendement maximum.

8.3 Bilan énergétique au démarrage

8.3.1 Moteur asynchrone

Pour un démarrage à fréquence constante, l'énergie Joule dissipée au rotor vaut :

$$W_{Jdr} = \int_0^{td} P_{Jr} dt$$

Par l'annexe 8.2.1, on a :

$$P_{Jr} = 3 R'_r I'_r{}^2 = M s \Omega_s$$

Sans couple résistant (à vide), on a :

$$M = J d \Omega / dt$$

$$P_{Jr} = J s \Omega_s d \Omega / dt$$

$$\begin{aligned} W_{Jdr} &= \int_0^{\Omega_s} J s \Omega_s d\Omega = \int_0^{\Omega_s} J (\Omega_s - \Omega) d\Omega \\ &= J \Omega_s^2 / 2 = W_{cin} \end{aligned}$$

L'énergie Joule dissipée au rotor au démarrage est égale à l'énergie cinétique totale. L'énergie Joule dissipée au stator est généralement d'un ordre de grandeur comparable. Selon la taille du moteur, on a, pour le stator :

$$W_{Jds} \cong 0,25 \text{ à } 1 W_{cin}$$

$$W_{Jdtot} \cong 1,25 \text{ à } 2 W_{cin}$$

Pour un démarrage à fréquence variable, on a :

$$W'_{Jdr} = \int_0^{td} P_{Jr} dt = \int_0^{\Omega_s} J s \Omega_s d\Omega$$

$$s \Omega_s = \Delta \Omega = \text{constante}$$

$$W'_{Jdr} = J \Delta \Omega \Omega_s$$

$$\Delta \Omega = s_N \Omega_s$$

s_N = glissement nominal à la fréquence maximale

$$W'_{Jdr} = s_N \Omega_s^2 = 2 s_N W_{cin}$$

$$W'_{Jdtot} \cong 1,25 \text{ à } 2 W'_{Jdr} = 2,5 \text{ à } 4 s_N W_{cin} \cong 2 s_N W_{Jdtot}$$

Pour un moteur de 5 kW, le glissement s_N vaut environ 4%.

Les pertes Joule totales au démarrage sont d'environ 8% des pertes Joule à fréquence constante.

8.3.2 Moteur à courant continu

Pour un démarrage à tension constante, avec ou sans rhéostat de démarrage, on peut écrire :

$$P_J = R i^2$$

$$W_{Jd} = \int_0^{td} R i^2 dt = \int_0^{td} R i \cdot i \cdot dt$$

$$i = M/k = \frac{J}{k} d \Omega / dt$$

$$W_{Jd} = \int_0^{\Omega} (U - k\Omega) \frac{J}{K} d\Omega$$

$U/k = \Omega_0$ vitesse à vide

$$W_{Jd} = J \int_0^{\Omega_0} (\Omega_0 - \Omega) d\Omega = J \Omega_0^2 / 2 = W_{cin}$$

L'énergie Joule au démarrage dissipée au rotor est égale à l'énergie cinétique. Si le démarrage s'effectue à tension variable de telle façon que le courant soit constant, égal au courant nominal i_N , on a :

$$R i_N = \alpha U_N$$

$$W'_{Jd} = \int_0^{\Omega_0} \alpha U_N \frac{J}{K} d\Omega$$

$$W'_{Jd} = \alpha J \Omega_0^2 = 2 \alpha W_{cin}$$

En pratique, pour un moteur de quelques kW, le coefficient α représente de 4 à 5% de la tension nominale.

$$W'_{Jd} \cong 8 \text{ à } 10\% W_{Jd}$$

Un démarrage à tension variable permet une économie importante d'énergie au démarrage.

Les résultats obtenus pour un moteur à courant continu à tension variable peuvent être transposés approximativement à un moteur à courant continu sans collecteur, avec contrôle de courant.

8.4 Transfert de position Bilan énergétique

Si un moteur doit assurer un transfert de position (angle α_{tot}) pratiquement à vide dans un temps donné T , le processus le plus simple consiste à réaliser trois phases consécutives (figure 26):

- une phase d'accélération de durée t_1 ;
- une phase intermédiaire à vitesse constante de durée $T - t_1 - t_2$;
- une phase de décélération de durée t_2 .

A la limite, la phase à vitesse constante peut présenter une durée nulle

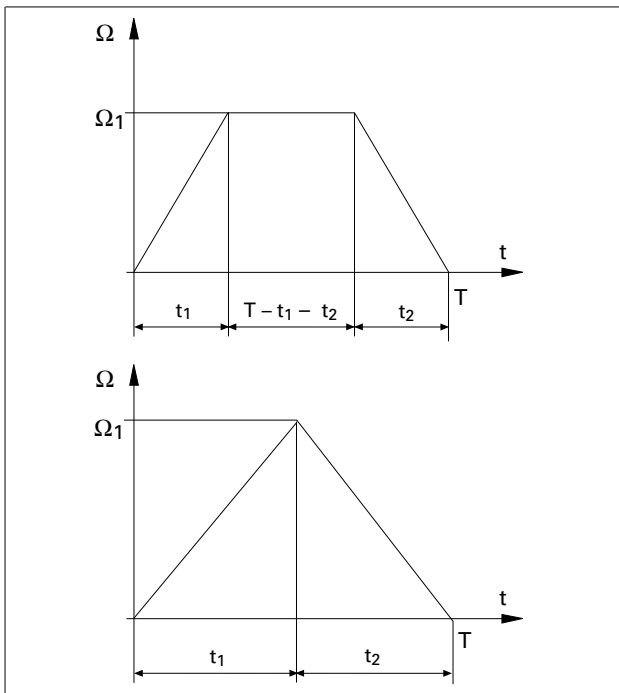


Figure 26: Profils de vitesse associés à un transfert de position.

La façon la plus simple de contrôler l'accélération (la décélération) consiste à imposer un courant constant. Pour un moteur de type courant continu avec ou sans collecteur, le couple est proportionnel au courant. Dans ces conditions, le bilan énergétique peut s'écrire comme suit:

$$W_{Joule} = RI_1^2 t_1 + RI_2^2 t_2$$

R = résistance équivalente au niveau continu

I_1 = courant d'accélération

I_2 = courant de décélération

La condition d'accélération constante est obtenue par un couple, donc un courant constant; celui-ci sera admis le même pour l'accélération et la décélération. Dans ces conditions on peut écrire:

$$W_J = 2 RI^2 t_1$$

L'angle de rotation α_{tot} étant imposé, on a:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \varepsilon t_1^2 = \alpha_2$$

ε = accélération angulaire

$$\Omega_{max} = \varepsilon t_1$$

$$\alpha_{tot} = 2\alpha_1 + \Omega_{max} (T - 2t_1)$$

$$\alpha_{tot} = \varepsilon t_1 (T - t_1)$$

La grandeur ε est l'accélération angulaire dont l'expression devient:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{tot}}{t_1 (T - t_1)} = M/J$$

M = couple d'accélération = $k I$

J = inertie totale

k = constante de couple [Nm/A]

$$I = M/k = \frac{J \alpha_{tot}}{k t_1 (T - t_1)}$$

L'énergie dissipée devient ainsi:

$$W_J = 2R \frac{J^2 \alpha_{tot}^2}{k^2 t_1 (T - t_1)^2}$$

Le système présente une consommation minimale pour les conditions suivantes:

$$dW_J/dt_1 = 0$$

Le numérateur de l'expression doit être nul:

$$3 t_1^2 - 4 t_1 T + T^2 = 0$$

Les solutions sont:

$$t_1 = T/3 \quad \text{et} \quad t_1 = T$$

Seule la solution $t_1 = T/3$ a un sens.

Dans ces conditions, l'énergie dissipée dans la résistance équivalente vaut alors:

$$W_{Jmin} = \frac{27 R J^2 \alpha_{tot}^2}{2 k^2 T^3} \quad t_1 = T/3$$

A titre de comparaison, pour une marche en triangle, on obtient:

$$W_{J1/2} = \frac{16 R J^2 \alpha_{tot}^2}{R^2 T^3} \quad t_1 = T/2$$

$$W_{J1/2} = \frac{32}{27} W_{Jmin}$$

2^e partie

Entraînements électriques : méthodologie de conception

Prof. Marcel Jufer
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

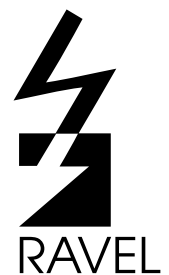


Table des matières

1.	Introduction	37
1.1	Définition	37
1.2	Composants d'un entraînement électrique	37
2.	L'organe entraîné	38
2.1	Fonction de l'organe entraîné	38
2.2	Régime nominal ou de référence	38
2.3	Comportement transitoire	38
2.4	Cahier des charges	39
2.4.1	Données de base	39
2.4.2	Caractéristiques de réglage	39
2.4.3	Caractéristiques de démarrage (de freinage)	39
2.4.4	Caractéristiques transitoires	40
2.4.5	Caractéristiques des élément périphériques	40
2.4.6	Aspect thermique	40
2.4.7	Contraintes	40
2.5	Liste type	41
3.	La transmission	43
3.1	Types de transmission et caractérisation	43
3.1.1	Transmission tournantes tournantes	43
3.1.2	Transmissions tournantes linéaires	43
3.2	Résolution	44
3.2.1	Caractérisation	44
3.2.2	Critères de choix	44
3.2.3	Limites	44
3.3	Adaptation de vitesse	44
3.4	Comportement dynamique	44
3.4.1	Objectif	44
3.4.2	Equations dynamiques	45
3.4.3	Constante de temps mécanique	46
3.4.4	Accélération	46
3.5	Couple pulsant	47
3.5.1	Objectif	47
3.5.2	Lissage des oscillations de vitesse	47
3.5.3	Couple impulsif	48
4.	Conception globale d'un entraînement électrique	51
4.1	Introduction	51
4.2	Equations dynamiques	51
4.2.1	Transfert de position	51
4.2.2	Equation de mouvement avec transmission	51
4.3	Relation couple-inertie	52
4.3.1	Couple en fonction des dimensions	52
4.3.2	Inertie en fonction des dimensions	52
4.3.3	Corrélation couple-inertie	52
4.4	Relation couple-rapport de transmission	53

4.5	Exemple	53
4.5.1	Moteur à performances élevées	53
4.5.2	Moteur à performances moyennes	54
4.6	Conclusions	54
4.6.1	Liste des symboles	55
4.6.2	Références bibliographiques	55
4.7	Annexe	56
4.7.1	Moteur polarisé – lois de similitude	56
4.7.2	Moteur réluctant – lois de similitude	56
4.7.3	Echauffement – lois de similitude	56

5.	Prédimensionnement du moteur	57
5.1	Objectif	57
5.2	Inertie	57
5.3	Couple	57
5.3.1	Marche à suivre	57
5.3.2	Moteur synchrone à aimants permanents	58
5.3.3	Moteurs réluctants	59
5.3.4	Moteur à courant continu	59
5.3.5	Moteur asynchrone	60
5.4	Relation couple-inertie	60

6.	Echauffement et limites thermiques	61
6.1	Importance de l'échauffement	61
6.2	Equations thermiques	61
6.2.1	Conduction	61
6.2.2	Convection et rayonnement	61
6.2.3	Phénomène résultant	61
6.2.4	Solution	62
6.2.5	Mesure	62
6.2.6	Démarrage	62
6.2.7	Régime variables	62

1. Introduction

1.1. Définition

Un entraînement électrique est un système assurant une conversion électromécanique par le biais d'un moteur ou d'un transducteur et comprenant l'ensemble des périphériques nécessaire à la transmission, à l'alimentation et au contrôle.

Le concept de système, par opposition au moteur seul, est caractéristique de l'entraînement électrique. La qualité de ce système vaut principalement par la valeur du composant le plus faible.

L'entraînement électrique doit être adapté à l'application considérée par le biais de certains de ses composants. L'*organe entraîné* (pompe, machine-outil, traceur, périphérique d'ordinateur, robot, etc.), s'il ne fait pas partie intégrante de l'entraînement, détermine ses caractéristiques par le biais du cahier des charges qui en découle.

1.2. Composants d'un entraînement électrique

Les composants d'un entraînement électrique sont principalement les suivants (cf. 1^{re} partie, chapitre 2) :

- la *transmission*, qui permet d'adapter le mouvement (conversion tournante-linéaire, par exemple), la vitesse, la résolution ou la dynamique du système ;
- le *moteur*, défini par ses caractéristiques externes et de réglage ;
- l'*alimentation*, 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 ou les *capteurs* qui fournissent les informations nécessaires au contrôle ;
- les éléments de *sécurité* et de *protection* tels que protection thermique, protections de survitesse, de surintensité, etc.

De façon traditionnelle, chacun de ces éléments est développé pour lui-même, de façon à en permettre l'utilisation la plus large possible. La tendance actuelle va vers l'intégration des composants dans le moteur lui-même (transmission, alimentation,

capteur), tout en accroissant la souplesse d'utilisation par le biais d'une commande à microprocesseur programmable.

La démarche d'analyse d'un système d'entraînement électrique implique tout d'abord l'étude des composants :

- l'organe entraîné qui doit permettre de définir le cahier des charges et les contraintes imposées à l'entraînement électrique ;
- la transmission qui permet l'adaptation de l'entraînement électrique à la charge ;
- le moteur, son alimentation, sa commande et ses périphériques qui sont étroitement liés et conditionnés par la fonction à réaliser.

La synthèse en vue du choix implique deux démarches :

- la *pondération* des divers critères de choix. Certains facteurs sont prioritaires de façon évidente, alors que d'autres sont plus difficilement maîtrisables. En particulier, les aspects économiques sont fortement liés à des conditions spécifiques telles que quantités, conditions de fabrication etc, donc plus difficilement connus a priori ;
- le processus d'*itération* permettant une comparaison de plusieurs variantes, de façon à effectuer un choix relativisé.

Les chapitres qui suivent porteront principalement sur les aspects analytiques, alors que les derniers chapitres mettront l'accent sur la synthèse.

2. L'organe entraîné

2.1. Fonction de l'organe entraîné

Tout organe entraîné est caractérisé par une fonction: pompage, transfert de position, arrachement de matière, mouvement vibratoire, contrôle de vitesse, etc. Le *cahier des charges* a pour objectif de traduire cette fonction en termes d'entraînement électrique. De plus, un certain nombre de *contraintes*, liées à l'environnement associé à l'organe entraîné peuvent intervenir: source électrique primaire, atmosphère et température ambiante, contraintes dimensionnelles (diamètre, longueur, masse).

2.2. Régime nominal ou de référence

De nombreux entraînements électriques peuvent être caractérisé par le *régime nominal* ou de *référence* de l'organe entraîné. Il correspond au couple que peut fournir le système en permanence, sans surchauffement d'aucun des composants. Il est associé à une vitesse nominale Ω_N . Cette dernière n'est pas la vitesse maximale possible. Dans la règle et sans précisions particulières, tout moteur doit supporter une survitesse de 20%.

$$\Omega_{\max} = 1,2 \Omega_N$$

La puissance nominale ou de référence vaut donc:

$$P_N = M_N \cdot \Omega_N$$

De façon usuelle, les moteurs sont caractérisés par leur couple nominal et leur vitesse pour les petites puissances, mais par leur puissance nominale et leur vitesse pour les puissances plus élevées (1 kW environ).

Pour beaucoup d'organes entraînés, la puissance (ou le couple) et la vitesse nominales sont des grandeurs clairement définies: une pompe est généralement appelée à fonctionner à puissance et vitesse constantes ou faiblement variables. En revanche, pour d'autres organes entraînés, ce concept n'a pas de sens a priori; seul le comportement transitoire est caractérisé et les concepts de puissance et de vitesse nominale ne sont définis que de façon équivalente, a posteriori.

2.3. Comportement transitoire

Un comportement transitoire sera défini par une évolution d'un ou plusieurs paramètres en une durée inférieure ou comparable à la plus grande constante de temps du système. Très fréquemment, cette dernière correspond à la constante de temps thermique du moteur. Deux types de comportement transitoire sont à considérer:

- un régime exceptionnel, intervenant à une périodicité nettement supérieure à la constante de temps thermique. De façon typique, le démarrage, le freinage avec récupération ou une surcharge de courte durée sont des cas de régime transitoire exceptionnel. En général, il n'influence pas le dimensionnement du moteur, mais celui de certains périphériques – alimentation, commande spécifique –;
- un comportement de référence consistant en une succession de régimes transitoires tels qu'accélération, transfert à vitesse constante, décélération, temps mort. Dans une configuration donnée – transmission, alimentation, commande définies – des grandeurs nominales équivalentes peuvent être déduites. La vitesse nominale correspond à la vitesse maximale. Le couple nominal sera défini comme celui qui conduit aux mêmes pertes, en régime permanent, que les pertes moyennes en régime transitoire;
- une grandeur caractérise une utilisation discontinue d'un entraînement électrique: c'est le taux d'utilisation, qui établit le rapport entre le temps d'enclenchement et une durée de référence, dans la règle 300 s.

$$\tau_{ut} = T_e/T_p \text{ généralement exprimé en \%}$$

Ce concept est fréquemment utilisé pour des transducteurs tels que relais ou des pousseurs, moins fréquemment pour des moteurs. En effet, dans ce dernier cas, les conditions et la durée relative de démarrage ou de freinage jouent un rôle important, non défini par le seul taux d'utilisation.

2.4. Cahier des charges

2.4.1. Données de base

Le cahier des charges comprendra dans la règle les informations suivantes, permettant de caractériser l'organe entraîné en termes d'entraînements électriques :

- le couple maximal ou de référence M_N
- la vitesse nominale Ω_N
- le couple de démarrage M_d
- la tension d'alimentation et le type de source primaire (réseau alternatif, réseau continu, pile, batterie, etc). U_N

Ces éléments constituent les données de base. De nombreuses informations complémentaires permettent de mieux caractériser le système. On peut les classer en caractéristiques de réglage, de démarrage, transitoires et relatives aux éléments périphériques.

2.4.2. Caractéristiques de réglage

Ces caractéristiques sont relatives au comportement en charge du moteur. Elles permettent de définir des plages de vitesse, de couple et de résolution ainsi que les précisions requises.

De façon typique, un domaine de vitesses est défini par deux valeurs limites, par une précision relative et par un taux maximum admissible d'oscillation :

- plage de vitesse Ω_{\min} – Ω_{\max}
- précision relative p %
- taux d'oscillation $\Delta\Omega/\Omega_N$ %

En termes de couple, on impose généralement une caractéristique de couple maximum à fournir en fonction de la vitesse. Le couple oscillatoire dû aux effets réductants ou à la commutation de l'alimentation est fréquemment limité :

- caractéristique couple-vitesse en charge M (Ω)
- couple oscillatoire maximum $\Delta\hat{M}$
ou $\Delta\hat{M}/M_N$

Les exigences en matière de résolution sont généralement fixées à l'arrêt, plus rarement en compor-

tement dynamique. La résolution est généralement fixée en incréments (pas par tour) ou en angle :

- résolution α_p (angle)
 N_p (pas/tour)
- précision (écart de position rapporté au pas élémentaire) $\Delta\alpha/\alpha_p$

Certains cahiers des charges précisent également des contraintes en termes de constantes de temps de réglage.

2.4.3. Caractéristiques de démarrage (de freinage)

L'opération de démarrage a pour objectif d'amener le moteur dans la plage de fonctionnement, en terme de vitesse et de couple. Elle peut faire partie implicitement du domaine usuel de réglage, mais peut s'en distinguer par des contraintes de couple résistant, de couple d'accélération, de temps de transfert ou de précision.

En termes d'organe entraîné, le démarrage est essentiellement caractérisé par les paramètres suivants :

- la caractéristique de couple résistant au démarrage M_d (Ω)
- l'inertie de la charge (ou la masse pour un mouvement linéaire) J_e, m_e
- la fréquence des démarrages (ou durée séparant deux démarrages), éventuellement le nombre de démarrages consécutifs f_d
- le temps de démarrage maximum admissible $T_{d\max}$

Le freinage fait parfois l'objet d'un cahier des charges particulier, s'il ne s'effectue pas par un ralentissement en régime libre.

Il est alors caractérisé de façon symétrique au démarrage :

- caractéristique de couple résistant au ralentissement M_f (Ω)
- temps de freinage (ou caractéristique vitesse-temps) T_f
 Ω_f (t)

- possibilités de récupération d'énergie ;
- conditions d'arrêt : précision, résolution, oscillation, dépassement.

2.4.4 Caractéristiques transitoires

Certains systèmes sont exploités dans un mode correspondant à une succession de régimes transitoires: commandes d'axes, robots, traceurs, etc. Ils sont généralement caractérisés par un cycle type. Ce dernier sera généralement défini comme suit:

- caractéristique de vitesse en fonction du temps $\Omega(t), v(t)$
- caractéristique de couple résistant correspondante $M_r(t)$
- durée du cycle, durée des temps morts ou taux d'utilisation T_{cr}, T_m, τ_{ut}

2.4.5 Caractéristiques des éléments périphériques

Le cahier des charges impose fréquemment certaines contraintes ou caractéristiques relatives aux éléments périphériques.

En ce qui concerne l'alimentation, les conditions portent principalement sur la source primaire d'énergie électrique:

- nature de la source primaire

type de source (réseau alternatif ou continu, batterie, pile)

- niveau de tension U_N
- courant limite I_{max}
- taux de réjection harmonique maximum $\tau_h \%$
- possibilité de récupération ou non.

La transmission est soit imposée a priori dans son principe seulement, dans son exécution (rapport de transmission et inertie) ou au contraire laissée libre. Dans le cas où la transmission est imposée, les éléments suivants doivent la caractériser:

- rapport de transformation α_m/α_e
 α_m/x_e
- inertie rapportée de la transmission J_t, m_t
- rendement de la transmission $\eta(M, \Omega)$

Les capteurs sont parfois intégrés directement à l'organe entraîné. Dans ce cas, relativement rare, toutes les caractéristiques du capteur devront être précisées. Dans un cas plus général, les caractéristiques du capteur choisi découlent principalement des informations relatives aux caractéristiques de réglage et de résolution.

2.4.6 Aspect thermique

Tout entraînement électrique génère des pertes qui doivent être évacuées par l'environnement. Les caractéristiques et les possibilités d'évacuation doivent être précisées. Les principales caractéristiques nécessaires à cet aspect sont les suivantes:

- type d'évacuation des pertes

convection naturelle
convection forcée
échangeur air-air
échangeur air-eau
- température ambiante maximale

T_{amb}

Sans précision, cette valeur est de 40°C.
- classe d'isolation ou température maximale que supporte l'isolation

Y	90°C
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	220

Sans précision, classe B
- atmosphères particulières, corrosives, explosives
- degré de protection, correspondant en particulier à la résistance à l'humidité et à l'eau.

2.4.7 Contraintes

A la différence des caractéristiques, les contraintes ont un aspect limitatif en ce qui concerne la réalisation de certains composants.

Elles seront généralement de nature géométrique:

- contraintes dimensionnelles d'encombrement: diamètre, longueur, volume, masse;
- contraintes relatives à une caractéristique: inertie inférieure ou supérieure à une valeur limite;
- contraintes d'alimentation: courant ou puissance limite;
- contraintes thermiques: pertes limitées, températures ambiantes extrêmes;
- contraintes de bruit;
- contraintes de bruit électromagnétique;
- contraintes économiques...

2.5 Liste type

Le tableau qui suit résume les caractéristiques de l'organe entraîné.

Cahier des charges

1. Données de base

1.1	Couple nominal (de référence)	M_N	=
1.2	Vitesse nominale	Ω_N	=
1.3.	Couple de démarrage	M_d	=
1.4	Tension et nature de l'alimentation	U_N	=

2. Caractéristiques de réglage

2.1	Plage de vitesse	Ω_{\min}	=
		Ω_{\max}	=
2.2	Précision de réglage de vitesse	p	=
2.3	Taux d'oscillation de vitesse	$\Delta \hat{\Omega} / \Omega_N$	=
2.4	Caractéristique couple-vitesse	$M(\Omega)$	
2.5	Couple oscillatoire maximum	$\Delta \hat{M} / M_N$	=
2.6	Résolution	N_p	=
2.7	Précision de positionnement	$\Delta \alpha / \alpha_p$	=
2.8	Constantes de temps		

3. Caractéristiques de démarrage et de freinage

3.1.	Couple résistant au démarrage	$M_d (\Omega)$	
3.2	Inertie de la charge	$J_e =$	$m_e =$
3.3	Fréquence des démarrages	$f_d =$	
3.4	Temps de démarrage maximum	$T_{d\max} =$	
3.5	Caractéristique de couple résistant au freinage	$M_f (\Omega)$	
3.6	Temps de freinage maximum	$T_{f\max} =$	
3.7	Possibilités de récupération d'énergie au freinage	?	
3.8	Conditions d'arrêt, résolution		

4. Caractéristiques transitoires

4.1	Vitesse en fonction du temps	$\Omega(t), v(t)$	
4.2	Couple résistant en fonction du temps	$M_r(t)$	
4.3	Durée du cycle, taux d'utilisation	$T_c =$	$\tau_{ut} =$

5. Caractéristiques des périphériques

5.1	Nature de la source primaire		
5.2	Niveau de tension	U_N	=
5.3	Courant limite	I_{max}	=
5.4	Taux de réjection harmonique max	τ_h	=
5.5	Possibilités et conditions de récupération		
5.6	Rapport de transformation de la transmission	r	=
5.7	Inertie de la transmission	J_t	=
5.8	Rendement de la transmission	$\eta (M, \Omega)$	
5.9	Capteurs		

6. Caractéristique thermique

6.1	Type de refroidissement																
6.2	Température ambiante		T_{amb}														
6.3	Classe d'isolation	Classe:	$T_{max} =$ <table border="0" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>Y</td><td>90°C</td></tr> <tr><td>A</td><td>105</td></tr> <tr><td>E</td><td>120</td></tr> <tr><td>B</td><td>130</td></tr> <tr><td>F</td><td>155</td></tr> <tr><td>H</td><td>180</td></tr> <tr><td>C</td><td>220</td></tr> </table>	Y	90°C	A	105	E	120	B	130	F	155	H	180	C	220
Y	90°C																
A	105																
E	120																
B	130																
F	155																
H	180																
C	220																
6.4	Atmosphère particulière																
6.5	Degré de protection																

7. Contraintes

7.1	Contraintes dimensionnelles
7.2	Inertie
7.3	Alimentation
7.4	Thermique
7.5	Bruit
7.6	Bruit électromagnétique
7.7	Autres

8. Aspects économiques

8.1	Quantités
8.2	Délais
8.3	Coûts

9. Divers

3. La transmission

3.1 Types de transmission et caractérisation

3.1.1 Transmissions tournantes tournantes

La conversion d'un mouvement tournant en un autre mouvement tournant vise plusieurs objectifs possibles :

- réduction ou multiplication de vitesse ;
- démultiplication de la résolution ;
- démultiplication du couple ;
- changement de sens ou de direction de rotation.

Une telle transmission est principalement caractérisée par un rapport de transmission r , défini comme suit :

$$r = \Omega_m / \Omega_e$$

indice m , moteur

indice e , organe entraîné

$$r = \alpha_m / \alpha_e$$

Pour un système idéal, sans pertes, on a :

$$r = M_e / M_m$$

Pour un système réel, cette dernière relation est corrigée comme suit :

$$M_e = M_m \eta_r = r M_m - M_r$$

η_r = rendement de la transmission

M_r = couple de frottement équivalent de la transmission

L'expression ci-dessus correspond à une conversion moteur-organe entraîné. Pour une conversion inverse (freinage), elle devient :

$$M_m = \frac{M_e}{r} \eta_r = \frac{M_e}{r - M'_r}$$

Par conservation de l'énergie cinétique, on a l'expression suivante pour les inerties :

$$J'_m = r^2 J_m$$

J'_m = inertie équivalente au moteur, rapportée à l'organe entraîné

La réalisation d'une transmission tournante tournante peut faire appel à des technologies très différentes :

- engrenages ;
- poulies et courroie (trapézoïdale, crantée, etc.) ;
- poulies et câble.

3.1.2 Transmissions tournantes linéaires

Comme pour la conversion tournante tournante, une conversion tournante linéaire vise différents objectifs possibles, outre le changement de mouvement :

- conversion et contrôle de vitesse ;
- conversion et contrôle de position ;
- génération d'une force.

Ce type de transmission peut être caractérisée par un rapport de transmission k , défini comme suit :

$$k = \Omega_m / v_e \text{ [rad/m]}$$

$$k = \alpha_m / \Delta x_e$$

α_m = pas angulaire

Δx_e = pas linéaire

Idéalement, sans pertes :

$$k = F_e / M_m$$

Pour un système réel, en régime moteur :

$$F_e = k M_m \eta_k = k M_m - F_r$$

F_r = force de frottement équivalente à la transmission

En régime de freinage :

$$M_m = \frac{F_e}{k} \eta_k = F_e / k - M'_r$$

La masse équivalente à l'inertie du moteur a pour expression :

$$m'_m = k^2 J_m$$

Une transmission tournante linéaire peut être réalisée par différentes techniques :

- vis, vis à billes, vis à rouleaux ;
- poulies et courroie ou câble ;
- cabestan ;
- engrenage et crémaillère ;
- came ;
- bielle et excentrique.

3.2 Résolution

3.2.1 Caractérisation

La résolution d'un entraînement électrique, tournant ou linéaire, est définie par le pas élémentaire α_p , x_p ou par le nombre de pas élémentaires sur une distance angulaire (2π) ou linéaire donnée :

$$\begin{aligned} N_p &= 2\pi / \alpha_p && \text{tournant} \\ N_p &= x_{ref} / x_p && \text{linéaire} \end{aligned}$$

Une transmission permet de transformer la résolution.

Pour un système tournant :

$$\begin{aligned} \alpha_{pe} &= \alpha_{pm} / r \\ N_{pe} &= N_{pm} \cdot r \end{aligned}$$

Pour un système linéaire :

$$x_{pe} = \alpha_{pm} / k$$

Si $x_{ref} = 2\pi / k$:

$$N_{pe} = N_{pm}$$

La précision est définie comme l'écart maximum de position, rapporté au pas :

$$p = \Delta\alpha_p / \alpha_p$$

3.2.2 Critères de choix

Pour un moteur, la résolution peut être intrinsèque ou définie par un capteur associé. Elle est intrinsèque pour un moteur pas à pas ou un moteur synchrone autocommuté :

- pour un moteur pas à pas, les résolutions usuelles N_p sont comprises entre 2 et 500 pas/tour ;
- pour un moteur synchrone autocommuté, la résolution implicite est définie par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} N_p &= 2 m p && \text{commutation à } 120^\circ \text{ ou à } 180^\circ \\ N_p &= 4 m p && \text{commutation à } 150^\circ. \end{aligned}$$

Un capteur permet d'obtenir pratiquement n'importe quelle résolution, jusqu'à un ordre de grandeur de 100 000 incréments par tour. Cependant, on peut décomposer cette plage en deux domaines :

- résolution ≤ 1000 incréments par tour, peut être considérée comme peu coûteuse pour des capteurs produits en grandes séries, intégrés ;
- résolutions > 1000 , coûteuse.

D'autres solutions sont envisageables, tels que les capteurs indirects liés à la tension induite de mouvement.

3.2.3 Limites

Théoriquement, le recours à une transmission permet d'obtenir n'importe quelle valeur de résolution. Pratiquement, plusieurs limites physiques restreignent ces possibilités :

- Les jeux qu'introduit toute transmission. Des systèmes de rattrapage de jeux permettent de réduire cet effet, mais en accroissant les frottements et les usures.
- L'élasticité de tout système de liaison et de transmission, qui introduit une imprécision associée aux variations de charge.

3.3 Adaptation de vitesse

Une adaptation de vitesse peut être imposée par la nécessité d'atteindre des vitesses extrêmes, très élevées ou au contraire très faibles. Mais de façon plus générale, l'adaptation de vitesse par une transmission peut simplement être imposée par des critères économiques. En effet (chapitre 4), le volume et le poids d'un moteur, donc également son prix, sont inversement proportionnels à sa vitesse nominale, pour une puissance donnée.

$$V_m \sim 1/\Omega_N$$

Il est donc souvent plus intéressant d'utiliser un moteur rapide et une transmission réduisant la vitesse, plutôt qu'un moteur lent et une transmission directe. Par ailleurs, la plupart des moteurs de série sont caractérisés par une vitesse nominale comprise entre 1000 et 3000 à 6000 t/min. Pour tout autre domaine de vitesse, une adaptation ou une exécution spéciale est indispensable.

3.4 Comportement dynamique

3.4.1 Objectif

L'étude du comportement dynamique a pour objectif de faire intervenir le rôle de la transmission dans le comportement d'ensemble, en particulier en régime d'accélération. Le choix du rapport de transmission influence les temps d'accélération et de freinage. Une optimisation spécifique peut ainsi être réalisée.

3.4.2 Equations dynamiques

De nombreux systèmes doivent principalement assurer des performances d'accélération et de décélération, pratiquement sans entraînement à vitesse constante. C'est un cas fréquent pour les transducteurs ou les systèmes de positionnement.

De façon générale, on peut écrire pour l'équation du mouvement d'un système tournant tournant :

$$(J_e + r^2 J_m) \frac{d\Omega_e}{dt} = rM_m - M_e$$

M_m = couple moteur

M_e = couple résistant de l'organe entraîné

On considère une caractéristique linéaire pour le couple moteur en fonction de la vitesse (figure 1).

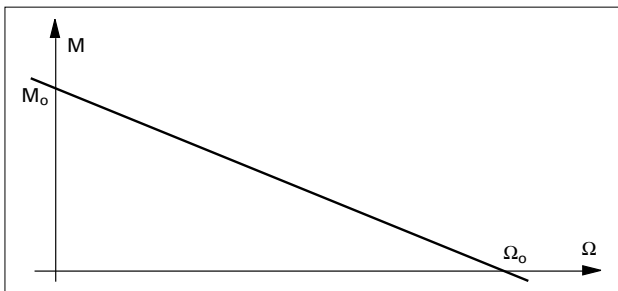


Figure 1

C'est la caractéristique naturelle du moteur à courant continu à excitation séparée. Pour de nombreux autres moteurs, la première partie de la caractéristique de couple peut également être approchée par une droite (figures 2 et 3).

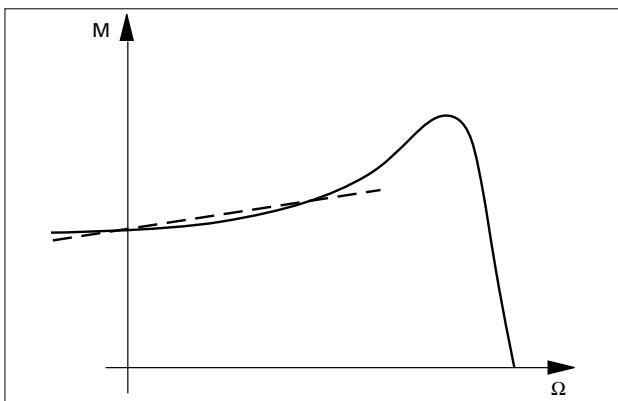


Figure 2

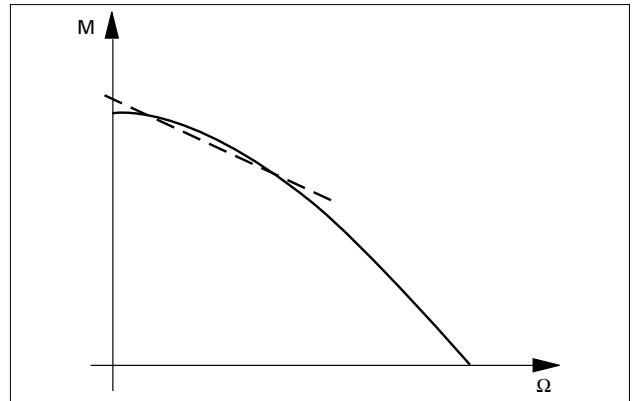


Figure 3

On peut poser :

$$M_m = M_o \left(1 - \frac{\Omega_m}{\Omega_o}\right) = M_o \left(1 - \frac{r \Omega_e}{\Omega_o}\right)$$

Le couple résistant peut fréquemment se réduire à deux termes :

- M_s = couple de charge constant dû à un frottement sec ou à une charge constante (système tournant linéaire, F_s)
- $M_v = \xi \Omega_e$ = couple de frottement visqueux (système tournant linéaire : $F_v = \chi v_e$)

L'équation du mouvement devient :

$$(J_e + r^2 J_m) \frac{d\Omega_e}{dt} = r M_o \left(1 - r \frac{\Omega_e}{\Omega_o}\right) - M_s - \xi \Omega_e$$

$$(J_e + r^2 J_m) \frac{d\Omega_e}{dt} = \Omega_e \left(\frac{r^2 M_o}{\Omega_o} + \xi\right) = r M_o - M_s$$

La solution de cette équation linéaire est :

$$\Omega = \Omega_{es} (1 - e^{-t/\tau_{mec}})$$

avec

- la vitesse stabilisée (solution particulière) :

système tournant $\Omega_{es} = \frac{rM_o - M_s}{\frac{r^2 M_o}{\Omega_o} + \xi}$

système tournant linéaire $v_{es} = \frac{kM_o - F_s}{\frac{k^2 M_o}{\Omega_o} + \chi}$

- la constante de temps mécanique :

système tournant
$$\tau_{mec} = \frac{J_e + r^2 J_m}{\frac{r^2 M_o}{\Omega_o} + \xi}$$

système tournant linéaire
$$\tau_{mec} = \frac{M_e + k^2 J_m}{\frac{k^2 M_o}{\Omega_o} + \chi}$$

- l'accélération à l'enclenchement :

$$a_d = d\Omega/dt, \text{ en } t = 0$$

système tournant
$$\varepsilon_d = \frac{rM_o - M_s}{J_e + r^2 J_m}$$

système tournant linéaire
$$a_d = \frac{kM_o - F_s}{m_e + k^2 J_m}$$

3.4.3 Constante de temps mécanique

La constante de temps mécanique selon l'expression ci-dessus, n'a de sens que pour le cas des figures 1 et 3. Dans un cas plus général, une autre définition doit être donnée. La constante de temps mécanique de référence peut alors être définie comme suit :

$$\tau_{mec} = \frac{J_{eq} \Omega_N}{M_N}$$

Ω_N = vitesse nominale
 M_N = couple nominal
 J_{eq} = inertie équivalente

Cette constante de temps correspond au temps de démarrage pour atteindre la vitesse nominale en appliquant au système le couple nominal.

La constante de temps mécanique associée à la caractéristique de couple de la figure 1 présente une évolution en fonction du rapport de réduction dépendant des inerties et des couples. Elle est représentée à la figure 4.

Trois cas sont à considérer :

a)
$$\frac{J_m}{M_o/\Omega_o} > \frac{J_e}{\xi}$$

Le réducteur doit être un multiplicateur de vitesse. Il conduit alors à une valeur limite égale à J_e/ξ .

b)
$$\frac{J_m}{M_o/\Omega_o} = \frac{J_e}{\xi}$$

Un réducteur n'a aucun effet sur la constante de temps mécanique

c)
$$\frac{J_m}{M_o/\Omega_o} < \frac{J_e}{\xi}$$

Un réducteur assure une diminution de la constante de temps avec une valeur asymptotique égale à

$$\tau_{mec} = \frac{J_m}{M_o/\Omega_o}$$

Cette notion de constante de temps mécanique est caractéristique en matière de démarrage jusqu'à la valeur nominale de la vitesse. Pour concrétiser les performances de démarrage conduisant à une vitesse qui n'est qu'une fraction de la vitesse nominale, on recourra à l'accélération.

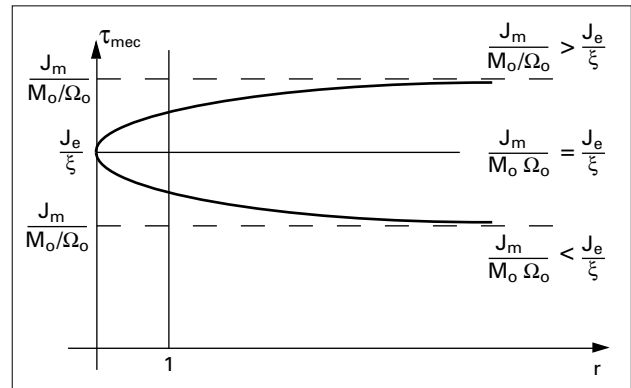


Figure 4

3.4.4 Accélération

L'accélération est caractérisée par la relation du paragraphe 3.4.2. Elle est significative pour des systèmes de transfert de position. Cette expression présente un maximum :

$$\frac{d\varepsilon_d}{dr} = \frac{M_o (J_e + r^2 J_m) - 2 r J_m (r M_o - M_s)}{(J_e + r^2 J_m)^2} - r^2 J_m M_o + 2 r J_m M_s + M_o J_e = 0$$

Une seule solution a un sens ($r > 0$).

$$r_o = \frac{M_s}{M_o} + \sqrt{\left(\frac{M_s}{M_o}\right)^2 + \frac{J_e}{J_m}}$$

Système tournant linéaire :

$$k_o = \frac{F_s}{M_o} + \sqrt{\left(\frac{F_s}{M_o}\right)^2 + \frac{m_e}{J_m}}$$

Si le couple de frottement sec est négligeable, cette expression devient :

$$r_o = \sqrt{\frac{J_e}{J_m}} \quad k_o = \sqrt{\frac{m_e}{J_m}}$$

Cette dernière expression conduit à choisir un rapport de réduction tel que l'inertie du moteur rapportée à la charge soit égale à celle de la charge.

$$r_o^2 J_m = J_e$$

Exemple

Soit un moteur à courant continu (Maxon 2128.910) caractérisé par les grandeurs suivantes :

- $\Omega_o = 5200 \text{ tr/min}$
- $J_m = 8,57 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$
- $M_o = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Nm}$

Ce moteur est destiné à l'entraînement d'une roue marguerite (imprimante) présentant une inertie de $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$. Les frottements secs et visqueux sont négligeables. En moyenne, une telle tête d'impression doit assurer une rotation de $\pi/4$. Celle-ci peut être décomposée en une phase d'accélération sur un angle de $\pi/8$ et une phase de décélération sur la deuxième moitié de l'angle ($\pi/8$).

Un tel moteur ne travaille pratiquement qu'aux régimes d'accélération et de décélération.

L'accélération optimale est obtenue pour un réducteur présentant un rapport égal à :

$$r = \sqrt{\frac{J_e}{J_m}} = \sqrt{\frac{4,5 \cdot 10^{-6}}{8,57 \cdot 10^{-7}}} = 2,29$$

Dans ces conditions, on a les valeurs suivantes :

Réducteur	avec	sans
Accélération Σ_d	$4,58 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$3,36 \cdot 10^3$
Temps d'accélération ($\pi/8$)	13 ms	15,3
Vitesse atteinte Ω_e	59,5 rad/s	51,4

3.5 Couple pulsant

3.5.1 Objectif

Lorsque la charge est caractérisée par un couple variant périodiquement, plusieurs problèmes peuvent en résulter :

- l'oscillation de vitesse résultante doit être réduite. Ceci peut se faire en accroissant l'inertie du système ;
- dans la mesure où la puissance instantanée présente des pointes importantes de brève durée (étampeuses par exemple), une part essentielle de l'énergie correspondante peut être soutirée de l'énergie cinétique stockée dans les masses tournantes. Le moteur travaille alors de façon plus ou moins continue au renouvellement de l'énergie cinétique.

Les deux cas ci-dessous seront analysés dans leur principe permettant le choix des principaux paramètres : inertie et puissance du moteur.

3.5.2 Lissage des oscillations de vitesse

Une charge caractérisée par un couple oscillant peut être associée à l'expression de couple suivante, ne retenant que le terme fondamental :

$$M_r = M_o + \hat{M}_p \sin \omega_p t$$

M_o = couple résistant moyen

\hat{M}_p = amplitude du couple pulsant

ω_p = pulsation du couple pulsant

Le couple moteur moyen M_m sera égal et opposé au couple résistant moyen.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_m - M_r = -\hat{M}_p \sin \omega_p t$$

$$\Omega = \bar{\Omega} + \Delta\Omega$$

$\Delta\Omega$ = oscillation de vitesse

$$\Delta\Omega = \frac{\hat{M}_p}{J\omega_p t} \cos \omega_p t$$

L'amplitude de l'oscillation de vitesse vaut ainsi :

$$\Delta\hat{\Omega} = \frac{\hat{M}_p}{J\omega_p}$$

Si cette oscillation maximale est imposée, on en déduit l'inertie totale:

$$J_t = \frac{\hat{M}_p}{\Delta\hat{\Omega} \cdot \omega_p}$$

Ceci fixe l'inertie nécessaire pour un tel lissage de vitesse. Si cette valeur est supérieure à l'inertie de la charge et du moteur, l'adjonction d'un volant d'inertie supplémentaire est indispensable.

3.5.3 Couple impulsif

Dans le cas d'un entraînement électrique associé à un organe entraîné présentant des pointes de couple importantes et de brève durée, deux paramètres doivent être déterminés de façon à minimiser le coût de l'entraînement:

- le volant d'inertie destiné à stocker l'énergie cinétique;
- la puissance du moteur.

Si l'énergie fournie à l'organe entraîné est prélevée sur l'énergie cinétique, le moteur ne doit pas être à vitesse constante:

- moteur asynchrone;
- moteur à courant continu;
- moteur à courant continu sans collecteur.

Pour les deux premiers cas, la caractéristique couple vitesse est linéaire. Pour le dernier cas, elle peut être approchée par une droite dans la zone utile.

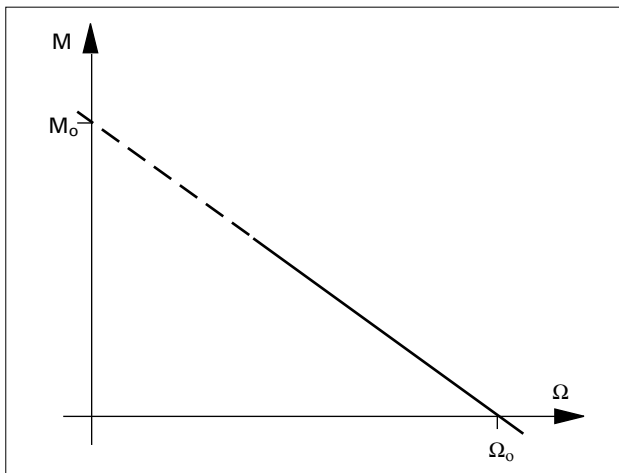


Figure 5

Le bilan énergétique peut être caractérisé comme suit:

$$\Delta W_{mec} = \Delta W_{cin}$$

ΔW_{mec} = énergie mécanique utile par cycle

ΔW_{cin} = variation d'énergie cinétique par cycle

$$\Delta W_{cin} = \frac{1}{2} J_t (\Omega_1^2 - \Omega_2^2)$$

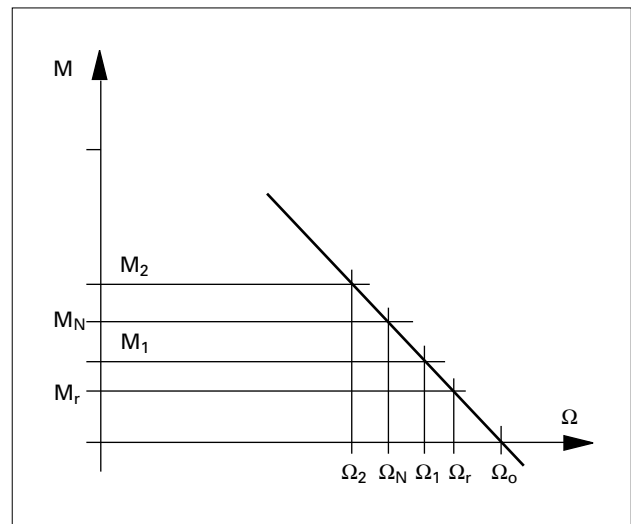


Figure 6

Ω_1 = vitesse maximale atteinte par le moteur sur un cycle

Ω_2 = vitesse minimale atteinte par le moteur sur un cycle

Le régime de ralentissement est généralement de brève durée comparé à la période. Le comportement en est régi par la charge principalement.

Le régime d'accélération correspond à l'expression suivante:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_0 (1 - \Omega/\Omega_0) - M_r$$

On a pour solution:

$$\Omega(t) = \Omega_0 (1 - M_r/M_0) (1 - e^{-t/\tau_{mec}}) + \Omega_e e^{-t/\tau_{mec}}$$

$$\Omega_1 = \Omega(T)$$

T = période

La démarche suivante peut être adoptée en vue du choix des paramètres :

- choix de la puissance du moteur, basé sur l'équilibre énergétique :

$$P = \frac{\Delta W_{\text{mec}}}{T} + \frac{1}{2} Mr (\Omega_1 + \Omega_2)$$

- choix de la vitesse Ω_1 , telle que le couple d'accélération ne soit pas trop faible en fin de période :

$$\Omega_1 \approx \Omega_o - 2 (\Omega_o - \Omega_r) = 2 \Omega_r - \Omega_o$$

$$\Omega_o - \Omega_1 \geq 0,25 (\Omega_o - \Omega_N)$$

- choix de la vitesse Ω_2 inférieure à la vitesse Ω_N ($M_2 > M_N$) :

En première approximation, on peut poser :

$$\frac{1}{2} (M_1 + M_2) = M_N$$

$$M_2 = 2 M_N - M_1$$

ou

$$\Omega_2 = 2 \Omega_N - \Omega_1$$

- l'inertie totale est déterminée par l'expression de l'énergie cinétique :

$$J_t = 2 W_{\text{cin}} / (\Omega_1^2 - \Omega_2^2)$$

En utilisant l'expression de la vitesse en fonction du temps, le choix des grandeurs Ω_1 , Ω_2 , J_t doit être vérifié, en contrôlant le bilan des pertes du moteur. Par un processus itératif, les valeurs finales peuvent être ainsi déterminées.

Transfert de position – Bilan énergétique

Définition de l'objectif

Si un moteur doit assurer un transfert de position (angle α_{tot}) pratiquement à vide dans un temps donné T , le processus le plus simple consiste à réaliser trois phases consécutives (figure 7) :

- une phase d'accélération de durée t_1 ;
- une phase intermédiaire à vitesse constante de durée $T - t_1 - t_2$;
- une phase de décélération de durée t_2 .

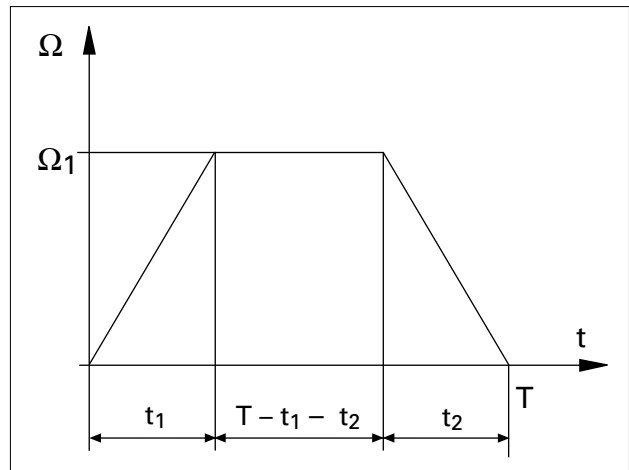


Figure 7

A la limite, la phase à vitesse constante peut présenter une durée nulle (figure 8).

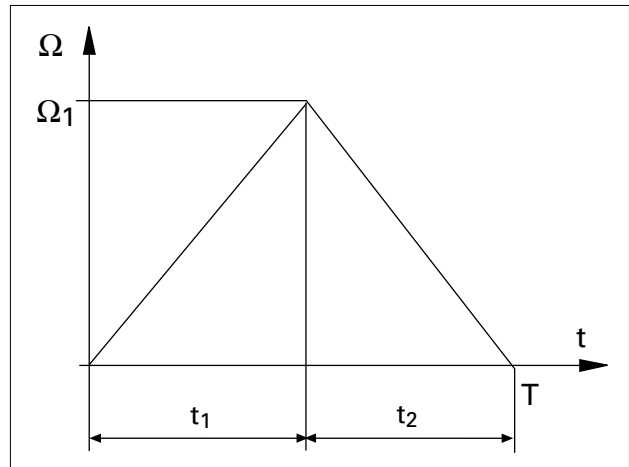


Figure 8

La façon la plus simple de contrôler l'accélération (la décélération) consiste à imposer un courant constant. Pour un moteur de type courant continu avec ou sans collecteur, le couple est proportionnel au courant. Dans ces conditions, le bilan énergétique peut s'écrire comme suit :

$$W_{\text{Joule}} = R I_1^2 t_1 + R I_2^2 t_2$$

R = résistance équivalente au niveau continu

I_1 = courant d'accélération

I_2 = courant de décélération

La condition d'accélération constante est obtenue par un couple, donc un courant constant; celui-ci sera admis le même pour l'accélération et la décélération. Dans ces conditions on peut écrire:

$$W_J = 2 R I^2 t_1$$

L'angle de rotation α_{tot} étant imposé, on a:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 = \alpha_2$$

$$\Omega_{max} = a t_1$$

$$\alpha_{tot} = 2\alpha_1 + \Omega_{max} (T - 2 t_1)$$

$$\alpha_{tot} = a t_1 (T - t_1)$$

La grandeur a est l'accélération angulaire dont l'expression devient:

$$a = \frac{\alpha_{tot}}{t_1 (T - t_1)} = M/J$$

M = couple d'accélération = $k I$

J = inertie totale

k = constante de couple [Nm/A]

$$I = M/k = \frac{J \alpha_{tot}}{k t_1 (T - t_1)}$$

L'énergie dissipée devient ainsi:

$$W_j = 2 R \frac{J^2 \alpha_{tot}^2}{k^2 t_1 (T - t_1)^2}$$

Le système présente une consommation minimale pour les conditions suivantes:

$$dW_J/dt_1 = 0$$

Le numérateur de l'expression doit être nul:

$$3 t_1^2 - 4 t_1 T + T^2 = 0$$

Les solutions sont:

$$t_1 = T/3 \text{ et } t_1 = T$$

Seule la solution $t_1 = T/3$ a un sens.

Dans ces conditions, l'énergie dissipée dans la résistance équivalente vaut alors:

$$W_{Jmin} = \frac{27 R J^2 \alpha_{tot}^2}{2 k^2 T^3}$$

$$t_1 = T/3$$

A titre de comparaison, pour une marche en triangle (cf. figure 8), on obtient:

$$W_{J1/2} = \frac{16 R J^2 \alpha_{tot}^2}{R^2 T^3}$$

$$t_1 = T/2$$

$$W_{J1/2} = \frac{32}{27} W_{Jmin}$$

4. Conception globale d'un entraînement électrique

4.1. Introduction

Le choix d'un entraînement électrique ne peut pas être dissocié de ses périphériques :

- la transmission, tournante ou linéaire ;
- l'alimentation ;
- la commande.

Lorsqu'un temps de transfert (temps de déplacement) est imposé pour une charge donnée, le choix du couple du moteur et du rapport de transmission correspondant constituent deux inconnues liées.

Si le moteur est connu à priori, il est possible de montrer que l'optimum satisfaisant la condition de transfert de position dans un temps donné correspond à la relation suivante :

$$r_{\text{opt}} = \sqrt{J_m / J_e}$$

J_m = inertie du moteur

J_e = inertie de l'organe entraîné

Si cette relation est bien connue, elle ne correspond à aucune réalité pratique. En effet, pour un organe entraîné donné, le moteur n'est pas connu a priori. Le choix du moteur et celui de la transmission sont libres et à optimiser en fonction de plusieurs critères. Les paragraphes qui suivent décrivent une méthodologie générale d'approche.

4.2 Equations dynamiques

4.2.1 Transfert de position

On associe un transfert de position à un profil de vitesse trapézoïdal (figure 9). L'accélération et la décélération s'effectuent à couple constant, correspondant aux limites du moteur et de l'alimentation. Le tronçon à vitesse constante correspond à la vitesse limite du moteur. Il est possible de montrer [1] que le bilan énergétique est optimum lorsque les temps respectifs d'accélération (T_a), à vitesse constante ($T_b - T_a$) et de freinage ($T_t - T_b$) sont égaux :

$$T_a = T_t / 3 = \text{temps d'accélération}$$

$$T_t = \text{durée totale du transfert}$$

$$T_b = \text{instant de début du freinage}$$

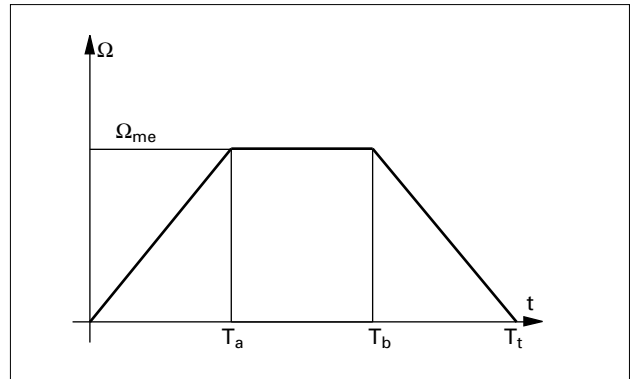


Figure 9

Dans ces conditions, les pertes du moteur sont minimales.

Soit α_e l'angle total de déplacement (ou x_e le déplacement linéaire total) de l'organe entraîné. Par intégration, on a les valeurs suivantes :

$$\alpha_e = 2 T_a \Omega_{me} = \frac{2}{3} T_t \Omega_{me}$$

$$\left(x_e = 2 T_a v_{me} = \frac{2}{3} T_t v_{me} \right)$$

$$\Omega_{me} = \frac{3}{2} \frac{\alpha_e}{T_t} = \text{vitesse maximale}$$

$$\left(v_{me} = \frac{2}{3} \frac{x_e}{T_t} \right)$$

4.2.2 Equation de mouvement avec transmission

On définit le rapport de transmission pour un système tournant (linéaire) comme suit :

$$r = \Omega_m / \Omega_e \text{ [-]} \quad (k = \Omega_m / v_e \text{ [rad/m]})$$

$$\Omega_m = \text{vitesse du moteur} \quad \Omega_e (v_e) = \text{vitesse de l'organe entraîné}$$

$$J_e = \text{inertie entraînée}$$

$$J'_e = \text{inertie rapportée au moteur}$$

$$= J_e / r^2 \quad (J'_e = m_e / k^2)$$

$$J_{\text{tot}} = J_m + J_r + J_e / r^2 \quad (J_{\text{tot}} = J_m + J_r + m_e / k^2)$$

$$J_r = \text{inertie du réducteur}$$

L'équation du mouvement devient:

$$J_{\text{tot}} \frac{d\Omega_m}{dt} = M_m - M_f/r$$

M_m = couple moteur = M_o = couple maximum
 M_f = couple de frottement de l'organe entraîné

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = r \frac{d\Omega_e}{dt} = r \frac{\Omega_{me}}{T_a}$$

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = k \frac{V_{me}}{T_a}$$

D'où l'équation liant les principaux paramètres du transfert:

système tournant:

$$(J_{mt} + J_r + J_e/r^2) r\Omega_{me}/T_a = M_o - M_f/r$$

système tournant linéaire:

$$(J_m + J_r + m_e/k^2) kv_{me}/T_a = M_o - F_f/k$$

L'équation ci-dessus établit la corrélation entre le couple du moteur et le temps de transfert souhaité ($T_t = 3 T_a$). Elle contient cependant une inconnue indésirable: l'inertie du moteur J_m , qui dépend du couple M_o . L'objectif consiste à établir une corrélation entre couple et inertie.

4.3. Relation couple-inertie

4.3.1 Couple en fonction des dimensions

Moteur polarisé

En se basant sur les lois de similitude [2] on peut poser, en comparant deux moteurs de taille différente, caractérisés par les diamètres respectifs d' et d :

$$d'/d = d^*$$

Pour deux moteurs homothétiques, il est possible de définir la loi d'évolution des principaux paramètres. En se référant à l'annexe, paragraphe 4.71, on obtient pour le couple, en valeur relative:

$$M^* = d^{*3,5}$$

(à échauffement constant).

En valeur absolue:

$$M = k_{Mp} d^{3,5}$$

Moteur réluctant

Pour un moteur réluctant (ou un moteur asynchrone), ces mêmes lois deviennent:

$$d'/d = d^*$$

$$M^* = d^{*4}$$

(à échauffement constant)

En valeur absolue, on obtient:

$$M = k_{Mr} d^4$$

Forme générale

En regroupant les deux résultats précédents, on peut poser:

$$M = k_M d^n$$

$n = 3,5$ ou 4 selon le type de moteur.

4.3.2 Inertie en fonction des dimensions

Pour un cylindre massif, on a l'expression suivante pour l'inertie:

$$J_m = m \frac{d^2}{8} = \pi \frac{d^2}{4} l \gamma \frac{d^2}{32}$$

γ = masse spécifique [kg/m³]

l = longueur = εd

$$J_m = \frac{\pi \gamma \varepsilon}{32} d^5 = k_J d^5$$

4.3.3 Corrélation couple-inertie

Partant de l'expression couple-diamètre, on peut écrire:

$$M = k_M d^n$$

$$d = (M/k_M)^{1/n}$$

En substituant dans l'expression de l'inertie, il vient:

$$J = k_J (M/k_M)^{5/n}$$

L'inertie peut ainsi s'exprimer en fonction du couple.

4.4 Relation couple – rapport de transmission

L'équation finale du paragraphe 4.3.2 peut s'exprimer en fonction du couple et du rapport de transmission uniquement, grâce à la relation du paragraphe 4.3.3 :

Système tournant :

$$[k_J (M_o/k_M)^{5/n} + J_r + J_e/r^2] r \Omega_{me} = (M_o - M_f/r) T_a$$

Pour un système tournant linéaire :

$$[k_J (M_o/k_M)^{5/n} + J_r + J_e/k^2] k v_{me} = (M_o - F_f/k) T_a$$

Cette relation établit une corrélation entre le couple du moteur et le rapport de transmission. Si l'on tire l'expression du rapport de transmission en fonction du couple, on a :

$$J_r + k_J (M_o/k_M)^{5/n} = J_{mr} (M_o) = J_{mr} \\ J_{mr} \Omega_{me} r^2 - M_o T_a r + J_e \Omega_{me} + M_f T_a = 0$$

Deux solutions sont possibles :

$$r = \frac{M_o T_a \pm \sqrt{M_o^2 T_a^2 - 4 J_{mr} \Omega_{me} (J_e \Omega_{me} + M_f T_a)}}{2 J_{mr} \Omega_{me}}$$

Une solution existe à condition que l'expression sous la racine soit positive. Une valeur limite apparaît pour une racine nulle.

$$M_o^2 T_a^2 - 4 [J_r + k_J (M_o/k_M)^{5/n}] (J_e \Omega_{me} + M_f T_a) \Omega_{me} = 0$$

Une valeur limite de M_o peut satisfaire l'équation ci-dessus, soit M_{olim} , à laquelle correspond un rapport de transmission limite :

$$r_{lim} = \frac{M_{olim} T_a}{2 J_{mr_{lim}} \Omega_{me}}$$

Pour toute valeur $M_o > M_{olim}$, une solution existe. La valeur limite correspond donc au plus petit moteur possible.

Pour M_o quelconque, il existe deux valeurs du rapport r :

$$r_1 = \frac{M_o T_a + \sqrt{\dots}}{2 J_{mr} \Omega_{me}} \quad \text{et} \quad r_2 = \frac{M_o T_a - \sqrt{\dots}}{2 J_{mr} \Omega_{me}}$$

Seule la valeur r_2 présente un intérêt. En effet, l'énergie cinétique au démarrage est toujours inférieure pour le rapport r_2 :

$$W_{cin} r_2 < W_{cin} r_1$$

L'énergie cinétique au démarrage a pour expression :

$$W_{cin} = \frac{1}{2} J_{tot} \Omega_{me}^2 = \frac{1}{2} [k_J (M_o/k_M)^{5/n} + J_r + J_e/r^2] r^2 \Omega_{me}^2$$

4.5 Exemple

L'exemple traité est emprunté à une application d'entraînement linéaire pour une machine à poinçonner des tôles.

Masse entraînée	$m_e = 30 \text{ kg}$
Course	$x_e = 50 \text{ mm}$
Temps de transfert	$T_f = 0,25$ $T_a = 0,0667 \text{ s}$
Force de frottement	$F_f = 30 \text{ N}$

La transmission est assurée par une vis à billes.

Deux cas sont considérés, pour un moteur de type synchrone autocommuté à aimants permanents :

$$M_o = k_M d^{3,5}$$

$$k_{M1} = 1,2 \cdot 10^5$$

Moteur avec un couple volumique élevé

$$k_{M2} = 6 \cdot 10^4$$

Moteur avec un couple volumique moyen

Dans les deux cas, l'inertie de la transmission a été négligée. Le coefficient d'inertie vaut, pour les deux cas :

$$J = k_J d^5 \quad k_J = 768$$

4.5.1 Moteur à performances élevées

Pour ce moteur, on obtient les valeurs limites suivantes :

$$M_{olim} = 55,3 \text{ mNm}$$

$$k_{lim} = 7,22 \cdot 10^3 \quad \text{correspondant à un pas de la vis de } 0,87 \text{ mm}$$

$$d_{lim} = 15,5 \text{ mm}$$

$$J_{mlim} = 6,8 \cdot 10^{-7} \text{ kg m}^2$$

Cette solution limite n'est pas acceptable, par suite d'une vitesse maximale de 25 800 t/min.

La figure 10 présente le couple, la vitesse et le diamètre du rotor en fonction du pas de la vis (ou du rapport de transmission).

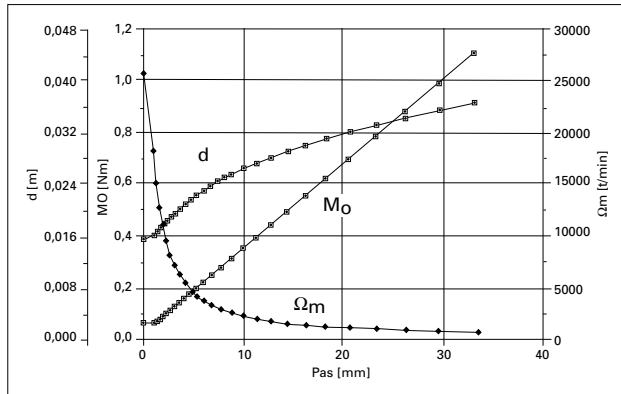


Figure 10: Couple de démarrage, diamètre d'alésage et vitesse maximale en fonction du pas de la vis $k_M = 1,2 \cdot 10^5$.

Si on limite la vitesse maximale à 6000 t/min et le pas de la vis maximum à 15 mm, on obtient une solution comprise entre les deux limites suivantes:

- pas 4 mm $M_o = 0,152 \text{ Nm}$
 $\Omega_m \approx 5600 \text{ t/min}$
 $d = 21 \text{ mm}$
 $J_m = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$
 Energie au démarrage: 2,6 Joule
- pas 15 mm $M_o = 0,510 \text{ Nm}$
 $\Omega_m \approx 1500 \text{ t/min}$
 $d = 29,2 \text{ mm}$
 $J_m = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$
 Energie de démarrage: 2,3 Joule

La solution correspondant au pas de 4 mm est la plus intéressante en termes d'investissement (moteur plus petit).

4.5.2 Moteur à performances moyennes

Les valeurs limites pour ce moteur sont:

$$M_{olim} = 313 \text{ mNm}$$

$$k_{lim} = 1,28 \cdot 10^3$$

correspondant à un pas de la vis de 4,93 mm

$$d_{lim} = 31 \text{ mm}$$

$$J_{mlim} = 2,19 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$$

Energie au démarrage: 4,6 Joule

La vitesse maximale correspondante, 4570 t/min, est de valeur acceptable.

La figure 11 présente également les caractéristiques de couple, de vitesse et de diamètre en fonction du pas de la vis.

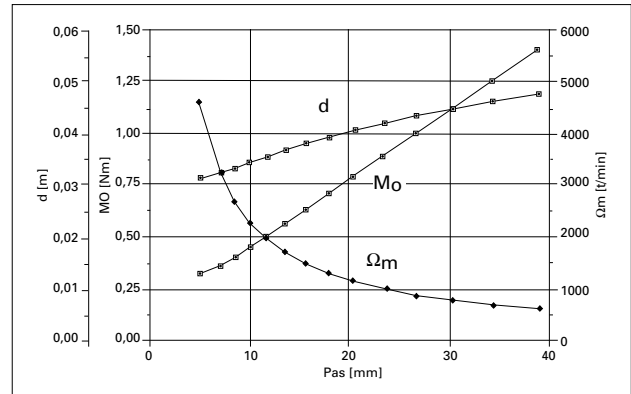


Figure 11: Couple de démarrage, diamètre d'alésage et vitesse maximale en fonction du pas de la vis $k_M = 6 \cdot 10^4$.

Si le pas est également limité à 15 mm, les valeurs correspondantes deviennent:

- pas 15 mm $M_o = 610 \text{ mNm}$
 $\Omega_m \approx 1500 \text{ t/min}$
 $d = 37 \text{ mm}$
 $J_m = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$
 Energie au démarrage: 2,8 Joule

4.6 Conclusions

La méthodologie décrite présente l'avantage de permettre une analyse sans a priori de la solution optimale pour le choix d'un moteur et d'une transmission. S'il n'y a généralement pas d'optimum, il existe en revanche une solution la plus favorable compte tenu de contraintes telles que vitesse maximale, résolution, pas de vis, transmission limite, etc. La démarche illustre l'importance des performances du moteur (facteur k_M), associées au type de construction.

Cette méthodologie doit bien sûr encore être confrontée aux catalogues, qui discrétisent les réalisations.

4.6.1 Liste des symboles

d	diamètre
J	inertie
j	densité du courant
k	coefficient
k	rapport de transmission tournant linéaire
l	longueur
m	masse
n	exposant
r	rapport de transmission tournant tournant
S	surface
t	temps
T	instant
ΔT	échauffement
v	vitesse
x	position, course
W	énergie
α	angle
β	coefficient de convection
γ	masse spécifique
ε	rapport l/d
Λ	perméance
θ	potentiel magnétique
Ω	vitesse angulaire

4.6.2 Références bibliographiques

- [1] M. Jufer: « Entraînements électriques ». Cours EPFL, 1990.
- [2] M. Jufer: « Transducteurs électromécaniques ». Traité d'Electricité, Vol. IX, 1985, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.
- [3] M. Jufer: « Moteurs électriques ». Cours EPFL, 1991.

Indices

a	accélération
a	aimant
b	bobinage
b	freinage
e	relatif à l'organe entraîné
f	de frottement
J	d'inertie
lim	limite
M	de couple
m	moteur
p	polarisé
r	réluctant
f	de transfert
o	à vitesse nulle
r	rapporté

4.7 Annexe

4.7.1 Moteur polarisé – lois de similitude

Le couple vaut:

$$M = \frac{d\Lambda_{ab}}{d\alpha} \theta_a \theta_b$$

Λ_{ab} = perméance mutuelle entre aimant et bobine
 θ_a = potentiel de l'aimant
 θ_b = potentiel de la bobine

$$\Lambda_{ab}^* = \left(\frac{\mu S}{1} \right)^* = d^*$$

$$\theta_a^* = (H_o I_a)^* = H_o^* I_a^* = 1 \cdot d^* = d^*$$

$$\theta_b^* = (J S)^* = J^* d^{*2}$$

D'où:

$$M^* = J^* d^{*4}$$

A échauffement constant, selon l'annexe 4.7.3, on a:

$$J^* = 1/\sqrt{d^*}$$

D'où:

$$M^* = d^{*3,5}$$

En se référant à [1], le coefficient de proportionnalité entre couple et $d^{3,5}$ est donné en fonction des dispositions constructives:

$$M = k_{Mp} d^{3,5}$$

4.7.2 Moteur réductant – lois de similitude

Le couple vaut:

$$M = \frac{1}{2} \frac{d\Lambda}{d\alpha} \theta_b^2$$

Λ = perméance
 θ_b = potentiel du bobinage
 $\Lambda^* = d^*$
 $\theta_b^* = J^* d^{*2}$
 $M^* = J^{*2} d^{*5}$

A échauffement constant, selon l'annexe 4.7.3 ci-dessous, on a:

$$J^* = 1/\sqrt{d^*}$$

D'où:

$$M^* = d^{*4}$$

En se référant à [1], le coefficient de proportionnalité est donné:

$$M = k_{Mr} d^4$$

4.7.3 Echauffement – lois de similitude

L'échauffement ΔT peut s'exprimer comme suit, en ne prenant en compte que la convection de surface:

$$\Delta T = \frac{\text{Pertes}}{\beta S_\beta}$$

Pertes = $P_{\text{Joule}} = 3 J^2 V$
 V = volume de cuivre
 β = coefficient de convection [$W/m^2 K$]
 S_β = surface de convection
 $P_J^* = J^{*2} d^{*3}$
 $\beta^* = 1$
 $S_\beta^* = d^{*2}$
 $\Delta T^* = J^{*2} d^*$

Si l'on impose un échauffement indépendant de la taille (limite thermique des isolants), on a:

$$\Delta T^* = 1 = J^{*2} d^*$$

$$J^* = 1/\sqrt{d^*}$$

5. Prédimensionnement du moteur

5.1. Objectif

Dans le cadre du choix des composants d'un entraînement électrique, il y a deux cas pour lesquels il est nécessaire de connaître a priori les caractéristiques du moteur :

- la comparaison de performances telles qu'accélération et couple massique ou volumique de différents types de moteurs ;
- la détermination du couple d'accélération d'un moteur en prenant en considération son inertie propre.

De façon traditionnelle, les deux problèmes sont résolus par un processus d'itérations successives en recourant à l'usage de catalogues.

La méthode proposée ci-après permet une approche plus systématique et évite des comparaisons hasardeuses, selon le choix de catalogues disparates. Elle est basée sur l'expression respective du couple et de l'inertie en fonction du diamètre d'alésage du moteur, en prenant en compte les principaux paramètres de la structure.

$$M_o = f_1(d) \quad \text{le couple nominal ou d'accélération}$$

$$J = f_2(d) \quad \text{l'inertie}$$

En utilisant les deux expressions ci-dessus, il est possible d'éliminer l'une des deux grandeurs :

$$J = f_3(M_o)$$

De plus, les deux fonctions de couple et d'inertie permettent la comparaison des principaux types de moteurs.

De façon générale, on admettra une longueur d'empilage proportionnelle au diamètre d'alésage :

$$l = \alpha d$$

5.2. Inertie

Dans de nombreux cas, l'inertie du rotor d'un moteur peut être assimilée à celle d'un cylindre homogène équivalent :

$$J = m \frac{d^2}{8}$$

$$m = \frac{\pi d^2}{4} \alpha \rho = \frac{\alpha \pi \rho}{4} d^3$$

$$J = \frac{\alpha \pi \rho}{4} d^5$$

Pour une structure hétérogène marquée du rotor, un calcul détaillé doit être entrepris. Cependant, dans tous les cas, l'inertie peut prendre la forme ci-après :

$$J = K_J d^5$$

5.3 Couple

5.3.1 Marche à suivre

Le couple peut être caractérisé par deux valeurs typiques :

- le couple nominal associé à la vitesse nominale ;
- le couple de démarrage (figure 12).

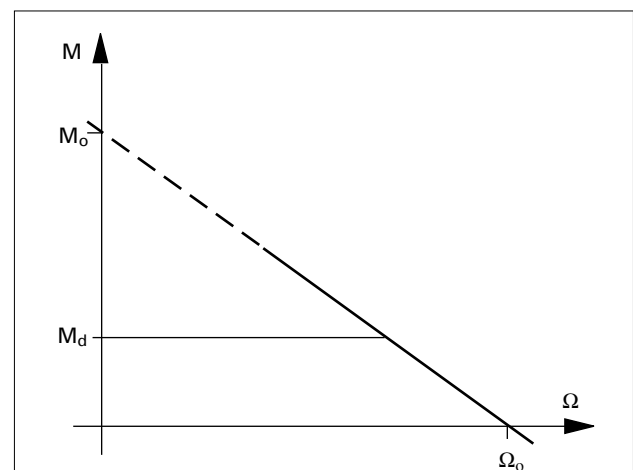


Figure 12

Cette dernière grandeur dépendra de la fréquence des démarrages, des aspects thermiques associés au mode d'utilisation du moteur et de l'alimentation.

L'expression du couple d'un moteur pour un régime donné dépendra des principaux paramètres suivants :

- les dimensions et plus particulièrement le diamètre d'alésage et la longueur d'empilage ;
- le choix des matériaux, aimants, fer et isolants.

Cette expression sera bien entendu associée au principe et à la structure du moteur. Dans les paragraphes qui suivent, l'intention n'est pas de donner un formulaire, mais d'explicitier la démarche permettant d'établir une corrélation entre dimensions, matériaux et performances.

Les moteurs suivants seront analysés :

- moteur synchrone à aimants permanents ;
- moteur réductant ;
- moteur à courant continu à aimants ;
- moteur asynchrone.

5.3.2 Moteur synchrone à aimants permanents

Par la relation de Laplace, le couple peut s'exprimer comme suit :

$$M = \int idl B \frac{d}{2} = \Theta l \bar{B} \frac{d}{2}$$

L'induction créée par l'aimant permanent est liée à l'induction rémanente (figure 13).

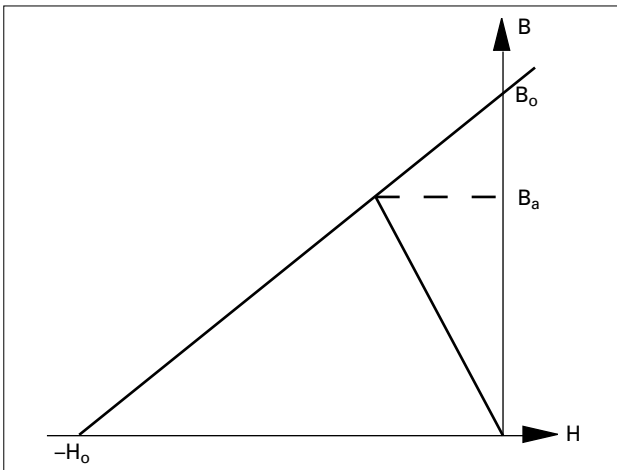


Figure 13

Le potentiel magnétique est lié à la section des encoches et à la densité de courant.

On admettra

$$B_a = 0,7 B_0$$

Θ = potentiel magnétique résultant

$$= K_{cu} S_{enc} J$$

J = densité de courant efficace

k_{cu} = coefficient de remplissage du cuivre

S_{enc} = section totale des encoches

$$S_{enc} = \tau_{enc} \cdot h_{enc}$$

τ_{enc} = pas total des encoches

h_{enc} = hauteur d'encoche = $\gamma_h d$

γ_h = 0,15 à 0,25

$\tau_{enc} = \pi (d + h_{enc}) - b_{dtot}$

$$b_{dtot} = B_a \frac{\pi d}{k_f B_f}$$

k_f = coefficient du foisonnement du fer = 0,9 à 0,95

B_f = induction du fer dans les dents = 1,6 à 1,8 T

La largeur totale des encoches vaut ainsi :

$$\tau_{enc} = \pi d (1 + \gamma_h) - \pi d \frac{B_a}{k_f B_f} = \pi d \left(1 + \gamma_h - \frac{B_a}{k_f B_f} \right)$$

$$S_{enc} = \pi d^2 \gamma_h \left(1 + \gamma_h - \frac{B_a}{k_f B_f} \right)$$

$$\Theta = J k_{cu} \pi d^2 \gamma_h \left(1 + \gamma_h - \frac{B_a}{k_f B_f} \right)$$

Le couple vaut ainsi, en posant $l = \alpha d$ et en admettant une distribution sinusoïdale de l'induction :

$$\begin{aligned} \hat{M} &= J B_a \frac{\pi \gamma_h \alpha}{2} \left(1 + \gamma_h - \frac{B_a}{k_f B_m} \right) d^4 \frac{\pi}{2} = \\ &= J B_a \alpha \gamma_h \left(1 + \gamma_h - \frac{B_a}{k_f B_m} \right) = k_M J B_a d^4 \end{aligned}$$

Dans l'expression ci-dessus, on a admis implicitement que l'induction dans l'entrefer était égale à celle de l'aimant. C'est le cas pour une construction à magnétisation radiale. Pour une magnétisation tangentielle, on aura :

$$B = \gamma_B B_a$$

Au chapitre 4, § 4.3.4 du volume IX du Traité d'électricité (PPR), il est montré qu'un échauffement constant conduit à une expression de la densité de

courant proportionnelle à la racine de l'inverse du diamètre :

$$J \sim \sqrt{1/d}$$

Dans ces conditions, le couple prend l'expression suivante :

$$\hat{M} = K'_M B_a d^{3,5}$$

L'analyse qui précède a pour objectif d'illustrer complètement la démarche permettant la corrélation entre couple, inertie et dimensions, en prenant en compte divers paramètres magnétiques, électriques et thermiques. Il sera procédé de même pour les autres types de moteurs, mais sans introduire tous les détails relatifs aux calculs numériques. Seuls les paramètres principaux (diamètre d , densité de courant J , induction créée par les aimants) seront corrélés sans l'introduction de valeurs numériques pour les coefficients.

5.3.3 Moteurs réluctants

Le moteur réluctant est caractérisé par des structures dentées au stator et au rotor, ou par un stator générant un champ tournant et un rotor à réluctance variable.

Le phénomène de saturation influence particulièrement la caractéristique de couple de tels moteurs par les effets suivants :

- une distorsion des caractéristiques en fonction de l'intensité du courant ;
- les effets de frange qui ne permettent pas une extrapolation vers les petites tailles.

L'expression du couple peut s'écrire, pour une phase :

$$M = \frac{1}{2} \frac{\partial \Lambda}{\partial \alpha} \Theta_b^2$$

Le potentiel magnétique peut s'écrire :

$$\Theta_b \sim JS_b \sim J\tau_{enc} \cdot h_{enc} \cdot k_{cu}$$

$$\tau_{enc} \sim d$$

$$h_{enc} \sim d$$

$$\Theta_b \sim Jd^2$$

En admettant une variation sinusoïdale de la perméance, il vient :

$$\Lambda = \hat{\Lambda} \sin p \alpha$$

$$p = \text{nombre de périodes rotoriques}$$

$$\hat{\Lambda} = \frac{\mu_o \cdot \tau_{dtot} \cdot I}{\delta}$$

$$\tau_d = \text{pas dentaire} \sim d$$

$$l = \text{longueur active} \sim d$$

$$\delta = \text{entrefer} \sim \delta_o + \beta_d$$

On admettra un entrefer proportionnel à d en première approximation.

$$\hat{\Lambda} \sim d$$

$$\frac{d\Lambda}{d\alpha} \sim p d$$

La proportionnalité au terme p doit être corrigée par la limitation liée aux effets de franges.

