

RÉINVENTONS
L'ÉNERGIE



LA VARIATION DE VITESSE



RÉGION WALLONNE

SOMMAIRE

	INTRODUCTION	1
1	TECHNOLOGIE	3
1.1	Introduction	3
1.2	Moteur asynchrone	3
1.2.1	Principe	3
1.2.2	Courbes de fonctionnement	4
1.2.3	Fonctionnement moteur - application : choix du moteur	4
1.3	Variateur de vitesse	5
1.3.1	Redresseur	5
1.3.2	Circuit intermédiaire	6
1.3.3	Onduleur	6
1.3.4	Circuit de commande	8
1.3.5	Normes	9
1.4	Association d'un variateur de vitesse et d'un moteur	9
1.4.1	Courbes caractéristiques	9
1.4.2	Modes de pilotage possibles avec variateur de vitesse	10
1.5	La question des harmoniques	11
1.5.1	Effets des harmoniques sur les charges et les procédés	11
1.5.2	Rappel des notions d'harmoniques	11
1.5.3	Exemple des harmoniques générées par un variateur de vitesse	12
	RESUME DE LA TECHNOLOGIE	14
2	EXEMPLES D'APPLICATIONS	16
2.1	Système de climatisation à volume d'air constant	16
2.2	Contrôle de filtres	19
2.3	Pompe de pressurisation	21
2.4	Pompe de circuit de filtrage d'une piscine	24
2.5	Système de tour de refroidissement	25
2.6	Conclusion	26
3	FACTEURS DE DÉCISION ET MISE EN OEUVRE	28
3.1	Avantages des variateurs de vitesse par variation de fréquence	28
3.1.1	Avantages généraux	28
3.1.2	Caractéristiques des moteurs asynchrones pilotés	28
3.1.3	Fonctionnalités intégrées	29
3.2	Inconvénients des variateurs de vitesse par variation de fréquence	30
3.3	Précautions et protections	31
3.3.1	Position des capteurs	31
3.3.2	Lutte contre les harmoniques	31
3.3.3	Interférence de fréquences radio (RFI)	31
3.3.4	Installation et câblage	31
3.3.5	Protection des installations	32
3.3.6	Echauffement du variateur	32
3.4	Comment savoir si mon application mérite d'être adaptée ?	32
3.4.1	Facteurs à prendre en compte dans le calcul de rentabilité	32
3.4.2	Evaluation de la rentabilité	33
3.5	Choix de la taille du variateur de vitesse	34
	CRITERES DE SELECTION	35
4	ETUDES DE CAS	37
4.1	Ventilateur piloté : l'étranglement mécanique remplacé par la variation de vitesse	37
4.2	Ascenseur : le contrôle de vitesse par pôles remplacé par le variateur de vitesse	37
4.3	Pompe d'eau sale : l'étranglement mécanique remplacé par le contrôle de la vitesse	38
4.4	Variateurs de vitesse associés à des tours de refroidissement	38
5	ALTERNATIVE TECHNOLOGIQUE	40
5.1	Introduction	40
5.2	Technologie	40
5.3	Illustrations de modes de fonctionnement de la technologie	40
5.3.1	Fonctionnement à débit constant	40
5.3.2	Fonctionnement en fonction d'une consigne de température	41
5.4	Avantages et inconvénients de la technologie	41
	CONCLUSION	42
	BIBLIOGRAPHIE	43

INTRODUCTION

Au total, 80% de la consommation d'électricité industrielle revient aux moteurs électriques. Les pompes et les installations à air comprimé y contribuent pour une part importante. Dans le secteur tertiaire également, les moteurs représentent une consommation considérable, avec comme principales applications la ventilation, les systèmes de réfrigération et la climatisation.

Beaucoup de systèmes utilisant des pompes, des ventilateurs, des compresseurs, ... et devant travailler dans des conditions de charge variable, sont régulés par étranglement ou par by-pass. Ce mode de régulation est énergivore : on accélère et on freine en même temps!

Il est nettement plus efficace de réduire la vitesse des moteurs pour l'adapter aux besoins. Par exemple, réduire de moitié la vitesse d'un ventilateur pour adapter le débit d'air frais à l'occupation d'un local permet de diviser par huit la consommation électrique du moteur!

Ceci est possible grâce aux variateurs de vitesse et aux énormes progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance.

Ainsi, dans toute application utilisant des moteurs (distribution de chauffage, ventilation, pompage, traction, ...), l'intérêt de la régulation de vitesse mérite d'être étudié : des dizaines de pourcents d'économie peuvent être faits sur la consommation électrique des moteurs.

La régulation de vitesse offre en outre des possibilités de régulation très attrayantes qui peuvent contribuer à l'amélioration du procédé principal.

A l'origine, seuls les moteurs à courant continu étaient utilisés pour les entraînements à vitesse variable car ils permettaient d'obtenir la vitesse et le couple requis sans recourir à des dispositifs électroniques complexes. Cependant, le développement des variateurs de vitesse à courant alternatif résulte en partie de la volonté d'obtenir les niveaux de performances très élevés des moteurs à courant continu (en termes de temps de réponse en régulation de couple et de précision en régulation de vitesse) avec des moteurs à courant alternatif, réputés pour leur robustesse, leur coût plus abordable et leur simplicité de maintenance.

Les variateurs de vitesse à courant alternatif sont basés sur un principe simple. Les caractéristiques physiques des moteurs asynchrones font que leur vitesse de rotation est fonction de la fréquence de la tension d'alimentation. C'est en jouant sur ce paramètre que les variateurs parviennent à réguler la vitesse.

La présente brochure décrit donc le variateur de vitesse pour moteur asynchrone et ses applications.

Cette première approche de la technologie et des possibilités offertes par les variateurs de vitesse a pour objectif d'en montrer les avantages que l'on peut résumer en trois points majeurs :

- économie d'énergie ;
- amélioration des processus ;
- fonctionnalités accrues.

Les techniciens et les décideurs trouveront également les repères permettant de situer l'intérêt de la variation de vitesse pour une application donnée et ensuite des balises pour s'orienter dans le choix d'une solution particulière.

Dans un but de mise en perspective, nous présentons également une technologie différente mais présentant sensiblement les mêmes fonctionnalités que celles offertes par les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones. Cette technologie ouvre d'autres possibilités pour obtenir un contrôle de vitesse des moteurs électriques.

Nous verrons en quoi cette technologie fondamentalement différente peut représenter, pour certaines applications, une alternative, avec ses avantages et ses inconvénients.

Le contenu de cette brochure se divise comme suit :

Chapitre 1 : Technologie

Rappel du fonctionnement des moteurs asynchrones ainsi que de leurs caractéristiques générales.
Présentation de la technologie des variateurs de vitesse et de leurs modes de fonctionnement.
Rappel de la problématique des harmoniques.

Ce chapitre est suivi d'un résumé pour permettre au lecteur non technicien de se familiariser avec la technologie sans entrer dans les détails.

Chapitre 2 : Exemples d'applications

Mise en place du troisième maillon de la chaîne en introduisant la problématique de la mise en application. Il expose un certain nombre d'exemples d'applications des variateurs de vitesse en présentant les contraintes, les avantages et les économies d'énergie réalisables.

Chapitre 3 : Facteurs de décision et mise en oeuvre

Synthèse des avantages et des inconvénients liés à la variation de vitesse ainsi qu'un certain nombre de recommandations concernant les précautions et les protections d'installations. Nous discutons aussi de l'ensemble des facteurs à prendre en compte pour l'évaluation de l'investissement et des temps de retour. Le choix du variateur est également discuté.

Chapitre 4 : Etude de cas

Exposé des résultats chiffrés provenant d'installations déjà réalisées. Il permet de se faire une idée des économies d'énergie réalisables.

Chapitre 5 : Alternative technologique

Approche d'une alternative technologique au variateur de vitesse par variation de la fréquence. Nous présentons une toute autre technologie caractérisée par une intégration totale (régulateur - moteur - application) et adaptée aux ventilateurs.
Nous terminons en discutant les avantages et les inconvénients de cette technologie.

1.1 Introduction

Les variateurs de type « convertisseurs de fréquence » sont utilisés pour alimenter les moteurs asynchrones. Ils permettent essentiellement de faire varier la vitesse de rotation de ces moteurs, mais aussi d'obtenir des caractéristiques de fonctionnement du moteur radicalement différentes de celles obtenues lors de l'utilisation normale à amplitude et fréquence constantes (moteurs alimentés en direct par la tension du réseau).

La vitesse de rotation du moteur varie en fonction de la fréquence de la tension d'alimentation. Les variateurs utilisent cette caractéristique pour obtenir une régulation en vitesse. L'évolution de l'électronique de puissance et de la vitesse des processeurs a permis de développer de très bons systèmes de contrôle des caractéristiques de fonctionnement.

Commençons par rappeler le fonctionnement et les caractéristiques des moteurs asynchrones.

1.2 Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone (également appelé moteur à induction) est le moteur électrique le plus répandu et le plus utilisé dans l'industrie. Ce moteur fiable, robuste, peu encombrant requiert peu d'entretien. Cela justifie son succès.

Comme tout moteur électrique, il transforme une énergie électrique en énergie mécanique, transformation régie par la loi de Laplace : « Un conducteur traversé par un courant et placé dans un champ magnétique subit une force d'origine électromagnétique ».

1.2.1 Principe

Le moteur asynchrone est composé d'un stator (fixe) équipé d'un enroulement triphasé et d'un rotor (mobile) le plus souvent dit à cage d'écureuil (barreaux court-circuités). Le stator relié au réseau électrique triphasé produit un champ électromagnétique tournant à une vitesse proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation. La vitesse de ce champ est appelée la vitesse de synchronisme du moteur (n_0).

$$n_0 = (f \times 60) / p \text{ [tr/min]}$$

f : fréquence de la tension d'alimentation

n_0 : vitesse de synchronisme

p : nombre de paires de pôles

Le rotor immobile voit défilier un champ électrique tournant à la vitesse n_0 , ce qui donne naissance à un courant dans les barreaux court-circuités du rotor. L'action du champ magnétique sur ce courant induit une force qui entraîne le rotor dans le sens de ce champ tournant. La vitesse du rotor augmente alors jusqu'à une vitesse proche mais inférieure à la vitesse de synchronisme. En effet, le rotor ne peut atteindre la vitesse du champ tournant, vu qu'à vitesse égale aucun courant n'est induit dans les barreaux du rotor.

Tous les développements des variateurs de vitesse se basent sur ce principe. On voit en effet que la vitesse du rotor, qui correspond à la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, dépend directement de la fréquence de la tension d'alimentation.

Cette dépendance passe par l'intermédiaire du champ tournant créé par cette tension d'alimentation.

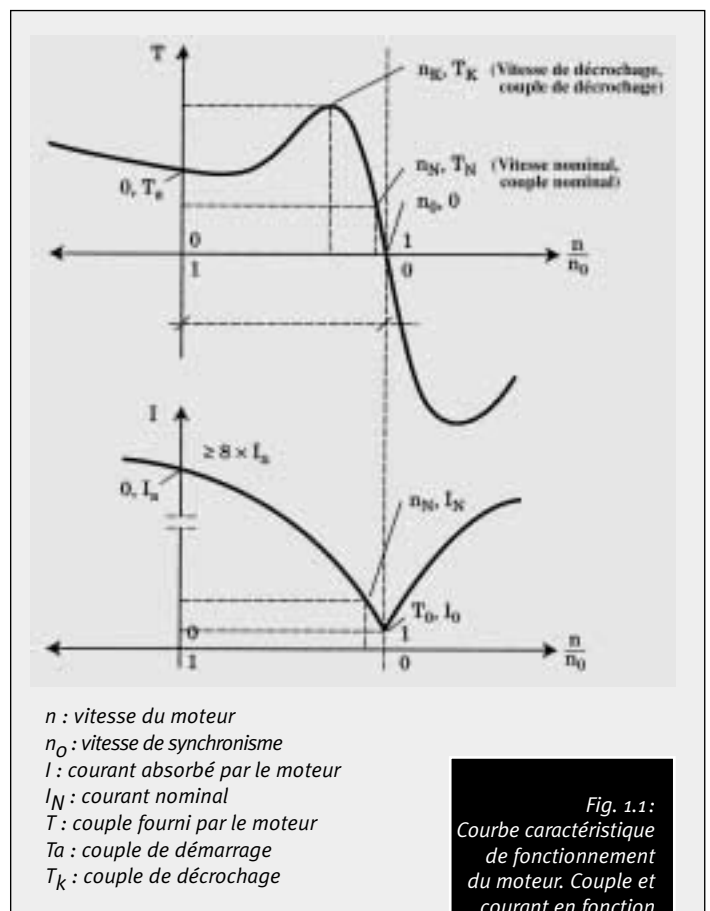


Fig. 1.1 :
 Courbe caractéristique
 de fonctionnement
 du moteur. Couple et
 courant en fonction
 de la vitesse.

1.2.2 Courbes de fonctionnement

Les courbes caractéristiques du moteur asynchrone (Figure 1.1) nous permettent de comprendre son fonctionnement ainsi que ses limitations.

Au démarrage, la vitesse du moteur est nulle et l'on se trouve sur l'axe $n/n_0 = 0$. Cela nous permet de comprendre qu'au démarrage le moteur asynchrone fournit un couple représenté par T_a sur la figure. Il s'agit du couple développé par le moteur, à l'arrêt, lorsqu'on lui applique la tension et la fréquence nominales. Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse, on voit que le couple est croissant et passe par un maximum aussi appelé le couple de décrochage du moteur (T_k). Le fonctionnement du moteur se stabilise alors à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme ($n/n_0 < 1$) et présente alors ses caractéristiques nominales (vitesse nominale n_N , couple nominal T_N , courant nominal I_N).

La plage de fonctionnement du moteur est divisée en deux zones : la zone d'accélération $0 < n/n_0 < n_k/n_0$ et la zone d'utilisation $n_k/n_0 < n/n_0 < 1$.

Le rendement d'un tel moteur varie en fonction de sa puissance et du nombre de pôles mais se situe généralement entre 0,7 et 0,9.

1.2.3 Fonctionnement moteur - application : choix du moteur

Les caractéristiques d'un moteur sont généralement représentées par les diagrammes vitesse - couple ou vitesse - puissance. Nous avons présenté ces caractéristiques pour le moteur asynchrone.

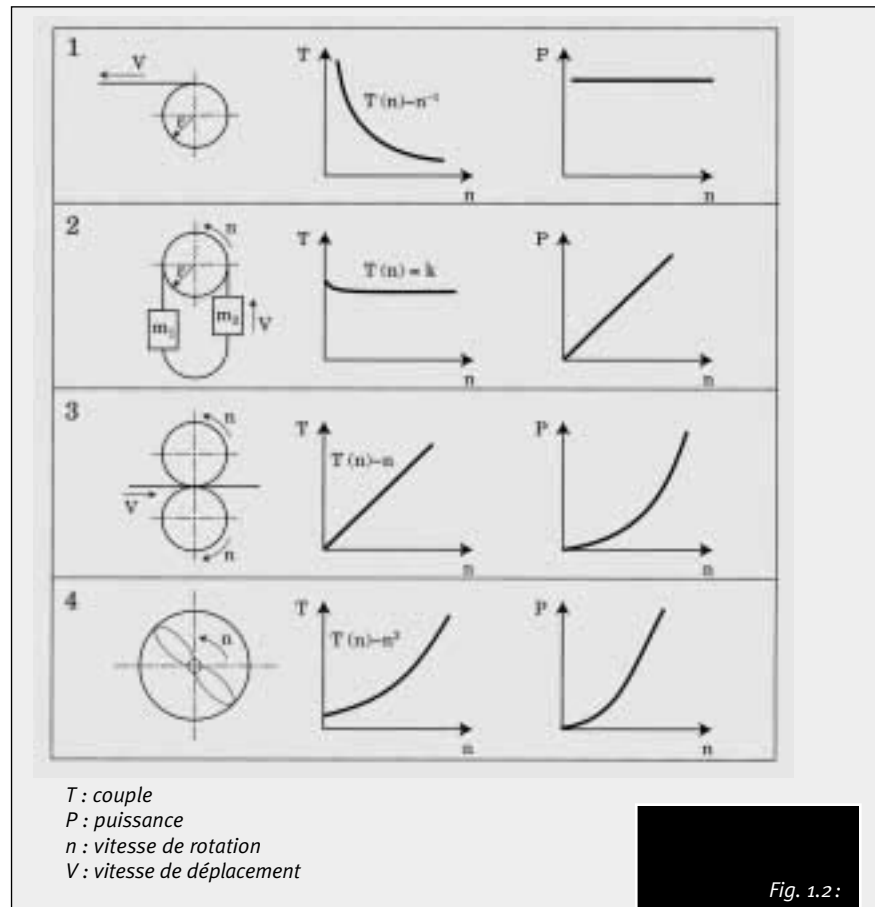
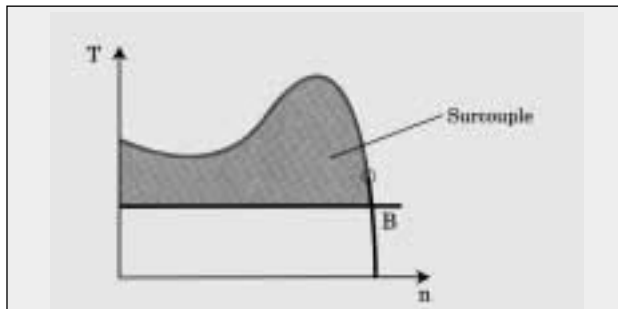


Fig. 1.2 :
Caractéristiques de
charges classiques

La figure 1.2 présente ces mêmes diagrammes de caractéristiques pour les applications. Elle répertorie les applications classiques suivant quatre catégories.