Finalement le couple peut s'exprimer comme suit :

$$M \sim pd^5 J^2$$

A nouveau, pour des raisons thermiques, la densité de courant évolue selon la relation suivante :

$$J \sim d^{-1/2}$$

$$d'où$$

$$M \sim pd^4$$

5.3.4 Moteur à courant continu

Pour un moteur à courant continu à aimants permanents, les caractéristiques sont comparables à celles d'un moteur synchrone à aimants permanents :

$$M \sim B\Theta \frac{d}{2} l$$

$$M \sim BJd^2 \frac{d}{2} \alpha d$$

$$M \sim BJd^4$$

A nouveau, à échauffement constant :

$$J \sim d^{-1/2}$$

$$M \sim Bd^{3,5}$$

5.3.5 Moteur asynchrone

On appliquera la loi de Laplace entre les potentiels statorique (indice s) et rotorique (indice r):

$$M = \frac{d}{2} \Theta_r I B_s$$

B_s = induction créée par le potentiel statorique

$$B_s = \Theta_s / S = \lambda_s \Theta_s / S$$

$$B_s \sim d J_s d^2 / d^2 \sim J_s d$$

$$\Theta_r \sim J_r d^2$$

$$M \sim J_s J_r d^5$$

Si l'échauffement est constant, on obtient:

$$M \sim d^4$$

5.4 Relation couple-inertie

Le couple et l'inertie ont été tous deux exprimés en fonction du diamètre du moteur, en faisant intervenir l'ensemble des caractéristiques constructives. On peut poser:

$$M = K_M d^n$$

$$J = K_J d^5$$

avec $n = 3,5$ moteur synchrone ou à courant continu
 $n = 4$ moteur réluctant ou asynchrone

En éliminant le diamètre, il est possible d'exprimer l'inertie en fonction du couple:

$$d = (M/K_M)^{1/n}$$

$$J = K_J (M/K_M)^{10/7} \quad \text{moteur synchrone ou à courant continu à aimants permanents}$$

$$J = K_J (M/K_M)^{5/4} \quad \text{moteurs réluctants ou asynchrones}$$

Par ailleurs, l'analyse des expressions respectives de couple de deux moteurs permet de mettre en évidence leurs avantages respectifs en fonction de la taille. On peut ainsi affirmer a priori qu'un moteur réluctant sera plus intéressant qu'un moteur synchrone à aimants permanents pour de grandes puissances. La puissance limite dépendra des caractéristiques constructives respectives, résumées par le coefficient K_M . Par ailleurs, il est important de rappeler que deux moteurs de taille très différente ne seront jamais homothétiques l'un de l'autre.

6. Echauffement et limites thermiques

6.1 Importance de l'échauffement

L'échauffement est le principal facteur limitatif de la puissance admissible pour un moteur. L'échauffement est défini par les pertes et la structure de la machine. C'est la tenue thermique des isolants qui impose une limite maximum de température. L'étude du comportement thermique des machines électriques permet de définir l'évolution transitoire et d'éventuelles surcharges admissibles.

Le comportement thermique fait principalement appel à trois phénomènes :

- la conduction ;
- la convection ;
- le rayonnement.

6.2 Equations thermiques

6.2.1 Conduction

La conduction au travers d'un milieu d'épaisseur e_1 et de surface S_1 est régie par l'équation suivante :

$$P = cV \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\lambda S_1}{e_1} (T - T_e)$$

P = pertes du système	[W]
V = volume intéressé par l'accumulation d'énergie thermique	[m ³]
T = température	[K]
λ = conductivité thermique	[W/mK]
T_e = température externe	[K]
c = chaleur spécifique volumique	[J/m ³ K]
S_1 = surface de conduction	[m ²]
e_1 = distance du transfert de chaleur	[m]

Cette équation est caractéristique du phénomène de conduction interne à une machine.

6.2.2 Convection et rayonnement

La convection et le rayonnement sont les phénomènes caractéristiques de l'évacuation thermique des pertes vers l'air ambiant. On peut définir un coefficient global pour ces deux phénomènes, caracté-

risé comme suit et l'équation caractéristique de la convection s'écrit :

$$P = cV \frac{\partial T}{\partial t} + \alpha S_2 (T - T_e)$$

α = coefficient de convection résultant $\approx 12 + 6 v^{0,8}$	[W/m ² K]
v = vitesse de l'air	[m/s]
S_2 = surface de convection	

6.2.3 Phénomène résultant

La conduction et la convection apparaissent simultanément dans un moteur électrique. Il est possible de réduire l'ensemble du phénomène à une convection équivalente. Dans une première phase, on peut considérer la conduction et la convection comme deux phénomènes de conduction en série. La résistance thermique peut s'écrire, en régime permanent :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P}$$

ΔT = écart thermique

Comme les pertes sont évacuées au travers des deux résistances de conduction et de convection, il vient :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$$

$$R_{th1} = \frac{e}{\lambda S_1}$$

$$R_{th2} = \frac{e}{\alpha S_2} = \frac{e_2}{\lambda S_2}$$

$$e_2 = e/\alpha$$

La résistance thermique totale peut s'écrire :

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{e}{S_1} + \frac{\lambda}{\alpha S_2} \right)$$

On peut réduire le phénomène à une convection résultante, associée à la surface S_2 .

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha_{eq} S_2} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{e}{S_1} + \frac{\lambda}{\alpha S_2} \right)$$

$$\alpha_{eq} = \frac{1}{\lambda S_1 + \frac{1}{\alpha}}$$

$$P = cV \frac{\partial T}{\partial t} + \alpha_{eq} S_2 (T - T_e)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\alpha_{eq} S_2}{cV} T = \frac{P + T_e \alpha_{eq} S_2}{cV}$$

6.2.4 Solution

La résolution de l'équation thermique résultante permet de déterminer les grandeurs principales suivantes (figure 14):

- la température stabilisée (T_s , correspondant à la solution particulière):

$$T_s = T_e + \frac{P}{\alpha_{eq} S_2} = T_e + P \cdot R_{theq}$$

- la constante de temps thermique:

$$\tau_{th} = \frac{c V}{\alpha_{eq} S_2} = cV \cdot R_{theq}$$

La solution vaut:

$$T = T_e + (T_s - T_e) (1 - e^{-t/\tau_{th}})$$

On peut définir, par analogie avec le domaine électrique, une capacité équivalente C_{theq} :

$$C_{theq} = cV \quad [J/K]$$

$$\tau_{th} = R_{theq} C_{theq}$$

La figure 14 décrit l'évolution exponentielle de la température.

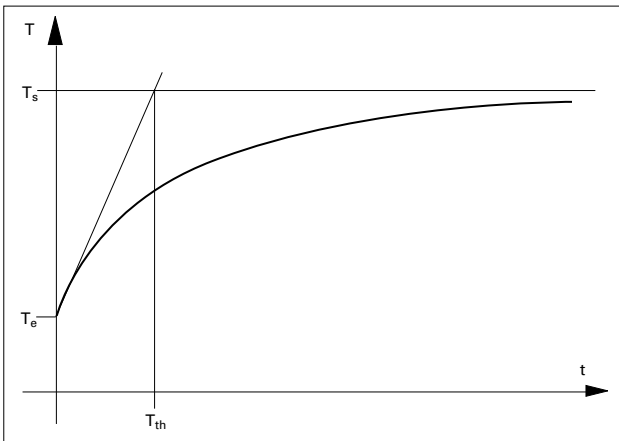


Figure 14

6.2.5 Mesure

Pour un moteur, on ne possède en général pas les grandeurs τ_{th} et T_s pour un régime donné. Pour les connaître, il suffit de procéder à un essai en charge pour lequel on connaît les pertes (essai complémentaire). La mesure de l'évolution thermique permet aisément de déterminer la constante de temps

τ_{th} et le facteur de proportionnalité entre les pertes et l'échauffement stabilisé.

$$\frac{T_s - T_e}{P} = \frac{1}{\alpha_{eq} S} R_{theq} \quad [K/W]$$

Ce coefficient est constant, pour une vitesse constante.

6.2.6 Démarrage

L'opération de démarrage d'un moteur asynchrone ou d'un moteur à courant continu s'accompagne d'une pointe de courant et de l'accumulation d'une certaine quantité d'énergie thermique, au rotor essentiellement. On peut associer à cette opération une constante thermique spécifique. La température stabilisée n'est pratiquement pas déterminée, compte tenu du changement de régime lié à la stabilisation de vitesse et au changement d'état (figure 15).

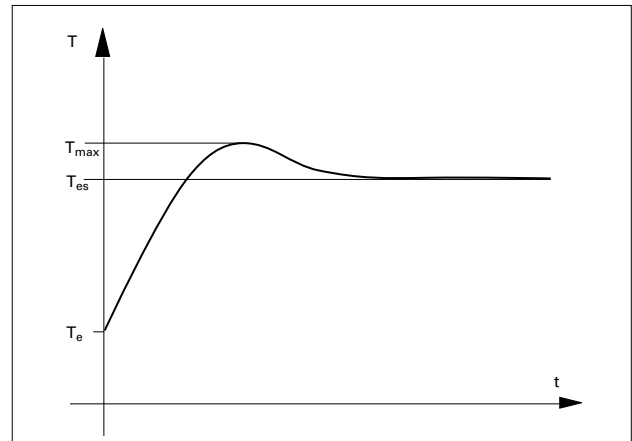
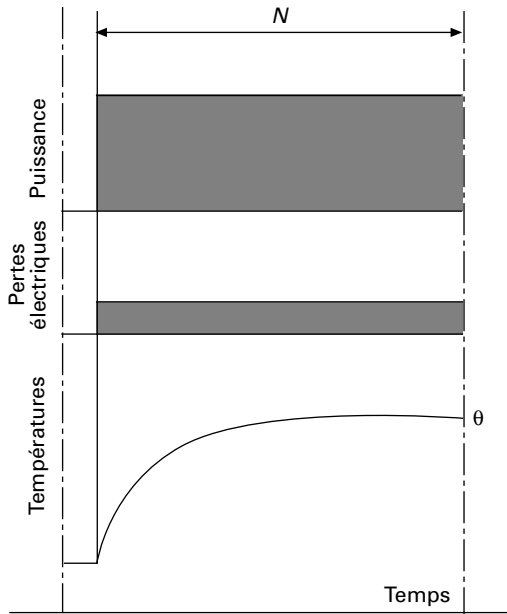


Figure 15

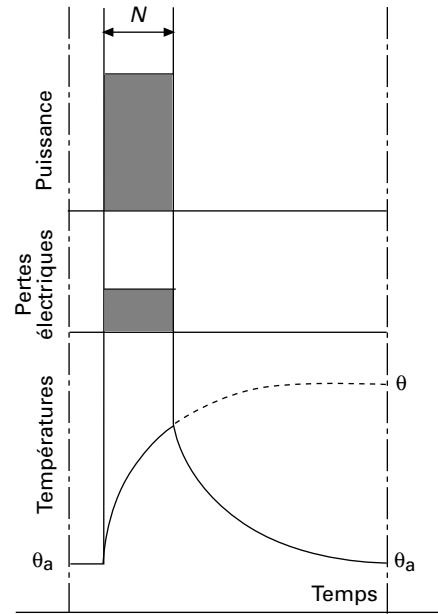
6.2.7 Régimes variables

La figure 14 caractérise un changement de régime thermique associé à un saut des conditions de charge ou des conditions électriques. La connaissance des conditions d'alimentation et de charge en régime transitoire quelconque peuvent se réduire à une succession de comportements exponentiels. Il est par exemple possible de déterminer ainsi les pointes maximales de température ou la durée admissible d'une surcharge temporaire. Les figures des pages suivantes décrivent plusieurs exemples de l'évolution thermique en fonction de celle de la charge.

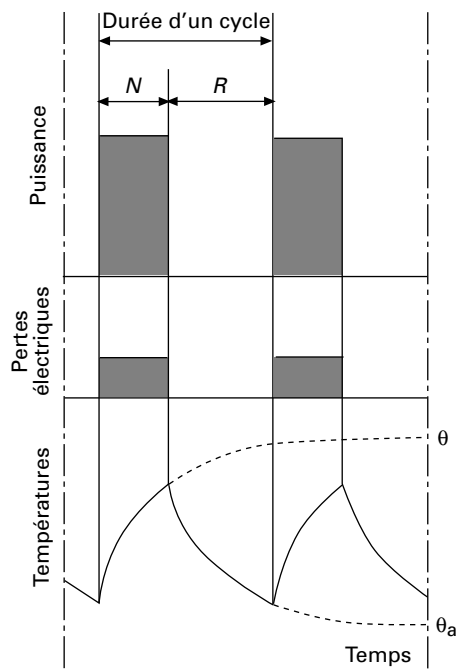
SCHÉMAS REPRÉSENTATIFS DES SERVICES-TYPES



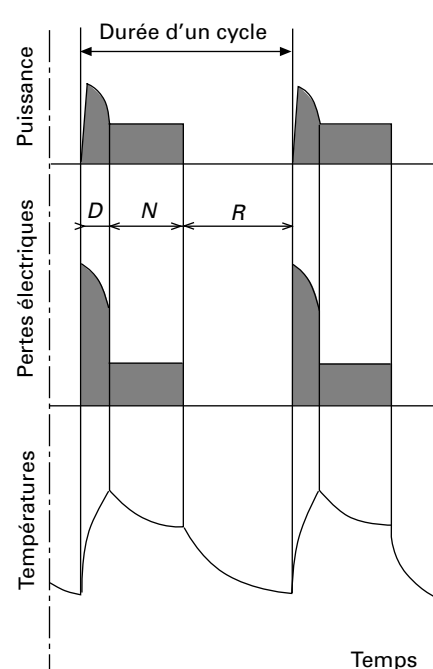
Service continu (S1)



Services temporaires (S2)



Services intermittents périodiques (S3)



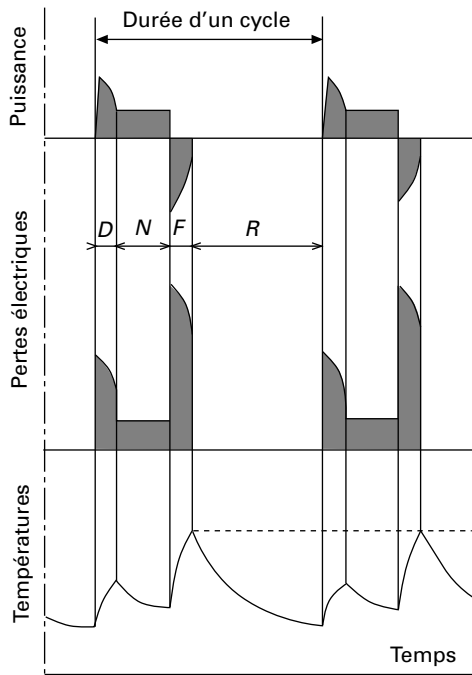
Services intermittents périodiques (S3)

LÉGENDE

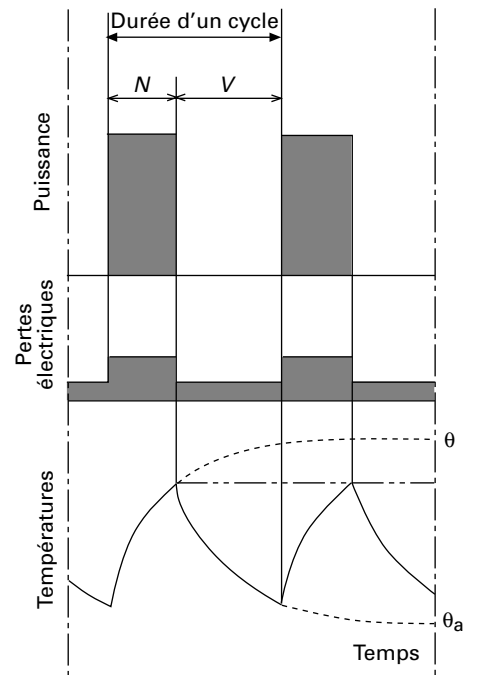
N Fonctionnement au régime nominal
 R Repos
 D Démarrage

θ Température en service continu
 θ_a Température du milieu refroidissant

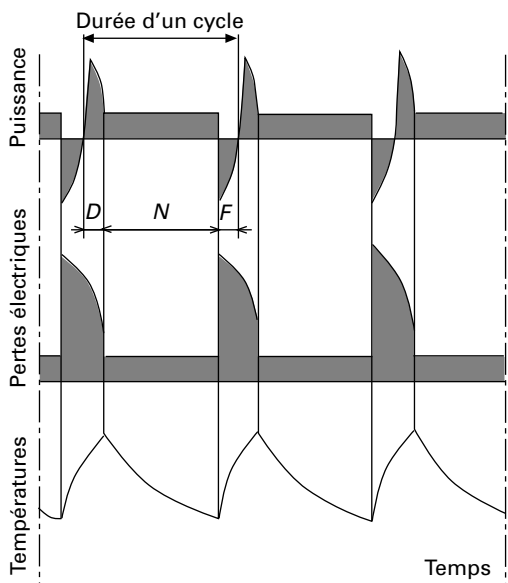
SCHÉMAS REPRÉSENTATIFS DES SERVICES-TYPES



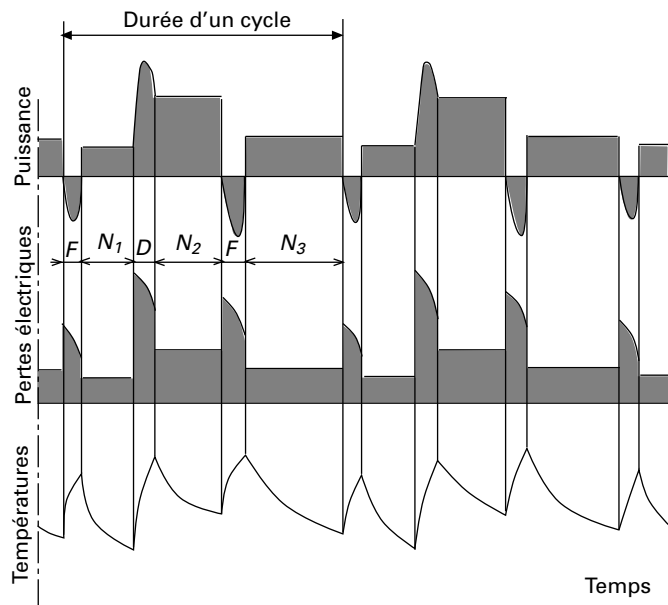
Service à démarrage et freinage électrique (S5)



Services ininterrompus à charge intermittente (S6)



Services ininterrompus à démarrage et freinage (S7)



Services ininterrompus à changement de vitesse périodique (S8)

LÉGENDE

- | | | |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| N Fonctionnement au régime nominal | V Fonctionnement à vide | } Fonctionnement au régime normal |
| D Démarrage ou accélération | R Repos | |
| F Freinage électrique | θ Température en service continu | |
| | θ_a Température du milieu refroidissant | N_2 ou N_3 |

3^e partie

**Electronique de puissance
et convertisseurs statiques**

**Prof. Alfred Rufer et Prof. Hansruedi Bühler
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

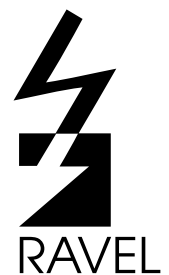


Table des matières

1.	Introduction	69
1.1	Systèmes d'électronique de puissance	69
1.2	Convertisseurs statiques	70
1.3	Technique de conversion	71
1.3.1	Généralités	71
1.3.2	Conversion alternative-alternative à fréquence invariable	71
1.3.3	Conversion continue-continue	72
1.3.4	Conversion alternative-continue	72
1.3.5	Conversion continue-alternative	73
1.4	Éléments semiconducteurs de puissance	74
1.4.1	Généralités	74
1.4.2	Classification	74
1.5	Enclenchement et déclenchement des dispositifs d'électronique de puissance	77
2.	Convertisseurs de courant	79
2.1	Généralités	79
2.2	Montage en pont triphasé	79
2.3	Fonctionnement	79
2.4	Répercussion sur le réseau d'alimentation	80
2.5	Tension continue et caractéristique idéale	80
2.6	Chute de tension inductive	81
3.	Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue	82
3.1	Généralités	82
3.2	Réalisation des branches onduleur	82
3.3	Fonctionnement de l'onduleur triphasé	83
3.4	Onde fondamentale et harmoniques de la tension de phase	84
3.5	Représentation par phaseurs spatiaux	85
3.6	Commande de l'onduleur à pulsation	86
3.6.1	Généralités	86
3.6.2	Stratégies pour la commande de l'onduleur à pulsation	86
3.6.3	Commande par la méthode de sous-oscillation	86
3.6.4	Fonctionnement de la méthode de sous-oscillation	87
3.6.5	Commande directe par des régulateurs à action à deux positions	88
4.	Méthodes de réglage des entraînements à vitesse variable utilisant des machines à champ tournant	89
4.1	Machine asynchrone	90
4.1.1	Machine asynchrone à fréquence variable. Réglage sur la base du modèle stationnaire	90
4.1.2	Réglage vectoriel	92
4.1.3	Réglage par intervention directe	93
4.2	Moteur synchrone	94
4.2.1	Stratégie de commande du moteur synchrone	94
4.2.2	Schéma de principe d'un réglage de position pour moteurs à aimants permanents	95
5.	Références bibliographiques	96

1. Introduction

1.1 Système d'électronique de puissance

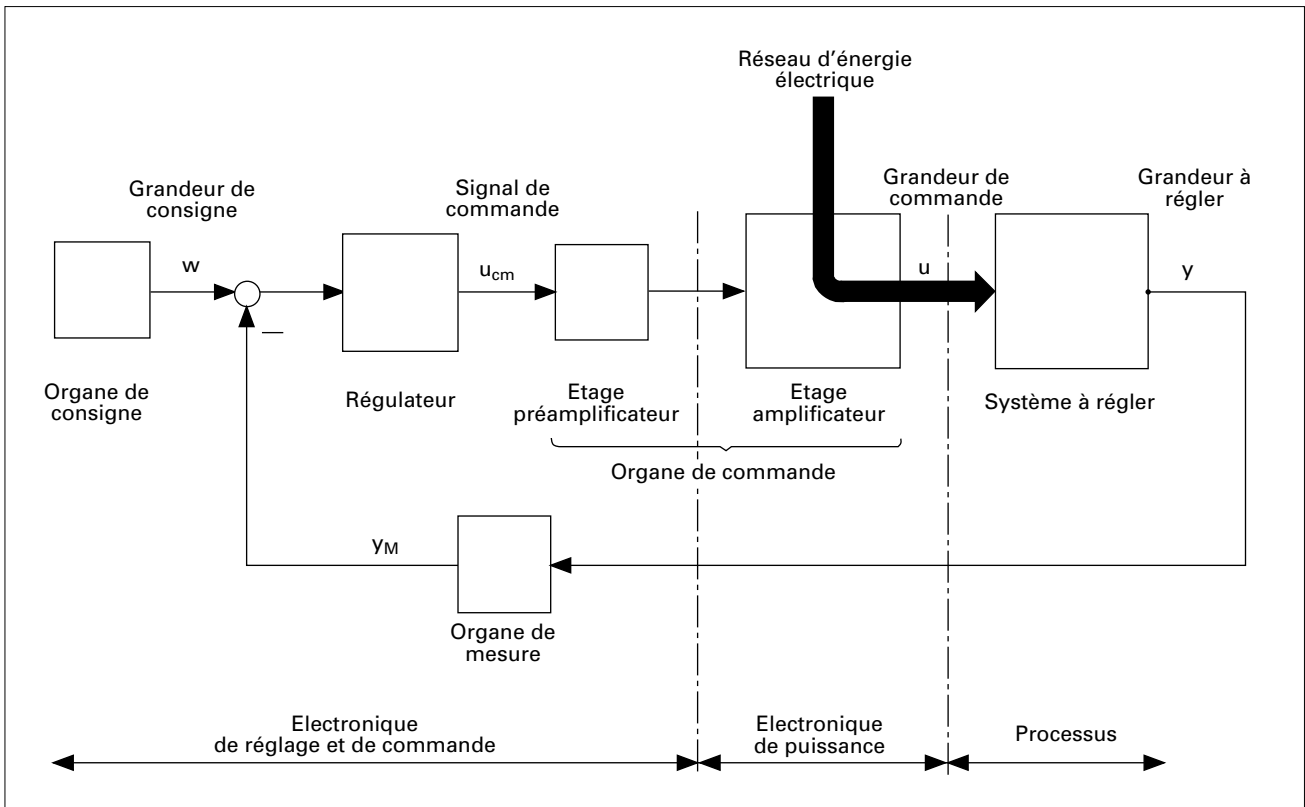


Figure 1: Représentation schématique d'un système automatique.

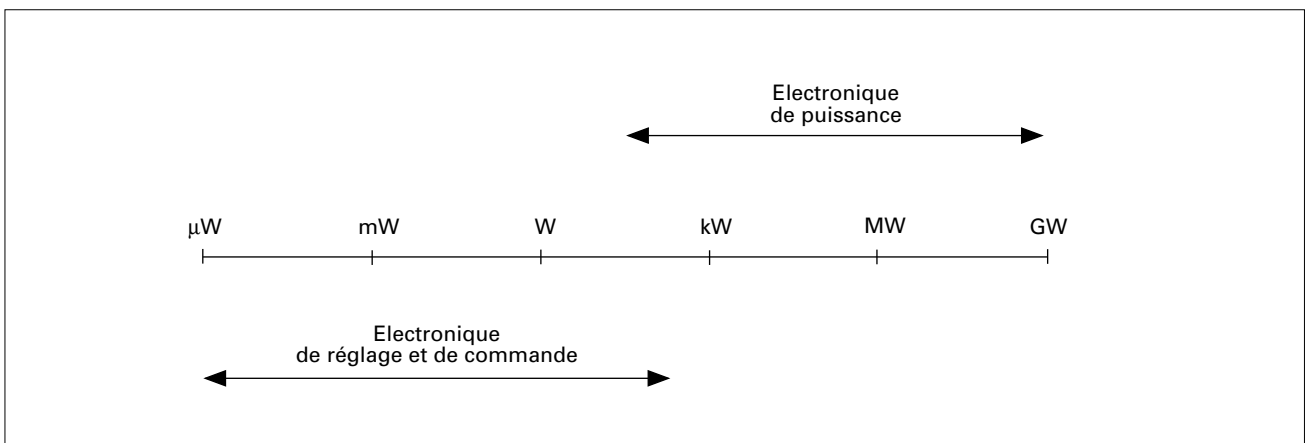


Figure 2: Subdivision en électronique de puissance et en électronique de réglage et de commande, selon les puissances en jeu.

1.2 Convertisseurs statiques

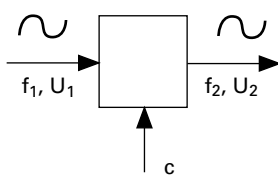
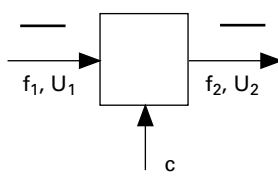
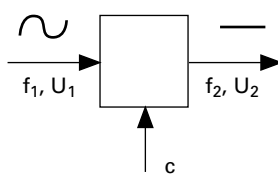
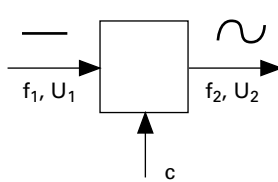
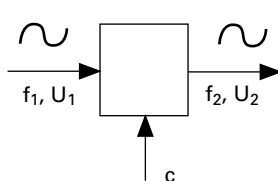
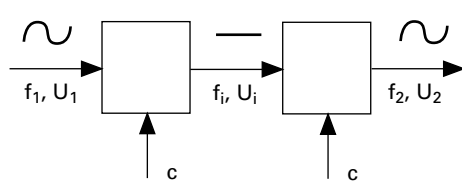
N°	Désignation	Représentation schématique	Observations
1	Variateur de courant alternatif		$f_2 = f_1 \neq 0$ $U_2 : \text{var.}$
2	Variateur de courant continu		$f_2 = f_1 = 0$ $U_2 : \text{var.}$
3	Convertisseur de courant (Redresseur contrôlé)		$f_2 = 0$ $U_2 : \text{var.}$
4	Onduleur		$f_1 = 0$ $f_2, U_2 : \text{var.}$
5	Convertisseur de fréquence direct		$f_1 \neq 0$ $f_2, U_2 : \text{var.}$
6	Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire		$f_i = 0$ $f_2, U_2 : \text{var.}$

Tableau 3: Vue d'ensemble des convertisseurs statiques.

1.3 Technique de conversion

1.3.1 Généralités

Le fonctionnement des convertisseurs statiques se base sur quelques principes fondamentaux de la technique de conversion. Ces convertisseurs statiques commutent périodiquement entre différents niveaux de tension. Selon les niveaux de tension et la séquence de commutation choisis, il est possible d'obtenir différents genres de conversion.

Dans cette section, on présentera plusieurs principes de conversion, à savoir :

- conversion alternative-alternative à fréquence invariable ;
- conversion continue-continue ;
- conversion alternative-continue ;
- conversion continue-alternative ;
- conversion alternative-alternative à fréquence variable.

Ces différents principes sont présentés indépendamment de montages particuliers de convertisseurs statiques. Le montage doit être conçu de façon à réaliser la commutation désirée entre les différents niveaux de tension. Les montages les plus utilisés seront présentés dans les chapitres suivants, où l'on décrira surtout leur application pratique.

1.3.2 Conversion alternative-alternative à fréquence invariable

La figure 4 montre schématiquement la conversion alternative-alternative à fréquence invariable. Dans ce cas, on commute entre une tension alternative d'amplitude \hat{U} et de pulsation ω et le niveau zéro. La commutation durant la demi-période négative est symétrique à celle durant la demi-période positive.

Selon le secteur sélectionné de la tension alternative, on peut faire varier l'onde fondamentale de la tension alternative résultante dans un large domaine. Ce secteur est caractérisé par l'angle d'enclenchement α et l'angle de déclenchement β .

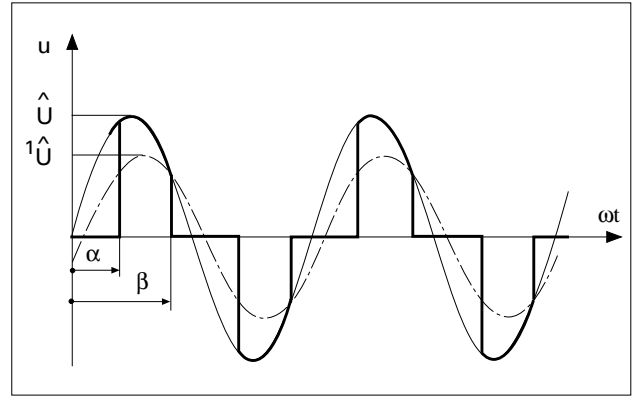


Figure 4: Représentation schématique de la conversion alternative-alternative à fréquence invariable.

L'amplitude ${}^1\hat{U}$ de l'onde fondamentale s'obtient par la relation

$${}^1\hat{U} = \sqrt{{}^1\hat{U}_s^2 + {}^1\hat{U}_c^2} \quad [1.1]$$

avec

$$\begin{aligned} {}^1\hat{U}_s &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi u(\omega t) \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_\alpha^\beta \hat{U} \sin^2 \omega t \, d\omega t = \\ &= \frac{\hat{U}}{\pi} [(\beta - \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \sin(\beta - \alpha)] \end{aligned} \quad [1.2]$$

et

$$\begin{aligned} {}^1\hat{U}_c &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi u(\omega t) \cos \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_\alpha^\beta \hat{U} \sin \omega t \, d\omega t = \\ &= \frac{\hat{U}}{\pi} \sin(\beta + \alpha) \sin(\beta - \alpha) \end{aligned} \quad [1.3]$$

Introduit dans [1.1], on tire

$${}^1\hat{U} = \frac{\hat{U}}{\pi} \sqrt{(\beta - \alpha)^2 - 2(\beta - \alpha) \cos(\beta + \alpha) \sin(\beta - \alpha) \sin^2(\beta - \alpha)} \quad [1.4]$$

Comme on le voit de la figure 4, cette conversion donne non seulement l'onde fondamentale de la tension alternative que l'on peut influencer par les commutations, mais aussi des harmoniques plus ou moins prononcées ayant une fréquence multiple de la fréquence du réseau d'alimentation alternatif. A noter que le variateur de courant alternatif se base sur ce principe de conversion.

1.3.3 Conversion continue-continue

Lors de la conversion continue-continue, on commute périodiquement entre deux niveaux de tension constants, comme le représente la figure 1.4.

Avec la durée t_1 où reste enclenché le niveau U_1 et la durée t_2 où le niveau U_2 reste enclenché, on obtient la valeur moyenne de la tension continue

$$U_{med} = \frac{U_1 t_1 + U_2 t_2}{t_1 + t_2} \quad [1.5]$$

En intervenant sur les durées d'enclenchement t_1 et t_2 , il est possible de faire varier la valeur moyenne de la tension continue U_{med} .

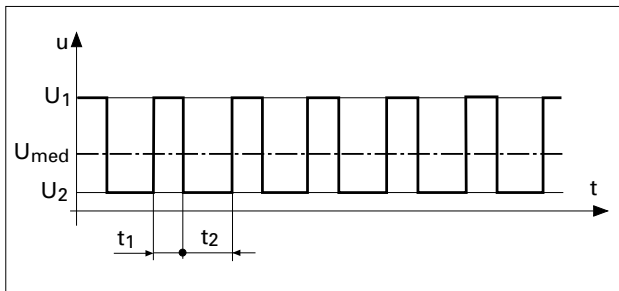


Figure 5: Représentation schématique de la conversion continue-continue.

Dans ce cas, on obtient une ondulation de forme rectangulaire très prononcée qui se superpose à la valeur moyenne. Sa valeur crête à creux est de

$$\hat{U} = U_1 - U_2$$

et sa fréquence

$$1/(t_1+t_2).$$

Le variateur de courant continu travaille selon ce principe, le deuxième niveau de tension est alors

$$U_2 = 0 \text{ ou } U_2 = -U_1.$$

Dans ce dernier cas, la valeur moyenne de la tension continue peut aussi devenir négative.

1.3.4 Conversion alternative-continue

Dans le cas de la conversion alternative-continue, on commute périodiquement entre des secteurs sinusoidaux appartenant à un système alternatif

polyphasé. Le nombre des phases est en général deux (déphasage entre les tensions simples 180°), trois (déphasage 120°) ou six (déphasage 60°). La figure 6 montre le cas d'un système triphasé.

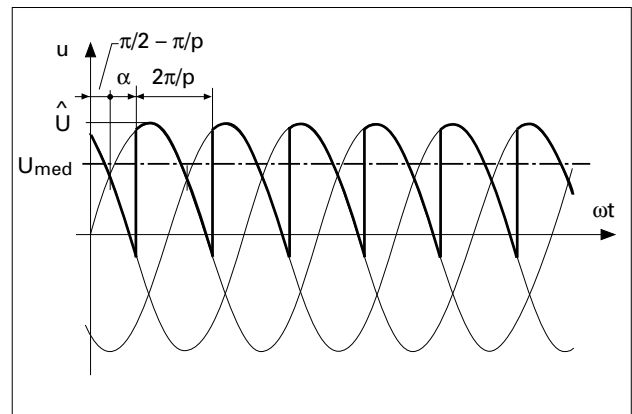


Figure 6: Représentation schématique de la conversion alternative-continue.

Avec p le nombre des phases du système polyphasé, on trouve la valeur moyenne de la tension continue par

$$U_{med} = \frac{1}{2\pi/p} \int_{\frac{x}{2} - \frac{x}{p} + \alpha}^{\frac{x}{2} + \frac{x}{p} + \alpha} \hat{U} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \hat{U} \cos \alpha \quad [1.6]$$

En variant l'angle α , la valeur moyenne de la tension continue varie aussi. Elle devient négative pour $\alpha > \pi/2$.

A la valeur moyenne est également superposée une ondulation dont la fréquence est p fois la fréquence du réseau d'alimentation polyphasé.

A noter que le convertisseur de courant se base sur ce principe de conversion. Dans ce cas, la commutation d'une tension alternative sur une autre est assez facile à réaliser.

Cependant, pour la conversion alternative-continue, d'autres possibilités sont imaginables. Une variante est représentée à la figure 7.

Dans ce cas, on utilise des secteurs symétriques des tensions sinusoidales, intercalés de secteurs où la tension est nulle.

La valeur moyenne est donnée, cette fois-ci, par

$$U_{\text{med}} = \frac{1}{2\pi/p} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \hat{U} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{p}{\pi} \hat{U} \sin \frac{\delta}{2} \quad [1.7]$$

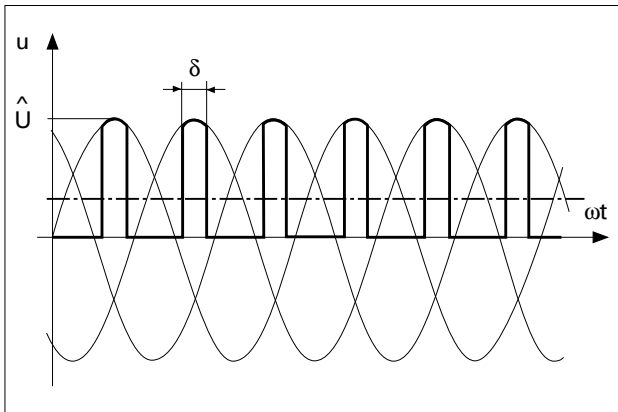


Figure 7: Représentation schématique d'une variante de la conversion alternative-continue.

En variant l'angle δ , on varie également la valeur moyenne U_{med} de la tension continue. A celle-ci est de nouveau superposée une ondulation.

Cette méthode n'est pratiquement pas encore utilisée pour la conversion alternative-continue. En effet, la commutation depuis la sinusoïde sur la tension zéro pose certains problèmes, lorsqu'on emploie des thyristors. Cependant, avec l'apparition de nouveaux éléments semiconducteurs de puissance, plus facilement déclenchables, la réalisation de cette variante de conversion devient possible.

1.3.5 Conversion continue-alternative

Pour la conversion continue-alternative, il y a plusieurs méthodes qui sont utilisées plus ou moins fréquemment pour la réalisation des onduleurs.

A la figure 8 est représentée la méthode la plus simple. On commute alternativement entre les deux niveaux constants $+U$ et $-U$. On obtient ainsi une tension alternative d'allure rectangulaire.

L'amplitude de l'onde fondamentale de la tension alternative s'obtient par

$$1\hat{U} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U \sin \omega t \, d\omega t = \frac{4}{\pi} U \sin \frac{\omega t_1}{2} \quad [1.8]$$

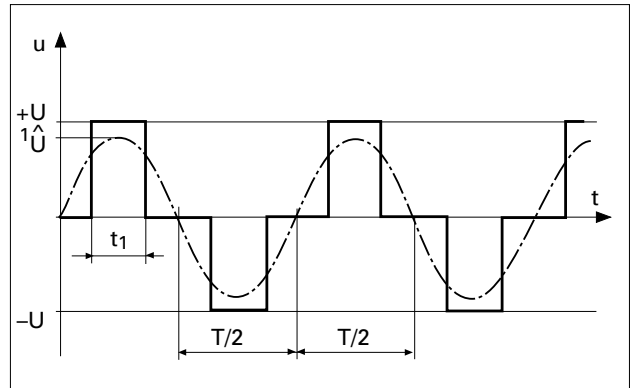


Figure 8: Représentation schématique de la conversion continue-alternative (première méthode).

Avec cette méthode, il n'est pas possible de faire varier l'onde fondamentale lorsque la tension U est constante. On peut seulement varier la fréquence en intervenant sur les instants de commutation caractérisés par la durée $T/2$ de la demi-période.

En plus de l'onde fondamentale, on obtient également des harmoniques dont la fréquence est un multiple impair de la fréquence fondamentale.

Lorsqu'on désire faire varier aussi l'amplitude de l'onde fondamentale, il est judicieux de commuter la tension pendant une demi-période plusieurs fois respectivement entre U et 0 et entre 0 et $-U$ comme le montre la figure 9. Lorsque la durée t_1 , où la tension $U(t)$ est égale à $+U$ ou $-U$, varie sinusoïdalement en fonction du temps t , on obtient une tension pulsée dont la valeur moyenne glissante varie sinusoïdalement en fonction du temps.

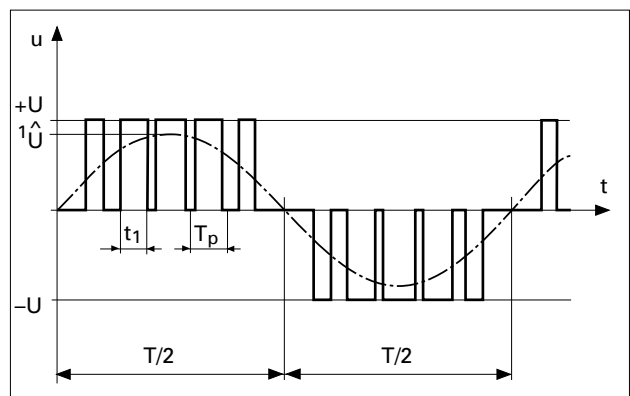


Figure 9: Représentation schématique de la conversion continue-alternative (deuxième méthode).

Lorsque la période de pulsation T_p est très inférieure par rapport à la demi-période $T/2$ de l'onde fondamentale, la durée t_1 doit être modulée selon la relation

$$t_1 \cong \frac{\hat{U}}{U} |\sin \omega t| \quad [1.9]$$

Elle dépend donc de l'amplitude \hat{U} de l'onde fondamentale et de sa pulsation $\omega = 2\pi/T$.

Cette méthode possède l'avantage de ne produire que des harmoniques à fréquence relativement élevée. En effet, elles sont des multiples entiers de la fréquence de pulsation $f_p = 1/T_p$. A noter que cette méthode est très répandue et connue sous le sigle PWM (pulse width modulation : modulation d'impulsion en durée, voir [1] chapitre 3.5).

1.4 Elements semiconducteurs de puissance

1.4.1 Généralités

Le principe des convertisseurs statiques est basé sur la commutation de courants entre les mailles d'un circuit électrique de puissance. Ces commutations sont réalisées au moyen d'éléments semiconducteurs de puissance fonctionnant comme interrupteur. A la figure 10 est représenté le cas simple de commutation d'une maille à l'autre dans un circuit électrique, comme on le trouve, par exemple, lors de la conversion alternative-continue.

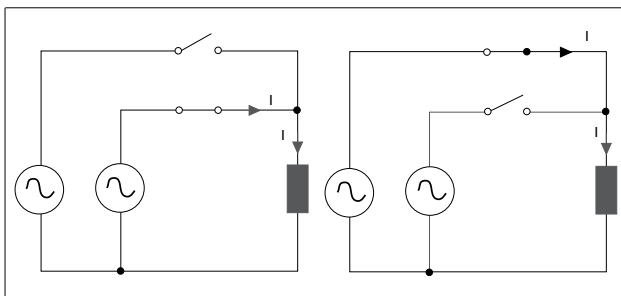


Figure 10: Commutation du courant I d'une maille à l'autre d'un circuit électrique.

La figure 11 (a) montre le symbole et la figure 11 (b) la caractéristique statique d'un interrupteur idéal. Pour un élément semiconducteur remplissant la

fonction interrupteur, le courant pour interrupteur ouvert doit être négligeable; de même, la tension aux bornes de l'interrupteur fermé doit être très faible. Cette dernière grandeur possède en effet une influence importante sur le rendement d'un convertisseur statique (pertes de conduction).

Les semiconducteurs de puissance actuellement sur le marché remplissent partiellement la fonction d'interrupteur. En effet, leur caractéristique de fonctionnement (caractéristique statique) se limite à deux ou trois branches de celle d'un interrupteur idéal représenté par la figure 11 (b). D'autre part, les éléments semi-conducteurs de puissance se différencient par leur possibilité ou non de commande :

- commande à la fermeture (enclenchement) ;
- commande à l'ouverture (déclenchement).

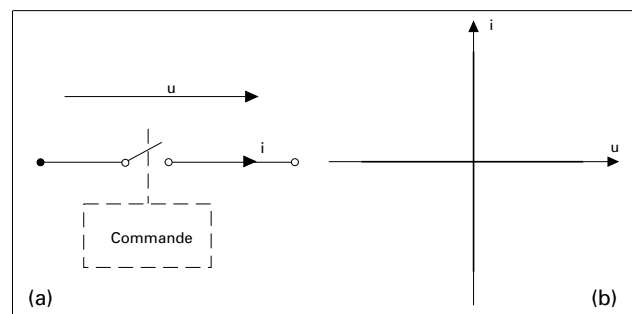


Figure 11: Interrupteur idéal: (a) symbole; (b) caractéristique.

La transition d'un état à l'autre est définie par la caractéristique dynamique. Il existe une bibliographie très vaste sur les semiconducteurs de puissance.

1.4.2 Classification

Les éléments semiconducteurs de puissance peuvent être classés selon leur possibilité de commande. Pour les éléments les plus utilisés, on peut définir trois classes de semiconducteurs de puissance :

- éléments non contrôlables (diodes) ;
- éléments contrôlables à l'amorçage (thyristors, thyristors asymétriques, thyristors à conduction inverse, triacs) ;
- éléments contrôlables à l'amorçage et au blocage (transistors bipolaires, transistors MOS, thyristors blocables).

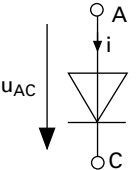
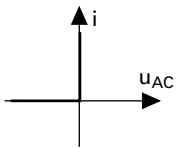
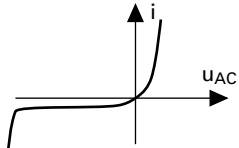
N°	Désignation	Symbole	Caractéristique	
			idéale	réelle
1	Diode			

Tableau 12: Élément semiconducteur non commandable.

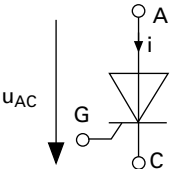
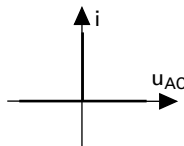
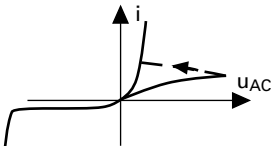
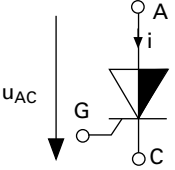
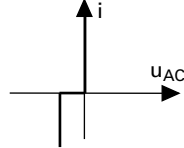
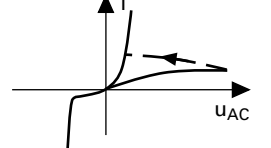
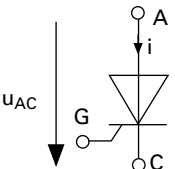
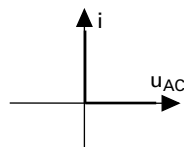
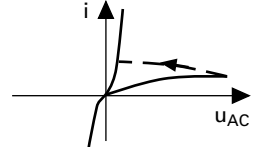
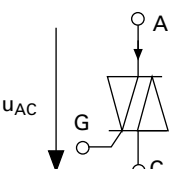
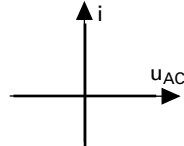
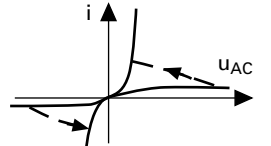
N°	Désignation	Symbole	Caractéristique	
			idéale	réelle
1	Thyristor Silicon Controlled Rectifier (SCR)			
2	Thyristor asymétrique Asymetrical SCR (ASCR)			
3	Thyristor à conduction inverse Reverse Conducting Thyristor (RCT)			
4	Triac			

Tableau 13: Eléments semiconducteurs commandables à la fermeture.

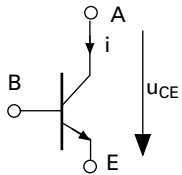
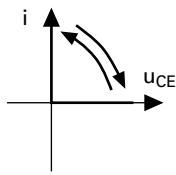
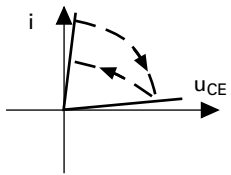
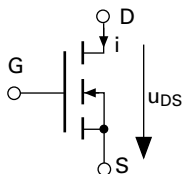
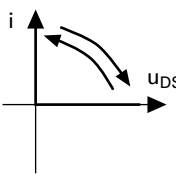
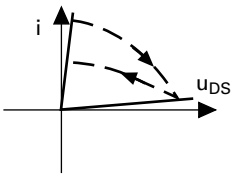
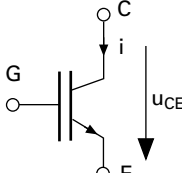
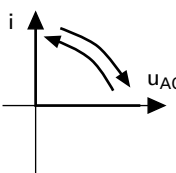
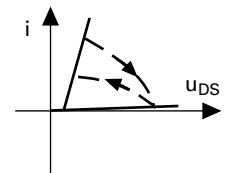
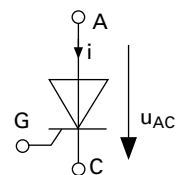
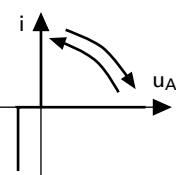
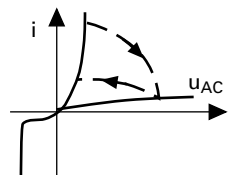
N°	Désignation	Symbole	Caractéristique	
			idéale	réelle
1	Transistor bipolaire à commutation			
2	Transistor MOS de puissance			
3	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)			
4	Thyristor blocable Gate Turn Off (GTO)			

Tableau 14: Eléments semiconducteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture.

1.5 Enclenchement et déclenchement des dispositifs d'électronique de puissance

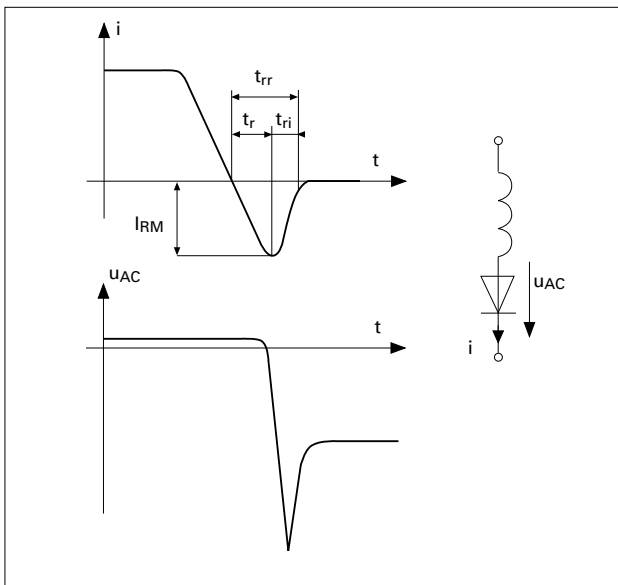


Figure 15: Élément non commandable (diode).

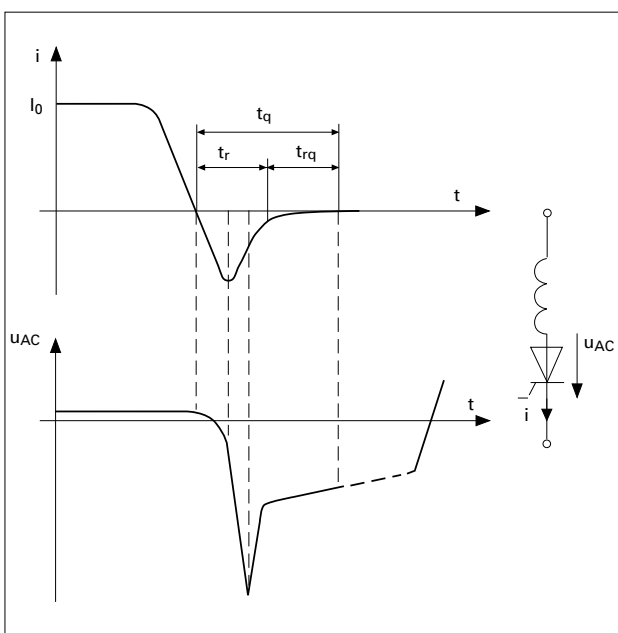


Figure 16: Élément commandable à la fermeture (thyristor).

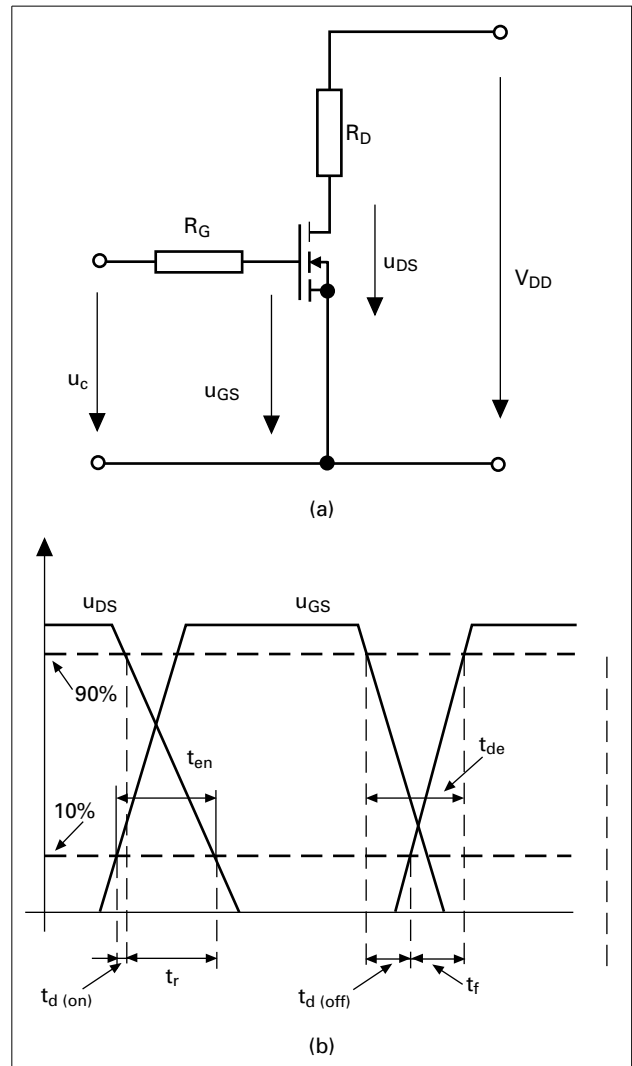


Figure 17: Commutation d'un transistor MOS: (a) circuit de test; (b) allures des tensions u_{GS} et u_{DS} .

La figure 17 (a) représente le montage d'un transistor MOS sur charge résistive pour la définition des temps de commutation (figure 17 (b)) donnés par le constructeur:

$t_{d(on)}$: retard à l'enclenchement;

t_r : temps de croissance;

$t_{d(off)}$: retard au déclenchement;

t_f : temps de décroissance;

$t_{en} = t_{d(on)} + t_r$: temps d'enclenchement;

$t_{de} = t_{d(off)} + t_f$: temps de déclenchement.

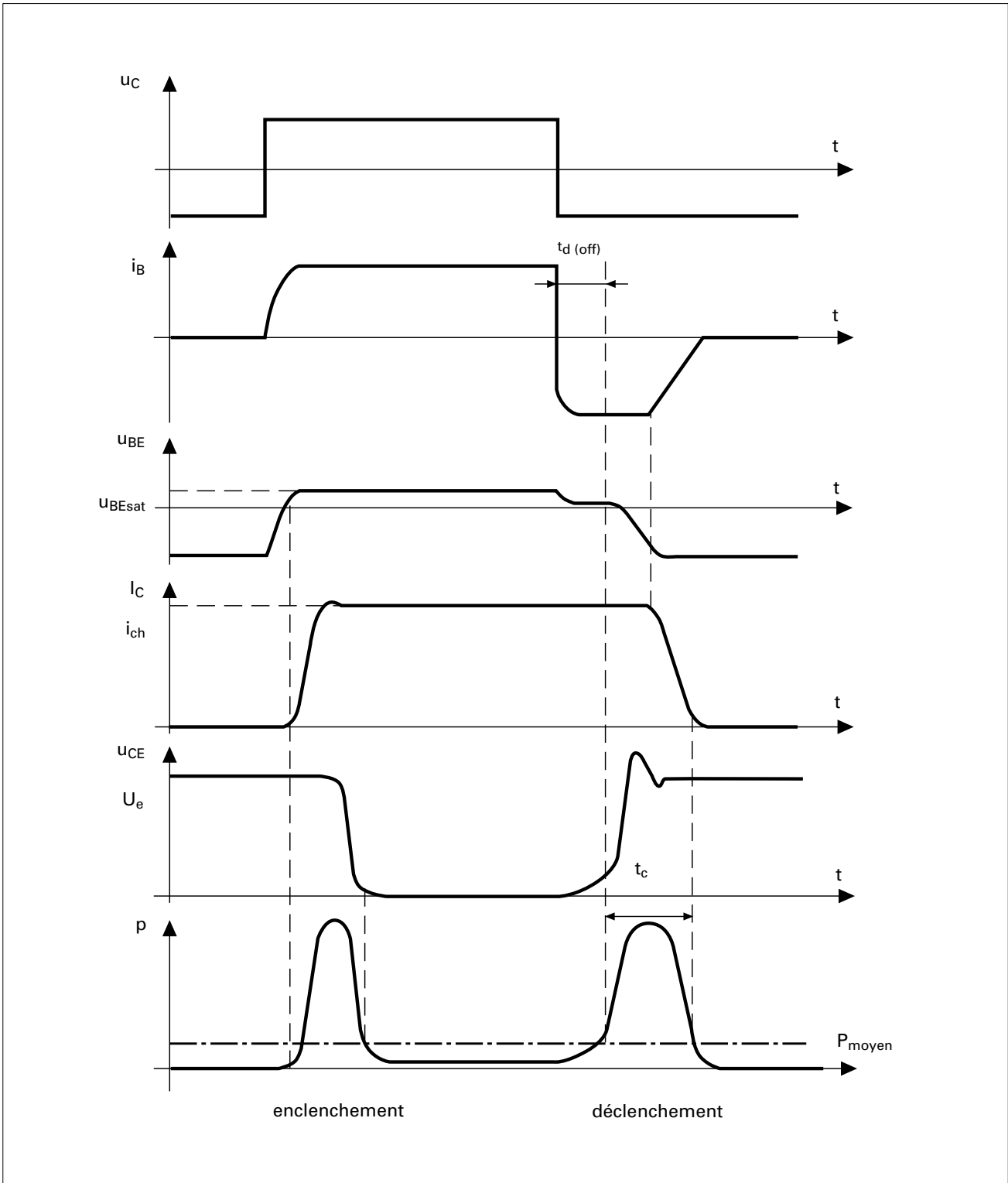


Figure 18: Allures des tensions, courants et pertes p dans un transistor à commutation.

2. Convertisseur de courant

2.1 Généralités

Comme déjà mentionné, le convertisseur de courant est très répandu et il est utilisé jusqu'à des puissances très élevées. Il est en principe un redresseur contrôlé.

Les différents montages et leur fonctionnement sont décrit de manière détaillée dans [2], chapitres 5 à 10. Par la suite, on donnera une brève récapitulation des propriétés essentielles de ces convertisseurs de courant, en se limitant essentiellement au montage en pont triphasé, utilisé presque exclusivement aujourd'hui. De plus, on présentera quelques compléments qui concernent l'ondulation du courant continu et la caractéristique de charge réelle.

2.2 Montage en pont triphasé

Un transformateur, dont les enroulements sont montés par exemple en étoile/étoile, est branché avec un convertisseur de courant, composé de six thyristors. Il s'agit du montage en pont triphasé représenté à la figure 19. Celui-ci alimente, le cas échéant, par l'intermédiaire du filtre de lissage L_f , la charge à courant continu L, R avec une tension et un courant continus variables.

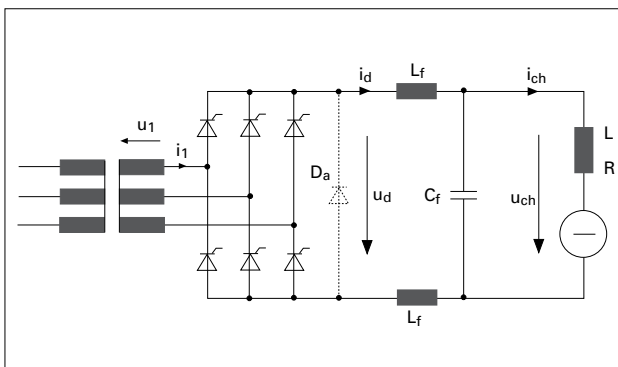


Figure 19: Montage en pont triphasé d'un convertisseur de courant.

Parfois, on monte en parallèle avec le pont à thyristor une diode D_a appelée aussi diode à roue libre. Elle évite des valeurs instantanées négatives de la tension continue u_d en réduisant les ondulations en tension et permet surtout la décharge de l'énergie

magnétique de la charge à courant continu lors d'une défaillance du réseau d'alimentation. Ceci est particulièrement important lorsque la charge est constituée de grands aimants.

Souvent, on peut brancher le convertisseur de courant directement au réseau d'alimentation sans l'intermédiaire d'un transformateur.

2.3 Fonctionnement

Normalement, le courant continu i_d circule au travers de deux thyristors (un dans chaque moitié du pont). La valeur instantanée de la tension continue u_d est donc identique à celle de la tension composée entre les deux phases qui conduisent le courant. La troisième phase ne conduit aucun courant.

Lorsque le courant commute d'un thyristor à un autre (séparément dans chaque moitié du pont), il y a cependant un bref laps de temps un court-circuit entre deux phases. Ces commutations se font cycliquement. La tension continue u_d est donc composée essentiellement de secteurs sinusoïdaux d'un système hexaphasé, comme le montre la figure 20. Cette allure correspond à un indice de pulsation $p = 6$. On voit une ondulation en tension bien prononcée.

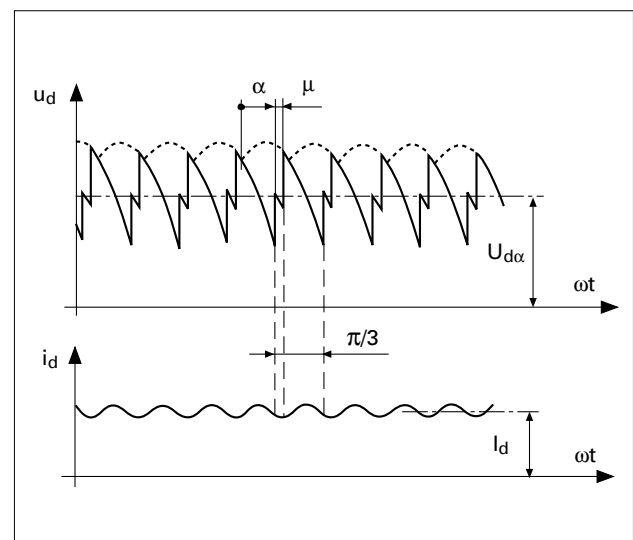


Figure 20: Allure de la tension u_d et du courant i_d continus d'un convertisseur de courant en montage en pont triphasé.

L'angle de retard d'allumage α caractérise l'instant d'allumage d'un des thyristors. Avec cet angle, on peut faire varier la valeur moyenne $U_{di\alpha}$ de la tension continue. L'angle μ est l'angle d'empiétement durant lequel le courant commute d'un thyristor à un autre. Cette commutation provoque une chute de tension continue, appelée chute de tension inductive. Elle est relativement faible, 2 à 6% de la valeur maximale de la tension continue et proportionnelle au courant continu I_d et à l'inductance de court-circuit L_c du transformateur et du réseau d'alimentation.

Le courant continu i_d ne peut être que positif, compte tenu du sens de conduction des thyristors. Ce courant est légèrement ondulé. L'ondulation dépend de l'inductance L de la charge s'il n'y a pas de filtre de lissage, ou dans le cas contraire essentiellement de l'inductance $2L_f$ du filtre de lissage.

2.4 Répercussion sur le réseau d'alimentation

Le convertisseur de courant provoque des répercussions sur le réseau d'alimentation, comme le montre la figure 21.

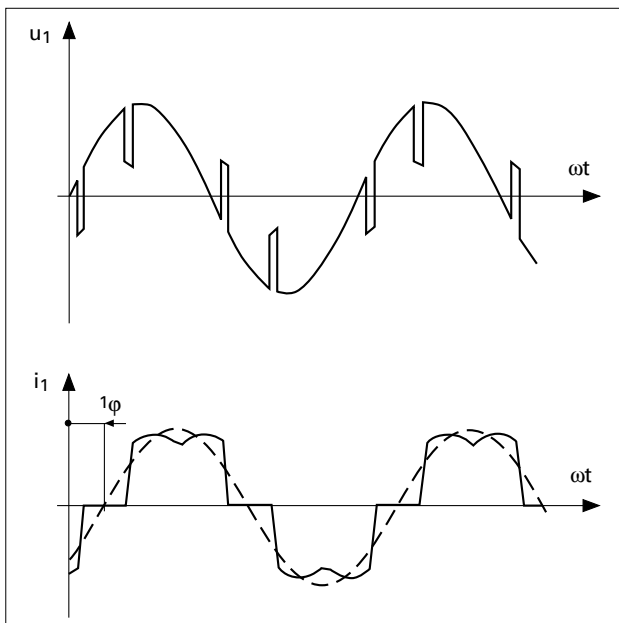


Figure 21: Allure de la tension u_1 et du courant de ligne i_1 au secondaire du transformateur.

Le courant de ligne (courant de phase) i_1 n'est pas sinusoïdal, mais présente une allure presque rectangulaire. De plus, l'onde fondamentale de ce courant est déphasée par rapport à la tension simple u_1 d'un angle $1\varphi \cong \alpha + \mu/2$. Ceci demande une puissance réactive, malgré la charge à courant continu. Sur la tension simple u_1 au secondaire du transformateur (figure 19) apparaissent des impulsions dues à la commutation du courant continu d'une phase à une autre. Les problèmes liés aux harmoniques et à la puissance réactive sont traités dans [2], chapitre 9.

Ces harmoniques en courant et en tension au côté alternatif peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau d'alimentation surtout pour des grandes puissances des convertisseurs de courant. Des distorsions de la tension et des perturbations par couplage inductif ou capacitif sur d'autres consommateurs en sont les conséquences. Le cas échéant, on doit insérer des filtres d'absorption (filtres LC) entre le réseau et le transformateur, afin de réduire l'influence néfaste des harmoniques ([2], section 9.3).

A noter que ces phénomènes de perturbations apparaissent aussi sur les autres types de convertisseurs statiques. En effet, ils possèdent à l'entrée un redresseur à diodes. Son fonctionnement correspond à celui d'un convertisseur de courant où l'on a $\alpha = 0^\circ$.

2.5 Tension continue et caractéristique idéale

Le convertisseur de courant travaille selon le principe de la conversion alternative-continue représentée à la figure 6. La valeur moyenne de la tension continue est donc donnée par la relation [1.6]. Puisqu'il s'agit de la tension valable pour le fonctionnement idéalisé (en négligeant le phénomène de la commutation naturelle, angle d'empiétement μ) et qu'elle dépend de l'angle de retard d'allumage α , on la désigne comme tension continue idéale $U_{di\alpha}$.

Selon la relation [1.6], on obtient dans le cas présent d'un convertisseur de courant en montage en pont triphasé avec

$$p = 6 \text{ et } \hat{U} = \sqrt{2} U$$

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \cos \alpha \tag{2.1}$$

où

$$U_{di0} = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \sqrt{2} U = 1,350 U \quad [2.2]$$

est la tension continue idéale maximale.

A noter que U est la valeur efficace de la tension composée du transformateur triphasé alimentant le convertisseur de courant.

La figure 22 (courbe 1) montre la caractéristique idéale d'un convertisseur de courant, obtenue depuis la relation [2.1]. Pour $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$, la tension continue $U_{di\alpha}$ est positive. Le convertisseur de courant fonctionne comme redresseur. Par contre, pour $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, la tension continue devient négative. Puisque le courant continu I_d doit toujours être positif (imposé par le sens de conduction des thyristors), la puissance (produit tension $U_{di\alpha}$ par courant I_d) devient négative. Il y a donc récupération de la puissance active du côté continu vers le côté alternatif: le convertisseur de courant travaille comme onduleur.

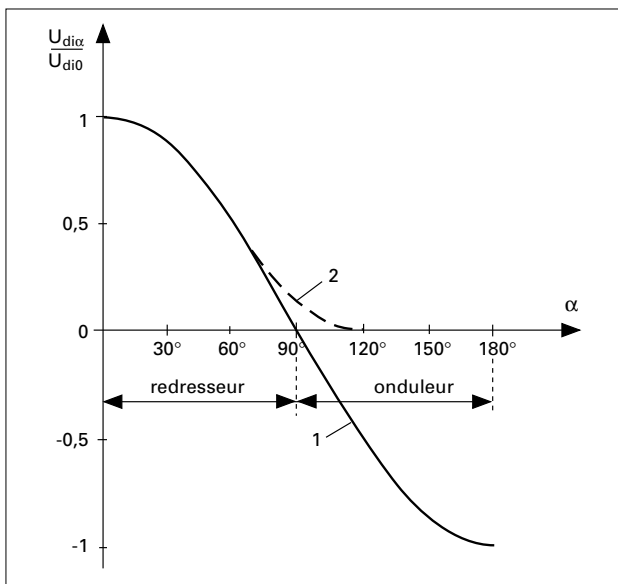


Figure 22: Caractéristique idéale d'un convertisseur de courant (1: sans, 2: avec diode D_a à roue libre).

La relation [2.1] n'est valable que pour le cas où il n'y a pas de diode D_a en antiparallèle (diode à roue libre selon la figure 19). En effet, cette diode évite des valeurs instantanées négatives de la tension continue u_d . Ce phénomène apparaît pour $60^\circ < \alpha \leq 120^\circ$. La caractéristique idéale est alors modifiée, comme le montre la courbe 2 de la figure 22.

2.6 Chute de tension inductive

Lorsque le courant continu commute d'un thyristor à un autre, deux phases du réseau d'alimentation sont court-circuitées pendant un bref laps de temps, correspondant à l'angle d'empiètement μ (voir figure 20). Ceci a une influence sur l'allure temporelle de la tension continue en réduisant sa valeur moyenne. On parle alors de chute de tension inductive. Comme on l'a montré dans [2], section 6.3, cette chute de tension est proportionnelle au courant continu I_d et proportionnelle à une résistance interne fictive R_i . Cette dernière est donnée pour un montage en pont triphasé par

$$R_i = \frac{3}{\pi} \omega L_c \quad [2.3]$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation du réseau d'alimentation et L_c l'inductance de court-circuit dans chaque phase du transformateur et du réseau d'alimentation.

La valeur moyenne de la tension continue s'obtient donc par

$$U_{d\alpha} = U_{di\alpha} - R_i I_d = U_{di0} \cos \alpha - R_i I_d \quad [2.4]$$

On peut alors tracer les caractéristiques de charge, comme le montre la figure 23. A noter qu'en fonctionnement onduleur ($\alpha > 90^\circ$), il est indispensable de limiter l'angle de retard d'allumage α à environ 150° , afin d'éviter le raté de commutation ([2], section 6.5).

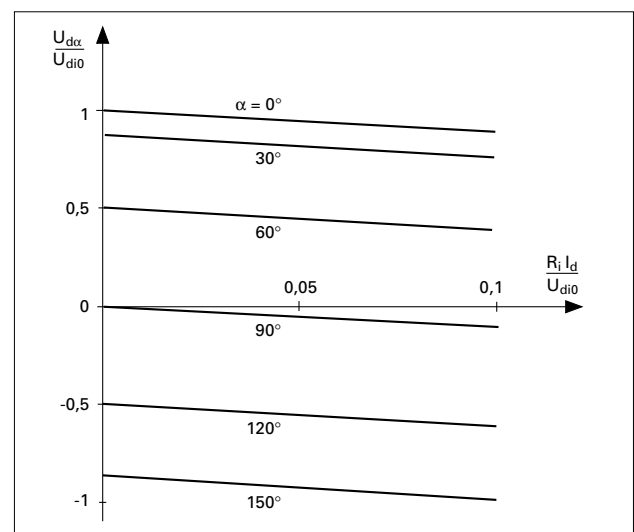


Figure 23: Caractéristiques de charge d'un convertisseur de courant.

3. Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue

3.1 Généralités

Le convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue est sans doute le montage le plus répandu aujourd’hui. Basé sur l’utilisation de dispositifs enclenchables et déclenchables, il alimente aussi bien une machine asynchrone que synchrone. En plus d’un condensateur de stockage au circuit intermédiaire, il est constitué d’un circuit redresseur à l’entrée, et d’un onduleur à la sortie. Le circuit de puissance d’un tel convertisseur est donné à la figure 24.

Au côté du réseau triphasé, il y a un redresseur à diodes I. Il impose une tension continue U_e constante au circuit intermédiaire.

L’onduleur II qui alimente la charge possède trois branches. Elles peuvent être équipées soit par des thyristors ou des transistors à commutation, comme on le montrera au paragraphe suivant. Chaque branche de l’onduleur peut être enclenchée et déclenchée librement et fonctionne donc le plus souvent à pulsation. Par conséquent, on parle aussi d’onduleur à pulsation. La variation de la fréquence et de la tension alternative (tension de charge) a lieu dans l’onduleur.

Dans le circuit intermédiaire, il y a un condensateur C. Il permet de lisser la tension continue U_e redressée. De plus, il sert de condensateur-tampon ([2],

section 12.5) et prend en charge les variations rapides du courant i_{dII} dans le circuit intermédiaire. Cette section sera consacrée essentiellement à l’onduleur. Sa commande sera traitée à la section suivante.

3.2 Réalisation des branches onduleur

Pour la réalisation des branches onduleur, il existe plusieurs possibilités. Les plus utilisées sont représentées à la figure 25.

Pour des puissances allant jusqu’à plusieurs centaines de kW, on utilise de préférence des transistors de commutation. Les éléments les plus utilisés sont les transistors IGBT, qui peuvent être commandés très simplement. Une branche d’onduleur à pulsation à transistors de commutation est donnée à la figure 25 (a).

Pour des puissances supérieures (domaine du MW), comme on les rencontre typiquement en traction électrique, on utilise des thyristors GTO. Le schéma d’une telle branche d’onduleur est représenté à la figure 25 (b).

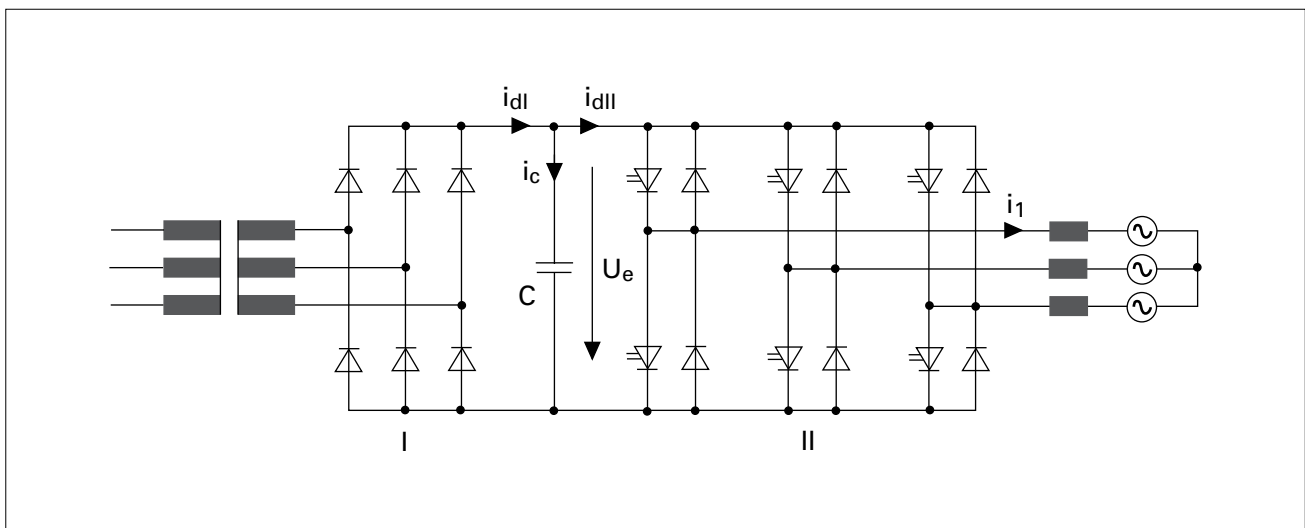


Figure 24: Convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire à tension continue (convertisseur U).

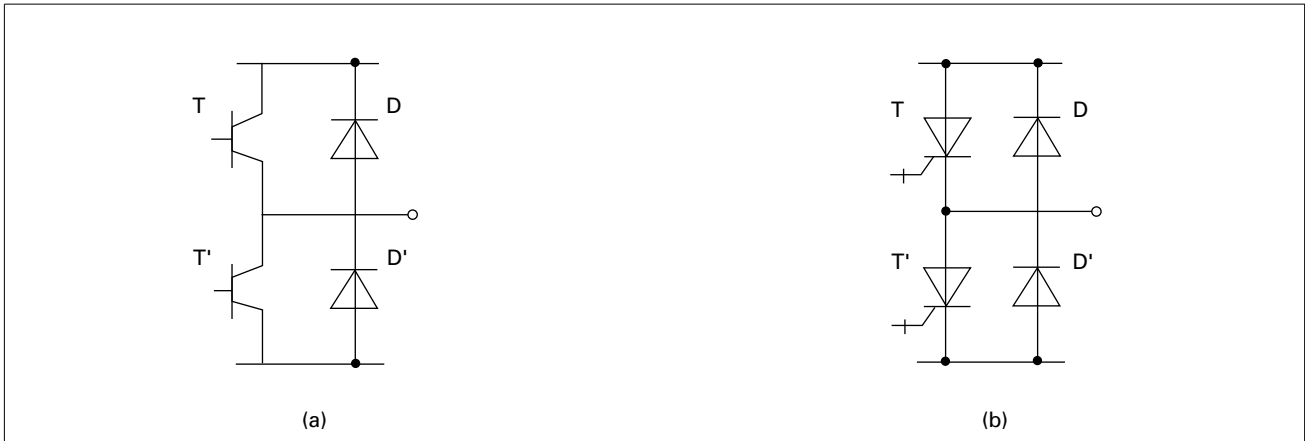


Figure 25: Plusieurs possibilités pour la réalisation des branches onduleur.

3.3 Fonctionnement de l'onduleur triphasé

Pour étudier le fonctionnement de l'onduleur, en particulier en ce qui concerne la formation des tensions, on fait appel au schéma de principe représenté à la figure 26. Les thyristors avec commutation forcée, les thyristors GTO ou les transistors à commutation sont représentés (comme à la figure 24) par le symbole général d'un contacteur statique ([2], paragraphe 12.2.2). On doit distinguer d'une

part les tensions de branche u_{10} , u_{20} et u_{30} mesurées par rapport à la borne (-) de la tension continue U_e , la tension d'entrée de l'onduleur. D'autre part, il y a les tensions de phase u_1 , u_2 et u_3 , mesurées par rapport à un point neutre flottant N. Ce dernier est formé par une charge triphasé symétrique, par exemple les enroulements statoriques d'un moteur asynchrone, montés en étoile. A noter que dans ce contexte, la connaissance de la configuration de la charge n'est pas nécessaire afin d'étudier le fonctionnement de l'onduleur triphasé. En effet, l'onduleur fonctionne de manière autonome, indépendamment de la charge.

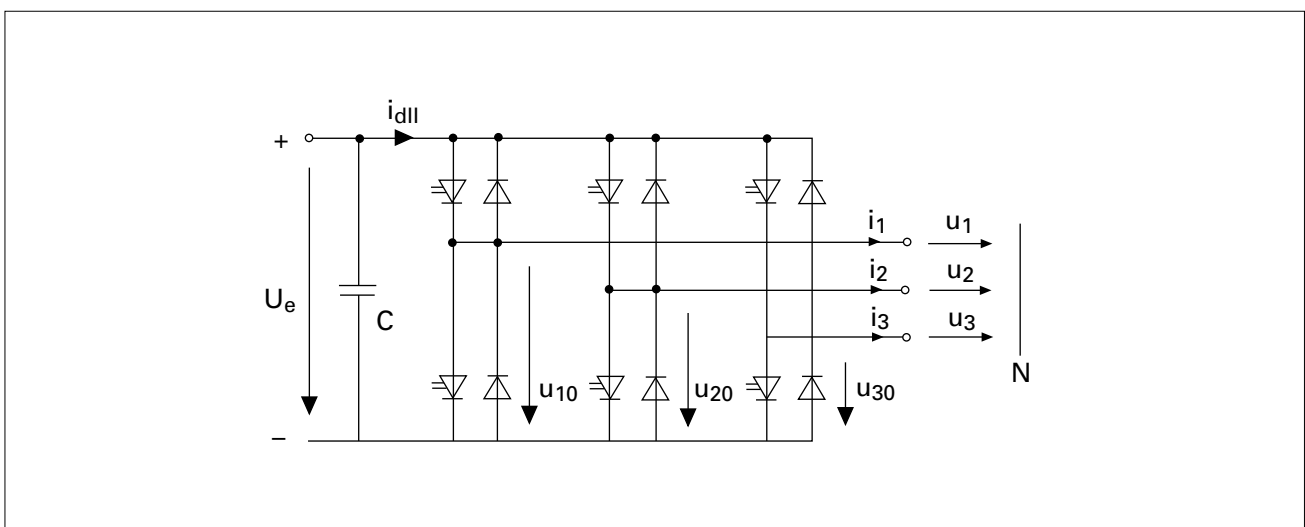


Figure 26: Schéma de principe de l'onduleur triphasé.

Les tensions de branches u_{k0} (avec $k = 1, 2$ ou 3) peuvent être imposées avec une commande appropriée des contacteurs statiques. Il faut alors déterminer les tensions de phase u_k à la sortie de l'onduleur. Dans ce but, on peut établir les relations

$$\left. \begin{aligned} -u_{10} + u_1 - u_2 + u_{20} &= 0 \\ -u_{10} + u_1 - u_3 + u_{30} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad [3.1]$$

En additionnant ces deux équations, on obtient

$$-2u_{10} + 2u_1 - u_2 - u_3 + u_{20} + u_{30} = 0 \quad [3.2]$$

Dans une charge triphasée symétrique avec point neutre flottant, la somme des courants de phase i_1 , i_2 et i_3 doit être nulle. Il en est de même pour les tensions de phase. Il existe donc la condition

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad [3.3]$$

Dans [3.2], on peut alors remplacer $-u_2 - u_3$ par u_1 et l'on tire

$$u_1 = \frac{1}{3} (2u_{10} - u_{20} - u_{30}) \quad [3.4]$$

Par analogie, on obtient pour les autres tensions de phase

$$u_2 = \frac{1}{3} (2u_{20} - u_{10} - u_{30}) \quad [3.5]$$

et

$$u_3 = \frac{1}{3} (2u_{30} - u_{10} - u_{20}) \quad [3.6]$$

Selon la conduction des contacteurs statiques ou des diodes dans une branche onduleur, les tensions de branches u_{k0} peuvent être égales à U_e ou à 0.

Dans le cas le plus simple, elles varient rectangulairement en fonction du temps, comme le montre la figure 27. Elle présente aussi l'allure des tensions de phase u_k , construite selon les relations [3.4] à [3.6].

Comme on le voit, les tensions de phase u_k possèdent une allure par gradins avec une amplitude égale à $2U_e/3$. Elles sont décalées de $T/3$ l'une par rapport à l'autre, où T est la période fondamentale des tensions de sortie de l'onduleur triphasé.

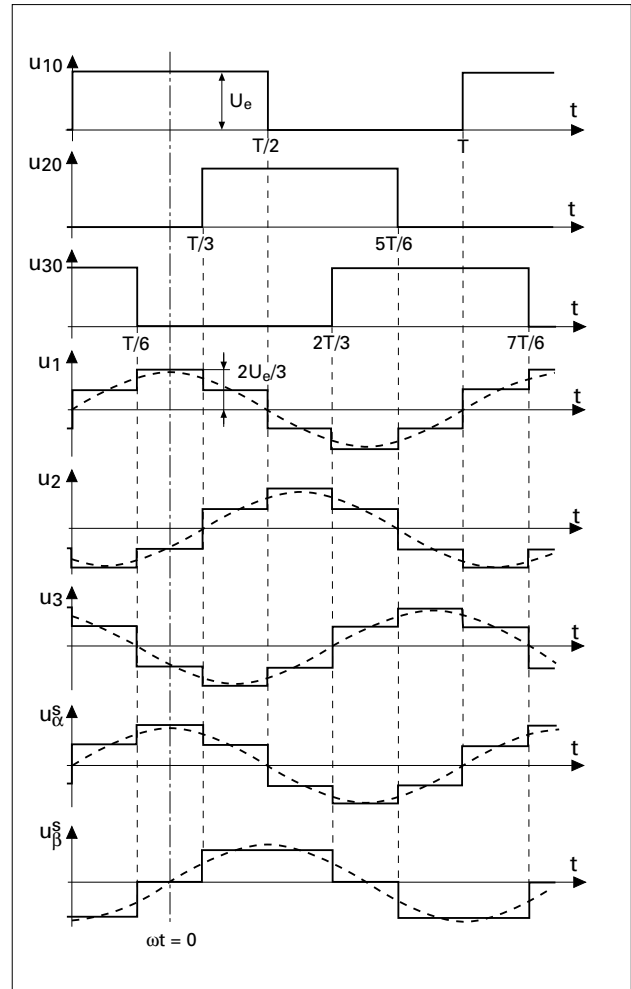


Figure 27: Allure des tensions d'un onduleur triphasé pour une commande rectangulaire.

3.4 Onde fondamentale et harmoniques de la tension de phase

Comme on le voit de la figure 27, les tensions u_k (tensions de phase de la charge) varient par gradins en fonction du temps. Il est possible de décomposer ces tensions en une onde fondamentale et des harmoniques selon le procédé du développement en série de Fourier.

Compte tenu des symétries existantes, les amplitudes $v_{\hat{U}_s}$ se déduisent de la relation

$$\begin{aligned}
 v\hat{U} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u \sin v \omega t \, d\omega t = \\
 &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{U_e}{3} \sin v \omega t \, d\omega t + \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \frac{U_e}{3} \sin v \omega t \, d\omega t \right] = \\
 &= \frac{8}{3\pi v} U_e \sin v \frac{\pi}{2} \sin v \frac{\pi}{3} \cos v \frac{\pi}{6} \quad [3.7]
 \end{aligned}$$

Avec $v = 1$, on obtient l'amplitude de l'onde fondamentale

$$1\hat{U} = \frac{2}{\pi} U_e \quad [3.8]$$

Par contre, pour les harmoniques, on trouve

$$\left. \begin{aligned}
 v\hat{U} &= \frac{2}{\pi v} U_e ; v = 5, 7, 11, 13, \dots \\
 v\hat{U} &= 0 ; v = 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, \dots \end{aligned} \right\} \quad [3.9]$$

Le spectre de la tension de phase est représenté à la figure 28. A noter qu'il n'y a ni des harmoniques d'ordre pair, ni des harmoniques d'ordre d'un multiple de trois.

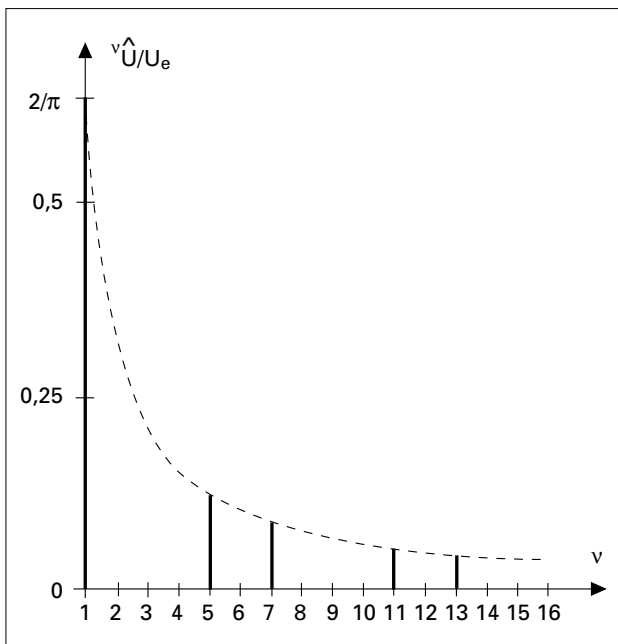


Figure 28: Spectre des harmoniques des tensions de phase de l'onduleur pour une commande rectangulaire.

3.5 Représentation par phaseurs spatiaux

Dans le cas présent, il est également judicieux de faire appel aux phaseurs spatiaux afin de représenter le fonctionnement de l'onduleur, en particulier en ce qui concerne les tensions de phase.

Les deux composantes du phaseur spatial \underline{u}^s des tensions de phase sont données par

$$u_{\alpha}^s = \frac{1}{3} (2 u_{10} - u_{20} - u_{30}) = U_1 \quad [3.10]$$

$$u_{\beta}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_2 - u_3) = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{20} - u_{30}) \quad [3.11]$$

Dans ce cas, on a introduit les tensions de branche u_{10} , u_{20} et u_{30} de l'onduleur.

L'allure temporelle de u_{α}^s et u_{β}^s est représentée en bas de la figure 27. Malgré l'allure différente entre u_{α}^s et u_{β}^s , les deux tensions possèdent la même amplitude de l'onde fondamentale.

Le phaseur spatial \underline{u}^s dans le plan (α^s, β^s) est représenté à la figure 29.

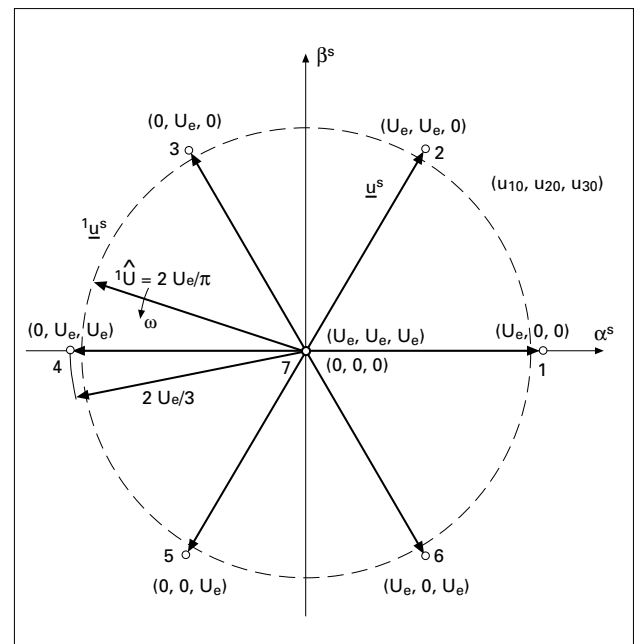


Figure 29: Phaseur spatial \underline{u}^s des tensions de phase dans le plan (α^s, β^s) .

Etant donné que les tensions de branche u_{k0} ne peuvent être que U_e ou 0, il y a huit positions possibles pour le phaseur spatial. Six se trouvent sur les sommets d'un hexagone. Le module du phaseur spatial est alors égal à $2 U_e/3$. Enfin, il y a deux positions qui se trouvent à l'origine du plan (α^s, β^s). Ici, le module du phaseur spatial est évidemment égal à 0. Pour chaque position du phaseur spatial, on a indiqué l'état (u_{10}, u_{20}, u_{30}) des trois tensions de branche.

Dans la figure 29, on a aussi représenté en trait interrompu le phaseur spatial $1\hat{u}^s$ de l'onde fondamentale. Il se déplace continûment sur un cercle de rayon $1\hat{U} = 2 U_e/\pi$ avec la pulsation $\omega = 2\pi/T$ lorsque les trois branches onduleurs sont commandées selon la figure 27.

3.6 Commande de l'onduleur à pulsation

3.6.1 Généralités

Dans cette section, on présentera plusieurs méthodes existantes pour commander l'onduleur à pulsation. Il s'agit plus particulièrement d'imposer une certaine modulation des tensions de branche où l'on peut tenir compte d'exigences particulières en ce qui concerne les harmoniques, la fréquence de pulsation, etc.

On mentionnera d'abord les différentes stratégies possibles pour ensuite montrer leur réalisation pratique. Dans ce contexte, on traitera aussi les caractéristiques de commande et le comportement dynamique.

3.6.2 Stratégies pour la commande de l'onduleur à pulsation

Pour la commande de l'onduleur à pulsation, on peut distinguer trois stratégies différentes, à savoir :

- modulation par des signaux de commande variables;
- modulation par des instants de commutation pré-établis;
- modulation par une commande directe.

La première méthode, la modulation par des signaux de commande variables, s'inspire de la commande du variateur de courant continu par un dispositif de contrôle analogique. Dans le cas présent, il faut évidemment prévoir une extension à un système triphasé. Les signaux de commande varient le plus souvent de manière sinusoïdale en imposant fréquence et amplitude de l'onde fondamentale. Ce procédé, connu aussi sous la notion de méthode de sous-oscillation est très répandu.

La deuxième méthode, la modulation par des instants de commutation pré-établis, se prête bien à une réalisation digitale par microprocesseurs. Dans ce cas, on calcule a priori les instants de commutation selon l'amplitude et la fréquence de l'onde fondamentale en tenant compte d'un critère supplémentaire, comme

- élimination de certaines harmoniques en tension;
- minimisation de l'ondulation en courant;
- minimisation de l'ondulation du couple électromagnétique d'un moteur asynchrone.

Enfin, la troisième méthode, la modulation par une commande directe, fait appel à des régulateurs à action à deux positions qui forment un système de réglage triphasé. Ce dernier règle normalement les courants triphasés en imposant des grandeurs de consigne variant sinusoïdalement en fonction du temps.

3.6.3 Commande par la méthode de sous-oscillation

Le principe d'un dispositif de commande par la méthode de sous-oscillation est représenté à la figure 30.

Le générateur de fonction 1 fournit trois signaux auxiliaires u_{h1}, u_{h2} et u_{h3} sous forme de tensions triangulaires. Ils sont comparés avec les signaux de commande analogiques u_{cm1}, u_{cm2} et u_{cm3} . La différence apparaît à l'entrée d'une des trois bascules de Schmitt 2, produisant les signaux logiques d_1, d_2 et d_3 . Enfin, il y a une commande logique 3 qui forme les signaux logiques c_k et c_k' (avec $k = 1, 2, 3$) permettant d'enclencher et de déclencher les deux contacteurs statiques dans chaque branche onduleur. Le fonctionnement de cette commande logique dépend fortement de la réalisation des branches onduleurs (chapitre 3.2). En particulier pour la commutation forcée, il faut dériver à partir des

signaux logiques c_k et c'_k des impulsions permettant d'allumer les thyristors principaux et les thyristors auxiliaires. En tout cas, entre les signaux c_k et c'_k , il faut tenir compte du retard t_a du temps d'antiveauement. De plus, il faut garantir que les branches onduleurs soient enclenchées ou déclenchées pendant un laps de temps minimal afin de permettre une commutation correcte et de limiter les pertes de commutation ponctuelles.

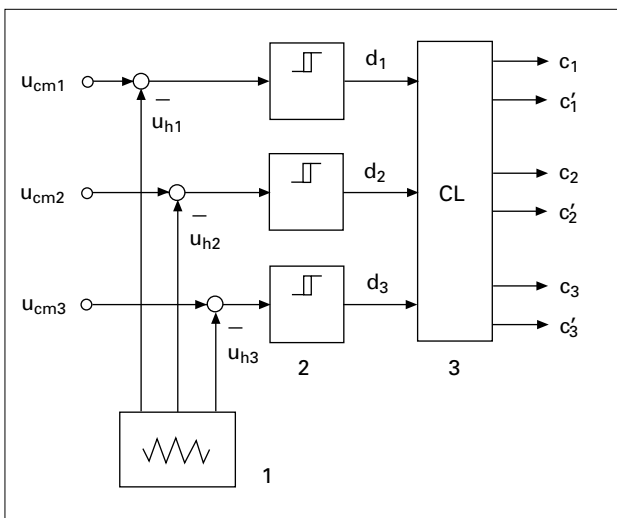


Figure 30: Représentation schématique d'un dispositif de commande par la méthode de sous-oscillation.

3.6.4 Fonctionnement de la méthode de sous-oscillation

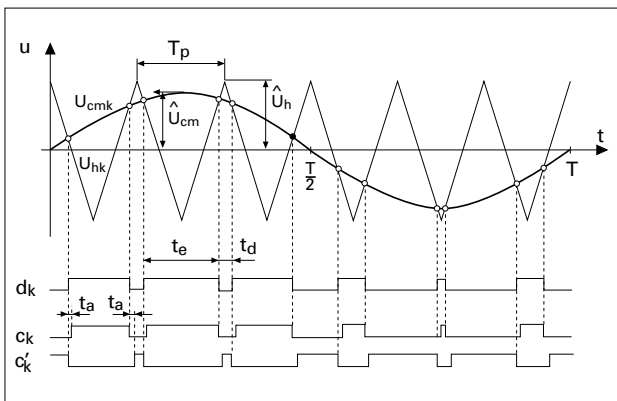


Figure 31: Principe de fonctionnement d'un dispositif de commande par la méthode de sous-oscillation, avec des signaux auxiliaires séparés pour les trois branches.

La figure 31 montre le principe de fonctionnement de ce dispositif de commande pour une branche k . Les durées d'enclenchement t_e et de déclenchement t_d sont données par l'intersection des tensions u_{cmk} et u_{hk} . Etant donné que le signal de commande varie sinusoïdalement, on obtient une modulation de la durée d'enclenchement t_e , définie par la durée où le signal logique d_k est égal à 1.

Le retard t_a , dû au temps d'antiveauement, possède une influence sur l'allure des signaux logiques c_k et c'_k , qui déterminent la commande effective des branches onduleurs selon la polarité du courant de phase.

La fréquence de pulsation $f_p = 1/T_p$ est donnée par la période T_p du signal auxiliaire u_{hk} . Si cette période est relativement grande vis-à-vis de la période T de l'onde fondamentale, c'est-à-dire pour $T_p \geq T/20$ environ, il est indispensable que le signal auxiliaire u_{hk} soit synchronisé et mis en phase avec le signal de commande u_{cmk} , comme le montre la figure 31. Afin de garantir une symétrie entre les demi-ondes positive et négative, il faut en plus que la période de pulsation T_p soit une fraction entière impaire de la demi-période fondamentale $T/2$, donc

$$T_p = \frac{T/2}{2^{2v+1}} = \frac{T}{2^{2(v+1)}} ; v = 1, 2, 3, \dots \quad [3.12]$$

Lorsque la période fondamentale T varie dans un large domaine (ce qui est le cas lors de l'alimentation d'un moteur asynchrone à vitesse variable), il est indispensable de varier le nombre de commutations par période fondamentale afin d'obtenir une fréquence de pulsation à peu près constante.

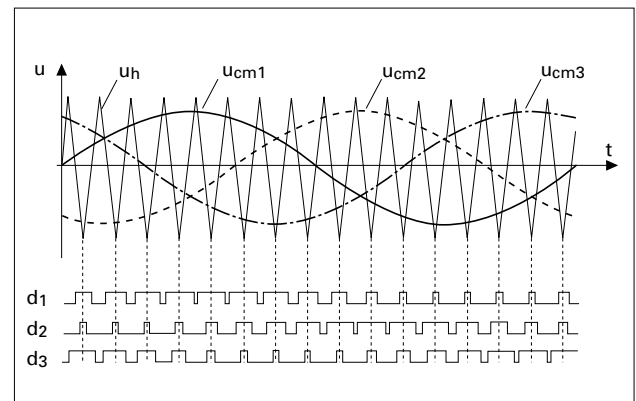


Figure 32: Principe de fonctionnement d'un dispositif de commande par la méthode de sous-oscillation, avec un seul signal auxiliaire pour les trois branches.

Cette adaptation et synchronisation (cette dernière séparément pour chaque branche) complique notablement la réalisation de ce dispositif de commande.

3.6.5 Commande directe par des régulateurs à action à deux positions

Pour commander l'onduleur à pulsation, on peut aussi faire appel à des régulateurs à action à deux positions.

La figure 33 en donne une représentation schématique.

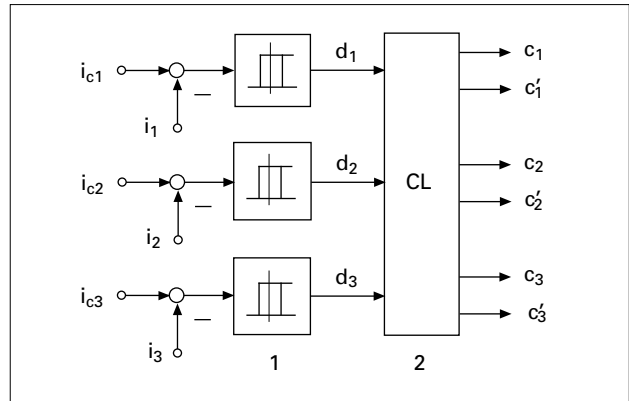


Figure 33: Représentation schématique d'une commande directe par régulateurs à action à deux positions.

4. Méthodes de réglage des entraînements à vitesse variable utilisant des machines à champ tournant

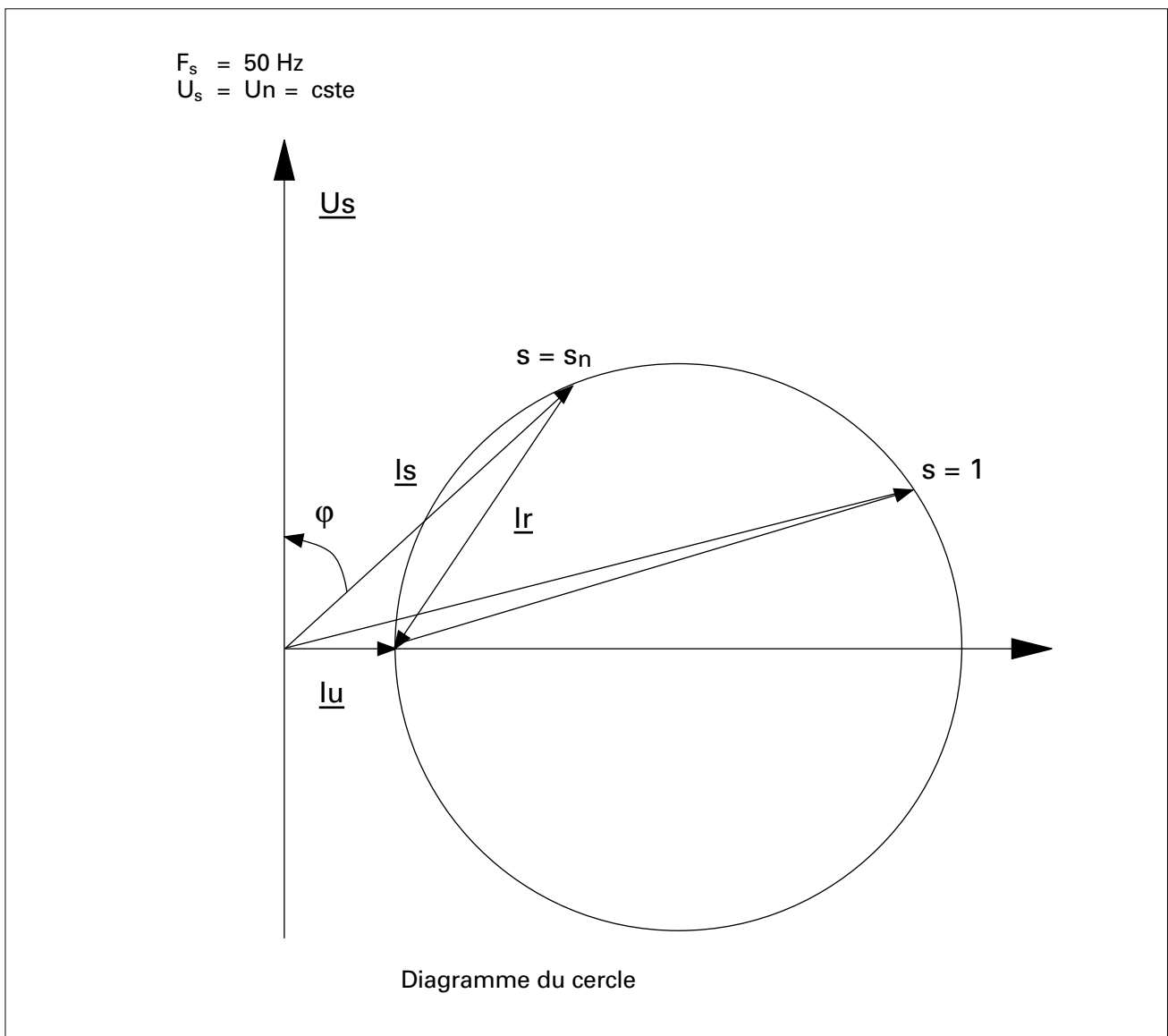


Figure 34: Machine asynchrone, fonctionnement normal.

4.1 Machine asynchrone
4.1.1 Machine asynchrone à fréquence variable
Réglage sur la base du modèle stationnaire

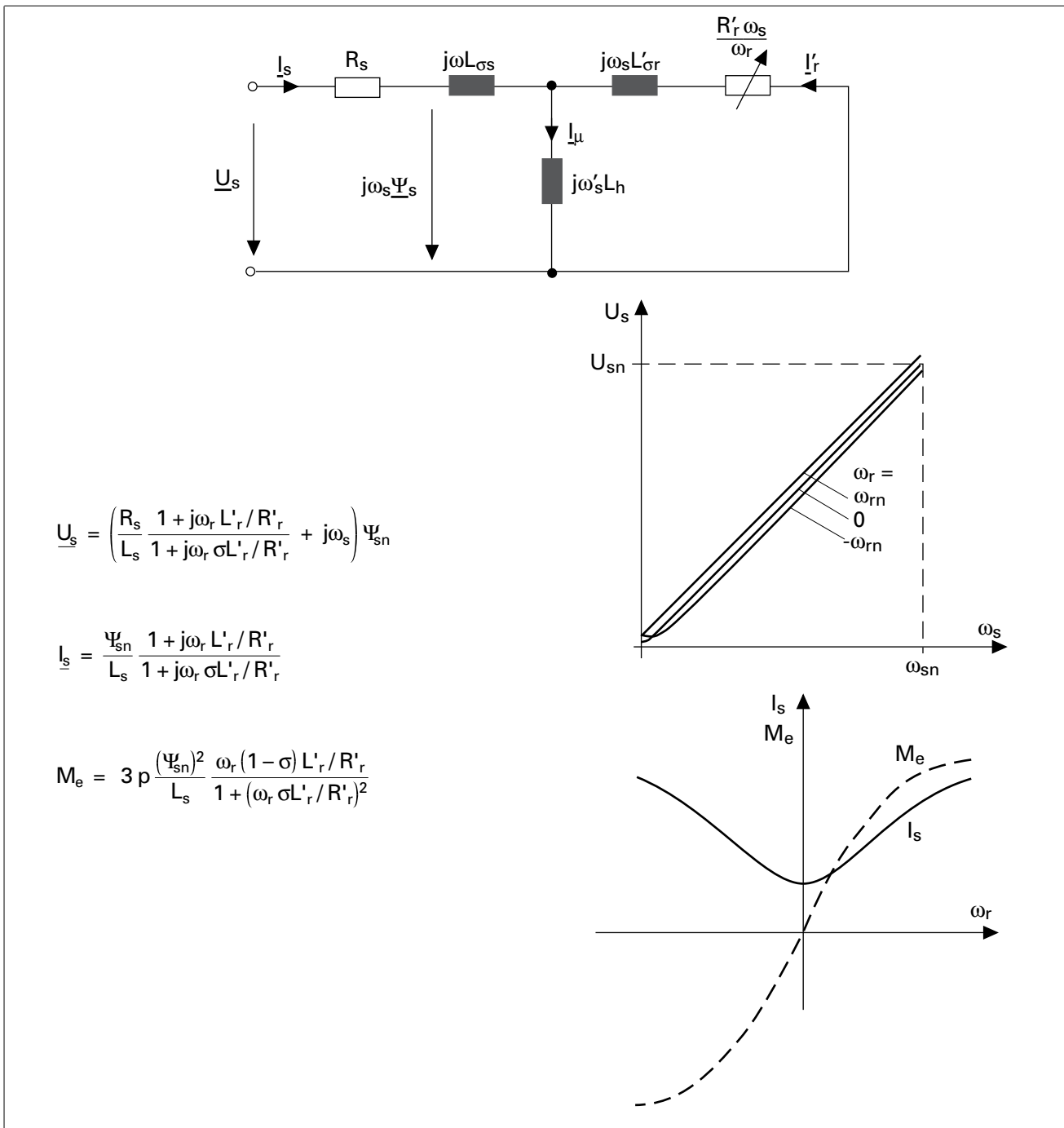


Figure 35: Machine asynchrone à fréquence variable. Réglage sur la base du modèle stationnaire.

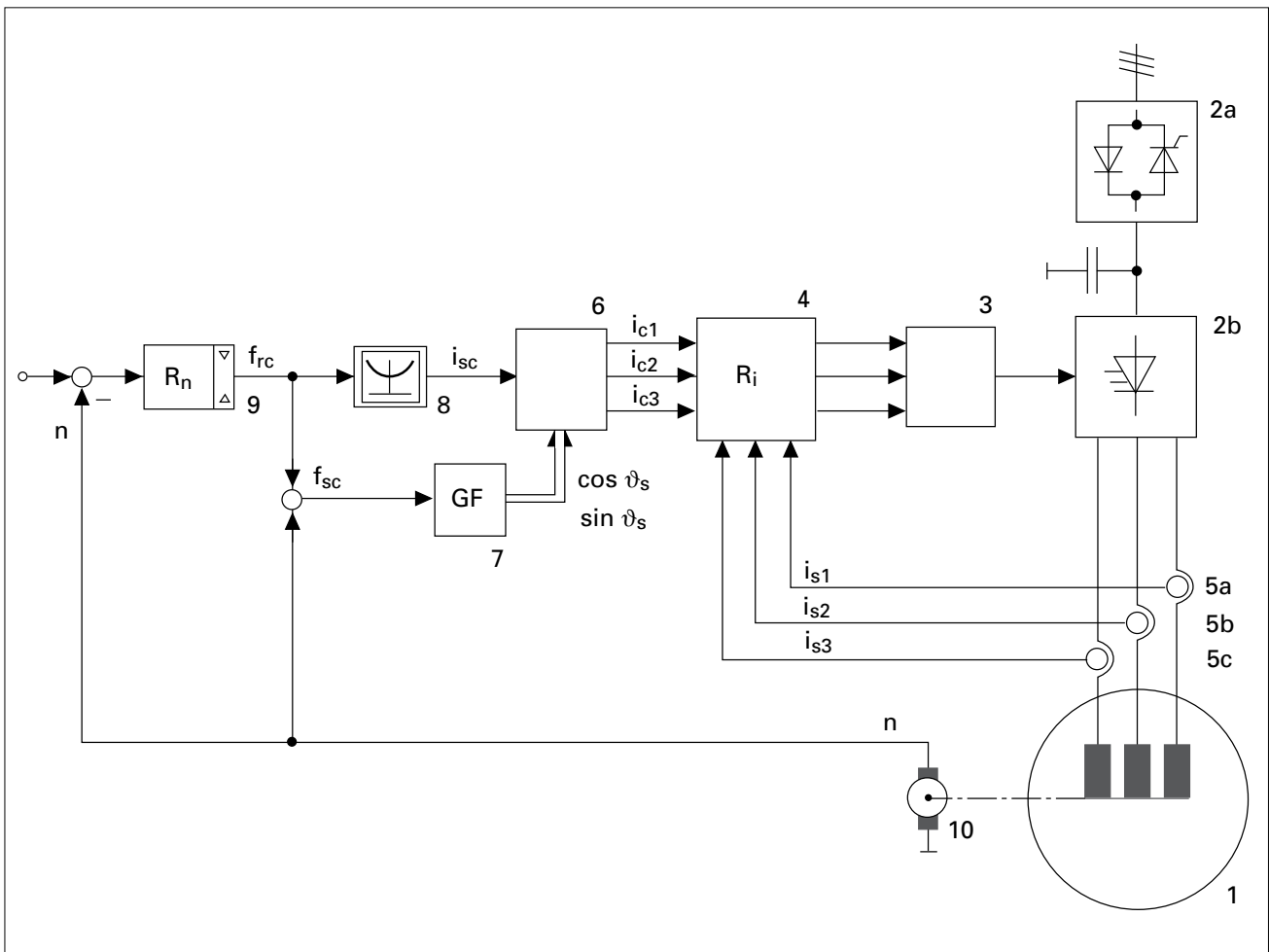


Figure 36: Schéma de principe d'un réglage de vitesse pour un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur U.

4.1.2 Réglage vectoriel

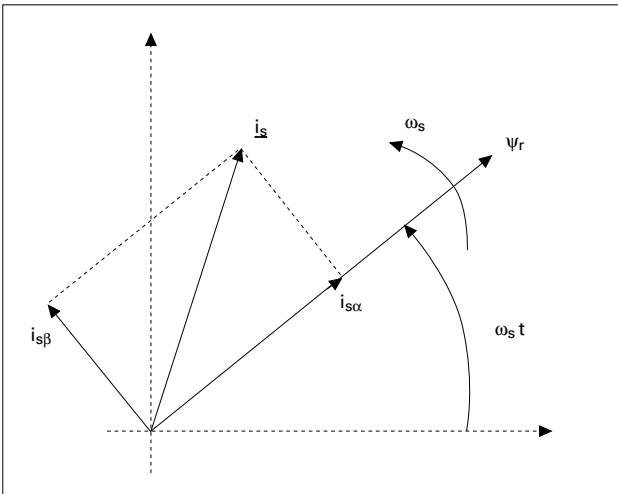


Figure 37: Diagramme vectoriel illustrant le principe de l'orientation sur le flux rotorique.

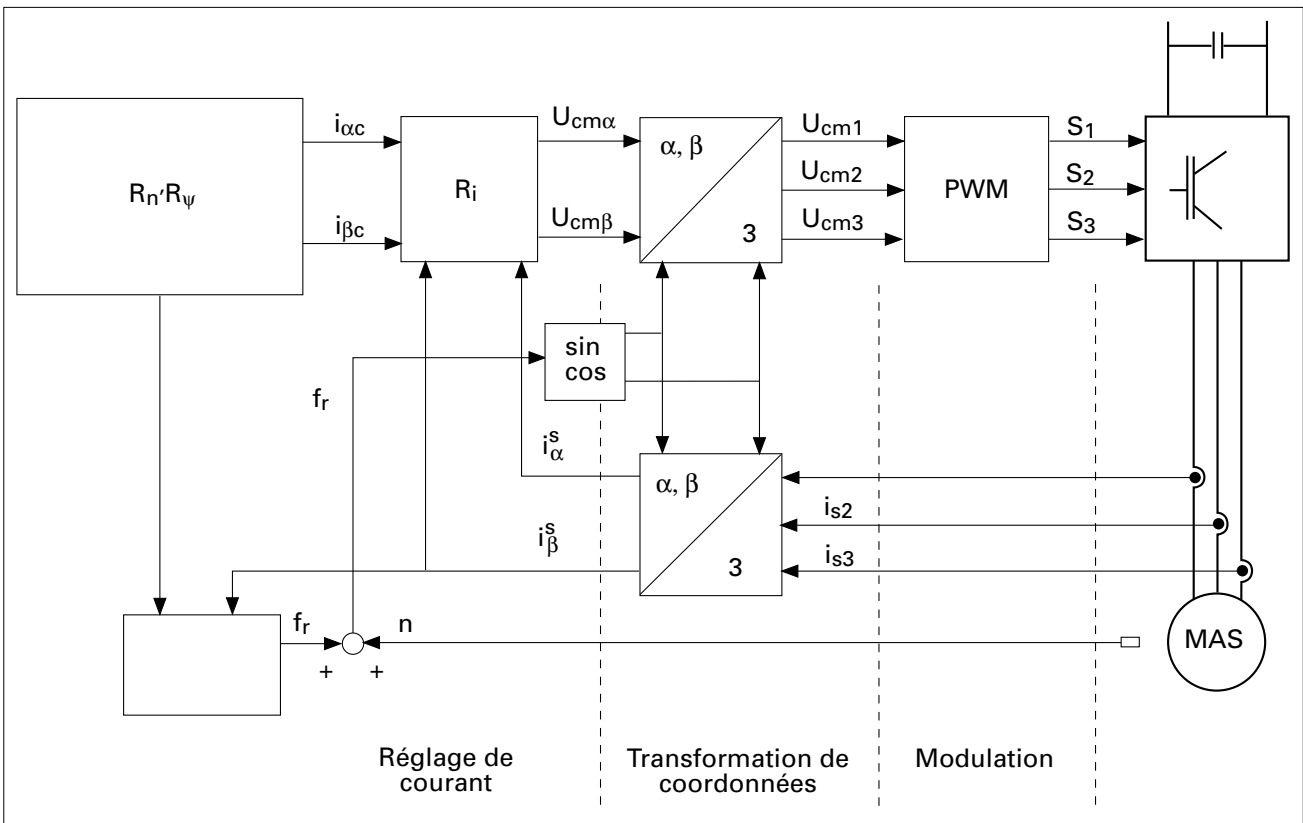


Figure 38: Réglage classique par orientation sur le flux rotorique.

4.1.3 Réglage par intervention directe

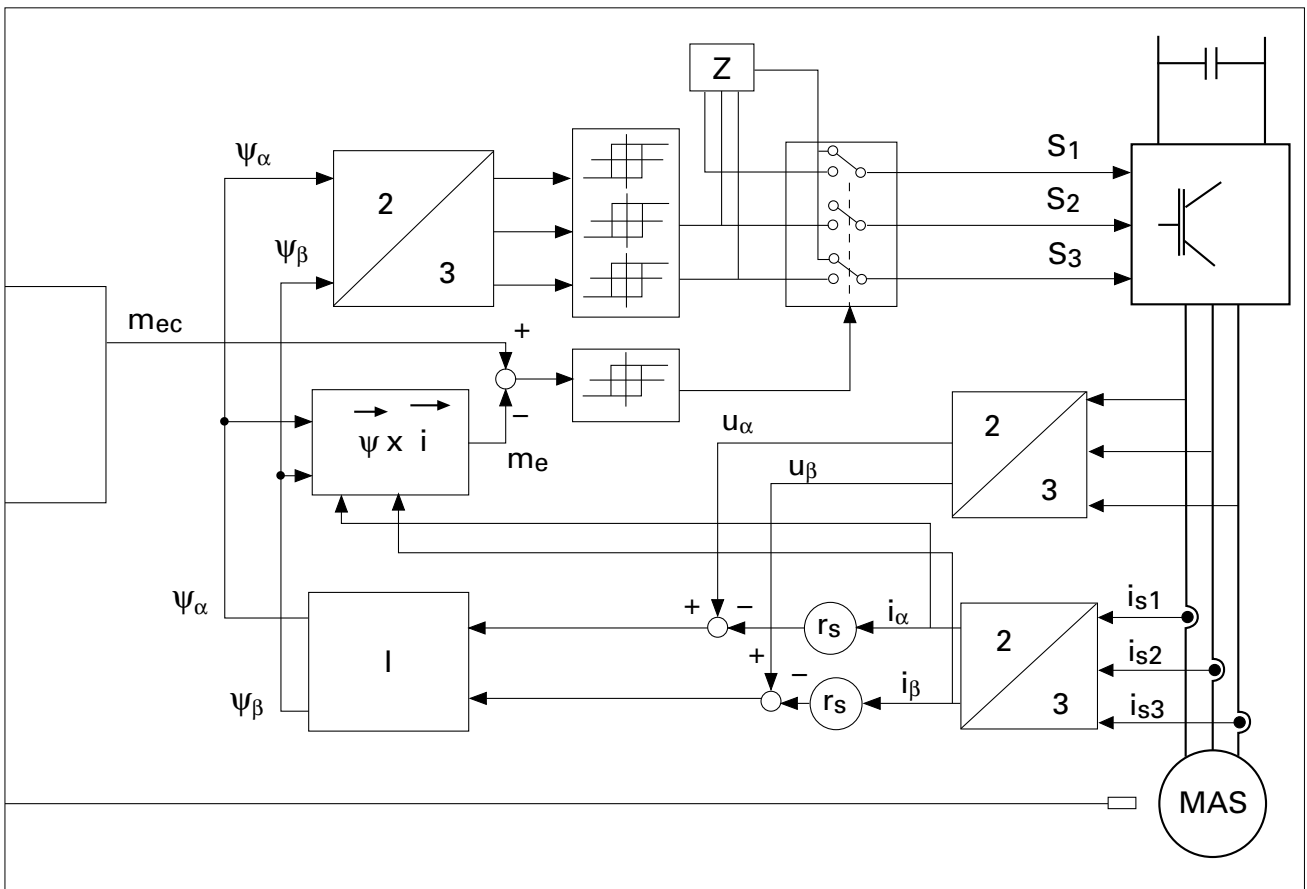


Figure 39: Réglage par intervention directe.

4.2 Moteur synchrone

4.2.1 Stratégie de commande du moteur synchrone

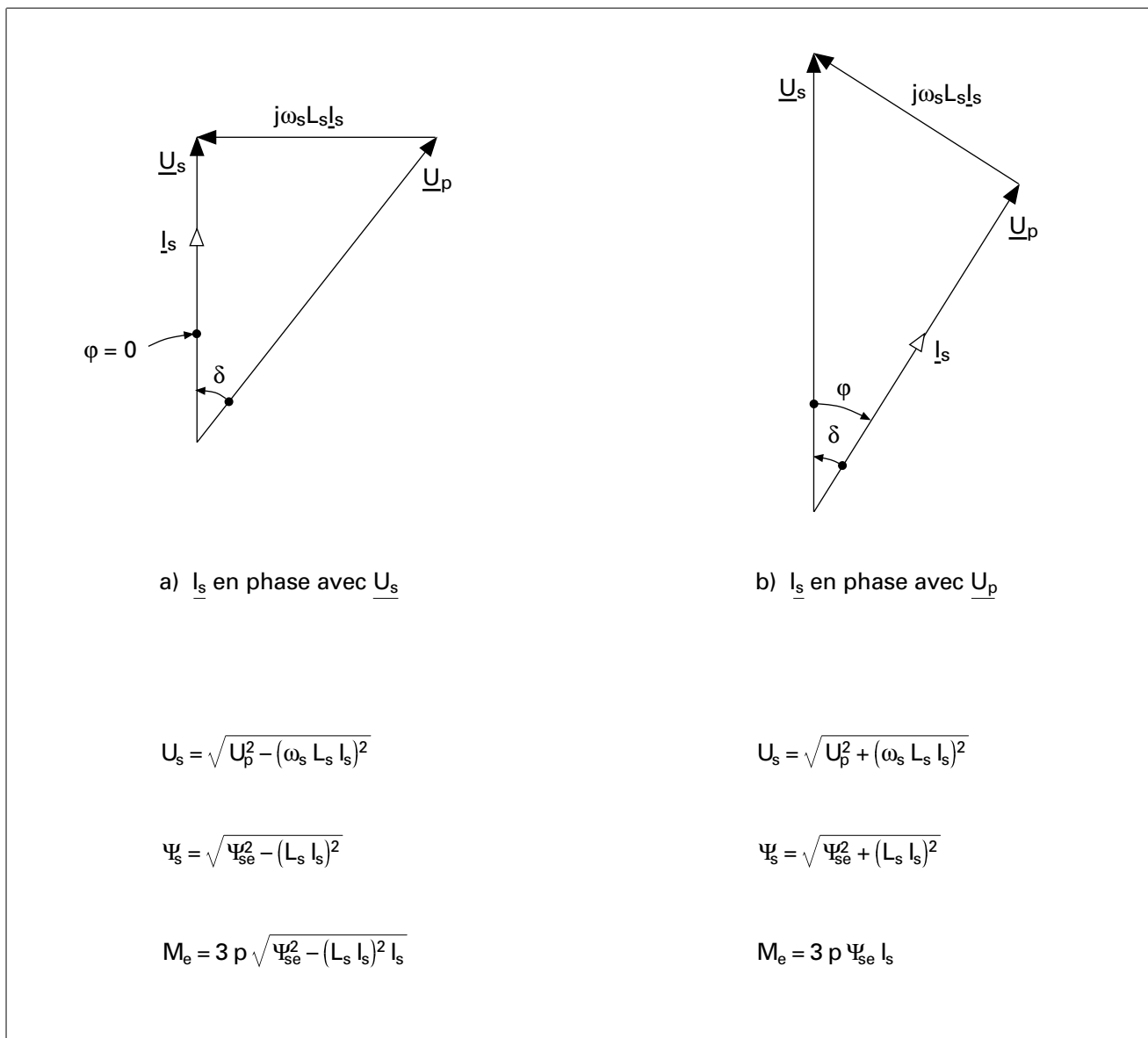


Figure 40: Stratégie de commande du moteur synchrone.

4.2.2 Schéma de principe d'un réglage de position pour moteur à aimants permanents

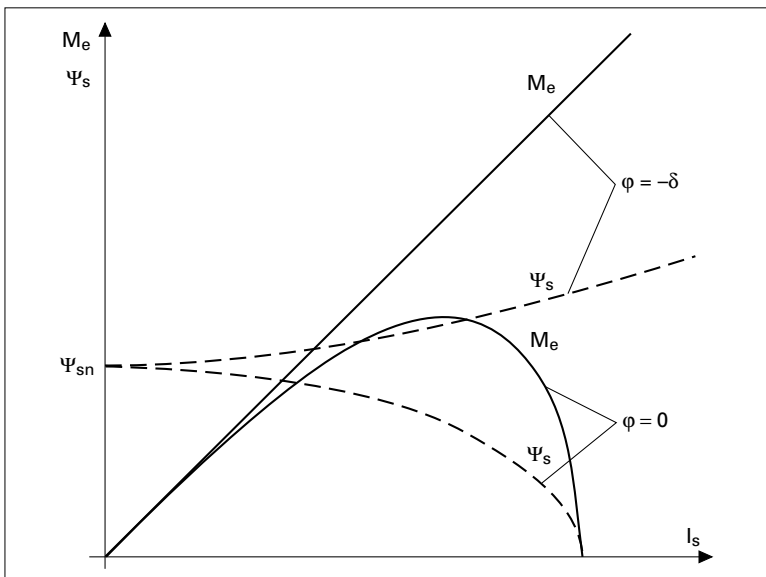


Figure 41: Caractéristiques du couple électromagnétique M_e et du flux statorique Ψ_s en fonction du courant statorique I_s pour un moteur synchrone à aimants permanents.

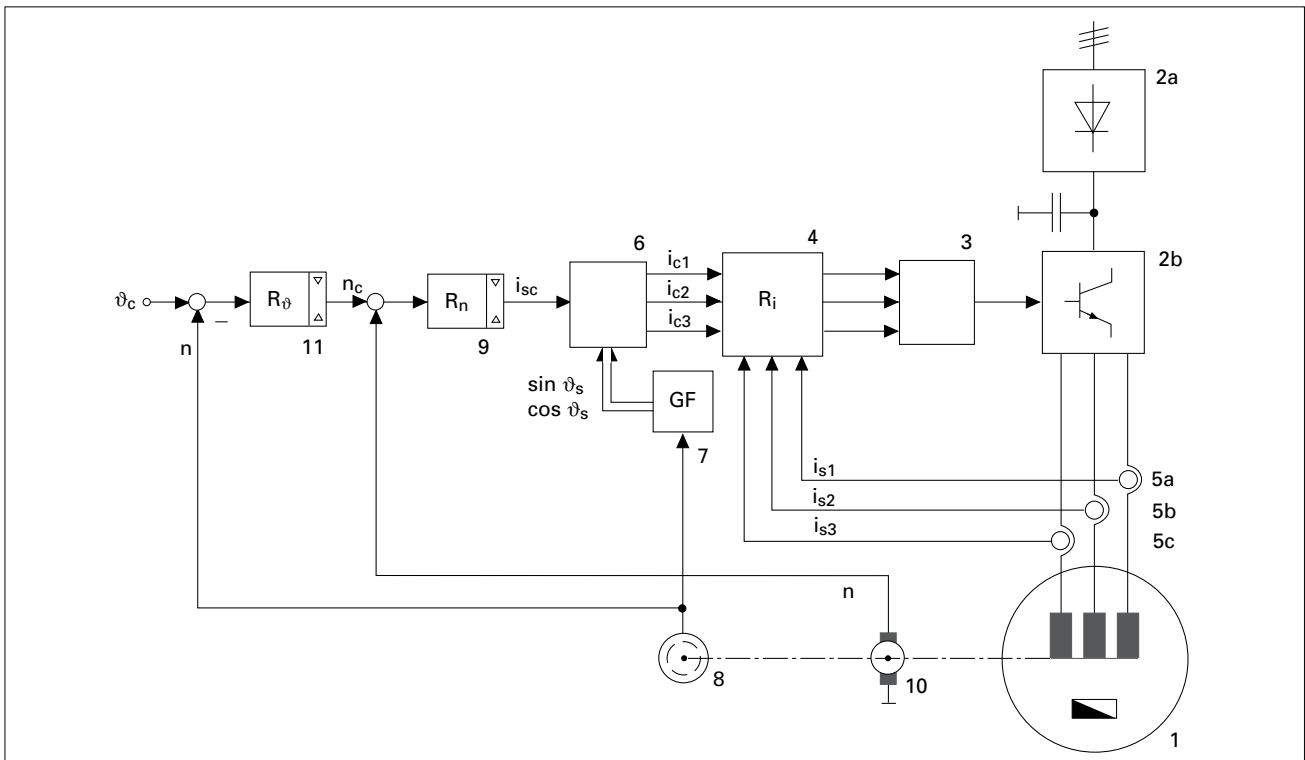


Figure 42: Schéma de principe d'un réglage de position pour un moteur synchrone à aimants permanents.

5. Références bibliographiques

- [1] H. Bühler: « Convertisseurs statiques ». Complément au Traité d'Electricité, 1991, Presses Polytechniques Romandes (PPR), Lausanne.
- [2] H. Bühler: « Electronique de Puissance ». Traité d'Electricité, Vol. XV, 1987, Presses Polytechniques Romandes (PPR), Lausanne.

4^e partie

Economie d'énergie, adéquation des composants et méthodologie de choix

Michel Bongard

**Adaptation et traduction du chapitre 4 de l'édition originale
« Elektrische Antriebe, energie-optimal auslegen und betreiben », N° 724.331 d**

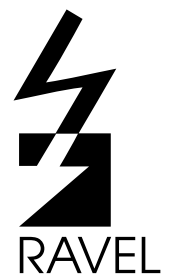


Table des matières

1.	Introduction	101
2.	Développement, importance générale et potentiel d'économie d'énergie des entraînements électriques	102
3.	Méthodologie pour une conception énergétiquement économique des entraînements électriques	103
3.1	Bases de départ	103
3.2	Conséquences des améliorations de la méthodologie de conception des entraînements	104
3.3	Procédure systématique pour la définition d'un entraînement électrique	106
3.3.1	Analyse du processus, détermination des exigences de l'entraînement	108
3.3.2	Structuration de l'entraînement	110
3.3.3	Choix des composants de l'entraînement	111
3.3.4	Définition des grandeurs nominales	114
3.4	Logiciels pour l'aide à la définition et à la simulation des entraînements	117
3.4.1	Définition des buts et des tâches	117
3.4.2	Logiciels d'aide aux choix de moteurs asynchrones correctement chargés	118
3.4.3	Logiciels d'aide au choix des moteurs asynchrones alimentés par onduleur et choix de l'onduleur	121
3.4.4	Logiciels d'application pour la détermination et le choix des entraînements	125
4.	Analyse et identification du processus et des composants des entraînements	126
4.1	Introduction	126
4.2	Identification de la machine entraînée ou de l'organe entraîné	126
4.2.1	Généralités	126
4.2.2	Grandeurs d'états et équations de base	127
4.2.3	Les paramètres de la machine et leur définition	129
4.2.4	Définition du moment d'inertie	130
4.3	Liste de contrôle pour l'analyse de processus et préparation des étapes conduisant au choix de l'entraînement	132
4.4	Identification du procédé, techniques de mesures et valorisation	133
4.4.1	Moyen pour l'analyse de la machine ou du processus	133
4.4.2	Moyens d'analyse de l'entraînement électrique	134
5.	Economie d'énergie dans les systèmes d'entraînement	136
5.1	Marche à suivre générale	136
5.2	Economies d'énergie de la machine et du processus	137
5.2.1	Amélioration de la construction	137
5.2.2	Amélioration du processus	137
5.3	Economie d'énergie du moteur	138
5.3.1	Charge du moteur	138
5.3.2	Grandeur, puissance et vitesse du moteur	139
5.3.3	Type et alimentation du moteur	139
5.3.4	Définition du moteur	140
5.4	Economie d'énergie provenant de l'électronique de puissance	142
5.5	Economie pour les régimes transitoires	143
5.6	Liste de contrôle	147

6.	Amélioration de l'exploitation des entraînements sur- et sous-chargés	148
6.1	Les moteurs normalisés en charge partielle	148
6.1.1	Considération économique-énergétique du comportement des moteurs asynchrones en charge partielle	148
6.1.2	Le rendement et le facteur de puissance en fonction de la charge	148
6.1.3	Lois de similitudes et charges partielles pour les moteurs asynchrones normalisés	149
6.1.4	La valorisation économique du rendement et du facteur de puissance	150
6.2	Mesures pour améliorer l'utilisation d'entraînements sous-chargés	151
6.2.1	Généralités	151
6.2.2	Mesures pour améliorer l'utilisation	152
6.3	Mesures pour améliorer le comportement d'entraînements surchargés	156
<hr/>		
7.	Entraînements économique-énergétiques importants et solutions	159
7.1	Ventilateurs avec réglage de vitesse	159
7.2	Pompe avec vitesse variable	162
7.3	Utilisation de l'énergie d'une pompe centrifuge en régime inverse	165
<hr/>		
8.	Références bibliographiques	169

1. Introduction

Ce document souhaite promouvoir l'utilisation rationnelle de l'énergie électrique dans l'application et l'exploitation des entraînements électriques.

Plusieurs solutions sont à disposition :

- Augmenter les rendements de chaque composant de l'entraînement et en particulier celui du moteur électrique.
- Utiliser des nouveaux moyens/principes *actifs* de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, par exemple augmenter l'utilisation des aimants permanents dans la construction des moteurs électriques.
- Etudier la meilleure solution de l'ensemble du système d'entraînement et de son adaptation adéquate aux exigences de la machine ou de l'organe à entraîner.
- Trouver la meilleure exploitation du processus par des mesures et des observations entraînant une conduite et des réglages appropriés.

Les études d'économie d'énergie dans les différentes applications des entraînements électriques démontrent de façon générale que ceux-ci sont mal adaptés aux charges et/ou aux variations de char-

ges. Ainsi les moteurs et leur alimentation sont surdimensionnés. Les possibilités d'adaptation, de l'entraînement aux besoins réels d'exploitation, mises à disposition par les réglages et les convertisseurs statiques ne sont que trop peu utilisées.

Cela conduit à des conditions d'exploitation énergétiquement peu favorables ainsi qu'à de faibles rendements et de petits facteurs de puissance. N'oublions pas non plus que chaque investissement de matériel correspond à une consommation d'énergie qui, pour sa part, correspond à son « contenu d'énergie » ou « énergie grise ».

Ce document concerne aussi bien le concepteur-projeteur que l'exploitant. Tous deux doivent définir les contraintes et les exigences des entraînements électriques en fonction de la connaissance et de la maîtrise du procédé (ou processus) et de sa conduite dans le temps. Plus complexe est le procédé (ou processus), meilleure est sa prévision, mieux seront faits les choix des composants de l'entraînement. Il en résultera alors un meilleur rendement global du système complet et moindre sera sa consommation d'énergie. Il est évident que les possibilités d'amélioration des rendements du convertisseur d'énergie lui-même et aussi du système de transformation ou procédé sont à observer en permanence afin d'en tirer profit.

2. Développement, importance générale et potentiel d'économie d'énergie des entraînements électriques

Le développement des entraînements se fait en permanence, en fonction de l'évolution des besoins et des exigences et en relation avec les innovations techniques et technologiques.

Avant l'invention de la machine à vapeur, seules la force musculaire, la force hydraulique et celle du vent étaient les moyens d'entraînements. En général, ils étaient limités en grandeur et géographique-ment.

Avec la machine à vapeur, l'industrie a pu disposer d'un moyen d'entraînement indépendant du lieu. Ce système était centralisé et la distribution d'énergie vers de petites machines était réalisée mécaniquement.

L'invention de la machine électrique, il y a environ 100 ans, et les facilités de transport et de distribution de l'énergie électrique ont apporté de nouvelles impulsions à la technique des entraînements. Les possibilités d'adaptation et de réglage des machines électriques permettent un accouplement simple avec la machine et une adaptation permanente aux conditions d'exploitation du procédé ou processus.

Cette qualité d'adaptation a encore été augmentée par le développement de la technique des convertisseurs statiques (électronique). Cette technique a été soutenue dans son développement par la micro-électronique et par les calculateurs (ordinateurs) de procédés et processus qui permettent de prendre à leur compte des tâches d'optimisation.

Les différentes possibilités des moteurs et des convertisseurs permettent de réaliser des entraînements avec différentes qualités. Il est raisonnable de classer les entraînements selon les types suivants :

- *Entraînements non commandés* : pour des charges constantes et de faibles exigences de précision et de réaction à la charge.
- *Entraînements commandés* : pour des exploitations variables et possibilités d'adaptation aux différents régimes.
- *Entraînements réglés* : pour des exploitations avec hautes exigences de précision et d'adaptation aux variations de charge.
- *Entraînements conduits* : pour des exploitations avec tâches d'optimisation et de coordination.

En plus, il y a lieu de différencier entre entraînement individuel et entraînements en groupe. Dans ces

choix, la minimalisation des pertes et les conditions de coordination d'exploitation peuvent être d'une certaine importance.

Il est en général très difficile d'avoir une bonne vision de la répartition des différents types d'entraînements dans le parc d'exploitation industriel global. Des évaluations montrent que la grande partie de la conversion d'énergie électrique est faite par des moteurs non commandés et que la tendance d'utiliser des entraînements réglés est en constante progression.

Une évaluation de la part « énergétique » des entraînements est seulement disponible dans des pays « autarciques » comme les USA. Selon des publications (Federal Energy Administration : Energy Efficiency and Electric Motors/May 1976) plus de 50% de la production d'énergie électrique est convertie dans les entraînements électriques.

En Suisse, les statistiques donnent la répartition en quatre formes de la consommation d'énergie électrique : « chaleur », « force », « lumière » et « énergie de processus ». Le 58% de cette dernière est à nouveau de la « force ». (Il faut souligner que les statistiques énergétiques suisses ne sont plus du tout à un niveau qui permette une exploitation cohérente et efficace des valeurs indiquées.)

Pour des informations détaillées, se référer à la partie « Utilisation rationnelle de l'énergie électrique finale dans les processus de production et dans l'exploitation industrielle » de ce document.

3. Méthodologie pour une conception énergétiquement économique des entraînements électriques

Important !

- La majorité des machines électriques sont sous-chargées, respectivement surdimensionnées, c'est-à-dire *pas chargées de façon optimale*.
- Les entraînements qui ne sont pas dimensionnés de façon optimale conduisent à : *de plus grandes pertes, un facteur de puissance plus faible, plus d'investissement en matériel, de plus grands coûts et une plus grande dissipation d'énergie*.
- La conception optimale de l'entraînement ne peut se faire que par une vision globale du système et par l'application d'une procédure systématique :
 - 1) analyse du processus ;
 - 2) spécifications ;
 - 3) structuration de l'entraînement ;
 - 4) conception ;
 - 5) simulation et optimisation.
- Lors de la conception, on doit correctement tenir compte des surcharges thermiques de courte durée.
- Lors de l'étude d'entraînements avec moteurs normalisés, des *logiciels d'aide ou d'application sont disponibles*.

3.1 Bases de départ

Un entraînement dimensionné et exploité de manière optimale est caractérisé par les qualités suivantes :

- le moteur est chargé en moyenne à sa puissance nominale et son point de fonctionnement se trouve alors au point de meilleur rendement ;
- les pertes à vide et à l'arrêt sont maintenues aussi faibles que possible ;
- les pertes de transfert au travers du convertisseur électronique et du réducteur mécanique sont aussi faibles que possible et le rendement de la machine (procédé) entraînée aussi élevé que possible.

Les analyses des différentes applications démontrent cependant que la réalité diffère souvent beaucoup de cela.

Le tableau suivant donne les rapports de charge des différents entraînements dans diverses branches de l'industrie. On se rend compte que les machines ne sont vraiment pas utilisées à 100%. Le tableau donne le rapport de charge par rapport à la puissance installée P/P_N , ainsi que la durée d'exploitation relative par année T_B . Il s'agit de moteurs asynchrones normalisés de puissances < 100 kW.

Puissance ≤ 100 kW	P/P_N	T_B
Ventilation	0,70	0,12
Pompes, compresseurs	0,63	0,52
Machines de transformation en général	0,69	0,25
Machines-outils*	0,20	0,45

Tableau 1: Rapports de charge des différents entraînements dans diverses branches de l'industrie.

Remarque*: T_B certainement trop élevé ! 0,15 à 0,20.

Dans le cadre des études RAVEL « Rendement global de processus (électrique) », par exemple pour des machines à imprimer le textile, on observe la même tendance : pendant le procédé continu d'impression, les entraînements de la machine d'impression sont en moyenne peu chargés (figure 2 et tableau 3).

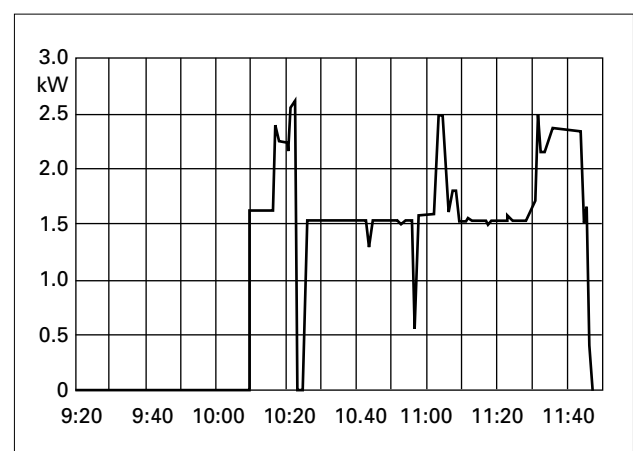


Figure 2: Machine d'impression textile.

Remarque: la charge des différents entraînements en fonction du temps est très variable et peut difficilement être classée selon les cas de charges normalisées.

Consommateur électrique	Puissance installée [kVA]	Puissance mesurée [kW]	Cos φ
Machine d'impression:			
Bande (F130)	31,00	3,47	0,18
Corps de chauffe	3,10		
Pompe couleur (eau)	0,55	0,15	0,21
Pompe couleur	0,55	0,33	0,67
Brosses	1,50	0,53	0,50
Brosses	1,50	0,48	0,47
Chablons	0,75	0,37	0,42
« Breithalter »	2,20	1,45	0,55
Séchoir:			
Ventilateur circ. 1/1 (M500)	8,00	4,64	0,61
Ventilateur circ. 1/2 (M500)	25,00	25,00	0,69
Ventilateur circ. 2/1	8,00		
Ventilateur circ. 2/2	25,00	14,90	0,68
« Abluftventilator »	5,20	2,42	0,78
Bande de séchage	2,80		
« Abzug Trockner »	1,80	0,88	0,50

Tableau 3: Charge des divers entraînements d'une machine d'impression textile.

Dans cette application également, les durées de production d'impression sont relativement petites par rapport au temps de mise en route ou de préparation. La demande de puissance varie de façon considérable selon les mesures de la figure 4.

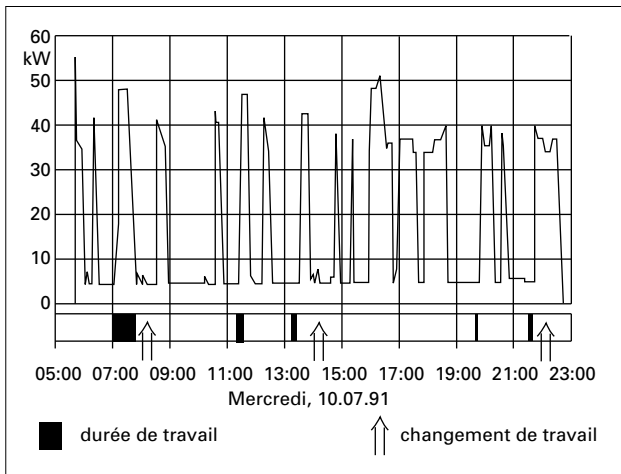


Figure 4: Représentation de la demande de puissance d'une rotative d'impression pour le textile.

Un grand potentiel d'économie d'énergie est disponible dans les pompes de circulation des chauffages comme l'a démontré le projet RAVEL: « Dimensionnement et exploitation optimale des circulateurs » (N° 724.330 f). Les pompes de circulation des chauffages consomment environ 3,5% de la consommation électrique globale de la Suisse. Les résultats des analyses et les possibilités d'amélioration du dimensionnement et des conditions d'exploitation démontrent qu'un potentiel d'économie de 40% peut être réalisable. Le gain d'énergie provient de la meilleure adaptation de la puissance aux besoins effectifs, par exemple par réglage continu de la vitesse de la pompe de circulation et par un meilleur dimensionnement de celle-ci. Ce dernier point est le fait d'une mauvaise connaissance des besoins réels de chauffage ou, si l'on veut, de la réelle valeur de l'énergie « utile » désirée.

Dans la production mécanique conventionnelle par enlèvement de copeaux, le temps moyen de production effectif d'une pièce rapporté au temps de passage de la pièce dans l'usine est de 5%. Le temps d'usinage par machine rapporté au temps disponible des machines-outils représente environ 15%. La consommation spécifique d'énergie pour des opérations de tournage, perçage et fraisage est en moyenne de l'ordre de 630 kJ/kg (pièce), alors que la limite minimale théorique est de 52,5 kJ/kg (pièce). Voir aussi les informations dans la suite de ce document.

En premier lieu, on voit que les techniques de réglage, la conduite et l'organisation/gestion vont jouer un rôle très important et cela aussi pour la minimisation des opérations annexes. Parallèlement, le dimensionnement et le choix de la grandeur optimale du moteur sont importants par rapport aux variations relativement grandes de la charge et aux différentes conditions/régimes d'exploitation.

3.2 Conséquences des améliorations de la méthodologie de conception des entraînements

Les causes de surdimensionnements des entraînements électriques peuvent être évitées par la connaissance détaillée du projet et une bonne planification. Pour cela, il faut disposer d'une bonne

méthode de calcul basée sur un « modèle » aussi précis que possible de la machine à entraîner, du procédé ou du processus global. Il faut également connaître les demandes de puissance pour l'entraînement et les conditions d'exploitation. Ce n'est pas seulement le rendement de l'entraînement ou le rendement de conversion de l'ensemble de la transmission qui est décisif, mais le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation et surtout la consommation d'énergie rapportée à une quantité (volume ou poids) du produit fabriqué (grandeur caractéristique).

La méthode de conception doit s'écarter de l'habitude du report de marge de sécurité à chaque étape du dimensionnement (dimensionnement par addition de marge de sécurité).

La figure 5 montre d'abord la méthode conventionnelle. Pour une puissance nominale donnée, on choisit la pompe d'un type supérieur. Le constructeur de la pompe va lui aussi choisir un moteur d'une taille plus grande afin d'assurer la puissance de la pompe. Et finalement, le convertisseur pour l'entraînement du moteur sera lui aussi choisi avec une marge de sécurité. Le chemin A indique ce type de dimensionnement. Par contre, si lors de la conception on a bien l'ensemble des composants en

vue, on peut éviter un surdimensionnement parce qu'en fait, dans l'exemple précédent, le moteur doit être adapté uniquement à la puissance hydraulique nominale.

Evidemment, cette méthodologie n'est pas toujours facilement applicable lorsque les installations sont très complexes. En particulier, lorsque des éléments d'installation sont soumis à des charges variables qui ne sont pas aisément décelables.

Il n'est pas non plus évident d'identifier à l'avance l'ensemble des paramètres ainsi que le modèle de simulation du procédé ou de la machine. Pour des installations nouvelles, l'exploitant d'une part ne dispose pas encore d'expériences de fonctionnement et d'autre part des vieillissements/usures. Des modifications et des conditions extérieures peuvent encore contribuer à la complexité du problème.

Il est donc extrêmement important de collecter le maximum de valeurs pratiques. Pour cela, il faut mettre en place une technique de mesure qui permettra systématiquement de relever l'ensemble des valeurs intéressantes à tous les niveaux. Il faut ensuite les mettre à disposition pour l'évaluation des modifications ou des améliorations et pour la conception d'une nouvelle machine ou installation.

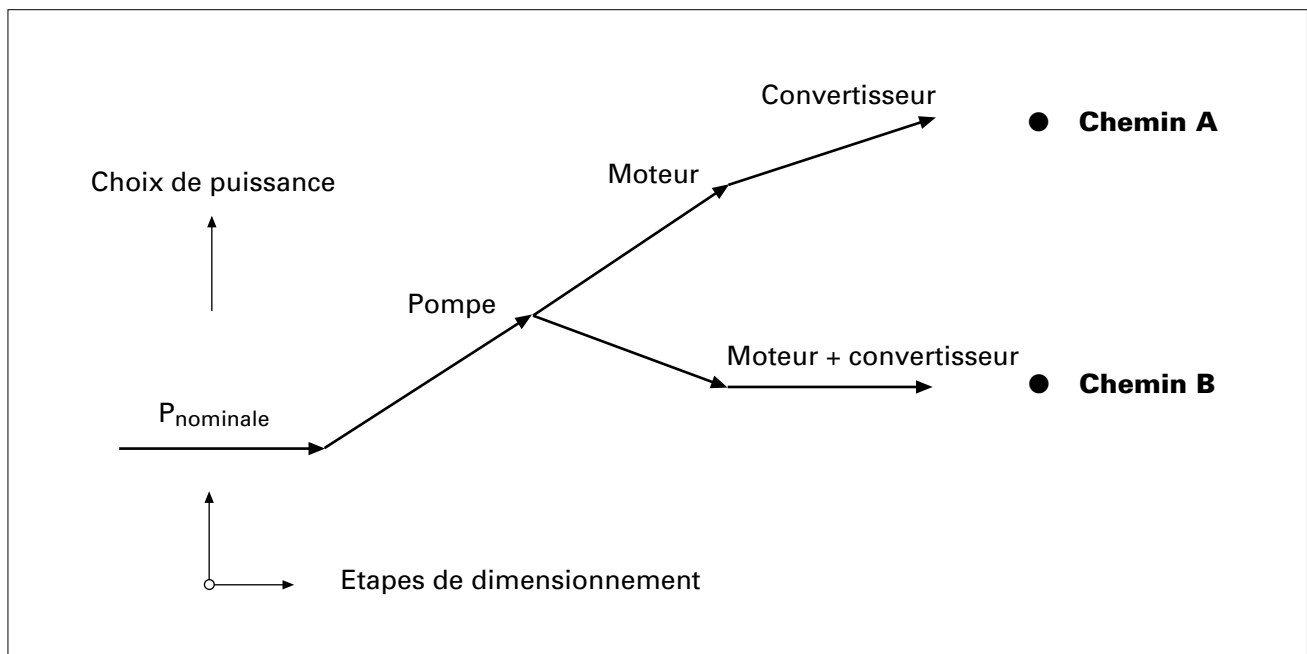


Figure 5: Dimensionnement des composants de la transmission.

Récapitulation

On peut malheureusement constater que la majorité des entraînements électriques ne sont pas du tout optimisés du point de vue énergétique, aussi bien lors du dimensionnement qu'à l'exploitation. Ils sont sous-chargés ou, si l'on veut, surdimensionnés. L'ensemble des résultats des différentes études RAVEL sont là pour le prouver. Il faut cependant relever que cette optimisation n'a jamais été, jusqu'à ce jour, une exigence imposée aux projeteurs, sauf cas spéciaux où le coût de l'énergie était un élément important du prix de revient du produit fabriqué.

La méthode de définition actuellement utilisée consiste à :

- dimensionner les composants selon un point de vue statistique et prendre en considération les tolérances maximales de charge ;
- considérer d'une manière restreinte les variations de charge à l'exploitation ;
- utiliser d'une manière restreinte les possibilités d'adaptation des variations de charge ;
- projeter et optimiser séparément la machine et son entraînement.

Elle doit être remplacée par des méthodes de définition et de dimensionnement prenant en compte l'ensemble du système ou de l'installation.

Ces nouvelles méthodes ne sont pas introduites facilement dans la pratique parce qu'elles exigent de meilleures connaissances aussi bien de la part des projeteurs que des exploitants. Le système d'entraînement doit être structuré, analysé et optimisé. A partir d'une définition précise des exigences, d'une analyse détaillée du procédé ou du processus, il est possible de spécifier et de dimensionner l'entraînement. En général, l'analyse du procédé ou du processus donne déjà des indications sur les possibilités d'économie d'énergie.

3.3 Procédure systématique pour la définition d'un entraînement électrique

Introduction

La conception de base d'un système d'entraînement est montrée à la figure 6. Un entraînement électrique contient les composants suivants :

- l'organe ou la machine entraînée qui transforme/utilise l'énergie mécanique à l'exécution d'un processus ; par exemple mouvement, transfert de matériel, façonnage de matière, etc. ;
- le moteur qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement ;
- le réducteur mécanique entre le moteur et l'organe/machine à entraîner permet l'accouplement et l'adaptation du moteur à l'organe/machine à entraîner aussi bien en vitesse qu'en couple ;
- l'interrupteur et le sous-groupe de commande entre le moteur et le réseau électrique, qui dans le cas le plus simple est un contacteur avec la fonction enclenché/déclenché ou une installation de démarrage ou encore un convertisseur électronique de fréquence ou de tension d'alimentation du moteur ;
- la protection, la commande, le réglage et la conduite plus ou moins simple selon la complexité des exigences de l'organe/machine à entraîner et en fin de compte du processus lui-même.

Selon la complexité des exigences, nous distinguons des entraînements non commandés, commandés, réglés et conduits. Par rapport aux entraînements non commandés, les entraînements commandés, réglés et conduits posent des contraintes supplémentaires de connaissance et de mesure ou détection des états du moteur.

La définition du choix des entraînements se compose des étapes suivantes :

- les composants de l'entraînement, c'est-à-dire l'alimentation, le type du moteur, le réducteur mécanique ainsi que la protection et le réglage sont à choisir de manière optimale aux points de vue coût et consommation d'énergie ;
- les paramètres des composants de l'entraînement doivent être adaptés aux contraintes du processus ;

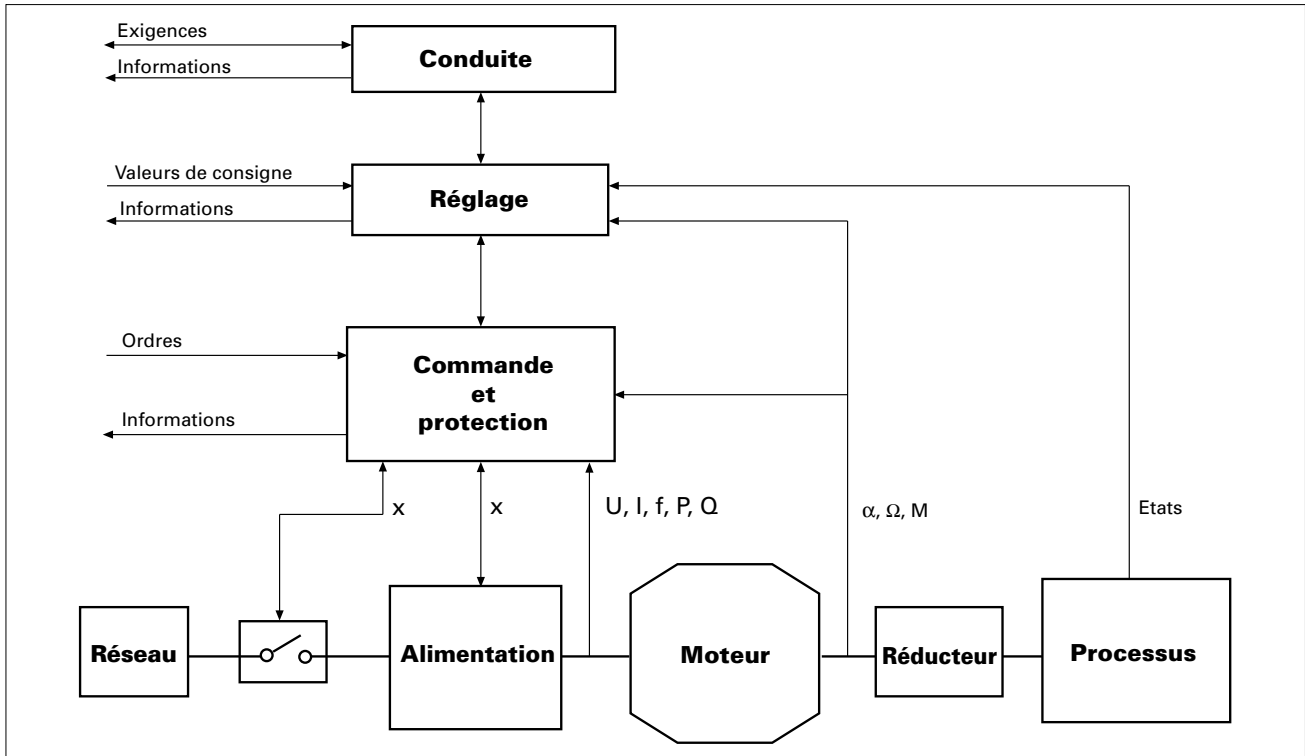


Figure 6: Structure d'un entraînement électrique.

- les fonctions et les optimisations d'exploitation (consommation d'énergie, réglage, etc.) sont à contrôler et le cas échéant à adapter par modification des paramètres.

L'adaptation des paramètres se fait en deux phases:

a) l'entraînement doit d'abord remplir les exigences imposées, comme:

- démarrer dans un temps imposé et nombre des démarrages;
- offrir le couple imposé à la vitesse désirée;
- assurer les performances de commande conformes aux exigences;
- assurer la durée de vie, la fiabilité et la capacité spécifiée de surcharge;

b) l'élargissement des exigences peut être obtenu par une adaptation plus fine, par le choix d'une structure particulière et d'une conduite permettant d'assurer les exigences imposées, comme:

- le maintien de la précision des grandeurs caractéristiques;

- la consommation minimale d'énergie;
- l'exploitation avec un rendement maximum;
- l'exploitation optimale;
- la coordination avec d'autres entraînements.

Cette forme générale de détermination des exigences ne peut être atteinte que lorsque le processus est connu avec précision. Dans ce but, il est nécessaire de procéder à l'analyse générale de l'installation avant de définir les exigences de l'entraînement.

La définition de l'installation est obtenue par les étapes suivantes:

- analyse du processus et détermination des exigences de l'entraînement;
- structuration de l'entraînement;
- adaptation des paramètres de l'entraînement;
- définition des moyens d'exploitation;
- analyse du comportement en exploitation;
- correction des choix, si nécessaire.

Ces étapes sont traitées les unes après les autres ci-après.

3.3.1 Analyse du processus, détermination des exigences de l'entraînement

L'analyse du processus doit indiquer les exigences/contraintes de l'entraînement :

- la fonction du couple de charge dans l'ensemble des conditions d'exploitation ;
- couple et vitesse nominaux, moment d'inertie, domaine de fonctionnement ;
- conditions d'exploitation : température, climat, altitude, perturbations, etc. ;
- exigences de précision, valeurs limites, etc.

L'analyse du procédé doit permettre de déterminer ou de reconnaître les problèmes de l'installation et aussi les points faibles (à forte consommation) énergétiquement significatifs.

Lors de l'analyse du procédé, il faut distinguer entre les éléments suivants :

- des entraînements dont les conditions de charge ne varient pas dans le temps, soit des conditions d'exploitation en régime stationnaire pour lesquelles les durées d'exploitation sont nettement plus grandes que les constantes thermiques et pour lesquelles des variations de charge peuvent se faire, mais sur une durée très longue, par exemple en l'espace d'un jour ;
- des entraînements en régime non stationnaire pour lesquels les conditions de charge et la dynamique, par exemple : accélération, freinage, changement de direction, etc., sont fréquents.

A **charge constante**, le couple résistant de l'organe/machine entraînée, sa relation en fonction de la vitesse depuis l'arrêt jusqu'à la valeur nominale et/ou limite, est déterminant pour la définition de la puissance (grandeur) du moteur électrique.

Les relations typiques du couple résistant en fonction de la vitesse sont :

- couple contre force de gravitation : M_W constant
- couple avec frottement visqueux : $M_W \sim n$
- convoyeur, ventilation : $M_W \sim n^2$

Lorsque l'application consiste à déplacer verticalement une charge (masse), le couple résistant peut se calculer avec précision par la relation « couple résistant = force (mg) · bras de levier ». Lorsque l'application traite des problèmes plus complexes de transformation de matériaux ou de convoyage de matériaux, etc., de simples relations n'existent pas et il faut avoir recours à des valeurs expérimentales ou à des mesures. Dans ce cas, il faut procéder avec beaucoup de prudence afin d'éviter des mauvaises interprétations ou des surdimensionnements.

En régime non stationnaire, les différences entre le couple moteur et le couple résistant accélèrent ou freinent les masses du moteur, du réducteur mécanique et de l'organe entraîné. Dans ce cas, il faut faire appel à la relation suivante :

$$2 \pi \frac{dn}{dt} J = M - M_W$$

J est le moment d'inertie de toutes les masses en rotation et n la vitesse en nombre de tours/s.

Si l'on admet un déplacement vertical, par exemple ascenseur, pour lequel le diagramme « chemin parcouru – temps », la valeur limite de l'accélération ainsi que la valeur « $r = da/dt$ » (variation de l'accélération) sont donnés, la relation précédente permet de calculer le couple M à fournir par le moteur pour autant que M_W et J soient connus.

Inversement, la relation précédente peut aussi être utilisée pour déterminer l'évolution dans le temps de l'accélération « a » et de la vitesse lorsque les autres valeurs de M, M_W , et J sont définies.

Du point de vue énergétique, les masses en rotation permettent de stocker la valeur suivante de l'énergie cinétique :

$$E = 1/2 J (\Omega)^2 = 1/2 J (2 \pi n)^2$$

Ainsi pour accélérer des masses jusqu'à une vitesse de « n », il est nécessaire que l'entraînement et le réseau transmettent au moins une énergie E/η , η étant le rendement global du moteur, de son alimentation et de la transmission (réducteur) mécanique. Lors du freinage, seule la valeur E peut être récupérée si le moteur peut travailler en générateur. Les pertes énergétiques minimales sont alors :

$$E_V = E (1/\eta - \eta)$$

Cela veut dire qu'avec un rendement = 0,8, 45% de l'énergie cinétique E est transformée en chaleur dans l'entraînement par accélération et/ou freinage.