La première (1) correspond aux machines utilisant une force de traction pour enrouler des matières. La seconde (2) regroupe les transporteurs, grues, pompes volumétriques et machines-outils. Le troisième (3) correspond aux machines de type rouleaux, laminoirs, ... Enfin la quatrième (4) regroupe les machines utilisant la force centrifuge, comme les ventilateurs et pompes centrifuges, centrifugeuses, ...

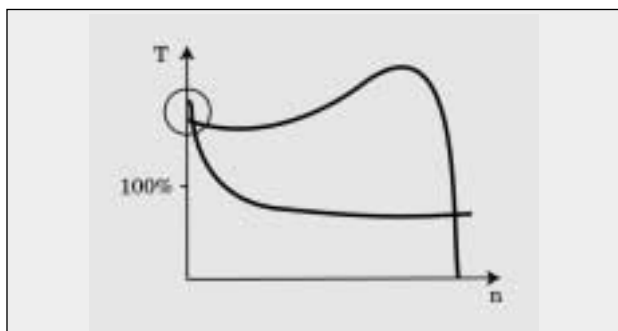
On parle d'état stationnaire lorsque les couples moteur et machine sont égaux. Cela se produit au point d'intersection des courbes de couples. Sur l'exemple de la figure 1.3, l'état stationnaire se situe au point d'intersection B.



T : couple
n : vitesse de rotation
B : état stationnaire de fonctionnement

Fig. 1.3 :
Etat stationnaire de
fonctionnement et
nécessité de surcouple

Pour assurer un bon fonctionnement de l'application, il ne suffit pas de disposer d'un état stationnaire. En effet, l'amorçage au moment du démarrage nécessite de disposer d'un surcouple. De plus, pour les accélérations il est également indispensable de disposer d'une marge de manœuvre au niveau du couple disponible. Il faudra donc éviter les situations telles que celle de l'exemple de la figure 1.4.



T : couple
n : vitesse de rotation

Fig. 1.4 :
Veiller à la disponibilité de
surcouple sur toute la
plage de fonctionnement
et notamment au démarrage.
Ici on voit que le moteur
sera dans l'incapacité d'as-
surer un surcouple au
moment du démarrage.

Effectuer un dimensionnement correct du moteur nécessite de bien connaître les caractéristiques de son application.

1.3 Variateur de vitesse

Le variateur fournit au moteur asynchrone une onde de tension à amplitude et fréquence variables tout en maintenant le rapport tension / fréquence sensiblement constant. En modifiant la fréquence de la tension d'alimentation du moteur, le variateur permet de modifier la vitesse du champ tournant du stator et donc la vitesse de rotation du moteur. La génération de cette onde de tension est réalisée par un dispositif électronique de puissance schématisé à la figure 1.5.

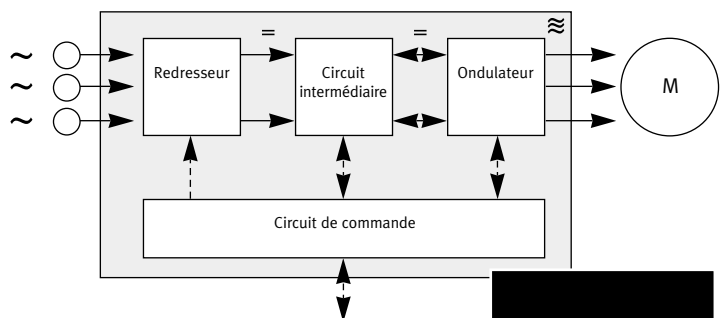


Fig. 1.5 :
Schéma de principe
du convertisseur de
fréquence

Le principe général du variateur de vitesse est de transformer la tension d'alimentation sinusoïdale triphasée du réseau en une tension continue, de façon à disposer d'une « matière première » permettant de générer une nouvelle tension sinusoïdale triphasée de la fréquence désirée.

Le schéma de la figure 1.5 présente les quatre grandes parties d'un variateur de vitesse. Nous allons brièvement décrire chacune d'elles.

1.3.1 Redresseur

La fonction du redresseur est de transformer la tension alternative triphasée du réseau en tension continue. En pratique, il est difficile d'obtenir une tension de sortie parfaitement continue, ce qui donne en général une tension continue comportant une ondulation résiduelle. Suivant le type de technologie utilisé, il est possible de concevoir un circuit redresseur non commandé ou commandé.

Redresseur non commandé à diode :

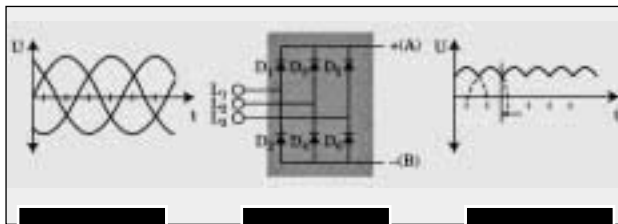


Fig. 1.6a :
Tension
d'entrée

Fig. 1.6b :
Schéma du
circuit

Fig. 1.6c :
Forme de la
tension de
sortie

Redresseur commandé à thyristor :

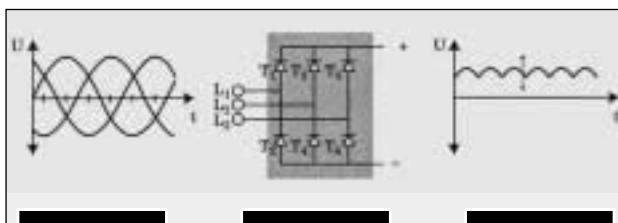


Fig. 1.7a :
Tension
d'entrée

Fig. 1.7b :
Schéma du
circuit

Fig. 1.7c :
Forme de la
tension de
sortie

Outre la nécessité d'une commande, le circuit à thyristor se caractérise par la possibilité de faire varier la valeur moyenne de la tension continue de sortie. Le redresseur commandé entraîne une plus grande perte que le redresseur non commandé ainsi qu'une plus grande perturbation sur le réseau d'alimentation. En contre partie, il permet de renvoyer sur le réseau l'énergie récupérée lorsque le moteur fonctionne en génératrice (le fonctionnement en génératrice correspond à un cycle de freinage). Notons que d'autres technologies mixtes permettent de concevoir des circuits semi-commandés.

Le redresseur fournit au circuit intermédiaire la tension continue présente à sa sortie.

1.3.2 Circuit intermédiaire

Typiquement constitué d'un condensateur, le circuit intermédiaire joue le rôle d'un stock tampon entre la sortie du redresseur et l'entrée de l'onduleur. Il en existe

différents types, à choisir suivant le redresseur et l'onduleur utilisés. Sa fonction est essentiellement de lisser les caractéristiques électriques à la sortie du redresseur. Rappelons que la tension à la sortie du redresseur présente une ondulation résiduelle.

Le circuit intermédiaire est également en charge d'un certain nombre de fonctions supplémentaires telles que :

- découplage du redresseur et de l'onduleur ;
- réduction des harmoniques ;
- stockage d'énergie permettant de contenir des pointes intermittentes de charge.

Suivant les cas, il fournit à l'onduleur :

- un courant continu variable ;
- une tension continue variable ;
- une tension continue constante.

1.3.3 Onduleur

L'onduleur est la dernière partie du variateur de vitesse située avant le moteur. Il fournit des grandeurs électriques variables au moteur. Dans tous les cas, l'onduleur est composé de semi-conducteurs disposés par paires en trois bras. Les semi-conducteurs de l'onduleur commutent sur des signaux en provenance du circuit de commande.

L'onduleur classique, typiquement conçu pour une sortie de circuit intermédiaire à courant variable, est composé de six diodes, six thyristors et six condensateurs comme présentés à la figure 1.8.

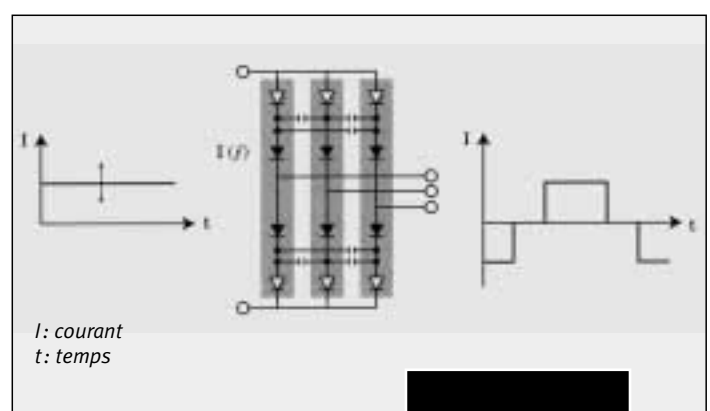


Fig. 1.8 :
Onduleur classique
pour courant inter-
médiaire variable

La figure 1.9 représente le schéma de principe de l'onduleur pour une sortie de circuit intermédiaire à tension constante ou variable. Quel que soit le type de semi-conducteur utilisé, le principe reste le même : un circuit de commande allume et éteint les composants de façon à générer une tension de sortie à fréquence variable.

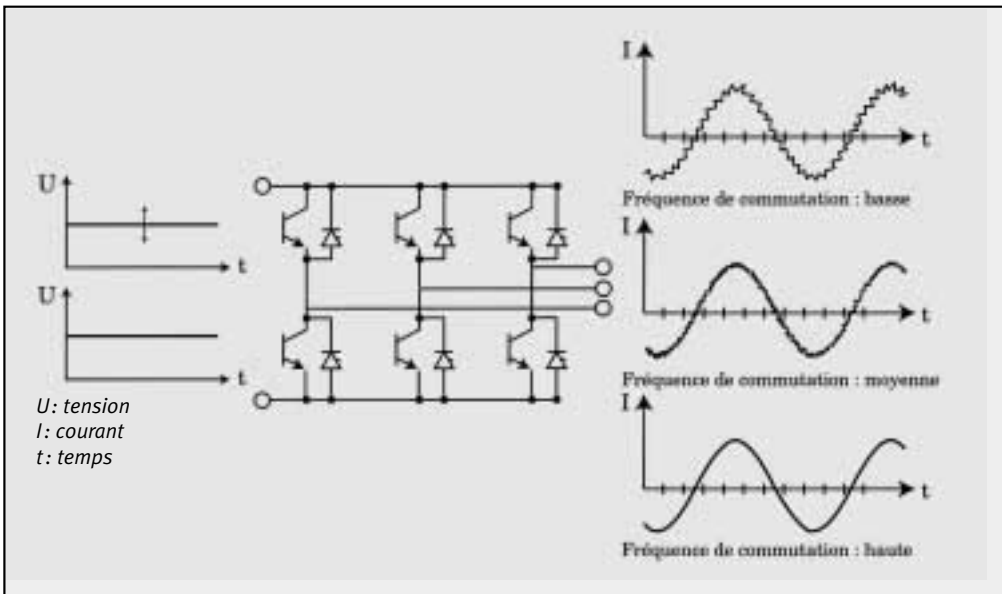


Fig. 1.9:
Onduleur pour tension
intermédiaire constante
ou variable

L'évolution des composants électroniques permet aujourd'hui de recourir à des fréquences de commutation élevées situées typiquement entre 300 et 20 kHz. Ces fréquences de commutation élevées rendent possible l'alimentation du moteur par une tension parfaitement sinusoïdale (figure 1.10). Il faut cependant veiller à un équilibre car ces fréquences peuvent engendrer des surchauffes du moteur ainsi que des tensions de pointe élevées.

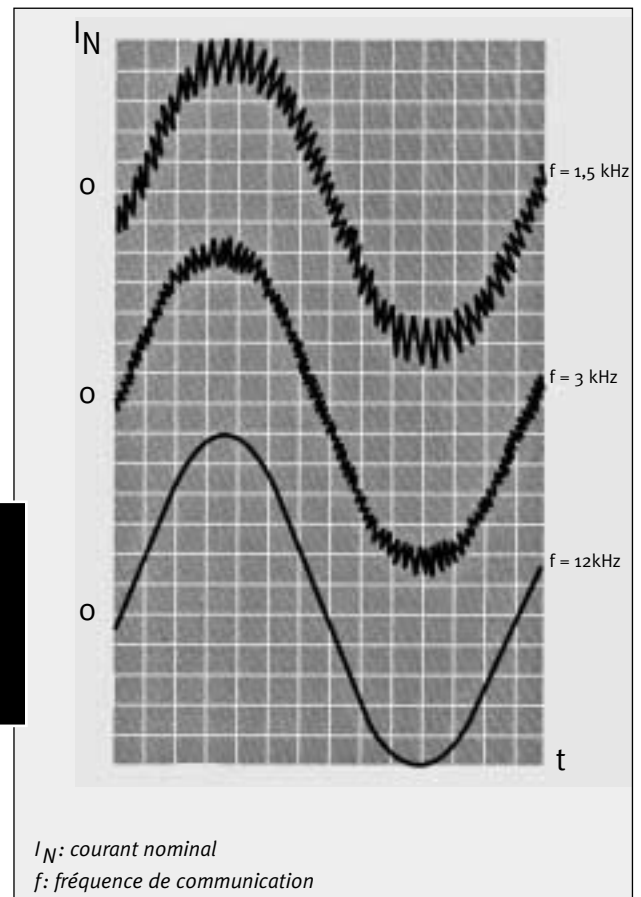


Fig. 1.10:
Influence de la
fréquence de
commutation sur le
courant du moteur

La modulation correspond à la manière dont on façonne la tension continue pour en faire une tension variable. Pour ce faire, il existe une série de techniques différentes. A titre d'exemple, nous en présentons une, largement répandue : la Modulation par Largeur d'Impulsion à commande sinusoïdale (M.L.I. ou P.W.M. pour Pulse Width Modulation).

Le principe (figure 1.11) consiste à appliquer aux enroulements du moteur une suite d'impulsions de tension, d'amplitude égale à la tension continue fournie par le redresseur. Les impulsions sont modulées en largeur de manière à créer une tension alternative d'amplitude variable.

Tout le problème est de générer la commande qui va procéder à l'allumage et à l'extinction des composants électroniques pour obtenir le résultat désiré. C'est le rôle du circuit de commande.

Dans le cas de la M.L.I. à commande par sinusoïde, on obtient la commande par comparaison de deux signaux : un triangulaire et l'autre sinusoïdal (figure 1.11a). Chaque fois que ces deux signaux se croisent, cela correspond à une commande d'allumage ou d'extinction d'un composant (figure 1.11b & 1.11c). En effectuant la soustraction des deux signaux ainsi générés, on obtient le résultat désiré (figure 1.11d).

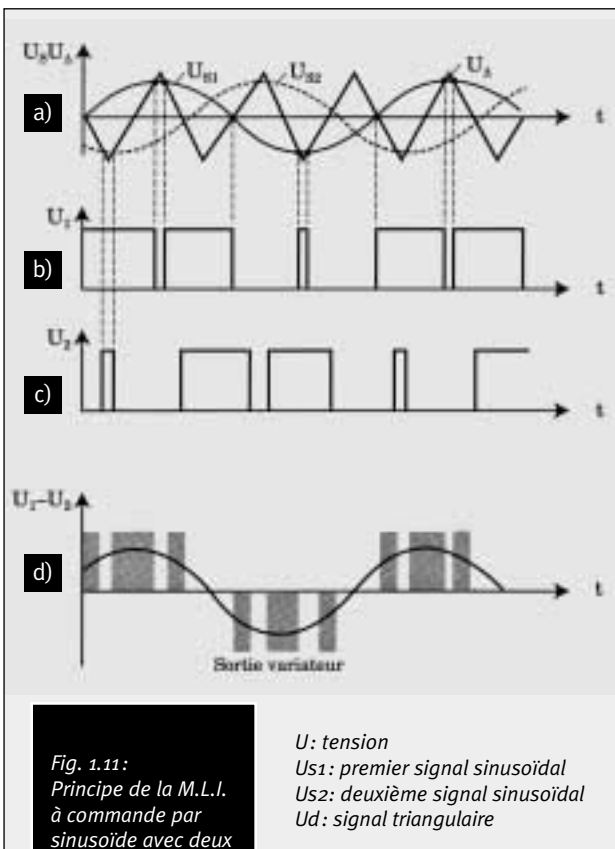


Fig. 1.11:
Principe de la M.L.I.
à commande par
sinusoïde avec deux
tensions de référence

1.3.4 Circuit de commande

Le circuit de commande est la quatrième et dernière partie du variateur de vitesse. Ce circuit intègre quatre fonctions essentielles :

- commandes des semi-conducteurs du redresseur, du circuit intermédiaire et de l'onduleur ;
- échange de données entre le variateur de vitesse et les périphériques ;
- protection pour le variateur de vitesse et le moteur ;
- collecte et compte-rendu des messages de défaut.