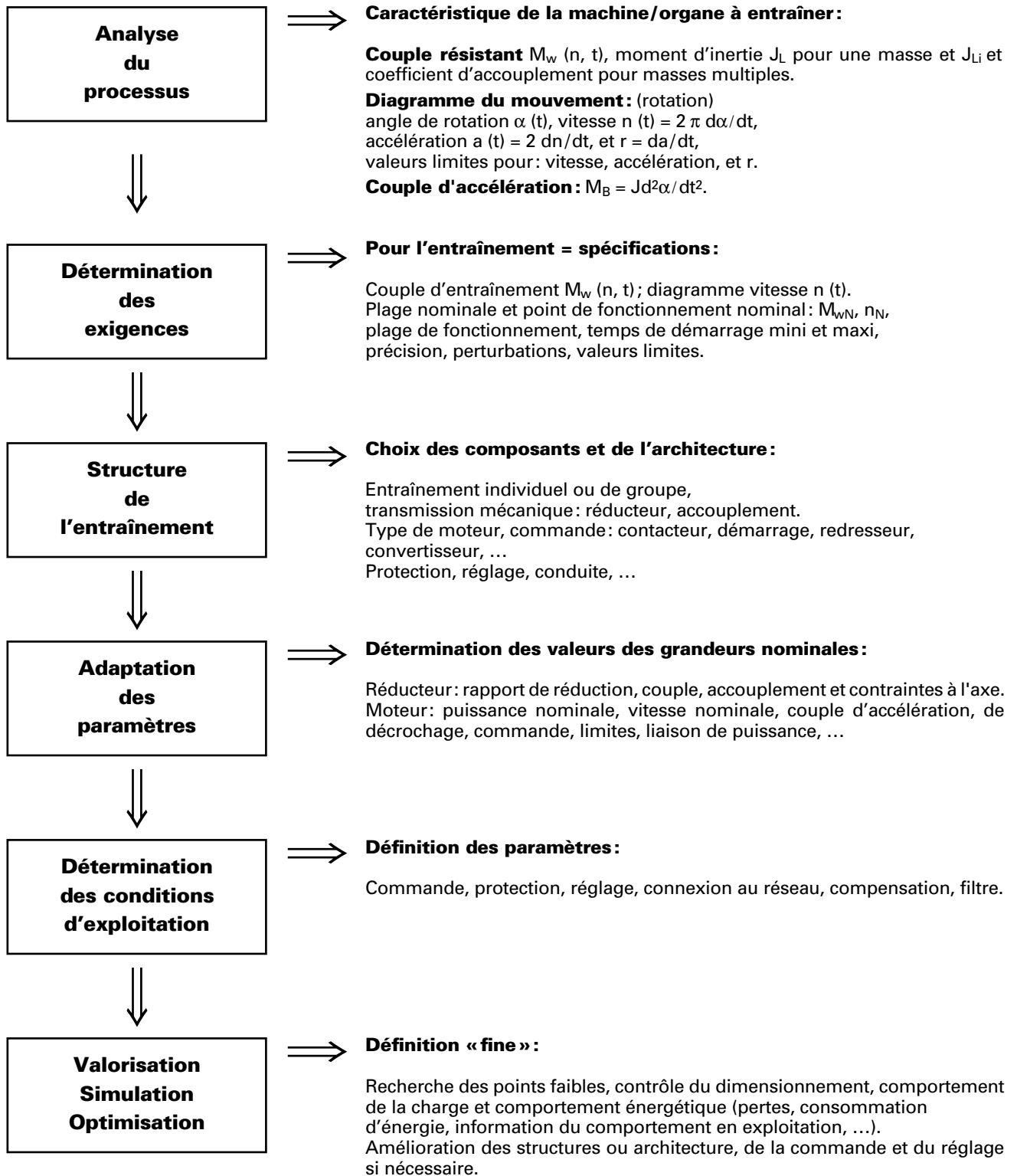


Figure 7: Méthode de définition et de choix des entraînements.

En fonction des conditions d'exploitation, l'alimentation ainsi que le type de moteur peuvent être la source de pertes supplémentaires qui vont détériorer le bilan énergétique et avoir des influences sur le choix de la « grandeur » du moteur.

En particulier, le moteur asynchrone se comporte particulièrement défavorablement pendant l'accélération s'il est alimenté à fréquence et à tension constante, sans commutation de pôles. Il consomme pendant l'accélération à la vitesse « n » au moins le double de l'énergie, 2E. La moitié de cette énergie est transformée en chaleur dans le rotor et l'autre moitié sert à l'accélération des masses tournantes. De plus, des pertes interviennent au stator provoquées par le courant relativement élevé au démarrage.

Cette source de chaleur à l'intérieur du moteur peut être déterminante pour la définition de la puissance nominale de l'entraînement lorsque le moment d'inertie J et l'énergie E dépassent des valeurs critiques.

Exemple :

Accélération avec un moteur asynchrone

Pour l'entraînement d'une charge constante avec un moment d'inertie négligeable ($\ll 0,5 \text{ kgm}^2$), il est prévu d'utiliser un moteur asynchrone d'une puissance de 5,5 kW. Si le moment d'inertie est augmenté à 2 kgm^2 , la puissance du moteur est alors augmentée à 11 kW si l'on veut éviter un échauffement supérieur des enroulements du stator pendant la période de démarrage/accélération ou si l'on maintient les mêmes conditions de démarrage. Cependant, en régime stationnaire, ce moteur va être chargé à la moitié de sa puissance nominale et de ce fait fonctionner avec un mauvais rendement.

3.3.2 Structuration de l'entraînement

Sur la base de la description du procédé ou processus et de ses spécifications, il est possible de définir la structure de l'entraînement.

Il est important de faire les distinctions suivantes :

- entraînements (non commandés, commandés) pour lesquels il n'y a pas de réaction aux grandeurs instantanées;
- entraînements avec réaction aux grandeurs instantanées.

Pour les premiers, fondamentalement, il n'y a pas de différence des caractéristiques du moteur *couple-vitesse* et *courant-vitesse*.

Alors qu'en exploitation simple (non réglée) les différents types de moteurs se comportent selon leurs caractéristiques propres très différentes les unes des autres, en exploitation réglée les différences s'égalisent et le couple, respectivement le courant, est limité dans la plage nominale de fonctionnement. Des différences importantes de comportement peuvent apparaître dans la plage supérieure de la vitesse, en particulier si des dispositions sont prises pour affaiblir le flux magnétique (figures 8 et 9).

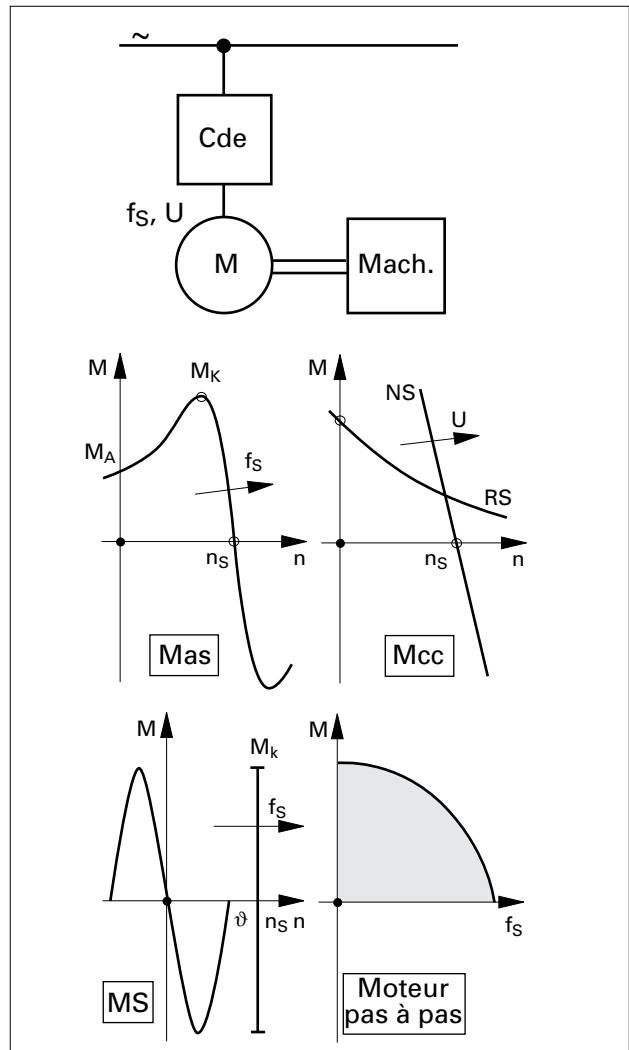


Figure 8: Caractéristiques des moteurs en régime commandé.

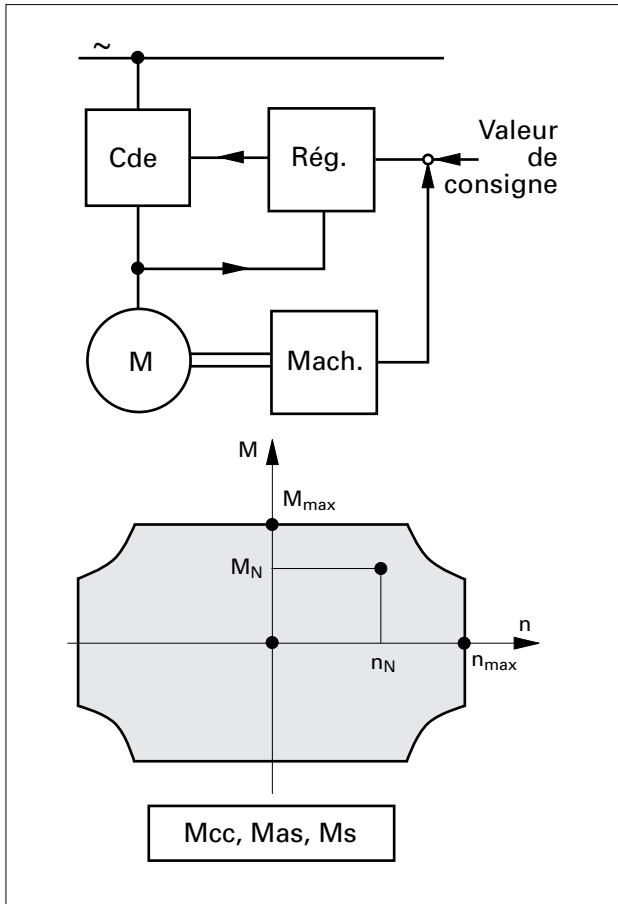


Figure 9: Caractéristiques des moteurs en régime réglé.

En exploitation simple, les régimes de fonctionnement peuvent être seulement dans deux quadrants: moteur et générateur sans changement de sens de rotation et restreints à une petite plage autour de la position de marche à vide ou du point de synchronisme si aucune disposition particulière n'est prise. Un fonctionnement dans les quatre quadrants implique au moins une commutation des enroulements ou une possibilité de changement de la fréquence et de la tension.

En exploitation simple, la vitesse à vide n_s est:

- pour les machines à champ tournant, elle est donnée par la fréquence f_s et par le nombre de paires de pôles p

$$n_s = f_s / p$$

- pour les machines à courant continu, elle est donnée par la tension d'induit et le flux magnétique.

Le couple de démarrage et le couple de décrochement sont pour les moteurs à champ tournant (asynchrone) d'environ 2,5 fois le couple nominal ($>1,7 M_N$). Le courant de démarrage est lui de 5 à 8 fois la valeur en régime nominal.

En exploitation réglée, il est possible d'obtenir des fonctionnements dans les quatre quadrants indépendamment du type de machine électrique, mais dépendant de l'exécution du convertisseur électronique. Il est évident que cela n'est possible qu'avec un coût supplémentaire (tableau 10).

Grâce au réglage et par l'alimentation, il est possible d'avoir des entraînements dynamiques avec de faibles pertes qui, à cause d'une alimentation à fréquence variable et de la possibilité de récupération par le réseau électrique (par exemple les ascenseurs), conduisent à des économies importantes d'énergie.

En exploitation réglée, les valeurs maximales du couple et du courant sont limitées par le convertisseur. Ainsi le couple maximal étant fixé à 2,5 fois la valeur nominale, la valeur du courant de démarrage et de régime permanent ne dépassera pas 2,5 fois la valeur du courant nominal.

3.3.3 Choix des composants de l'entraînement

Les choix du moteur, du convertisseur et de la transmission mécanique/réducteur dépendent des considérations suivantes:

- les caractéristiques de la machine ou organe entraîné: la caractéristique de charge $M_W(n, t)$, le point de fonctionnement nominal, le couple nominal M_N , la vitesse nominale n , le moment d'inertie total J , les conditions d'environnement, etc.;
- les conditions générales d'exploitation de la machine/procédé, fonctionnement dans plusieurs quadrants, profils des déplacements, fréquence des enclenchements, etc.;
- les précisions des exigences d'exploitation.

Les tableaux 10 et 11 donnent des indications concernant le choix du moteur ainsi que son comportement en fonction de la vitesse et du couple.

Exigences	Type de moteur	Comportement en vitesse et couple	Comportement dynamique	Indice de coût	Domaine d'application
Pas d'exigence de vitesse	Moteur asynchrone à cage	Faible, réduction linéaire de vitesse	M (n), l (n) donné, naturellement	1	Entraînement simple : ventilateurs, pompes, élévateurs outils
Variation de vitesse par paliers	Commutation de pôles, moteurs asynchrones	Faible, réduction linéaire de vitesse	M (n), l (n) dépendant du nombre de pôles	2	Ascenseurs, ventilateurs, machines-outils
Petite plage de variation de vitesse, démarrage difficile et doux	Moteurs asynchrones à bagues	Réduction de vitesse ajustable	M (n), l (n) ajustable	1,5 à 2	Ascenseurs, ponts roulants, ventilateurs, centrifugeuses
Vitesse ajustable	Alimentation par convertisseur de moteurs asynchrones, synchrones, rég. U/f	Réduction de vitesse ajustable	M (n), l (n) ajustable	> 2	Ventilateurs, centrifugeuses, machines textiles, machines-outils
Grande plage de variation de vitesse, réglage : M, n	Alimentation convertisseur moteur DC et asynchrone	Ajustable, réglable	Ajustable, réglable	2 à 4	Machines-outils, transporteurs, convoyeurs, machines textiles, impression
Réglage libre : position, vitesse, couple, courant	Alimentation convertisseur moteur DC, asynchrone, pas à pas	Ajustable, réglable	Ajustable, réglable	2 à 4	Entr. par servo, machines-outils, machines d'impression

Tableau 10: Choix du moteur.

A ce stade du projet, il ne peut être tiré de conclusion concernant le rendement et les pertes. Une analyse plus complète doit être poursuivie.

Cependant, en général, on doit souligner que les moteurs synchrones engendrent moins de pertes que les moteurs asynchrones et que la consommation d'énergie d'une machine ou d'un procédé dépend essentiellement des conditions de gestion et d'exploitation.

Lors du **choix du réducteur mécanique**, il y a lieu de prendre en compte les considérations suivantes :

- les machines à champ tournant (asynchrone et synchrone) ont leur point de fonctionnement,

lorsqu'elles sont alimentées directement à la fréquence f_s , au voisinage de la vitesse $n_s = f_s/p$, pour laquelle p peut avoir les valeurs 1, 2, 3, ...;

- la grandeur des machines électriques est déterminée par le couple ; cela veut dire que pour une vitesse plus élevée et la même puissance, la grandeur de la machine sera plus petite ;
- le réducteur engendre des pertes, voir tableau 12, à savoir 1 à 2% par étage de réduction. Un réducteur à un étage a un rendement de 97%, des réducteurs à plusieurs étages ont des pertes plus élevées. Pour les réducteurs à vis sans fin, les pertes dépendent fortement de la valeur du rapport de réduction.

Types de moteur	Domaine d'application	Limite d'application et problèmes
Moteur asynchrone à cage	Entraînement simple, boîte de vitesse	Comportement simple : $I_A, M_A, \cos \varphi, M_K$
Asynchrone à bagues	Entraînement simple, démarrage difficile, plage de fonctionnement limitée	Usure des bagues
Asynchrone alimenté par « Drehstromsteller »	Entraînement simple, démarrage difficile, réglable	Mauvais rendement, stabilité
Asynchrone alimenté par convertisseur U ou I	Entraînement réglable avec dynamique limitée	Couple oscillat, pertes, bruit, puissance convertisseur
Asynchrone avec alimentation par convertisseur PWM	Entraînement réglable avec dynamique limitée U/f et réglage vectoriel	« Stillstandbetriebe », pertes, bruit, puis. convertisseur
Moteur DC alimenté en continu et par redresseur	Entraînement réglable avec bonne dynamique et grande plage	Alimentation continue
Moteur synchrone, moteur réluctant	Entraînement avec vitesse constante, bon facteur de puissance	Démarrage, oscillations propres, stabilité
Moteur pas à pas alimenté par convertisseur	Réglage de faible puissance sans régulateur	Stabilité, perte de pas, démarrage, oscillations propres
Moteur synchrone alimenté par convertisseur I	Entraînement réglable pour grande puissance	Couple oscillant, plage de réglage, démarrage
Moteur synchrone alimenté par convertisseur U	Entraînement réglable, petite puissance, moteur électronique	Couple oscillant, plage de réglage, « Feldschwächbereich » / affaiblissement du champ

Tableau 11: Comportement en fonction de la vitesse et du couple.

Type/mode de réduction	Rendement
Accouplement direct	$\geq 99\%$
Réducteur : <ul style="list-style-type: none"> • à engrenage droit • à engrenage conique • à vis sans fin 	$\geq 94 - 97\%$ $\geq 94 - 97\%$ $\geq 30 - 90\%$
Transmission à courroie : <ul style="list-style-type: none"> • courroie trapézoïdale • bandes plastiques • bandes caoutchouc • plates • courroie dentée 	$\geq 88 - 93\%$ $\geq 81 - 85\%$ $\geq 81 - 85\%$ $\geq 97 - 99\%$ $\geq 97 - 99\%$
Chaînes	$\geq 90 - 96\%$
Câbles	$\geq 91 - 95\%$

Tableau 12: Rendements des réducteurs.

Forts de cela, nous pouvons faire les recommandations suivantes :

- des entraînements directs pour la plage de 500 à 3000 t/min (50 Hz) peuvent être réalisés lorsque la vitesse est voisine du synchronisme, c'est-à-dire $n_s = f_s/p$;
- lorsque la vitesse de fonctionnement est inférieure à 500 t/min, des réducteurs doivent être installés ;
- pour un fonctionnement au-dessus de 3000 t/min, l'emploi d'un convertisseur de fréquence ($f > 50$ Hz) a tout son sens.

3.3.4 Définition des grandeurs nominales

Lors de la définition du moteur on distingue :

- l'adaptation de la caractéristique de couple du moteur $M(n)$ à la caractéristique de charge de la machine ou de l'organe entraînée ;
- la définition des grandeurs nominales du moteur.

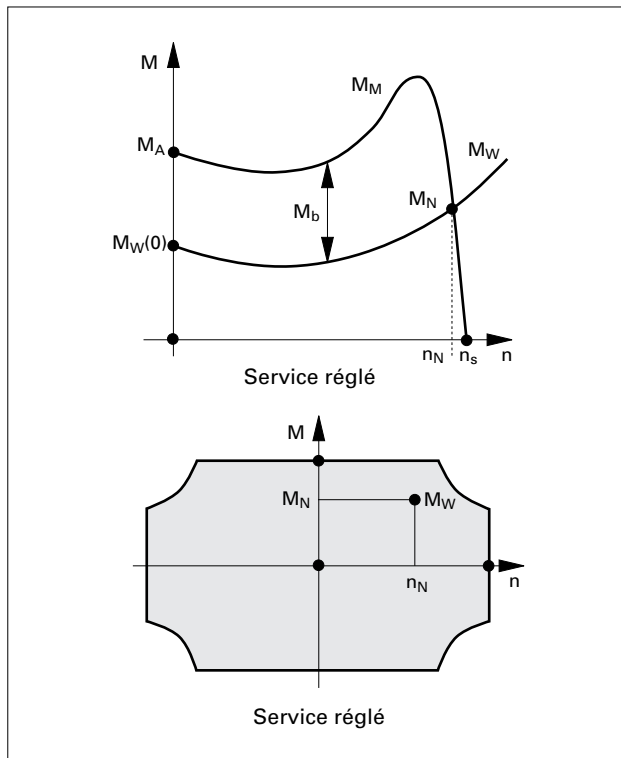


Figure 13: Adaptation des caractéristiques des moteurs lors du choix.

L'adaptation des caractéristiques de charge $M_W(n)$ de la machine est modifiée ou rapportée au moteur par le réducteur.

On recherche la caractéristique du moteur (figure 13) :

- le couple de démarrage M_A à l'arrêt est plus grand que le couple de charge M_W ;
- le couple d'accélération $M_B = M - M_W$ est suffisamment grand pour que le temps imparti pour le démarrage soit respecté :

$$T_A = \frac{2 \pi n_N J}{M - M_W}$$

- le point de fonctionnement est stable aux valeurs nominales M_N et n_N , c'est-à-dire que la pente de la caractéristique de charge du moteur dM/dn est plus grande que la pente de la caractéristique de la charge dM_W/dn ou de pente négative ;
- dans le cas le plus défavorable de la charge, il faut que le couple M_W ne dépasse jamais la valeur du couple de décrochage du moteur.

Le choix de la puissance nominale est à définir par la relation $P_N = 2 \pi n_N M_N$ de telle manière que :

- les exigences nominales, de démarrage et de surcharge puissent être garanties ;
- l'échauffement du moteur ou plutôt des enroulements, en particulier au démarrage, lorsque l'on a à faire à des charges avec un moment d'inertie J très grand, ainsi qu'en régime permanent, soit dans la plage de température recommandée par la classe d'isolation des enroulements ;
- la capacité de stockage de l'énergie ou de la chaleur du moteur soit bien utilisée et cela particulièrement lorsque la durée de fonctionnement t_b est vraiment plus petite que la constante d'échauffement du moteur. Celle-ci est de 15 à 25 minutes pour les moteurs normalisés.

L'échauffement des enroulements provient :

- du type de refroidissement, de la vitesse du ventilateur et des conditions ambiantes ;
- de la valeur des pertes, qui dépendent des conditions d'exploitation, mais aussi du type d'alimentation, par exemple par convertisseur, etc. (figure 14).

Les normes prévoient huit types de fonctionnement, qui sont représentatifs des conditions pratiques de fonctionnement.

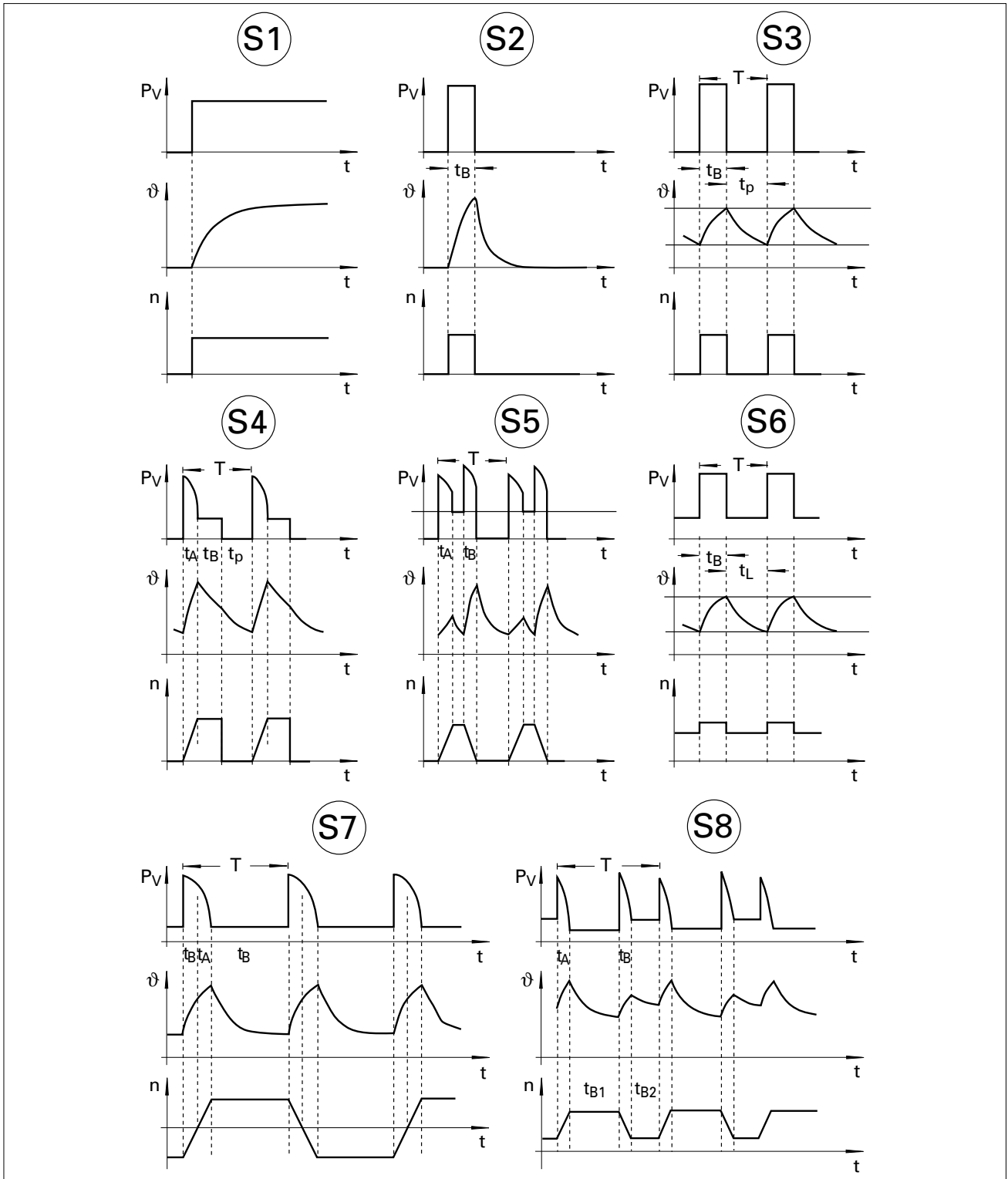


Figure 14: Les régimes de fonctionnement normalisés des entraînements.

Les constructeurs de machines électriques produisent des moteurs correspondant à ces régimes de fonctionnement ou services et en particulier les types S1 et S3 avec la normalisation des enclenchements selon le tableau 15.

L'influence des régimes d'exploitation et d'alimentation sont pris en compte lors de la définition de la puissance nominale P_N sur la base de la puissance effective P demandée par la charge et d'un facteur de correction de puissance K , dépendant du type d'exploitation et de l'alimentation.

Le facteur $K = P/P_N$ prend les valeurs suivantes :

- Service continu S1: $K = 1$
- Services temporaires S2:
 $K = 1,1$ $K = 1,2$ $K = 1,4$
 $t_b = 60$ (min) $t_b = 30$ (min) $t_b = 10$ (min)
- Services intermittents périodiques S3:
 $K = 1,10$ $K = 1,15$
 $ED = 60\%$ $ED = 40\%$
- Alimentation par convertisseurs électroniques:
 $K = 0,85$ à $0,95$

Pour les moteurs, dans les types de services S4 à S8, le nombre d'enclenchements par heure ainsi que le facteur d'inertie FI sont à prendre en compte. Ces influences sont relativement complexes et

dépendent aussi de la grandeur et du type du moteur. Il n'est pas aussi simple dans ces cas de donner une valeur au facteur K . Celui-ci doit être défini pour chaque cas et pour cela il existe des logiciels d'application qui aident à sa détermination (voir chapitre 3.4).

Les méthodes actuelles de définition partent de l'a priori que la température de l'enroulement ne doit pas dépasser la valeur maximale donnée par la classe d'isolation. L'enroulement a une durée de vie de l'ordre de grandeur de 100 000 heures.

Cette valeur et les conditions d'exploitation ne reflètent cependant pas les conditions de la réalité. Un entraînement n'est chargé qu'exceptionnellement à sa puissance maximale et la durée de vie d'un entraînement n'est jamais poussée à la valeur précédente car il est obsolète ou remplacé par d'autre système bien avant (100 000 heures correspondent, pour une exploitation annuelle de 6500 heures, à 15,34 ans!!).

C'est seulement ces derniers temps que la surcharge thermique a été prise en compte dans la définition des types de services. Une surcharge temporaire (avec réduction de la durée de vie) ne peut être compensée que par les régimes fréquents de sous-charge. Le nouveau type de service est dénommé S10. Ce type permet la prise en compte de surcharges comme indiqué dans les recommandations IEC, voir figure 16.

Caractéristiques	Abrév.	Valeurs proposées	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S...
Durée de service	t_B	0,5; 1; 3; 5; 10; 30 60; 90 min permanent (dd)	dd		X						
Arrêt enclenchements/heure	t_p	60; 90; 120; 240; 600 c/h		X		X	X		X	X	
Durée d'enclenchement relative	ED_N	15; 25; 40; 60%		X	X	X	X	X		X	
Facteur d'inertie	FI	1,2; 1,6; 2; 2,5; 4				X	X		X	X	
avec: ED rapport t_B à T_{cycle} FI rapport J_{global} à J_{moteur} t_B durée de service											

Tableau 15: Caractéristiques des types de régimes nominaux.

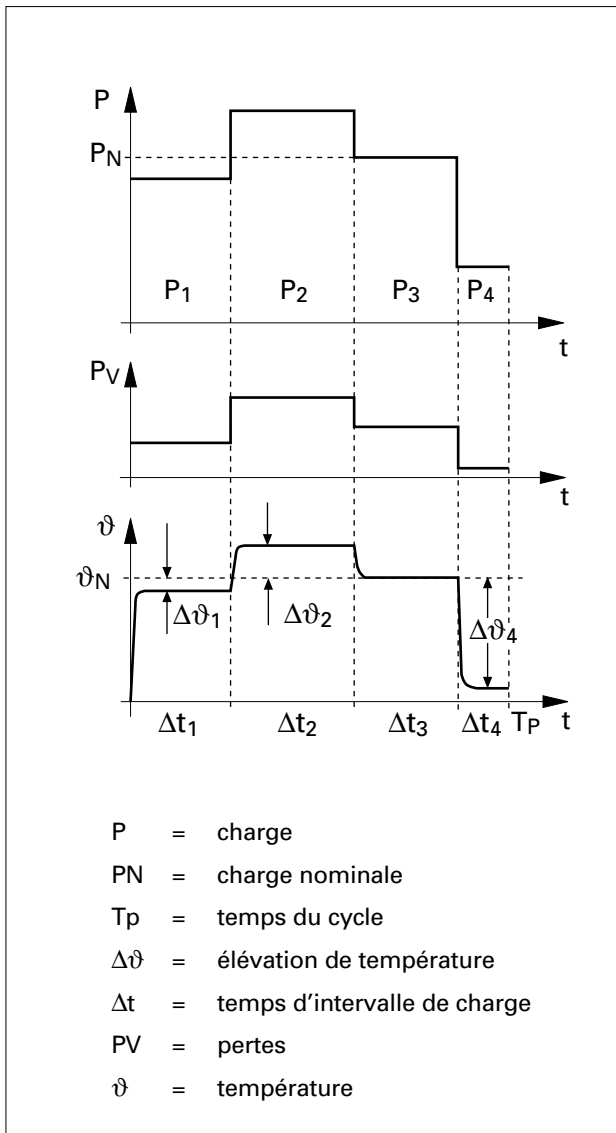


Figure 16: Définitions des surcharges thermiques selon S10.

La possibilité d'une surcharge thermique des enroulements doit être dans l'avenir beaucoup mieux mise à profit pour réaliser un dimensionnement mieux « chargé » et une meilleure utilisation du matériel et de l'énergie. Ainsi, la donnée de la température maximale des enroulements sera dorénavant remplacée par une prévision de durée de vie. Il devrait en être de même pour les autres choix des composants de l'entraînement, comme le réducteur dont la durée de vie devrait aussi entrer dans le choix de la grandeur du modèle.

3.4 Logiciels pour l'aide à la définition et à la simulation des entraînements

3.4.1 Définition des buts et des tâches

Les logiciels d'aide au choix, à la définition et à la simulation sont utilisés pour :

- pouvoir choisir les composants d'un entraînement en fonction de ses conditions réelles de charge ;
- pouvoir comparer les résultats d'un projet selon différents points de vue ;
- apporter un support extérieur au dialogue entre le spécialiste de l'entraînement et celui du procédé afin d'établir le « profil » le plus précis des exigences et contraintes de l'entraînement ;
- améliorer la qualité de la conception du projet ;
- prendre en compte au mieux les surcharges thermiques temporaires d'un entraînement ;
- permettre de prendre en compte de nouvelles conditions de conception, comme par exemple la « durée de vie ».

L'utilisation de ces logiciels d'aide est un outil essentiel à la définition optimale des composants, à la réalisation d'entraînements avec des consommations d'énergie plus faibles et chargés correctement en fonction de toutes les exigences.

Des entraînements mal utilisés conduisent à :

- de mauvaises conditions énergétiques pendant l'exploitation, de faibles rendements, mauvais facteurs de puissance et des pertes inutilement grandes ;
- une consommation de matériel plus grande et par là même une consommation supérieure « d'énergie grise ».

Les tâches de ces logiciels d'aide peuvent être décrites de la manière suivante :

- choix des composants de l'entraînement (moteur, réducteur, convertisseur) sur la base de grandeurs caractéristiques, comme valeurs nominales, rendement, facteur de puissance, etc., depuis une banque de données ;
- définition des composants sur la base du profil des exigences et de l'indication des paramètres

décisifs de choix : contraintes, utilisation, pertes, ainsi que rendement, température d'enroulement et durée de vie ;

- la simulation de l'entraînement pour indiquer :
 1. le comportement mécanique: déroulement des déplacements, forces, couples, puissances, contraintes, oscillations, fréquences propres ;
 2. le comportement électrique en exploitation et lors de perturbations: courants, tensions, pertes, couples, vitesse ;
 3. le comportement thermique des composants: température, flux de chaleur, flux des agents de refroidissement, contraintes d'isolation, espérance de vie ;
- exécution et valorisation des mesures électriques, thermiques et du comportement mécanique des composants de l'entraînement et détermination d'un modèle paramétré.

Les logiciels d'aide actuellement à disposition permettent de travailler avec des structures de bases de données et peuvent être installés sur l'ordinateur à la place de travail. Une vue générale des logiciels disponibles est donnée en fin de chapitre. Ces logiciels sont en majorité disponibles pour la définition du moteur, de l'alimentation et du convertisseur jusqu'à des puissances de 200 kW. Pour l'analyse de processus ou de procédés et pour la simulation, il n'existe que des applications spécifiques.

3.4.2 Logiciels d'aide au choix de moteurs asynchrones correctement chargés

Le dialogue interactif de l'utilisateur à sa place de travail commence par des questions se rapportant à la puissance désirée, à la vitesse désirée, aux caractéristiques d'exploitation (classe d'échauffement, température de l'agent de refroidissement, plage de la tension) et au moment d'inertie de la machine ou de l'organe entraîné (figure 19).

L'ordinateur calcule immédiatement un ordre de grandeur de la valeur du couple. Sur cette base, l'exploitant peut définir un déroulement dans le temps, par intervalles, du couple ainsi que des informations sur l'état de fonctionnement (à vide ou déclenché) de l'entraînement (figure 17). Du fait que le moment d'inertie de la machine ou de l'organe entraîné n'intervient qu'en combinaison avec le moment d'inertie du moteur, il sera utile de préciser cette valeur lors du choix du moteur.

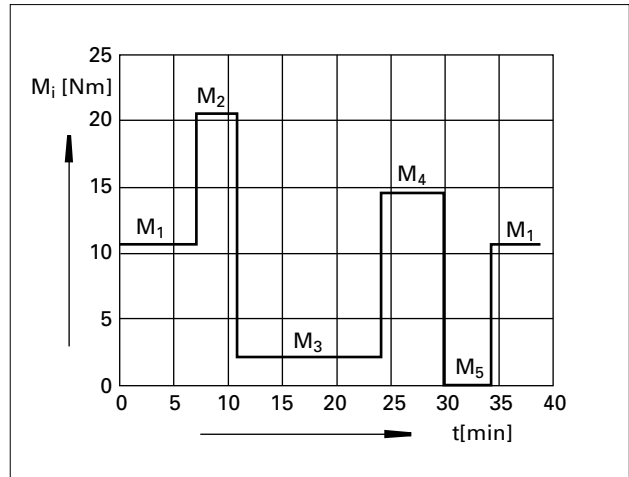


Figure 17: Profil du couple en fonction du temps.

Avec les indications disponibles, le logiciel détermine un couple effectif pour le choix du moteur par la relation :

$$M_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

pour un régime en charge constante. Pour autant que pendant les intervalles t_1 à t_n l'équilibre thermique soit atteint, le couple effectif permet le choix du moteur juste. Pour les autres régimes, ce choix est une première approximation qui sera affinée par des calculs complémentaires dans les intervalles en fonction de l'échauffement et du refroidissement, (figure 18). Le choix définitif du moteur est alors affiché à l'écran.

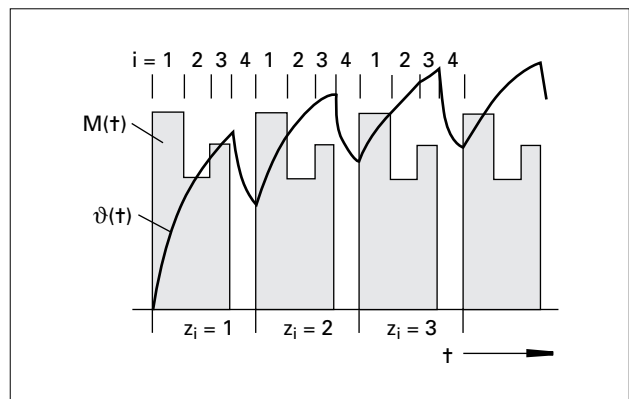


Figure 18: Evolution couple-température.

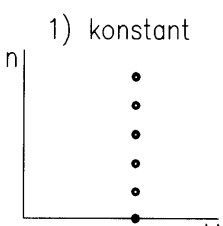
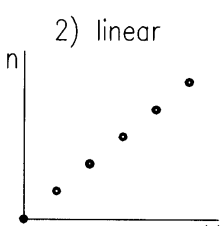
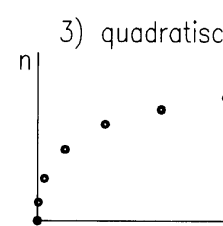
PRODRIVE A	Eingabedaten: Angaben zum Motor	Vers. 4.10	
	Betrieb bei Sonderfrequenz 60 Hz	(j/n) : < n >	
	gewünschte Leistung	[kW] : 15.00	
	gewünschte Synchrondrehzahl	[1/min] : 1500	
	result. Drehmomentrichtwert	[Nm] : <u>95</u>	
	Leistungszuordnung (DIN=1, progressiv=2)	: 1	
	Wärmebeständigkeitsklasse	[B/F/F+] : F	
	Grundausführung	(j/n) : j	
	max. Kühlmitteltemperatur (zul. Werte sind: 0 ... 60)	[°C] : <40>	
	Breitspannungsausführung	(j/n) : n	
	Stern - Dreieck - Anlauf	(j/n) : n	
	Spannungseinbruch beim Anlauf	(j/n) : j	
	verbleibende Spannung	[%] : 90	
qualitativer Verlauf der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie			
	1) konstant	2) linear	
	3) quadratisch		
			
			
	Kennzahl der gewünschten Kennlinie	(1...3) : < 2 >	
	Zusatzträgheitsmoment an der Motorwelle	[kgcm ²] : 1500.00	
PRODRIVE A	Eingabedaten: Angaben zum Belastungsverlauf		
Nr.	Lastmoment [Nm]	Dauer des Intervalles [min]	Intervallparameter
1	<58.00>	12.00	2
2	17.00	5.00	3
3	0.00	0.01	0
4	17.00	5.00	2
5	0.00	4.00	1
6	61.00	30.00	3
7	0.00	1.00	0

Figure 19: Exemple de présentation sur l'écran d'un dialogue de dimensionnement.

PRODRIVE A	Der optimale Motor	
Aus unserem Lieferprogramm empfehlen wir Ihnen den Motor:		
<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Typ KPER 160 M 4 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Modifikation – Standardausführung </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Nenndaten des Motors </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Angaben zum Lastfall </div>	
Leistung : 11.00 kW Drehzahl : 1440 1/min Moment : 72.95 Nm Spannung : 220/380 V Strom : 23.00 A (Y) WBK : F – J(eigen) : 350.0 kgcm ²	max. Anlaufzeit : 0.37 s max. Bremszeit : 0.17 s Reversierzeit : 0.00 s Belastungsgrad : 61 % max. Erwärmung: <input style="width: 50px;" type="text" value="59"/> K	
PRODRIVE A	Kontrollrechnung nächst kleinerer Typ	
Aus unserem Lieferprogramm empfehlen wir Ihnen den Motor:		
<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Typ KPER 132 M 4 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Modifikation – Standardausführung </div>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Nenndaten des Motors </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Angaben zum Lastfall </div>	
Leistung : 7.50 kW Drehzahl : 1440 1/min Moment : 49.74 Nm Spannung : 220/380 V Strom : 16.50 A (Y) WBK : F – J(eigen) : 280.0 kgcm ²	max. Anlaufzeit : 0.70 s max. Bremszeit : 0.26 s Reversierzeit : 0.00 s Belastungsgrad : 102 % max. Erwärmung: <input style="width: 50px;" type="text" value="98"/> K Wünschen Sie Einsatzhinweise (j/n)?:	
* Unter Einhaltung nachfolgender Einschränkungen ist ein Einsatz des Motors zulässig: –Kontrollieren Sie, ob eine geringere Kühlmitteltemperatur zugelassen werden kann (Kontrollrechnung)! –Für den vorliegenden Einsatzfall verbleibt unter Berücksichtigung der erhöhten Wicklungserwärmung eine Wicklungslbensdauer von 107%. Kontrollieren Sie ob dies ausreichend ist! –Die genannten Einschränkungen entfallen bei Umrüstung der Ständerwicklung auf Wärmebeständigkeitsklasse H durch eine VEM – Vertreterfirma. Rücksprache mit dem Hersteller ist unbedingt erforderlich! Beachten Sie die Modifikationshinweise! * Modifikationshinweise: –Einsatz entsprechend temperaturbeständiger Lager und Schmierfette –Austausch von Plastlüfter gegen Metalllüfter –Einsatz entsprechend temperaturbeständiger Dichtungen –Kontrolle der Zulässigkeit der erhöhten Gehäusetemperatur		

Figure 20: Résultat d'une feuille de calcul: détermination du type de moteur et calcul pour le moteur de grandeur inférieure.

Les résultats sont imprimés sur le protocole de calcul, figure 20.

On peut aussi prendre un moteur de grandeur juste inférieure et le soumettre aux conditions de charge. Cela permet d'estimer l'importance du risque pris en rapport avec les contraintes thermiques et d'évaluer la nouvelle durée de vie.

Pour l'estimation de la qualité du logiciel à définir le choix d'un entraînement, nous disposons de son algorithme qui permet à chaque spécialiste de vérifier ses performances (figure 21). Il est à relever ici que dans ce schéma une seule itération est faite pour l'échauffement et que seuls les choix importants sont pris en compte sous une forme simple. Un modèle plus évolué est présenté dans un chapitre suivant. Il prévoit un modèle à deux composants et doit être vérifié par le constructeur qui prend la garantie d'une exécution compatible au point de vue qualité. C'est la raison de la restriction à quatre paramètres qui conduit à une augmentation de la qualité du moteur.

3.4.3 Logiciels d'aide au choix des moteurs asynchrones alimentés par onduleur et choix de l'onduleur

Lorsque des moteurs asynchrones à vitesse variable sont alimentés par onduleur, deux effets sont à considérer :

- la dépendance dans le moteur des pertes, de la fréquence, de la vitesse et de l'évacuation de la chaleur ;
- des harmoniques du courant et de la tension.

Les tendances de développement des convertisseurs montrent que les effets des harmoniques seront mieux pris en compte. La méthode actuellement utilisée pour les entraînements à variation de vitesse est basée sur la caractéristique limite d'échauffement. Elle tient compte de la baisse du couple du moteur pour une vitesse très basse (mauvais refroidissement) et pour de hautes fréquences (grandes pertes). Cette méthode sous-entend que dans ces régimes extrêmes la charge constante est toujours prise en compte. Elle conduit donc à un surdimensionnement du moteur et du convertisseur.

Les résultats du logiciel donnent une vision du déroulement du choix d'un moteur asynchrone et de son convertisseur pour des variations de vitesse

et de charge, figure 23. Comme c'est le cas à la figure 17 pour le choix d'un moteur sous régime de charge variables, il y a lieu là aussi de faire un test avec la grandeur inférieure aussi bien pour le moteur que pour le convertisseur. Il y a lieu aussi de savoir s'il est vraiment nécessaire, en rapport avec la durée de vie, d'imposer une température ambiante de 40 degrés. Le convertisseur, lui, reste le même puisqu'il est défini par la tension de service et par les courants durant l'exploitation.

Jusqu'à présent, les considérations sur les harmoniques ont plus retenu l'attention que les considérations relatives à la dépendance de la variation de vitesse. Il est évident, et cela surtout en fonction de l'état de développement des convertisseurs, qu'il faut prendre en considération les effets des harmoniques. En effet, des essais sur banc de tests sont convaincants. Il pourrait être tenu compte de l'effet des harmoniques sur la réduction du couple à certaines fréquences. Heureusement, les développements actuels vont permettre de plus en plus de négliger ces effets.

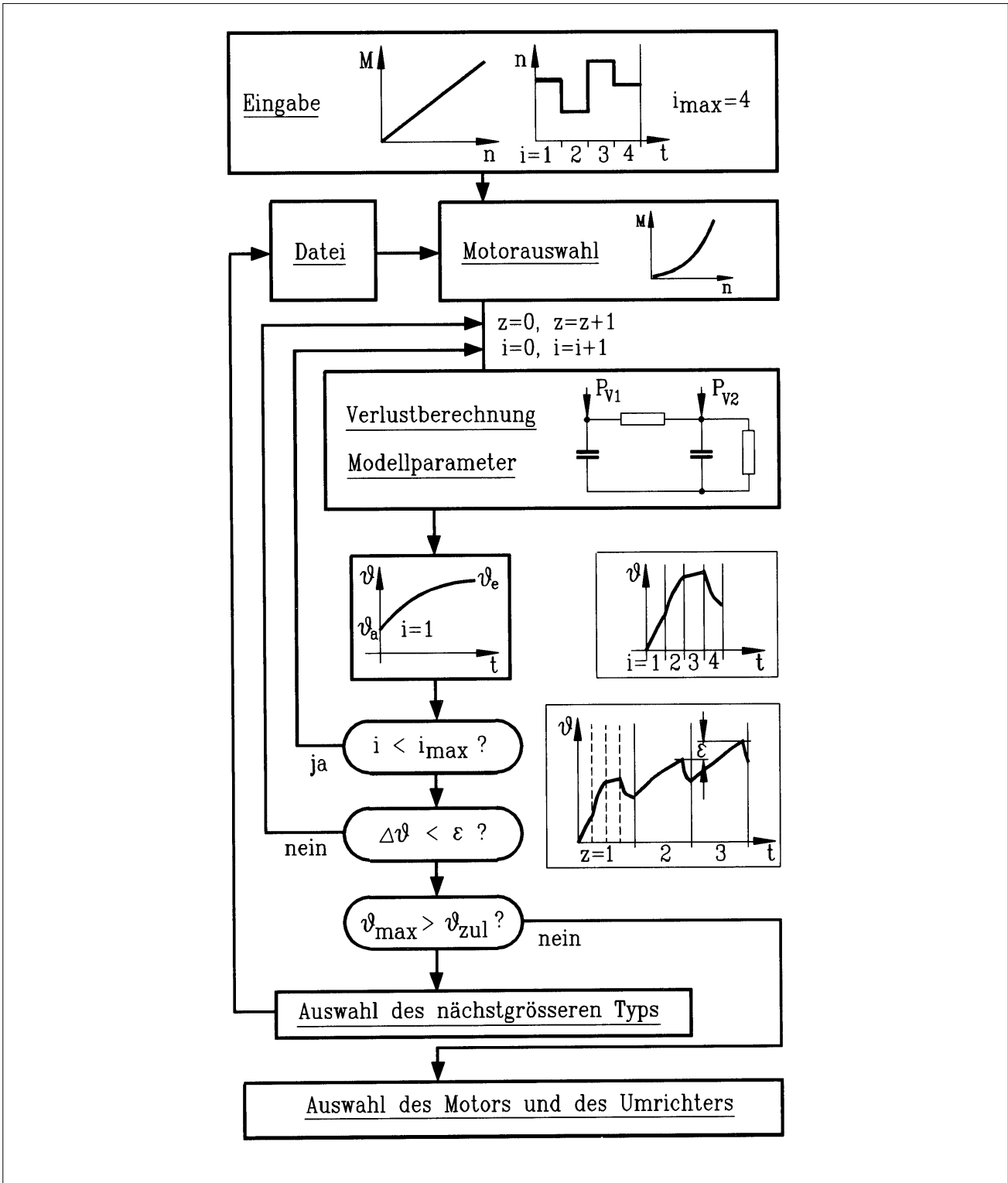
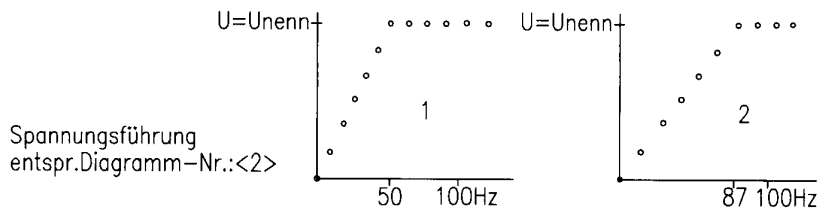


Figure 21: Proposition d'un algorithme de logiciel de définition/choix d'un entraînement.

PRODRIVE U | Eingabedaten: Angaben zum Umrichter | Vers. 4.10

Idealisierter Verlauf der Umrichter-Ausgangsspannung (Unenn) in Abhängigkeit von der Frequenz (Spannungsanhebung nicht dargestellt)
(Hinweis: Erforderliche Motorschaltung (Stern/Dreieck) --><F1>)



PRODRIVE U | Eingabedaten: Angaben zum Motor | Vers. 4.10

Syn.-drehzahl (50Hz)	Polzahl
3000	2
1500	4
1000	6
750	8

gewünschte Polzahl des Motors : <2>

Leistungszuordnung [DIN=1, progressiv=2] : 1

Art der Belüftung [1=Eigen, 2=Fremd] : 1

erf. Wärmebeständigkeitsklasse [B/F] : F

max. Kühlmitteltemperatur (°C) : 40

Drehzahl - Drehmoment - Kennlinie: linear.....l
konstant.....k
quadratisch.q
beliebig.....b

gewünschter Typ : k

Punkt auf der Kennlinie : Drehzahl : <2920.0> 1/min
bei Drehmoment : 62.00 Nm

PRODRIVE U | Eingabedaten: Angaben zum Lastspiel | Vers. 4.10

Nr.	Lastmoment [Nm]	Dauer des Intervalles [min]	Intervallparameter
1	875.00	0.10	2
2	2652.00	1.50	2
3	4375.00	1.00	2
4	4500.00	0.50	2
5	4375.00	1.00	2
6	2625.00	1.50	2
7	875.00	0.50	2
8	0.00	18.00	0

mögliche Intervallparameter: 2=Normalbetrieb

Figure 22: Présentation d'un dialogue sur l'écran pour le choix d'un convertisseur.

Entsprechend Ihren Belastungsdaten empfehlen wir folgenden Antrieb:

Motor
KPER 160 L 2

Nennenden des Motors

Leistung : 18.5 kW
 Drehzahl : 2920 1/min
 Moment : 60.51 Nm
 Spannung : 220/380 V
 Strom : 58.89 A (Dreieck)
 WBK : F -
 Kühlmitteltemp. : 40°C
 Belastungsgrad : 72 %
 max.Erwärmung : 72 K

Angaben zur Umrichterwahl

Ausgangsspannung : 380 V
 erf. Maximalstrom : 61.9 A
 erf. Frequenz von : 16 Hz
 bis : 76 Hz
 U/f=konstant bis : 87 Hz

Umrichterwahl erwünscht(j/n)?

Motor
KPER 160 L 2

Nennenden des Motors

Leistung : 18.5 kW
 Drehzahl : 2920 1/min
 Moment : 60.51 Nm
 Spannung : 220/380 V
 Strom : 58.89 A (Dreieck)
 WBK : F -
 Kühlmitteltemp. : 40°C
 Belastungsgrad : 72 %
 max.Erwärmung : 72 K

Umrichter
S3.-30.0/400-.

Nennenden des Umrichters

Geräteleistung : 40.0 kVA
 Ausgangsspannung: 3*0-380 V
 Maximalstrom : 65.0 A
 Minimalfrequenz : 1 Hz
 Maximalfrequenz : 100 Hz
 U/f=konstant bis : 87 Hz

PRODRIVE U | Kontrollrechnung zum nächstkleineren Antrieb

Die gewünschte Kontrollrechnung ergibt:

Motor
KPER 160 MX 2

Nennenden des Motors

Leistung : 15.00 kW
 Drehzahl : 2920 1/min
 Moment : 49.06 Nm
 Spannung : 220/380 V
 Strom : 49.36 A (Dreieck)
 WBK : F -
 Kühlmitteltemp. : 40°C
 max.Erwärmung : 102K

Umrichter
S3.-30.0/400-.

Nennenden des Umrichters

Geräteleistung : 40.0 kVA
 Ausgangsspannung: 3*0-380 V
 Maximalstrom : 65.0 A
 Minimalfrequenz : 1 Hz
 Maximalfrequenz : 100 Hz
 U/f=konstant bis : 87 Hz

Figure 23: Résultat sur l'écran d'une série de déterminations: moteur et convertisseur.

3.4.4 Logiciels d'application pour la détermination et le choix des entraînements

Ces logiciels existent en allemand et en anglais.

- | | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Auswahl von Asynchronmaschinen
CDDCH 90: Feste Drehzal
CDCCH 90: Variable Drehzahl (Umrichter) | F.W. Berg, ABB Normelec AG
Riedstrasse 6, 8953 Dietikon
Tel.: 01-743 42 80 |
| 2. | Auswahl von Antriebsmotoren für Netz- und Umrichterbetrieb
ORPRO CH VN63 Universalprogramm
(Ersatzschaltbild, Streuinduktivität) | F.W. Berg, ABB Normelec AG
Riedstrasse 6
8953 Dietikon
Tel.: 01-743 42 80 |
| 3. | Projektierung von Antrieben
PRODRIVE A: Drehstrom-Standardmotoren
PRODRIVE U: Umrichterantriebe | Dr. H. Reiche, VEM Antriebstechnik AG
Försterlingstr. 20, D-01259 Dresden
Tel.: 0049-351-229 5430 |
| 4. | Anlaufverhalten und Erwärmung der Asynchronmaschine
ASMANL: Anlauf
ASMTMP: Erwärmung | Dr. R.E. Neubauer, ETH Zürich, IEM
Physikstrasse 3
8092 Zürich
Tel.: 01-632 6554 |
| 5. | Alternating Current Adjustable Frequency Drives
(Simulation umrichtergespeister Drehstromantriebe) | Allen-Bradley
Lohwisstrasse 50
8123 Ebmatingen
Tel.: 01-980 3303 |
| 6. | Analyse von Arbeitsprozessen
SEW Berechnungsprogramm
(Sammlung von Fallbeispielen) | Rene Holzer, Alfred Imhof AG
Antriebstechnik, 4142 Münchenstein
Tel.: 061-411 9296 |
| 7. | Motor Selection Program
MOTORSEL DC: Gleichstrommotoren
MOTORSEL AC: Wechselstrommotoren | CEGELEC Industrial Controls
West Avenue, Stoke-on-Trent
Staffordshire ST7 1TW |
| 8. | Drives Diagnostic Quiz
(Fallbeispiele zur Fehleranalyse für elektrische Antriebssysteme) | CEGELEC Industrial Controls
West Avenue, Stoke-on-Trent
Staffordshire ST7 1TW |
| 9. | Electric Machinery
Fallbeispiele zur Berechnung von elektrischen Maschinen | Stephen D. Umans
Mc Graw Hill Book Company
College Division |
| 10. | Wirtschaftlichkeit elektr. Antriebe
Motor Master Version 2.0
(Energie- und Kostenanalyse für Motoren verschiedener Hersteller) | Washington State Energy Office
Motor Master Registration
P.O. Box 43 165
Olympia, WA 98504-3165 |

4. Analyse et identification du processus et des composants des entraînements

Important !

- Pour réaliser une conception optimale de l'entraînement, il est nécessaire d'avoir fait une identification aussi précise que possible du processus ou procédé.
- Le processus mécanique est décrit par la dépendance du couple résistant (charge, frottement et accélération) en fonction de la vitesse et du temps, ainsi que des plages/domaines de fonctionnement (profil de charge).
- Les paramètres du processus peuvent être définis analytiquement ou par des essais et/ou mesures.
- L'élément de base pour la conception et le choix du moteur est une connaissance aussi précise que possible de sa courbe d'échauffement, puisque celle-ci définit la durée de vie des enroulements (bobinage) du moteur.

4.1 Introduction

Le but d'une analyse optimale de l'entraînement est de permettre de pouvoir satisfaire les exigences imposées par la consommation d'énergie et le coût minima. Pour cela, il est nécessaire de passer par une identification précise du procédé et du système d'entraînement.

Dans la suite des chapitres, des moyens pour l'identification du système de transmission mécanique de la machine seront définis, leurs relations avec le choix du moteur seront soulignées.

4.2 Identification de la machine entraînée ou l'organe entraîné

4.2.1 Généralités

Le but de cette identification est de définir les paramètres mécaniques, c'est-à-dire : l'évolution dans le temps du couple résistant, de la vitesse, de la puis-

sance et de la demande d'énergie de façon aussi précise que possible afin d'éviter des sous- ou surdimensionnements et de connaître les sources des pertes. Il est admis que le couple de la charge M_L est composé du couple résistant M_W et du couple d'accélération M_B .

Une classification des systèmes d'entraînements est établi dans le tableau 24.

Elle prend en considération les éléments suivants :

- l'évolution dans le temps du couple de la charge $M_L = f(t)$;
- les fréquences d'enclenchements et d'arrêts ;
- le moment d'inertie de la machine ou de l'organe entraîné ;
- la plage de variation de la vitesse ;

qui devront être définis en fonction du temps ainsi que des types de régimes stationnaires et transitoires.

Alors qu'en régime quasi-stationnaire seul le couple résistant M_L de la machine est important, les phénomènes d'équilibres mécaniques et thermiques ne sont que secondaires.

En régime transitoire, les paramètres à prendre en considération sont complétés par le comportement en fonction du temps du couple résistant et du couple d'accélération, par la fréquence et la durée des démarrages et des arrêts, par le moment d'inertie et les régimes d'exploitation.

La plus grande attention sera portée à l'analyse des informations liées aux régimes transitoires, pour lesquels une part importante d'énergie est consommée et qui permet peut-être aussi des économies.

En général la partie mécanique d'un système d'entraînement est décrite par :

- les grandeurs d'états ;
- les équations de base ;
- les paramètres de la machine ou de l'organe entraîné.

Les relations principales sont données à la suite.

Couple de charge			Démarrage Arrêt		Moment d'inertie			Réglage de vitesse		M _{W(n)} → fig. 27	
variable	oscillant	à-coup	rare	souvent	petit	moyen	grand	moyen	grand		
X			X		X					8	Ventilateurs petites puissances, pompes centrifuges, convoyeurs légers, tapis roulants, élévateurs, vis d'Archimède, escaliers roulants
X			X			X				2	Ventilateurs, élévateurs, turbo-compresseurs, calandres, convoyeurs
X			X			X		X			Machines textiles légères, mélangeurs, rectifieuses
X			X			X			X	2	Rotatives d'impression, broches machines-outils, machines à papier
X				X		X			X	1	Ascenseurs pour personnes
X		X	X			X				2 11	Bétonnières, sécheurs à tambour, pompes à piston et compresseurs, moulins à ciment, scieuses
X		X	X			X		X		4	Machines à laver, métiers à tisser, téléphérique, machines à raboter, extrudeurs
X		X	X			X			X		Laminoir
X		X		X		X		X		1	Ponts roulants élévateurs, ponts roulants rotatifs, manipulateurs, treuils, découpeuses pour tôle
	X	X	X				X			12 13	Ponceuses à bois, pompes à piston, entraînements de vanne
	X	X	X				X	X		5	Calandres de séchage, à papier, cylindres d'entraînement, découpeuses rotatives
	X	X		X			X				Presses, presses à découper, cisailles, treuils
	X	X		X			X	X			Dérouleuses-enrouleuses à papier, tronçonneuses
	X	X	X				X				Concasseurs, compresseurs à piston
	X	X	X				X	X			Centrifugeuses à sucre
X				X	X						Machines pour l'emballage, essoreuses, machines de conditionnement/bouteilles
X				X	X				X	1 3	Commandes d'axes de machines-outils

Tableau 24: Classification des systèmes d'entraînements.

4.2.2 Grandeurs d'états et équations de base

a) Les grandeurs d'états sont, pour :

Mouvement de rotation

- angle α
- vitesse angulaire $\Omega = d\alpha/dt$
- accélération angulaire $a = d\omega/dt$

Mouvement de translation

- déplacement s
- vitesse $v = ds/dt$
- accélération $a = dv/dt$

A la place de la vitesse angulaire, on fait souvent intervenir la vitesse n en tours/s. La relation entre eux est :

$$\Omega = 2 \pi n.$$

Pour un déplacement constant, la vitesse est constante et l'accélération nulle.

Pour certains processus, comme un système de transport (convoyeur), et pour la fabrication textile, la variation dans le temps de l'accélération (saccades/secousses) $r = da/dt$ est une valeur critique qui ne doit pas dépasser une valeur limite.

Dans les systèmes de transport interviennent aussi bien des mouvements de rotation que de translation (figure 28). La vitesse circonférentielle v d'une

roue de rayon R qui tourne avec une vitesse angulaire de Ω est de :

$$v = \Omega R$$

b) Les équations de mouvement décrivent la relation entre la vitesse angulaire ou le nombre de tours/s n avec les couples M, M_W , respectivement les forces F et F_W . Elles ont la forme suivante :

Pour une rotation

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_W$$

Pour une translation

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_W$$

cela pour un moment d'inertie, respectivement une masse constante.

Le déroulement du mouvement, $\Omega(t)$, $\alpha(t)$ et respectivement $v(t)$, $s(t)$ sera régi par l'équation précédente et influencé par :

- le couple du moteur M, respectivement de la force de traction F du moteur, pour lequel $M, F \geq 0$ régime moteur et $M, F \leq 0$ régime génératrice ou freinage ;
- le couple résistant M_W , respectivement la force résistante F_W de la machine ;
- le couple d'accélération $M_B = J d\Omega/dt$ respectivement la force d'accélération $F_B = m dv/dt$.

Les valeurs du couple ou de la force du moteur, ainsi que les valeurs de la charge peuvent dépendre des grandeurs d'état (déplacement, vitesse, accélération), mais aussi du temps t.

Le couple, respectivement la force du moteur, doit équilibrer le couple, respectivement la force résistante, et le couple respectivement la force d'accélération :

$$M = M_W + M_B ; F = F_W + F_B$$

Si entre la machine/processus et le moteur est installé un réducteur, il y a lieu de prendre en compte le rapport de réduction $i = n_m/n_L$ ainsi que son rendement. Le couple résistant de la machine rapporté au moteur aura la valeur suivante, cf. figure 25 :

$$M_W = M_{WA}/\eta_i$$

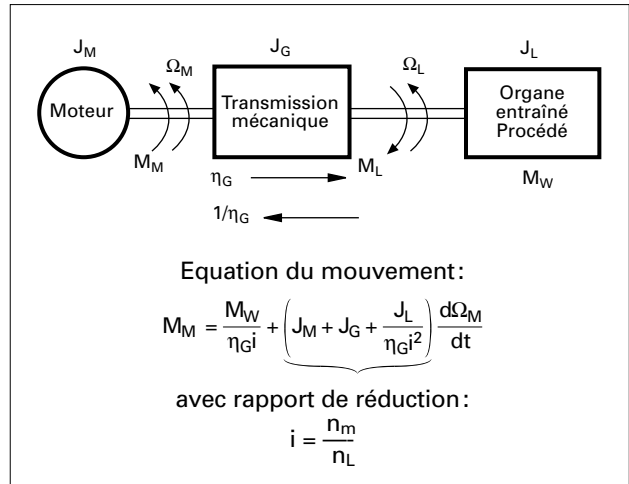


Figure 25: Système d'entraînement avec réducteur.

et le moment d'inertie rapporté au moteur aura la valeur suivante :

$$J = J_M + J_G + J_L/i^2$$

c) Les relations de puissance sont les suivantes :

Rotation

$$P = \Omega M$$

Translation

$$P = vF$$

Pour l'énergie (travail), les relations suivantes sont valables :

$$E = P dt$$

Sur la base des relations $P = \Omega M$ et $P = vF$, il est possible de définir le bilan de puissance :

$$P_M = P_W + P_B$$

et pour l'énergie :

$$E_M = E_W + E_B$$

Le moteur doit dans le cas général fournir la puissance résistante P_W ainsi que la puissance P_B d'accélération, en tenant compte du fait que l'énergie stockée dans les masses en rotation peut éventuellement être récupérée. Pour cela cependant, il est nécessaire que l'entraînement fonctionne dans au moins deux quadrants, cf. figure 26.

En **régime non stationnaire**, le couple M du moteur est une fonction du type de construction ou

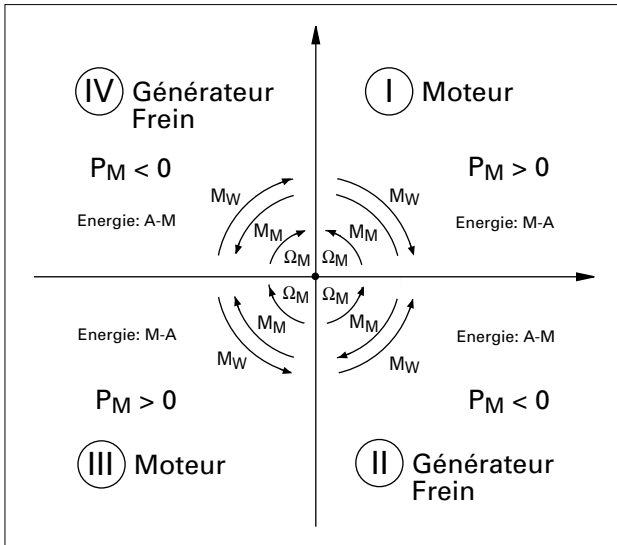


Figure 26: Régime de fonctionnement d'un entraînement.

de la commande ou une donnée. Le couple d'accélération est une déduction $M_B = M - M_W$ et il détermine le déroulement du mouvement.

En **régime stationnaire**, le moteur fournit un couple M correspondant au couple résistant M_W . Le couple d'accélération M_B est nul puisque la vitesse est constante, cf. figure 27.

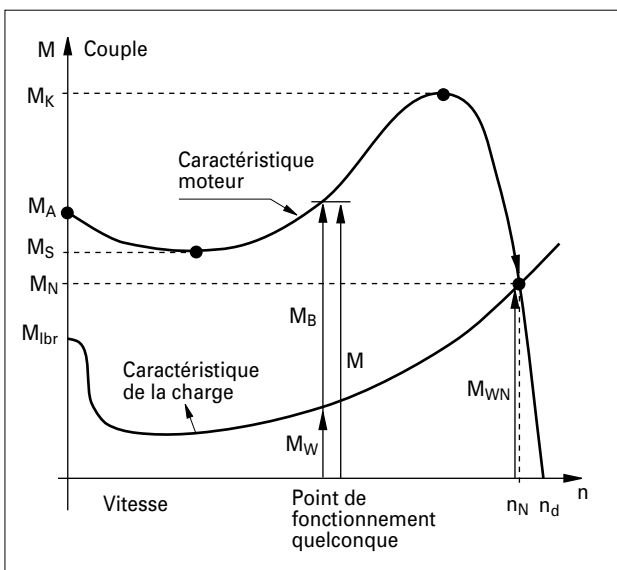


Figure 27: Couple = f (vitesse) en régime non stationnaire et stationnaire.

4.2.3 Les paramètres de la machine et leur définition

Des considérations précédentes, il ressort que le couple résistant M_W , le moment d'inertie J et les plages de fonctionnement sont les paramètres les plus importants.

La détermination du couple résistant M_W ainsi que de la puissance P_W de la machine peut être définie:

- sur la base des relations de la physique;
- par des mesures et par identification à un modèle.

On peut considérer les différentes sortes de machines, suivant le tableau 24 et la figure 29:

a) Machine avec déplacement de masse:

Pour des machines avec déplacement de masses montantes ou descendantes, le couple résistant peut être défini sur la base des relations de la physique. Exemple: ascenseur, cf. figure 28.

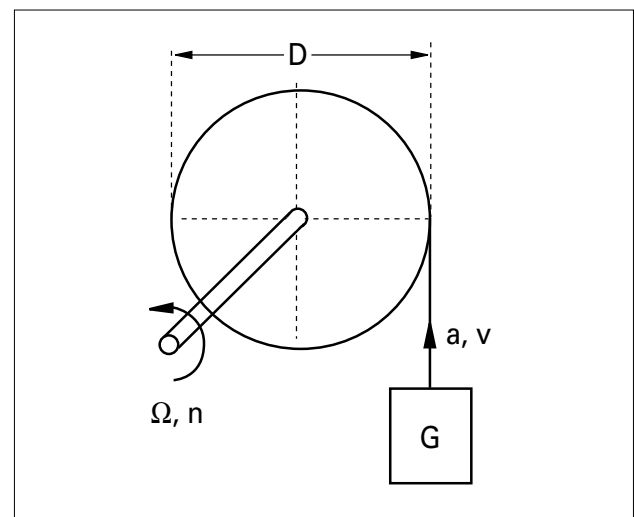


Figure 28: Schéma principe « ascenseur ».

Pour le mouvement de la masse G en direction verticale avec une vitesse v , le couple de la charge est de

$$M_W = \underbrace{gGD/2}_F$$

et la puissance

$$P_W = \underbrace{gGv}_F, \text{ avec } g = 9,81\text{m/s}^2.$$

b) Procédé de formage :

Dans le procédé de formage par enlèvement de matière et formation de copeaux, la puissance et le couple résistant peuvent être définis par les relations exposées dans la partie du document traitant des exemples.

c) Transfert de fluides ou de solides :

Dans des machines à transfert de fluides et de solides, comme des pompes centrifuges, des compresseurs, des centrifugeuses et des malaxeurs-agitateurs, le couple résistant croît avec le carré du nombre de tours/s: $M_W = kn^2$.

Il est à remarquer, que lors du passage de l'arrêt au mouvement, le frottement à l'arrêt doit être aussi vaincu. Celui-ci peut, dans certains cas, être diminué par exemple par un relâchement de pression dans le cas des compresseurs. La figure 29 donne des considérations sur le couple résistant $M_W = f(n)$ pour certaines machines.

4.2.4 Définition du moment d'inertie

Pour le calcul du moment d'inertie J_x d'un corps par rapport à un axe de rotation x , on part de la défini-

tion de l'énergie cinétique. L'énergie cinétique d'un corps en mouvement à la vitesse v et d'une masse m est de :

$$E_{cin} = mv^2/2$$

Un élément de masse dm d'un corps quelconque animé d'une vitesse angulaire de Ω à une distance r de l'axe de rotation contribue pour :

$$dE_{cin} = 1/2 \Omega^2 r^2 dm \quad \text{avec } v = \Omega r$$

au moment d'inertie total du corps en question. La somme des contributions donne la valeur de l'énergie cinétique

$$E_{cin} = 1/2 \Omega^2 \int r^2 dm$$

pour laquelle le moment d'inertie est défini par :

$$E_{cin} = 0,5 \Omega^2 J$$

et nous obtenons pour le moment d'inertie la relation :

$$J = \int r^2 dm$$

Cette relation permet de calculer analytiquement tous les moments d'inertie pour des corps en rotation autour d'un axe, cf. figure 30.

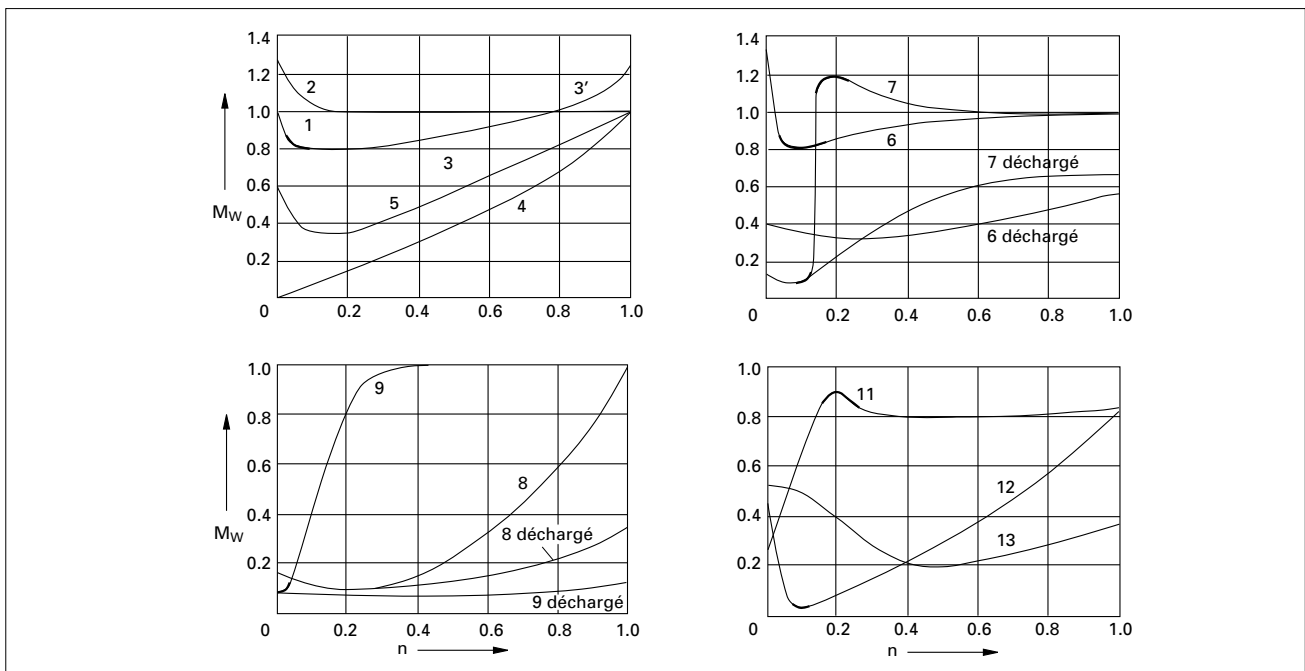


Figure 29: Caractéristiques du couple résistant (voir aussi tableau 24).

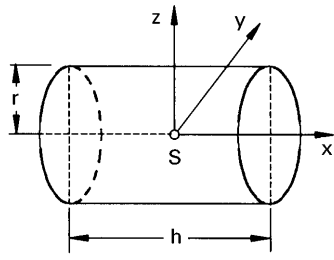
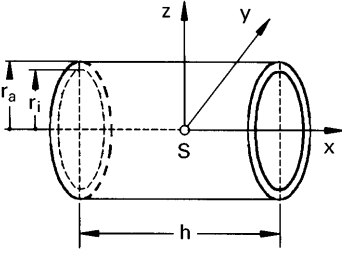
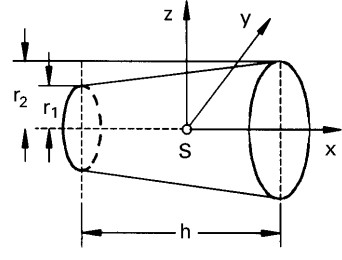
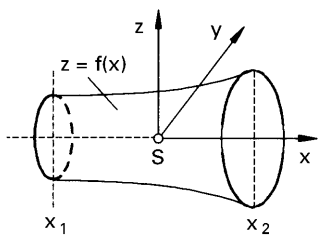
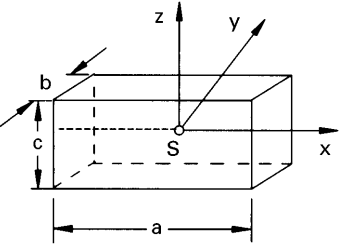
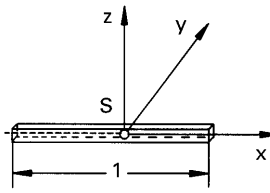
<p style="text-align: center;">Cylindre</p>  <p> $m = \rho \pi r^2 h$ $J_x = \frac{mr^2}{2}$ $J_y = J_z = \frac{m(3r^2 + h^2)}{12}$ <i>Tube</i> Epaisseur de la paroi $\delta \ll r$ $m = \rho 2 \pi r h \delta$ $J_x = mr^2$ $J_y = J_z = \frac{m(6r^2 + h^2)}{12}$ </p>	<p style="text-align: center;">Tube</p>  <p> $m = \rho \pi (r_a^2 - r_i^2) h$ $J_x = \frac{m(r_a^2 + r_i^2)}{2}$ $J_y = J_z = \frac{m(r_a^2 + r_i^2 + h^2/3)}{4}$ </p>	<p style="text-align: center;">Cône de révolution</p>  <p> $m = \rho \frac{1}{3} \pi h (r_2^2 + r_2 r_1 r_1^2)$ $J_x = \frac{3}{10} m \frac{r_2^5 - r_1^5}{r_2^3 - r_1^3}$ </p>
<p style="text-align: center;">Corps quelconque en rotation</p>  <p> $m = \rho \pi \int_{x_1}^{x_2} f^2(x) dx$ $J_x = \frac{1}{2} \rho \pi \int_{x_1}^{x_2} f^4(x) dx$ </p>	<p style="text-align: center;">Parallélépipède</p>  <p> $m = \rho abc$ $J_x = \frac{m(b^2 + c^2)}{12}$ $J_y = \frac{m(a^2 + c^2)}{12}$ $J_z = \frac{m(a^2 + b^2)}{12}$ </p>	<p style="text-align: center;">Tige</p>  <p> $m = \rho Al$ $J_y = J_z = \frac{ml^2}{12}$ </p>

Figure 30: Moment d'inertie de quelques corps.

Dans la pratique, les entraînements sont composés de différentes masses en rotation, qui sont sur un même axe ou séparées par un réducteur et qui sont en rotation ou en translation. Le moment résultant pour des masses qui sont sur le même axe de rotation et qui ont la même vitesse angulaire est simplement obtenu par l'addition des différents moments d'inertie J_i :

$$J_{res} = \sum J_i$$

Les moments d'inertie résultants de systèmes couplés peuvent être calculés en utilisant la relation d'équivalence de l'énergie.

Pour un système général composé d'éléments en rotation avec des vitesses angulaires de Ω_i et des moments d'inertie J_i ainsi que des masses m_i en mouvement de translation avec des vitesses v_i , on obtient le moment résultant J_{res} pour la vitesse angulaire Ω_0 :

$$J_{res} = \sum J_i \Omega_i^2 / \Omega_0^2 + \sum m_i v_i^2 / \Omega_0^2$$

Le moment d'inertie d'un corps de forme irrégulière peut être obtenu par un essai « pendulaire ».

4.3 Liste de contrôle pour l'analyse de processus et préparation des étapes conduisant au choix de l'entraînement

1. Détermination des caractéristiques d'exploitation en fonction du temps :

déplacement	vitesse	accélération	
$s = s(t)$	$v = v(t)$	$a = a(t)$	pour translation
$\alpha = \alpha(t)$	$\Omega = \Omega(t)$	$\dot{\Omega} = \dot{\Omega}(t)$	pour rotation

2. Etablissement des relations du couple résistant en fonction de la vitesse et du temps t :

$$m_W = m_W(v) \quad \text{et} \quad m_W = m_W(t).$$

3. Connaissance de toutes les masses en mouvement M_i et de tous les moments d'inertie

$$J_i = J_i(t).$$

4. Connaissance des valeurs du rendement du processus et des transmissions mécaniques

$$\eta(n).$$

5. Estimation de l'élasticité/souplesse et des jeux du système mécanique.

6. Fixation des contraintes maximales et des valeurs limites.

7. Fixation des données de précision et des plages de tolérances.

4.4 Identification du procédé, techniques de mesures et valorisation

Afin de pouvoir transmettre les demandes de puissances et d'énergie de l'entraînement électrique à la machine ou au processus, il est avant tout nécessaire de bien connaître les exigences de ceux-ci. Si ces exigences sont mal connues, il est alors conseillé de procéder à des mesures ou éventuellement à la collecte de valeurs expérimentales. Des mesures sont de toute manière à envisager si le moindre soupçon subsiste concernant les exigences réelles, et il faut impérativement procéder à des mesures sinon la définition de l'entraînement ne sera pas optimale.

En général, il apparaît qu'il y a deux types d'adaptation en vue de l'amélioration du rendement. L'analyse seule de l'entraînement est une action à courte vue.

4.4.1 Moyen pour l'analyse de la machine ou du processus

Pour cette analyse, nous ne donnons que des indications. Des rapports spécialisés de RAVEL « Projets de recherche » comme « Analyse du rendement global de processus industriels de production », etc. donnent des renseignements détaillés du comportement énergétique d'un certain nombre de processus. Dans ce cadre, les processus impression textile, cimenterie, ventilation industrielle, machines-outils, pompes de circulation, etc. ont été étudiés. Pour illustrer nos propos, nous avons choisi les procédés suivants :

Pompes :

La puissance de la pompe est définie par son débit et la hauteur de refoulement. Les caractéristiques des pompes donnent également des indications sur le rendement, voir figure 31.

Il y a la possibilité, en connaissant les caractéristiques de l'installation, de faire correspondre la zone de rendement maximal de la pompe avec les exigences demandées. Pour cette méthode de choix, il existe des pompes disposant des éléments de mesure des grandeurs caractéristiques. La marche à suivre pour le calcul des caractéristiques d'une

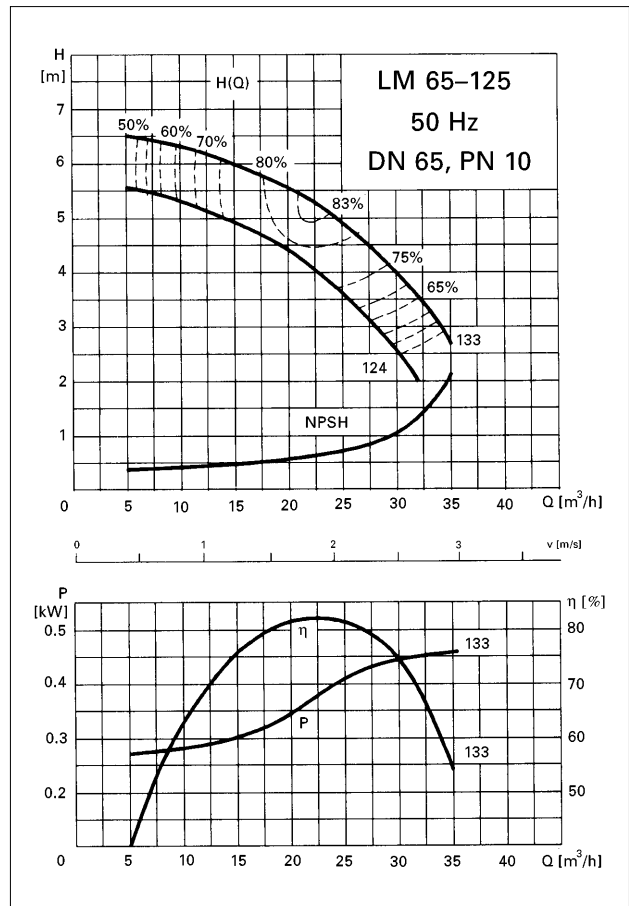


Figure 31 : Caractéristiques puissance et rendement d'une pompe centrifuge.

installation/tuyauterie de chauffage, par exemple, et la distribution sur un grand nombre de consommateurs réglés sont données dans la publication RAVEL « Dimensionnement et exploitation optimale des circulateurs » (1993 – N° 724.330 f)

Une pompe de mesure est décrite et définie à la référence [8]. Cette pompe est installée en lieu et place de la pompe définitive. Elle donnera des indications réelles sur le choix du point de travail, sur la pression de refoulement et le débit.