Les circuits de commande actuels se composent de microprocesseurs qui permettent une augmentation importante de la vitesse de fonctionnement, l'incorporation de nombreuses fonctionnalités utiles pour les applications ainsi qu'une optimisation de l'alimentation du moteur pour chaque état de son fonctionnement.

L'évolution récente est basée sur deux principes de commandes présentant chacune leurs spécificités :

- commande tension / fréquence (U/F ou E/F) ;
ou encore commande scalaire ;
- commande vectorielle de flux.

Chacune de ces méthodes présente ses avantages qui seront fonction des exigences spécifiques de chaque application.

La commande U/F est relativement simple à mettre en oeuvre et facile à adapter au moteur. Elle présente un bon comportement aux variations de charges instantanées dans toute sa plage de vitesse. En contrepartie, sa plage de vitesse est relativement limitée (de l'ordre de 1 à 20) et elle nécessite une stratégie de commande différente pour les faibles vitesses (technique de compensation).

La commande vectorielle de flux présente quant à elle une large plage de vitesse ainsi qu'une réaction rapide aux variations de vitesse. Elle a une bonne réaction dynamique aux variations de sens et constitue une stratégie de commande applicable sur toute la plage de vitesse. Par contre, elle nécessite une configuration spécifique au moteur, ce qui impose une connaissance détaillée des caractéristiques de celui-ci.

La solution optimale pour l'utilisateur est évidemment de pouvoir disposer des meilleures caractéristiques de chacune de ces deux techniques. Certains constructeurs fabriquent des systèmes de commande à technologie hybride permettant d'optimiser au maximum les procédés.

Exemple de caractéristiques de couple dans le cas d'une régulation tension / fréquence (U/F).

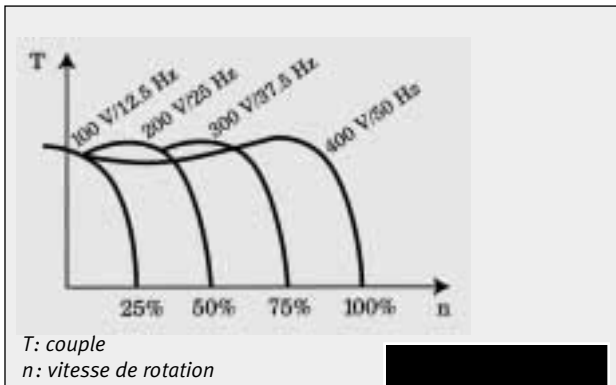


Fig. 1.12:
Diagramme couple
vitesse dans le cas
d'une régulation
tension / fréquence

1.3.5 Normes

Deux normes concernent particulièrement la conception des variateurs de vitesse :

- CEI 61800-3 « Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 3 : Norme de produit relative à la compatibilité électromagnétique. »
- NF EN50178 « Equipement électronique utilisé dans les installations de puissance ». La conformité à cette norme autorise le marquage CE au titre de la directive européenne « basse tension ». Cette norme fournit aussi des précisions pour l'installation de ces produits.

1.4 Association d'un variateur de vitesse et d'un moteur

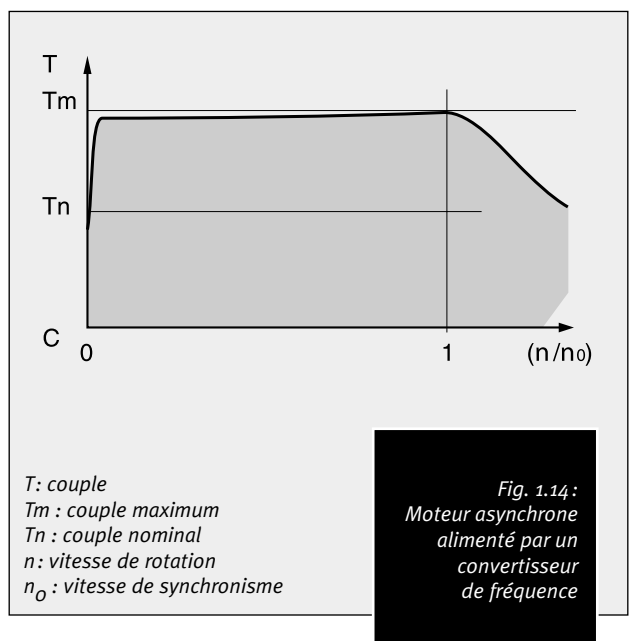
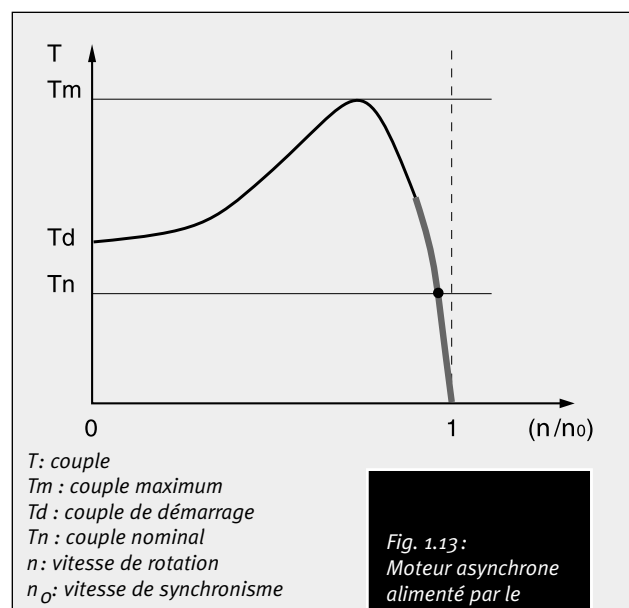
Comme annoncé en début de chapitre, la technologie décrite permet, non seulement de faire varier la vitesse de rotation des moteurs, mais également d'obtenir des caractéristiques de fonctionnement radicalement différentes.

Dans cette section, on compare les caractéristiques du moteur avant et après installation d'un variateur, montrant ainsi la modification fondamentale de la zone de fonctionnement dans le plan couple/vitesse. On présente également des exemples de modes de fonctionnement rendus possibles grâce au variateur. Au travers de ces exemples, on voit que le variateur prend également la fonction de pilotage du moteur.

Cette fonction additionnelle ouvre de nombreuses possibilités au niveau de l'application et constitue dès lors un avantage très important. Les diagrammes d'essais présentés ensuite nous montrent la précision que l'on peut attendre de ces pilotages.

1.4.1 Courbes caractéristiques

Les figures 1.13 & 1.14 présentent les zones de fonctionnement dans le plan couple - vitesse d'un moteur sans variateur de vitesse (moteur alimenté par le courant triphasé) et avec variateur de vitesse. La partie grisée de chaque courbe représente la zone de fonctionnement.



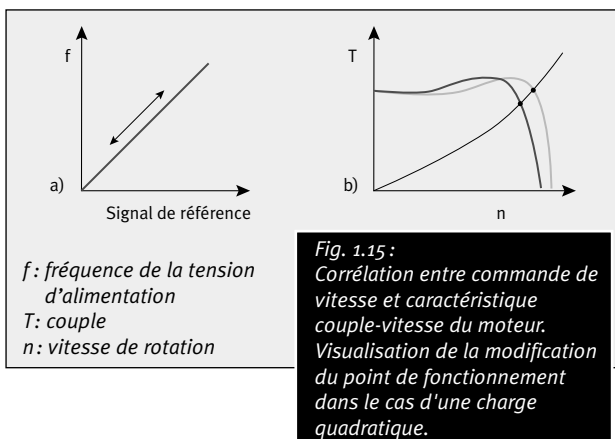
La figure 1.14 montre très clairement l'avantage de l'utilisation du variateur de vitesse pour assurer un bon contrôle des caractéristiques de fonctionnement du moteur.

1.4.2 Modes de pilotage possibles avec variateur de vitesse

Le variateur de vitesse devient un moyen de pilotage du moteur et donc de l'application :

• Pilotage de la vitesse de rotation du moteur

Un ou plusieurs signaux pilotent la fréquence de sortie du variateur et donc la vitesse de rotation du moteur. Lorsque la référence de vitesse augmente, le moteur tourne plus vite, ce qui a pour conséquence une modification de la caractéristique couple-vitesse du moteur. Sur la figure 1.15, cette modification se traduit par un déplacement de la partie verticale de la courbe vers la droite.



Tant que le couple exercé par la charge reste inférieur au couple moteur, la vitesse de rotation s'ajuste à la vitesse commandée par la consigne.

• Freinage dynamique

Lorsque la référence de vitesse diminue, le moteur joue la fonction de génératrice et donc de frein. Il se met à produire de l'électricité au lieu d'en consommer. Il récupère alors l'énergie de l'application pour la restituer au variateur de vitesse. Cette énergie, suivant les cas, est dissipée sous forme de chaleur par le variateur ou restituée au réseau d'alimentation. Si l'énergie de freinage dépasse la puissance dissipée dans le variateur, la tension du circuit intermédiaire du variateur augmente. Elle peut augmenter jusqu'à une certaine valeur où une protection va se déclencher. Il est possible d'ajouter une résistance de dissipation qui permet d'obtenir une puissance de

freinage plus élevée. Il faut alors veiller au problème de surchauffe du moteur.

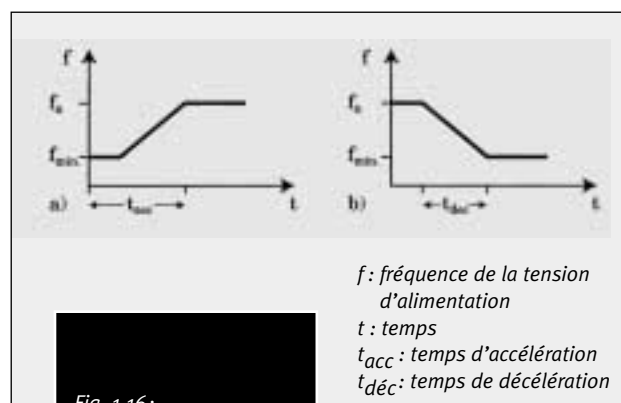
On peut aussi restituer au réseau d'alimentation l'énergie électrique récupérée par le variateur. Pour un variateur à redresseur non commandé, cela est directement possible. Avec un redresseur commandé, il est nécessaire de connecter un onduleur en couplage antiparallèle sur le redresseur.

• Inversion du sens de rotation du moteur

Le sens de rotation du moteur dépend de la séquence des phases du réseau d'alimentation. On obtient l'inversion du sens de rotation en permutant, à l'aide d'un contacteur, deux des phases d'alimentation. Le variateur de vitesse est capable d'effectuer cette commutation de façon électronique, soit par l'intermédiaire d'une commande de vitesse négative, soit par un signal de commande externe.

• Rampes d'accélération et de décélération

La rampe d'accélération indique le profil de la fréquence au moment de sa modification. Ces rampes sont exprimées en terme d'un temps d'accélération ou de décélération. C'est-à-dire le temps nécessaire au variateur de vitesse pour passer de la fréquence 0 Hz à la fréquence nominale du moteur (50 Hz) (figure 1.16). On peut déterminer la valeur optimale de ces temps d'accélération et de décélération à partir du moment d'inertie sur l'arbre du moteur. Les variateurs de vitesse peuvent être programmés de façon à tenir compte de ces valeurs optimales ainsi que des contraintes imposées par l'application (par exemple une décélération en douceur ou une réaction rapide à une consigne de vitesse)



En pratique, les variateurs de vitesse permettent d'obtenir de très bonnes caractéristiques de rampe avec une bonne linéarité de la vitesse ainsi qu'un bon comportement au passage par l'arrêt (dans le cas d'une inversion de sens).

Le diagramme d'essais ci-dessous (figure 1.17) présente une inversion de vitesse +/- 33 Hz avec rampe rapide. Ce diagramme correspond à des résultats obtenus sur un moteur standard de 7,5 kW sans capteur. Le moteur entraîne une charge constituée par une génératrice. On y note le bon comportement de la vitesse. On voit également la modification de la fréquence du courant avec la vitesse.

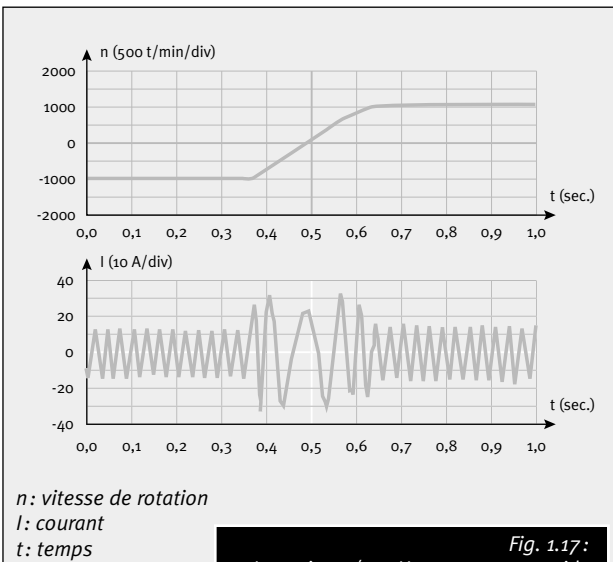


Fig. 1.17:
Inversion +/- 33 Hz avec rampe rapide (+/- 0,25 secondes). Avec une rampe rapide, l'inversion entre - 33 Hz et + 33 Hz (inversion du sens de rotation du moteur lorsqu'il tourne à 1000 t/min) dure moins de 0,3 seconde.

1.5 La question des harmoniques

Les variateurs de vitesse et notamment les composants électroniques de puissance sont responsables de la génération de courants harmoniques. Les harmoniques sont des phénomènes électriques nuisibles aux installations.

1.5.1 Effets des harmoniques sur les charges et les procédés

Les courants harmoniques n'ont pas d'effet direct sur la consommation énergétique mais ils augmentent les pertes par échauffement dans les installations (transformateurs, câblage, etc.). On peut distinguer leurs effets dans le temps en deux catégories :

Les principaux effets instantanés ou à court terme :

- le déclenchement intempestif des protections ;
- les vibrations et bruits acoustiques ;
- les pertes de précision des appareils de mesure.

Les principaux effets à long terme :

- l'échauffement des sources ;
- la fatigue mécanique des installations ;
- l'échauffement des récepteurs ;
- la destruction de matériel.

1.5.2 Rappel des notions d'harmoniques

Pour une meilleure compréhension des problèmes électriques générés, il est bon de rappeler le principe physique à l'origine des phénomènes harmoniques.

En théorie, la tension et le courant d'alimentation du réseau peuvent être représentés par des fonctions sinusoïdales. Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires (typiquement les composants électroniques de puissance) dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente.

Ce courant d'une forme différente peut être représenté par une superposition de signaux, de fréquence multiple de la fréquence d'alimentation du réseau. Le spectre fréquentiel représente les amplitudes de ces différents signaux. Il permet de visualiser l'importance des harmoniques pour chaque forme d'onde de courant.

La figure 1.18 montre des formes d'ondes de courant absorbé par différents types de charges, ainsi que leur spectre fréquentiel. Pour le premier exemple présenté, le spectre fréquentiel peut être lu comme suit : la première barre est l'amplitude du signal de ce qu'on appelle la fondamentale, c'est-à-dire le signal utile et non nuisible. Le 1 sous la première barre signifie que la fréquence de ce signal est égale à 1 x la fréquence fondamentale (1 x 50 Hz par exemple). Les autres colonnes représentent les amplitudes des autres signaux de fréquence respectivement 5 x la fréquence fondamentale, 7 x la fréquence fondamentale, ... (par exemple 250 Hz, 350 Hz, ...) et représentent les harmoniques nuisibles et indésirables.

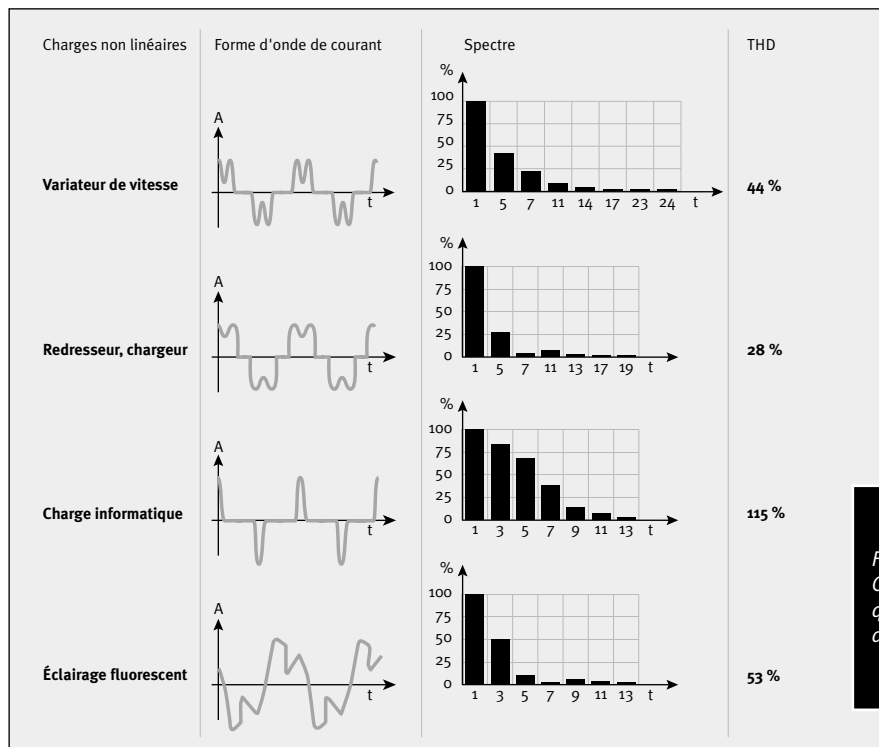


Fig. 1.18 :
Caractéristiques de
quelques générateurs
d'harmoniques

Le taux de distorsion harmonique (T.H.D. pour Total Harmonic Distortion) est une mesure de la déformation du signal et donne une idée de l'importance de la composante fondamentale (barre 1) par rapport à l'ensemble des autres composantes nuisibles (barre 3, 5, 7, 11, ...).

On recherche évidemment une déformation minimale du signal et donc un THD le plus petit possible.

Deux autres grandeurs caractérisant l'importance des harmoniques se retrouvent dans les fiches techniques des constructeurs :

- Le courant RMS (IRMS) est une mesure de l'amplitude du courant responsable des harmoniques ;
- Le T.P.F. pour Truth Power Factor est une mesure du déphasage du courant RMS par rapport à la tension d'alimentation. Il peut être compris entre 0,5 et 0,9.

C'est la valeur du taux de distorsion THD qui va nous aiguiller dans le choix du variateur et si nécessaire dans le choix des types de protections à mettre en oeuvre pour assurer une bonne protection de l'installation électrique.

Le taux maximal admissible dépend de la sensibilité électrique de l'environnement.

Les normes fixent des valeurs suivant les domaines d'application :

- applications sensibles (aéroports, hôpitaux) 3 % ;
- applications générales (immeuble de bureau, écoles) 5 % ;
- systèmes dédiés (industrie) 10 %.

1.5.3 Exemple des harmoniques générées par un variateur de vitesse

Caractéristiques du courant absorbé par le variateur.

Le redresseur associé au circuit intermédiaire prélève au réseau un courant non sinusoïdal.

- Pour une alimentation triphasée, l'allure de ce courant est représentée à la figure 1.19 et son spectre harmonique à la figure 1.20. La valeur typique du taux de distorsion harmonique THD est de 40 %.
- Pour une alimentation monophasée, le courant absorbé est représenté par la figure 1.21 et son spectre par la figure 1.22. La valeur typique du taux de distorsion harmonique THD est de 80 %.

À noter que ces taux de distorsion sont obtenus par adjonction d'inductances de ligne provoquant une chute de tension comprise entre 3 et 5 %. En l'absence de ces inductances de ligne, la distorsion de courant peut atteindre 80 % dans le cas de l'alimentation triphasée et dépasser 100 % pour l'alimentation monophasée.

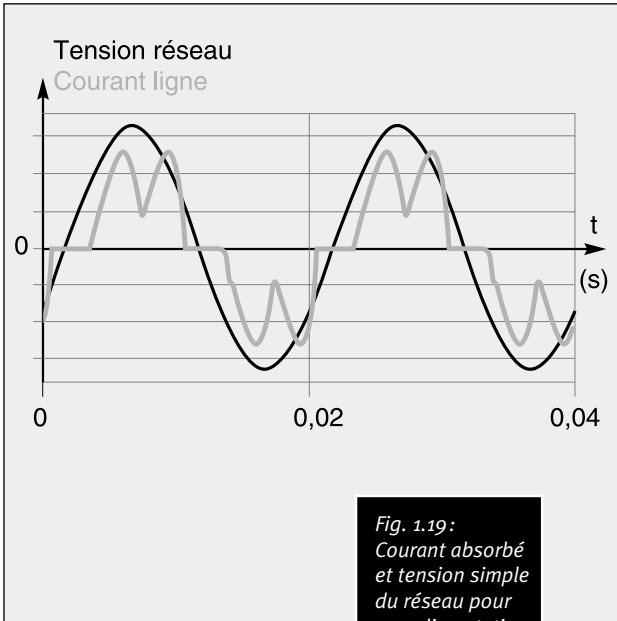


Fig. 1.19:
Courant absorbé
et tension simple
du réseau pour
une alimentation
triphasee

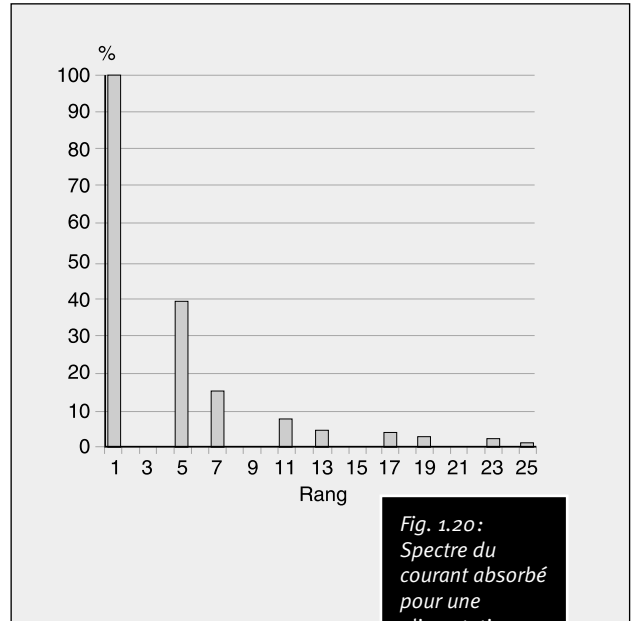


Fig. 1.20:
Spectre du
courant absorbé
pour une
alimentation
triphasee

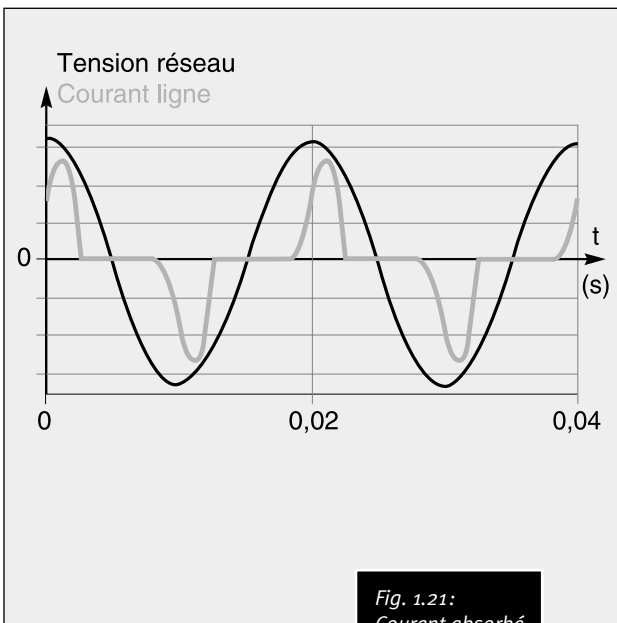


Fig. 1.21:
Courant absorbé
et tension simple
du réseau pour
une alimentation
monophasée

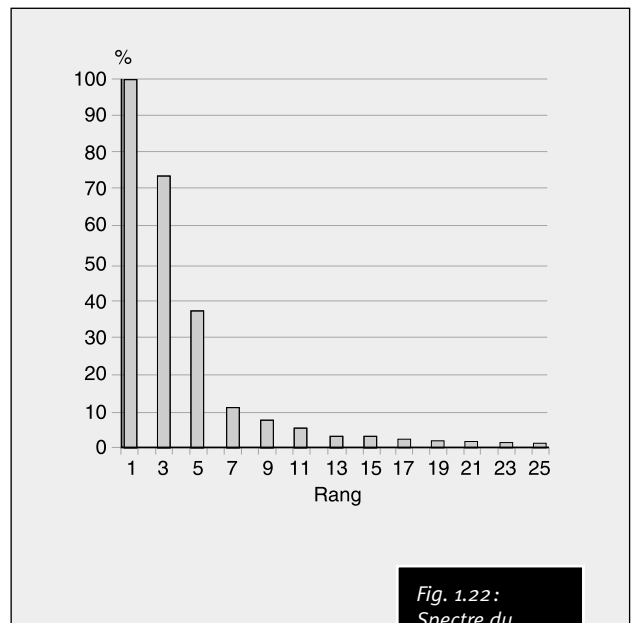


Fig. 1.22:
Spectre du
courant absorbé
pour une
alimentation
monophasée

RESUME DE LA TECHNOLOGIE

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus répandu et le plus utilisé dans l'industrie. Ce moteur fiable, robuste, peu encombrant requiert peu d'entretien. Cela justifie son succès.

Les variateurs de type convertisseurs de fréquence sont utilisés pour alimenter les moteurs asynchrones. Ils permettent essentiellement de faire varier leur vitesse de rotation, mais aussi d'obtenir des caractéristiques de fonctionnement moteur radicalement différentes de celles obtenues lors de l'utilisation normale à amplitude et fréquence constantes.

Le variateur fournit au moteur asynchrone une onde de tension à amplitude et fréquence variables tout en maintenant le rapport tension / fréquence sensiblement constant.

La génération de cette onde de tension est réalisée par un dispositif électronique de puissance schématisé à la figure 1.23.

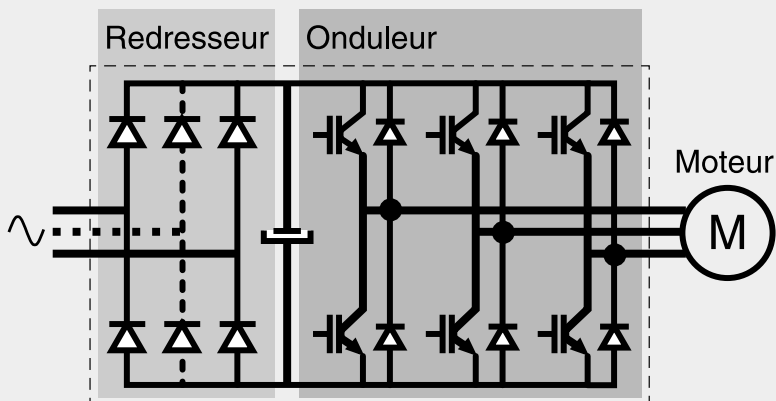
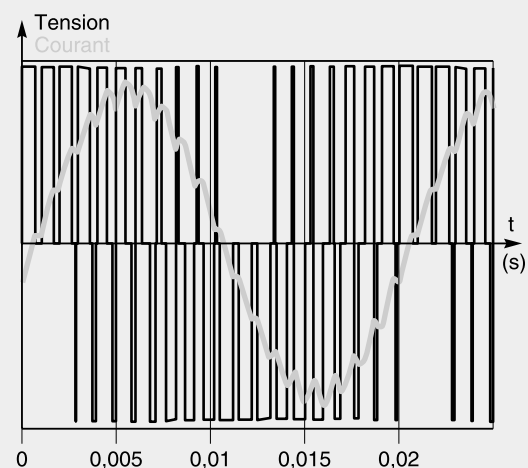


Fig 1.23 :
Schéma de principe
du convertisseur de
fréquence

Fig 1.24 :
Exemples de tension
entre phases et de
courant dans un
enroulement de la
machine



Le convertisseur comprend :

- un redresseur mono ou triphasé à diodes associé à un condensateur transformant la tension alternative du réseau en tension continue ;
- un onduleur alimenté par la tension continue et générant une onde de tension alternative à amplitude et fréquence variables, généralement par la technique de « Modulation de Largeur d'Impulsions » ou MLI ;
- une unité de commande fournissant les ordres aux composants électronique en fonction des consignes fournies par l'opérateur (ordre de marche, sens de marche, consigne de vitesse, etc.) et de la mesure de grandeurs électriques (tension réseau, courant moteur).

Le principe de la MLI utilisée dans l'onduleur consiste à appliquer aux enroulements du moteur une suite d'impulsions de tension, d'amplitude égale à la tension continue fournie par le redresseur. Les impulsions sont modulées en largeur de manière à créer une tension alternative d'amplitude variable (voir exemple figure 1.24).

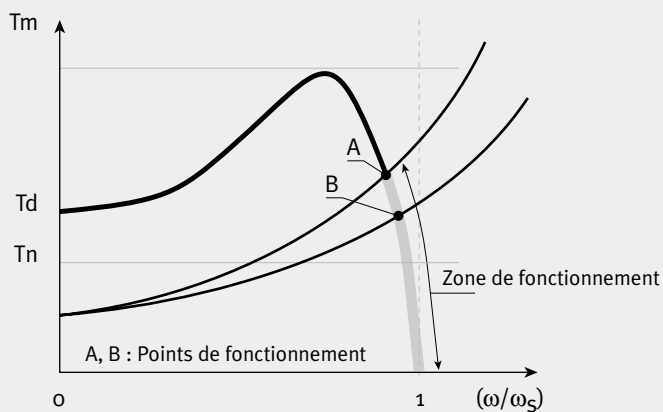
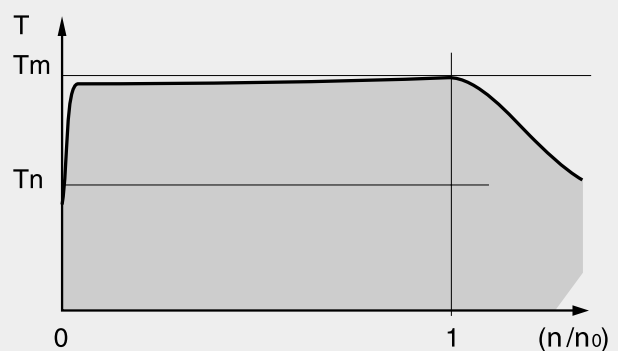


Fig 1.25 :
Diagramme couple-vitesse d'un moteur alimenté en direct.
La zone de fonctionnement du moteur dans le plan couple-vitesse est limitée à une section de la courbe.
Les points de fonctionnement obtenus (A et B) sont donnés pour deux profils de charge différents qui pourraient par exemple correspondre à la fermeture d'un clapet dans un système de ventilation.

T_m : couple maximum
 T_d : couple de démarrage
 T_n : couple nominal

Fig. 1.26 :
Diagramme couple-vitesse d'un moteur alimenté par un convertisseur de fréquence.
La zone de fonctionnement du moteur dans le plan couple-vitesse est représentée en gris.
La zone de fonctionnement est à présent très vaste et offre donc une grande flexibilité de fonctionnement.



Caractéristiques du courant absorbé par le variateur.

Le redresseur associé au circuit intermédiaire prélève au réseau un courant non sinusoïdal (figure 1.27) à l'origine de perturbations du réseau. Ces perturbations correspondent à ce qu'on appelle les courants harmoniques.

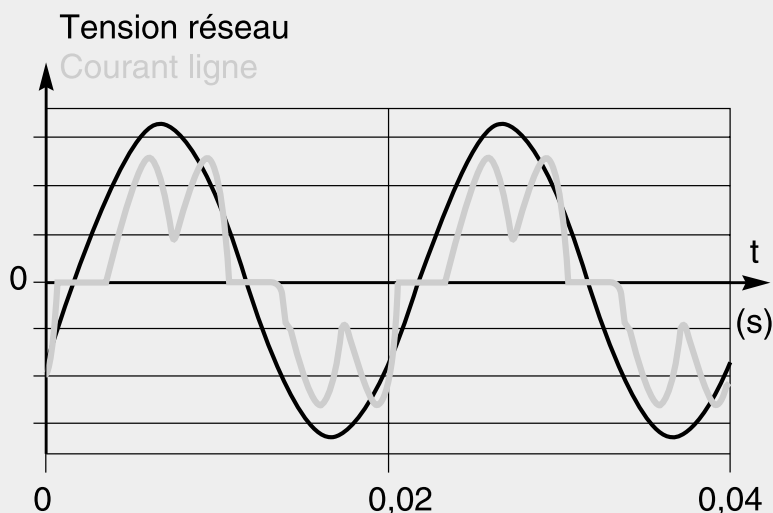


Fig. 1.27 :
Courant absorbé et tension simple du réseau

Les harmoniques.