Des diaphragmes peuvent être montés dans le circuit de distribution. Concernant la mesure des valeurs sur des installations existantes, il existe des appareils de mesure basés sur l'effet « Doppler », qui permettent d'éviter une modification de l'installation pour faire les mesures.

Ventilateurs:

La puissance aéronique est là aussi définie par le débit de l'air ou du gaz et par la différence de pression nécessaire.

Machines de transformation:

La puissance mécanique est donnée par la relation $P_{mec} = M\Omega$. La mesure de la vitesse est rendue facile au moyen de tachymètres ou de capteurs incrémentaux. Le couple peut être mesuré par un « torsiomètre ». Cet appareil installé sur l'axe doit être adapté à la puissance transmise. La mesure s'effectue par torsion ou flexion des éléments capteurs.

Il existe actuellement un système de mesure de couple développé à l'EPFL qui permet la mesure en faisant les connexions seulement sur le réseau d'alimentation électrique, donc sans perturbation à l'installation. Un autre moyen est l'utilisation de systèmes de « frein » mécanique ou électrique avec une génératrice; ceux-ci sont utilisés essentiellement en laboratoire.

La détermination du rendement mécanique global d'une machine de transformation dépend essentiellement du produit fini. Pour un tour, il est défini par le volume de copeaux produit par unité de temps. Pour une cimenterie, de la puissance du concassage de la matière première jusqu'à l'obtention de la poudre au grammage désiré. Il est d'environ 3% pour ce dernier et de l'ordre de 8% pour le tour. Et cela dans les deux cas en ne prenant en considération que l'énergie directe ou nécessaire au procédé.

Ces chiffres démontrent de quelle importance est l'établissement d'une analyse de procédé pour la valorisation, en particulier, de la situation énergétique globale. Sans elle, une analyse limitée à l'énergie électrique peut conduire à des décisions mal choisies et à côté des points importants.

4.4.2 Moyens d'analyse de l'entraînement électrique

L'appareillage de base pour l'appréciation énergétique d'un processus variable en fonction du temps est de disposer d'instruments de mesure de puissance qui, à intervalles réguliers, enregistrent la puissance active et la puissance réactive. Le schéma de principe est donné à la figure 32.

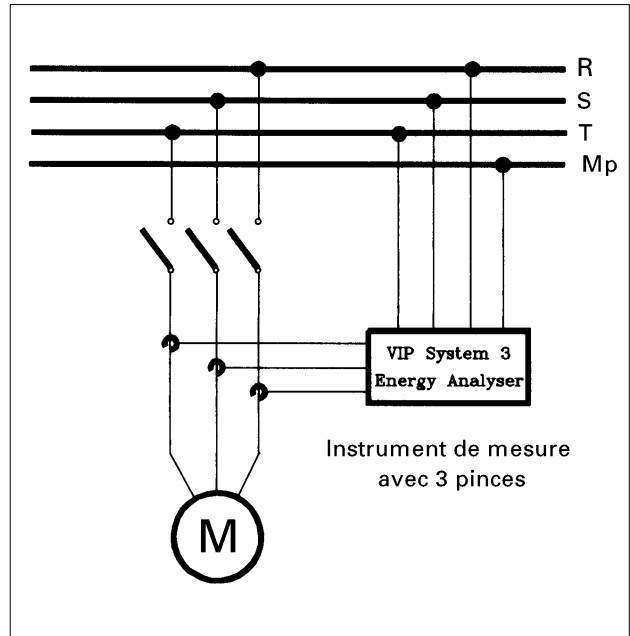


Figure 32: Schéma pour la mesure de puissance instantanée.

Avec, entre autre, l'appareil «VIP-instrument multifonction», il est possible de mesurer plusieurs consommateurs en même temps et de calculer les facteurs de puissance respectifs. La cadence de mesure est de 1 seconde. On peut également obtenir des valeurs moyennes sur un laps de temps donné. Pour des mesures sur de plus longues périodes, il est recommandé d'utiliser des enregistreurs à points. Il est entendu que ces mesures sont correctes seulement dans le cas de réseaux sinusoïdaux. Lorsque des convertisseurs/redresseurs/onduleurs sont utilisés, cela n'est plus rigoureusement exact.

Pour la mesure du rendement de moteurs à induction alimentés par convertisseurs, il existe des appareils adaptés qui font une conversion analogique-digitale des valeurs instantanées et les produits des valeurs instantanées des tensions et courants et une compilation des différentes valeurs des puissances.

Les appareils les plus connus sont ceux de NORMA D 5135 et de YOKOGAMA Infratec 104B. Une recommandation IEC est en préparation. Pour l'économie d'énergie, seul l'analyse complète de l'alimentation est intéressante. Les appareils de mesure doivent être compatibles avec la gamme des fréquences générées du côté du réseau à l'entrée du

convertisseur. Si, par exemple, la tension du réseau peut être maintenue sinusoïdale, l'emploi de l'appareillage digital n'est alors pas nécessaire.

La consommation d'énergie peut également être déterminée par l'appareil digital de la mesure de puissance. Pour des réseaux sinusoïdaux, les solutions sont simples.

La société LANDIS & GYR propose une série d'appareils avec disques de durée variable qui permettent l'enregistrement par jour, semaine et mois. Ces enregistrements peuvent par la suite être valorisés au travers de PC et de logiciels d'application spécialisés (voir figure 33). L'appareil de LANDIS & GYR type EMU 1.14 est particulièrement élégant. Il indique même le coût de l'énergie consommée.

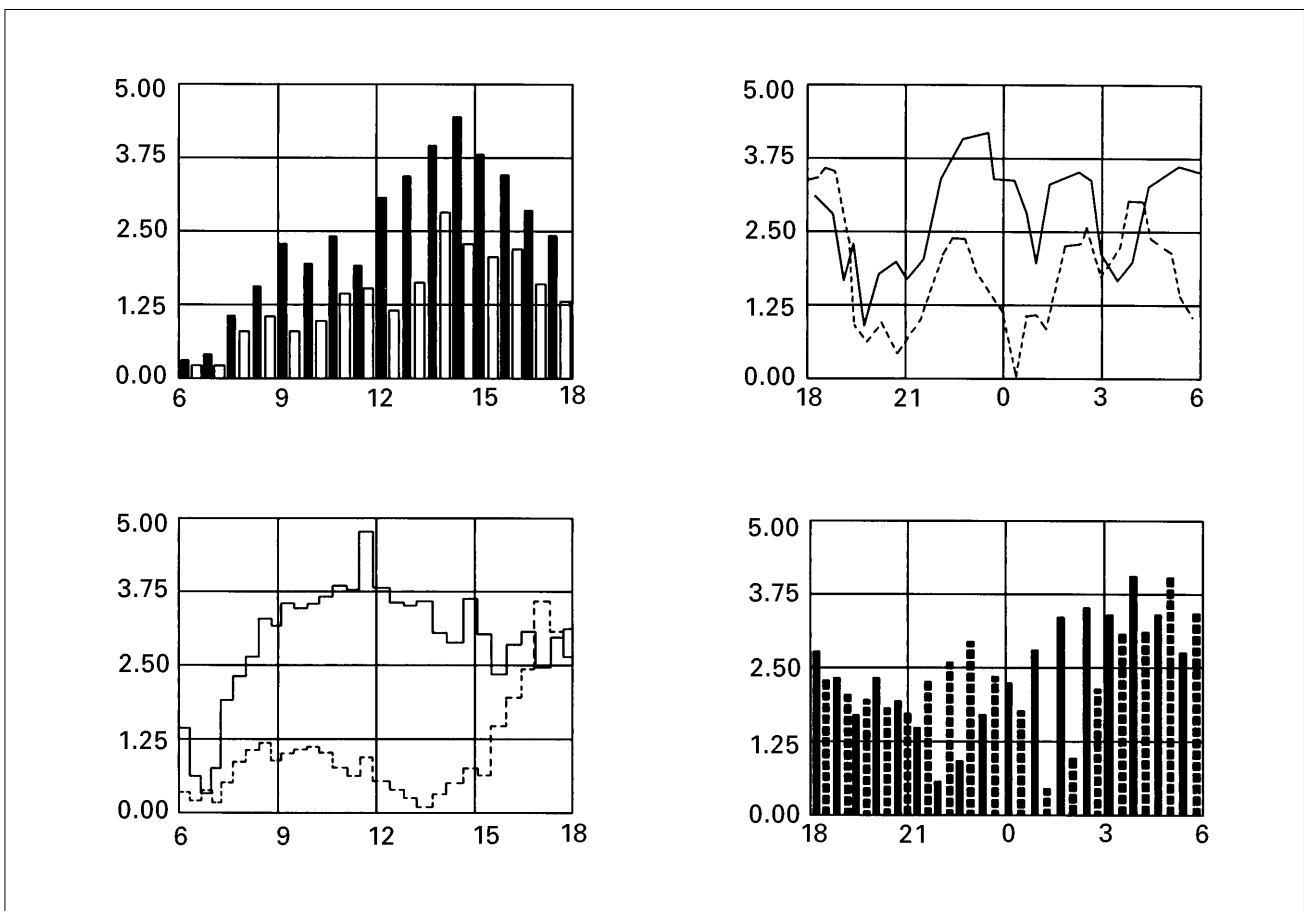


Figure 33: Différentes visualisation de la mesure d'énergie avec l'appareil L & G.

5. Economie d'énergie dans les systèmes d'entraînement

Important !

- Dans l'objectif d'économie d'énergie, les améliorations sont à faire dans l'ordre suivant :
 - régler la puissance de l'entraînement en fonction de la demande ;
 - adapter la puissance nominale aux besoins ;
 - améliorer le rendement des composants ;
 - optimiser la consommation d'énergie.
- En régime stationnaire les pertes sont à minimiser, alors qu'en régime non stationnaire c'est la consommation d'énergie qui est à minimiser.
- Le rendement des moteurs dépend du type, de la grandeur et de la charge.
- En régime transitoire, des pertes supplémentaires peuvent être créées au démarrage; elles peuvent être évitées par l'emploi de convertisseurs.
- La récupération d'énergie est seulement possible par l'emploi de convertisseurs.

- b) Diminuer la consommation d'énergie en minimisant les pertes dans les régimes en charge et à vide de la machine ou du procédé.
- c) Diminuer la consommation d'énergie en adaptant le réglage en fonction de la demande, c'est-à-dire par exemple: enclenchement ou déclenchement de la puissance en fonction de la demande, idem pour le couple et la vitesse.
- d) Minimiser la consommation d'énergie en régime transitoire, c'est-à-dire: utilisation de l'énergie de freinage, réduction des pertes au démarrage, adaptation optimale du moteur en fonction de la machine entraînée et optimisation de la consommation d'énergie pendant l'exploitation.
- e) Valorisation des pertes de l'entraînement et du processus.

Chacune de ces mesures est limitée dans son efficacité et en général couplée à des coûts et des dépenses complémentaires.

Concernant l'efficacité des mesures proposées, certainement que l'adaptation optimale du réglage en fonction de la demande et la réduction des pertes en régime à vide sont les meilleures et les plus faciles à mettre en pratique.

Des exemples typiques sont la ventilation d'espaces, le refroidissement et le transport d'agents ou matériaux. Dans ces exemples, par enclenchement et déclenchement en fonction des besoins ou avec un entraînement à deux vitesses, une quantité importante d'énergie peut être économisée.

L'amélioration du rendement du processus est régi par des relations de la physique et par les limites théoriques d'amélioration, soit la consommation théorique minimale du processus mis en œuvre par unité de produits fabriqués. Il est cependant important de connaître cette valeur afin de situer l'efficacité générale du processus et éventuellement de le comparer à d'autres. Dans un tel cas, il y a lieu de s'attaquer d'abord à l'élément le plus faible de la chaîne du processus.

La récupération d'énergie en régime transitoire met en œuvre d'assez grands moyens. Intrinsèquement elle produit aussi des pertes, dont il faut tenir compte.

5.1 Marche à suivre générale

L'économie d'énergie dans un système d'entraînement peut provenir des considérations suivantes :

- a) Amélioration du rendement global η_G du système d'entraînement

$$\eta_G = \eta_{st} \cdot \eta_M \cdot \eta_{Gtr} \cdot \eta_A$$

avec l'amélioration du rendement de chaque composant, à savoir: du convertisseur (η_{st}), du moteur (η_M), du réducteur (η_{Gtr}) et de la machine ou processus (η_A), par diminution des pertes respectives.

5.2 Economies d'énergie de la machine et du processus

Les mesures suivantes peuvent être mises en place :

5.2.1 Amélioration de la construction

Minimiser les pertes aux paliers, dans les circuits de distribution et les frottements un peu partout. Diminuer les pertes dans la distribution par des sections de transfert raisonnablement dimensionnées (voir normes SIA).

Les pertes d'écoulement dans les processus conditionnent fortement l'énergie consommée et la puissance installée. Par suppression de régimes turbu-

lents dans les conduites et leur remplacement par des régimes laminaires, en grossissant les sections d'écoulement, il est possible de diminuer les pertes et, par là, la demande d'énergie.

5.2.2 Amélioration du processus

Minimiser les masses à accélérer et à faire tourner.

Amélioration de la conduite du processus, du réglage et de la commande pour les transferts d'agents matériels, par exemple le pompage et la ventilation. Remplacer les réglages par contrainte du flux ou par « bypass » par des réglages par variation de la vitesse (figure 34). Adaptation de la cadence de production ou de la vitesse aux besoins. Réglage en fonction de la demande par enclenchement et déclenchement.

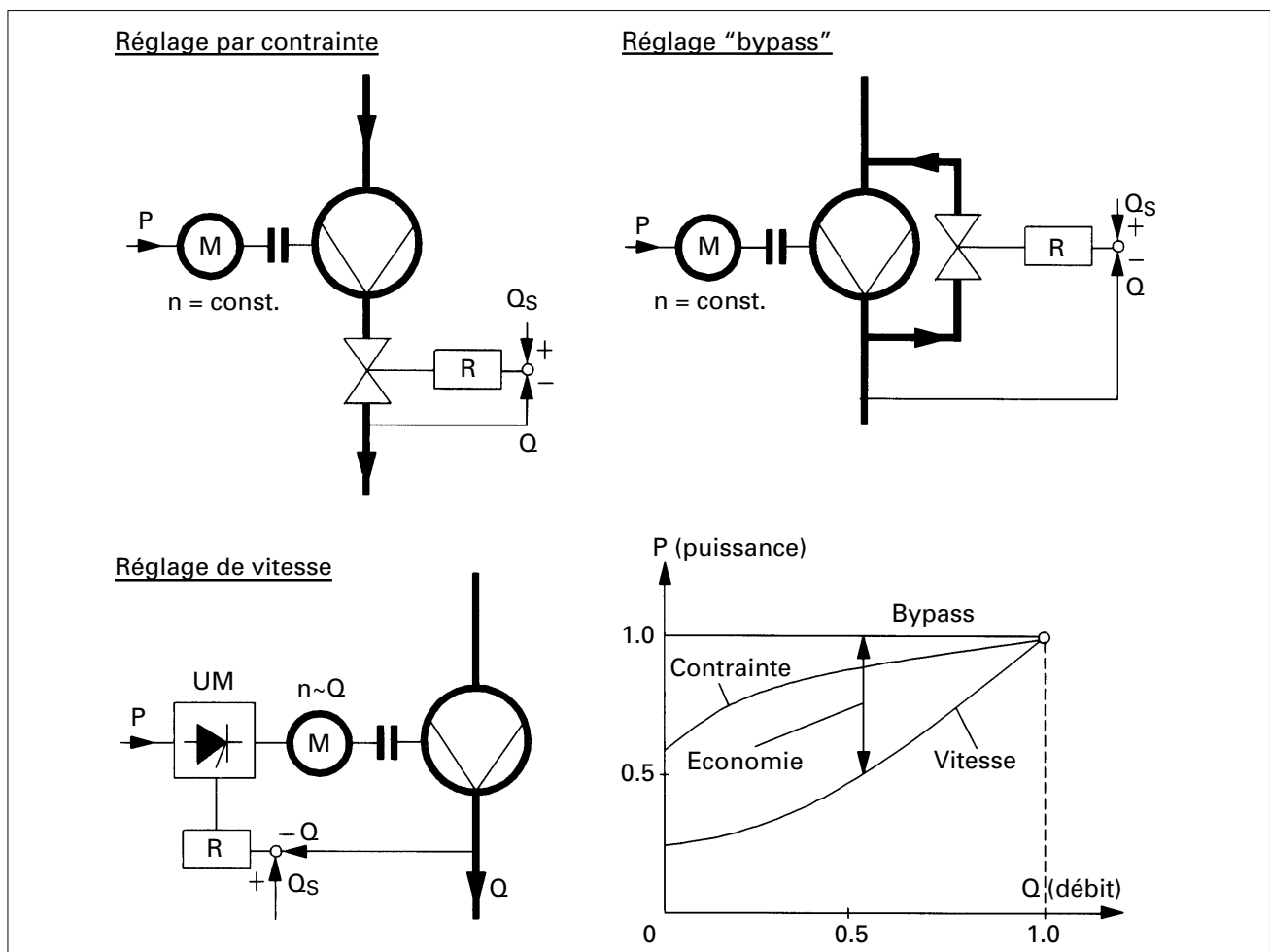


Figure 34: Amélioration du processus par le réglage du débit.

En fonction des exigences du réglage, il existe actuellement un certain nombre de solutions :

- pour des variations continues de la vitesse, on peut utiliser des moteurs asynchrones avec convertisseur de fréquence-tension ;
- pour des variations de la vitesse par paliers, on peut faire appel à la commutation des pôles dans les machines asynchrones.

Le réglage de la vitesse produit aussi d'autres avantages, comme la diminution de l'usure et de la charge de l'installation.

5.3 Economie d'énergie du moteur

Dépendance des pertes

Les pertes du moteur se composent :

- des pertes par échauffement provoqué par le courant (pertes Joule) $V_{cu} = RI^2$ dans les enroulements ; elles sont proportionnelles au carré de la puissance P (V_{cu} proportionnel à P^2) ;
- des pertes provoquées par les cycles de magnétisation et les courants de « Foucault » ou pertes fer dans les tôles ou les aimants permanents V_{fe} . Ces pertes sont proportionnelles au carré de la tension U et de la fréquence f , ainsi V_{fe} proportionnel à $U^2 \cdot f^2$;
- des pertes par frottements et de ventilation V_R dans les paliers et le circuit de refroidissement ;
- des pertes supplémentaires qui dépendent aussi du carré de la puissance ; V_{zu} proportionnel à P^2 .

Le rendement, respectivement les pertes d'un moteur, dépendent des grandeurs suivantes :

1. charge du moteur ;
2. grandeur, puissance et vitesse du moteur ;
3. type et alimentation du moteur ;
4. adaptation du moteur.

5.3.1 Charge du moteur

Les pertes totales $V_{total} = V_{cu} + V_{fe} + V_R + V_{zu}$ sont dépendantes de la charge. Ainsi rapportées à la

puissance fournie P ; V_{total}/P à cause de la dépendance relative à la charge du courant et des autres pertes, celles-ci ont une valeur minimale pour une charge bien précise P_{opt} . Pour ce point de fonctionnement optimal, qui n'est pas le point défini par les valeurs nominales, les pertes en charge sont $V_{last} = V_{cu} + V_{zu}$ et les pertes à vide sont $V_{leer} = V_{fe} + V_R$. Ces deux valeurs sont égales (figure 35).

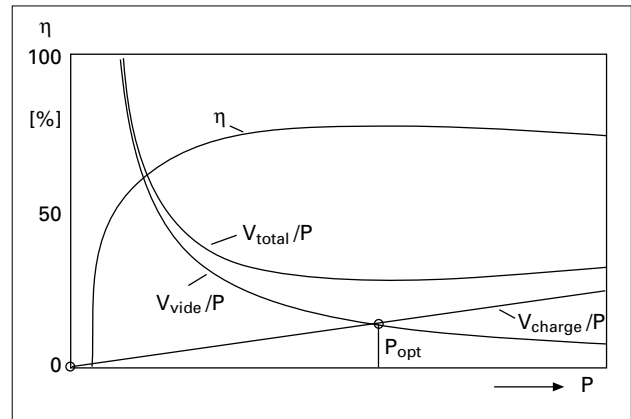


Figure 35: Le rendement en fonction de la charge et des pertes relatives.

Pour cette charge, le rendement prend la valeur suivante :

$$n = \frac{P}{V_{total}} = \frac{1}{1 + V_{total}/P}$$

qui représente la valeur la plus haute !

La valeur de ce maximum dépend de la valeur de la charge et des pertes à vide et en charge nominale. Si les pertes à vide, à la valeur nominale, sont plus faibles que celles de la charge, alors le moteur a pour une charge partielle un rendement plus grand. Un moteur optimisé, pour la valeur nominale, a en charge partielle un rendement plus petit.

Ce raisonnement est valable pour tous les types de machines.

La comparaison les moteurs asynchrones normalisés avec les moteurs asynchrones « High-Efficiency », dont les pertes sont indiquées dans le tableau 36 démontre cette tendance, voir aussi la figure 37. Les moteurs « High-Efficiency » ont de faibles pertes à vide et effectivement un meilleur rendement en charge partielle. Ainsi leur emploi dans les entraînements, en général sous-chargés, est particulièrement efficace.

Pertes	Moteur normalisé [kW]	Moteur « High-Efficiency » [kW]
I^2R -pertes stator	1,32	0,91
Pertes fer	0,72	0,18
I^2R -pertes rotor	0,64	0,67
Frottements etc.	0,37	0,28
Pertes suppl.	0,85	0,23
Pertes totales	3,90	2,27
Rendements	0,90	0,94

Tableau 36: Comparaison d'un moteur asynchrone de 37 kW normalisé et « High-Efficiency ».

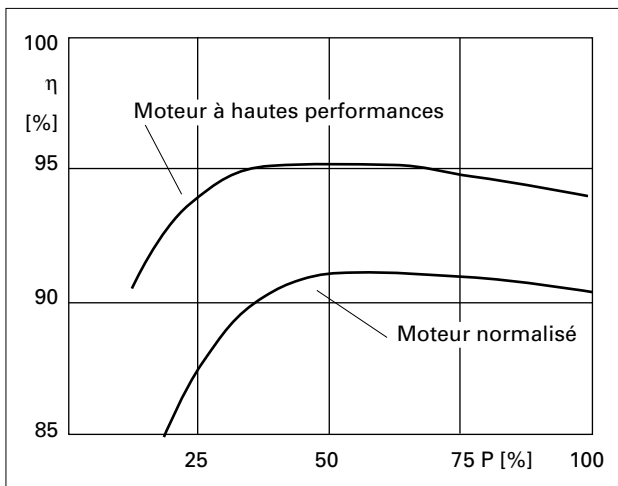


Figure 37: Rendement en fonction de la charge pour les deux moteurs asynchrones de 37 kW.

5.3.2 Grandeur, puissance et vitesse du moteur

La puissance nominale et la vitesse influencent beaucoup le rendement. Sur la base des lois de similitude, pour une augmentation linéaire des dimensions (a), les pertes augmentent avec le carré, alors que le couple respectivement la puissance pour une vitesse définie, augmente avec le cube. Ainsi les pertes relatives diminuent avec l'augmentation de la puissance, (figure 38). Le rendement augmente avec l'accroissement de la puissance.

Du fait que la grandeur des machines et les pertes sont définies par le couple, les moteurs à rotation rapide ont un meilleur rendement que les moteurs plus lents.

5.3.3 Type et alimentation du moteur

Le type du moteur définit très fortement la valeur du rendement. Les machines synchrones atteignent le meilleur rendement, figure 39.

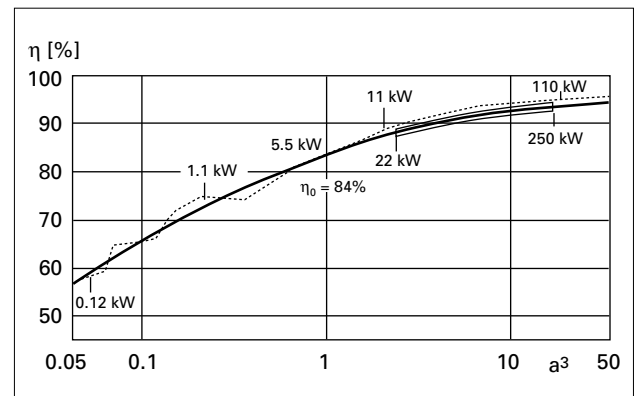


Figure 38: Variation du rendement en fonction de la « grandeur », machines asynchrones.

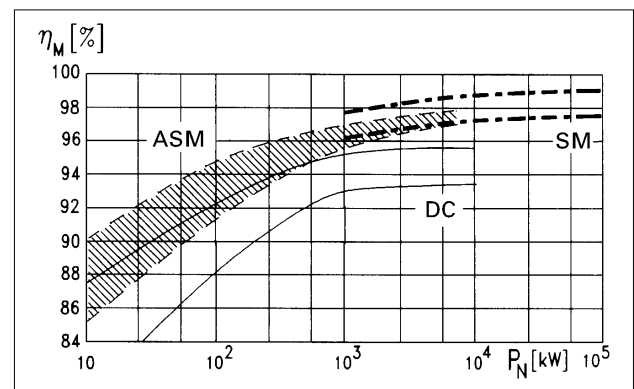


Figure 39: Rendement de différents types d'entraînements électriques.

Les moteurs asynchrones monophasés et les moteurs monophasés à bagues de court-circuit ont des rendements très mauvais, figures 40 et 41. L'emploi d'aimants permanents permet d'améliorer le rendement des petits moteurs. Ainsi l'excitation est simplifiée. Les machines à aimants permanents doivent être pourvues d'un enroulement à cage pour le démarrage ou bien être alimentées par des convertisseurs.

Lorsque l'alimentation du moteur asynchrone se fait de manière asymétrique ou avec une tension

non sinusoïdale (convertisseur), des pertes supplémentaires sont créées qui dépendent de la valeur de ces perturbations. La pratique indique que les valeurs nominales de la puissance doivent être réduites de 10% pour des asymétries de l'alimentation de 3% pour obtenir le même échauffement.

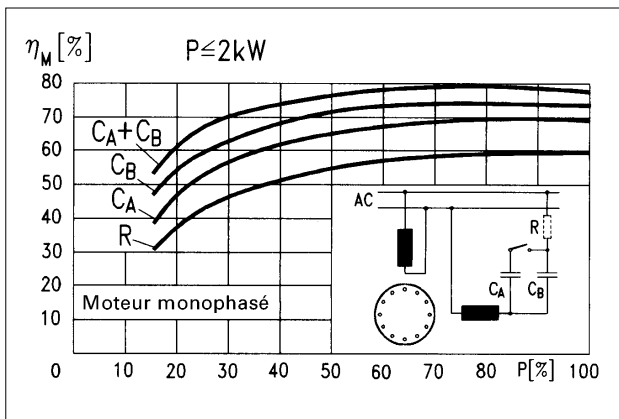


Figure 40: Rendements de différents moteurs monophasés asynchrones.

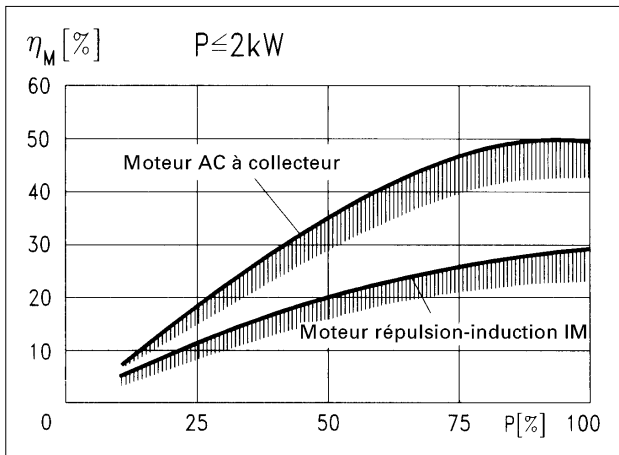


Figure 41: Rendements de petits moteurs monophasés.

5.3.4 Définition du moteur

Les pertes des moteurs électriques peuvent être diminuées par :

a) Une réduction spécifique des pertes par :

- une diminution de la résistance électrique des enroulements, par une meilleure conductivité, un

meilleur refroidissement ou une section plus grande ;

- une diminution de la charge magnétique du fer et des besoins d'excitation, par une augmentation de la section de fer ;
- une diminution des pertes dans le fer, par une meilleure isolation des paquets de tôles, par des traitements complémentaires des rotors des machines asynchrones et d'autres mesures de fabrication pour diminuer la conduction électrique entre les tôles et entre les enroulements du rotor (cage) ;
- un changement de l'utilisation du fer et des enroulements, caractérisé par l'induction dans l'entrefer B et par le courant, respectivement la tension électrique des enroulements et de la densité de courant J pour une même charge ;
- une amélioration de l'utilisation des valeurs de construction de la machine, caractérisée par une augmentation de l'induction B, de la densité de courant J et/ou de la fréquence d'alimentation f_s.

Alors que les mesures mentionnées sous a) ne changent aucunement les caractéristiques intrinsèques des machines électriques, comme courant de démarrage, couple de démarrage, couple de décrochement et facteur de puissance, le changement de caractéristiques de conception/construction, par exemple l'induction B et la densité de courant J, peut modifier des caractéristiques de ces machines.

b) Une augmentation de l'induction B :

- augmente : le courant de démarrage, le couple de démarrage, le couple de décrochement et les pertes fer ;
- diminue : le facteur de puissance, les pertes des enroulements.

c) Une augmentation de la densité de courant J :

- augmente : le facteur de puissance ;
- diminue : le courant de démarrage, le couple de démarrage, le couple de décrochement et les pertes fer ;

et cela pour un même type de charge ou d'utilisation.

Lorsque les pertes fer sont plus petites que les pertes dans les enroulements, le rendement augmente pour un accroissement de l'induction B, respectivement

de la tension, pour la même charge. Par contre, le facteur de puissance diminue et le courant de démarrage augmente, cf. tableau 42.

Tension d'alimentation	380 V	420 V
Rendement	0,837	0,853
Facteur de puissance	0,84	0,78
Courant de démarrage	94 A	103 A
Glissement nominal	4,6%	3,5%
Echauffement	73°C	66°C

Tableau 42: Pertes en fonction de la tension du réseau pour un moteur asynchrone de 7,5 kW.

Si l'on maintient les caractéristiques d'une machine électrique relativement constantes, chaque diminution des pertes est à associer à plus de matériel ou une amélioration du procédé de fabrication. Il est évident que cela provoque des coûts supplémentaires. On arrive à la fin à un moteur du type « High-Efficiency » qui, comparé à un moteur normalisé de même diamètre de rotor, a un meilleur rendement, mais aussi un coût plus élevé parce que faisant intervenir plus de matériaux (voir figure 35).

Les comparaisons du tableau 36 montrent d'une manière claire que le moteur « High-Efficiency » est conçu de façon suboptimale, parce que pour une construction optimale les pertes minimales sont obtenues lorsque les pertes fer et d'enroulement sont égales. Par une augmentation de l'induction et de la fréquence, la puissance et le rendement peuvent être améliorés pour ce type de moteurs. Mais il faut compter avec une augmentation du courant de démarrage, du couple de démarrage et du couple de décrochement.

Minimiser les pertes du moteur :

Pour minimiser les pertes du moteur, on dispose des possibilités suivantes :

1. on installe un moteur de type adapté avec des pertes réduites ;
2. la grandeur du moteur est décidée après observation des pertes pendant une assez longue période d'exploitation, de façon à ce que celles-ci soient aussi faibles que possible ;
3. à la place d'un moteur normalisé, on peut installer un moteur de type « High-Efficiency ».

1. Installation d'un moteur avec des pertes faibles

Lors du choix d'un moteur, les démarrages, les conditions d'exploitation et les investissements sont à prendre en considération. Ainsi, un moteur synchrone ne peut remplacer un moteur asynchrone que lorsque les conditions de démarrage sont garanties. Le remplacement d'une machine à courant continu par une machine asynchrone ou synchrone alimentée par un convertisseur ne peut donc être recommandé que lorsqu'aucune contrainte particulière n'est imposée aux oscillations de couple et aux performances de réglage de vitesse.

2. Choix de la puissance du moteur

Le choix de la puissance du moteur peut être fait tel que lors de l'exploitation :

- le moteur fonctionne à puissance nominale ;
- le moteur est surchargé ;
- le moteur est sous-chargé.

Un fonctionnement en surcharge est seulement acceptable lorsque la température limite maximale n'est pas dépassée ou en accord avec la réduction de la durée de vie. Ce régime n'est cependant pas à conseiller parce que le rendement en surcharge a dépassé la valeur maximale, comme le montre la figure 35.

Lors d'un fonctionnement en sous-charge ou surdimensionné, la comparaison avec le régime nominal est la suivante :

- les pertes à vide sont plus grandes puisqu'il s'agit d'un plus gros moteur ;
- les pertes en charge plus petites puisqu'elles diminuent avec le carré de la puissance.

Une analyse précise de la dépendance des pertes en fonction de la grandeur du moteur montre que pour des puissances < 50 kW, un surdimensionnement à cause de la diminution forte du rendement ne diminue pas les pertes aussi longtemps que la charge est plus grande que 50% (voir chapitre suivant).

3. Installation de moteurs de type « High-Efficiency »

Fondamentalement, un moteur normalisé peut toujours être remplacé par un moteur « High-Efficiency » puisque les hauteurs d'axes sont les mêmes.

Les moteurs « High-Efficiency » ont de plus petites pertes, des températures d'enroulement et de paliers plus bas et donc une durée de vie plus longue. Ils travaillent avec un plus petit glissement, c'est-à-dire avec une vitesse un peu plus élevée.

Les moteurs « High-Efficiency » ont plus de matériaux et sont fabriqués avec plus de soins. Le supplément de coût est de l'ordre de 10 à 25 %.

En fonction de l'exploitation, il est possible d'amortir cette différence de coût sur une période plus ou moins longue par le gain de la consommation d'énergie électrique. On peut dire en général que pour un service de 4000 h/an, le supplément de coût d'un moteur « High-Efficiency » peut être compensé par l'économie d'énergie électrique sur une période de deux à trois ans.

5.4 Economie d'énergie provenant de l'électronique de puissance

Une alimentation par convertisseur peut avoir des conséquences positives et négatives sur la consommation d'énergie.

L'électronique de puissance conduit à des économies d'énergie lorsque :

- par adaptation de la fréquence et de la tension, le moteur fonctionne avec le glissement minimal et que les pertes internes sont minimales ;
- le processus peut être amélioré par l'adaptation de la vitesse aux besoins/à la demande.

Elle augmente les pertes et diminue le rendement lorsque :

- elle engendre des coupures de phases (convertisseur courant alternatif) comme alimentation de machines asynchrones (glissement réglé par la tension) ;
- elle produit des harmoniques importantes sur la tension de sortie.

La situation des pertes est aussi aggravée par les éléments suivants :

- des dissymétries dans le système d'alimentation du champ tournant : le champ contraire produit des pertes supplémentaires dans le rotor ;
- une tension d'alimentation non sinusoïdale.

Exemple :

Entraînement de ventilateur

Pour l'entraînement d'un ventilateur, on dispose soit d'un moteur asynchrone avec alimentation à vitesse variable, respectivement un convertisseur de fréquence et un moteur synchrone avec une alimentation par convertisseur électronique. La figure 43 donne, pour comparaison, les caractéristiques des pertes $P_V(n)$ de ces deux solutions. On voit que le moteur synchrone avec son alimentation engendre les pertes les plus petites.

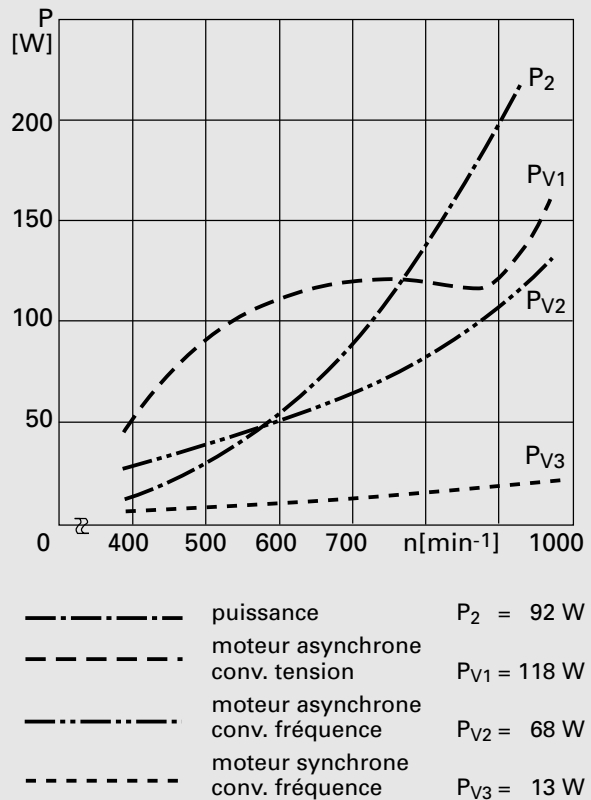


Figure 43: Comparaison d'entraînements de ventilateurs.

Exemple :

Pompe de circulation pour chauffage

Dans une installation de chauffage, la pompe de circulation fait en sorte que les radiateurs reçoivent suffisamment d'eau chaude. Les thermostats installés sur les radiateurs déterminent la quantité d'eau. La pompe fonctionne sur le principe de contrainte du débit et consomme continuellement la puissance nominale si

elle est installée directement sur le réseau et ne dispose que d'une vitesse de rotation. En plus, il peut y avoir des vibrations ou autres perturbations lorsque la vanne thermostatique est presque fermée et que la pompe insiste à fournir le débit nominal.

La solution de ce problème peut être la suivante :

- l'installation de moteurs asynchrones avec commutation de pôles ou enroulements ;
- l'installation d'un convertisseur d'alimentation du moteur asynchrone permettant de régler la vitesse afin que la différence de pression soit maintenue constante.

Les moteurs asynchrones à commutation de pôles ont des rendements mauvais et en plus ils travaillent par paliers de vitesse.

Le réglage d'un moteur asynchrone avec un convertisseur ou l'alimentation avec un convertisseur électronique d'un moteur synchrone à aimants permanents sont de bonnes solutions. Ces solutions sont déjà disponibles pour des petites puissances. Dans la pratique, il a pu être démontré qu'en moyenne, pour une pompe de 130 W installée, une pompe de 60 W était suffisante. Ainsi 360 kWh/an/installation (= 250 · 24 · 60 Wh) peuvent être économisés et cela pour 250 jours de chauffage.

5.5 Economie pour les régimes transitoires

Dans les régimes transitoires, il y a lieu de fournir à l'entraînement l'énergie nécessaire à l'accélération des masses en mouvement. La valeur de cette énergie varie comme le carré du nombre de tours/s n et est proportionnel au moment d'inertie J , elle vaut :

$$E = 1/2 \Omega^2 J = 1/2 (2 \pi n)^2 J$$

Lors de l'accélération, il se produit des pertes plus ou moins grandes dépendant du type d'entraînement et d'alimentation.

Lors du freinage, cette énergie est dissipée/disponible sous les formes suivantes :

- transformée en chaleur dans le moteur ;
- transformée en chaleur dans un frein à frottement ;
- par freinage par récupération retransmise au réseau d'alimentation.

Lors du démarrage direct d'un moteur asynchrone et lors du freinage à contrechamp, l'énergie dans le rotor est :

$$E_r = 1/2 (2 \pi n)^2 J$$

Elle est transformée en chaleur par le courant I_r du rotor. Au stator circule le courant I_s et des pertes du même ordre de grandeur sont générées. Elles produisent un échauffement important au stator. Le moteur doit supporter ces contraintes et être dimensionné en conséquence.

Ainsi l'économie d'énergie en régime transitoire peut s'énoncer ainsi :

- les masses et respectivement l'inertie des masses en mouvement doivent être aussi petites que possible ;
- les pertes complémentaires qui se produisent au moteur et à l'alimentation doivent être diminuées par
 - 1) moteur asynchrone à commutation de pôles,
 - 2) convertisseur d'alimentation des moteurs asynchrones et synchrones avec variation de la vitesse par variation tension/fréquence (fréquence pour le démarrage) et frein à récupération,
- le rapport de réduction $i = n_M/n_A$ de la transmission mécanique, pour un temps de démarrage donné T_{A_r} , conduit à un couple nominal M_N et à la grandeur du moteur minimale pour :

$$i_{opt} = \sqrt{J_A / J_M}$$

avec J_A le moment d'inertie total de la transmission au nombre de tours/s n_A et J_M le moment d'inertie du moteur et du réducteur au nombre de tours/s n_M ;

- par l'application conséquente des méthodes « système », il est recommandé de s'assurer que la conception générale est juste, que les composants sont choisis de manière optimale et que finalement l'exploitation se déroule avec des pertes minimales.

Exemple :**Entraînement avec accélération d'un grand moment d'inertie**

Un entraînement, qui doit entraîner une centrifugeuse ou une calandre dans l'industrie textile, répond par exemple aux caractéristiques suivantes :

- ✓ puissance à la vitesse maximale 4,5 kW
- ✓ gamme de vitesse 400 à 600 t/min
- ✓ moment d'inertie de la machine 415 kgm²
- ✓ puissance proportionnelle à la vitesse
- ✓ moment résistant à l'accélération croissant quadratique à 10 Nm
- ✓ exploitation par an de 6000 h
- ✓ démarrage par jour $h_A = 4$

a) Conception classique

L'entraînement se fait au travers d'un réducteur avec le rapport 1400 t/min : 600 t/min. Les changements de vitesses se font par échange d'engrenages. Pour le moteur asynchrone d'exécution spéciale, les caractéristiques sont les suivantes :

puissance nominale P_N	:	11 kW
couple démarrage M_A	:	140 Nm
courant de démarrage I_A	:	150 A (à 380 V)
vitesse nominale n_M	:	1440 t/min
rendements η	:	88% à 11 kW
η	:	85% à 4,5 kW
η	:	78% à 3 kW
résistance R_{ph}	:	0,84 ohm (froid)
moment d'inertie	:	72 kgm ² (axe)

On obtient :

un temps de démarrage de :

$$t_A = \frac{J \cdot n}{9,55 M_A} = 77,5 \text{ s}$$

les pertes suivantes :

- pertes stator

$$E_{Vst} = 3 \cdot I_A^2 \cdot R_{ph} \cdot t_A = 1,031 \text{ kWh}$$

- pertes rotor

$$E_{Vro} = \frac{J \cdot n^2}{183} = 0,2266 \text{ kWh}$$

- pertes au démarrage

$$E_V = E_{Vst} + A_{Vro} = 1,258 \text{ kWh}$$

et une consommation annuelle de

$$E_{Van} = z \cdot E_V = h_A \cdot \text{jour} \cdot E_V = 1509 \text{ kWh}$$

b) Conception moderne

On emploie un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur. Les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ puissance de démarrage P : 7,5 kW
- ✓ couple d'accélération M_B : 48 Nm
- ✓ puissance nominale P_N : 4,5 kW
- ✓ courant de démarrage I_A : 17,5 A (380V)
- ✓ plage de variation vitesse : 1200 à 1800 t/min
- ✓ rendement η : 86% à 7,5 kW
- η : 84,5% à 4,5 kW
- η : 83% à 3 kW
- ✓ facteur de puissance $\cos \varphi$: 0,86
- ✓ moment d'inertie J : 46,1 kgm² (axe)

On obtient :

un temps de démarrage de

$$t_A = \frac{J \cdot n}{9,55 M_B} = 181 \text{ s}$$

l'équivalent des pertes moteurs de

$$E_V = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta) = 0,3852 \text{ kWh}$$

et une somme des pertes annuelles de démarrage de :

$$E_{Van} = z \cdot E_V = 462,3 \text{ kWh}$$

c) Evaluation

Par l'emploi d'une alimentation avec convertisseur, l'accélération des masses permet une économie d'environ 70% ou 1047 kWh par an. La charge du moteur à l'accélération est limitée et conduit de ce fait à une augmentation de sa durée de vie. Mais cela avec des coûts supplémentaires.

Exemple :**Economie d'énergie dans le transport de personnes et de charges**

Les ascenseurs et les monte-charge se déplacent normalement à une vitesse de 2,0 m/s et sont entraînés par des moteurs asynchrones à commutation de pôles. En régime constant/permanent le moteur fonctionne avec le couplage correspondant au nombre de pôles inférieur. Dans la phase d'arrêt, il fonctionne avec le nombre de pôles élevé. Pour améliorer le confort pendant le déplacement ainsi que la précision d'arrêt, on lui ajoute une inertie complémentaire J_z sur l'axe du moteur.

La solution avec des moteurs à commutation de pôles est, du point de vue énergétique, défavorable. La demande d'énergie est de quelques fois supérieure au besoin en régime constant/permanent, parce que lors de l'accélération et du freinage l'énergie nécessaire aux masses en mouvement et en rotation est aussi transformée en chaleur dans le moteur asynchrone. Aussi, en régime permanent, les pertes sont relativement importantes avec le choix de ce type de moteur étant donné la forme de la fonction « vitesse-couple ». En régime permanent, le glissement est élevé et les pertes importantes. Pour l'arrêt, on fait appel à un frein mécanique.

Avec la solution du réglage de la vitesse par commutation et du freinage par courant continu, il est possible d'utiliser des moteurs conventionnels à commutation de pôles. La vitesse est variable, l'inertie supplémentaire peut ainsi être enlevée.

La situation énergétique n'est cependant pas encore grandement améliorée parce que l'entraînement est alimenté à une fréquence fixe, la fréquence du réseau.

Ce réglage de la vitesse n'influence que la tension d'alimentation du moteur et non la fréquence de synchronisme du moteur. Pour obtenir le freinage, le nombre de pôles supérieur est commuté et il est alimenté en courant continu. Dans ce cas, la machine électrique se comporte comme un frein de « Foucault ».

L'alimentation par convertisseur avec variation de la fréquence/tension et freinage par récupération est la solution énergétique la meilleure. Dans ce cas, seules l'énergie potentielle et la compensation des frottements sont à fournir par l'entraînement. La consommation d'énergie peut ainsi être réduite au tiers de ce qu'elle était pour les autres solutions. Cependant avec cette solution, les questions de bruit et de surcharge sont à résoudre. Elles peuvent en limiter l'application.

Malgré le fait que cette solution permette l'emploi d'un moteur normalisé plus petit, le coût du convertisseur est tel que son application n'est pas encore économique pour des puissances plus petites que 10 kW.

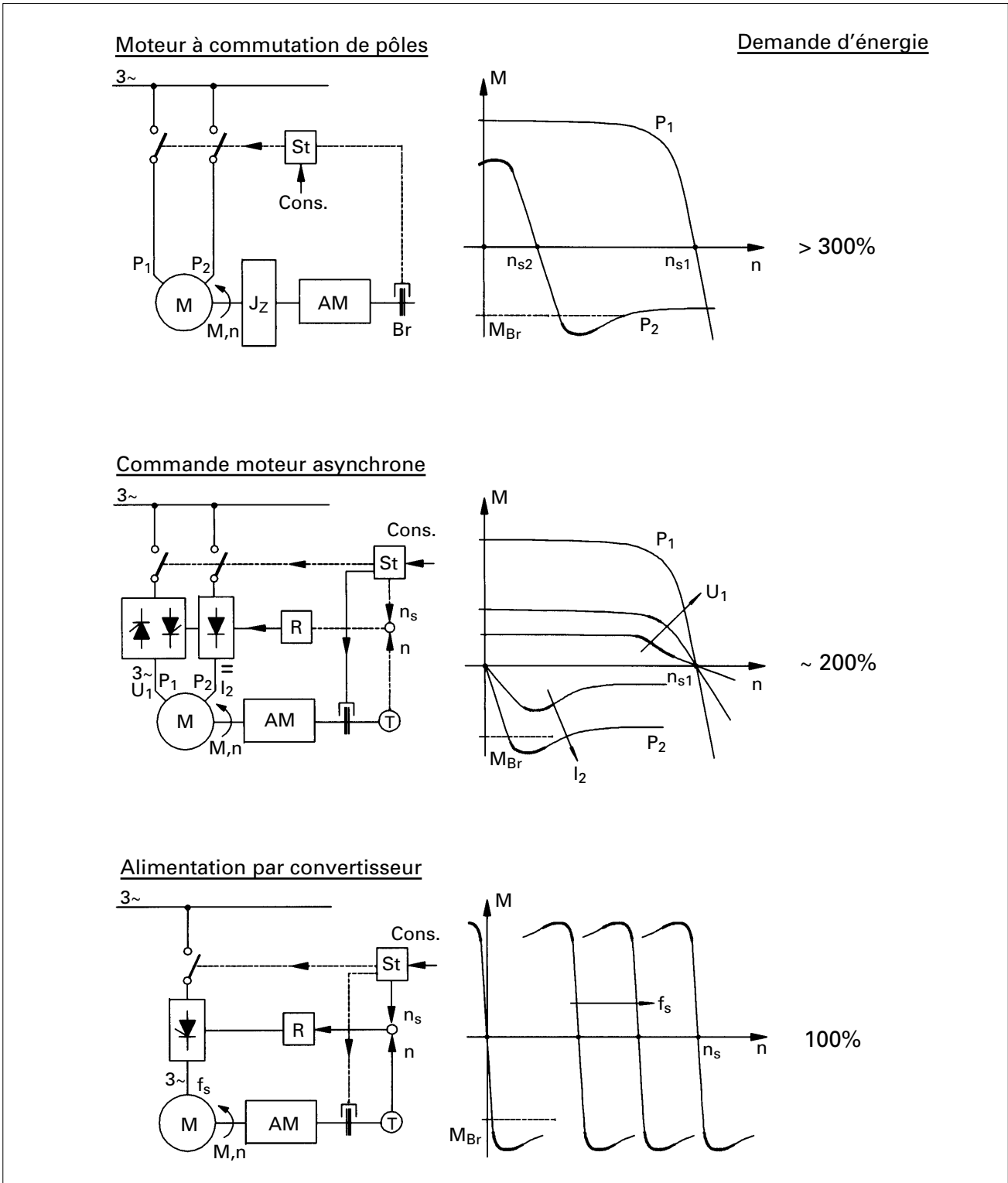


Figure 44: Consommation d'énergie du processus.

5.6 Liste de contrôle

Priorités lors du dimensionnement

1. Adapter la durée d'exploitation aux besoins.
2. Adapter la puissance aux besoins.
3. Utiliser des moteurs et des éléments de transmission avec le meilleur rendement.
4. Améliorer la consommation d'énergie du processus.

Contrôles

A) Comment le moteur sera-t-il chargé par la machine/processus et les conditions d'ambiance ?

1. Type de charge : permanent, transitoire ? type d'exploitation ? durée d'exploitation ?
2. « Grandeurs » : couple de charge M_L (n), moment d'inertie, variation de charge M_L (t), demande effective de puissance, temps effectif d'exploitation ?
3. Exigences de la commande et du réglage : vitesse, couple, fonctionnement sur plusieurs quadrants, freinage, adaptation à l'exploitation ?
4. Conditions d'environnement : réseau électrique, température ambiante ?

B) Comment est fait le couplage avec la machine/processus ? Un réducteur est-il nécessaire ?

1. Optimiser le rapport de réduction ? adaptation au moteur ? un accouplement direct est-il nécessaire et possible ?
2. Type de réducteur et son rendement ?

C) Quel moteur doit être utilisé et comment le définir ?

1. Type de moteur, commande, alimentation, démarrage, convertisseur ?
2. Détermination du moteur (puissance, vitesse, couple) et contrôle de son dimensionnement pour les conditions d'exploitation (durée, enclenchement).
3. Pertes, rendement, consommation d'énergie ?
4. Coût de l'installation, amortissement, coût énergétique ?

D) Comment peut-on améliorer la consommation d'énergie du processus ?

1. Valeurs et nécessité des masses en mouvement ?
 2. Possibilités de récupération d'énergie mécanique, chimique et de chaleur ?
 3. Réglage et commande, conduite, possibilité d'une exploitation discontinue ?
 4. Contrôler la demande/consommation d'énergie à vide.
-

6. Amélioration de l'exploitation des entraînements sur- et sous-chargés

Important !

- Le rendement des machines électriques est dépendant de la charge. Il croît avec la grandeur du moteur et diminue en charge partielle.
- La perte de rendement en cas de charge partielle, qui provient en majeure partie du fait de la prise en compte de marges de sécurité lors de la définition de l'entraînement, peut être compensée par des mesures précises à la commande.
- En se basant sur des considérations conséquentes de durée de vie, la température des enroulements peut dépasser la valeur limite donnée par la classe d'isolation et cela pendant un certain temps, en vue d'une meilleure utilisation du moteur.

6.1 Les moteurs normalisés en charge partielle

Les constructeurs de machines sont clairement intéressés à avoir des moteurs utilisés au maximum de leurs performances, ce qui représente un avantage vis-à-vis de la concurrence.

Un entraînement chargé partiellement conduit aux conséquences économiques suivantes :

- un mauvais comportement énergétique du fait de la réduction du rendement et du facteur de puissance, et souvent aussi par la réduction du rendement de la machine entraînée, comme pour les pompes et les ventilateurs ;
- la réduction du facteur d'utilisation du moteur d'entraînement et de la machine correspond également à du gaspillage de matériel et de volume.

6.1.1 Considération économique-énergétique du comportement des moteurs asynchrones en charge partielle

Un régime à charge partielle intervient en général lorsque les régimes d'exploitation l'imposent. Il est cependant admis que le moteur est adapté avec précision à sa charge maximale.

L'exploitation en régime de charge partielle peut aussi provenir d'exigences demandées au moment de la définition du moteur. Par exemple, l'entraînement d'une pompe à sa puissance nominale exige un moteur qui, pour des raisons de sécurité, de normes ou de discontinuité dans le catalogue les grandeurs normalisées, est équipé d'un moteur trop grand.

Il est aussi possible que la pompe, pour rester à cet exemple, soit choisie trop grande pour le débit demandé. Le fonctionnement en charge partielle agit alors sur la pompe et le moteur et, de ce fait, doublement sur le moteur.

On peut considérer en fin de compte que dans l'ensemble des branches de l'industrie, les moteurs normalisés avec une puissance inférieure à 100 kW sont, du point de vue de la charge, relativement mal utilisés, cf. tableau 1.

Ainsi, il est démontré sur la base de l'entraînement d'une machine d'impression textile (voir figure 2, tableau 3 et figure 4) que non seulement la sous-charge, mais aussi le facteur de puissance, ainsi que l'évolution dans le temps de la charge sont à considérer. L'analyse, en connaissance de cause, de la machine/processus demande des évaluations aux différents régimes et cela afin de maîtriser complètement la situation énergétique.

En fonction des vues précédentes concernant les moteurs normalisés et la disponibilité de logiciel d'aide, il devrait être possible d'améliorer la qualité des projets et de tirer conséquence des fonctionnements en charge partielle. En même temps, il faut faire le nécessaire afin que les éléments de base concernant le choix des moteurs normalisés soient disponibles et appliquer la nouvelle norme IEC S10 définissant de fonctionnement type à charge variable. Cela permettra d'avoir des moteurs normalisés qui ont une meilleure utilisation et un meilleur comportement énergétique.

6.1.2 Le rendement et le facteur de puissance en fonction de la charge

Le rendement du moteur est le rapport de la puissance mécanique P fournie à la puissance électrique absorbée au réseau $P_{rés}$:

$$\eta = \frac{P}{P_{rés}} = \frac{P}{P + Pertes_{tot}}$$

est par une fonction partielle du courant aux pertes totales $Pertes_{tot}$, dépendant de la charge.

Il est important pour évaluer le mauvais comportement énergétique en charge partielle de connaître les éléments de base qui sont valables dans tous les cas.

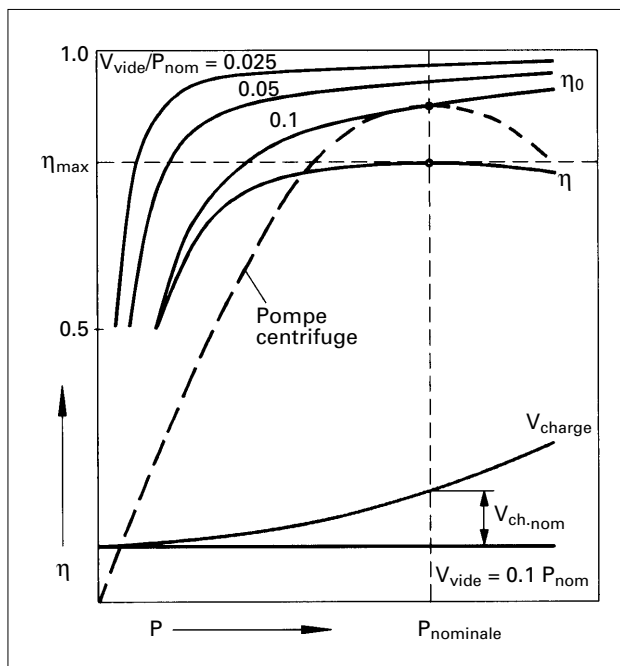


Figure 45: Variation du rendement pour différents rapports pertes à vide/ P_N .

La figure 45 montre pour différents rapports de pertes à vide $Pertes_{vide}$, composées des pertes fer, des frottements et des pertes par courant à vide, à la puissance nominale P_N . Pour différentes charges, les courbes de rendements désignés par η_0 .

Si l'on considère les pertes en charge $Pertes_{ch}$, lesquelles sont en première approximation des pertes « Joule », c'est-à-dire proportionnelles au carré de la puissance P , $Pertes_{ch} = Pertes_{chN} (P/P_N)^2$, il existe, pour un rapport de pertes choisi, une caractéristique de rendement $\eta (P)$. Les rendements des différents moteurs sont influencés dans leur caractéristique $\eta (P)$ seulement par les rapports entre puissance nominale, puissance à vide et les pertes en relation avec la charge. En général, le rendement est toujours maximum pour $Pertes_{vide} = Pertes_{ch}$, comme montré à la figure 45. Dans ce cas, le rendement est maximum au point de puissance nominale.

Lors de la construction du moteur, il est possible d'influencer le point de l'égalité $Pertes_{vide} = Pertes_{ch}$. Dans l'optique du fonctionnement très fréquent en charge partielle, il y a lieu de placer cette égalité au-dessous de la puissance nominale.

En relation avec la diminution de rendement en charge partielle, les pompes et les ventilateurs sont très critiques, parce que la chute de rendement en charge partielle est importante, comme le montre la figure 45 pour une pompe centrifuge.

La réduction de rendement, jusqu'à 50% de charge partielle, est encore relativement faible. Plus importante est la chute du facteur de puissance $\cos \phi$. Cette valeur est très influencée par la valeur du courant de magnétisation, dans le cas d'un moteur asynchrone.

L'importance économique de cette réduction peut justifier l'adjonction d'un condensateur, nécessaire à la fourniture d'énergie réactive ou par l'augmentation des tarifs de consommation dans de telles circonstances.

6.1.3 Lois de similitudes et charges partielles pour les moteurs asynchrones normalisés

Comme le montre la figure 46, le rendement selon la loi de similitude est fonction de la puissance du moteur. Cela est valable aussi bien pour la valeur du rendement $\eta_{1,0}$ pour la charge nominale $P_N = 100\%$, que pour la valeur $\eta_{0,5}$ pour la charge partielle correspondant à la puissance $P_N = 50\%$. Pour l'utilisation de moteurs avec l'optique d'économie d'énergie, deux tendances contraires sont à considérer :

- l'augmentation du rendement avec la « grandeur » du moteur ;
- la réduction du rendement à charge partielle.

Ces tendances contraires peuvent, lors de l'installation d'un moteur relativement grand, conduire à un comportement énergétique défavorable. Alors que pour des puissances plus petites (< 50 kW), l'installation d'un moteur surdimensionné, utilisé en charge partielle, peut être plutôt favorable.

Dans les figures 46 et 47, il est montré par des flèches qu'à la demi-charge d'un moteur le rendement $\eta_{0,5}$ peut être plus grand que le rendement $\eta_{1,0}$ d'un moteur plus petit choisi pour fonctionner exactement à la charge nominale.

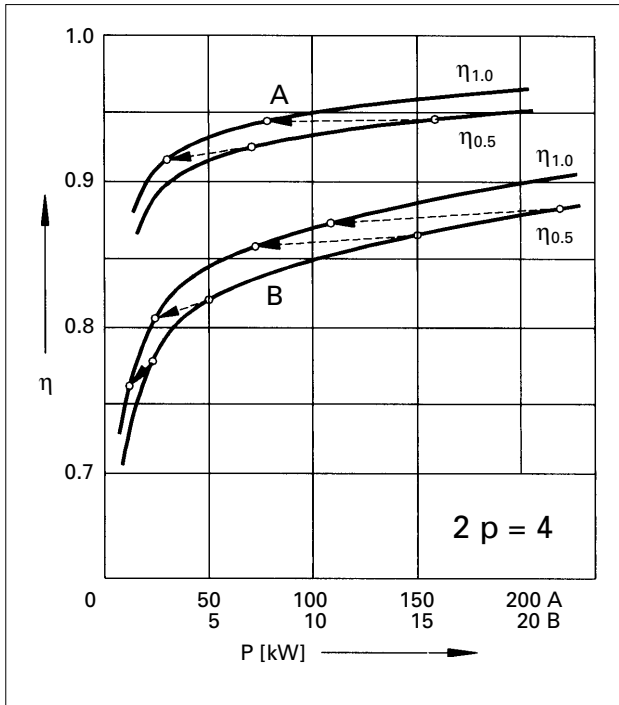


Figure 46: Rendement à pleine charge et à demi-charge.

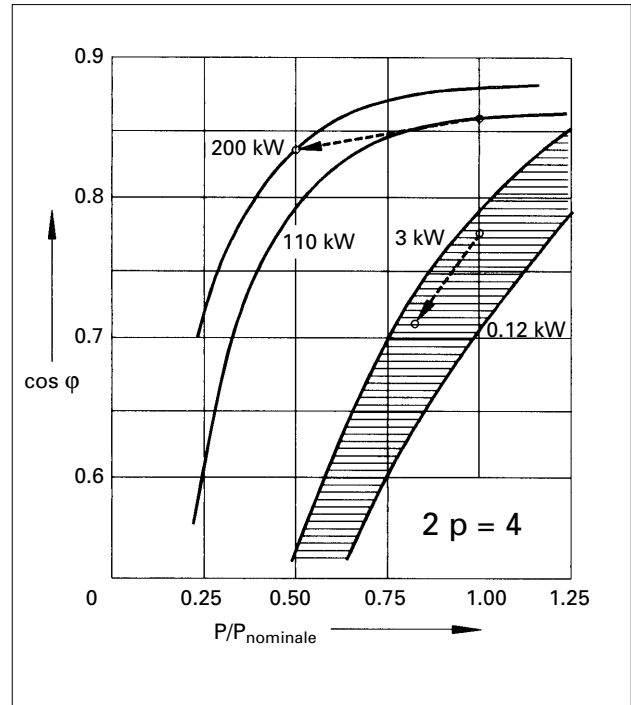


Figure 48: Facteur de puissance en fonction de la puissance.

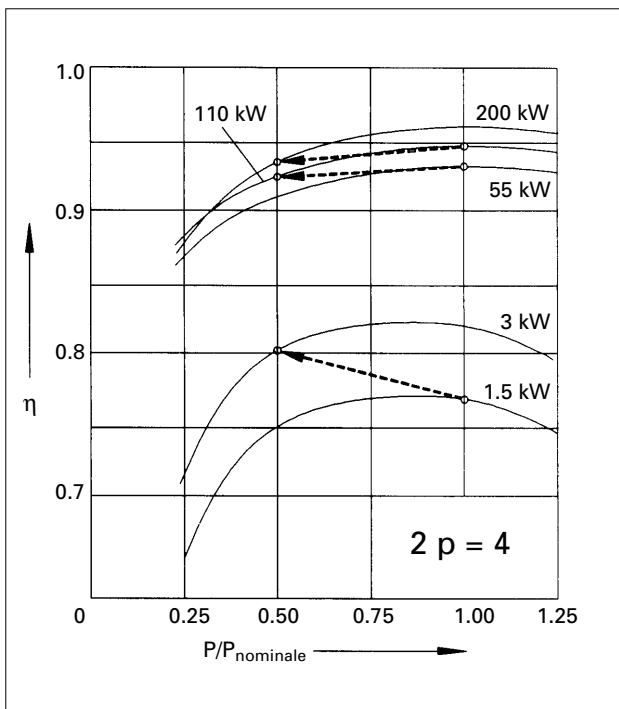


Figure 47: Rendement en fonction de la puissance.

En résumé, on peut dire qu'un moteur défini de manière favorable n'apporte pas de conséquences marquantes défavorables en fonctionnement en charge partielle.

L'optimum de la définition d'un entraînement est donné par des outils modernes de conception. En ce qui concerne le facteur de puissance $\cos \varphi$, le fonctionnement à charge partielle conduit à un comportement énergétique défavorable, alors que là aussi les lois de similitudes vont en sens contraire (figure 47).

6.1.4 La valorisation économique du rendement et du facteur de puissance

Pour le calcul du coût d'exploitation en charge partielle, les paramètres énergétiques (rendement et facteur de puissance) sont à prendre en considération pour la définition du tarif.

Pour la valorisation économique des améliorations d'augmentation des performances énergétiques, il faut prendre en considération :

- les moteurs normalisés modifiés pour un meilleur rendement;
- les installations de moteurs qui supportent des surcharges importantes;
- les condensateurs pour la compensation d'un facteur de puissance faible;
- l'installation de moyens de surveillance de la durée de vie lors d'exploitation avec des surcharges;
- la commutation étoile-triangle;
- la commande par coupure de phase adaptatif, pour diminuer les pertes.

Ceci devrait conduire à valoriser les investissements consentis.

6.2 Mesures pour améliorer l'utilisation d'entraînements sous-chargés

6.2.1 Généralités

Pour une machine asynchrone sous-chargée, les pertes indépendantes de la charge sont importantes, comme les pertes fer et les pertes par frottements, par rapport aux pertes «Joule» dans les enroulements. A cause de cela, la machine en charge partielle fonctionne avec un rendement médiocre.

Une amélioration de la situation peut être obtenue par:

- une diminution de la tension d'alimentation et ainsi des pertes fer qui varient approximativement avec le carré de la tension;
- une réduction de la fréquence d'alimentation et ainsi des pertes fer qui varient avec le carré de la fréquence;
- une réduction de la vitesse et ainsi des pertes par frottement et des pertes supplémentaires au rotor plus faibles.

Ces mesures peuvent modifier de différentes manières les conditions d'exploitation.

Le couple d'une machine asynchrone est proportionnel au carré du rapport de la tension et de la fréquence d'alimentation.

Une variation de la tension d'alimentation à fréquence constante est montrée à la figure 49.

Le graphique montre aussi une variation de la vitesse provoquée par des points de fonctionnement différents sur les caractéristiques couple-vitesse pour différentes valeurs de la tension d'alimentation et une charge identique.

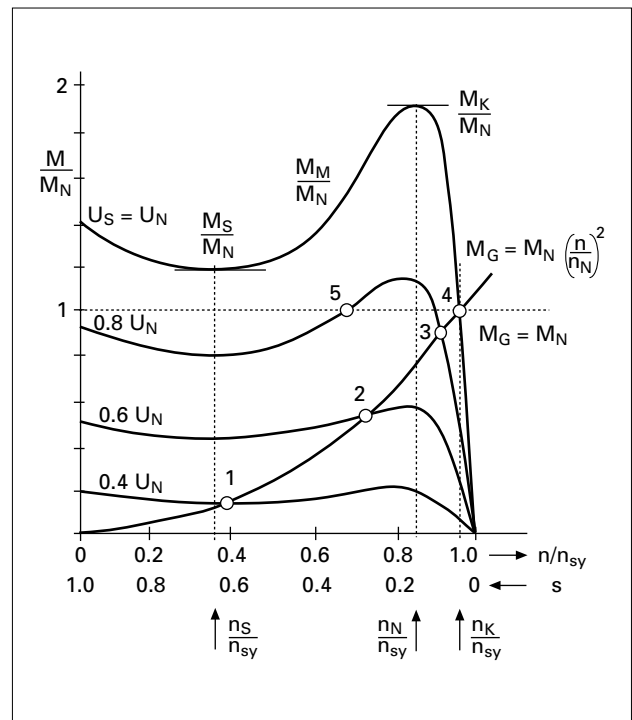


Figure 49: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone, points de fonctionnement 1, 2, 3, 4 stables et 5 instables pour M_L proportionnel n^2 pour $M_L = \text{constant}$.

Dans ce cas, le danger d'instabilité de la machine asynchrone existe; cela veut dire le retour à l'arrêt et le déclenchement du contacteur du moteur, si la condition de stabilité

$$\frac{\partial M}{\partial n} < \frac{\partial M_L}{\partial n}$$

n'est pas réalisée.

Ainsi par une commande de la tension d'alimentation, les plages de réglage suivantes sont stables (figure 50):

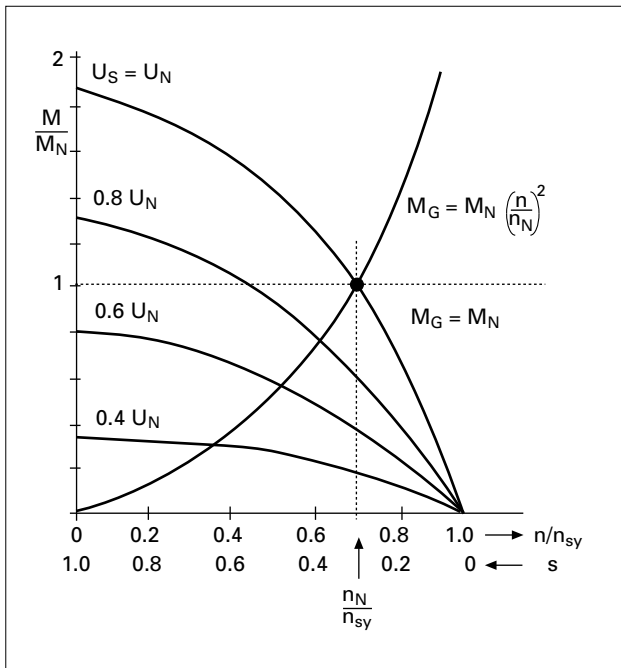


Figure 50: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone avec résistance au rotor en variant la tension du stator
 dans la plage: $0 < n < n_N$
 dans la plage: $0 < n < n_S$
 dans la plage: $n_K < n \leq n_N$.
 avec n_N la vitesse nominale
 n_S la vitesse en charge et
 n_K la vitesse de décrochement.

La plage entre $0 < n \leq n_S$ n'a pas de grande signification pratique. Elle n'est utilisée qu'au démarrage uniquement, à cause du grand courant.

Si en cas d'une alimentation avec une tension partielle, la machine asynchrone fonctionne avec un grand glissement, le facteur de puissance est alors faible. Ainsi, en plus des pertes élevées au rotor, il y a aussi des pertes supplémentaires au stator et dans la ligne.

Par une augmentation de la résistance électrique du rotor, il est possible d'améliorer le comportement de la machine asynchrone commandée à tension partielle. La résistance électrique du rotor est choisie de façon à ce que le couple de décrochement se

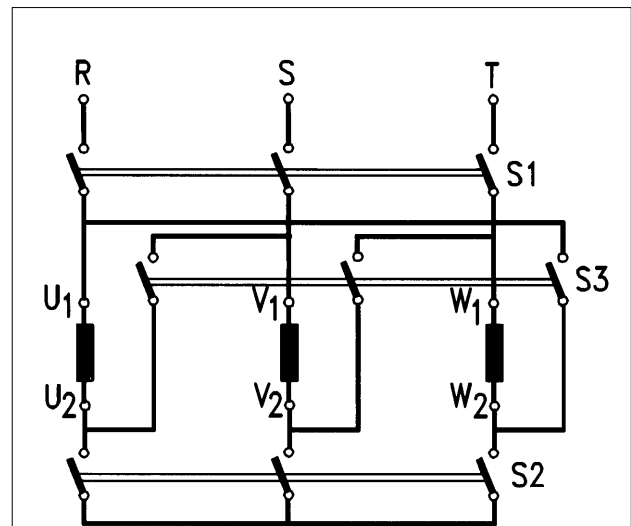
trouve pour $s_K > 1$. La figure 50 montre que pour une charge constante, le point de fonctionnement est stable.

Un autre avantage de la résistance élevée du rotor est l'amélioration du facteur de puissance en commande par tension partielle et aussi la diminution des pertes au stator. L'inconvénient est le plus grand glissement à tension nominale qui conduit à de plus grandes pertes au rotor.

Lors d'un changement de la fréquence, la vitesse varie aussi. Le couple reste constant lorsque la variation de la tension est proportionnelle à la fréquence, de manière que le flux magnétique reste constant.

6.2.2 Mesures pour améliorer l'utilisation

1) Commutation étoile-triangle



λ/Δ - connection	Position du commutateur		
	S1	S2	S3
0	0	0	0
λ	1	1	0
Δ	1	0	1

Figure 51: Commutation étoile-triangle.

Lors de la commutation étoile, selon figure 51, les tensions aux bornes des enroulements se trouvent dans le rapport de $1/\sqrt{3}$ plus petites que lors du couplage normal en triangle. Ainsi, le couple de la machine est un tiers plus petit que lors du fonctionnement en triangle. A charge égale, le glissement et le courant augmentent et les pertes aussi évidemment. Ainsi, le fonctionnement en étoile d'une machine prévue en triangle n'a de sens que si :

- la machine est à tel point sous-chargée qu'elle est aussi stable avec le couplage étoile ;
- la réduction du courant de démarrage est nécessaire ;
- une commande « intelligente » permet, par la mesure des pertes, de choisir la solution avec pertes minimales.

Une commutation étoile-triangle conduit à une réduction du courant de démarrage lorsque l'on fait attention aux caractéristiques couple-vitesse de la machine et de la charge. A la figure 52, deux exemples sont indiqués :

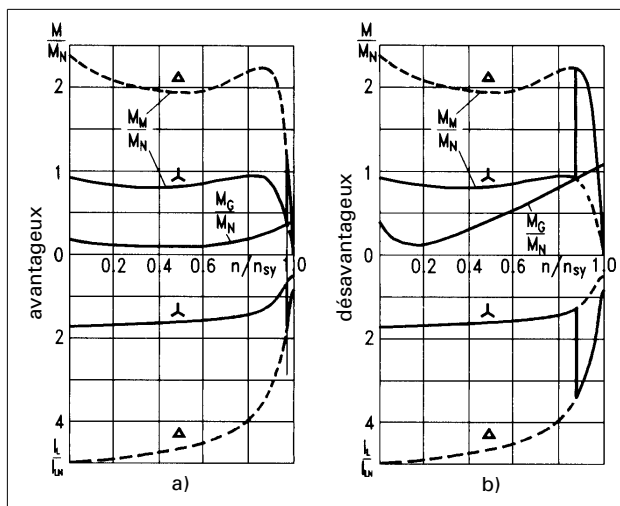


Figure 52: Commutation étoile-triangle: a) avantageux b) désavantageux.

Valorisation des solutions a) et b) :

- a) $M/M_N = 2,3$ $I/I_N = 3,0$
- b) $M/M_N = 1,6$ $I/I_N = 1,9$

En considérant le couple et la pointe de courant à la commutation, il apparaît que la solution b) est meilleure ; elle représente une plus faible charge de la machine.

2) Commande par coupure de phases

Lors de l'alimentation par coupure de phase, le courant est coupé par des circuits à semi-conducteurs (thyristors, triacs) antiparallèles dans chacune des phases de la tension d'alimentation. Cela permet de réduire la tension sans changer la fréquence. Approximativement, les courants se réduisent linéairement et le couple de façon quadratique avec la tension. Le moteur peut donc s'adapter à la charge.

Ce système de commande n'est cependant pas sans problèmes :

- le moteur alimenté avec une tension présentant des distorsions importantes aura aussi des pertes supplémentaires ;
- en fonctionnement, il peut apparaître des oscillations.

Aussi, ce type de commande n'est utilisé quasi exclusivement que pour diminuer le courant de démarrage, le couple de démarrage et les pertes au démarrage. La condition pour cela est une faible inertie totale et un faible couple résistant.

A la figure 53 sont représentées les caractéristiques couple-vitesse et débit-temps pour l'enclenchement à pleine tension (CTN) et commande à coupure de tension (CCT) (Halbleiterstarter) :

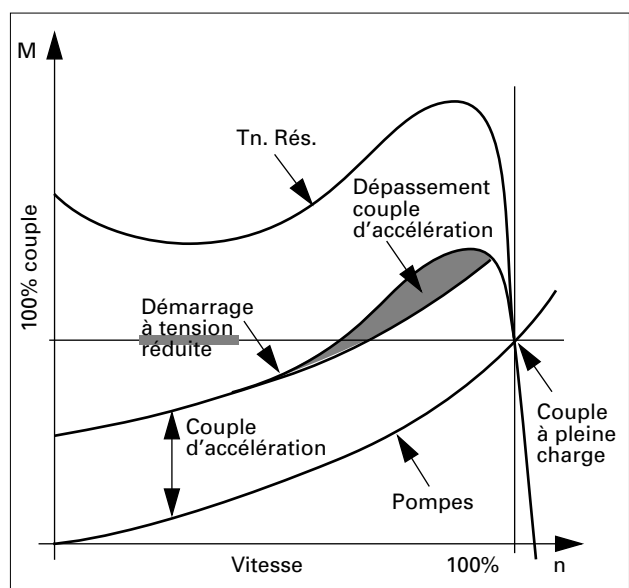


Figure 53: Caractéristiques couple-vitesse à pleine tension, réseau et tension réduite.

Lors d'une application CCT, la tension est augmentée avec une rampe permettant d'atteindre la pleine tension, cela conduit aussi à une augmentation lente du couple du moteur. A la fin de la rampe, étant donné la nature de la caractéristique de la machine asynchrone, une brusque variation du couple apparaît et avec elle un choc à la pompe, type coup de bélier.

3) Commande intelligente

Avec un réglage par coupure de phase d'alimentation, c'est-à-dire réduction de la tension, il est possible de limiter le couple d'accélération en régime non stationnaire et respectivement le couple en régime stationnaire et de l'adapter à la demande. Il n'y a de ce fait pas de variation par à-coups du couple et cela évite, ou tout au moins réduit dans le cas des pompes, des coups de bélier et autres bruits.

Pour des entraînements sous-chargés, cette variation de la tension permet une réduction des pertes. La figure 54 montre les mêmes caractéristiques que celles de la figure 53 dans le cas de l'utilisation du réglage « intelligent ».

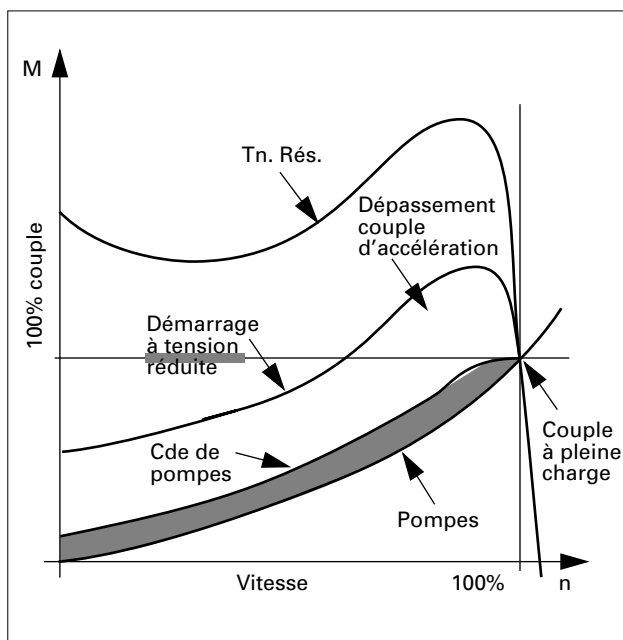


Figure 54: Caractéristiques couple-vitesse pour tension nominale permanente; tension réduite (CCT); réduction de tension réglée.

4) Moteurs asynchrones à commutation des pôles

Par la commutation des pôles, il est possible d'adapter la vitesse au besoin. La commutation des pôles pour une machine asynchrone, solution courante de variation de la vitesse, se base sur une variation du flux d'entrefer par commutation d'enroulements ou d'alimentation et ainsi de la vitesse synchrone. La figure 55 représente les exécutions les plus courantes.

Nombre de pôles	Nombre de tour pour 50 Hz en t/min	Nombre d'enroulements au stator	Connection
4-2	1500-3000	1	$\Delta/\lambda\lambda$
8-4	750-1500	1	$\Delta/\lambda\lambda$
12-6	500-1000	1	$\Delta/\lambda\lambda$
6-4	1000-1500	2	$\lambda-\lambda$
8-4-2	750-1500-3000	2	$\lambda-\Delta/\lambda\lambda$
8-6-5	750-1000-1500	2	$\Delta/\lambda\lambda$
12-8-6-4	500-750-1000-1500	2	$\Delta/\lambda\lambda-\Delta/\lambda\lambda$

Figure 55: Différents types de commutation.

Les moteurs asynchrones à commutation de pôles sont bien adaptés à l'entraînement d'organes tels que les ascenseurs, les ventilateurs et les pompes lorsque les régimes d'exploitation se contentent d'un petit nombre de différentes vitesses. En comparaison avec la solution du convertisseur, cette solution est favorable même si le moteur est en général mal utilisé.