Les variateurs de vitesse et notamment les composants électroniques de puissance sont responsables de la génération de courants harmoniques. Les courants harmoniques sont des phénomènes électriques nuisibles aux installations. Ils n'ont pas d'effet direct sur la consommation énergétique mais ils augmentent les pertes par échauffement dans les installations (transformateurs, câblage, etc.).

Les paragraphes qui suivent illustrent différents cas de mise en oeuvre où l'utilisation des variateurs de vitesse est particulièrement adaptée. Comme nous le verrons, l'implémentation de cette technologie permet une réduction importante de la consommation d'énergie et apporte un ensemble d'autres avantages.

2.1 Système de climatisation à volume d'air constant (C.A.V. : Constant Air Volume system)

Description de l'application

Les systèmes d'air à volume constant sont typiquement utilisés dans les installations de climatisation. Aujourd'hui on leur préfère les systèmes à volume d'air variable mais ils restent largement répandus dans nombre de bâtiments plus anciens.

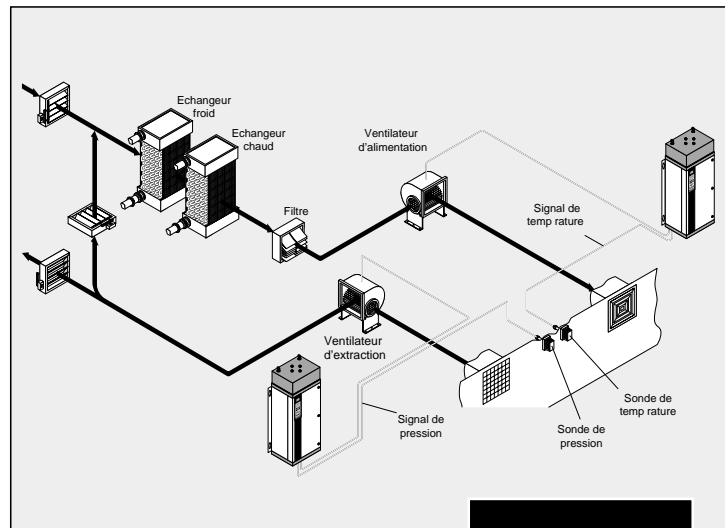


Fig. 2.2 :
Système de ventilation à volume d'air constant avec variateur de fréquence

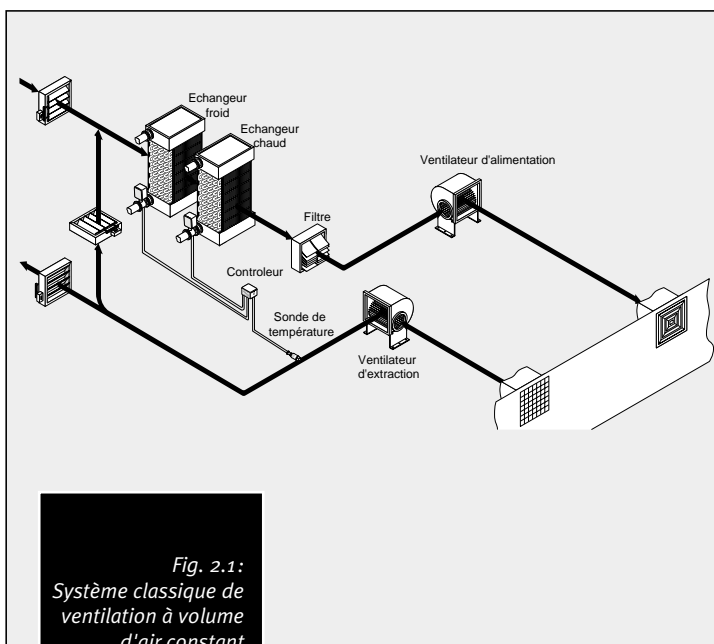


Fig. 2.1 :
Système classique de ventilation à volume d'air constant

Dans une installation classique (figure 2.1), l'air prélevé à l'extérieur traverse un système d'échangeurs chaud / froid qui le porte à la température désirée. Ensuite, via un réseau de canalisation, l'air est amené dans la zone contrôlée. Un premier ventilateur assure ainsi la pulsion d'air et un deuxième l'extraction. En aval du ventilateur d'extraction, l'air repart soit vers l'extérieur du bâtiment, soit vers les échangeurs chaud / froid pour amorcer un nouveau cycle. Le contrôle du conditionnement est assuré par un capteur de température dans la canalisation de reprise. Ce capteur pilote les vannes d'alimentation en eau chaude et eau froide des échangeurs.

Contrainte

Comme souvent en H.V.A.C., les systèmes sont dimensionnés pour pouvoir satisfaire la demande dans le cas le plus défavorable. Le surdimensionnement et le fonctionnement permanent à plein régime des ventilateurs conduisent à une perte d'énergie par rapport aux besoins, et ce pendant toute la durée de vie de l'installation. La seule possibilité de réduction de consommation énergétique est alors l'arrêt complet de l'installation.

Variation de vitesse

L'utilisation de variateurs de vitesse permet de pallier cette importante perte d'énergie. Un premier variateur de vitesse, relié à une sonde de température placée dans la zone à climatiser, pilote le ventilateur d'alimentation en air. Suivant l'application, on peut relier le variateur à une sonde CO₂ afin de contrôler la qualité de l'air. Dans cette configuration, le système de ventilation s'adapte continuellement aux conditions réelles d'utilisation du bâtiment. Par exemple, lorsque des personnes quittent une zone contrôlée, le détecteur de CO₂ relâche progressivement la contrainte sur le variateur, qui à son tour diminue la vitesse du ventilateur. Le même type de procédure s'applique pour une régulation en température. Si la température de la zone correspond à la valeur demandée, le variateur réduit la vitesse du ventilateur d'alimentation et donc l'arrivée d'air traité. Une fréquence de fonctionnement minimum peut être programmée sur le variateur de façon à assurer un renouvellement de l'air ambiant indépendamment de la valeur de la sonde.

L'usage d'un deuxième variateur de vitesse permet le contrôle du ventilateur d'extraction. Grâce à un capteur de pression, ce ventilateur maintient une différence constante de débit d'air entre l'entrée et la sortie.

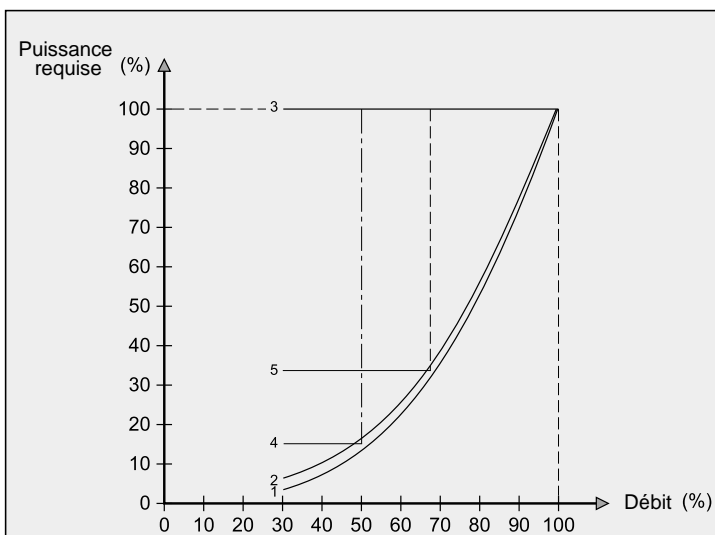


Fig. 2.3 :
 Courbes de consommation énergétique de différents ventilateurs à variation de vitesse. La courbe 1 représente le comportement théorique optimum d'un ventilateur. La courbe 2 montre le comportement d'un ventilateur commandé par un variateur de vitesse à rapport tension / fréquence constant. La légère différence provient de la perte inhérente au variateur. La courbe 3 représente la puissance en utilisation continue à vitesse maximale avec régulation du débit par étranglement. La courbe 4 représente la puissance absorbée dans la même situation mais avec un moteur de ventilateur à deux vitesses 100 % / 50 % (4 - 8 pôles) et la courbe 5 avec un moteur de ventilateur à deux vitesses 100 % / 66 % (4 - 6 pôles).

Comparaison des consommations énergétiques

La figure 2.3 présente la consommation en énergie des différents types de méthode utilisables pour une régulation en débit d'air dans un système à volume d'air constant.

Exemple de calcul d'économie d'énergie

Afin de pouvoir estimer la consommation et donc l'économie d'énergie potentielle d'une installation avec variateur de vitesse, il est nécessaire de connaître le taux d'utilisation de son installation. La figure 2.4 représente un profil de niveau d'utilisation type pour satisfaire aux demandes spécifiques d'une application à volume d'air constant. Chaque application spécifique présente évidemment un profil de charge différent.

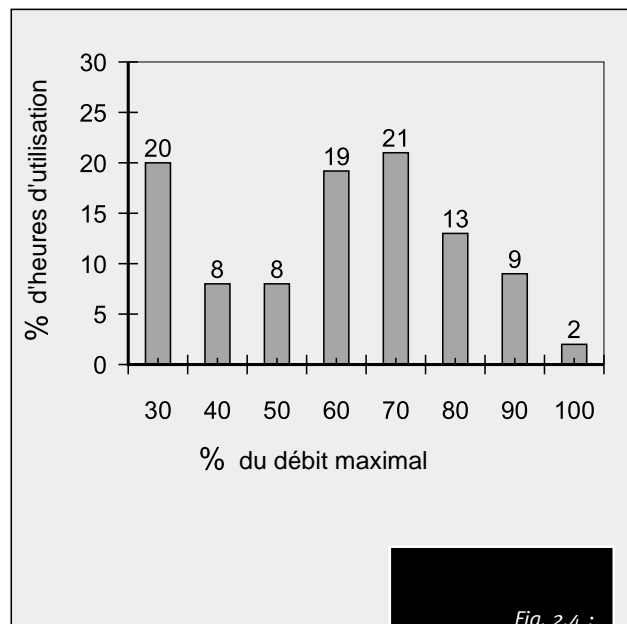


Fig. 2.4 :
 Profil de charge type d'une installation à volume d'air constant

Sur base du profil de charge de la figure 2.4, nous pouvons alors faire une estimation de la différence de consommation entre un système de ventilation non régulé (débit d'air fixe, température d'air variable) et un système régulé par un variateur de vitesse (débit d'air variable, température d'air fixe). L'exemple présenté dans le tableau ci-après tient compte d'un moteur 40 HP / 30 kW.

Débit (%)	Heure (%)	Heure de fonctionnement	Energie électrique nécessaire (kW)		Consommation d'énergie pour moteur 40 HP	
			Non régulé	Régulé	Non régulé	Régulé
30	20	1752	28	1	49,056	1,752
40	8	701	28	2	19,622	1,402
50	8	701	28	4	19,622	2,803
60	19	1664	28	7	46,603	11,651
70	21	1840	28	11	51,509	20,236
80	13	1139	28	15	31,886	17,082
90	9	788	28	22	22,075	17,345
100	2	175	28	29	4,906	5,081
	100%	8760 h			245.280 kWh	77.351kWh

La comparaison montre une économie d'énergie de 68 % entre une installation avec variateur de vitesse (programmée avec une vitesse minimale de fonctionnement de 30 %) et une installation non régulée.

Importance du positionnement du capteur

Le choix de la position du capteur est essentielle pour assurer une bonne régulation. Afin de positionner correctement le capteur, il faut tenir compte des phénomènes de stratification et de «dumping». Le phénomène de stratification se produit lorsque le système de conditionnement, plutôt que de mélanger l'air, forme des couches successives en confinant l'air froid dans la partie inférieure. Le «Dumping» se produit lorsque l'air s'écoule depuis la bouche de pulsion de façon laminaire sans provoquer de brassement d'air. Pour obtenir le meilleur résultat, on placera le capteur à une hauteur qui correspond à la position des occupants de la zone et hors de portée de la bouche d'alimentation. Il est également possible de positionner le capteur dans le conduit de reprise d'air.

Lorsque l'installation est pilotée par des variateurs de vitesse, le contrôle des échangeurs ne peut plus être assuré par la sonde dans le conduit de reprise d'air car cela créerait un double bouclage de contrôle. On commande alors la température de l'air injecté grâce à une sonde dans la gaine de pulsion en aval du ventilateur.

Comparaison des frais d'installation et de maintenance

Comme nous l'avons vu, l'utilisation de variateurs de vitesse dans des installations de climatisation d'air à volume constant donne lieu à une économie substantielle d'énergie. En plus de ces économies d'énergie, le choix du variateur de vitesse permet d'éviter l'achat et donc les frais d'installation et de maintenance de toute une série d'équipements tels que démarreurs, condensateurs de correction de facteur de puissance, etc. Le variateur offre en outre des réductions de frais de maintenance car il permet de limiter les contraintes mécaniques et électriques sur le moteur. Nous discuterons en détail de ces aspects techniques.

2.2 Contrôle de filtres

Description de l'application

Les systèmes de contrôle de filtres sont des cas particuliers de systèmes à volume d'air constant (C.A.V.). Il s'agit d'extraire et d'injecter de l'air dans une zone dans laquelle on souhaite contrôler un taux de contamination. L'objectif d'une telle installation est de maintenir un débit d'air dans le local.

Contrainte

La contrainte est donnée par le filtre, qui n'oppose pas la même résistance à l'écoulement de l'air lorsqu'il est neuf que lorsqu'il est encrassé. Cela signifie que pour une même vitesse de rotation du ventilateur, le débit obtenu dans la canalisation de ventilation diminue avec l'encrassement du filtre. À vitesse constante, la solution pour faire face à cette contrainte est de surdimensionner le ventilateur de sorte que l'augmentation de pression due à l'encrassement du filtre ne fasse pas trop s'écarter le débit obtenu du débit souhaité. Dans ce cas, pour un filtre neuf, le débit obtenu est supérieur au débit désiré (figure 2.5a) ; et pour un filtre encrassé, le débit est inférieur au débit désiré. (figure 2.5b).

Variation de vitesse

En utilisant un système à vitesse variable couplé avec un capteur de pression, le ventilateur est capable de maintenir un débit constant. En effet, le débit à la sortie est proportionnel à la pression dans la canalisation

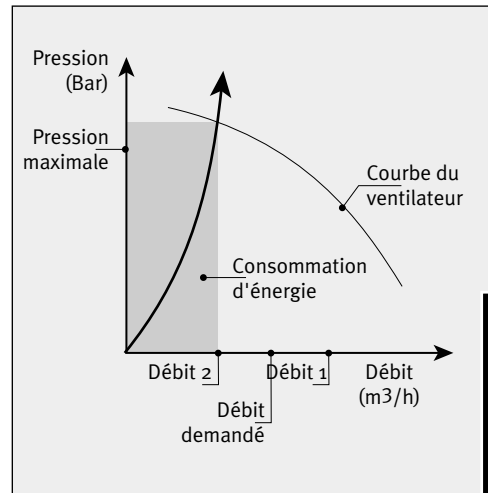


Fig. 2.5b :
Courbe caractéristique
de la pompe et point
de fonctionnement
avec un filtre encrassé

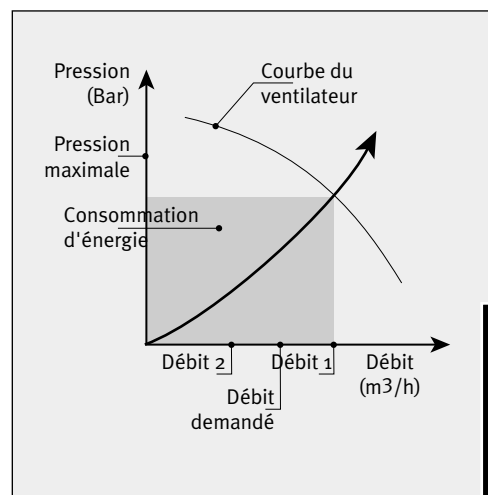


Fig. 2.5a :
Courbe caractéristique
de la pompe et point
de fonctionnement
avec un filtre neuf

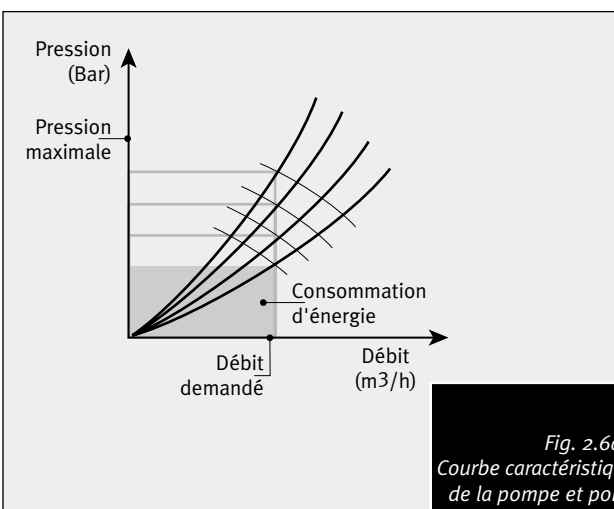


Fig. 2.6a :
Courbe caractéristique
de la pompe et point
de fonctionnement
avec un filtre neuf

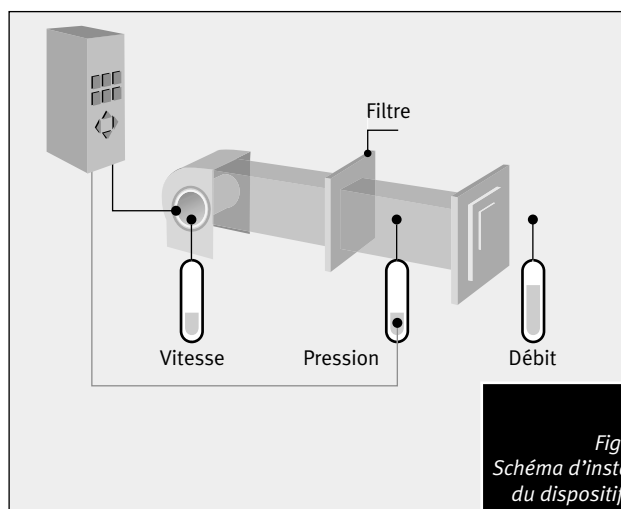


Fig. 2.6b :
Schéma d'installation
du dispositif et état
des capteurs avec un
filtre neuf

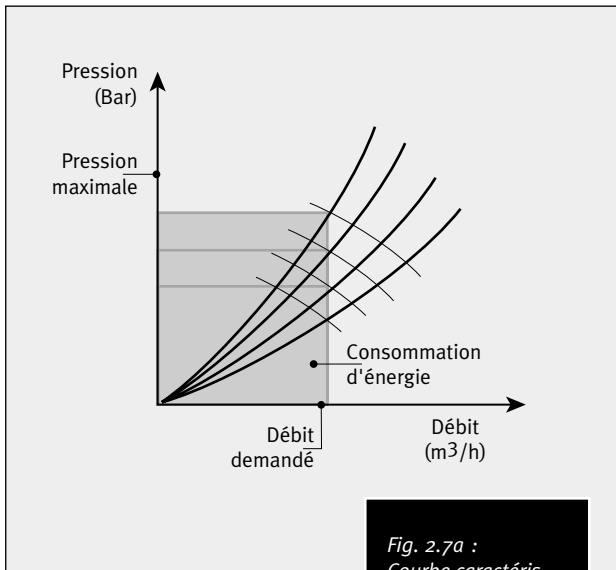


Fig. 2.7a :
Courbe caractéristique de la pompe et pont de fonctionnement avec un filtre encrassé

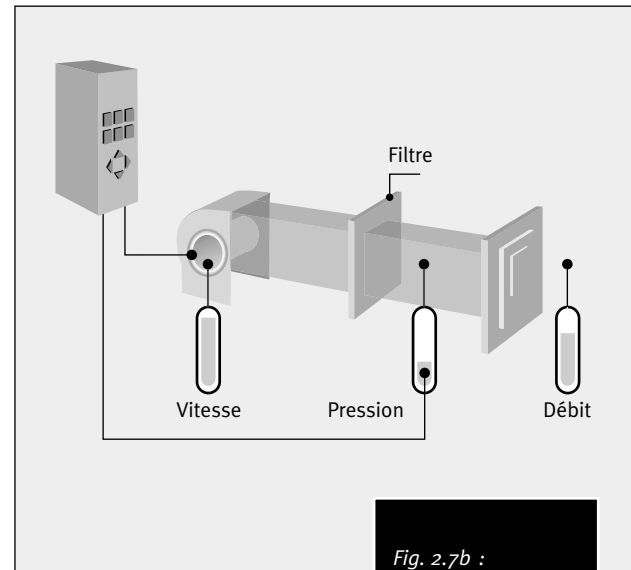


Fig. 2.7b :
Schéma d'installation du dispositif et état des capteurs avec filtre encrassé

Autres avantages de la vitesse variable

Dans une telle application, outre l'économie importante réalisée sur la consommation énergétique, on peut entre autres noter les avantages spécifiques suivants :

- Amélioration de la qualité de l'application de par le maintien d'un débit constant sur toute la durée de vie du filtre.
- Du fait d'une utilisation à débit constant, le filtre est en permanence utilisé dans ses conditions optimales de fonctionnement. Il en résulte un accroissement de sa durée de vie.

- Le variateur de vitesse, de par ses multiples fonctionnalités programmables, remplit la fonction de détection automatique du seuil de remplacement du filtre.

Profil de consommation énergétique

Comme vu précédemment, l'économie d'énergie réalisée dépend du profil de charge de l'installation au cours des différentes périodes d'utilisation. La figure 2.8 représente, pour un profil de chaque type d'une application H.V.A.C., l'énergie économisée lorsque l'on utilise la variation de vitesse.

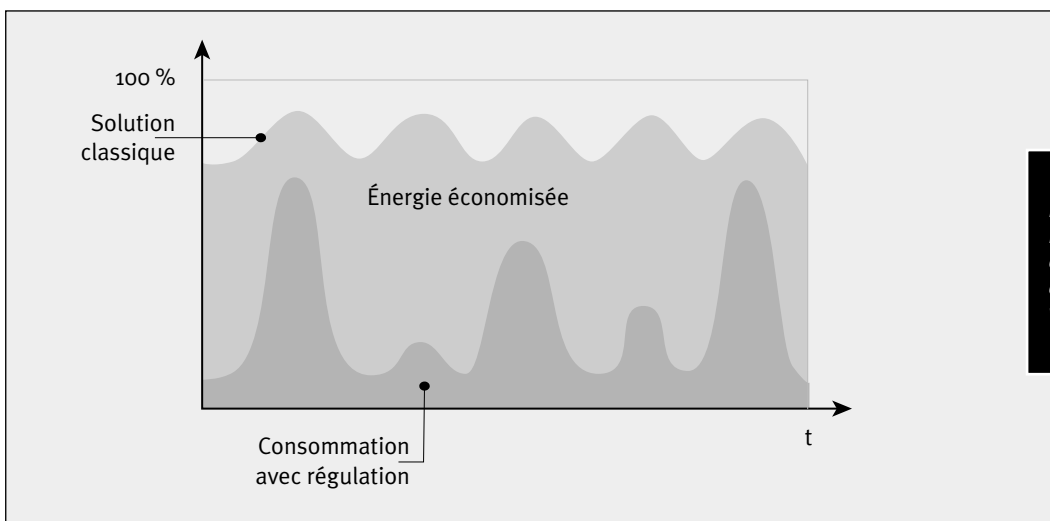


Fig. 2.8 :
Economie d'énergie réalisée avec l'utilisation d'un variateur de vitesse

2.3 Pompe de pressurisation

Description de l'application

Dans de nombreuses applications de distribution d'eau dans un bâtiment, il est nécessaire de compenser la pression de l'alimentation principale. En effet, sur certaines périodes de l'activité du bâtiment, la demande en eau peut présenter des pics qu'il faudra alors satisfaire en installant une série de pompes de pressurisation. Une application spécifique peut également nécessiter une pression d'eau constante. L'installation pour ce genre d'application est représentée à la figure 2.9.

Contrainte

Les pompes doivent être dimensionnées de façon à faire face à la modification de la demande. Si cette demande est susceptible de subir de grandes variations ou si la pression d'alimentation principale est soumise à des variations de pression importante, on aura recours à plusieurs pompes en parallèle. Une vanne de contrôle de pression est nécessaire de façon à éviter les problèmes de sur-pressurisation au cours des fluctuations. Chacune des pompes sera démarrée ou arrêtée suivant le débit instantané demandé (figure 2.10).

Fig. 2.9 :
Schéma
d'installation
du dispositif

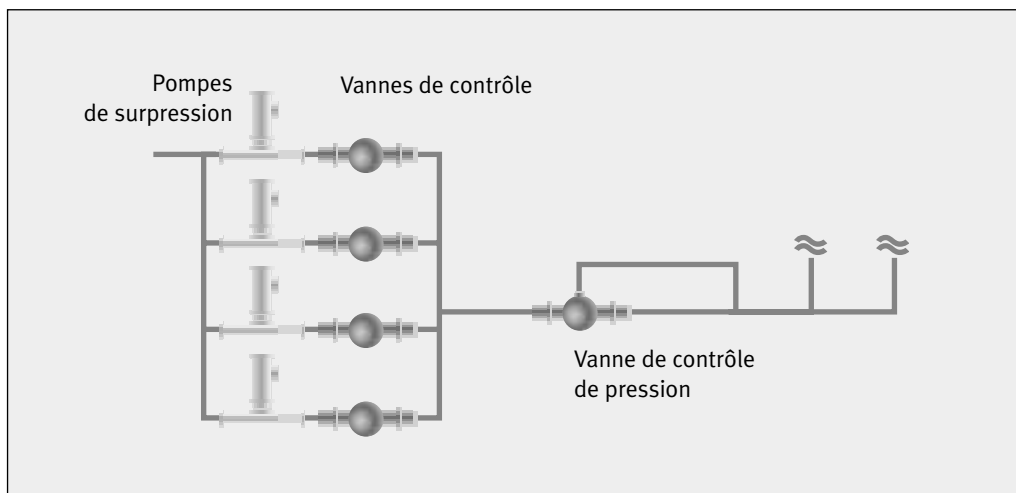
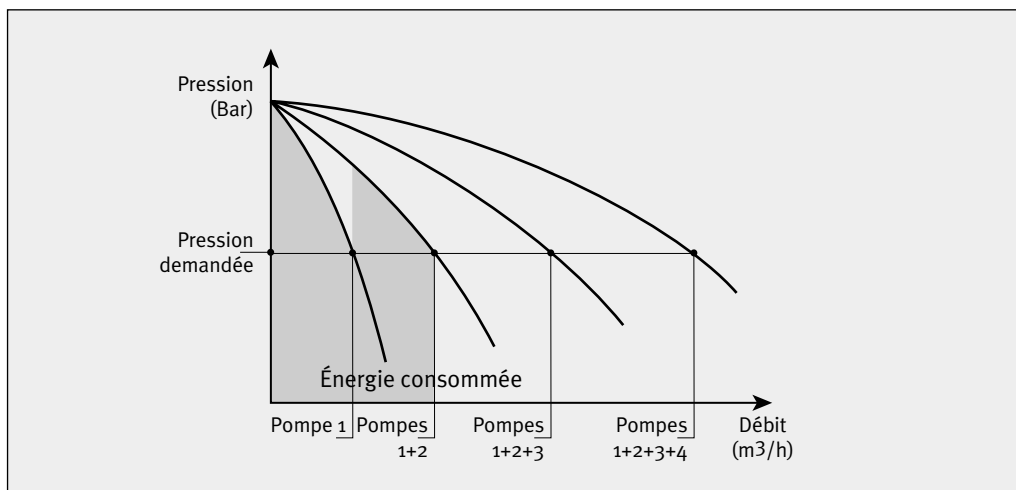


Fig. 2.10 :
Diagramme de
fonctionnement de
l'installation



Variation de vitesse

En utilisant la variation de vitesse, il est possible d'éviter la vanne de contrôle de pression. On supprime donc les pertes dues à l'énergie dissipée par la vanne ainsi que son coût et sa maintenance. La vitesse de la pompe est en effet automatiquement adaptée en fonction du débit demandé. Si le système comprend plusieurs pompes, deux configurations sont possibles. Soit une seule pompe est équipée d'un variateur, soit l'ensemble des pompes sont régulées en vitesse. Dans le premier cas, à chaque passage de seuil de demande, une nouvelle pompe est amorcée. Entre les seuils, c'est la pompe régulée en vitesse qui assure le suivi de la demande. Lorsque chacune des pompes est régulée en vitesse, on peut optimiser les niveaux d'utilisation en évitant les vitesses les plus basses. Cette deuxième solution est la plus économique en énergie car elle réduit les plages de fonctionnement à très bas régime réputées pour leur très mauvais rendement.

Profil de consommation énergétique

Comme toujours, l'économie d'énergie dépend du profil de charge de l'installation. Il est cependant possible de visualiser les économies d'énergie potentielles en comparant les figure 2.12 a, b & c. La figure 2.12a présente la consommation en énergie d'une installation classique fonctionnant à pleine puissance. La figure 2.12b montre l'économie d'énergie réalisée lorsque l'on utilise la variation de vitesse pour coller à la demande instantanée. La pression demandée correspond ici à une consigne fixe. La figure 2.12c montre qu'il est possible d'encore réduire la consommation énergétique. Rappelons que la perte de pression dans les canalisations diminue avec le débit. Le capteur de pression positionné au plus près de la charge peut alors tenir compte de ce phénomène, ce qui permet de réduire l'activité de la pompe à faible débit. Comme on le voit, cette économie supplémentaire n'est pas négligeable.

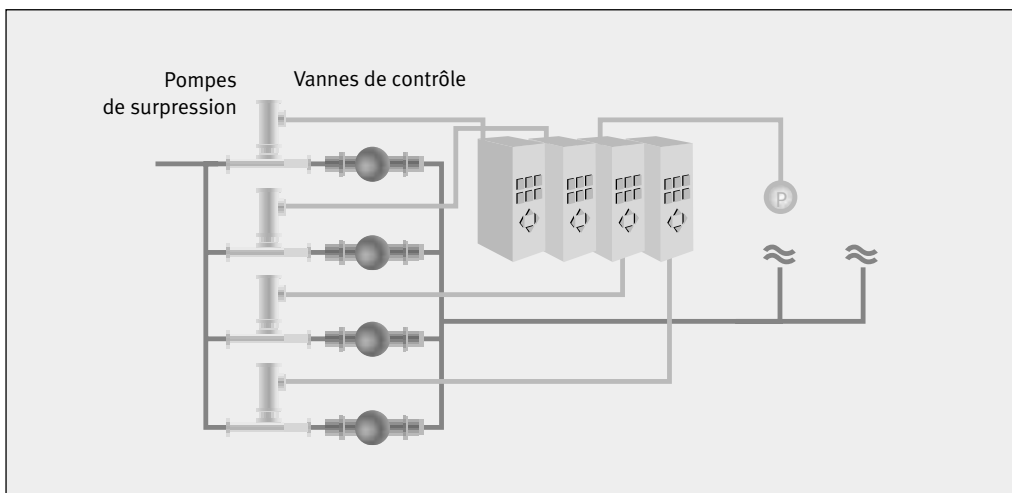


Fig. 2.11 :
Schéma de connexion
des variateurs de
vitesse

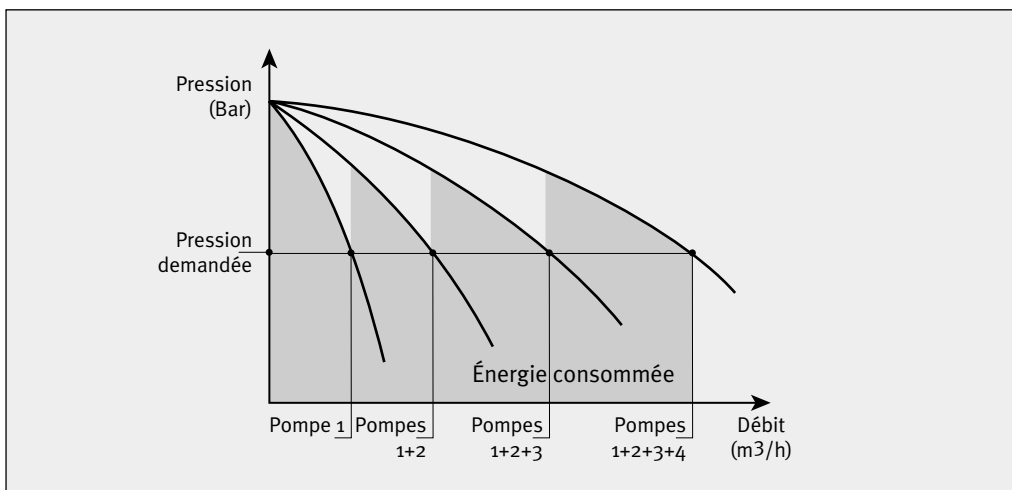


Fig. 2.12a :
Consommation
d'énergie
installation classique

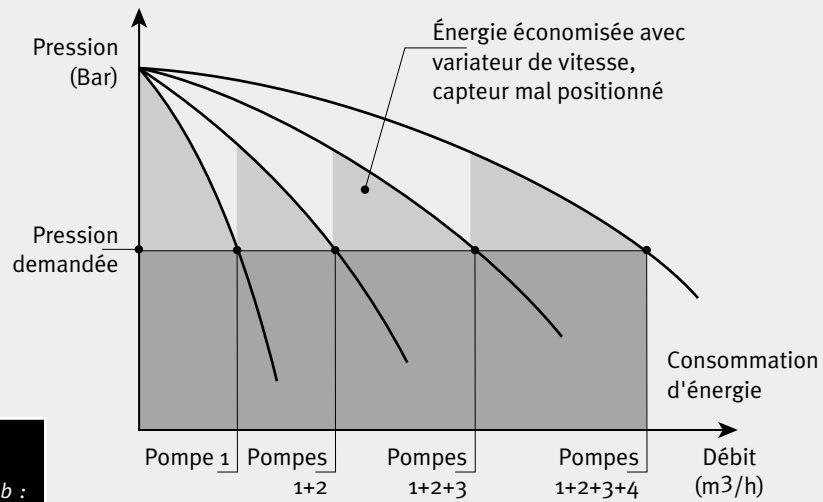


Fig. 2.12b :
Consommation
d'énergie avec
variateur de vitesse

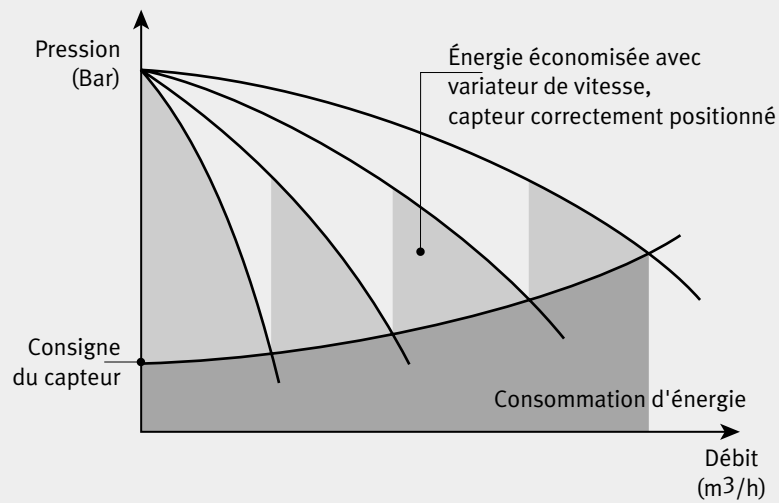


Fig. 2.12c :
Consommation
d'énergie avec position
optimale des capteurs

Outre les économies d'énergie et les avantages généraux déjà énoncés dans les exemples précédents, le variateur permet une utilisation optimale des pompes en réalisant la permutation automatique de celles-ci en fonction de leur nombre d'heures de fonctionnement.