Un passage du régime nominal à une vitesse réduite par commutation conduit à un fonctionnement en génératrice – frein jusqu'à ce que le nouveau régime correspondant au nombre de pôles soit atteint.

Exemple :

Entraînement de ventilateur

En tenant compte du fait que la relation entre la demande de puissance et la vitesse est dans le rapport du cube du débit, dans le cas d'un ventilateur, et qu'une demande de puissance à la vitesse maximale est de 7,5 kW, les différents rendements de l'entraînement par convertisseur de fréquence et par réglage du glissement donnent les résultats suivants (tableau 56) :

Vitesse t/min	Demande de puissance kW	Rendement	
		n_{rg} [%]	n_{rf} [%]
1500	7,5	82	83
1000	2,3	60	77
750	1,0	45	71

n_{rg} = n réglage par glissement
 n_{rf} = n réglage par variation de fréquence

Tableau 56: Comparaison des rendements pour 2 principes de réglage.

En utilisant un moteur à commutation de pôles en couplage « Dahlander » avec deux vitesses dans les rapports de 1:2 ou avec deux enroulements séparés dans le rapport de 1:1,5, respectivement un moteur avec trois commutations de pôles avec deux/trois enroulements séparés, nous obtenons les résultats explicités à la figure 57.

On reconnaît que la commutation de pôles selon le couplage « Dahlander » est, du point de vue rendement, la meilleure solution.

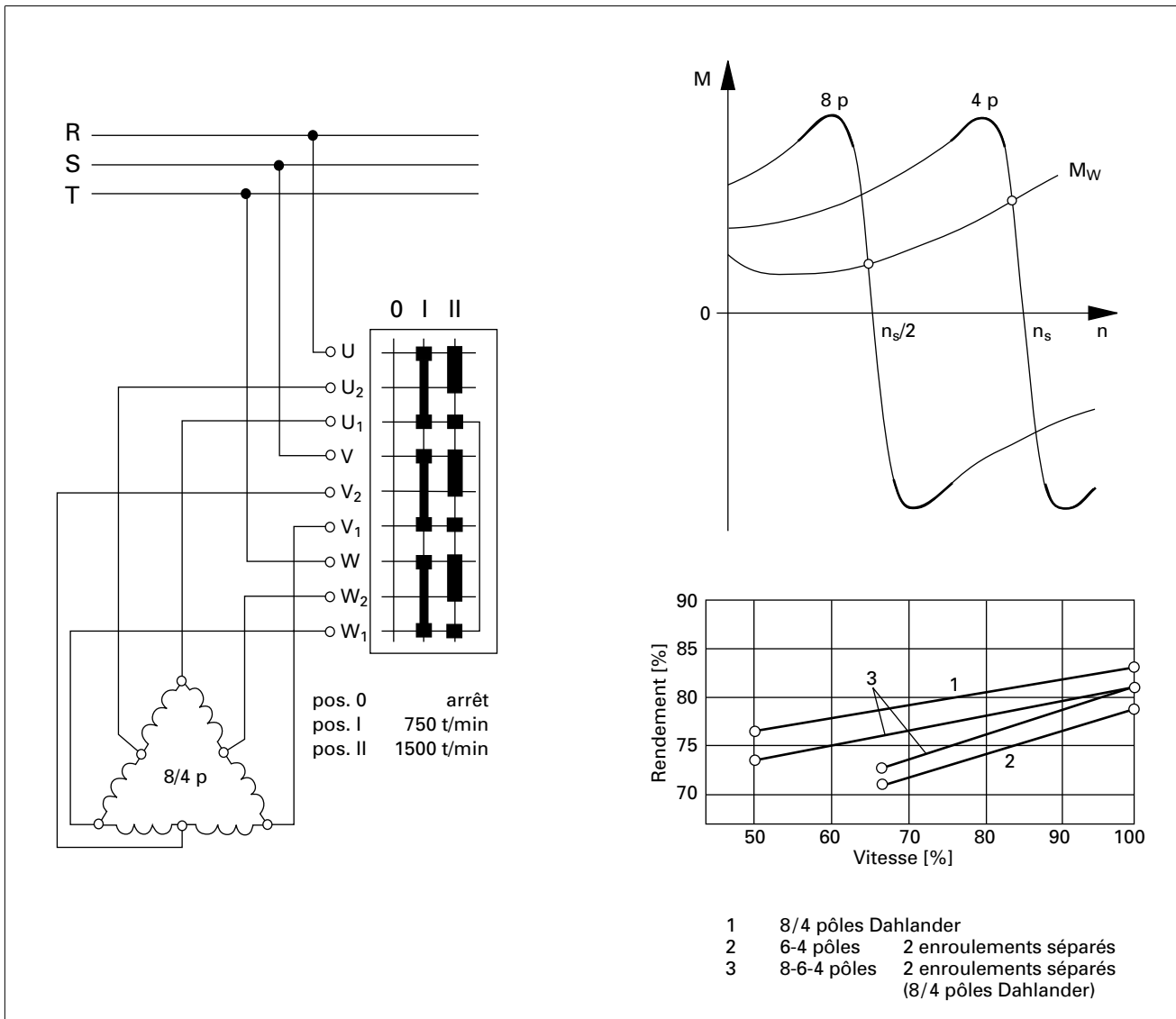


Figure 57: Caractéristique couple-vitesse pour machine asynchrone en couplage « Dahlander ».

6.3 Mesures pour améliorer le comportement d'entraînements surchargés

Les entraînements sous-chargés résultent de la crainte par les projeteurs et les exploitants de régimes d'exploitation en surcharge. Cette surcharge représente dans le sens des règles de conduite du projet un dépassement de la température tolérée pour les enroulements pendant un temps plus ou moins long. Cela représente, dans les faits, une réduction de la durée de vie des enroulements. Celle-ci est de 100 000 heures, garantie par les constructeurs de moteurs.

Ces données à « caractère rigide » de la température admissible des enroulements et de la garantie de la durée de vie, ne sont pas raisonnables dans un processus technique de dimensionnement et d'installation de composants techniques. Pour un réducteur, par exemple, la durée de vie est donnée en connaissant les lois de vieillissement ainsi que les processus d'usure dans le réducteur. S'il en est autrement pour les machines électriques, cela provient du fait que pour l'isolation des enroulements et la construction des machines électriques, les isolations sont classées par groupe de températures. Cette normalisation par classe sera remplacée par le IEC (International Electrotechnical Comitee) par un classement par « système ».

Ainsi, un premier pas a été fait conduisant à remplacer la tenue thermique des enroulements par des données sur la durée de vie et d'accepter une température des enroulements qui, dans la majorité des cas, peut être supérieure à la température de la classe d'isolation. Cependant, il y a lieu de considérer les deux limites suivantes :

- Une valeur maximale de la température ne doit pas être dépassée, parce qu'au-delà de certaines températures, des dégâts irréversibles pourraient avoir lieu qui endommageraient les enroulements par détérioration de la laque d'isolation.
- Les autres composants du moteur, sensibles aux contraintes thermiques, doivent également être contrôlés afin que la température maximale atteinte soit acceptable. Exemple pour le ventilateur, les paliers, les conduites et les joints.

Un projet orienté « durée de vie » devrait être fait en parallèle avec la démarche conventionnelle, ceci afin

de pouvoir évaluer les gains économiques et d'en discuter avec le constructeur. Aussi, nous allons présenter les moyens ou outils de cette méthode.

La relation entre la température de l'enroulement du moteur T et la durée de vie est la suivante :

$$L = Ae^{-B/T}$$

avec A, B = constantes de l'isolation utilisée.

Cette loi tient compte du particulier des matériaux isolants et de leur comportement en température. La suite de la méthode tient compte d'une perte de

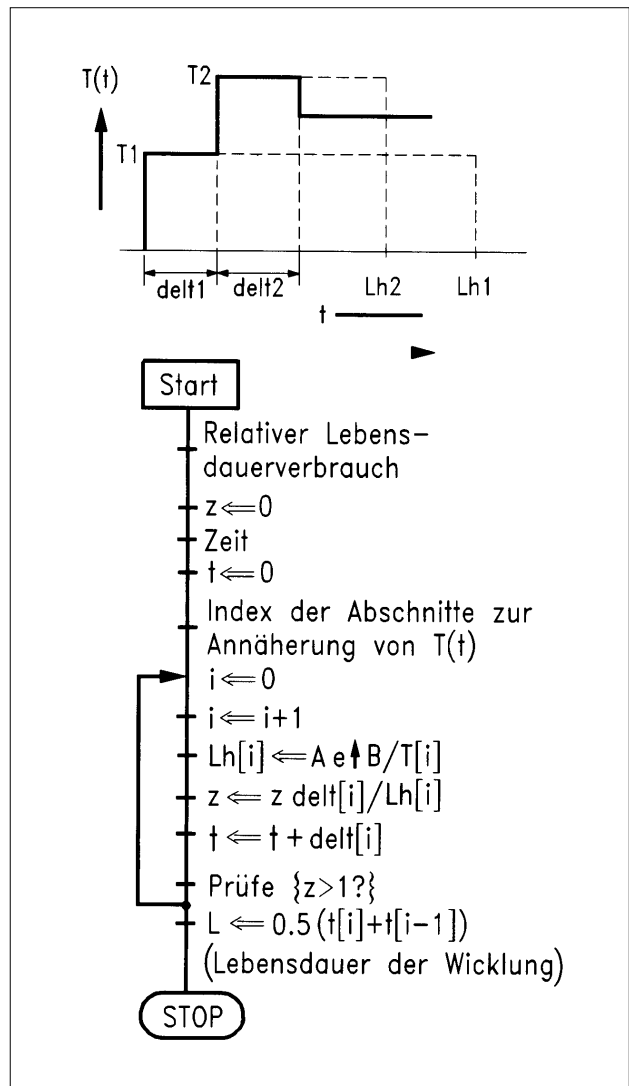


Figure 58: Algorithmme de détermination de la durée de vie.

masse, d'une augmentation de la porosité et d'une perte de résistance par rapport à la tension appliquée. La figure 58 donne un algorithme de la méthode. Elle fait apparaître au rythme des charges la température en fonction du temps et ainsi la durée de vie qui en découle. La température T_1 , qui conduit à une durée de vie de L_{h1} , est atteinte seulement pendant une certaine période et n'affecte la durée de vie de $1/L_{h1}$ que pour cet intervalle. Cette appréciation doit être faite pour tous les régimes. A la fin, on arrive à avoir entièrement consommé la durée de vie de l'isolation; c'est le point auquel le moteur devrait être hors d'usage.

La désignation « intelligente » de la protection du moteur se base sur une fonction de la probabilité de la durée de vie pour trouver l'âge de l'enroulement.

Dans le cas de la méthode de projection basée sur la durée de vie, on prend en compte le fait cyclique de la charge et son retour possible, comme le montre la figure 59. Ce cycle est à faire en fonction d'intervalles de temps dans lesquels il faudra apporter beaucoup d'attention à ceux qui ont des températures élevées. Le calcul de la durée de vie se trouve par la formule

$$L = \sum_i L_h [i] \cdot \frac{\text{delt} [i]}{T_s}$$

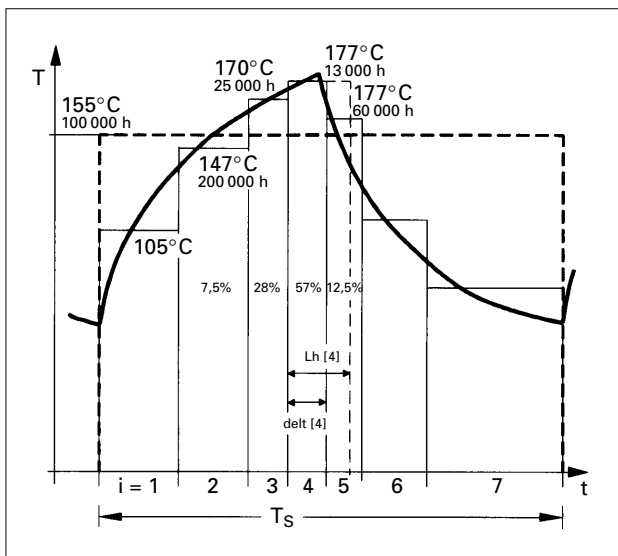


Figure 59: Evolution de la température pendant un intervalle.

dans laquelle $L_h [i] = f (T)$ correspond à la durée de vie de l'isolation et T_s est la durée d'un intervalle, voir figure 60.

La durée de vie nominale L_{nom} est définie pour une classe ou système d'isolation et est de 100 000 heures pour la température de 155 degré pour la classe F (WBK F).

A la figure 59 sont présentées, pour les groupes de températures, les valeurs relatives en pour cent des consommations de durée de vie. Seules les températures au-dessus de la température de la classe d'isolation interviennent dans la durée de vie. Par exemple, la consommation du $i = 4$ est de 57% de l'ensemble de la durée de vie.

Comme mentionné précédemment, il y a lieu de contrôler tous les éléments ou composants afin d'examiner leur comportement à la nouvelle température.

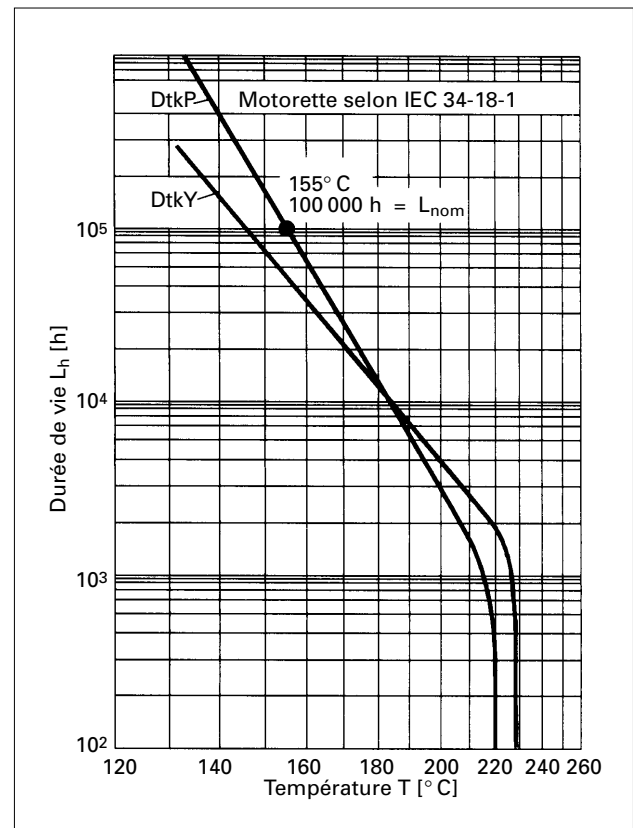


Figure 60: Fonction de la durée de vie d'un moteur classe F, IEC34-18-1.

Ce sont en particulier:

- ventilateur: les revêtements métalliques et plastiques;
- palier: paliers spéciaux avec jeux de dilatation;
- lubrification des paliers: supporte-t-elle une température plus élevée?
- joints des boîtes de connections: joints silicone;
- peintures: résistance à la chaleur.

Dans le cas contraire, une modification du moteur normalisé est à envisager.

La préparation de la répartition des charges par intervalles de temps/durée est une première simplification de la méthode précise de la prise en compte exacte de toutes les charges en fonction du temps. C'est un premier pas de mise en application de la méthode. Pour le type de régime S10, il est représenté enfin par:

$$p/\Delta t = 1,1/0,4 ; 1,0/0,3 ; 0,9/0,2 ; r/0,1 \quad T_L = 0,6$$

avec p le rapport de la puissance demandée à la puissance nominale, t la durée relative de cette charge, r l'état à l'arrêt sans courant et $T_L < 1$ la réduction relative de la durée de vie de l'enroulement par rapport au régime type S1 d'une machine en fonctionnement permanent.

7. Entraînements économique-énergétiques importants et solutions

Important !

- La moitié des moteurs asynchrones en service sont employés à l'entraînement de ventilateurs, de compresseurs et de pompes. L'utilisation de ces entraînements avec réglage de la vitesse permettrait de réduire la consommation d'énergie électrique de 35 %.
- Dans les systèmes de distribution d'eau, l'utilisation de turbopompes permet la production complémentaire d'énergie électrique.

7.1 Ventilateurs avec réglage de vitesse

Etant donné que la moitié des moteurs en exploitation sont utilisés pour l'entraînement des ventilateurs et des pompes, il est nécessaire de se pencher un peu plus sur ces deux applications.

Les ventilateurs et les pompes sont, dans la règle, dimensionnés de manière à ce qu'ils assurent les exigences maximales de l'installation. En pratique, il arrive constamment que la demande de puissance varie dans le temps et que dans une exploitation classique, la puissance en réserve reste inutilisée.

Pour le réglage ou la variation de débits, deux principes sont utilisés :

- l'utilisation de contrainte de flux, étranglement ou diaphragmes ;
- modification de l'angle des pales du distributeur.

Ces deux principes sont simples et de ce fait très employés. Cependant énergétiquement parlant, ils ne sont pas performants.

Récemment, diverses solutions de réglage de débits, plus favorables du point de vue énergétique, ont été développées. La meilleure solution physique et énergétique de variation de débit est réalisée en réglant la vitesse de la pompe, par l'emploi de moteurs asynchrones alimentés par convertisseurs statiques.

Par la suite, il ne sera pas seulement fait mention des différents modes de commande ou réglage des

points de vue technique et énergétique, mais il sera aussi fait mention des conséquences économique-énergétiques des méthodes encore peu connues d'utilisation rationnelle d'énergie électrique. Par exemple, l'emploi des turbopompes, des entraînements sous-chargés ou sporadiquement chargés.

De façon usuelle, lorsque les ventilateurs sont choisis pour une installation, cela sous-entend qu'ils travaillent de façon optimale à un seul point de fonctionnement. Dans l'optique d'une conduite de processus optimisée, il faut s'attendre à des demandes de débits variables. A côté de la possibilité pour les ventilateurs, compresseurs et souffleries d'être enclenchés ou déclenchés en fonction d'un cycle d'exploitation défini, deux autres solutions existent pour le réglage ou la variation des débits à vitesse constante du moteur.

Le débit d'un ventilateur peut être varié par des clapets ou des diaphragmes-étranglements dans le circuit de distribution. Ces éléments peuvent être placés soit du côté de la pression, c'est-à-dire à la sortie du ventilateur, soit du côté de l'aspiration, c'est-à-dire à l'entrée du ventilateur. Lorsqu'ils sont placés à l'entrée, ces éléments occasionnent des turbulences de flux. S'ils sont placés trop près de l'aspiration, leur effet sera une augmentation de la demande de puissance, et de ce fait, une chute de rendement et aussi une augmentation du bruit.

La variante la plus courante est la contrainte de flux du côté de la pression, par exemple les diaphragmes-étranglements D_{s1} , D_{s2} , D_{s3} , qui déterminent les caractéristiques avec les paramètres D_s selon la figure 61. La diminution de la pression (hauteur de refoulement) dans l'installation augmente la demande de puissance du ventilateur. La conversion de la différence de pression en chaleur occasionne une réduction du rendement.

Aussi longtemps que la contrainte de flux n'est employée exclusivement que pour de petites variations de débits autour du point nominal de fonctionnement, elle est à considérer comme très mauvaise du point de vue énergétique.

Les débits des ventilateurs peuvent aussi être réglés par variation de l'angle des pales du distributeur. Ce réglage est encore utilisé pour des puissances moyennes et grandes. Dans ce cas, la caractéristique de la machine change selon la position de celle-ci (D_L) et la surface du canal d'écoulement ainsi définie. Les caractéristiques du ventilateur changent en

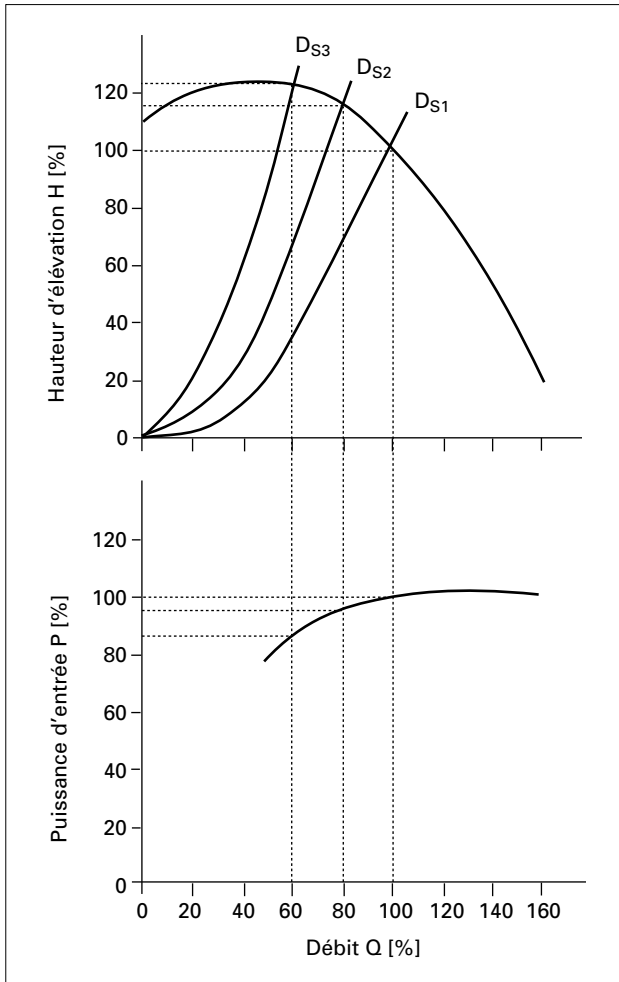


Figure 61: Caractéristiques d'un ventilateur radial avec variation de débit côté pression (D_s).

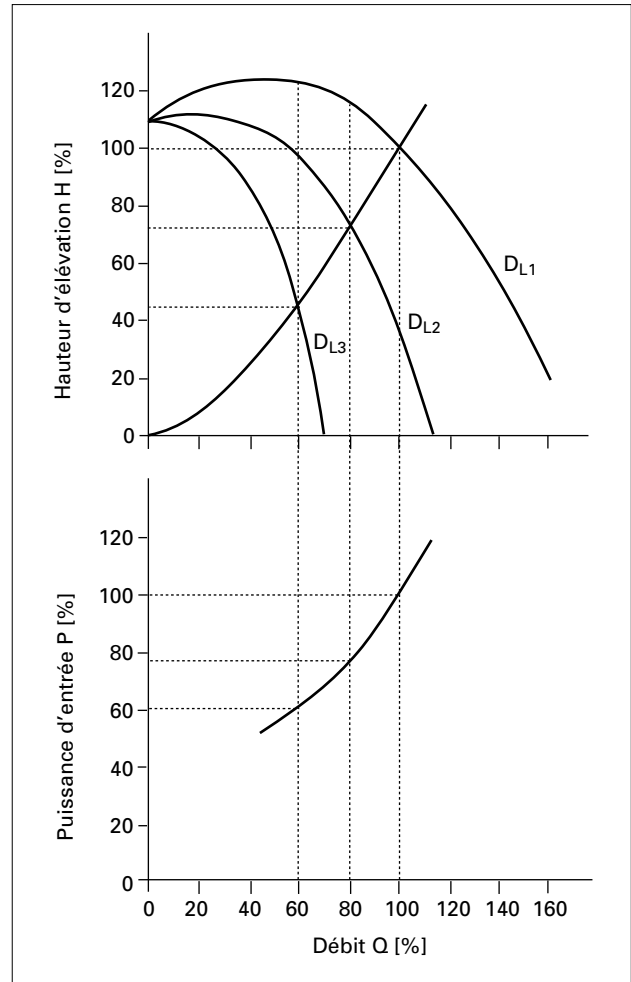


Figure 62: Caractéristiques d'un ventilateur en réglage du débit au distributeur (D_L).

fonction de ce paramètre D_{L1} , D_{L2} , D_{L3} (figure 62). Il en résulte que la pression, la puissance et le rendement diminuent. Les pertes énergétiques sont particulièrement importantes pour ce système et surtout pour de grandes variations conduisant à de grands changements de débits.

En comparaison avec le système de réglage précédent, celui-ci est plus favorable comme le montre l'exemple ci-après.

Un système de ventilation avec les caractéristiques de la table, figure 63, est employé 8400 heures par an. Dans ce cas, annuellement $1272,60/8400 = 0,1515$ ou 15,15% du coût énergétique est économisé par le réglage au distributeur (D_L) par rapport à la contrainte de flux côté pression (D_s).

Q [%]	t [h]	t [%]	Economie D_s/D_L [%]	t (h) · économie [h · %]
100	420	15	0	0
85	1260	15	11	138,60
75	2100	25	15	315,00
65	2100	25	16	336,00
55	1260	15	19	239,40
50	840	10	19	159,60
45	420	5	20	84,00
	8400			1272,60

Tableau 63: Comparaison des différences de consommation d'énergie (D_L - D_s)

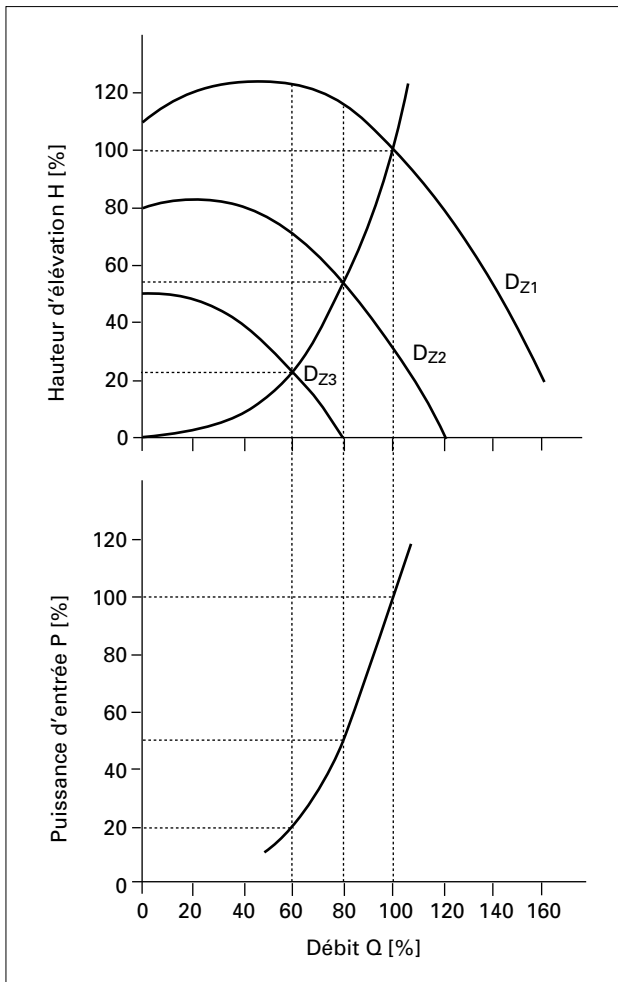


Figure 64: Caractéristiques d'un ventilateur radial avec réglage par variation de vitesse.

Le réglage du débit par variation de la vitesse du ventilateur est de loin la meilleure solution.

A la figure 64, on trouve les différentes caractéristiques du ventilateur pour les différentes vitesses (D_{Z1} , D_{Z2} , D_{Z3}) et débits.

Une courbe caractéristique d'un ventilateur peut être représentée par la fonction simple suivante :

$$\Delta p = k \cdot Q^2$$

avec Δp = différence de pression en Pa
 Q = débit en m^3/s

Le facteur k est une constante qui représente les pertes de charge spécifiques pour le système et le fluide.

Le débit, la différence de pression et la puissance mécanique sont régis par les lois de similitude suivantes :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} ; \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 ; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

avec n = vitesse de rotation
 P = puissance de l'entraînement

Pour cela, on considère que le rendement reste constant avec la vitesse.

Une combinaison simple des lois du modèle conduit à :

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 ; \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

$$\Rightarrow \Delta p_2 = \frac{\Delta p_1}{Q_1^2} Q_2^2$$

dans laquelle la grandeur $\Delta p_1/Q_1^2$ est égale à la constante k . Cela veut dire que pour une installation avec une caractéristique de ce type, il existe la possibilité d'adapter les exigences d'augmentation de pression par variation de la vitesse et cela avec des demandes de puissances en conséquence.

Pour apporter la preuve de cette affirmation, nous donnons le résultat des mesures pour un système de ventilation avec les demandes annuelles de débits indiquées sur le tableau 65. La comparaison indique l'énergie économisée par le réglage par variation de vitesse et les deux autres types de réglage présentés précédemment.

Q [%]	Temps [h]	Gain 1 R_z/R_s [%]	h · gain 1 [h%]	Gain 2 R_z/R_s [%]	h · gain 2 [h%]
100	420	-12	-50,40	-12	-50,40
85	1260	19	239,40	8	100,80
75	2100	31	651,00	16	336,00
65	2100	38	798,00	22	462,00
55	1260	45	567,00	26	327,60
50	840	46	386,40	27	226,80
45	420	48	201,60	28	117,60
	8400		2793,00		1520,40

Tableau 65: Comparaison des économies d'énergie pour les réglages : vitesse R_z /étranglement R_s et vitesse R_z /distributeur R_L .

On peut économiser ainsi annuellement les valeurs de $2793,00/8400 = 0,332$ ou 33,2% avec le réglage par variation de vitesse par rapport à «l'étranglement» dans le circuit de pression et la valeur de $1520,40/8400 = 0,181$ ou 18,10% avec le réglage par variation de vitesse par rapport au réglage par variation des pales du «distributeur». Dans ce cas la puissance active est seule caractéristique.

La figure 66 montre les valeurs de la demande de puissance pour une installation de $P_N = 84 \text{ kW}$, une vitesse n_N de 1450 t/min et un débit de $Q_N = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ en fonction des différents types de réglage. Le profil de charge est représenté par L_1 , et l'exploitation mensuelle est de 730 h.

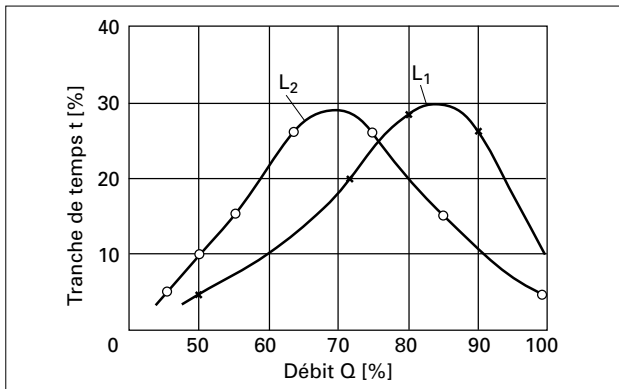


Figure 66: Profil de charge.

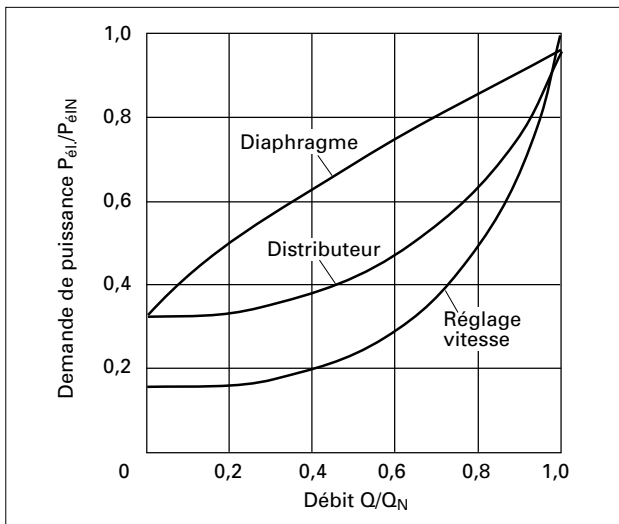


Figure 67: Puissance électrique demandée pour les différents types de réglage.

7.2 Pompe avec vitesse variable

On peut classer les pompes en deux grandes catégories: les pompes centrifuges et les pompes à piston. Dans les pompes à piston, le volume de la pompe varie et ainsi le fluide est mis en mouvement. Dans les pompes centrifuges, le volume est comprimé par la rotation des pales qui provoque une augmentation de la pression. Aujourd'hui, les pompes centrifuges sont les plus utilisées pour le transfert de fluides. Dans la suite de l'exposé, nous ne parlerons que de ce type de pompes. Il sera aussi fait mention de considérations importantes concernant l'écoulement des fluides.

- La **pression** ou la **hauteur de refoulement** pour une installation de pompage est en général donnée en Pascal (Pa) ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ J/m}^3 = \text{Nm/m}^3 = \text{kgm/s}^2\text{m/m}^3 = \text{kg/ms}^2$) ou en hauteur de colonne d'eau (mWS) ($1 \text{ mWS} = 9,81 \text{ kPa}$).
- La **hauteur statique de refoulement** d'une installation est la pression à vaincre pour atteindre une certaine différence de hauteur. Elle est donnée par la valeur de l'énergie potentielle de pression, sans écoulement du fluide.
- La **hauteur ou pression dynamique** est l'équivalent de la perte de charge d'une installation avec écoulement du fluide. C'est aussi l'énergie cinétique à transmettre au fluide; elle croît avec le carré du débit.
- Sous la désignation de **pression de l'installation**, nous comprenons l'ensemble des deux pressions, statique et dynamique.
- La **pression de la pompe** est celle disponible à la sortie de celle-ci; pour une pompe centrifuge, elle dépend du débit et est variable avec la vitesse de rotation de la pompe.
- La **pression d'aspiration** ou **dépression à l'entrée** de la pompe est une grandeur caractéristique en régime optimal. Si la dépression à l'entrée est plus grande que la pression générée par la pompe en service, il peut se créer des «créations de vapeur» qui sont indésirables et peuvent même produire des dégâts par cavitation.

Pour la définition énergétiquement optimale d'une installation de pompage, on dispose dans le diagramme pression-débit de deux caractéristiques. L'une est la caractéristique de pression qui dépend de la physique de la pompe et l'autre est la caractéristique de l'installation de transfert d'écoulement.

Q		Répartition		Puissance consommée pour chaque type de réglage			
%	r%	P_s	$P_s \cdot r$	P_L	$P_L \cdot r$	P_z	$P_z \cdot r$
100	10	84,0	8,40	84,0	8,40	84,0	8,40
90	27	79,8	21,55	68,9	18,60	62,1	16,77
80	28	74,8	20,95	57,9	16,21	44,5	12,46
70	20	69,7	13,94	49,5	9,90	33,6	6,72
60	10	63,8	6,38	42,0	4,20	26,9	2,69
50	5	57,9	2,89	36,9	1,85	21,8	1,09
			74,11		59,16		48,13

Durée d'exploitation	730 h/mois	54 100,30	43 186,80	35 134,90 kWh
Coût	0,16 Fr./kWh	8 656,05	6 909,90	5 621,60 Fr.
		- 5 621,60	- 5 621,60	
Economie	Fr./mois	3 034,45	1 288,30	

Figure 68: Différence de coût entre les réglages: vitesse (P_z)/contrainte dans le circuit de pression (P_s) et vitesse/variation au distributeur (P_L).

Les paramètres sont la longueur des conduites, la section des conduites, leur nombre et leur position qui dépend du nombre de coudes et d'embranchements. Au point de fonctionnement naturel, c'est-à-dire au croisement des deux caractéristiques, les pertes de charge sont juste couvertes par la pression de la pompe. Si ce point de fonctionnement se trouve à une valeur non désirée, il y a lieu de procéder à des ajustements. En pratique, pour les installations standard, il y a lieu de tenir compte des débits qui provoquent des effets sur le système global. Une méthode simple et très couramment employée est de varier le débit par l'insertion de diaphragmes ou valves qui évidemment changent la caractéristique de l'installation, comme indiqué sur le diagramme pression-débit.

La figure 69 montre les caractéristiques d'une installation de variation de débit par contrainte de flux et par variation de la vitesse; on constate qu'une réduction de débit provoque une augmentation de la pression à fournir par la pompe.

En comparaison, à la figure 69, la caractéristique en traitillé présente un type de réglage énergétiquement plus intéressant par variation de la vitesse de la pompe. On voit que la caractéristique pression-débit de la pompe se modifie pour chaque vitesse.

La variation de la caractéristique de la pompe peut être établie par avance en se basant sur les relations données précédemment. Une qualité importante de cette méthode est le fait que la pression de la pompe diminue aussi lors de la réduction du débit.

Pour mieux faire apprécier la différence qualitative de ces deux méthodes, nous allons examiner l'exemple pratique suivant.

A la figure 71, nous indiquons la caractéristique d'une pompe radiale de 355 mm avec un débit de 90 l/s ou 324 m³/h et une vitesse nominale de 1150 t/min. La pompe alimente, selon le profil de charge, une installation de distribution d'eau chaude avec une pression statique de 20 m. L'installation est d'abord examinée sans tenir compte de la pression statique (réglage R_s , $D1 = 31\%$ et $D2 = 63\%$). La figure 73 donne la caractéristique de la pompe et l'on peut trouver la puissance équivalente nécessaire pour un réglage par contrainte de flux en fonction du débit désiré.

Pour un réglage par variation de vitesse, la demande de puissance peut être trouvée par la relation de proportionnalité du débit et de la vitesse, ainsi que la fonction de la puissance au cube et de la vitesse:

$$Q \text{ proportionnel à } n \text{ et } P \text{ proportionnel à } n^3.$$

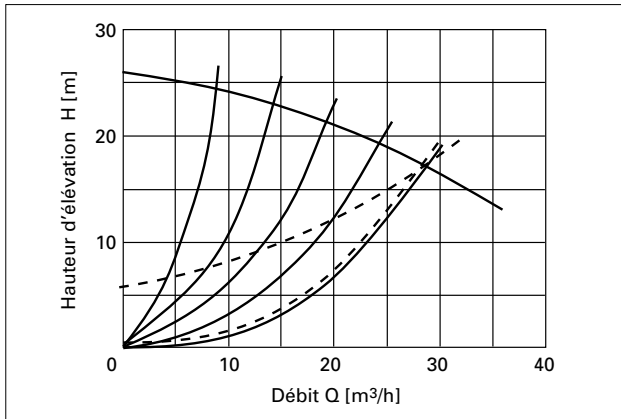


Figure 69: Caractéristiques pour les réglages par variation de vitesse et contrainte de flux.

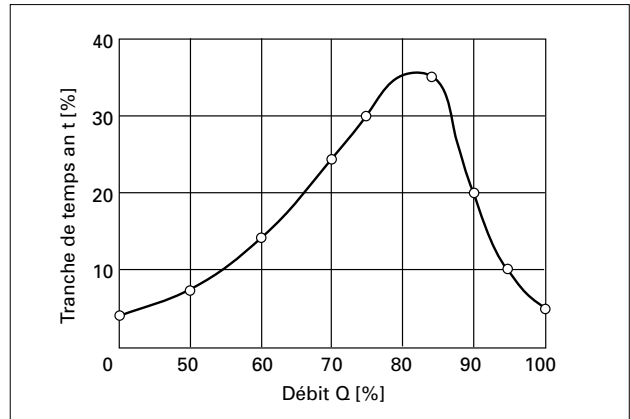


Figure 70: Profil de charge.

La figure 71 indique, pour des débits variables relatifs, la puissance demandée en valeurs relatives, et la deuxième partie du tableau 72 peut être remplie en fonction d'un profil de charge annuel moyen. Le résultat est que pour un réglage par variation de vitesse et par contrainte de flux, nous avons les valeurs suivantes d'économie d'énergie :

$$4027,38/8400 = 0,48 \text{ ou } 48\% \text{ (figure 70).}$$

Pour un calcul plus précis, il faudrait faire intervenir les rendements de la pompe et du moteur.

L'économie d'énergie dépend essentiellement de la durée pendant laquelle la pompe a produit une certaine puissance. Ainsi, une exploitation avec 60% du débit pendant un certain temps a plus de potentiel d'économie d'énergie qu'un régime à 80% du débit pendant le même temps.

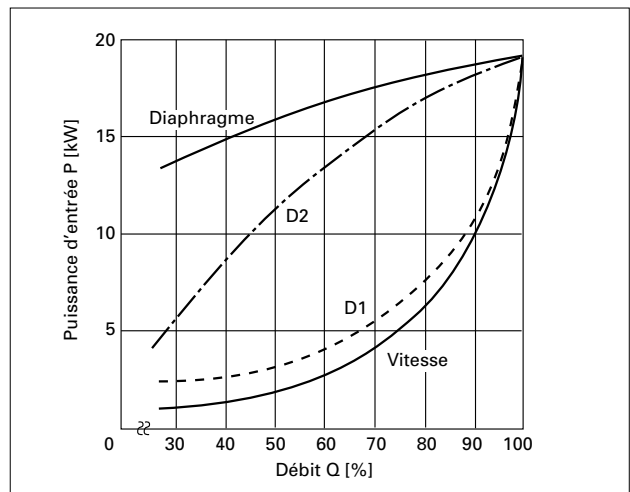


Figure 71: Puissance de l'entraînement en réglage de vitesse et contrainte de flux.

Q	Répartition annuelle		Réglage R _S /réglage vitesse		R _S /vitesse car. 1 = 31%		R _S /vitesse car. 2 = 69%	
	h	%	%	% · h	%	% · h	%	% · h
100	420	5	—	—	—	—	—	—
96	840	10	14,7	123,48	0,7	5,88	2,5	21,00
83	2940	35	47,5	1343,58	1,8	52,92	7,3	214,62
76	2520	30	51,7	1438,92	1,8	45,36	8,8	221,76
59	1250	15	68,0	856,80	1,4	17,64	10,7	134,82
42	420	5	63,0	264,60	0,8	3,36	6,4	26,88
	8400			4027,38		125,16		619,08

Tableau 72: Economie d'énergie « contrainte » et variation de vitesse.

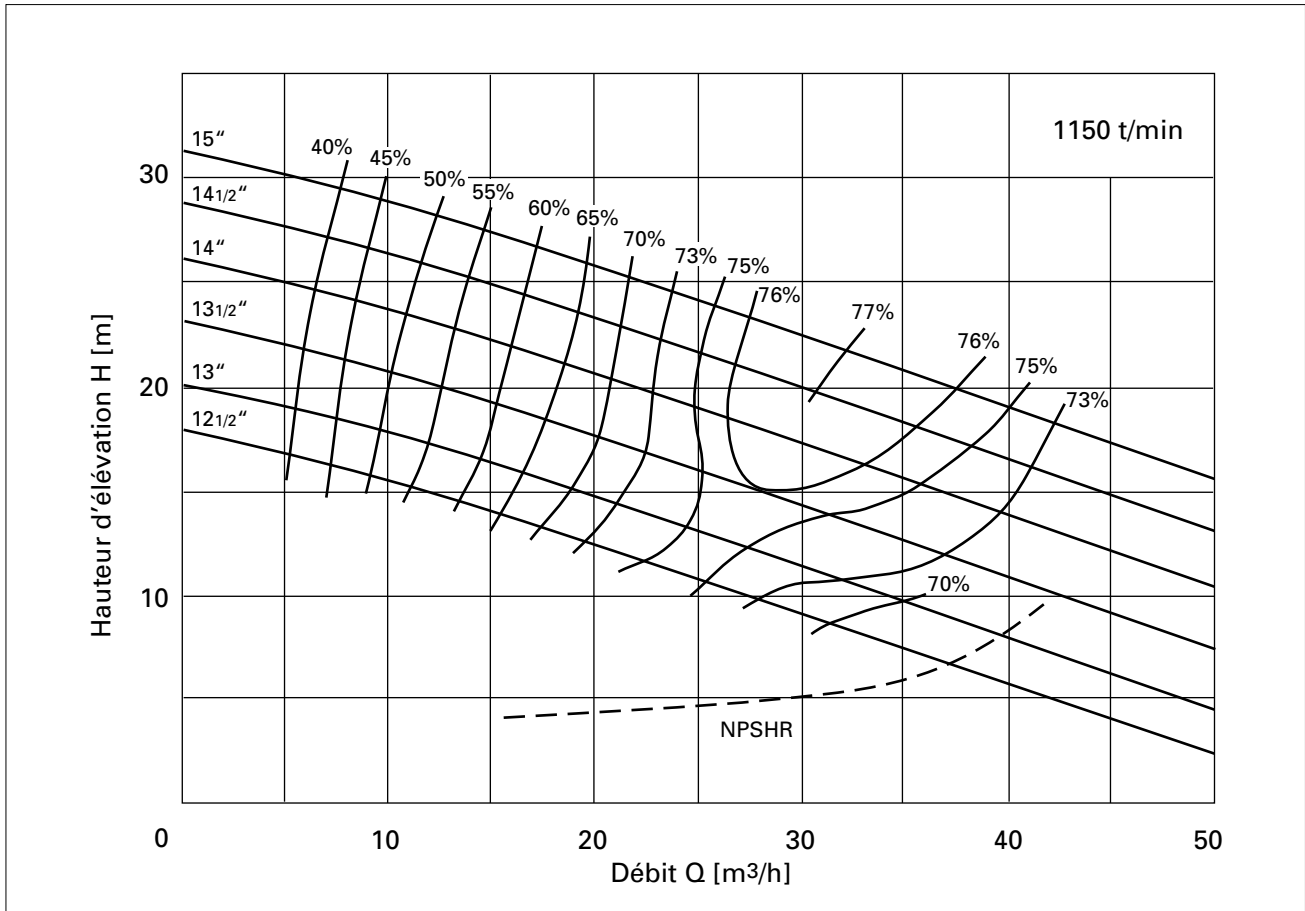


Figure 73: Caractéristique d'une pompe.

7.3 Utilisation de l'énergie d'une pompe centrifuge en régime inverse

L'utilisation effective de l'énergie potentielle dans un système de distribution d'eau, voir figure 74 page suivante, est toujours plus nécessaire, cela aussi bien du point de vue économique qu'écologique.

Pour la production d'énergie électrique, nous utilisons aussi des pompes centrifuges en régime inverse.

Les installations d'eau de consommation (potable) et d'eau usagée (claire), les conduites de pétrole, d'agents énergétiques liquides et la distribution de chaleur à distance sont énergétiquement intéressantes en marche en récupération.

Exemple :

Contenu énergétique d'une distribution d'eau à grande distance

Une installation d'eau de consommation avec un tube de diamètre de 1 m à 1,2 m a une longueur moyenne de 430 km avec une accumulation de 410 000 m^3 . Une légère surpression de 0,9 MPa représente une augmentation du contenu énergétique de l'eau de 300,6 GJ ou 83,5 MWh. Une part importante de cette énergie peut être récupérée en fonctionnement inverse.

Pour la valorisation de l'énergie de récupération possible dans un système de distribution d'eau, le débit Q et la hauteur de chute sont déterminants.

$$P_A = g\rho QH = Q \cdot \Delta p$$

avec g = accélération terrestre
 ρ = la masse spécifique (kg/m^3)

La relation ci-dessus permet de calculer la puissance théorique disponible P_A de l'installation.

Les critères de valorisation de cette production d'énergie sont:

- la valeur de la puissance disponible; en considération des coûts spécifiques et des gains possibles (des installations au-dessous de 5 kW ne devraient pas être prises en considération);
- la valeur des coûts d'investissement pour les équipements, l'installation et la réalisation;
- la valeur spécifique des coûts d'investissement rapportée à la durée d'exploitation;
- un coût spécifique de production d'énergie électrique de 0,7 à 1,5 ct/kWh peut être obtenu, ce qui place cette énergie à un coût inférieur à celle produite par le charbon ou par le nucléaire, qui eux, se situent entre 15 à 20 ct/kWh.

En pratique, la schématique donnée à la figure 75 indique les possibilités économiques de telles exploitations de pompe en régime turbine.

Une turbopompe en régime turbine avec couplage à une pompe centrifuge est montrée à la figure 75a. La figure 75b montre une turbopompe pour la production d'énergie électrique en couplage rigide avec un générateur asynchrone en régime génératrice. La vitesse n de sursynchronisme du générateur est quasi constante. Dans ce cas, il y a lieu de prévoir une génératrice tachymétrique et un schéma de commutation au réseau particulier pour l'accouplement rigide. Par contre, à la figure 75c, une turbopompe est couplée avec un accouplement élastique à la machine électrique qui travaille en génératrice. Les convertisseurs de fréquence permettent une variation de la vitesse de rotation n du générateur et tolèrent également des changements de débits.

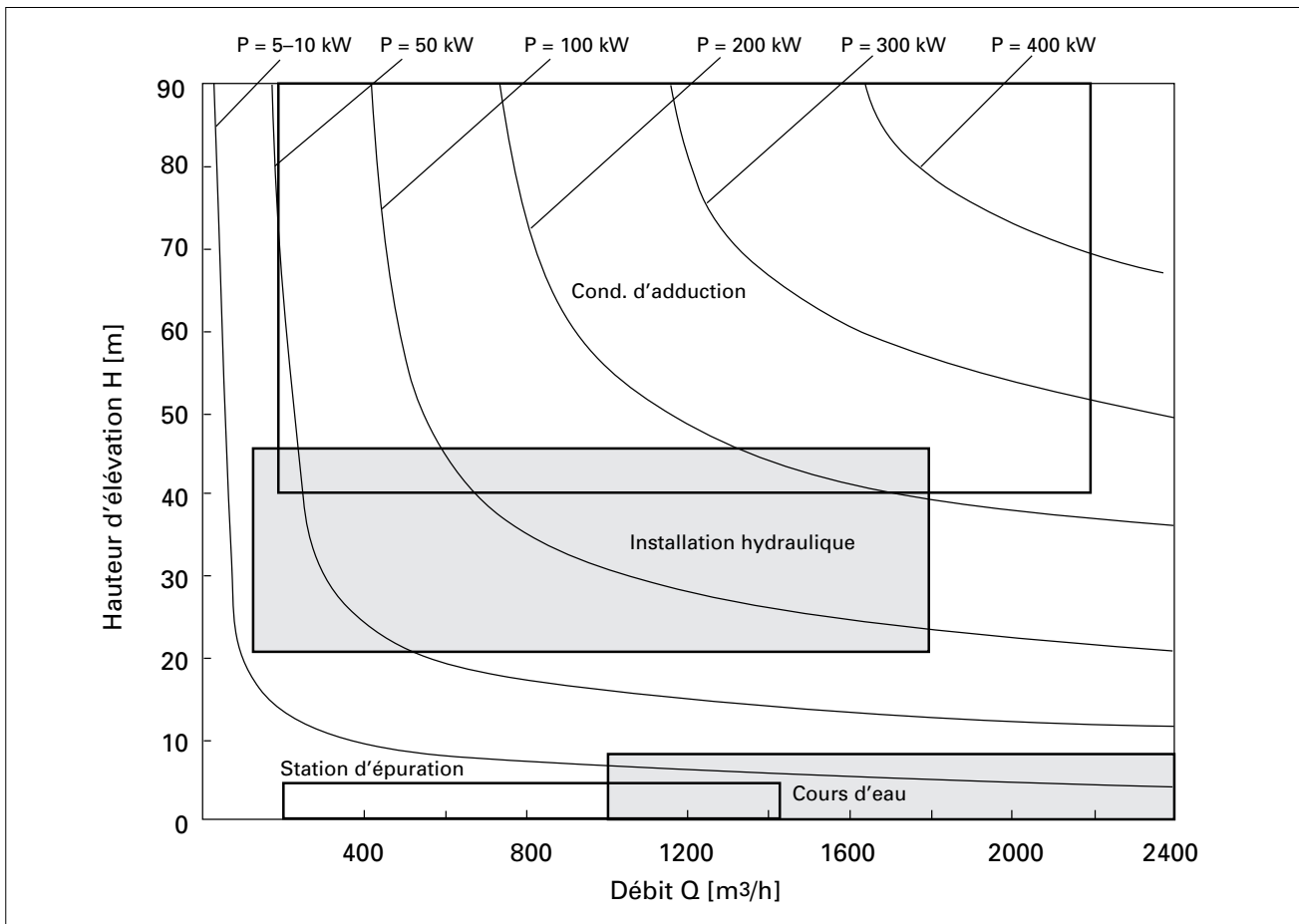


Figure 74: Puissance disponible dans les différents systèmes hydrauliques.

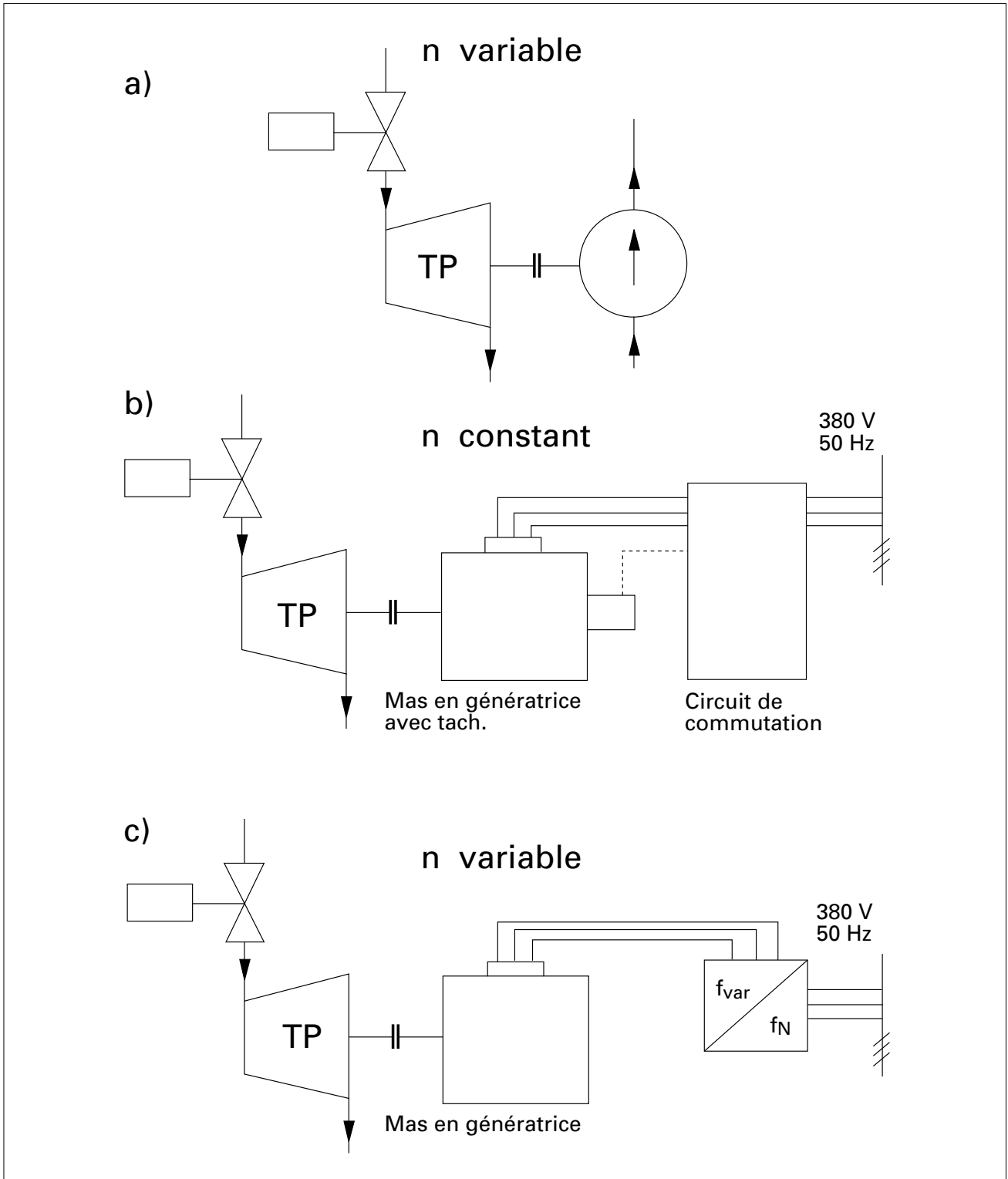


Figure 75: Concept pratique d'entraînements pour turbopompe avec sens de rotation inverse (turbine).

Les figures 76 et 77 donnent les courbes caractéristiques de fonctionnement en régime turbopompe. Les considérations suivantes sont à examiner :

- la plage de fonctionnement de la turbine $H_T = H_T(Q, n)$ ne couvre pas tout le domaine, comme dans le cas du fonctionnement en pompe ;
- lors du dépassement du régime nominal à vide, la turbopompe travaille en freinage et doit donc être entraînée.

Dans la pratique, la pression d'un système de distribution varie beaucoup pendant les périodes d'exploitation, donc également les paramètres d'exploitation de la turbopompe. La conséquence en est une réduction de la puissance récupérée par l'installation. Pour avoir une exploitation optimale, les machines asynchrones en génératrice seront couplées au réseau au travers d'un convertisseur de fréquence. Cela se fait conformément à la figure 78 avec un convertisseur à quatre quadrants permettant de transférer l'énergie au réseau. Ainsi la turbine peut fonctionner et être réglée à une vitesse optimale pour son exploitation.

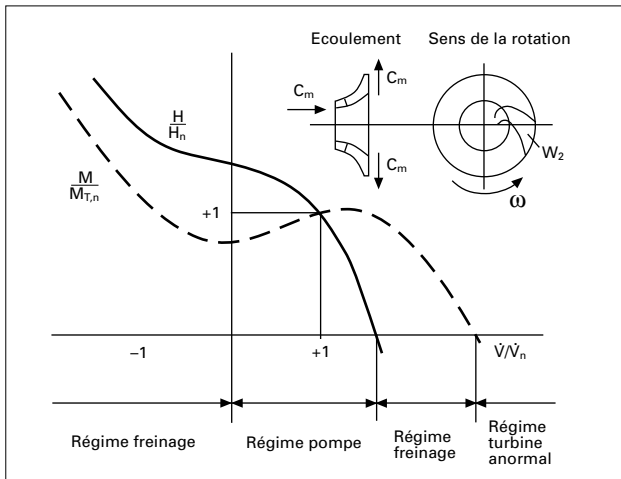


Figure 76: Exploitation en régime pompe avec sens de rotation positif (intérieur-extérieur).

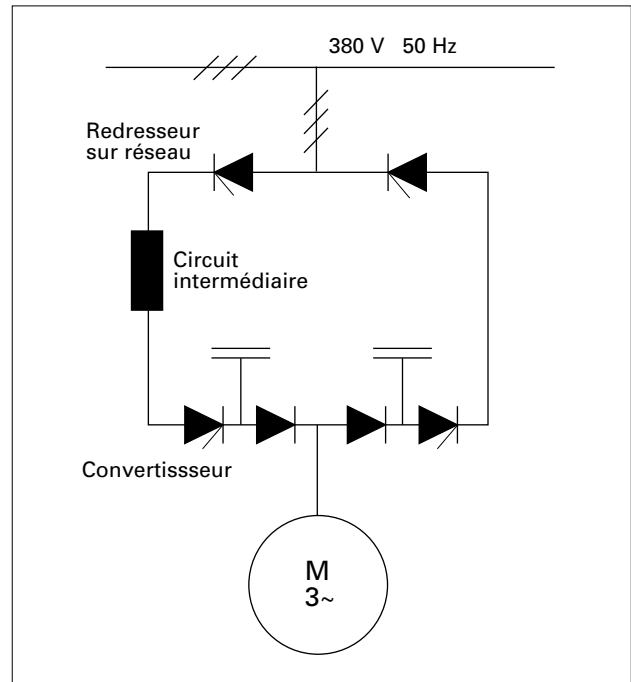


Figure 78: Circuit de courant intermédiaire avec convertisseur.

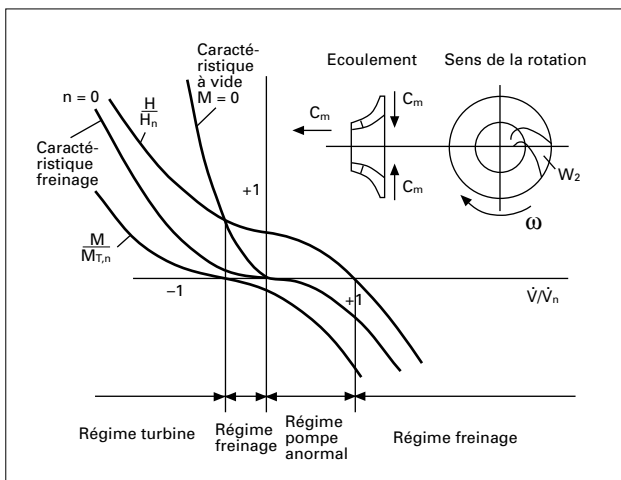


Figure 77: Exploitation en régime avec sens de rotation négatif (extérieur-intérieur).

8. Références bibliographiques

- [1] G. Biller: « High Efficiency Motors for Severe Duty Environments ». IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-14, N° 4, July 1978.
- [2] M. Bongard, M. Jufer: « Analyse du rendement énergétique de processus industriels de productique ». Projet RAVEL-Domaine 21: Force projet d'étude 21.55, 1992.
- [3] P.K. Budig: « Drehzahlvariable Drehstromantriebe mit Asynchronmotoren ». VEB Verlag Technik, Berlin, 1988.
- [4] « Energieverbrauch in der schweizerischen Industrie im Jahre 1990 ». Schweizerischer Energie-Konsumenten-Verband von Industrie und Wirtschaft.
- [5] IEC Empfehlung: « Leitfaden für die Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von Umrichter gespeisten Induktionsmotoren » (I C2, SC C2).
- [6] R. Leemann: « Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen ». Ein Leitfaden, Ravel-Impulsprogramm, Zürich, 1991.
- [7] J.E. Albrecht: « Energetischer Vergleich pneumatischer, hydraulischer und elektro-mechanischer Antriebs- und Werkzeugsysteme ». Ravel, N° 724.397.12.56 d, 1992.
- [8] Office fédéral des questions conjoncturelles: « Dimensionnement et exploitation optimale des circulateurs ». N° 724.330 f, 1993.

5^e partie

**Utilisation rationnelle
de l'énergie électrique finale
dans les processus de production
et dans l'exploitation industrielle**

Michel Bongard

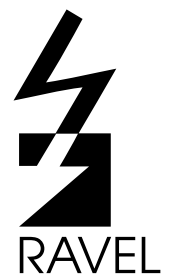


Table des matières

1.	Introduction	175
-----------	---------------------	------------

2.	Comptabilité énergétique	178
-----------	---------------------------------	------------

3.	Une nouvelle approche	180
3.1	Ressources naturelles	180
3.2	Mesures de la productivité de la consommation d'énergie	181
3.3	Grandeurs énergétiques spécifiques (ou indicateurs énergétiques spécifiques)	182
3.4	Grandeurs énergétiques caractéristiques d'un procédé (opération et enchaînement d'opérations)	183
3.5	Considérations sur les grandeurs spécifiques (ou indicateurs d'intensité énergétique)	184
3.5.1	Schéma des flux d'énergie	184
3.5.2	Rapport de l'énergie et de la puissance	185

4.	Valorisation énergétique de la récupération et du recyclage des matériaux	186
4.1	Flux des matériaux par habitant et par an aujourd'hui et dans le futur	188

5.	Exemple pratique de calcul des grandeurs caractéristiques appliqué à la fabrication des moteurs asynchrones normalisés	189
5.1	Analyse des grandeurs caractéristiques	189

6.	Détermination du contenu énergétique cumulé pour trois grandeurs de moteurs asynchrones normalisés	191
-----------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

7.	Les préceptes d'optimisation	194
-----------	-------------------------------------	------------

8.	Statistiques relatives aux entraînements électriques	195
8.1	Expression de l'énergie spécifique	195
8.2	L'énergie électrique pour les entraînements: les 7 points importants	196
8.3	Où l'électricité est-elle perdue?	197
8.4	Où va l'énergie perdue?	198

9.	Les pertes et le marché des moteurs électriques	200
-----------	--------------------------------------------------------	------------

10.	Gestion de l'énergie (adaptation et compromis)	201
------------	-------------------------------------------------------	------------

11. Exemples d'application	203
11.1 Air comprimé	203
11.2 Ventilation	205
11.3 Création de froid	207
11.4 Pompes	209
11.5 Station d'épuration des eaux usées (STEP)	210
11.6 Installation de purification des gaz de fumée	211
11.7 Transport interne dans les entreprises, convoyeurs	212
11.8 Production d'usinage mécanique par enlèvement de copeaux	213
11.9 Cimenterie	215
11.10 L'imprimerie (impression offset à feuilles) et l'emballage carton (production de boîtes pliantes)	215
11.11 Industrie de la cellulose, du papier et du carton	216

12. Comparaison du point de vue énergétique des systèmes d'entraînements pneumatique, hydraulique et électromécanique	218
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

13. Liste des références bibliographiques	220
--------------------------------------------------	------------

1. Introduction

Notre préoccupation s'attache aux utilisations finales de l'énergie plutôt qu'à sa production ou qu'à sa consommation. L'utilisation de l'énergie n'est pas une fin en soi. Il est évident que l'énergie n'est utile que dans la mesure où elle fournit des services qui améliorent la qualité de la vie: matériaux, aliments, cuisson, éclairage, chauffage, froid, force mécanique, produits, transport de personnes et de biens, etc. Nous allons donc tenter de mieux comprendre le rôle de l'énergie, en se demandant comment et par qui sont utilisées aujourd'hui les différentes formes de l'énergie.

Les processus de productions générateurs de produits peuvent être de façon très globale subdivisés en deux grands groupes distincts. Ceux-ci sont:

- les processus de transformation des matières premières (ressources naturelles) en matériaux de base;

- les processus de transformation des matériaux de base en produits fonctionnels (production industrielle).

Les premiers nommés sont grands consommateurs d'énergie, les seconds le sont beaucoup moins. Notre intention est de présenter les moyens d'analyses énergétiques et particulièrement *l'impact des entraînements électriques* principalement dans les seconds processus.

Nous voudrions toutefois éviter de perdre de vue l'importance de l'ensemble des cycles de transformation dans le bilan énergétique global. Aussi, la consommation globale d'énergie ne se limite pas aux agents ou vecteurs énergétiques (pétrole, gaz, bois, électricité, etc.) mais devrait inclure la part très importantes provenant des matériaux et des produits fonctionnels importés et consommés chez nous (voir figure 1).

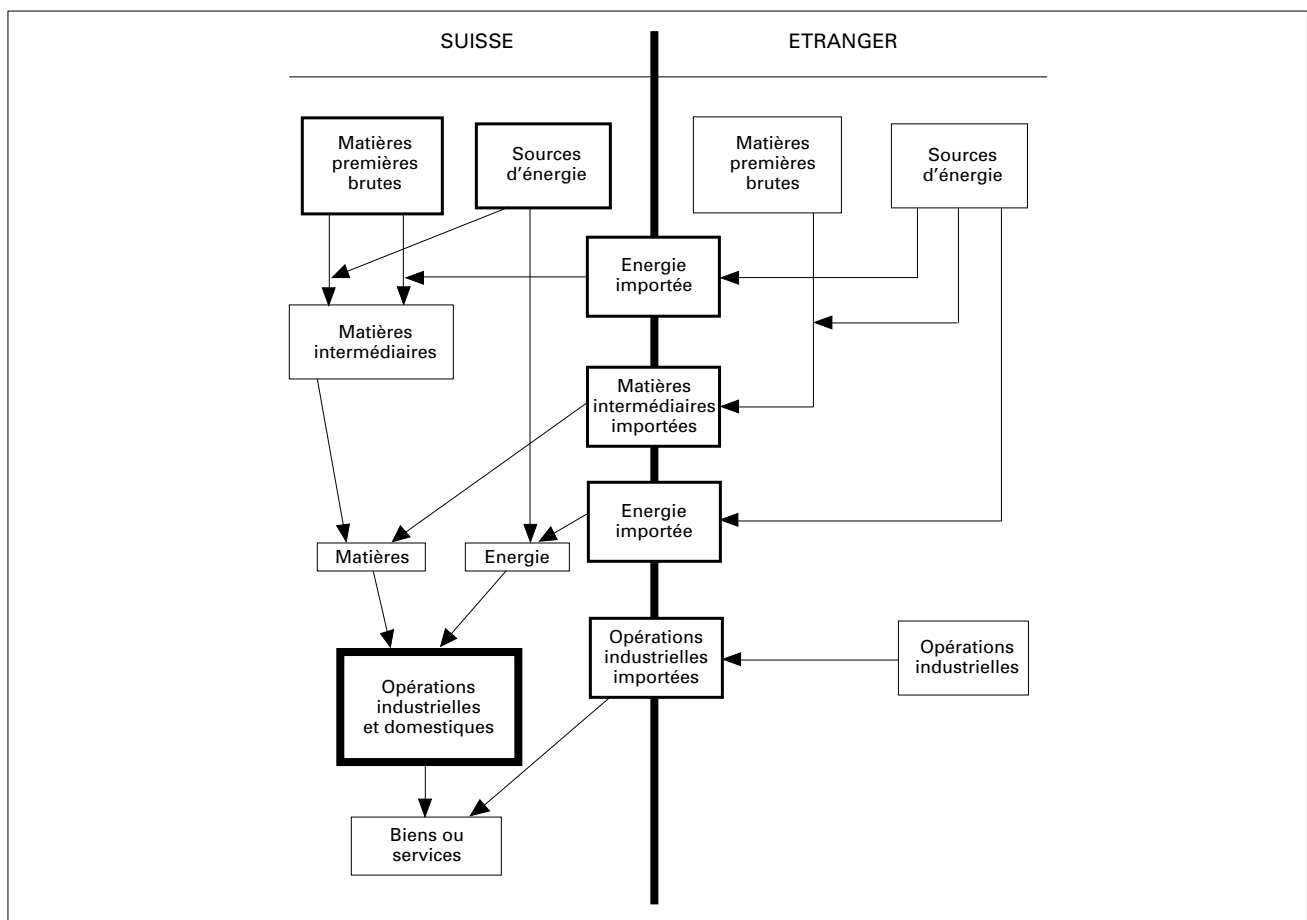


Figure 1: Représentation schématique des composants de notre consommation énergétique globale.

Exemples :

- la production de 1 kg d'acier nécessite la consommation de 7,77 kWh
- la production de 1 kg d'aluminium nécessite la consommation de 72,70 kWh
- la production de 1 kg de cuivre nécessite la consommation de 13,00 kWh
- la production de 1 kg de fonte nécessite la consommation de 3,60 kWh
- etc.

Tout matériau de base a nécessité une certaine quantité d'énergie pour le produire à partir des ressources naturelles : c'est son contenu énergétique exprimé en joules/kg ou en kWh/kg. Cette valeur a essentiellement un intérêt comparatif. Elle permet de comparer du point de vue énergétique des procédés ou des produits entre eux. Le contenu énergétique doit tenir compte de la valeur qualitative de l'énergie consommée.

Chaque opération industrielle a pour objectif de fabriquer des produits que nous qualifions de « fonctionnels », car ils sont définis par la fonction même à laquelle ils sont destinés. Il en résulte aussi des « sous-produits » dont une partie est rejetée dans l'environnement (déchets matériels, énergie dégradée, etc.) et dont le complément est réutilisé, soit dans le système lui-même, soit dans un autre système.

Cette transformation de matières premières en produits fonctionnels implique l'apport d'énergie et d'information ou de connaissance. L'énergie est fournie par les vecteurs ou agents énergétiques classiques (électricité, gaz, pétrole, etc.) et l'information ou connaissance est à la fois celle provenant des capteurs de mesures physicochimiques et celle constituée par l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques (know-how).

Le schéma de principe est représenté ci-dessous (figure 2).

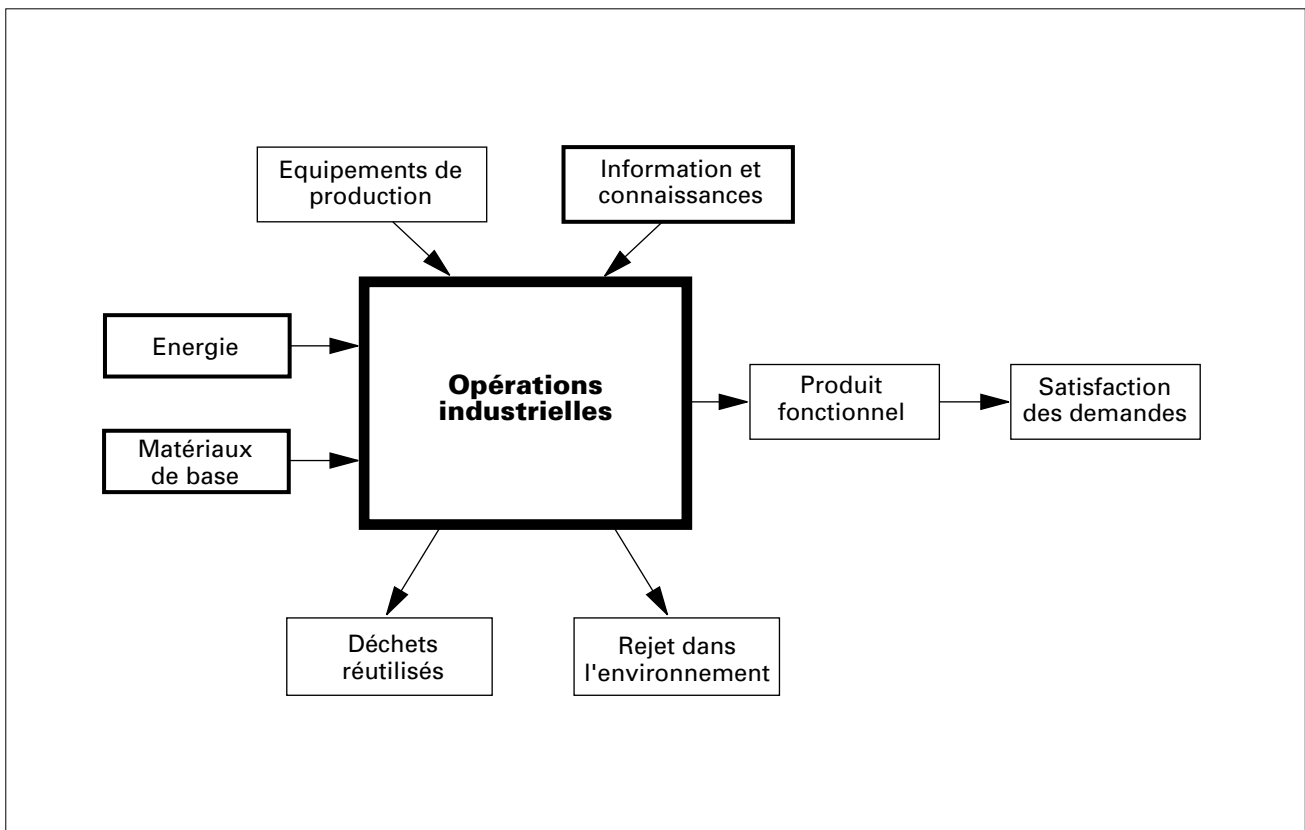


Figure 2 : Schéma de principe de l'opération industrielle.

Globalement, on peut dire que les producteurs d'énergie consomment deux unités d'énergie primaire pour fournir une unité d'énergie à leur clients et ceux-ci ne sont capables de transformer que la moitié de cette unité en énergie utile, comme le confort d'habitation, l'éclairage, les vêtements, la chaîne stéréo, etc. En effet, le développement ci-dessous met en évidence ces propositions.

Pour la Suisse et le vecteur d'énergie «électricité», le rapport entre l'énergie primaire (p) et l'énergie finale (f) est le suivant :

Répartition des provenances :	
hydraulique	60%
nucléaire	40%

Rendement moyen de production et distribution :	
hydraulique	80%
nucléaire	35%

$$E_f \text{ totale} = E_f \text{ part hydraulique} + E_f \text{ part nucléaire} = E_f \text{ totale} (0,6 + 0,4)$$

$$E_p \text{ totale} = E_p \text{ part hydraulique} + E_p \text{ part nucléaire} = E_p \text{ totale} (0,6/0,8 + 0,4/0,35)$$

$$\begin{aligned} \text{Rendement mixte} &= \frac{\text{Energie finale}}{\text{Energie primaire}} = \\ &= \frac{1}{0,6/0,8 + 0,4/0,35} = 0,52 \end{aligned}$$

Selon les *Statistiques énergétiques globales* de la Suisse pour 1990, toutes formes d'énergies confondues, le rapport de l'énergie utile à l'énergie primaire est le suivant :

$$\frac{\text{Energie utile } 431\,910 \text{ TJ}}{\text{Energie primaire } 1\,024\,080 \text{ TJ}} = 0,42$$

(Il y a lieu d'utiliser ces informations seulement comme indications d'ordre de grandeur !)

La valeur de ce même rapport avec la définition correcte que nous donnons plus loin de l'énergie utile est de l'ordre de 10% au mieux !!

Le contenu du texte précédent nous conduit à apporter l'explication de certains termes utilisés :

- *Les agents ou vecteurs d'énergie primaires* sont ceux que l'on trouve dans la nature et qui n'ont pas encore été transformés, qu'ils soient directement utilisables ou non. Ce sont : les combustibles

solides, le gaz naturel, le pétrole, les combustibles nucléaires et les forces hydrauliques brutes.

- *L'énergie finale ou distribuée* est la forme d'énergie disponible chez l'utilisateur consommateur. C'est pour l'électricité le poste d'entrée dans l'entreprise, pour le chauffage la prise de remplissage du réservoir de mazout, etc. Ce sont : les combustibles solides, les gaz, les produits pétroliers, l'électricité et la chaleur à distance.
- *L'énergie utile (définition actuelle)* est l'énergie sous la forme finalement désirée par le consommateur. Ce sont : l'éclairage, la chimie, le travail mécanique et la chaleur.
- *L'énergie utile (définition proposée)* est la quantité d'énergie minimale théorique nécessaire à réaliser un procédé, un processus ou satisfaire le besoin de confort.

Les qualifications de l'énergie : les processus industriels font appel à des énergie sous diverses formes. Dans la comptabilité énergétique appliquée aux processus de production, il faut cumuler ces formes d'énergie de façon correcte. Ainsi la définition des qualifications de l'énergie est indispensable afin d'obtenir des résultats cohérents.

1^{er} barème :

« à toutes valeurs égales », consiste à donner la même valeur à toutes les formes d'énergie, application du 1^{er} principe de la thermodynamique.

2^e barème :

« à rejets de valeur nulle », consiste à donner une valeur nulle à toutes les énergies rejetées dans l'environnement.

3^e barème :

« en valeurs d'énergie primaire », pour les combustibles proportionnelles à leurs pouvoirs calorifiques moyens et pour l'énergie hydraulique nous l'assimilerons à une centrale thermique fictive équivalente.

4^e barème :

« à valeurs d'exergie », traduit le fait que la chaleur a d'autant plus de valeur qu'elle est disponible à plus haute température et que l'électricité a une valeur exergétique égale à 1.

Le barème 3 est probablement le plus direct et d'une bonne qualité pour des opérations comptables de comparaisons qui sont celles pratiquées dans l'analyse énergétique des processus de production.

2. Comptabilité énergétique

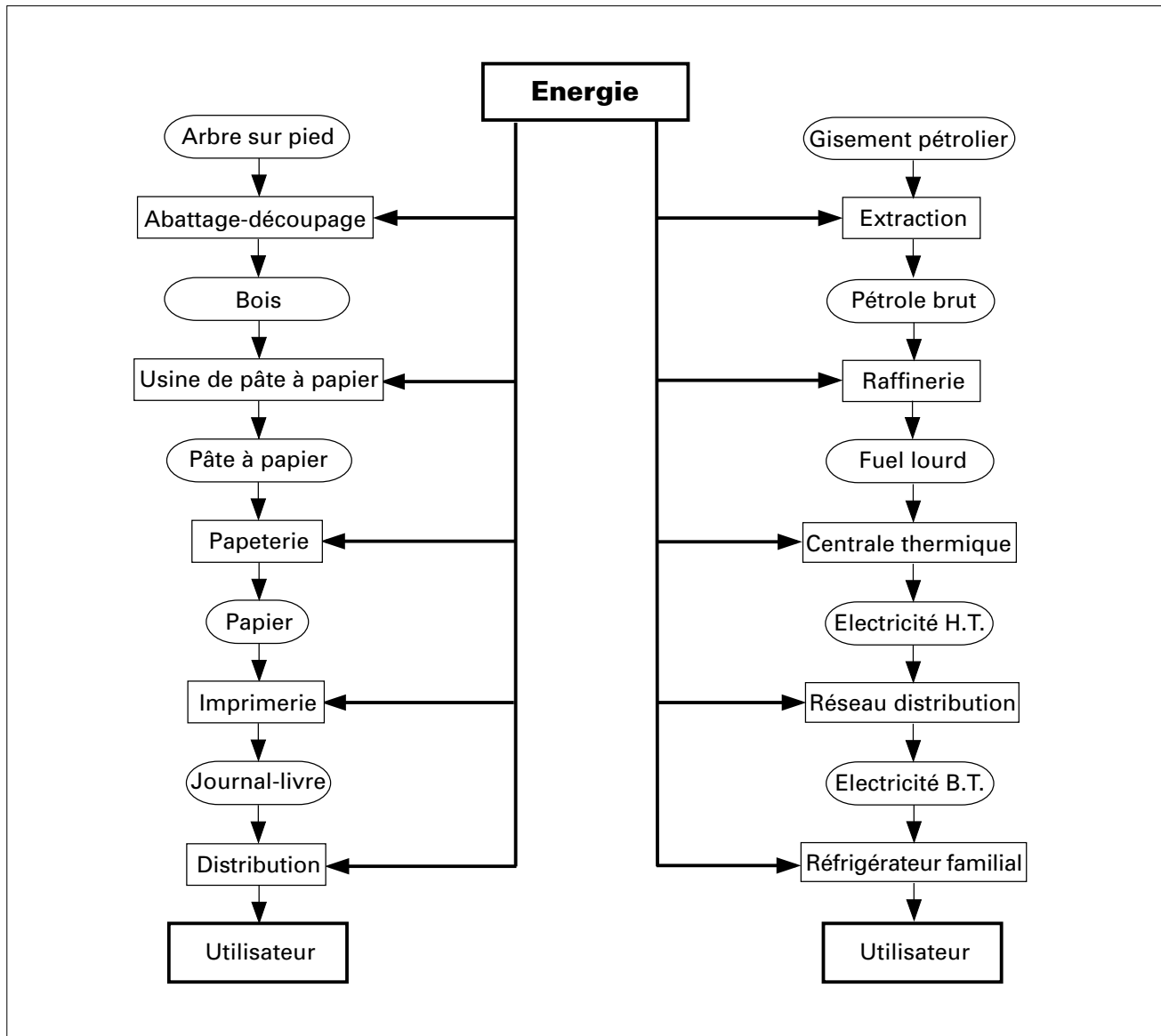


Figure 3: Enchaînement d'opérations industrielles.