2.4 Pompe de circuit de filtrage d'une piscine

Description de l'application

Dans les piscines, une grande quantité de l'énergie électrique consommée est due aux systèmes de pompage et de filtrage nécessaires à l'entretien de l'eau. Les pompes font circuler l'eau au travers des différents systèmes de filtrage et d'adduction chimique avant de la réinjecter dans la piscine.

Contrainte

Les normes d'hygiène définies par les réglementations en vigueur imposent que l'eau soit traitée avec une certaine fréquence de renouvellement. Les pompes sont donc contraintes à un débit minimal. Il est alors nécessaire de dimensionner les pompes de façon à pouvoir répondre à cette contrainte dans les cas de figure les plus défavorables. Cette situation se présente au moment où les filtres sont encrassés et offrent donc une résistance importante à l'écoulement de l'eau. Lorsque les filtres sont neufs, le débit est alors excessif. Le débit n'atteint le niveau requis qu'une fois les filtres suffisamment encrassés!

Variation de vitesse

La variation de vitesse permet d'adapter le régime de la pompe en fonction du niveau d'encrassement du filtre. En pratique, après la pose d'un filtre neuf, la pompe fonctionne à une vitesse relativement lente, de façon à tenir compte de la faible résistance offerte par ce filtre. Un capteur de débit assure l'ajustement de la vitesse de la pompe. Au fur et à mesure que le filtre s'encrasse, le variateur augmente automatiquement et progressivement la vitesse de rotation de la pompe. Pratiquement, la vitesse augmente jusqu'au seuil défini comme maximum pour le remplacement ou l'entretien du filtre. Cela correspond, à peu de chose près, à la vitesse maximale de la pompe. En général, on programme le variateur de façon à ce qu'il déclenche une alarme signalant la nécessité d'intervenir sur le filtre. Outre l'économie d'énergie réalisée sur la consommation de la pompe, on bénéficie d'une économie de matériel et de maintenance et d'un meilleur contrôle du processus. En effet, avec un système classique, le débit ainsi que la pression obtenus varient au cours du temps, avec comme conséquence un encrassement plus rapide du système de filtrage.

En régulation de vitesse, le débit est maintenu constant tout au long de la période d'utilisation avec une augmentation connue de la pression. Le filtre est alors utilisé dans les limites de son dimensionnement, ce qui assure un fonctionnement optimal. La sur-pressurisation des canalisations est également réduite.

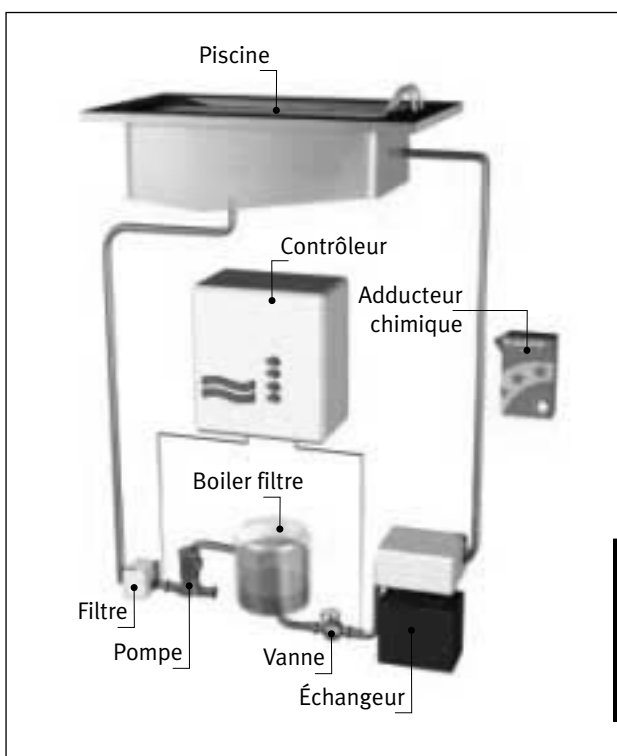


Fig. 2.13 :
Schéma de
principe du circuit
de pompage

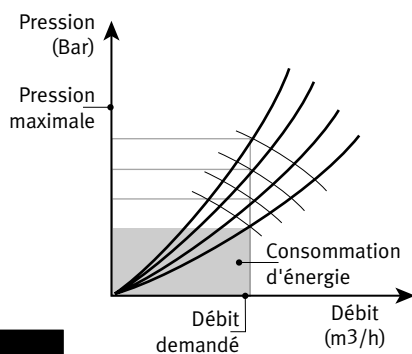
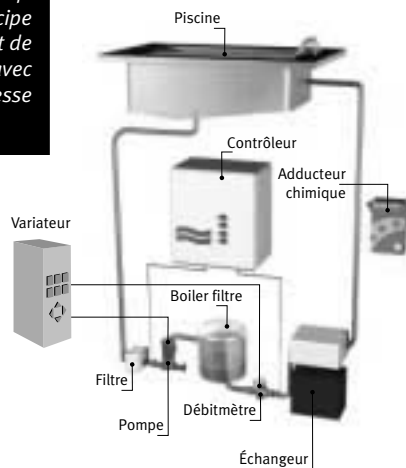


Fig. 2.14 :
Schéma de principe
du circuit de
pompage avec
variateur de vitesse



Profil de consommation énergétique

L'économie d'énergie réalisée est fonction de la courbe d'utilisation mais peut être schématiquement visualisée comme le présente la figure 2.15.

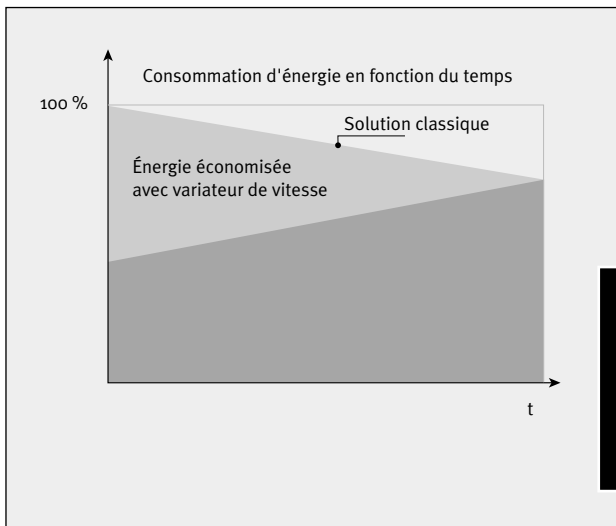


Fig. 2.15 :
Diagramme de
consommation
énergétique avec
et sans variateur de
vitesse

2.5 Système de tour de refroidissement

Description de l'application.

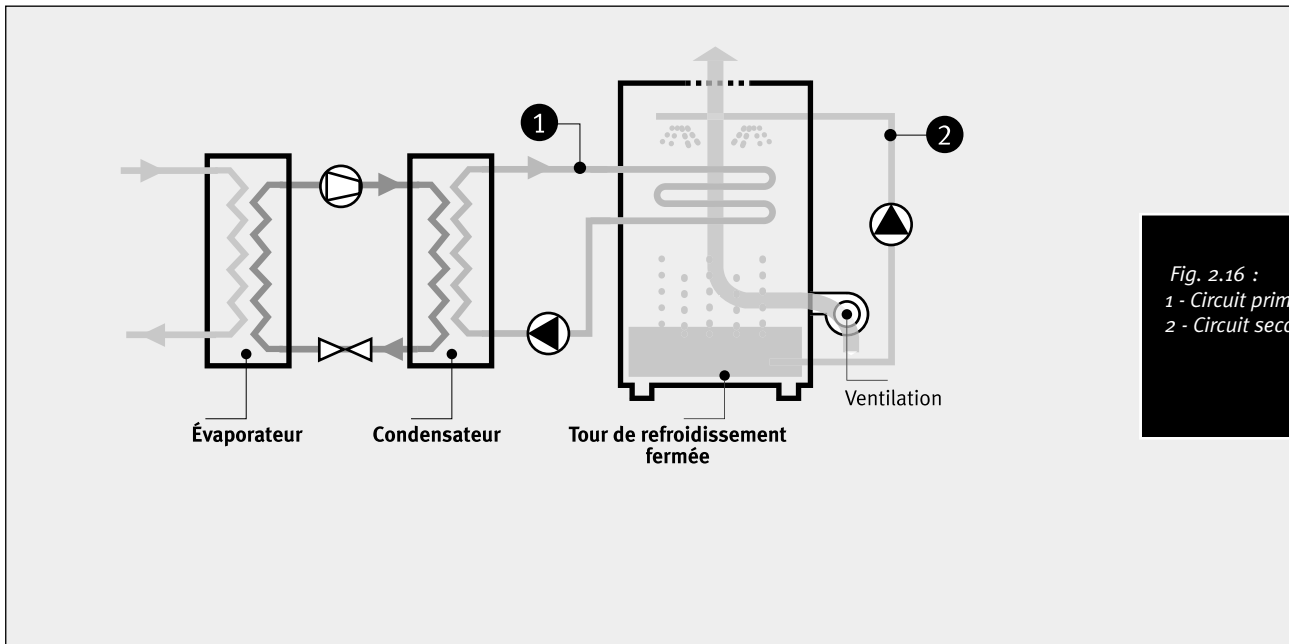
Exemple d'une tour de refroidissement fermée. L'eau du circuit primaire refroidit le condenseur et va rejeter sa chaleur à la tour de refroidissement en circuit fermé.

L'eau du circuit secondaire est puisée dans le bassin et pulvérisée dans la tour. Un ou plusieurs ventilateurs provoquent un courant d'air contraire ascendant. L'évaporation partielle des gouttelettes pulvérisées et l'échange de chaleur avec l'air froid provoquent son refroidissement.

Ces gouttelettes refroidies refroidissent à leur tour l'eau relativement chaude du circuit primaire. La puissance de refroidissement de la tour dépend de la quantité d'eau pulvérisée et de l'échange entre l'eau et l'air.

Dans une installation classique, le débit de circulation du circuit secondaire est constant et la modulation de la puissance de refroidissement est réalisée par un dispositif de démarrage /arrêt des ventilateurs. L'augmentation du débit d'air favorise l'échange entre l'air et l'eau du circuit secondaire, ce qui augmente la puissance de refroidissement. Les ventilateurs sont pilotés par une sonde de température.

Dans ce type de régulation, la différence de température entre le circuit primaire et le circuit secondaire fluctue en fonction des conditions climatiques. Cependant, l'échange de chaleur dans la tour présente un rendement optimum pour une différence de température définie. Il en résulte une perte d'énergie pendant la majorité du temps du fait du non fonctionnement de la tour à son niveau de rendement maximum.

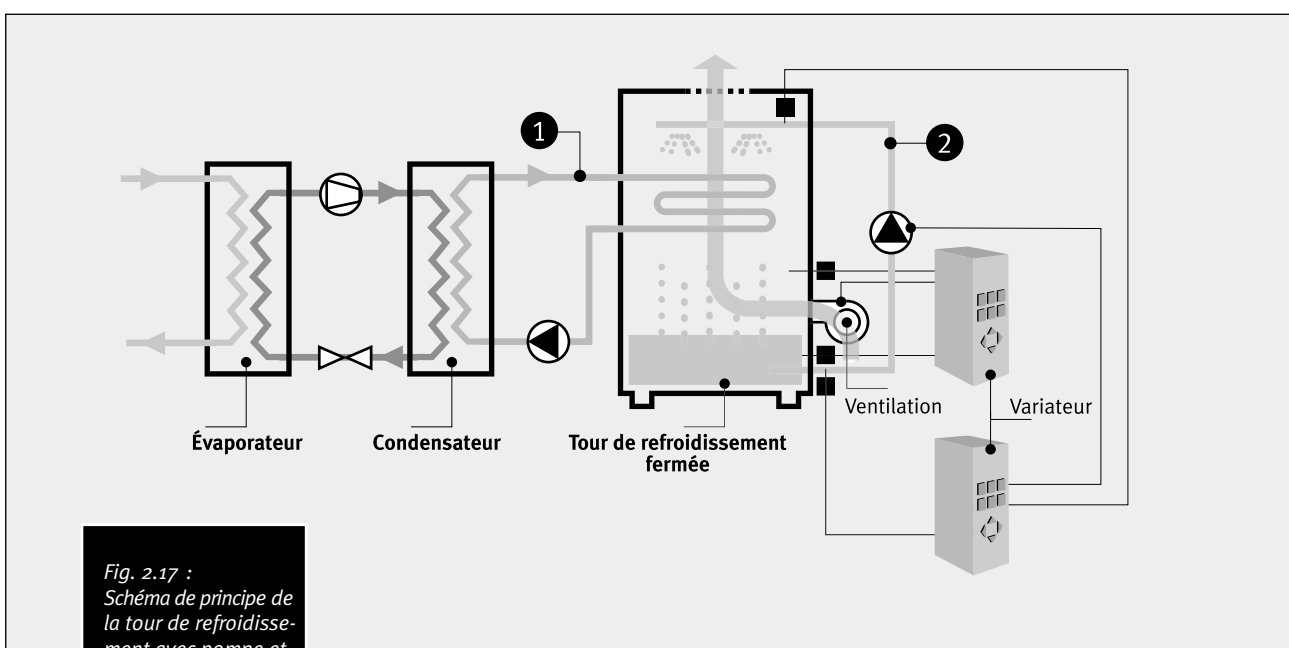


Avec variation de vitesse

Sur une tour de refroidissement, il est à priori possible de faire intervenir la variation de vitesse à deux niveaux différents.

La figure 2.17 représente le schéma de principe d'une installation utilisant cette double régulation.

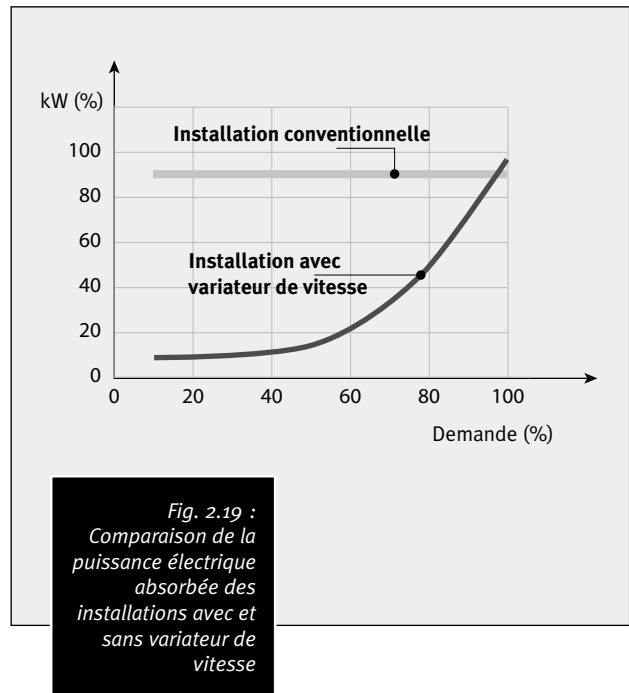
Premièrement, un variateur de vitesse peut être placé sur la pompe du circuit secondaire pour optimiser le fonctionnement de la tour en fonction de la quantité de chaleur à évacuer. Le variateur adapte le débit d'eau du circuit secondaire pour maintenir quasiment constante la différence de température entre l'eau pulvérisée et l'eau du bassin. En pratique, le variateur est piloté par la différence de pression entre l'eau pulvérisée et l'aspiration de la pompe.