Toute préoccupation d'utilisation rationnelle d'énergie et en particulier de l'énergie électrique présuppose, avant un inventaire, un bilan et une analyse du processus industriel considéré et/ou de l'enchaînement d'opérations industrielles.

La figure ci-dessus montre deux exemples d'enchaînement d'opérations industrielles, qui partent de l'exploitation de ressources naturelles, passent par leurs transformations en divers matériaux, matières consommables et objets manufacturés et aboutissent

à la distribution de services. La chaîne de gauche est la fabrication d'un journal à partir d'un arbre sur pied et celle de droite est la fabrication d'un glaçon dans le réfrigérateur.

Une autre image est donnée par la représentation en parallèle des flux de matériaux, d'énergie et de connaissances. Un flux d'énergie est une puissance.

Dans le cas particulier d'une chaîne *linéaire*, où chaque étape fabriquerait un seul produit fonctionnel

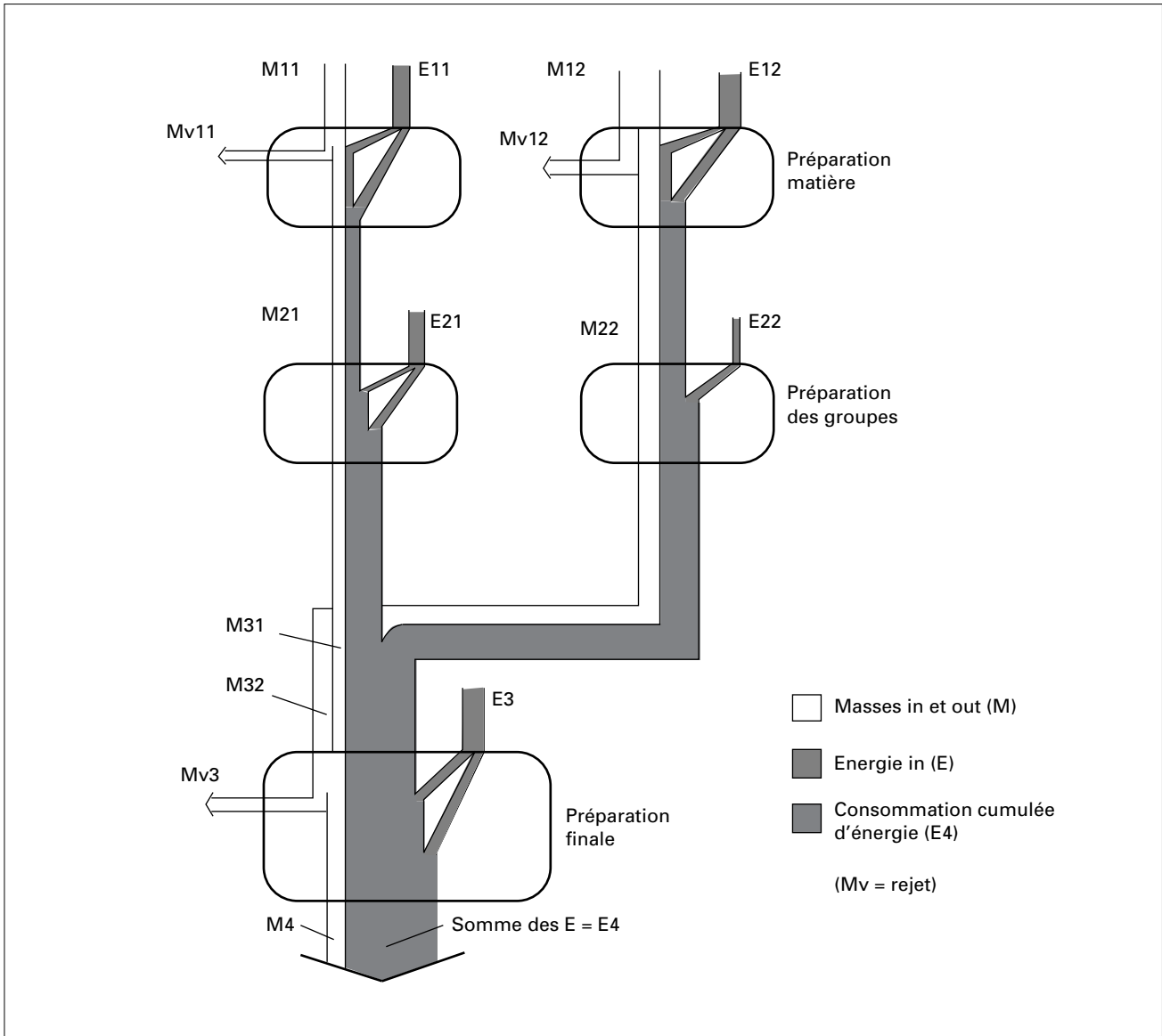


Figure 4: Flux de « masses » et flux d'énergie.

à partir d'une seule matière première et en utilisant un seul vecteur énergétique, il serait très facile d'établir le bilan d'énergie de chaque étape, puis de cumuler ces bilans pour calculer le contenu énergétique du produit final. Ce dernier serait la somme de tous les apports d'énergie aux étapes successives, rapportée à une unité du produit final.

Mais ce cas idéal de chaînes linéaires indépendantes n'existe pas. Toutes les chaînes industrielles sont au contraire fortement interconnectées: en effet, de

chaque étape sortent simultanément plusieurs produits fonctionnels (produits dits principaux et sous-produits). De plus, chaque étape utilise plusieurs types de matières premières et plusieurs sources d'énergie.

L'inventaire des flux permet de définir à chaque étape du processus les valeurs locales et cumulées consommées des matériaux (principaux et consommables), des énergies (consommation cumulée d'énergie-CCE) et des connaissances/informations mises en œuvre.

3. Une nouvelle approche

3.1 Ressources naturelles

Les ressources naturelles intervenant comme facteur de production sont des trois types suivants :

- matière ;
- énergie ;
- information/connaissance.

Ces trois facteurs sont indépendants les uns des autres et, de ce fait, ne sont pas non plus substituables de n'importe quelle manière. Leur relation a été définie de la manière suivante :

Without matter there is nothing, without energy matter is inert, and without information, matter and energy are disorganized, hence useless.

(Anthony Oettinger, Bell D., *The Social Framework of the Information Society* – 1979)

Matière et énergie sont extraits des ressources naturelles pour entrer dans le système économique. Les informations sont, d'une part contenues dans l'écosystème global et permettent le fonctionnement de celui-ci et la production des ressources naturelles renouvelables et, d'autre part sont générées par l'homme dans le développement du système économique (know-how). Elles permettent à partir de ressources naturelles de produire des produits fonctionnels.

Dans le système économique, les facteurs de production, matière, énergie et information seront transformés et en fin de compte retourneront à l'écosystème global. Des matières utiles deviendront des déchets et de l'énergie utile se transformera en des «échauffements» incapables d'exécuter un travail. Les déchets peuvent être recyclés et retransformés en matières utiles, cela par l'emploi supplémentaire d'énergie. Les « informations » contenues dans l'écosystème global peuvent aussi être dérangées par les processus économiques (émission des polluants) et peuvent perturber les fonctions complexes de l'écosystème. Seules les informations, « know-how » technique, ne sont pas dégradées par les processus de production, mais sans énergie et matière utiles elles ne servent à rien non plus.

Au cours du développement économique, les ressources naturelles peuvent et sont substituées par d'autres ressources naturelles (le charbon par le pétrole, le fer par l'aluminium, etc.). Cependant l'énergie utile, en tant que grandeur physique de base et facteur de pro-

duction, ne peut pas être remplacée par une autre ressource naturelle. Différentes ressources d'énergie sont caractérisées par différentes formes de matières, et différents processus de production se différencient par l'utilisation plus ou moins efficace de l'énergie utile. Différents vecteurs ou agents énergétiques et différentes techniques d'utilisation de l'énergie utile sont substituables, mais pas l'énergie elle-même.

Ainsi dans une analyse du découplage de l'accroissement économique à la consommation des ressources, l'énergie, en tant que facteur physique de production, prend toute son importance car elle ne peut intervenir dans ce découplage que par une économie (réduction), c'est-à-dire une utilisation plus rationnelle et non par une substitution. *La consommation énergétique est ainsi le facteur le plus important et l'indicateur universel dans le découplage de l'accroissement économique à la consommation des ressources naturelles.*

En conclusion, l'un des principaux objectifs de la recherche industrielle actuelle est de réduire les flux d'énergie, de matières premières et de nuisances, pour un même service rendu. Pour ce faire, il faut augmenter le flux d'information/connaissance apporté au système.

Supposons que l'objectif soit de produire une certaine quantité, imposée, d'un certain bien à une date imposée. Pour atteindre cet objectif, le décideur aura le choix entre de nombreuses combinaisons de consommations des divers intrants : les intrants sont, au moins en partie, substituables les uns aux autres.

Exemple de substitution : matière-énergie

Considérons à titre d'exemple l'extraction d'un métal à partir d'un minerai par des opérations successives de concassage-broyage, lavage par solvant, précipitation, calcination, réduction, etc. Pour produire P kg de métal, on aura à choisir entre consommer beaucoup d'énergie et peu de minerai, ou bien faire l'inverse. Cette substituabilité peut être examinée sur le plan purement énergétique. La consommation totale d'énergie (pour 1 kg de produit) s'écrit :

$$E_{\text{tot}} = E + M \cdot CE$$

avec CE = contenu énergétique de la matière entrant
M = masse du minerai
E = énergie opératoire

ou encore

$$M = \frac{E_{\text{tot}}}{CE} - \frac{E}{CE}$$

d'où le diagramme de substitution suivant $M = f(E)$:

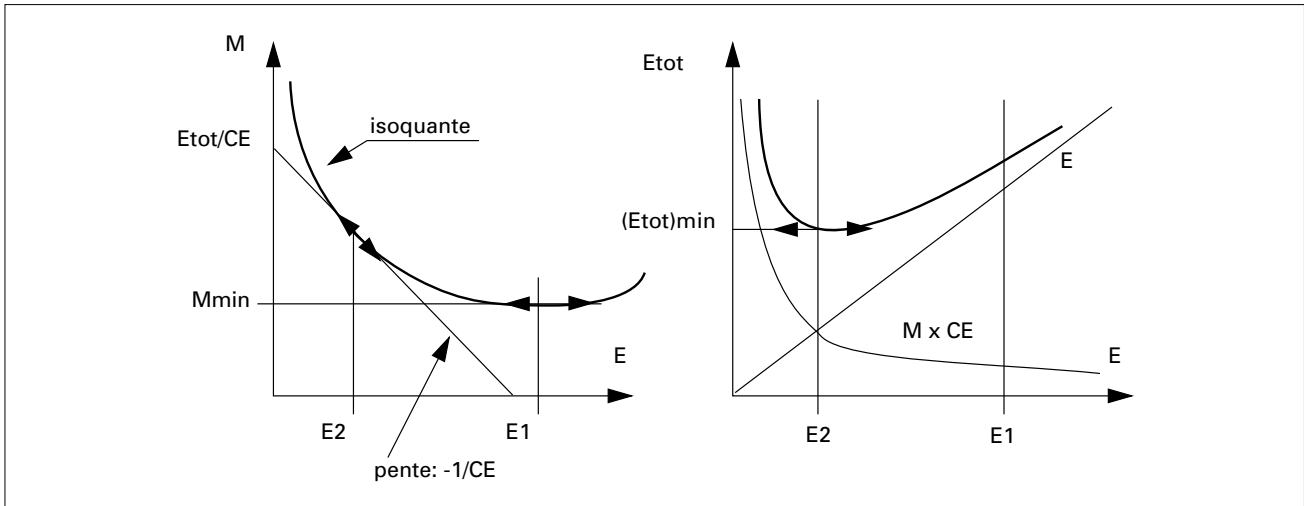


Figure 5: Exemple de substitution d'intrants.

Le point de l'isoquante qui conduit au minimum de consommation d'énergie totale est donc celui dont la tangente a la pente $-1/CE$.

La figure de droite présente l'énergie totale E_{tot} , en fonction de l'énergie opératoire E . E_{tot} est la somme d'un terme croissant E et d'un terme décroissant $M \cdot CE$.

Les deux valeurs E_1 , qui correspondent respectivement au minimum de l'énergie opératoire et E_2 au minimum de l'énergie totale, représentent des états de fonctionnement souvent fort différents.

Cette substituabilité du minerai par de l'énergie est avantageusement représentée sur un diagramme bidimensionnel comme présenté à la figure 5. On y tracera un réseau de courbes appelées « isoquantes » ou « isoproduction » correspondant à une quantité P de produit donnée.

3.2 Mesure de la productivité de la consommation d'énergie

Malheureusement, le rendement énergétique communément utilisé est un indicateur inadéquat du potentiel d'amélioration de la productivité/efficacité énergétique à moyen et long termes.

Le seul moyen efficace de mesurer les vraies performances est de comparer l'énergie actuellement

utilisée ou consommée dans un procédé avec la valeur théorique minimale d'énergie nécessaire pour exécuter un tel procédé ou action.

Par exemple, le chauffage d'une maison peut être défini par la quantité d'air chaud à fournir pour maintenir à une certaine valeur la température intérieure en fonction des saisons et des pertes thermiques de la maison. Pour le moteur et la transmission d'une voiture, cela peut être défini par la quantité de benzine nécessaire pour maintenir la vitesse de 90 km/h sur 1 km en donnant la traînée du véhicule et l'usure des pneus. Pour l'usinage par enlèvement de copeaux, il s'agit de donner la valeur spécifique d'énergie de coupe par unité de volume de matière enlevée, etc. Ce qui est important est de ne faire référence à aucune technique (processus) d'exécution et de ne considérer que le problème physique à accomplir.

Ainsi la vraie mesure de la productivité énergétique ou efficacité énergétique est donnée par la relation :

$$\frac{\text{Energie théorique minimale nécessaire pour accomplir un procédé}}{\text{Energie effectivement consommée pour accomplir ce procédé}}$$

Cette valeur est appelée efficacité selon le deuxième principe, parce que le besoin minimum d'énergie pour réaliser la tâche ou procédé est déterminé par le deuxième principe de la thermodynamique.

Exemple de valeurs données par l'application de cette mesure de productivité ou d'efficacité énergétique :				
Procédé pour la préparation	Acier	Papier	Aluminium	Ciment
Energie théorique minimale	7,4 GJ/t	0,1 GJ/t	28,8 GJ/t	0,8 GJ/t
Energie actuelle consommée	20 GJ/t	22 GJ/t	177 GJ/t	5,5 GJ/t
Rendement énergétique moyen	0,37	0,0045	0,16	0,14

Diverses études RAVEL consacrées à la consommation énergétique de procédés ont donné les résultats suivants :

Production du ciment

Elle était de 5,5 GJ/t en 1960, elle est aujourd'hui de 3,6 GJ/t, d'où une efficacité énergétique de 0,8 GJ/3,6 GJ = 0,22 ou 22 %.

Autres indications d'efficacité énergétique

Eau chaude	par gaz 3%	par électricité 1,5%
Réfrigération		4%
Transport automobile	12% !(th. min = 0,2%)	
Production mécanique		8%

Ces valeurs indicatives des efficacités énergétiques de procédé démontrent bien quel peut être le potentiel de gain énergétique réel. Elles sont significatives de l'intérêt de leur application.

3.3 Grandeurs énergétiques spécifiques (ou indicateurs énergétiques spécifiques caractéristiques)

Il existe dans la littérature différents indicateurs énergétiques et nous reprenons ici ceux définis par le Professeur I. Knoepfel du PSI (Paul Scherer Institut), à savoir :

Consommation spécifique d'énergie ou intensité énergétique (Energy Intensity) **EI** :

$$EI = \frac{\text{Energie finale consommée}}{\text{Masse ou volume de produit}}$$

Dans le but de mieux appréhender le système considéré, on parlera d'intensité énergétique totale **EIt**

pour l'ensemble d'une industrie, c'est-à-dire y compris l'éclairage, le chauffage, etc. (énergie directe et énergie indirecte) et d'intensité énergétique de procédé **Elp** lorsque l'analyse est limitée au procédé (énergie directe).

Un deuxième indicateur est l'intensité énergétique correspondant à la meilleure installation existante d'un échantillon donné et appelé « best plant value » **Elbp**. Cette grandeur est généralement significative seulement à l'échelle d'un pays avec un nombre suffisant d'installations à même but.

Un autre indicateur en relation avec les possibilités techniques démontrées est le **Elbat** pour « best available technology ». Il tient compte de l'état des technologies opérationnellement prouvées au moment de l'étude.

On parle encore de **Elit** pour « innovative technology » et de **Eltl** pour « theoretical limit ». L'Elit est basé sur des technologies à l'état de recherche et susceptibles d'être introduites à moyen terme alors que l'Eltl représente l'énergie théorique minimale des procédés ou des produits sur la base de transformations chimiques et/ou physiques qui l'amènent dans sa forme finale considérée. (Précédemment nous avons appelé **Eltl** l'énergie théorique minimale pour accomplir un procédé.)

A partir de ces indicateurs, il est possible de déterminer les potentiels théoriques d'économie suivants :

- Potentiel économique d'économie d'énergie (economical energy savings potential)
ESPec = (EI moyen – Elbp) · production.
- Potentiel technique d'économie d'énergie
ESPte = (Elmoyen – Elbat) · production.
- Potentiel théorique d'économie d'énergie
ESPth = (Elmoyen – Elit) · production.

La définition de ces dernières grandeurs n'est pas aisée et comporte toujours une composante spéculative. Les valeurs d'intensité énergétique s'expriment fréquemment en GJ/tonne et les unités de potentiel d'économie sont les unités d'énergie traditionnelles en J ou multiples de Joule. Par essence et à l'exception de l'intensité énergétique théorique minimale qui dépend de la nature chimique des produits, ces grandeurs sont évolutives, ce qui peut rendre certaines valeurs de la littérature rapidement obsolètes.

3.4 Grandeurs énergétiques caractéristiques d'un procédé (opération et enchaînement d'opérations)

Ces grandeurs énergétiques spécifiques caractéristiques sont indépendantes de la branche et des opérations et enchaînement d'opérations. Elles permettent d'évaluer et de valoriser la consommation d'énergie des branches industrielles et des procédés/processus. Ces grandeurs sont à la base des comparaisons et d'échanges d'expériences entre entrepreneurs industriels. Ces comparaisons permettent de mettre en évidence et d'identifier les opérations de trop grandes consommations et de démontrer comment l'utilisation rationnelle de

l'énergie peut être appliquée. A la suite de mise en application de mesures de rationalisation, ces mêmes grandeurs seront utilisées pour apprécier les efficacités réelles.

Pour l'établissement de ces grandeurs spécifiques caractéristiques, ce n'est pas la précision qui est déterminante mais bien la praticité de leurs applications. Chaque exploitation devrait définir ses propres grandeurs, les mesurer, les calculer et les interpréter. Ces grandeurs devraient pouvoir être obtenues sur la base des statistiques internes de l'entreprise. Il est recommandé de subdiviser le processus en un enchaînement d'opérations simples pour lesquelles la définition des limites est relativement aisée.

Résumé de la méthode pour l'établissement des grandeurs spécifiques: (nous renvoyons les lecteurs à l'étude RAVEL – « Valeurs caractéristiques de processus industriels » N° 724.397.12.54 f):

- définition du but;
- établissement des limites du système considéré;
- définition des grandeurs à mesurer;
- définition des grandeurs de références;
- exécution des mesures;
- établissement des grandeurs spécifiques caractéristiques;
- établissement des flux d'énergie, interprétation et valorisation des mesures;
- valorisation;
- échanges d'expériences et de résultats.

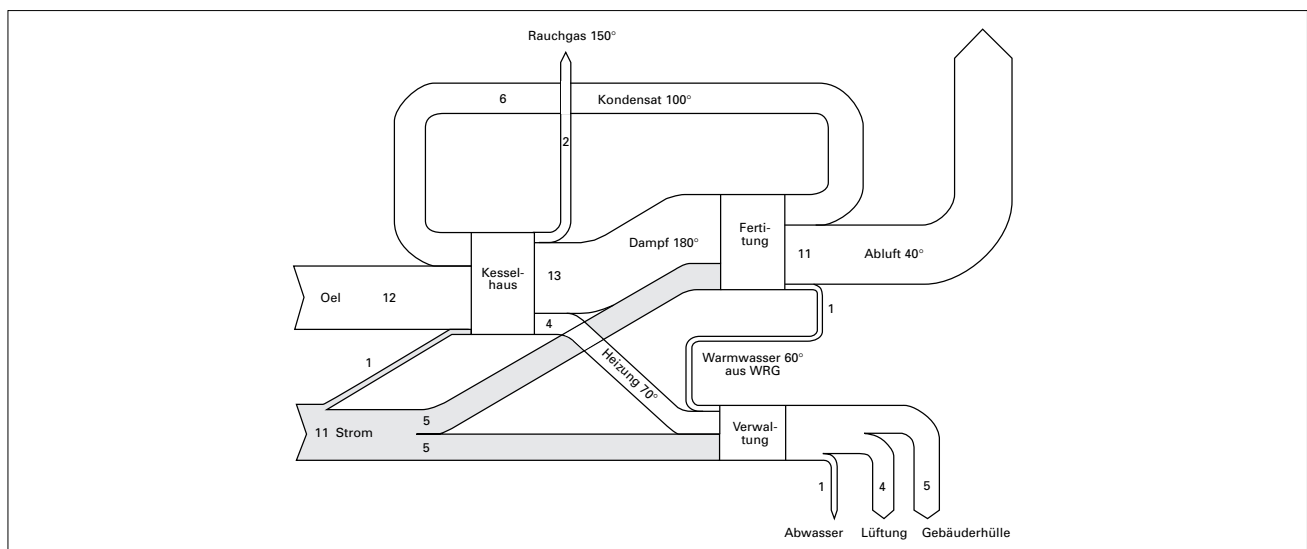


Figure 6: Schéma de représentation des flux d'énergie (unités GWh, MJ).

3.5 Considérations sur les grandeurs spécifiques (ou indicateurs d'intensité énergétiques)

3.5.1 Schéma des flux d'énergie

Tous les vecteurs d'énergie entrant dans le système sont suivis jusqu'à la sortie. Ils sont représentés graphiquement selon l'exemple de la figure 6. A chaque opération, seulement pour la comptabilité des flux, on peut dire que l'énergie-input est égale à l'énergie-output. Il est évident que pour des calculs de valorisation de l'énergie seule **l'exergie** peut être utilisée (2^e principe). Dans la représentation graphique, toutes les énergies sont données dans la même unité, par exemple kWh, J, MJ, % de la consommation générale, grandeurs spécifiques comme kWh/pièce, etc. Dans une telle représentation, les flux d'énergie sont donnés pour un certain état et il y a lieu de prendre quelques précautions lors de l'interprétation. Ainsi, des variations ou changements de puissance ne sont pas représentés, la qualification des énergies n'est pas mentionnée (par exemple pas d'indication de température), de même que les valeurs des coûts des vecteurs d'énergie.

Lorsque, plusieurs installations et/ou machines doivent être comparées, un certain nombre de caractéristiques doivent être données. Par exemple:

- installations et machines avec des capacités différentes;
- installations ou parties d'installation utilisant des technologies différentes;
- différents processus (enchaînements d'opérations) pour obtenir le même produit;
- installations qui produisent des produits semblables;
- installations avec différentes charges et conditions d'exploitation.

Pour connaître l'influence d'un de ces paramètres sur la consommation spécifique d'énergie, il y a lieu de faire des mesures dans des conditions équivalentes à l'exception du paramètre dont on veut déterminer l'influence. Lorsque cette influence est connue, il y a lieu alors d'apporter des corrections par rapport à une valeur standard définie. La méthode consistant à utiliser des productions horaires différentes permet dans certains cas d'observer les variations des grandeurs spécifiques et donne des indications intéressantes du comportement énergétique des installations (figure 7).

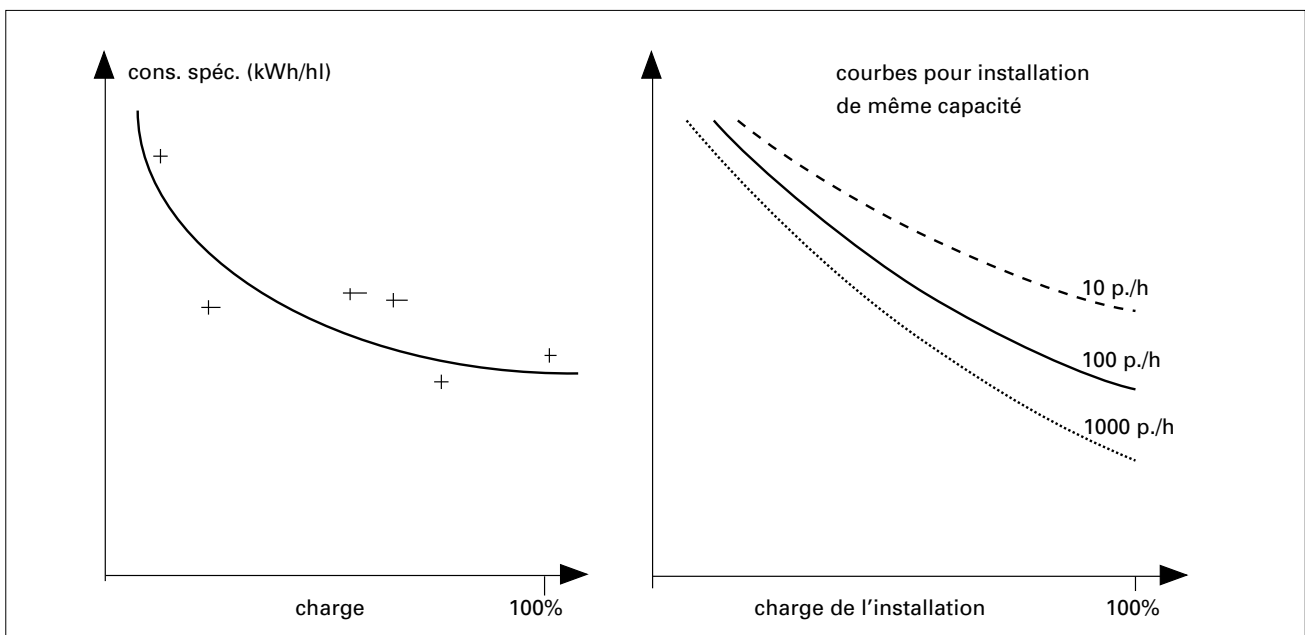


Figure 7: Energie spécifique = f (charge).

3.5.2 Rapport de l'énergie et de la puissance

Nous simplifions à l'extrême et admettons que le seul vecteur énergétique utilisé soit l'électricité. Nous allons devoir comparer l'énergie annuelle consommée (kWh ou MWh) avec la valeur de la puissance installée (kW ou kVA ou MVA). La division de la première valeur par la seconde nous indiquera l'équivalence de la durée en heure de fonctionnement à pleine puissance. C'est donc une bonne indication du dimensionnement énergétique de l'installation. La valeur de la puissance installée est donnée soit par la valeur de la puissance apparente de la station du transformateur d'entrée, soit par la somme des puissances apparentes des équipements installés.

Une autre indication, un peu plus intéressante, est l'établissement du diagramme ordonné de la charge annuelle de l'installation.

Pour se faire, nous mesurons en permanence la puissance instantanée (kW) consommée à l'entrée, par exemple au réseau, et nous la reportons de façon ordonnée sur un graphique. $P_{inst.} = f(\text{durée en heure})$.

La surface sous la courbe est la valeur de l'énergie annuelle consommée. La charge de l'installation par rapport à la puissance totale installée peut également être appréciée, de même que l'évolution de la charge par rapport au nombre d'heures annuel disponible de 8760 heures.

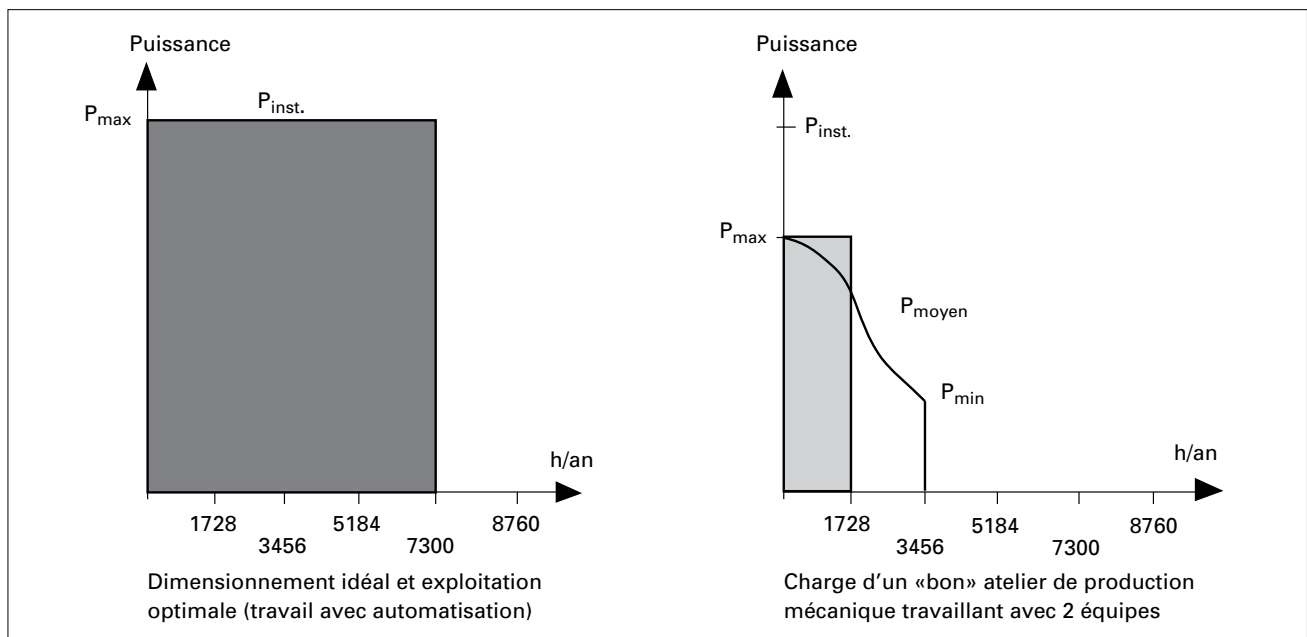


Figure 8: Diagramme de charge ordonné.

- 1728 heures correspondent au travail avec une équipe.
- 3456 heures correspondent au travail avec deux équipes.
- 5148 heures correspondent au travail avec trois équipes.
- 7300 heures correspondent au travail avec automatisation/robotisation.

Remarque:

Il est important de connaître au mieux ces indications au moment du planning de nouvelles installations ou lors d'améliorations. Non seulement les puissances de pointes coûtent relativement chères à l'exploitation, mais elles conduisent à des dimensionnements trop grands, donc à des coûts d'installations supérieurs inutiles et aussi consommateurs d'énergie grise (contenu énergétique) plus importants.

Le plan de charge d'un atelier de production mécanique est particulièrement favorable lorsqu'il concerne une entreprise fabriquant régulièrement de grandes séries et dont l'exploitation est organisée sur la base de trois équipes. Pour un atelier courant travaillant avec une équipe vous pouvez très simplement figurer la courbe de charge maximale () !!

4. Valorisation énergétique de la récupération et du recyclage des matériaux

Nous avons admis que les déchets ont une valeur énergétique nulle. Cependant ils peuvent intervenir directement et positivement dans le calcul cumulé du contenu énergétique des produits fonctionnels (énergie grise). Prenons comme exemple le cas intéressant de l'aluminium.

La figure ci-dessous montre le schéma fonctionnel de fabrication de pièces de véhicules. Ce schéma connu, il convient de déterminer l'énergie consommée dans chacune des activités en commençant par l'extraction du minerai jusqu'à la fabrication d'une pièce spécifique, en définissant la teneur en énergie de celle-ci.

La teneur en énergie d'un produit fini, c'est-à-dire l'énergie « investie » dans ce produit **E_i** apparaît comme la somme de l'énergie **E_a** que l'on doit consentir à amortir durant la vie du produit, et de **E_r** qui est la part d'énergie récupérable par recyclage.

$$E_i = E_a + E_r$$

La part recyclable **E_r** est définie comme la différence entre l'énergie nécessaire pour produire le métal « vierge » en lingot moins la différence de la somme des deux dépenses énergétiques supplémentaires **E_c** énergie de collecte des métaux usés et **E_{df}** énergie de refonte du métal usé.

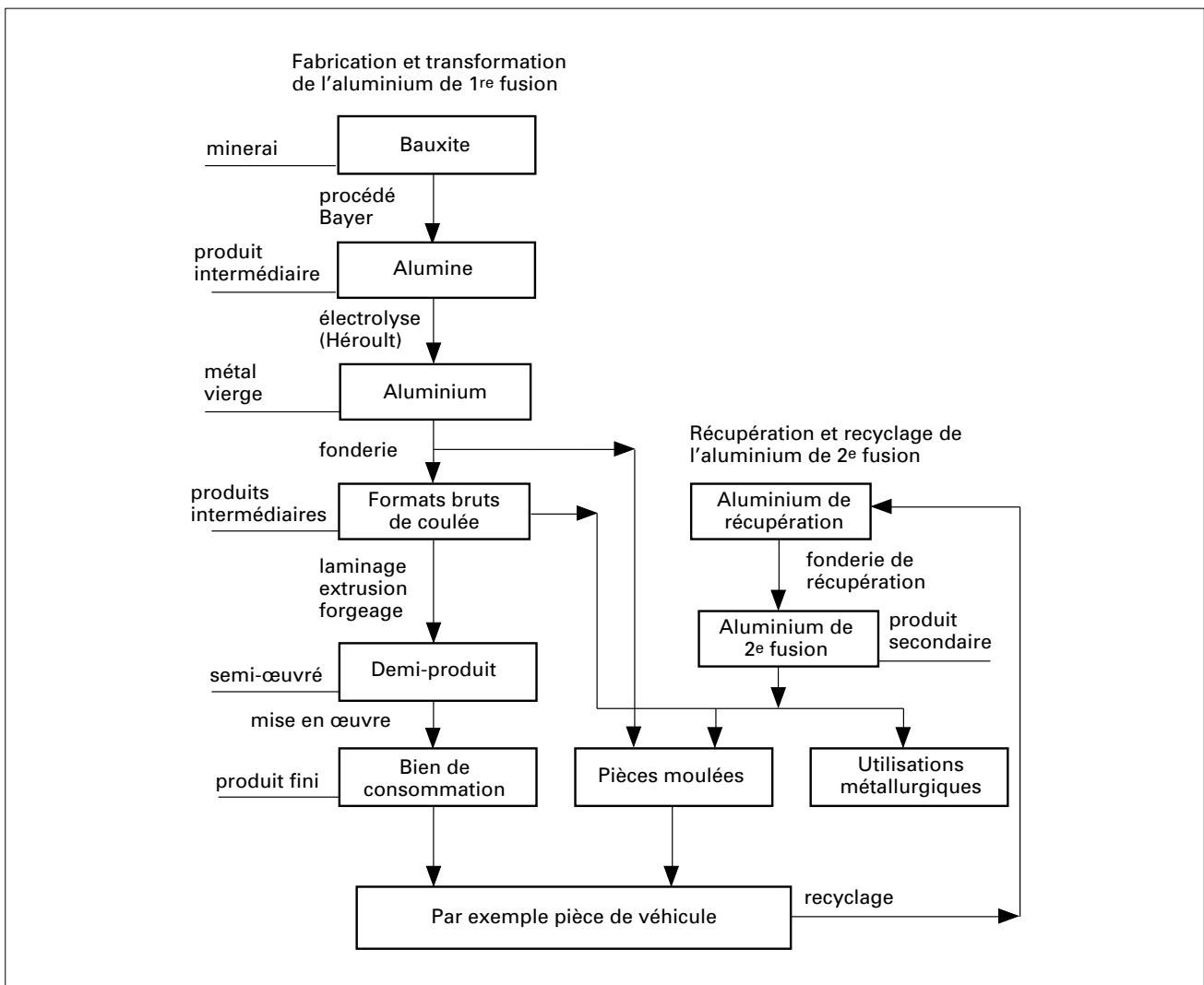


Figure 9: Schéma fonctionnel de la fabrication, de la transformation et de la mise en œuvre de l'aluminium (enchaînement des opérations).

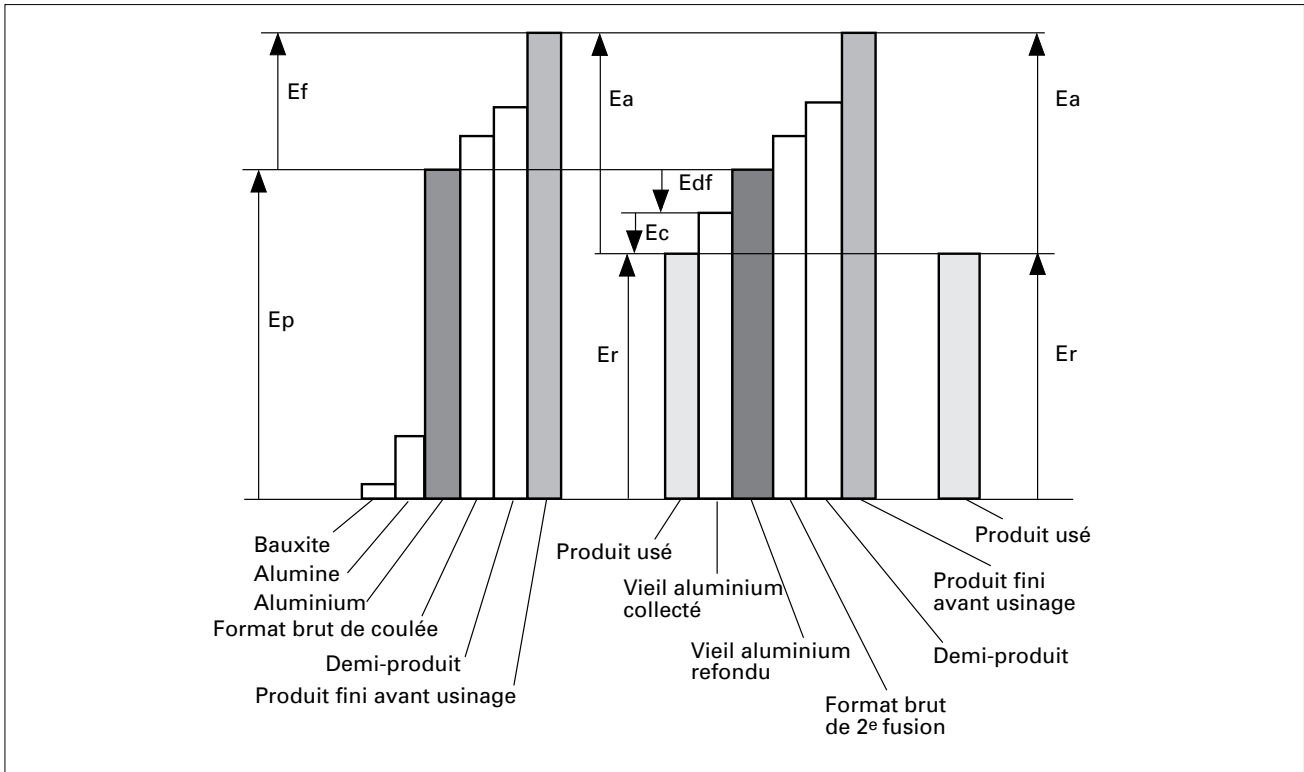


Figure 10: Teneur en énergie pour chaque stade d'activité.

Dans le cas d'alliages usuels, il n'existe plus guère de distinction entre les métaux de 2^e et de 1^{re} fusion au niveau de l'utilisation ; si certaines différences persistent, elles sont le fait d'habitudes commerciales plutôt que d'impératifs techniques. C'est pourquoi la teneur en énergie d'un lingot de 2^e fusion peut être admise égale à celle d'un lingot de 1^{re} fusion, soit **Ep**.

D'où :

$$E_c + E_{df} + E_r = E_p \text{ ou } E_r = E_p - E_c - E_{df}$$

et par conséquent, en appelant **Ef** l'énergie de mise en œuvre du métal pour la production de pièces :

$$E_i = E_f + E_p = E_r + E_a \text{ et } E_a = E_c + E_{df} + E_f$$

En ce qui concerne maintenant la consommation totale d'énergie liée à l'emploi d'un produit déterminé, l'énergie que l'on doit amortir est donc la somme de :

- l'énergie de collecte du vieux métal ;
- l'énergie de seconde fusion ;
- l'énergie de mise en œuvre du métal.

Elle est égale à la somme de l'énergie **Ea** investie dans le produit, et qu'il convient d'amortir, et de l'énergie nécessaire à l'utilisation (l'exploitation) ou au fonctionnement du produit.

Exemples :

Acier	1 ^{re} fusion	7,77 kWh/kg
	2 ^e fusion	3,96 kWh/kg
	Er	Er = 7,77 - 3,96 = 3,81 kWh/kg (49%)
Aluminium	1 ^{re} fusion	72,7 kWh/kg
	2 ^e fusion	20,0 kWh/kg
	Er	Er = 72,7 - 20,0 = 52,7 kWh/kg (72,5%) !
Cuivre	1 ^{re} fusion	20,1 kWh/kg
	2 ^e fusion	13,58 kWh/kg
	Er	Er = 20,1 - 13,58 = 6,52 kWh/kg (32%)
Plomb	1 ^{re} fusion	3,61 kWh/kg
	2 ^e fusion	2,64 kWh/kg
	Er	Er = 3,61 - 2,64 = 0,97 kWh/kg (27%)
Etain	1 ^{re} fusion	15,0 kWh/kg
	2 ^e fusion	5,8 kWh/kg
	Er	Er = 15 - 5,8 = 9,2 kWh/kg (61%)

4.1 Flux des matériaux par habitant et par an aujourd'hui et dans le futur

La représentation graphique (figure 11) indique le flux de matériel par habitant, aujourd'hui et dans le futur en kg/habitant et par an. Ce flux correspond aujourd'hui à une consommation moyenne par personne pendant 70 ans de vie de :

- produits pétroliers 250 tonnes
- eau à tout usage 10 000 tonnes
- bois 90 tonnes
- métaux 30 tonnes
- non métaux 650 tonnes
- engrais 5 tonnes
- pesticides, etc. 0,1 tonne
- produits agricoles bruts 720 tonnes
- minerais 420 tonnes
- air pour la combustion 8,106 m³

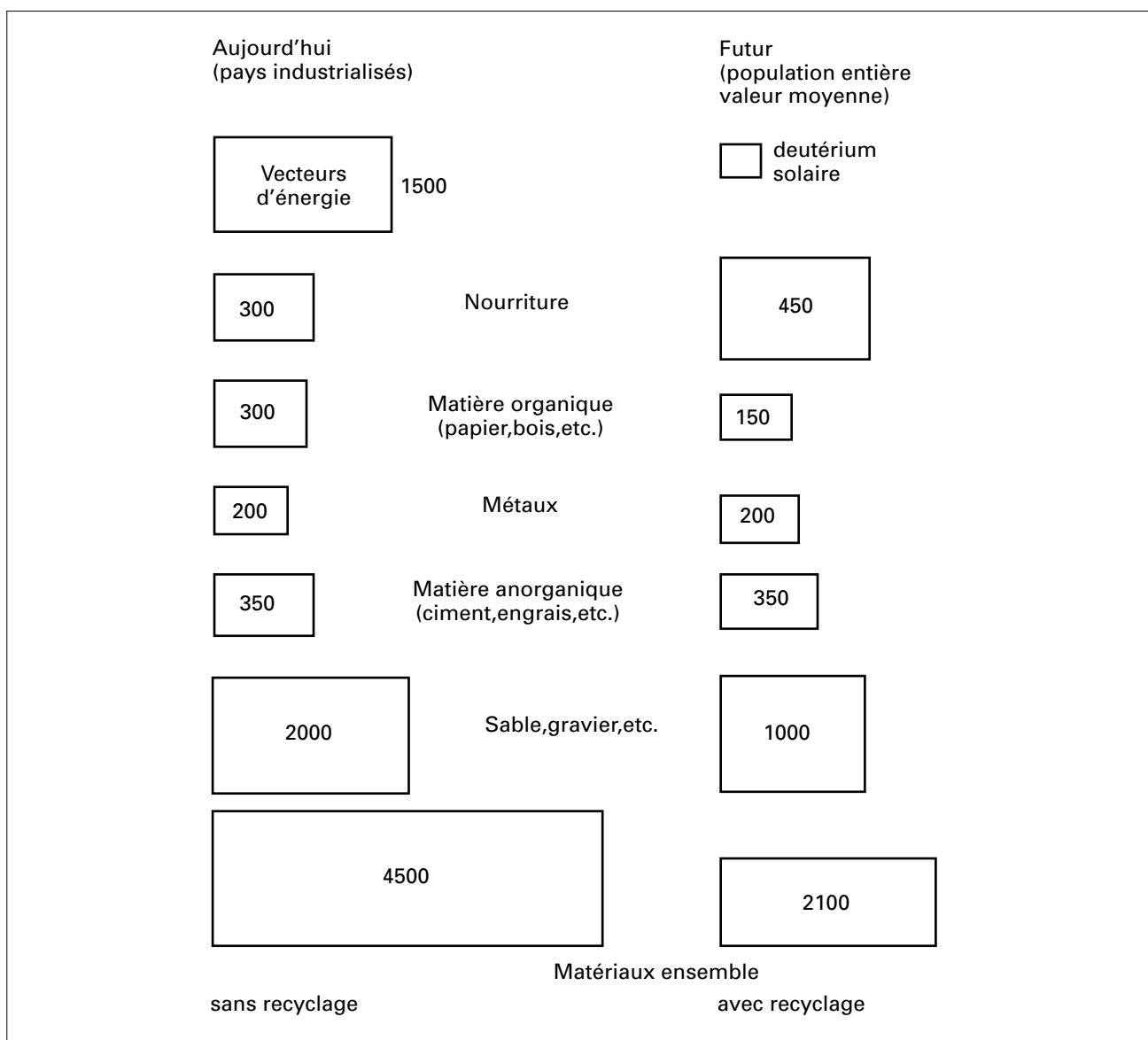


Figure 11: Flux de matériel par habitant et par an aujourd'hui et dans le futur.

5. Exemple pratique de calcul des grandeurs spécifiques caractéristiques appliqué à la fabrication de moteurs asynchrones normalisés

Le marché suisse et mondial des moteurs est nettement dominé par les moteurs asynchrones normalisés. En Suisse, ce marché est de l'ordre 210 000 pièces par an, un peu moins que pour le secteur des automobiles puisque celui-ci représente un marché de 300 000 pièces par an.

Le chiffre d'affaires de ces moteurs est pour l'Europe de l'ordre de 7 milliards de francs par an.

5.1 Analyse des grandeurs caractéristiques

Cette analyse se base sur les moteurs asynchrones à cage normalisés (DIN 42673, parties 1 à 3). La gamme de puissance prise en considération va de 0,75 kW à 132 kW. L'analyse se base sur les catalogues de cinq fournisseurs (référence : Professeur Dr Ing. H. Schaefer – TUM, 1986).

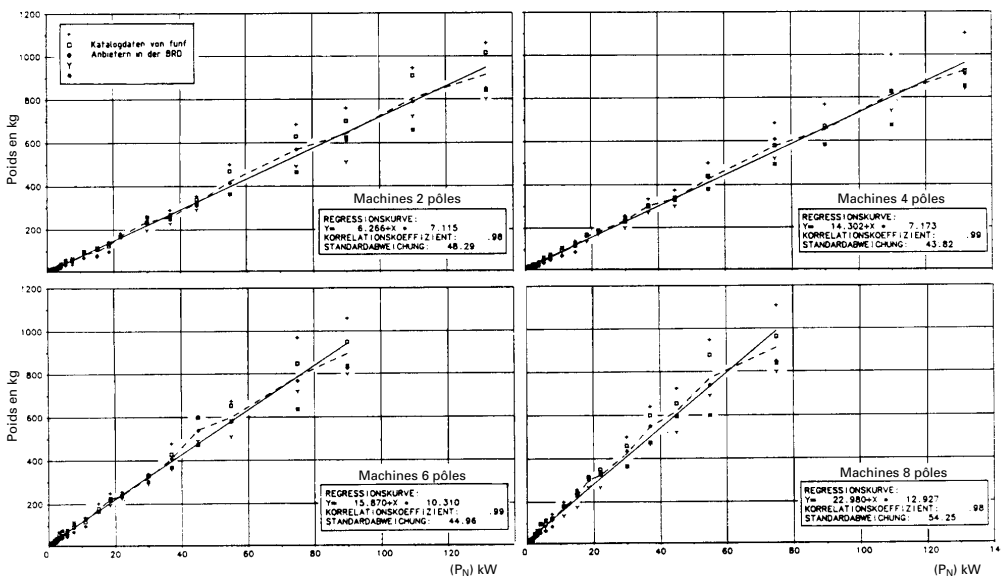


Figure 12: La masse du moteur en fonction du nombre de pôles.

Nous remarquons que les variations entre constructeur sont de l'ordre de $\pm 15\%$. Ainsi, même avec une normalisation, il subsiste une marge de manœuvre pour le constructeur.

La fonction est de la forme:
 $M = 14,3 + 7,2 \cdot P_n$
 pour moteurs 4 pôles avec:
 M = masse (kg)
 P_n = puissance nom (kW)

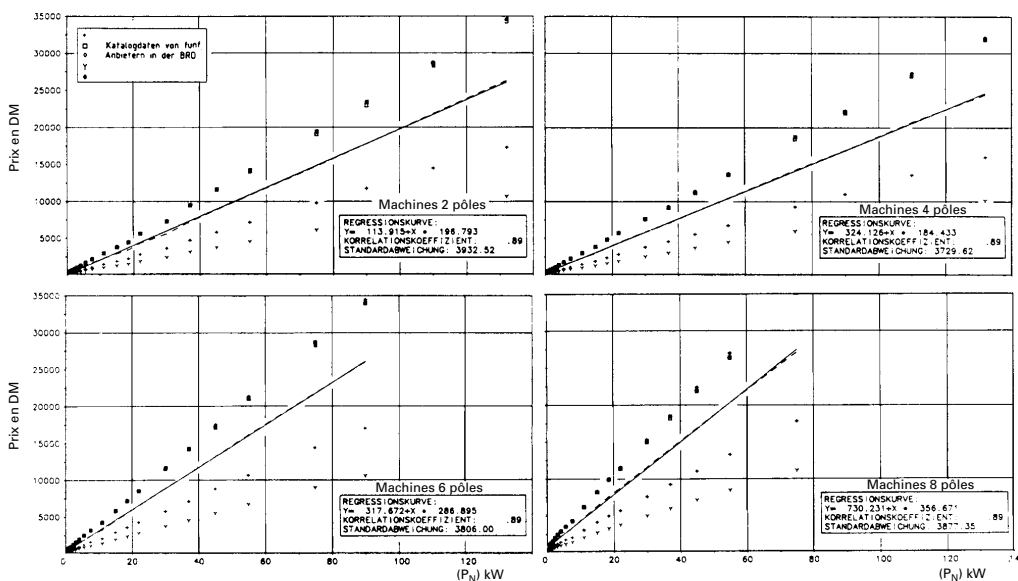


Figure 13: Le prix, selon liste de prix, en fonction de la puissance et du nombre de pôles.

La dispersion est ici encore plus grande surtout pour deux constructeurs. La fonction est de la forme:
 prix de liste =
 $= 324 + 1845 \cdot P_n$
 pour moteurs 4 pôles avec prix en DM
 P_n en kW

Figure 14:
Le rendement nominal
en fonction de la
puissance et du
nombre de pôles.

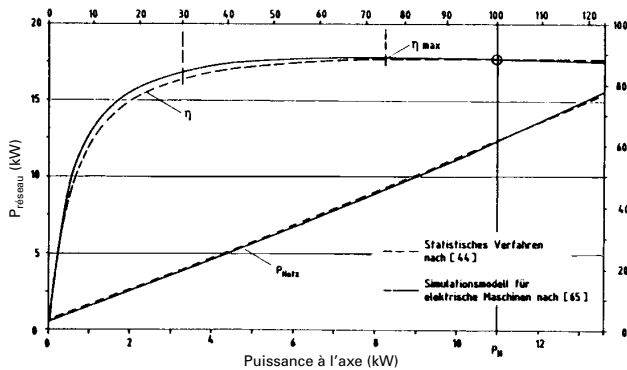
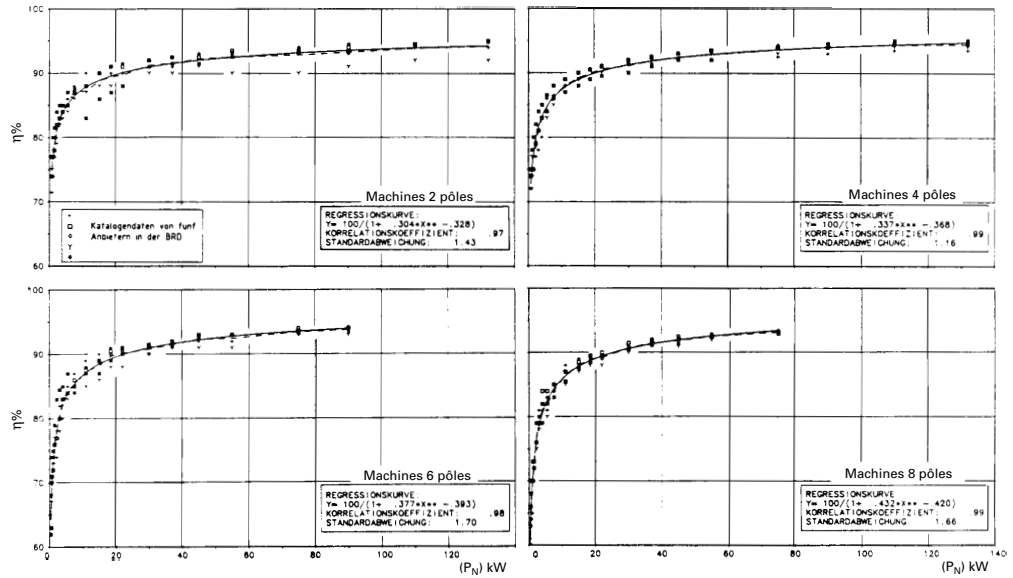


Figure 15: Le rendement en fonction de la charge.

Cet exemple est fait pour un moteur de 11 kW. La valeur maximale du rendement est atteinte pour une charge de 75%. En fait, le rendement varie relativement peu entre 30% et 120% de la charge. Au-dessous d'une charge de 30%, le rendement chute rapidement.

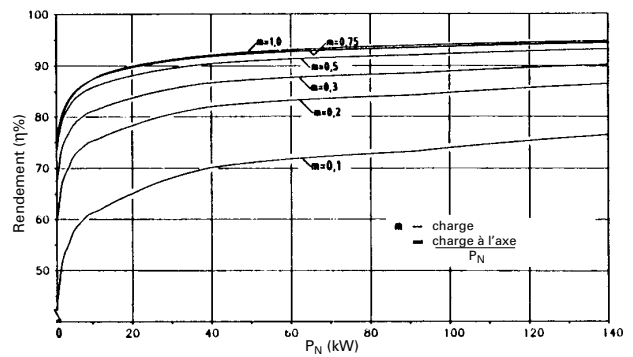


Figure 16: Le rendement en fonction de la charge et de la puissance nominale.

La figure 16 donne la variation de rendement en fonction de la charge et de la puissance nominale des moteurs. Ainsi une charge supérieure à 50% conduit à un rendement satisfaisant, alors qu'il ne l'est pas pour une charge inférieure à 30%.

6. Détermination du contenu énergétique cumulé pour trois grandeurs de moteurs asynchrones normalisés

Ces moteurs se composent d'environ 60 types de pièces différentes. Seuls 15 types de pièces sont importants dans notre calcul. Une « pièce » importante est la tôle du rotor. Il y a 330 tôles pour le moteur de 18,5 kW, 400 pour le 45 kW et de 500 pour le 90 kW.

Indication de fabrication pour 3 composants :

Ces indications figurent dans le tableau 17 ci-dessous.

Fabrication :

La fabrication peut être subdivisée en opérations externes et internes à l'entreprise. La répartition des consommations d'énergie est la suivante pour les trois types de moteurs considérés, voir le tableau 18. La moyenne arithmétique, calculée sur les trois types de moteurs, donne une consommation rapportée à l'énergie primaire de 20 100 MJ (64%) pour les opérations extérieures et 11 400 MJ (36%) pour les opérations internes.

Les dix plus gros consommateurs d'énergie électrique interne représentent 97% de la consommation totale. Parmi eux, la consommation indirecte intervient pour 43%, la plate-forme d'essais et de mesures pour 18%, l'éclairage pour 17% et l'informatique pour 5,4%.

La fabrication sur centre d'usinage CNC et tour à copier consomment respectivement 1,74% et 0,47% de l'énergie.

A titre de curiosité, le bobinage d'un enroulement intervient pour 0,13% de la consommation d'énergie électrique interne.

A titre d'exemple, quelques parts **d'énergie directe** dans des fabrications sont énumérées ci-après (pourcentage du contenu énergétique total) :

- machines-outils 22%
- équipements électriques 20%
- équipements industriels 19%
- industrie papier et carton 75%

Machine-outil utilisée	Pièces/composants usinés		
	Carcasse	Flasque palier	Couvercle palier
Puissance installée	380 V, 160 A, 105 kVA	380 V, 100 A, 66 kVA	380 V, 100 A, 66 kVA
P à vide P cycle fabrication	7,8 kW 9,6 à 11,5 kW	6,0 kW 6,8 à 7,8 kW	5,0 kW 8,2 kW
P _{réactive} à vide P _{réactive} cycle fabrication	11 kvar 17 kvar	14,0 kvar 15,5 kvar	6,8 kvar 11,5 kvar
Cos à vide Cos cycle fabrication	0,58 0,53	0,39 0,43	0,59 0,58
P app. (S) à vide P app. (S) cycle fabrication	13,5 kVA 20,0 kVA	15,4 kVA 17,4 kVA	8,5 kVA 14 kVA
Charge par rapport à P _n	12%	13%	15%
Flux copeaux moyen Energie spc. consommée	0,4 à 0,9 cm ³ /s 7,5 à 3,5 Wh/cm ³	0,2 à 0,6 cm ³ /s 3,1 à 12 Wh/cm ³	0,24 cm ³ /s 8,2 Wh/cm ³
d'où un rendement énergétique moyen de: $\frac{\text{énergie spécifique min. théorique}}{\text{énergie consommée}} = 2 \text{ J/mm}^3 \text{ (valeur de référence) ou } \frac{2 \cdot 1/3,6 \text{ Wh/cm}^3}{6,5 \text{ Wh/cm}^3} = 0,085 \text{ ou } \mathbf{8,5\%}$			

Tableau 17: Résultats des mesures pendant l'usinage avec centre usinage CNC.

D'une manière générale, on peut dire que les consommations indirectes sont à prendre en compte lors de la mise en application de mesures d'économie.

Le tableau 18 ci-après fait la récapitulation des composants du calcul de la consommation cumulée d'énergie pour la fabrication complète des trois moteurs considérés. Il indique également trois grandeurs caractéristiques, à savoir la masse spécifique par rapport à la puissance (kg/kW), le contenu spécifique d'énergie par unité de masse du moteur (MJ/kg) et le contenu spécifique d'énergie par unité de puissance (MJ/kW).

Moteurs	180 M4 18,5 kW 165 kg	225 M4 45 kW 330 kg	280 M4 90 kW 610 kg
Cons. électrique (kWh)	980	1 460	2 430
Combustible (MJ)	6 800	10 600	18 400
Cons. non énerg. (MJ)	250	490	970
Energie finale (MJ)	10 300	15 900	27 100
Energie primaire (MJ)	18 500	28 300	48 000
Poids spéc. (kg/kw)	8,9	7,3	6,8
Cons. spéc. (MJ/kg)	112	86	79
Energie (MJ/kW)	1 000	630	530

Tableau 18: Contenu énergétique cumulé pour la réalisation des différentes grandeurs de moteurs.

La classification des dix éléments des plus gros consommateurs d'énergie donne les indications suivantes:

- | | |
|-----------------------------------------|-------|
| 1. Tôles électriques | 21,5% |
| 2. Part chauffage de l'entreprise | 16,3% |
| 3. Eléments de fonderie | 13,0% |
| 4. Aluminium(enroulement rotor) | 12,4% |
| 5. Consommation indirecte d'électricité | 9,8% |
| 6. Fils laqués (enroulement stator) | 6,6% |
| 7. Axe du moteur | 4,7% |
| 8. Plate-forme d'essais | 4,1% |
| 9. Part éclairage | 3,9% |
| 10. Centre informatique | 1,2% |

93,5%
de 28,3 GJ

Essai de détermination de la rentabilité énergétique en améliorant le rendement par des mesures de construction:

Nous admettons pour notre raisonnement une durée de vie moyenne des moteurs de dix ans, une charge moyenne de 30% et le rendement équivalent, des durées de fonctionnement annuelle de 2000 h, 4000 h et 6000 h comme paramètres de la consommation d'énergie électrique.

Nous obtenons les trois représentations graphiques ci-après (figure 19):

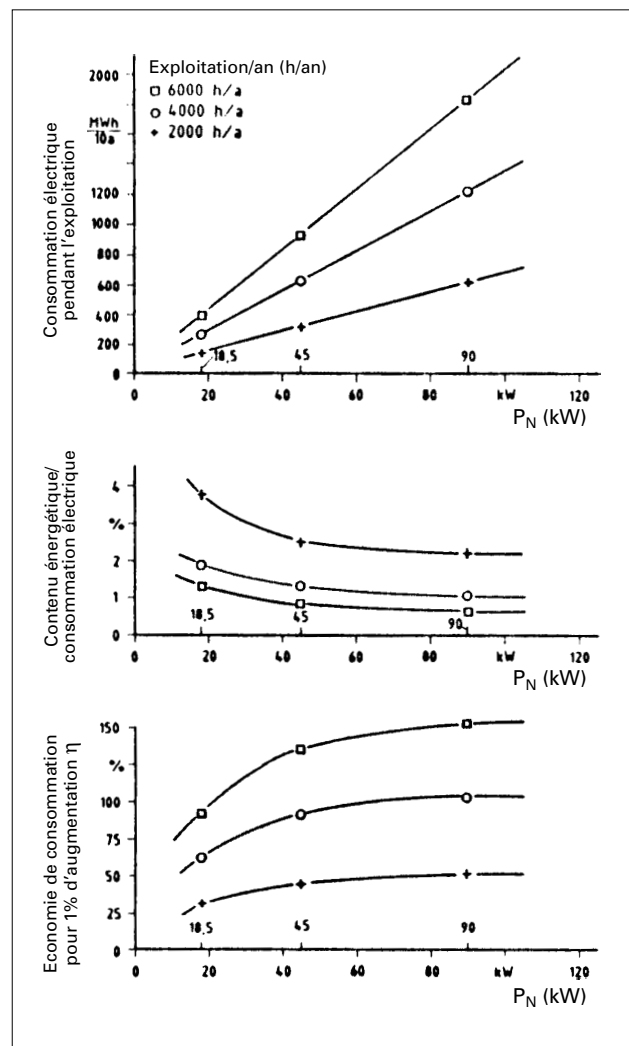


Figure 19: Contenu énergétique et consommation électrique.

Le graphique du milieu représente le pourcentage du contenu énergétique cumulé par rapport à la consommation électrique pendant dix ans. La part de 0,7 à 3,8% indique que des mesures d'amélioration du rendement sont raisonnables du point de vue énergétique.

Trois mesures peuvent être entreprises :

1. amélioration de la construction (tôles de plus haute qualité, section de cuivre plus grande, enroulement rotor en cuivre, etc.);
2. augmentation des dimensions (plus de matériaux actifs);
3. adaptation de la tension pour charges partielles.

Les dernières courbes donnent une indication des limites d'augmentation du contenu énergétique si l'on veut bénéficier de l'avantage de plus de matériaux pour se garantir d'une amélioration de 1% du rendement.

Le moteur de 18,5 kW pourrait supporter une augmentation du contenu énergétique de 26%. Cet avantage d'augmentation de 1% du rendement, rapporté en durée de fonctionnement, représente un gain d'environ 20 jours de travail « gratuit ».

En fait cela démontre que le rapport de la consommation d'exploitation par rapport au contenu énergétique est grand :

- consommation d'exploitation
 $18,5 \text{ kW} \cdot 0,3/0,84 \cdot 2000 \text{ h} \cdot 10 \text{ ans} = 132 \text{ MWh}$;
- contenu énergétique
18 500 MJ ou 5,14 MWh.

rapport :

$$\frac{\text{consommation d'exploitation}}{\text{contenu énergétique}} = \frac{132}{5,14} = 25,7$$

7. Les préceptes d'optimisation

Ils s'énoncent comme suit :

1. Maximiser la mise en valeur des connaissances scientifiques et l'application du procédé technique de meilleure efficacité énergétique.
2. Minimiser les rejets spécifiques d'énergie (maximiser le rendement des machines).
3. Maximiser la valeur de l'énergie rejetée (récupération).
4. Minimiser la consommation d'énergie d'alimentation.
5. Maximiser la durée de vie des équipements (les rendre plus résistants à l'usure, etc.).
6. Minimiser le contenu énergétique des équipements (concevoir des machines qui continuent à assumer la même fonction, tout en étant plus légères, faites de matériaux moins nobles, de conception plus évoluée, etc.).
7. Minimiser la valeur résiduelle des équipements (les concevoir de manière à ce qu'ils soient ensuite réutilisables facilement).
8. Maximiser, pendant la durée de disponibilité des équipements, leur taux de production.
9. Minimiser toutes les formes de stock.
10. Minimiser les modifications dès le début de la production.
11. Minimiser les rebuts en cours de production.

Exemples de la mise en application de l'un ou de l'autre de ces préceptes :

Eclairage

Les ventes mondiales d'«ampoules compactes fluorescentes (CFL)» ont été en 1992 de 134 millions de pièces. Cela représente le triple de 1988 avec 45 millions de pièces vendues. Le remplacement d'ampoules incandescentes par les CFL, seulement pour les ventes, de 1992, conduit à une demande négative d'électricité de 6000 MW, soit l'équivalent de 7 grandes centrales de production. Il faut dire que le volume des ventes CFL est sérieusement freiné par les ventes des ampoules standard qui représentent encore un volume de 9 milliards de pièces.

Une autre vision est de se représenter le coût des centrales équivalentes à l'économie d'énergie : le chiffre des ventes CFL est de 2 milliards de \$, soit $2 \cdot 10^9$ divisé par 7 centrales = 286 millions de \$ par centrale.

Automobile

Un allègement de 1 kg du véhicule induit une économie de carburant de 0,0035 litre aux 100 km. On imagine que c'est négligeable ! Voyez plutôt :

Admettons un allègement moyen des véhicules de 90 kg. Les effets seraient les suivants : pour un parcours en douze ans de 144 000 km, l'économie de carburant induite est de $144\,000/100 \cdot 90 \cdot 0,0035 = 453,6$ litres. Le parc automobile de la Suisse est de 2,8 millions de véhicules. Cela représente annuellement une économie de $2,8 \cdot 10^6 \cdot 12\,000 \cdot 0,0035 = 117,6$ millions de litres pour le même service rendu.

Vous êtes-vous déjà posé la question de savoir quelle est la valeur de la consommation d'énergie théorique minimale nécessaire pour un véhicule de 1000 kg qui parcourt 100 km en une heure, partant du repos et arrivant au repos ? L'unité d'énergie de transport vaut :

$1000 \cdot (100/3600)^2 = 8 \cdot 10^5$ joules ou l'énergie chimique contenue dans 20 cm³ de carburant (référence : P. Le Goff, *Energétique industrielle*).

Telle est la quantité minimale d'énergie qu'il faudrait dépenser pour déplacer l'automobile de 100 km en une heure, en absence de tout frottement.

Supposons que le véhicule consomme en réalité 10 litres de carburant pour effectuer ces 100 km en une heure, d'où une performance énergétique théorique de $20/10000 = 0,002$ ou 0,2%.

Production (Word Watch Institute – 1993)

Lean production has become the new byword of manufacturers. The concept combines just-in-time component deliveries, zero-defect strategies, and other changes from traditional methods. Nissan's newly opened British plant cut inventory for its European parts to 1.6 days, for exemple, compared with an industry average of 20 days. By closing the quality gap, US manufacturers began to regain some market share they had lost to the Japanese; over the past several years they reduced defects from about 7 per car to 1.5, while Japan went from 2 defects to 1.3.

Industrie du papier (Word Watch Institut – 1993)

Paper production continues to grow. Help has come from three sources: waste-paper recycling, development of faster-growing varieties of trees (requiring less land over the long term), and increasing use of non-wood pulp. In Asia countries other than China and Japan, nearly 70% of used paper is recycled. In Europe, the recovery rate is above 50%, and the US rate is about 34% – of which most is used for products like tissue and packaging. Since 1991, a Japanese company has begun to manufacture high-quality coated (glossy) magazine paper consisting of 80% recycled newspaper, and Chinese manufacturers are making 60% of their paper from non-wood sources.

8. Statistiques relatives aux entraînements électriques

Le développement de la machine électrique il y a environ une centaine d'année et la possibilité de transporter et de distribuer facilement l'énergie électrique a conduit à donner une grande impulsion à la technique des entraînements. Les qualités d'adaptabilité et de réglage permettent un couplage avec la machine ou l'organe à entraîner capables de satisfaire pleinement les exigences du procédé ou du processus.

L'énergie électrique est une forme secondaire d'énergie, qui ne présente que peu d'utilisations directes. En revanche, elle est une forme intermédiaire très intéressante par sa facilité de transport, sa souplesse et ses possibilités de conversion.

Parmi toutes les possibilités de transformation, la forme électromécanique joue un rôle particulièrement important. D'une part, plus de 99% de la production d'énergie électrique résulte d'une conversion mécanique-électrique, d'autre part la conversion électromécanique joue un rôle important dans des domaines aussi variés que la traction ferroviaire ou urbaine, les machines-outils, les appareils électroménagers, etc. Ce sont principalement les qualités de rendement de conversion, de souplesse et d'absence de pollution qui en font un produit technique très répandu.

La conversion électromécanique présente des caractères communs à la plupart de ses applications. Parmi celles-ci, on peut relever :

- le rendement énergétique généralement élevé ;
- la réversibilité, le même système permet aussi bien une conversion électromécanique qu'une transformation en sens inverse ;
- la fiabilité et la durée de vie ;
- la gamme étendue des puissances allant de quelques W à plus d'un GW ;
- la possibilité d'assurer, en plus d'une conversion d'énergie, une conversion d'information.

Certaines contraintes limitent cependant l'emploi de ce mode de conversion. On peut citer: la dépendance d'un réseau d'alimentation, la puissance par unité de volume ou de masse est moins élevée que pour certains systèmes hydropneumatiques, mécaniques ou thermiques. Les systèmes électriques présentent un danger d'électrocution pour l'homme.

8.1 Expression de l'énergie spécifique

Pour un système hydropneumatique :

l'énergie spécifique est la pression interne du système :

$$w_p = p$$

Pour un condensateur dans l'air :

on a :

$$w_{es} = 1/2 \epsilon_0 E^2 \quad \epsilon_0 = \text{permittivité}$$

Pour un système électromagnétique dans l'air :

on a :

$$w_{mag} = 1/2 B^2 / \mu_0 \quad \mu_0 = \text{perméabilité}$$

Pour chacun de ces cas, une valeur limite est imposée par les caractéristiques des matériaux utilisés, que ce soit au niveau de l'espace déformable ou de la structure du système.

Pour la pression p , on peut admettre une valeur limite de l'ordre de 400 bar ou $400 \cdot 10^5$ Pa (1 Pa = 1 J/m³), compatible avec les matériaux utilisés :

$$w_{sp p} = 4 \cdot 10^7 \text{ J/m}^3$$

Ainsi, un réservoir d'air comprimé à une pression de 7 bar ou $7 \cdot 10^5$ Pa contient une densité volumique d'énergie de $7 \cdot 10^5$ J/m³ et si le volume est de 250 litres, le contenu d'énergie est de

$$7 \cdot 10^5 \cdot 0,25 = 1,75 \cdot 10^5 \text{ J ou } 48,61 \text{ Wh !!}$$

Comme l'air sous pression provient d'une conversion électrique-mécanique, le rendement énergétique de cette conversion est en moyenne de 3 à 5%.

Pour un système électrostatique, c'est le champ électrique disruptif de l'air qui caractérise l'énergie maximale. On peut admettre une valeur ϵ_{air} de $3 \cdot 10^6$ V/m, soit :

$$w_{sp es} = 4 \cdot 10 \text{ J/m}^3$$

Pour un système électromagnétique, c'est le niveau de saturation du fer du circuit magnétique qui impose une induction de l'ordre de 1 T, d'où :

$$w_{sp mag} = 4 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$$

A titre d'exemple de comparaison, l'énergie spécifique primaire d'un m³ de pétrole est de

$$19,08 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

et en exergie spécifique elle est de

$$0,35 \cdot 19,08 \cdot 10^9 = 6,68 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3.$$

En comparant les valeurs limites précédentes, on obtient les rapports suivants :

$$w_{sp\ p} = 10^2 w_{sp\ mag} = 10^6 w_{sp\ es}$$

$$w_{sp\ mag} = 10^4 w_{sp\ es}$$

Dans une transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, il apparaît également une conversion d'énergie électrique en énergie thermique par effet Joule. Cette dernière présente un caractère irréversible. Le bilan énergétique faisant intervenir les formes électrique, mécanique et thermique n'est généralement pas équilibré, en particulier lors d'un régime transitoire. On établit l'existence d'une quatrième forme d'énergie associée à la conversion électromécanique. Il s'agit de l'énergie magnétique. La figure 20 illustre les principes d'une conversion électromécanique et de son inverse.

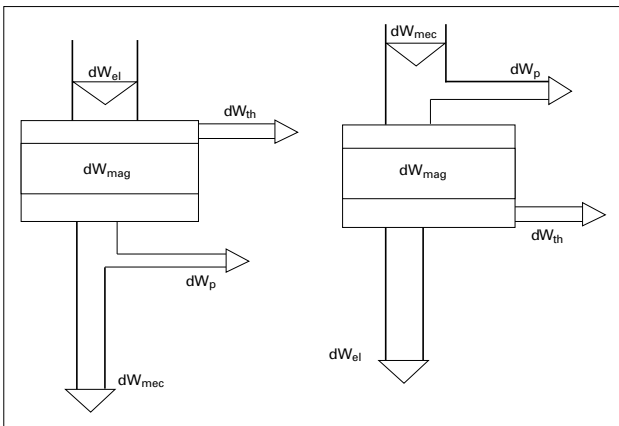


Figure 20: Conversion électromécanique et l'inverse.

8.2 L'énergie électrique pour les entraînements: les 7 points importants

1. *Les entraînements électriques sont les plus gros consommateurs de courant.*
Dans l'industrie, le 60% de l'énergie électrique est consommée par les entraînements. Ils sont donc importants dans la gestion énergétique d'une exploitation.
2. *Le coût de l'énergie électrique n'est pas imposé, il est variable.*
La consommation d'énergie électrique pour la production d'un produit industriel n'est jamais

imposée. Elle peut être influencée dans une assez large mesure aussi bien pour son tarif de base que pour la consommation globale. Sans investissement important, une réduction de la consommation et par là un coût énergétique réduit peut être obtenu quelquefois par de simples mesures d'organisation.

3. *La gestion de l'énergie est une tâche permanente.*
L'action isolée, par exemple une analyse énergétique ponctuelle, n'apporte que très peu en comparaison à une gestion permanente de l'énergie. Tous les niveaux hiérarchiques de l'entreprise doivent y participer. Il est démontré que ce sont les professionnels de l'entreprise qui connaissent le mieux les potentiels d'économie possibles.
4. *La comparaison des variantes est nécessaire.*
Lors de la planification d'un processus, d'une nouvelle installation ou de l'amélioration (modernisation) d'une installation existante, différentes variantes énergétiques doivent être comparées. Une analyse économique peut être utilisée comme base de valorisation des variantes en compétition. Dans ce cas, il y a lieu de prendre en considération en plus des coûts d'investissements également les coûts de la consommation en exploitation et les coûts de l'entretien.
5. *La prise en compte du système global complet.*
La conception énergétique optimale ne se base pas seulement sur l'assemblage de composants avec les meilleurs rendements. Le plus important est le choix du type d'entraînement, son adaptation à la charge et aux conditions d'exploitation. Les connaissances précises du processus et des conditions d'exploitation sont déterminantes.

6. *L'adaptation des durées d'enclenchement aux temps de production.*
Une économie importante peut être réalisée par l'adaptation des durées d'enclenchement aux temps réels de production. Cette adaptation peut être réalisée manuellement ou à l'aide d'une commande ou d'un réglage automatique.
7. *L'organisation des cycles de production.*
Des cycles de production efficaces apportent des économies importantes. Les modifications d'organisation pourront souvent réduire les coûts énergétiques et mieux utiliser l'installation avec pour conséquence une augmentation de la productivité.

8.3 Où l'électricité est-elle perdue ?

Seule une petite partie de l'énergie électrique prélevée au réseau est effectivement utilisée dans le processus lui-même. La plus grande partie est dissipée sous forme de pertes directes et indirectes (énergie cinétique, potentielle, confort, etc.).

La facture de la consommation de l'énergie électrique de l'industrie se monte à Fr. 1,5 milliard environ. Au prix moyen de 10 centimes le kWh, la consommation facturée correspond à 15 milliards de kWh. Cela représente le tiers de la consommation de l'énergie électrique finale totale du pays.

Plus grande est encore la part de l'industrie si l'on considère uniquement la consommation des entraînements. En Suisse, la moitié de la consommation

des entraînements provient des moteurs installés dans l'industrie.

Répartition des entraînements électriques par utilisateur :

- domotique 9%
- transports 13%
- **industrie 48%**
- agriculture, artisanat et services 30%

De grandes différences apparaissent lorsque l'on compare la part de la consommation des entraînements avec la consommation électrique totale d'une entreprise. Dans les différentes branches de l'industrie, les parts consommées par les entraînements sont les suivantes (figure 21) :

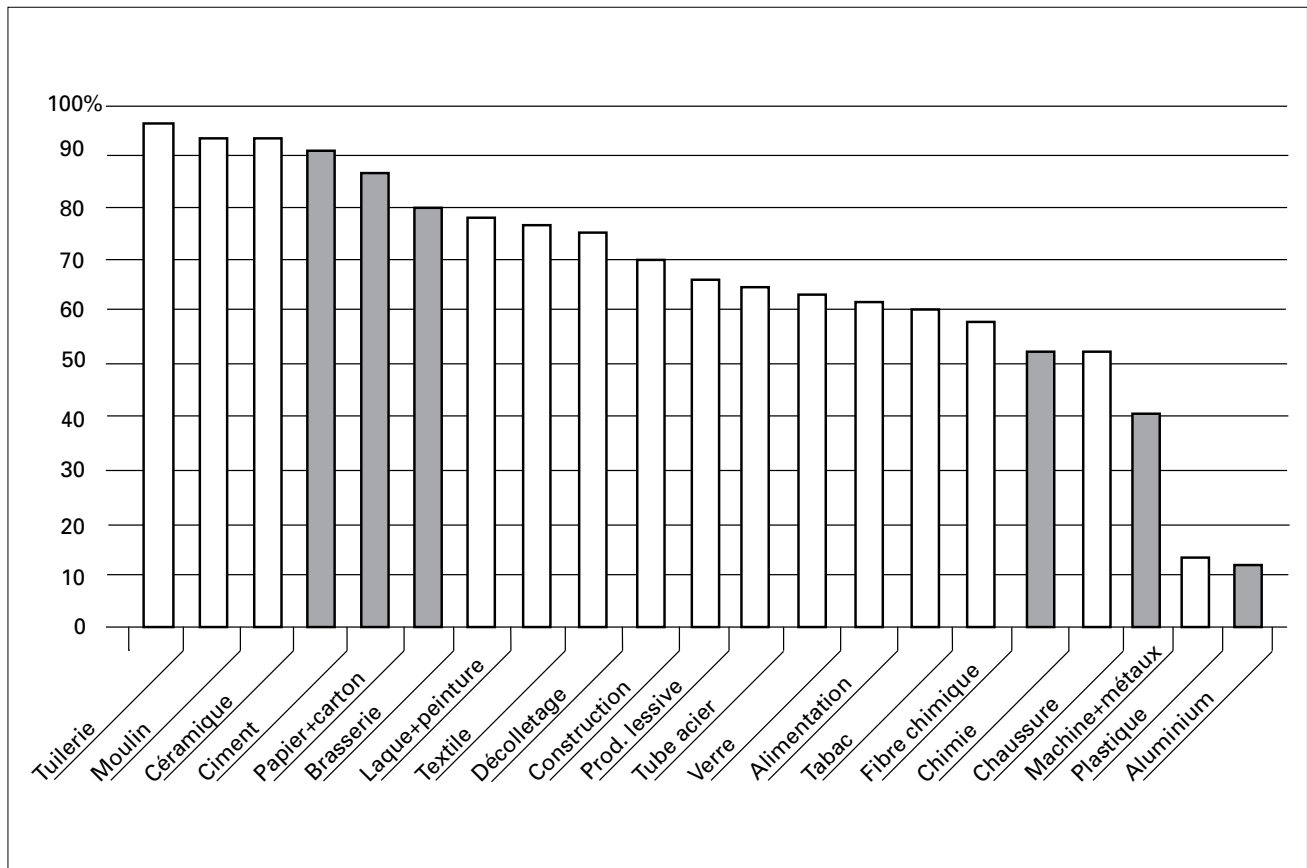


Figure 21: Parts des entraînements dans les différentes branches de l'industrie.

8.4 Où va l'énergie électrique perdue ?

(rendement de conversion et rendement énergétique)

Seule une partie de l'ensemble des pertes d'un système d'entraînement peut être imputée au moteur. Les composants en amont et en aval de celui-ci créent souvent des pertes importantes (figure 22). Dans le premier exemple correspondant à une installation de ventilation type, seulement la moitié de l'énergie d'alimentation (réseau) est transformée en énergie utile. Le bilan énergétique global montrerait en plus qu'il y a lieu de prendre en compte les pertes dans l'ensemble de la distribution d'air et mieux encore obligerait à se préoccuper des conditions physiologiques acceptables qui définissent l'énergie

théorique spécifique minimale nécessaire à la ventilation en fonction, entre autre, des conditions d'ambiance tolérées pendant la durée d'exploitation.

Le premier rapport nous indique le rendement de conversion pour les conditions nominales instantanées en régime permanent. Actuellement, ce rapport est la base pour le dimensionnement des composants d'une installation. A notre avis, il ne devrait être qu'une information parmi les autres. Les autres composants du dimensionnement doivent être, de façon aussi précise que possible, les conditions d'exploitation. Seule la prise en compte de ce tout permettra un dimensionnement énergétiquement satisfaisant. En aucun cas, l'objectif doit se limiter au rendement de conversion.

Ainsi, la prise en compte du rendement énergétique commence par la définition de l'énergie théorique

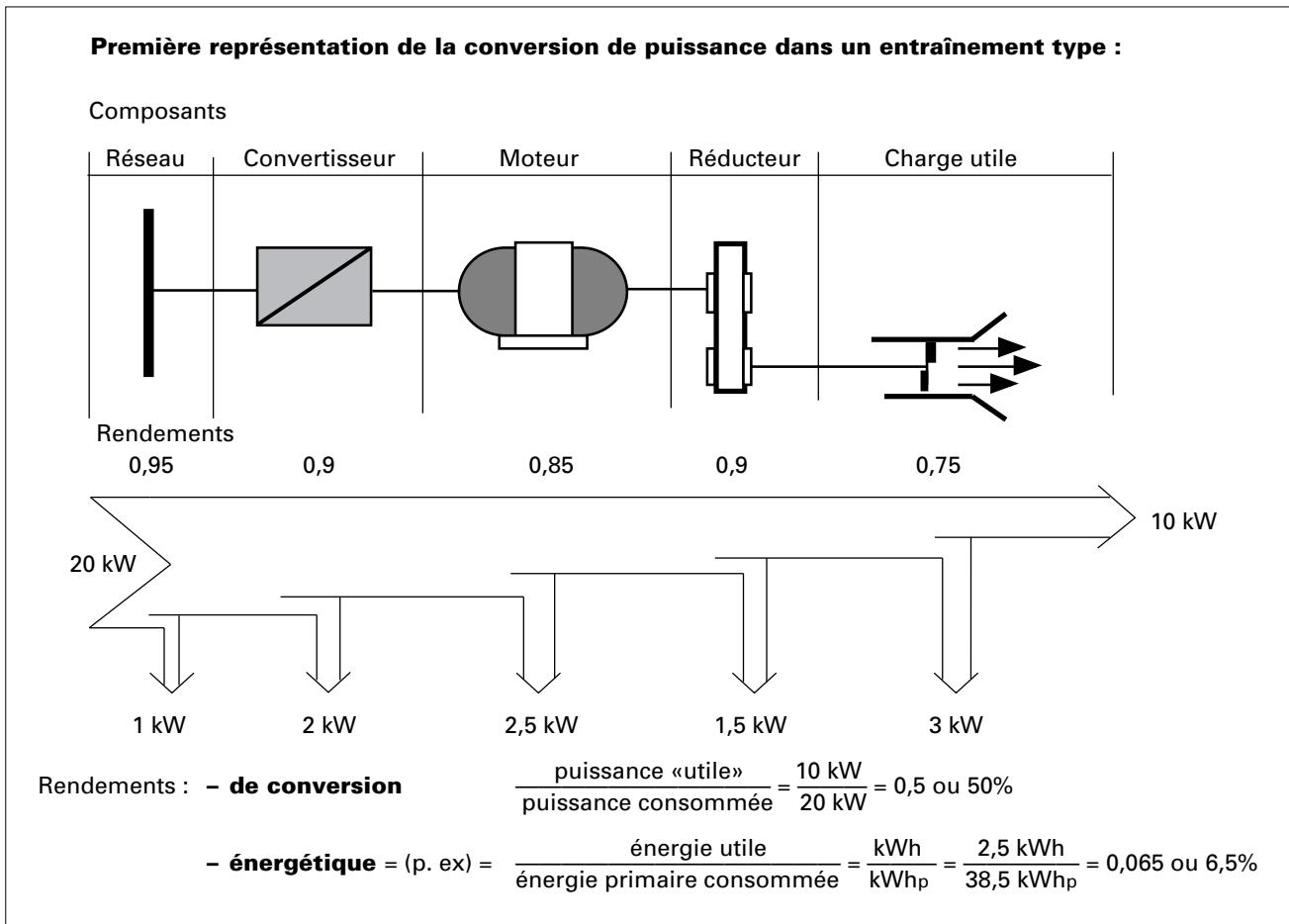


Figure 22: Installation de ventilation.

minimale et des conditions précises d'exploitation et de la conduite du procédé ou du processus. En général, on peut dire que les régimes transitoires ont une faible incidence par rapport aux conditions de charge qui sont déterminantes dans la qualité énergétique de la transformation.

Il est évident que pour le rendement de conversion, les indications sont exprimées en « puissance instantanée nominale » et ne prennent pas en compte les charges effectives, les cycles d'exploitation ou la conduite du processus. Un calcul simpliste du rendement donnerait un résultat de 50%, ce qui de toute évidence ne correspond à aucune réalité ! Cela indique simplement qu'une installation de ventilation avec une puissance nominale instantanée de 10 kW consomme au réseau une puissance instantanée de 20 kW en ayant choisi pour chacun des composants le meilleur et le mieux adapté. Cela correspond à un

cas bien particulier d'une installation. Nous voulons seulement montrer qu'il doit y avoir mieux à faire et que le dimensionnement doit prendre en compte davantage de paramètres et en particulier les paramètres d'exploitation qui sont déterminants de la valeur du rendement énergétique.

Ainsi seul le bilan énergétique global pendant un ou des cycles d'exploitation donne les informations correctes sur les charges, le dimensionnement et la consommation énergétique effective. Pour une évaluation cohérente de l'installation et la mise en place de mesures d'utilisation rationnelle de l'énergie électrique, il est nécessaire de faire cet effort d'investigation. Le professeur M. Taube indique dans son livre « Materie, Energie und die Zukunft des Menschen », Stugart-Hirzel, 1988, une valeur de 7% pour la valeur de l'énergie utile par rapport à l'énergie primaire !

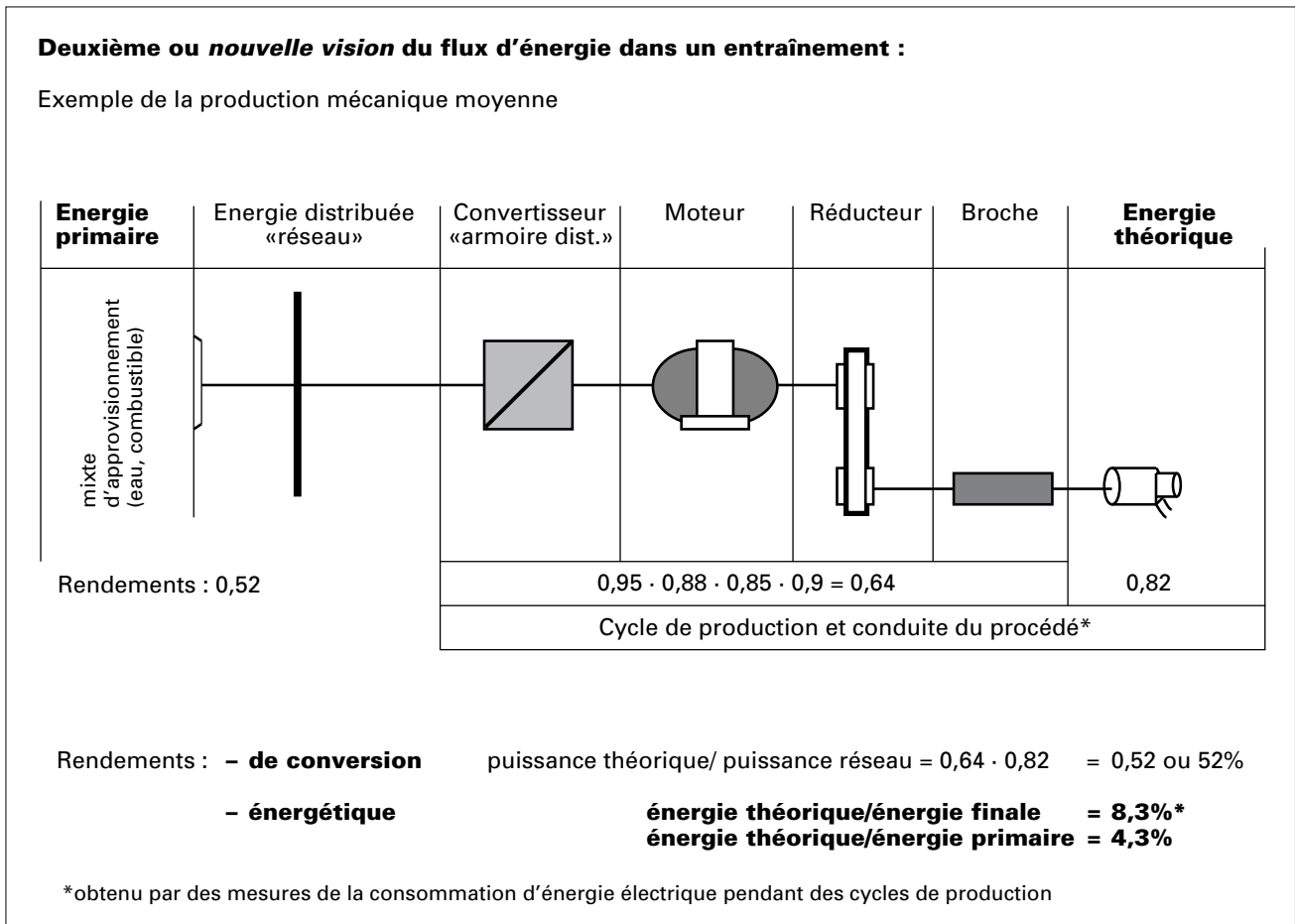


Figure 23: Production mécanique par enlèvement de matière.

9. Les pertes et le marché des moteurs électriques

Le type, la puissance et la charge déterminent les pertes en régime permanent. L'accroissement de la puissance nominale conduit à des pertes relatives plus petites. En effet, les gros moteurs ont un meilleur rendement que les petits. La dispersion du rendement entre les différents fabricants diminue également avec l'augmentation de la puissance nominale ; pour les petites et moyennes puissances de 1 à 22 kW, la dispersion est importante.

Exemple: des moteurs de 30 kW sont disponibles sur le marché avec un rendement de 90% et 93%. Si cela est faible du point de vue du rendement – 3% – cela représente plus de 30% au niveau des pertes.

Classe des moteurs	Part des pertes totales
10 à 100 W	10%
100 à 1 kW	29%
1 à 10 kW	39%
10 à 100 kW	16%
plus de 100 kW	6%
	} 78%

Tableau 24: Part des pertes totales par classe de puissance des moteurs.

La répartition des pertes par classe de puissance des moteurs donne une image très intéressante (voir tableau 24). Ainsi, en Suisse, les deux tiers des pertes sont concentrées sur les classes de moteurs de 0,1 à 10 kW et, ensemble, les classes de puissances de 10 W à 10 kW représentent 78% des pertes.

C'est donc dans ces classes de puissances que se situe le plus grand potentiel d'utilisation rationnelle de l'énergie électrique appliquée aux entraînements.

Pour les gros moteurs – plus de 22 kW – les rendements sont mieux optimisés parce que, pour ces grandeurs, le rendement est aussi un critère de choix

Les moteurs plus petits que 100 W ont bien un rendement faible, mais à cause de la petite puissance mise en jeu, ils ne participent que marginalement à l'ensemble des pertes. Il faut cependant se méfier d'une telle affirmation parce que 10% sont quand même de l'ordre de 300 GWh !

Les différences de rendements en fonction des types de moteurs sont représentées à la figure 25.

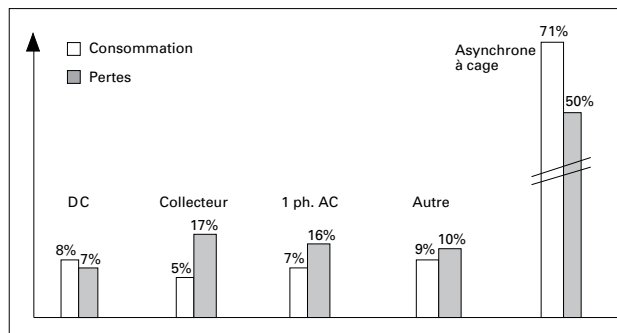


Figure 25: Rendement en fonction des types de moteurs.

Doubles pertes !

Les pertes échauffent le moteur. Aussi très souvent, cette production de chaleur doit être compensée par une installation de refroidissement ou une installation de ventilation. Les pertes des moteurs peuvent ainsi compter doublement.

Le tableau 26 indique une comparaison des coûts totaux de deux entraînements par addition des prix d'achats et du coût de la consommation d'énergie électrique pour 10 ans à 2000 heures de fonctionnement par an.

Moteur asynchrone	Coût d'achat [Fr.]	Coût de la consommation [Fr.]
1,1 kW 15 kg	300.–	2 200.–
11,0 kW 90 kg	1500.–	22 000.–

Tableau 26: Comparaison des coûts d'achat et de consommation.

En Suisse, la répartition du marché des moteurs asynchrones est le suivant:

Classe de puissance	Nombre [1000]	Ch. af [10 ⁶ Fr.]	Part [%]
plus petit 0,375 kW	65	9	10
0,375 – 7,5 kW	130	45	52
7,5 – 75 kW	13	28	32
75 – 200 kW	0,5	5	6
Total	208,5	87	100
Moto-réducteurs	25	15	
Total complet	233,5	102	

Tableau 27: Répartition du marché suisse des moteurs asynchrones.

10. Gestion de l'énergie (adaptation et compromis)

La gestion sévère de l'énergie est favorable au moins à deux points de vue : elle réduit les coûts de courant et de chaleur et conduit à une amélioration du processus de production. Ce chapitre traite des éléments les plus importants et quantifie les actions les plus intéressantes. Les directions d'entreprises pensent et agissent en considération des coûts. Pour l'énergie, ces coûts sont souvent considérés comme des coûts fixes et budgétés en conséquence. La marge de manœuvre d'économie n'est ainsi pas reconnue.

Les expériences de bon nombre d'entreprises démontrent que la gestion de l'énergie a des retombées économiques positives. En particulier, les industries gourmandes en énergie confiant cette mission à une direction spécialisée peuvent faire valoir des résultats intéressants.

Ces dépenses supplémentaires se justifient-elles ?

La règle est que ces dépenses de gestion peuvent atteindre jusqu'à 10 % du coût de l'énergie consommée.

Cette question est influencée par trois indicateurs :

1. Le temps consacré par la direction d'entreprise pour les questions énergétiques est proportionnel au coût de l'énergie dans le processus industriel considéré. Il s'agit en général de quelques jours, au plus de semaines par an.
2. Les coûts de l'énergie sont la base pour fixer la valeur de l'effort à y consacrer. En principe, de 5 à 10 % de ce coût devrait être investi dans la gestion.
3. Il faut s'attendre à une augmentation du prix de l'énergie.

Aspect politique et écologique

Les coûts ne sont pas les seuls éléments influant les décisions. Il existe aussi des considérations marginales économiques et écologiques qu'il faut prendre en compte et pour lesquelles l'industrie n'a directement aucune influence.

On peut mentionner les difficultés, pour les producteurs suisses d'énergie électrique, d'augmenter de beaucoup l'offre ainsi que les mesures de protection justifiées de l'environnement qui entraîneront probablement des augmentations de prix.

La gestion de l'énergie augmente l'efficacité de la production

Les économies d'énergie ont très souvent des effets secondaires intéressants. De l'analyse des flux de puissances instantanées, qui peut se faire par des mesures simples, il est possible de tirer des informations sur l'efficacité de la production. Des variations d'énergie spécifique vont souvent de pair avec un accroissement de la productivité.

Les influences positives d'une gestion de l'énergie sur des domaines hors énergie apparaissent plus particulièrement dans les procédés peu consommateurs d'énergie. L'exemple d'une industrie chimique avec une part du coût énergétique de 4 % du coût de la production démontre qu'un cinquième de ce coût peut être économisé par des mesures d'utilisation rationnelle de l'énergie et deux cinquièmes peuvent être obtenus par une meilleure utilisation et charge des installations par le personnel.

Mesures des consommations
Estimation de la marge disponible pour les économies
Analyse et planification
Organisation
Exécution et contrôle




Tableau 28: Eléments de gestion de l'énergie.

Mesures des consommations

La comptabilité est l'élément de base de décision. Cette étape est l'élément de base essentiel à une prise de décision. Ces mesures doivent tenir compte de tous les agents énergétiques intervenants. Un fil conducteur existe sous la forme d'un logiciel pour PC disponible à INFEL. Il propose une représentation sous forme de table et sous forme graphique.

Estimation de la marge d'économie

Où et quand la consommation peut-elle être réduite ? Dans quel domaine existe-t-il de la marge ? Les réponses à ces questions peuvent faire l'objet d'une appréciation grossière basée sur des grandeurs

connues; par exemples les *grandeurs spécifiques* de consommation. Ces grandeurs spécifiques sont caractéristiques de la valeur de la production de l'industrie considérée et cela en valeur de quantité, nombre de pièces, chiffre d'affaires, nombre d'employés, etc. Ces grandeurs permettent des comparaisons avec d'autres industries de la même branche. L'Association des consommateurs d'énergie, dont le siège est à Bâle, échange avec ses membres des informations qui peuvent être très importantes à connaître.

Analyse et planification

Actions immédiates gratuites.

L'analyse doit indiquer les actions et la durée d'exécution. Sont prises en considération en premier lieu les actions gratuites ou à coût très faible. Dans ces actions sont incluses des mesures d'organisation, par exemple une meilleure répartition des charges, l'entretien et le réglage (commande) de l'installation ou du processus. Pour des installations nouvelles, l'effort doit être fait lors de la planification. Une analyse détaillée doit être faite en relation avec les valeurs des grandeurs spécifiques disponibles. Lors de modifications majeures, des mesures sur l'ancienne installation doivent être faites afin de disposer de points de repères pour les modifications. Pour de nouvelles installations, les valeurs de consommation doivent être obtenues auprès des différents fournisseurs. La comparaison avec des installations de capacité et de consommation différentes est encore meilleure. Dans tous les cas, les investissements supplémentaires sont à comparer avec les diminutions des consommations énergétiques.

Organisation

La gestion énergétique concerne chacun.

Il est complètement faux de considérer que la gestion énergétique ne concerne que la technique et la production. Toute la hiérarchie de l'entreprise est à considérer pour conduire au succès: direction générale, finance, exploitation, planification, bureau d'étude, production, entretien et vente. La motivation de chacun est d'égale importance. L'organisation de la gestion de l'énergie dépend de la grandeur et de l'intensité énergétique de l'industrie considérée. La publication RAVEL « Organisation und Energie-management » donne des exemples d'organisation.

Exécution et contrôle

Les succès soutiennent la motivation.

La gestion de l'énergie doit être comprise comme une tâche permanente et non comme une étude ponctuelle. A cela sont liés l'information concernant

le contrôle et le succès des actions. La publication régulière des statistiques énergétiques et l'évolution des grandeurs spécifiques sont des mesures efficaces.

Les méthodes et instruments pour la gestion énergétique des entraînements électriques ne se différencient pas par rapport aux méthodes et instruments généraux d'analyse énergétique. A la figure 21 sont indiquées les parts de la consommation des entraînements électriques par rapport à la consommation totale dans différentes branches industrielles. La plage de 12 à 97 % donne une indication de l'importance des entraînements dans cette consommation.

Mesures et actions pour mieux utiliser le potentiel d'économie dans les entraînements électriques:

- processus énergétique économe;
- optimisation du déroulement du processus;
- éviter les marches à vide;
- régler selon les besoins;
- en cas de non utilisation déclenchement manuel;
- réglage de vitesse en charge partielle;
- dimensionnement de l'entraînement;
- composants avec les meilleurs rendements.

11. Exemples d'application

11.1 Air comprimé

La production et la distribution d'air comprimé

L'exemple de la production et de la distribution de l'air comprimé dans l'industrie et l'artisanat démontre des potentiels d'économie d'énergie et de gains économiques possibles. Ce chapitre fait apparaître que les utilisations de l'électricité sont souvent plus grandes que celles entrevues au premier coup d'œil.

Technique

Grâce à sa sécurité et à son utilisation conviviale, l'air comprimé est un agent énergétique auxiliaire très répandu dans l'industrie. Environ 4% de la consommation électrique des moteurs sert à la production d'air comprimé.

Lorsque la pression dans le réservoir d'air comprimé descend au-dessous d'une valeur minimale,

le compresseur se met en marche. L'air est aspiré, filtré, comprimé et séché. Le fonctionnement du compresseur sera arrêté dès que la pression atteindra le niveau défini.

La plus grande partie du courant électrique est transformée en chaleur – cela représente un potentiel intéressant de récupération de chaleur secondaire pour le chauffage de locaux ou le préchauffage de l'eau.

Coûts

Comme agent énergétique, l'air comprimé est vingt fois plus cher que le courant électrique. Les coûts annuels d'une installation de production d'une puissance de 37 kW sont de Fr. 26 000.-. Ils se répartissent de la manière suivante : 35% ou Fr. 9000.- coût d'investissement, 15% ou Fr. 4000.- pour l'entretien et la moitié, soit Fr. 13 000.- pour le coût de la consommation d'énergie électrique. Les coûts spécifiques se situent

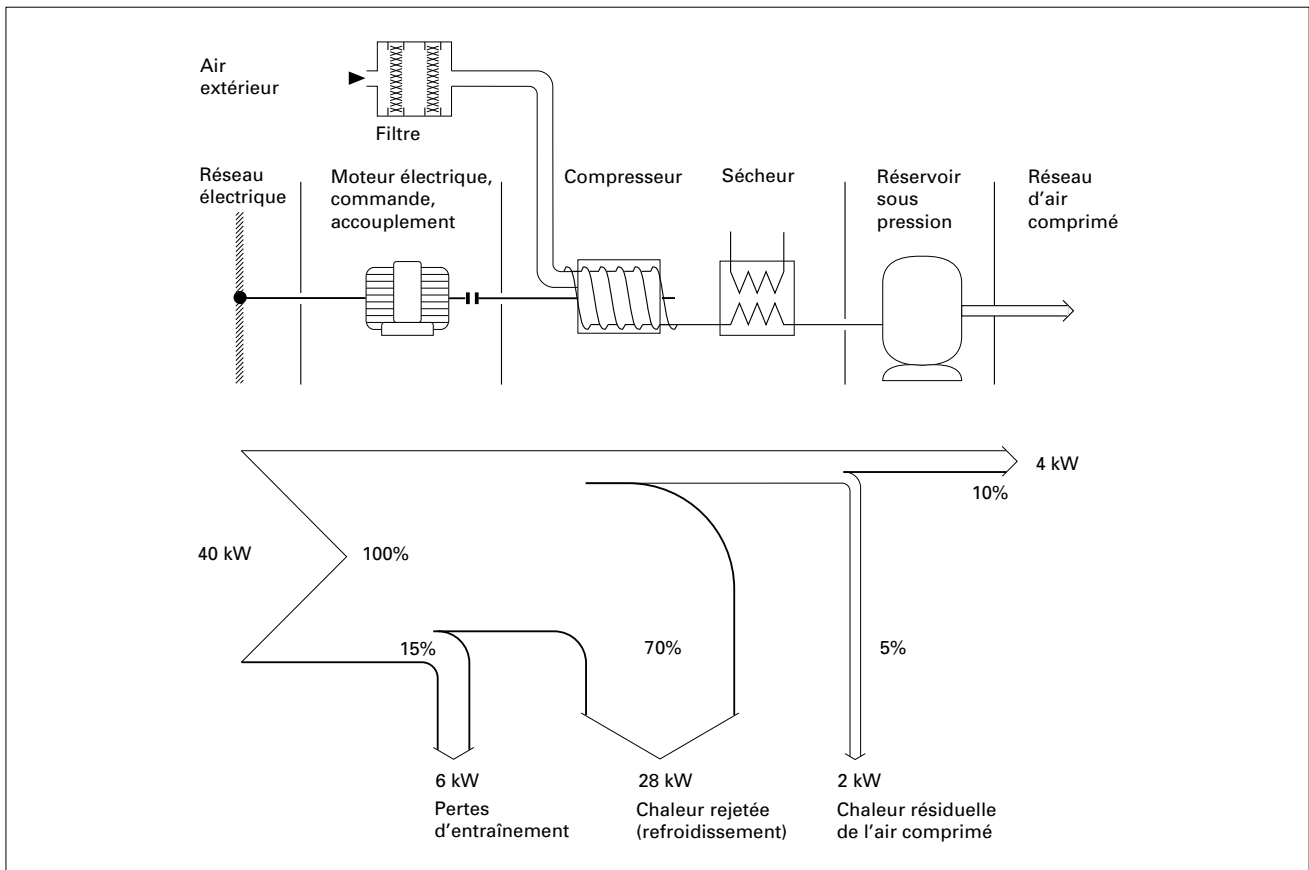


Figure 29: Installation de production d'air comprimé.

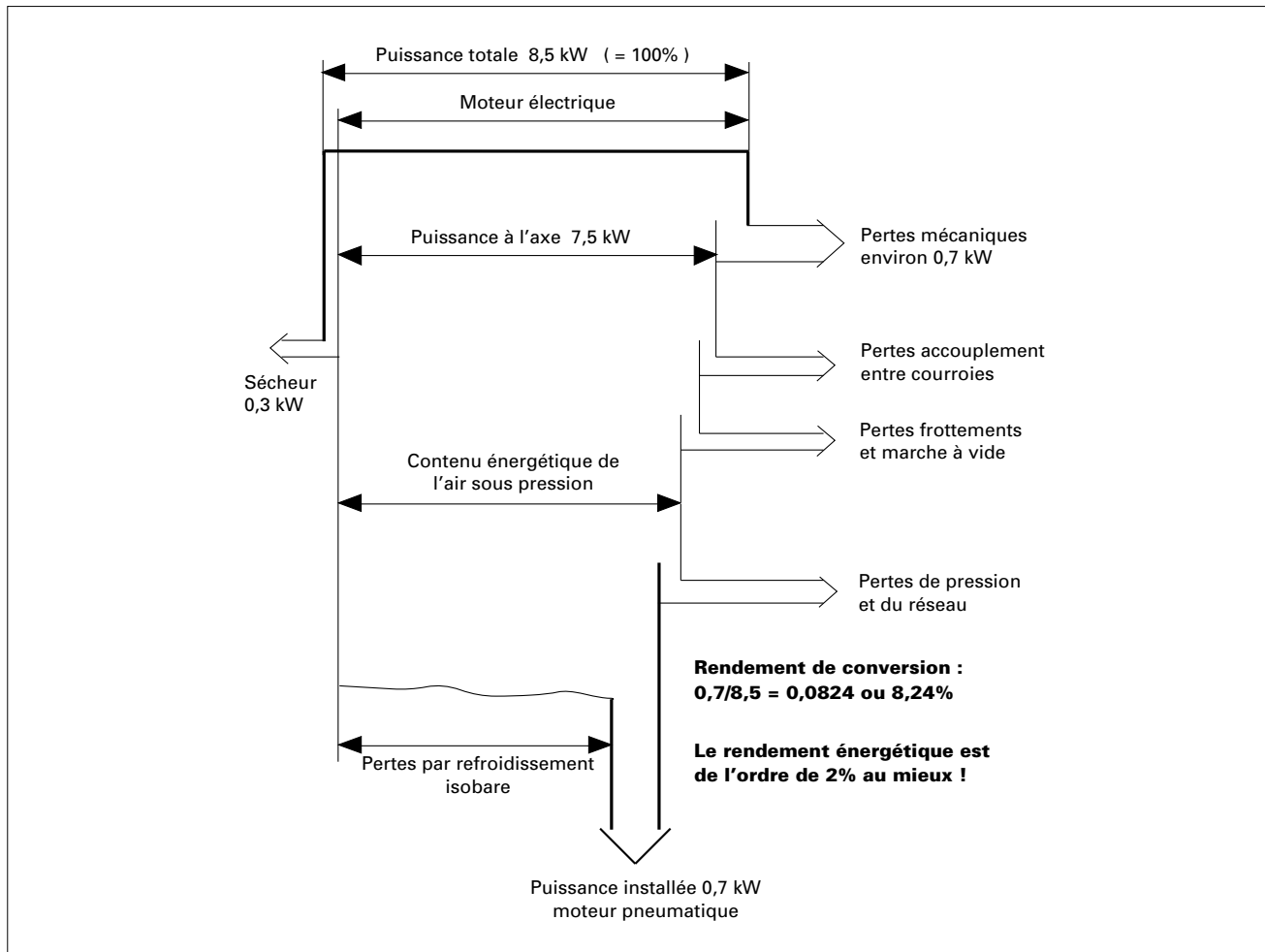


Figure 30: Diagramme du flux d'énergie pour une installation de production d'air comprimé.

entre 5 et 10 centimes/m³ à la pression normalisée. Les responsables, ainsi que les utilisateurs, ne sont en général pas conscients de ce coût élevé.

Mesures à l'exploitation

- L'évolution de la pression dans les réseaux démontre des utilisations très différentes et des surcharges.
- Charge et marche à vide: une installation bien chargée fonctionne seulement 10% à 15% en régime à vide.
- La consommation d'eau de refroidissement donne une indication sur la consommation complémentaire d'eau et sur le potentiel de récupération de l'eau préchauffée.
- Aspiration, air de refroidissement et température ambiante: lorsque la température s'élève, le rendement diminue. A température plus élevée, le volume aspiré diminue à cause de la plus faible densité et ainsi la puissance de distribution.

Mesures à l'entretien

- Un filtre sale sur l'aspiration diminue le rendement ainsi que la puissance de distribution.
- Les « soupapes » ne sont pas parfaitement étanches pendant leur durée de vie. Les révisions recommandées et prescrites doivent être effectuées.
- Accouplements et transmissions par courroies trapézoïdales et plates doivent être régulièrement contrôlés.

- Les refroidisseurs d'huile et d'air doivent être régulièrement nettoyés, afin que les températures d'exploitation restent autant que possible basses.
- Les petites fuites sont inévitables. Les grosses fuites peuvent être détectées par des mesures de la consommation ou par des sifflements de l'air. Elles doivent être corrigées. Les pertes par fuites sont proportionnelles à la puissance « trois » de la pression du réseau de distribution.

Installations nouvelles

- Grandeurs: pour le compresseur, il faut veiller à un haut taux d'exploitation. Pour la détermination de la puissance, il y a lieu de faire des calculs précis de la consommation d'air ou, si une ancienne installation existe, de faire des mesures sur cette installation. Lorsque la consommation présente de grandes variations, par exemple nuit et jour, il y a lieu de prévoir l'installation de deux compresseurs: un petit pour la couverture de la demande de base et un autre pour assurer la distribution de pointe.
- Enclenchement et déclenchement de la pression: ne pas utiliser si possible de pression élevée, parce que la consommation d'énergie augmente fortement lorsque la pression augmente.
- Type de compresseur: le choix du compresseur doit être fait en fonction de l'utilisation de l'air. Les critères de choix des compresseurs sont la puissances, la gamme de pression ainsi que la qualité de l'air (par exemple air sans huile).

Exemple dans une entreprise de cartonnage:

Les mesures de consommation d'une installation de production avec un compresseur de 75 kW et une puissance de distribution de 500 m³/h indiquait des pertes de 300 m³/h. Raison: une soupape dans le compresseur était défectueuse! Ce défaut avait pour conséquence un surcoût de la consommation d'électricité d'une valeur de Fr. 165.-/jour. Par un contrôle et de l'entretien, un tel coût pourrait être évité.

Mesures

La consommation de courant à vide représente plus de la moitié de la consommation en charge. La réparation immédiate de la soupape représentait un coût de Fr. 500.-.

L'installation d'un deuxième compresseur car pour le compresseur de base la marche de nuit correspond à 90% de régime à vide. Les compresseurs sont pourvus dans le circuit de réglage d'appareillage évitant des mises en marche fréquentes. De ce fait le compresseur fonctionne très souvent à vide, cela veut dire que lorsque le moteur tourne et que le compresseur fonctionne, il ne se fait pas de travaux de maintenance et pas de recherche de fuites. La consommation en régime à vide représente entre 50% et 70% de la consommation en charge.

Calcul économique:

Investissement pour un nouveau compresseur (deuxième)	Fr. 20 000.-
Economie de courant (consommation à vide 70000 kWh/a)	Fr. 10 500.-
Réduction des frais d'entretien à cause de la réduction de marche	Fr. 1 500.-
Réduction des coûts/an	Fr. 12 000.-

d'où amortissement en moins de 2 ans!

11.2 Ventilation

Réduire les heures d'exploitation et les volumes

Le postulat de l'adaptation des besoins énergétiques aux besoins réels est, dans le domaine de la ventilation industrielle, très actuel. Beaucoup de mesures sont d'ordre d'organisation et entraînent de faibles investissements. Des modifications aux installations de productions et aux canaux de distribution sont beaucoup plus conséquentes.

Technique

Dans l'industrie, selon les estimations, entre 10% et 15% de la consommation des moteurs est le fait d'installations de ventilation. Il existe des installations de ventilation avec seulement l'aspiration d'air frais et des installations avec prise d'air frais et extraction locale des polluants.

Les ventilations de locaux ventilent et/ou chauffent des locaux et des halles. Dans la règle générale, l'air est renouvelé. Lorsque des processus produisent des émissions polluantes, il est plus avantageux d'éliminer celles-ci directement à leur source plutôt

que d'augmenter l'alimentation d'air pour assurer la même concentration. Les ventilations avec extraction de polluants à la source fonctionnent plus efficacement; meilleur air avec moins de consommation d'énergie.

Mesures

- Les économies de courant et d'argent sont influencées par les facteurs suivants:
 - adaptation des temps d'exploitation,
 - réduction du flux volumique,
 - réduction des pertes de charge dans les canaux de ventilation,
 - augmentation des rendements des composants.
- L'adaptation des temps de fonctionnement aux temps d'utilisation peut se faire par des moyens relativement simples (interrupteur horloge, senseur de matière polluante, commande en fonction de la distribution). Ainsi, l'installation de ventilation n'est alors en service que lorsque cela est vraiment nécessaire.
- Par la réduction du flux volumique, il est possible de diminuer très fortement la consommation d'énergie. Il faut se rappeler que la puissance électrique d'une installation de ventilation est proportionnelle à la puissance 3 du débit. Le débit peut être réduit par une commande à vitesse variable et par une meilleure réalisation de l'installation. Il est évident que les mesures de réduction du débit ne doivent pas provoquer une diminution du confort « raisonnable » souhaité.
- Les pertes de charge dans les canaux sont déterminées par les dimensions de ceux-ci. Par exemple, une surface double du canal de ventilation ne nécessite plus qu'un quart de l'énergie pour le transport du même débit. Les modifications de la grandeur des canaux sont liées à des frais d'investissement important. Par des comparaisons entre différentes variantes, il est possible de quantifier les coûts et les économies. Pour cela, il y a lieu de comparer les coûts d'investissements, de consommation d'énergie et d'entretien.
- Les rendements des composants, du moteur, de la réduction mécanique (courroie) et du ventilateur jouent un rôle important. Par l'installation de composants avec de meilleurs rendements, il est possible de diminuer la consommation d'énergie électrique.

Hygiène de l'air ventilé

Les valeurs « MAK » indiquent les quantités acceptables des composants dangereux dans le volume d'air. MAK donne les valeurs maximales de concentration à la place de travail. Ces valeurs font partie des prescriptions de la CNA et se trouvent dans la prescription CNA N° 1903. Pour l'appréciation de beaucoup de mélanges particuliers intervenant dans l'industrie, ces valeurs sont limitées. Dans la pratique, on utilise souvent des formules empiriques ou des valeurs d'expérience. En cas d'accident, il y a des installations qui prévoient la mise en service d'un débit « tempête ». Ce débit provoque une augmentation massive des aspirations et des rejets; par exemple, ceux-ci sont doublés.

Liste de contrôle

Mesures immédiates sans investissement

- Motivation du personnel, déclenchement de l'installation lorsque celle-ci n'est pas utilisée.
- Contrôler périodiquement les réglages et les fonctions des horloges à contacts, en particulier lors d'interruption de courant ou au changement entre heures d'hiver et d'été.
- Lors de changement de fabrication, il y a lieu de reconstrôler les réglages et les commandes.
- Réduire les volumes d'air (emploi des valeurs MAK).
- Entretenir régulièrement les installations: nettoyer ou changer les filtres, contrôler les transmissions, nettoyer les carcasses des moteurs ainsi que les ouvertures de ventilation.

Installations neuves

- Optimiser les installations en fonction des conditions d'exploitation les plus récentes et mettre à profit les réglages continus.
- Installer des aspirations de sources de polluants (meilleur air et moins de courant).
- Réglage de la puissance des ventilateurs en continu ou par palier. Eventuellement installer des ventilateurs répartis ou fractionnés.
- Pour la ventilation « tempête », il vaut mieux installer des moteurs séparés.
- Intégrer des récupérateurs de chaleur (la consommation de courant va augmenter mais le gain en chaleur récupérée sera important).

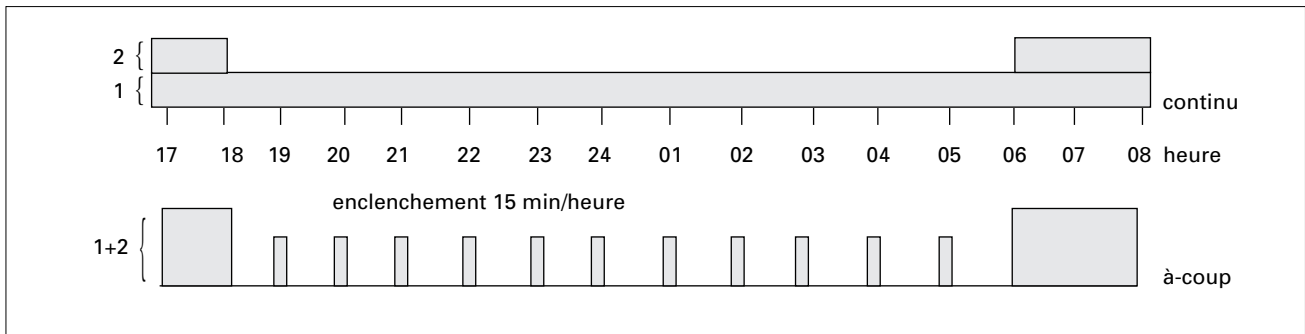


Figure 31: Exemple d'un fonctionnement par à-coup et d'un fonctionnement continu.

Exemple

Dans une entreprise chimique la ventilation fonctionne pendant la plus grande partie de la nuit à une valeur réduite. Des observations ont montrées qu'une ventilation par à-coup serait parfaitement suffisante pour éliminer les émissions polluantes. Par ce mode de commande, l'installation n'est en fonction que quinze minutes par heure en lieu et place d'un fonctionnement en continu (cf. figure 31). La consommation du service de nuit peut être réduite de 75% ou de 90 000 kWh. Comparée à la consommation totale cela représente quand même le 20%.

11.3 Création de froid

Les valeurs caractéristiques montrent un potentiel de gain

Où devrait se situer le point d'action? Quelles sont les mesures qui conduisent au meilleur rapport coût-utilisation? A ces questions, les grandeurs caractéristiques donnent des réponses. Par unité de production, les valeurs spécifiques de consommation par produit réalisé permettent des comparaisons et laissent entrevoir des potentiels d'économie.

Technique

Dans quelques branches de l'industrie la consommation d'énergie pour la production du froid est très élevée.

Le froid est en général produit par des machines frigorifiques avec un entraînement électrique du compresseur. Pour un autre procédé comme « l'absorption », la chaleur de la vapeur ou de l'eau chaude sert

de source d'énergie de fonctionnement. Malheureusement, les statistiques de la consommation d'électricité dans la production du froid font en grande partie défaut. Dans certaines branches de l'industrie, la part de la consommation d'énergie à la production de froid est importante par rapport à la consommation totale; cela est le cas en particulier dans l'alimentation, la chimie et le textile.

Principe de la production de froid par compresseur

A l'évaporateur, il est extrait la chaleur du fluide de refroidissement. Cette chaleur et l'énergie d'entraînement (électricité) sont évacuées au condenseur. L'emploi de cette chaleur extraite pour la préparation d'eau chaude ou pour le chauffage de locaux est souvent économiquement intéressant. Ces observations sont surtout importantes lors de la planification d'installations neuves.

Mesures

- Isoler correctement les locaux froids contre les pertes.
- Les portes de ces locaux doivent se fermer automatiquement.
- Installer des moteurs et des compresseurs avec de hauts rendements.
- Prévoir un réglage optimal.
- Indiquer correctement la température du condenseur.
- Disposer d'un réglage pour les charges fractionnées.
- Eviter le réglage par « bypass ».

- Le compresseur devrait être « étagé » correctement.
- Améliorer le stockage ainsi que les conduites froides et les locaux froids.
- Planifier la récupération de la chaleur.
- Éviter les consommations de froid de pointes par des mesures d'organisation.
- Les consommations de pointes devraient être couvertes, par exemple, par des stockages de glace.
- Utiliser l'eau froide en fonction de l'échelonnement des niveaux de températures.

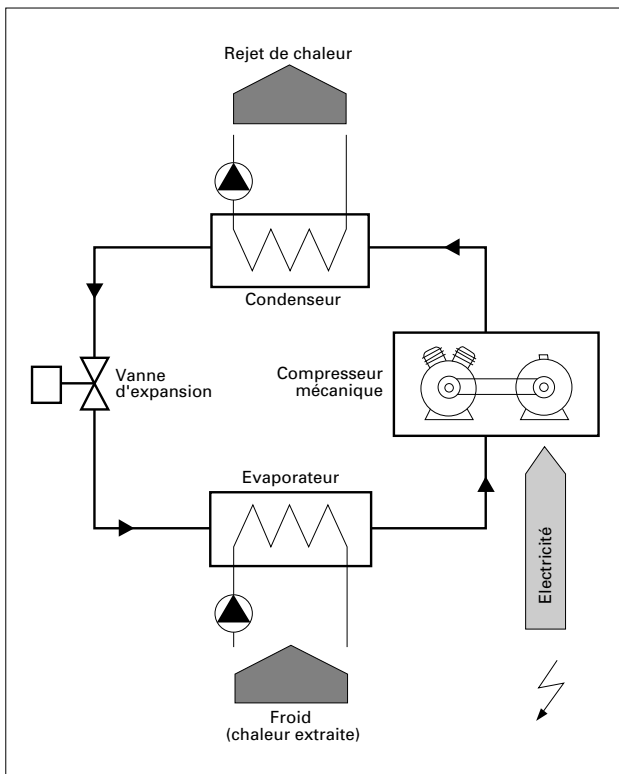


Figure 32: schéma d'une installation de production de froid à compresseur.

Exemple : brasserie

Les « grandeurs caractéristiques » donnent la consommation énergétique spécifique rapportée à la quantité produite ou au nombre de pièces.

Ces valeurs sont importantes et intéressantes parce qu'elles permettent des comparaisons faciles et également de mettre en évidence des parties faibles

de l'installation. Dans une brasserie, par exemple, les valeurs des grandeurs caractéristiques sont données en kWh/hl de bière.

Les grandeurs caractéristiques, comme présentées dans les illustrations suivantes, sont basées sur des valeurs de statistiques disponibles dans les diverses entreprises (compteurs horaires, compteurs de courant, valeur de la production, etc.).

Entre les six brasseries prises en compte, les consommations totales d'électricité sont différentes et également la part de la production de froid. Cette simple comparaison donne une indication sur le potentiel d'économie. Dans la brasserie A, la part d'électricité pour la production du froid est de 19%, alors qu'elle est de 62% dans la brasserie F.

Encore plus évidente est la comparaison entre la valeur de l'énergie théorique minimale pour effectuer le processus ou chaque étape d'un processus et la consommation réelle d'énergie.

Pour nos brasseries, la valeur théorique spécifique minimale pour la production de froid varie entre 3,5 et 5 kWh/hl. Les différences de production réelle de froid varient d'un facteur 4. Ces différences s'expliquent partiellement par des durées de rotation différentes dans les chambres froides.

La grande partie des différences provient de la manière inefficace de produire le froid et sa distribution et aussi à cause d'isolations trop faibles des chambres froides.

Les représentants des différentes brasseries sont membres d'un groupe de recherche. Les analyses des résultats obtenus ainsi que leurs valorisations ont déjà conduit à une série de mesures techniques et économiques ; d'autres mesures sont en voie de préparation.

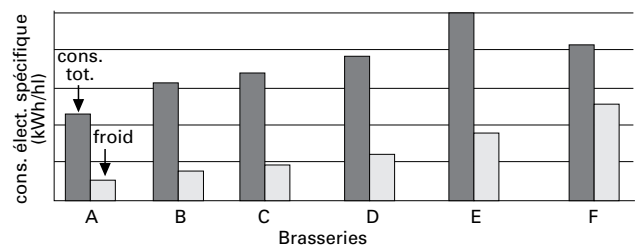


Figure 33: Consommation spécifique d'énergie électrique et consommation spécifique d'énergie électrique pour la production du froid dans 6 brasseries.

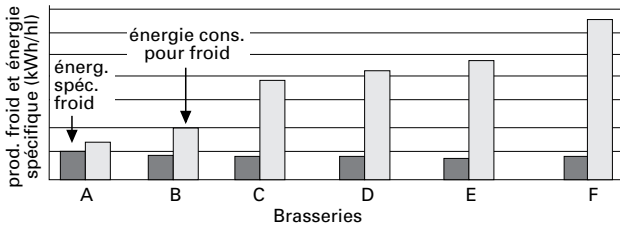


Figure 34: Production de froid et valeurs spécifiques théoriques minimales des besoins de froid dans les 6 brasseries.

11.4 Pompes

Régler la vitesse au lieu de contraindre le flux

Le réglage de la vitesse comme moyen de varier le débit apporte un potentiel d'économie d'énergie très important, et cela souvent avec un bon rapport coût-exploitation. La raison provient du faible coût du réglage et d'une large plage d'application avec un gain élevé.

Technique

Environ 15 à 20% de la consommation des moteurs dans l'industrie est à mettre sur le compte des pompes. Le potentiel d'économie d'énergie est important, parce que le réglage de la vitesse permet une réduction importante de la consommation d'énergie. Les champs d'application des pompes sont très larges. Les pompes se différencient par des types de construction très différents, cela en fonction des fluides pompés.

Applications typiques

Transport de chaleur et de froid; distribution de fluides divers comme le mazout, essence, huile hydraulique, produits chimiques, eaux potables et usée, etc.

Types de construction ou d'installations

Pompes centrifuges, pompes à piston, pompes à engrenages, pompes à vis, pompes à ailettes, pompes à membranes, etc.

Les applications les plus importantes du point de vue énergétique sont les pompes de circulation, d'alimentation ou de distribution d'eau chaude ou froide (chaleur ou froid), ainsi que les pompes pour l'alimentation en eau potable et l'évacuation des eaux usées. Les branches industrielles qui font appel à un nombre d'applications nettement au-dessus de

la moyenne sont la chimie et l'industrie du papier (pâte à papier).

Dans une pompe, la consommation d'énergie croît avec la puissance 3 de la vitesse ou du débit. Cette considération est des plus importantes pour l'analyse d'un système de pompage.

Exemple: dans un système, on n'utilise régulièrement que la moitié du débit; ainsi la puissance théorique d'entraînement ne sera que de 12,5% de la valeur nominale ($0,5^3 = 0,125$), pour autant que le réglage se fasse par variation de la vitesse. Par contre, la puissance sera de 80% de la valeur nominale si la pompe tourne à sa vitesse nominale et que le débit est réglé par étranglement.

Les éléments importants concernant le choix et la conception d'un système de pompage sont la connaissance des courbes caractéristiques de la pompe et du réseau de distribution. Les constructeurs de pompes mesurent les caractéristiques de celles-ci et les transcrivent dans les catalogues. Les caractéristiques d'un réseau de distribution peuvent être calculées ou lorsqu'il s'agit d'un remplacement ou d'une modification, elles peuvent être mesurées. Le point correspondant au régime d'exploitation se trouve à l'intersection des deux courbes. Le choix du rendement le plus élevé pour le régime d'exploitation le plus fréquent est déterminant pour le dimensionnement de la pompe et de son entraînement.

Mesures

- Déclencher la pompe lorsqu'aucun débit n'est nécessaire.
- Réduire les turbulences et les pertes de charges dans le réseau: dimensionner plutôt grand, utiliser des éléments d'égalisation, enclenchement simple du réseau.
- Equilibrer ou égaliser hydrauliquement les tuyaux du système de distribution.
- Commander les pompes par réglage optimal.
- Dimensionner les pompes de façon optimale.
- Choisir des pompes avec un haut rendement.

Exemple

Dans une exploitation, une pompe transporte des eaux usées d'un réservoir intermédiaire jusqu'à la

station d'épuration. La quantité d'eau usée dépend de la charge et varie en conséquence. La vanne d'étranglement à la sortie de la pompe règle le débit de façon à maintenir constant le niveau dans le réservoir intermédiaire. Le débit varie ainsi entre 50% et 100%.

Avec un convertisseur statique qui règle la vitesse de la pompe, une part importante d'énergie électrique peut être économisée par rapport au réglage par vanne. Cette économie dépend de la répartition dans le temps des différents régimes et des différences des demandes de puissances.

Dans l'exemple mentionné, l'économie est de l'ordre de 55 000 kWh/an; ainsi l'utilisation d'un convertisseur pour le réglage de la vitesse (débit) est économiquement justifié.

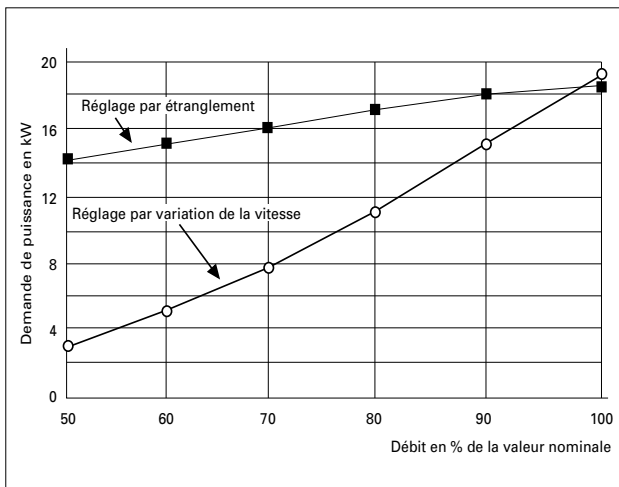


Figure 35: Puissance électrique consommée par une pompe en fonction des deux types de réglage du débit (pression variable).

Dans un second exemple l'utilisation d'un convertisseur statique n'est pas économiquement intéressant. Il s'agit d'une application dans laquelle la pression est pratiquement constante (pompage de la nappe phréatique). Malgré les conditions d'exploitation peu favorables, une économie de 10 000 kWh/an peut être faite.

Conséquence: une déclaration générale d'utilisation de convertisseurs pour le réglage de la vitesse ou débit ne peut pas être faite. Il s'agit d'étudier cas par cas.

11.5 Station d'épuration des eaux usées

Les bassins d'épuration doivent être ventilés de manière optimale

Dans les stations d'épuration des eaux usées, la ventilation des bassins de boues est le plus grand consommateur d'énergie électrique. Cela est aussi valable pour la station d'épuration d'une industrie chimique qui comporte pas moins de 70 moteurs.

Technique

Les exploitations chimiques produisent en général beaucoup d'eau usée. Ces eaux ne peuvent pas être sans autre déversées dans une installation d'épuration publique (STEP). L'exploitation concernée nécessite une station d'épuration qui traite également les eaux usées d'une commune de 4500 habitants. Les 70 moteurs installés représentent une puissance apparente totale de 460 kVA. La consommation annuelle de ces moteurs est de 1,7 millions de kWh. Elle représente les 8,5% de la consommation d'énergie totale de toute l'entreprise. La consommation d'énergie électrique de cette STEP coûte environ Fr. 200 000.- par an. (Se référer au tableau 36 et également à l'étude RAVEL « Analyse de processus industriels sélectionnés: utilisation de force dans une entreprise chimique » N° 724.397.21.56 f.)

Composants	Consommation [kWh/an]	Coût de l'énergie électrique [Fr.]
Moteurs de ventilation Centrifugeuses	1 400 000	160 000.-
Ventilateur d'air frais	100 000	11 500.-
Retour des boues	100 000	11 500.-
Alimentation des boues	30 000	3 400.-
	20 000	2 300.-
Totaux des moteurs importants	1 650 000	188 700.-

Tableau 36: Coût de la consommation d'énergie électrique des gros moteurs de cette installation.

Environ 85% de l'énergie électrique est utilisée pour l'entraînement des ventilateurs des bassins des boues d'épuration. Cette valeur se situe en général entre 50% et 80%. Une attention particulière devrait

donc être accordée à ces composants. Comme facteurs d'influence, on peut citer :

- besoin en oxygène de l'eau usée avant l'épuration;
- technique de ventilation : fin ou grossier ;
- commande des ventilateurs et de la quantité d'air.

Mesures

Dans le cadre de la protection de l'environnement – protection des eaux et de l'air – on utilise environ 3,5% de la consommation électrique de toute l'industrie. Cette part va encore augmenter à cause de la sévérité justifiée des prescriptions.

L'oxygène est d'importance vitale pour les micro-organismes; pour cela, la teneur en oxygène de l'eau est l'un des paramètres les plus importants pour le réglage de la consommation d'air. Dans beaucoup d'installations, la quantité d'air est simplement réglée par un « bypass » en renvoyant dans l'environnement l'air en surplus. Cependant la quantité d'air pourrait être réglée par l'emploi de ventilateurs appropriés et ceux-ci réglés en vitesse ou par l'enclenchement étagé de plusieurs ventilateurs selon un programme de priorité ou de charge. En particulier, pour des installations importantes, l'emploi de turbocompresseurs est particulièrement favorable parce que pour des pressions relativement constantes le débit peut fortement varier. La mise en exploitation d'un système moderne de commande peut également être économiquement intéressant.

11.6 Installation de purification des gaz de fumée

Maintenir la propreté de l'air en consommant moins d'énergie électrique

Environ 10% de la consommation d'énergie électrique des cimenteries provient des mesures justifiées de protection de l'environnement et 6,5% pour l'exploitation des installations de nettoyage des gaz de fumée. En premier se trouve l'élimination des émissions de poussières, du NO_x et du SO₂. Les poussières et le NO_x proviennent essentiellement du processus, alors que le SO₂ provient de la matière brute. En vertu des ordonnances sur la protection de l'air de 1988, une deuxième étape du net-

toyage des gaz de fumée a été mise en exploitation récemment.

A coté des électrofiltres – constructivement, ce sont des grilles chargées électriquement – les ventilateurs de transport des gaz sont les plus gros consommateurs d'énergie électrique. Des entraînements de pompes, de bandes transporteuses ou convoyeurs sont aussi installés.

Partie de l'installation	Puissance [kW]	Coût énergétique par an [Fr.]
Ventilateurs des gaz d'échappement	1000	400 000.-
Ventilateurs	1000	400 000.-
Ventilateurs de broyeurs	850	340 000.-
Absorbeurs	160	65 000.-
Filtres à poussière	130	52 000.-

Tableau 37: Puissance et coût de la consommation d'énergie électrique pour les composants les plus importants.

Mesures

- Une conduite de processus efficace permet de déclencher pendant certains laps de temps des parties d'installation non utilisées.
- Les matériaux sont à transporter par les chemins les plus directs et les plus courts.
- Les moteurs doivent fonctionner dans des plages de régime restreintes de 3/4 à 4/4 de la charge nominale.
- La commande des convertisseurs (entraînements) doit être adaptée à la demande de puissance de chaque module. En général, cela est possible par l'emploi de convertisseurs statiques.
- Choisir les bons réducteurs (attention aux contraintes de la poussière).
- Effectuer soigneusement les travaux de nettoyage et d'entretien, cela particulièrement là où il y a de la poussière.
- Disposer des moyens de surveillance de la puissance et de la consommation d'énergie.
- Surveiller le déroulement du processus et des charges sur l'ensemble de l'installation.

Ventilateurs

Les plus gros entraînements d'une installation de nettoyage des gaz de fumée sont les ventilateurs. Sur la base des conditions d'exploitation et des concentrations, la régulation des flux se fait sur le principe du réglage des ailettes du distributeur d'entrée. Pour cela, la position des ailettes du ventilateur se fait par l'opérateur depuis la salle de commande. Avec ce principe de régulation, il est possible d'adapter les débits et les pressions aux conditions de charge et de ce fait adapter la consommation d'énergie électrique aux besoins réels de fonctionnement.

11.7 Transport interne dans les entreprises, convoyeurs

Diminuer les masses en mouvement

Des réserves de sécurité lors du dimensionnement des installations de transport interne ont pour conséquence des entraînements surdimensionnés. Ainsi, l'ensemble de l'installation est dimensionné pour des conditions qui pourraient se présenter très rarement, voire jamais. Le paragraphe suivant traite de la concordance des moyens et des besoins.

Technique

L'économie d'énergie et une bonne gestion de stockage sont en conformité. Environ 5% de la consommation des entraînements de l'industrie sont utilisés dans les installations de transport interne et de stockage. On peut de manière simplifiée considérer 5 types de systèmes de transport interne.

Système de stockage

La gestion la plus efficace d'une installation de stockage consiste à réduire l'inventaire et par cela le volume mis à disposition. Un plus petit volume réduit les déplacements et aussi l'énergie consommée. De plus, les volumes à chauffer ou à refroidir sont aussi plus faibles, les économies d'énergie et le stockage ont ainsi des buts compatibles.

Alimentation permanente/convoyeurs

Les matériaux sont transportés en permanence. Exemple: transport à rouleaux, à chaîne et à bande. Dans ce genre de transport, les rendements et les valeurs des frottements sont les critères les plus importants concernant la consommation d'énergie.

Ascenseurs

Dans l'industrie, les ascenseurs hydrauliques sont appliqués pour des distances courtes et pour de petites vitesses. La souplesse de la construction et de l'installation de l'entraînement jouent favorablement; défavorable est la forte consommation d'énergie électrique (entraînement de la pompe). Un ascenseur à câble devrait pour cette raison être pris en considération comme variante et comparé.

Ponts roulants

Le facteur le plus important concernant la consommation d'énergie est le dimensionnement général et la masse du pont roulant. Les ponts roulants se caractérisent par de petites durées de fonctionnement comparées aux bandes transporteuses/convoyeurs.

Engins de transport au sol

Ce sont les engins de déplacement et de levage, les chariots de transport, élévateurs, etc. La masse et la longueur des déplacements sont les facteurs déterminants de la consommation d'énergie. Le potentiel d'économie est faible.

Valable en général

Les entraînements électriques directs sont plus efficaces que les entraînements hydrauliques et/ou pneumatiques.

Planification

La planification est de loin déterminante dans une installation de transport interne du point de vue de la consommation d'énergie. A côté du choix du système, le dimensionnement et le type des entraînements ont aussi leur importance.

Marge de sécurité: totalement superflue!

Trop souvent, des marges de « peur » qui se multiplient conduisent à des surdimensionnements, à des coûts d'installations trop élevés et à une plus grande consommation d'énergie.

Exemple: le planificateur augmente la vitesse de transport de quelques% pour être sûr que le débit de transport soit respecté. Le constructeur se sent plus à l'aise s'il ajoute lui aussi, lors de la construction, un facteur de sécurité. Les caractéristiques pour le dimensionnement, comme rendement et frottement, bénéficient aussi de petites réserves. Le fournisseur du moteur choisit à son tour la grandeur juste supérieure pour éviter le risque d'un sous-dimensionnement, etc.

« Check-list » pour la conception
d'une nouvelle installation

- Définir avec précision les usages et l'utilisation.
- Demander les valeurs de consommation d'énergie chez les constructeurs.
- Comparaison économique de différentes variantes des systèmes d'entraînement, ainsi que des commandes et des réglages.
- La masse des engins ou des systèmes de transport devrait être aussi petite que possible.
- Contrôler les systèmes d'entraînement en fonction des contraintes et exigences.

11.8 Production d'usinage mécanique par enlèvement de copeaux

Optimiser la charge et la logistique

Il y a certainement peu d'énergie à économiser dans le processus de coupe proprement dit. En effet, dans un processus complet de production en série de pièces mécaniques, seuls 10% de la consommation d'énergie sont affectés à la coupe alors que les 90% de la consommation d'énergie sont consommés par l'organisation et la logistique de production.

Environ 50 000 machines-outils sont en exploitation en Suisse. Elles produisent un chiffre d'affaires de l'ordre de 5,5 milliards de francs. La consommation d'énergie électrique de ces machines représente environ les 10 à 15% de la consommation d'électricité de l'industrie.

Les machines-outils produisent des pièces mécaniques selon les indications des gammes d'opération. Ces machines sont exclusivement entraînées par des moteurs électriques. Les entraînements sont constitués par un appareillage d'alimentation et de réglage associé au moteur avec en général un réducteur. Le réglage est essentiellement un contrôle de la vitesse.

Les analyses ont démontré que la consommation théorique minimale pour la production d'une pièce est de l'ordre de 10% de la consommation totale. Cela laisserait un potentiel théorique d'économie d'énergie de 90% de la consommation totale. Il est

évident que la part pratiquement atteignable est bien plus faible. C'est principalement dans l'adaptation de la transmission (engrenage, vis) et non le surdimensionnement du moteur que l'on peut économiser. C'est bien plus l'efficacité proprement dite de la machine et du processus qui est à prendre en considération. C'est là que se trouve le plus grand potentiel.

Exemple: la charge d'un parc de machines

Les pièces sont effectivement usinées pendant environ 5% de leur présence dans les ateliers. Pendant les 95 % du temps restant, elles sont transportées, mesurées et stockées.

Quant à l'utilisation des machines, nous avons trouvé les chiffres suivants: pendant 15% du temps, l'usinage s'effectue, 30% du temps est utilisé pour les changement d'outils et des réglages, le solde du temps (donc les 55%), la machine est en attente et/ou fonctionne à vide. Dans la majorité des cas, les machines restent constamment enclenchées et les moteurs tournent à vide ou sont arrêtés selon le type de la commande.

Une meilleure charge des machines demande soit des série plus importantes, ce qu'il n'est pas raisonnable d'envisager, soit des temps de réglage entre pièces pratiquement nuls, ce qui est à envisager. Un exemple montre que dans certaines entreprises, automobiles par exemple, on peut augmenter le temps d'usinage proprement dit à 38% au lieu des 15% moyen de chez nous.

Rendement de conversion et rendement énergétique

- Rendement de conversion
- Effort et puissance de coupe

En première approximation, la valeur de l'effort de coupe tangentielle est donnée par la relation approximative:

$$F = R \cdot k \cdot S$$

avec: F (en daN)

R (en daN/mm²), résistance à la rupture par compression

k coefficient numérique

S (en mm²), section du copeau =

= a (avance en mm/t) · p (profondeur en mm)

Le produit (R · k) symbolise la résistance spécifique à la coupe en fonction du matériau coupé et du degré de fragmentation du copeau. Le coefficient k varie de 2 à 4 environ, en fonction inverse de la section S,

soit: k = 2,5 (tournage ébauche), k = 3 (tournage finition), k = 4 (perçage et fraisage).

Exemple:

L'effort de coupe pour chariotter l'acier A.60, si a = 0,5 mm et p = 5 mm, est de:

$$F = R \cdot k \cdot S = 60 \cdot 2,5 \cdot 0,5 \cdot 5 = 375 \text{ daN}$$

et la puissance à installer sur un tour (moteur électrique) pour cet effort à la vitesse de coupe de 30m/min avec un rendement global de 0,65 sera de:

$$P \text{ (en kW)} = \frac{F \cdot V}{1000 \cdot 60 \cdot n} = \frac{3750 \cdot 30}{1000 \cdot 60 \cdot 65} = 2,9 \text{ kW}$$

Rendement énergétique:

Définition:

- énergie utile =
= énergie de coupe · rendement de coupe
- énergie spécifique de coupe W_{sp} =
= énergie de coupe/volume des copeaux
= (N · mm)/(mm² · mm) = (J/mm³)

Ainsi, un volume à enlever pendant un certain laps de temps, en tenant compte du rendement de conversion nous donne la puissance à installer. L'énergie utile est représentée par le volume de copeaux à enlever. Pour les différents types d'usinage, nous avons les valeurs suivantes d'énergie spécifique de coupe:

Exemple acier:

- tournage, fraisage, perçage 1 à 3 (J/mm³)
- rectifiage 30 à 60 (J/mm³)
- étincelage 100 à 200 (J/mm³)
- électroérosion 200 à 500 (J/mm³)

Pour une production d'usinage moyen, on obtient les valeurs typiques suivantes (valeurs ramenées à la masse de la pièce pour un volume de copeaux estimé de 20% et en ne comptant que de l'énergie directe):

Energie utile	52,5 kJ/kg ou 14,6 Wh/kg
Energie de coupe	64,1 kJ/kg ou 17,8 Wh/kg
Energie pour une opération de coupe	120 kJ/kg ou 33,4 Wh/kg
Energie pour un cycle de production unitaire	320 kJ/kg ou 88,9 Wh/kg
Energie pour la production en série	475 kJ/kg ou 132 Wh/kg
Energie opératoire totale	630 kJ/kg ou 175 Wh/kg

Le rendement énergétique de production =

$$\frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie opératoire totale}} = \frac{52,5 \text{ kJ/kg}}{630 \text{ kJ/kg}} = 0,083 = 8,3\%$$

C'est la seule valeur intéressante dans le cadre d'une analyse énergétique.

Mesures

L'étude RAVEL intitulée «Analyse du rendement énergétique de processus industriels de production», N° 724.397.21.55 f, conclut que les gains énergétiques potentiels sont de l'ordre de 542 GWh/an.

De ce potentiel possible, 6% peuvent être obtenus par de meilleures machines et un processus de coupe nettement amélioré. La plus grande part du potentiel d'économie sera réalisée par une organisation de production adéquate et efficace. C'est l'utilisation ou la mise en pratique des concepts de *Just in time*, *Lean production*, *Material requirement planning*, *Hierarchical production planning*, etc. Ces méthodes sont ou vont être mises en application par les entreprises non pour des questions d'économie d'énergie mais bel et bien pour des raisons de coûts de production.

On peut dire que 60% du potentiel d'économie pourraient être gagnés par la charge et des gammes d'opérations judicieuses sur une machine et 40% par l'optimisation du flux de la production elle-même.

Mesures par machines

- Déclencher la machine pendant les pauses.
- Motiver les opérateurs à une production plus efficace.

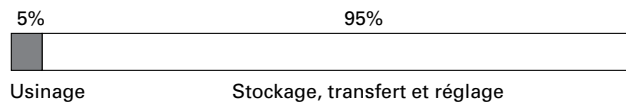


Figure 38: Emploi du temps par pièce.

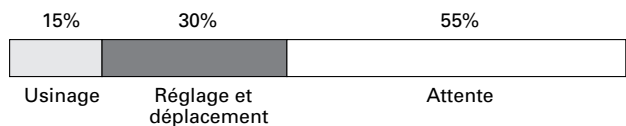


Figure 39: Emploi du temps pour une machine.

11.9 Cimenterie

Cette industrie est par excellence le thème d'économies d'énergie; elle fait partie du groupe des industries les plus consommatrices d'énergie. Une exploitation type comprend environ 1000 entraînements électriques. L'analyse des conditions d'exploitation et de production d'une entreprise était l'objectif d'un projet RAVEL. Cette analyse démontre que, malheureusement, les conditions sont relativement spécifiques à cette entreprise. Cependant, des conclusions générales peuvent quand même en être tirées.

Technique

Plus des $\frac{4}{5}$ de la consommation d'énergie sont pris par les entraînements.

La production du ciment est une industrie à consommation intensive d'énergie. Par tonne produite, il faut en Suisse 100 kWh d'énergie électrique et quelques fois plus en chaleur. Plus des $\frac{4}{5}$ de la consommation d'électricité sont consommés par les entraînements. Dans l'exploitation analysée, il y a environ 1000 entraînements avec une puissance entre 40 W et 3600 kW, la majorité dans les puissances moyennes. L'électricité compte pour 10% de la consommation d'énergie et pour 30% des coûts d'énergie. Cela est un bon argument pour la réduction de cette consommation. Des mesures touchant les entraînements sont donc une priorité.

Mesures

- La consommation d'énergie de chaque partie de l'installation est mesurée en permanence. Des écarts par rapport à des valeurs moyennes sont analysés. Les résultats sont immédiatement transcrits pour l'optimisation des réglages et de la conduite du processus.
- La disponibilité des installations est surveillée par des procédures d'entretien efficaces.
- L'exploitation dispose d'un stock de moteurs permettant des échanges rapides effectués par le personnel d'entretien. Par mesure d'économie, ce stock est géré au plus juste. Pour certains entraînements, on admet un faible surdimensionnement.
- Les valeurs des consommations spécifiques sont partie intégrante des contrats de fournitures

d'installations. Les spécifications sont qualifiées lors des tests de réception.

- La conduite du processus permet l'enclenchement et le déclenchement de parties de l'installation afin d'augmenter la disponibilité. Les marches à vide (sans charge) sont supprimées autant que possible.
- Le personnel est régulièrement instruit.
- Les transports pneumatiques sont autant que possible remplacés par des systèmes électromécaniques.
- Pour assurer une répartition optimale des charges, un système de gestion d'énergie est en service.

11.10 L'imprimerie (impression offset à feuilles) et l'emballage carton (production des boîtes pliantes)

L'industrie graphique emploie environ quelques 60 000 personnes. Elle est de ce fait la cinquième branche de l'industrie de la Suisse. Elle se décompose selon les groupes généraux suivants: la prépresse, l'impression, le façonnage, le conditionnement et la distribution.

La répartition par produits est la suivante:

• journaux/quotidiens	19%
• magazines	17%
• livres	7%
• impressions économiques	16%
• publicité	27%
• emballage	9%
• divers	5%

Alors que dans la prépresse il y a surtout des équipements informatiques et de composition, scanners, développeuses, le secteur impression comprend des machines d'impression à la feuille ou rotatives, des installations de climatisation et de séchage. Dans les autres zones d'un centre d'impression se trouvent des plieuses, des machines d'insertion, des chaînes de transfert et de stockage ainsi que des installations de climatisation pour les stocks ou magasins.

Consommation d'énergie électrique avec une machine d'impression à feuilles

Dans la machine d'impression à la feuilles, les éléments consommateurs d'énergie électrique sont les suivants et leur comportement, vis-à-vis de cette consommation, a les caractéristiques suivantes :

Composant de la machine	Comportement énergétique en exploitation
• Moteurs, entraînement principal	variable
• Appareils auxiliaires	constant
• Moteurs du chargeur/margeur	faible variation
• Moteur de la réception	faible variation
• Compresseur	constant
• Ventilateur	constant
• Transformateur	constant
• Humidificateur	faible variation
• Pupitre de commande	constant

Comparaison des consommations d'énergie entre la production du papier et l'impression

Pour la fabrication d'une tonne de papier, il faut consommer environ 5500 à 6000 kWh, ce qui fait environ 5,5 à 6 kWh par kg.

Une feuille de 115 g/m² de papier en format de 50 sur 70 cm pèse environ 40 g. Ainsi 250 feuilles font 1 kg et 1000 feuilles qui pèsent 4 kg consomment donc environ 22 à 24 kWh pour leur fabrication.

Pour imprimer 1000 feuilles, il faut sur une machine du type 2-FOM environ 1,1 kWh et sur une machine du type 4-FOM entre 1,9 et 2,1 kWh.

Ainsi la proportion de la consommation d'énergie entre matière de base et impression est de l'ordre de 10 à 20 fois plus pour la production du papier que pour l'impression.

Pour une machine rotative d'impression, dans les mêmes formats, la puissance installée est environ 10 fois supérieure pour 4 couleurs et une vitesse de 60 000 exemplaires/h, c'est-à-dire 5 à 6 fois supérieure à la cadence à la feuille. Ainsi, on peut s'attendre à une consommation d'énergie, pour une feuille, du double pour l'impression sur rotative qu'à la feuille.

Comptabilité énergétique pour un quotidien

Nous avons connaissance des chiffres suivants par kg de journal :

- énergie pour matériel de la préresse 10 Wh/kg
- énergie pour préparation forme d'impression 17 Wh/kg
- énergie pour fabrication du papier 4000 Wh/kg
- énergie pour consommables 3 Wh/kg
- énergie du processus d'impression 66 Wh/kg
- énergie travaux accessoires et salle d'expédition 27 Wh/kg
- énergie pour matériel d'emballage 3 Wh/kg
- énergie pour la distribution (camion et CFF) 78 Wh/kg
- récupération par recyclage -1500 Wh/kg

Pour le quotidien considéré (180 g), il a été consommé 0,77 kWh. Par le recyclage de la récupération du papier, on récupère 0,27 kWh. Ainsi la consommation énergétique effective pour ce quotidien (par exemplaire) est de 0,5 kWh.

Une autre valeur est la consommation d'énergie par kg de journal. Elle est sans recyclage de 4,2 kWh et avec recyclage de 2,7 kWh.

11.11 Industrie de la cellulose, du papier et du carton

L'industrie du papier, selon la définition ci-dessus, est un grand consommateur d'énergie. En 1985, elle consommait environ 14% de l'énergie totale (13% de l'électricité) recensée par l'UEC.

La production

Les produits intermédiaires entrant dans la fabrication du papier se répartissent de la manière suivante :

Année	Cellulose [1000 t]	Pâte de bois [1000 t]	Vieux papier [1000 t]
1960	100	130	160
1970	118	150	297
1980	103	182	376
1987	126	198	553

Produits finis et semi-finis (en milliers de tonnes)

Année	Papier journal	Papier graphique	Papier d'emballage	Papier ménage	Carton	Mat. première carton ondulé	Energie spécifique	
							GJ/t	kWh/kg
1960	90	129	78	38	100	45		
1970	143	249	80	38	150	71		
1980	210	284	70	66	112	172		
1987	248	323	35	133	146	262		

Agent énergétique	Consommation finale [TJ/an]	Convertie en énergie primaire [TJ/an]	Energie spécifique	
			GJ/t	kWh/kg
mazout	5759	6855		
gaz	2019	2404		
charbon	922	1097		
électricité	5122	9850 (x 1,0,52)		
ch. à dist	1100	1375		
déc.+ch. réc.	1931	3017		
Total		24590	21,45	5,95

La production totale des produits finis et semi-finis représente un poids de 1147 ktonnes pour l'année 1987 et 480 ktonnes pour l'année 1960.

Le 50% de la consommation suisse de ce type de produits est aussi fabriqué en Suisse et 45% de la production est exporté. On peut dire, avec une certaine simplification, que la production suisse est consommée chez nous!

Nous obtenons comme valeur des énergie spécifiques pour ces deux années les chiffres suivants:

Année	Consommation d'énergie [TJ/an]	Production [ktonne/an]	Energie spécifique	
			GJ/t	kWh/kg
1960	10 044	480	20,92	5,83
1987	16 853	1147	14,69	4,08

Souvenons-nous que la valeur de l'énergie spécifique théorique minimale est de 0,1 GJ/t ou de 0,028 kWh/kg! La moyenne mondiale est de 22 GJ/t et nous sommes à 15 GJ/t.

Si nous étions conséquents et si nous faisons un calcul de l'énergie spécifique par rapport à l'énergie primaire consommée, nous obtiendrions pour 1987 la nouvelle valeur suivante:

Remarque

L'addition des différents agents énergétiques sans tenir compte de leur « qualification énergétique », comme cela se fait très régulièrement, est une **erreur**.

12. Comparaison du point de vue énergétique des systèmes d'entraînements pneumatique, hydraulique et électromécanique

Résumé de la publication «Analyse de processus industriels sélectionnés: utilisation de force dans une entreprise chimique», RAVEL N° 724.397.12.56 f.

Résumé

Comment utiliser de manière adéquate les composants pneumatiques, hydrauliques et électromécaniques pour les outillages à main, les appareils et les installations? La réponse doit fournir une aide à la décision et conduire à l'achat et à l'utilisation de machines et de systèmes de commande économes en énergie.

Au cours de dialogues de plusieurs mois avec des fabricants suisses de composants, des utilisateurs industriels et des professionnels, il a été procédé à quelques essais. La comparaison des performances énergétiques entre les différents systèmes est quelque chose de nouveau et les résultats sont les suivants:

1. Les domaines d'application se divisent en trois groupes:
 - machines avec entraînements pneumatique, hydraulique et/ou électromécanique;
 - outillage à main pour application industrielle, par exemple: perceuses, clés à cliquets sur les chaînes de montage, technique de laboratoire dentaire, etc.;
 - outillage à main pour utilisation spécifique, par exemple: perceuses, machines à aiguiser et à meuler ou scier pour les chantiers ou service de maintenance, etc.
2. Chaque système a indiscutablement ses avantages et ses inconvénients. Par exemple, l'hydraulique pour les installations et la pneumatique pour les machines-outils ont des avantages de poids très nets et ainsi de puissance massique (puissance/kg).
3. Les pertes énergétiques des trois systèmes peuvent se classer selon les catégories:

A pertes de conversion et de distribution de l'énergie (air comprimé et systèmes hydrauliques);

B pertes produites par la commande et la régulation (il est cependant sous-entendu que dans ces applications l'exploitation par tout ou rien entraînerait encore plus de pertes);

C pertes à l'intérieur de l'appareillage de transformation en énergie mécanique (moteurs et cylindres d'entraînement).

Le rendement global du système résulte de ces trois types de pertes.

4. Les ordres de grandeurs des rendements des trois systèmes sont les suivants:

Types de système	Application sans réglage	Application avec réglage
pneumatique	3 à 7%	moins de 3%
hydraulique	60 à 70%	40 à 50%
électromécanique	60 à 80%	40 à 60%

La répartition des rendements est la suivante:

Systèmes	Conversion énergie électrique en intermédiaire	Commande/ réglage en %	Transformation en énergie mécanique	Rendement global en %
pneumatique	4 à 10%	— 30-70	rotation <80% translation 70% " "	4-8 <3
hydraulique	65 à 80%	circ. fermé 95 ouvert: hydr.rég. 60-80 servohyd. <35	rotation 70-90% translation 95% " "	60-70 40-50 <20
électromécanique	100% pas énerg. interm.	— 65-80	rotation 80% translation 40-90% " "	60-80 40-60

Remarque

Il y a lieu d'être très prudent avec les valeurs indiquées précédemment. Celles-ci se réfèrent toujours à des conversions «instantanées» (puissance) et pas à des conversions énergétiques

durant une durée d'exploitation. C'est uniquement ce cas qui est une référence de consommation d'énergie. Ainsi ces valeurs sont à considérer comme des maxima.

5. La consommation énergétique et son coût sont généralement plus importants que ce qui était admis jusqu'à ce jour. Le rapport entre le coût de l'énergie consommée et celui de l'énergie utile mécanique d'entraînement atteint plusieurs ordres de grandeurs de différences et cela en particulier pour la pneumatique/air comprimé. Il en va en général de même pour le coût en capital de ces installations, compresseurs avec leur conduites et tous les composants.
6. Il est recommandé de faire pour chaque nouvelle installation une comparaison des coûts pour les trois variantes, pneumatique, hydraulique et électromécanique, ainsi qu'un calcul de rentabilité d'exploitation.
7. Les constructeurs et les concepteurs/projeteurs de machines ou d'installations complexes, comme par exemple des usines d'emballages et/ou de distribution devraient, avant de s'équiper de composants pneumatiques ou hydrauliques, considérer les aspects techniques et aussi énergétiques.

8. Echelle des coûts énergétiques :

Si nous prenons pour référence 1 le rendement énergétique d'une installation pneumatique, il serait de 10 pour l'hydraulique et de 14 pour l'électromécanique.

Dans ces conditions le coût comparé pour l'utilisation de l'énergie mécanique disponible par les trois systèmes est la suivante (prix de l'énergie électrique consommée 0,185 fr./kWh) :

Systèmes	sans réglage Fr.	avec réglage Fr.
électromécanique	0,25 à 0,35	0,35 à 0,50
hydraulique: circuit ouvert		0,40 à 0,50
circuit fermé	0,30 à 0,35	
pneumatique	2,50 à 5,00	>4,00

13. Références bibliographiques

- [1] R. Le Goff: «Energétique industrielle, technique et documentation». 1988.
- [2] G.F. Micheletti: «NC Machine Tools as Electric Energy Users». Annals of CIRP, 1981.
- [3] D. Spreng: «Net Energy Analysis». Praeger, 1988.
- [4] «Maîtrise de l'énergie dans les industries mécaniques». Agence française pour la maîtrise de l'énergie. 1990
- [5] Dr. A. Neyer: «Elektroantriebe». RAVEL, N° 724.332 d, 1993.
- [6] «Analyse de processus industriels sélectionnés: utilisation de la force dans une industrie chimique». RAVEL, N° 724.397.21.56 f.
- [7] «Energetischer Vergleich pneumatischer, hydraulischer und elektromechanischer Antrieb- und Werkzeugsysteme». RAVEL, N° 724.397.12.56 d.
- [8] «L'électricité à bon escient». Manuel RAVEL, 1993.
- [9] «Energy Analysis of 108 Industrial Processes». Fairmont Press Edition, 1985.
- [10] «Methoden zur Energie- und Rohstoffeinsparung für Augewählte Fertigungsprozesse». RWTH Aachen, 1991.
- [11] «The Trends that are Shaping our Future». VITAL SIGNS 1993, World Watch Institute.
- [12] B. Aebischer et G.R. Perrin: «Les Industries suisses intensives en énergie». CUEPE-Genève, 1990.
- [13] M. Binzwanger: «Gibt es eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums von Naturverbrauch und Umweltbelastungen?». IWO-HSG, 1993.
- [14] Dissertation: «Der Energieverbrauch zur Erzeugung ökonomischer Güter und seine Bedeutung». Unter der Leitung von H. Schaefer, TUM, 1985.
- [15] M. Jufer: «Transducteurs électromécaniques». PPUR, 1985.
- [16] M. Taube, S. Hirzel: «Materie, Energie und die Zukunft des Menschen». 1988.
- [17] «Manuel de l'industrie». RAVEL, N° 724.370 f, 1995.