La figure 2.18 montre l'évolution du DT en fonction de la demande.

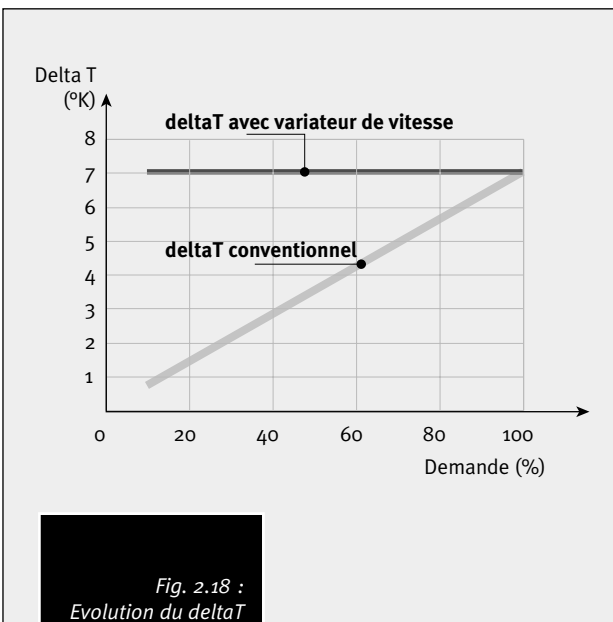
Deuxièmement, un variateur de vitesse peut être placé sur les ventilateurs pour optimiser le fonctionnement de la tour en fonction des conditions climatiques. Le variateur adapte le débit d'air pour maintenir la température de l'eau du bassin à la température humide ambiante. En pratique, le variateur est piloté par les mesures de température et d'humidité relative ambiantes et par la mesure de température de l'eau du bassin.

D'autres fonctions seront également assurées par le variateur comme par exemple le maintien d'une vitesse minimale de fonctionnement et le saut de fréquences afin d'éviter les zones de résonances de la tour.



Profil de consommation énergétique

La figure 2.19 compare la puissance électrique d'une installation classique et d'une installation avec double contrôle de la vitesse.



2.6 Conclusion

Les différents exemples présentés ci-dessus illustrent les avantages que l'on peut tirer de la variation de vitesse au niveau de l'économie d'énergie, de l'amélioration de la qualité du processus, et de la réduction de coût (maintenance, etc.).

Il ne s'agit ici que de quelques exemples permettant de se faire une représentation concrète de l'association d'un variateur de vitesse et d'un moteur. Ces exemples font partie d'une très large gamme d'applications où la variation de vitesse se révélera intéressante. On peut notamment citer les systèmes :

- d'extraction de fumée ;
- de pressurisation de cages d'escaliers ;
- de pompage ou d'épuration des eaux ;
- transporteurs comme les ascenseurs ou les convoyeurs ;
- etc.

Le chapitre 3 reprend en détail l'ensemble des avantages et des inconvénients de l'association de la technologie des variateurs de vitesse aux moteurs asynchrones.

3.1 Avantages des variateurs de vitesse par variation de fréquence

3.1.1 Avantages généraux

- Une très bonne **fiabilité**.
- **Economie substantielle d'énergie** pouvant aller au-delà de 90 %. Particulièrement vraie dans le cas des pompes et des ventilateurs où la consommation d'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse. Par exemple, une réduction de 50 % de la vitesse de rotation entraîne une diminution de consommation énergétique de 87,5 % par rapport à la puissance nominale.
- **Amélioration du processus**. Comme présenté dans les nombreux exemples exposés, le variateur permettra suivant les cas, soit une amélioration de la productivité, soit une amélioration du confort (nuisance sonore, courant d'air intempestif), de la précision ou encore de la flexibilité de l'application.
- **Surveillance de processus**. Le variateur de vitesse peut surveiller le processus qu'il pilote et intervenir en cas d'irrégularité. Cette surveillance porte sur trois domaines. Surveillance de l'installation via la fréquence de sortie, le courant de sortie et le couple moteur. S'il y a dépassement des limites fixées pour ces valeurs, on peut intervenir sur la commande, déclencher une alarme ou procéder à l'arrêt du moteur. Surveillance du moteur à partir des conditions thermiques. Le variateur de vitesse joue alors le rôle du déclencheur thermique. Finalement, surveillance du variateur lui-même via le microprocesseur du variateur qui peut effectuer un calcul permettant d'éviter la surcharge.
- **Fonctionnement souple**. Forte réduction des cycles marche / arrêt et des modifications brusques de vitesse. L'utilisation des rampes de démarrage et d'arrêt permet de fortement réduire les contraintes des composants mécaniques des installations.
- Outre un accroissement des durées de vie, le fonctionnement souple entraîne également une **réduction de la maintenance**. Par ailleurs, le variateur lui-même ne nécessite aucun entretien.

- **Incorporation d'autres fonctionnalités**. Le variateur peut en effet jouer toute une série d'autres fonctions comme le déclenchement d'alarme, la détection d'encrassement de filtre, le respect des limites de fonctionnement prédéfinies, etc.
- Dans certaines applications, il permet aussi la **suppression de matériel périphérique** (capteurs, câblage et leurs protections, etc.) ainsi que la suppression de leur coût d'installation et d'entretien.
- **Bon cos ϕ** obtenu automatiquement. Contrairement aux moteurs asynchrones qui sont alimentés directement à partir du réseau et qui nécessitent une compensation de l'énergie réactive par adjonction de batteries de condensateurs, le moteur alimenté par un variateur présente un bon cos ϕ (généralement supérieur à 0,9).
- Possibilité de réglage de la vitesse de **plusieurs moteurs**.

3.1.2 Caractéristiques des moteurs asynchrones pilotés

Outre les avantages généraux exprimés ci-dessus, les variateurs modifient un certain nombre de caractéristiques propres des moteurs asynchrones.

Nous présentons un comparatif des caractéristiques techniques du moteur asynchrone selon qu'il est utilisé en connexion directe sur le réseau d'alimentation ou qu'il est connecté par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse.

- **Courant de démarrage**
 - en usage normal, le courant de démarrage est très élevé. Il peut monter jusqu'à 6 à 8 fois le courant nominal en valeur efficace, 15 à 20 fois en valeur crête.
 - avec variateur de vitesse, il est limité dans le moteur (environ 1,5 fois le courant nominal).
- **Couple de démarrage**
 - en usage normal, le couple de démarrage est élevé et surtout non contrôlé, sa valeur peut typiquement monter jusque 2 à 3 fois le couple nominal.
 - avec variateur de vitesse, il est de l'ordre de 1,5 fois le couple nominal et est contrôlé pendant toute l'accélération.

• Démarrage

- en usage normal, il est brutal et sa durée n'est fonction que des caractéristiques du moteur et de la charge entraînée (couple résistant, inertie).
- avec variateur de vitesse, il est progressif, sans à-coup et contrôlé (rampe linéaire de vitesse, par exemple).

• Vitesse

- en usage normal, elle varie légèrement selon la charge ; pratiquement, elle est proche de la vitesse de synchronisme.
- avec variateur de vitesse, elle peut varier à partir de zéro jusqu'à une valeur supérieure à la vitesse de synchronisme.

• Couple maximal C_m

- en usage normal, il est élevé : il monte jusqu'à 2 à 3 fois le couple nominal.
- avec variateur de vitesse, il est également élevé et disponible sur toute la plage de vitesse (de l'ordre de 1,5 fois le couple nominal).

• Freinage électrique

- en usage normal, il est relativement complexe, nécessitant des protections et un schéma particulier.
- avec variateur de vitesse, il est facile à réaliser et peut être accompagné d'une récupération de l'énergie.

• Inversion du sens de marche

- en usage normal, il est facile seulement après l'arrêt du moteur.
- avec variateur de vitesse, il est facile à réaliser, très rapide et contrôlé avec une bonne précision.

• Fonctionnement du moteur dans le plan couple – vitesse (pour rappel, figures 1.13 et 1.14 page 9)

- en usage normal, limité à une section de la courbe de fonctionnement.
- avec variateur de vitesse, s'étend sur une plage très large permettant une grande flexibilité.

3.1.3 Fonctionnalités intégrées

Les variateurs de vitesse, en plus de leur fonction première et grâce aux développements de l'électronique de leur circuit de commande, intègrent toute une série de fonctionnalités qui auront des conséquences importantes sur l'application. Ces fonctionnalités permettent d'améliorer la qualité de l'application, d'en diminuer ses nuisances sonores, de réduire davantage encore la

consommation d'énergie ou encore d'améliorer la durée de vie ou le coût d'entretien de l'installation. Il faut évidemment garder à l'esprit que chacune de ces fonctionnalités ne sera pas utile dans toutes les applications.

Nous présentons ici les fonctionnalités les plus courantes et les plus répandues. Elles permettent de se faire une bonne idée des possibilités supplémentaires offertes par les variateurs. La liste n'est pas exhaustive car les possibilités en la matière sont presque illimitées.

• Fréquence minimum de fonctionnement

Elle permet de définir la fréquence minimale à laquelle le variateur aura le droit de faire descendre la vitesse de rotation du moteur. Cela est utile, par exemple, dans le cas où la mécanique mise en œuvre dans l'application ou l'application elle-même nécessite une rotation minimale du moteur pour conserver un bon comportement (graisage d'une boîte de vitesse, dépôt de givre nuisible, niveau de ventilation minimum, etc.).

• Démarrage progressif du moteur

Au démarrage, le variateur n'applique pas instantanément la tension correspondant à la consigne de fonctionnement. Cela permet d'éviter les courants trop importants, les échauffements excessifs ainsi que les contraintes mécaniques indésirables. Ces fonctionnalités peuvent également exister pour une accélération ou une décélération importante quel que soit le niveau de vitesse. Dans tous les cas il en résultera une meilleure durée de vie pour le moteur ainsi qu'une exécution « en souplesse » de l'application.

• Avertissement haute fréquence

C'est la possibilité de fixer une valeur de fréquence de fonctionnement maximale au-delà de laquelle le variateur effectue une opération prédéfinie. Les possibilités peuvent varier entre l'affichage sur la console, l'envoi d'un signal vers l'extérieur, etc.

• Saut de fréquence

Il permet de programmer des bandes de fréquences indésirables pour l'application. Il s'agit de définir des plages de fréquences de fonctionnement que le variateur de vitesse devra sauter. Cela sera essentiellement utile pour éviter des zones de fonctionnement où le moteur commandé pourrait provoquer un phénomène de résonance avec d'autres équipements mécaniques de l'installation.

- **Mode veille**

Il permet de définir un niveau de fonctionnement en-dessous duquel le variateur de vitesse éteint le moteur commandé. Cette fonction peut être accompagnée d'un paramètre permettant de déterminer un niveau de réveil. Dès qu'une variable du système repasse au dessus d'un certain niveau prédéterminé, le variateur redémarre le moteur. L'autre possibilité est de disposer d'un paramètre permettant de définir un temps de veille au-delà duquel le variateur redémarre le moteur.

- **Inversion du sens de rotation**

Le variateur de vitesse est capable, via un système de commutation interne, de réaliser l'inversion du sens de rotation du moteur.

- **Préchauffage du moteur**

Le variateur de vitesse injecte de petites quantités croissantes de courant dans le moteur de façon à éviter le démarrage à froid ainsi que les effets néfastes attenants. C'est essentiellement utile dans des environnements froids et / ou humides.

- **Autorisation de démarrage**

Le variateur de vitesse prend en considération un signal externe avant d'effectuer son démarrage. Ce signal «système prêt» est utile dans de nombreuses applications. Avant d'effectuer le démarrage du variateur, on peut s'assurer que l'ensemble des autres appareillages sont prêts à fonctionner.

- **Facilité de programmation**

Il existe toute une série de fonctionnalités facilitant la programmation d'un variateur de vitesse et plus particulièrement la multiprogrammation : possibilité de charger ou de copier des programmations entre variateurs, d'installer le clavier de programmation dans une cabine de contrôle, d'interchanger les claviers de programmation, etc.

- **Exportation de données**

Elle permet d'exporter, vers une centrale de contrôle ou un poste d'automation, des données en provenance de capteurs arrivant au variateur. Le tout sans équipement supplémentaire.

- **Contrôleur PID**

Un contrôleur PID (Proportional, Integral and Differential) est utilisé pour contrôler un système variable. La plupart du temps ce contrôle est obtenu en analysant un signal en provenance de capteurs disposés dans le système. Ce signal est alors comparé à la valeur de la commande, et sur base de cette comparai-

son, le contrôleur effectue un calcul. Les contrôleurs de ce type peuvent consister en un P, PI ou PID contrôleur. La différence entre ceux-ci est la façon dont ils sont capables d'extraire l'information du signal. Habituellement ce genre de contrôleurs est constitué d'éléments séparés faisant partie d'un appareillage extérieur comme un système de traitement de l'air, un contrôleur de pompe ou encore un morceau de software intégré dans le système de gestion centralisée du bâtiment. Aujourd'hui les PID sont de plus en plus intégrés dans le variateur de vitesse.

3.2 Inconvénients des variateurs de vitesse par variation de fréquence

- Génération d'harmoniques. Elles sont toujours nuisibles pour les installations électriques. Elles ont nécessairement une conséquence économique liée à :
 - une diminution du rendement énergétique des installations (perte d'énergie) ;
 - plus particulièrement dans le moteur commandé où l'injection de courant non sinusoïdal provoque un excédent de chaleur dissipée qui va nécessiter l'adjonction d'un système de ventilation extérieur au moteur ;
 - la nécessité de surdimensionner les équipements ;
 - une perte au niveau de l'opérationalité ou de la productivité des équipements du fait de leur vieillissement accéléré et des éventuels déclenchements intempestifs des protections ;
 - la nécessité de recourir à des investissements permettant de lutter contre celles-ci.
- Rendement du convertisseur. Le convertisseur de fréquence n'a jamais un rendement de 100 %. Cette perte devra donc être comptabilisée dans le calcul global. De plus, le convertisseur perd en rendement à moindre charge (il peut par exemple passer d'une valeur supérieure à 0,95 en vitesse nominale à 0,75 à très faible vitesse).
- Sollicitation plus importante des isolants du moteur, du fait des ondes de tension à flanc raide et à fréquence élevée servant à générer la tension d'entrée du moteur. Sollicitation d'autant plus marquée que la fréquence de commande du convertisseur servant à générer la tension d'entrée sinusoïdale du moteur sera plus élevée.
- Coût relativement élevé nécessitant un calcul de temps de retour pour l'application considérée.

3.3 Précautions et protections

L'installation d'un variateur de vitesse est une opération délicate qui requiert de l'expérience. D'une part pour le choix de la position du capteur. D'autre part pour la mise en place des diverses protections de lutte contre les effets néfastes des hautes fréquences générées par le variateur.

3.3.1 Position des capteurs

Un élément important pour assurer un gain énergétique optimal est la position des capteurs. Comme nous l'avons vu dans l'exemple des pompes de pressurisation, ce positionnement entraîne une différence non négligeable sur la consommation d'énergie de l'installation.

En plus de l'économie d'énergie, le bon positionnement assure également une meilleure qualité de régulation et donc une meilleure satisfaction au niveau de l'application.

Le positionnement optimal est à étudier pour chaque cas particulier d'application. Par exemple, la solution couramment suggérée pour une application de pompage ou de ventilation est de placer les capteurs de pression aux $3/4$ de la longueur totale de la conduite, et ce afin de tenir compte de la perte de pression différente suivant le débit. Pour la même raison, dans le cas d'une application nécessitant un capteur différentiel de pression, on optera pour une position du capteur mesurant directement la perte de pression au travers de la charge. L'attention portée à la position du capteur peut faire varier l'économie d'énergie d'un facteur 2 à 5 !

La solution optimale pour le positionnement n'est pas fondamentalement complexe, elle est simplement trop souvent négligée.

3.3.2 Lutte contre les harmoniques

Nous avons vu que les variateurs de vitesse, de par leurs comportements électriques, étaient des générateurs d'harmoniques. Les harmoniques et les techniques de lutte contre celles-ci constituent un domaine très vaste qui sort des objectifs de cette publication. Dans le cas des variateurs de vitesse, deux orientations retiennent notre attention pour limiter la pollution électrique.

Il s'agit d'ajouter une inductance de ligne, qui sera, soit placée en série avec l'alimentation, soit placée directement dans le circuit intermédiaire du variateur de vitesse. Dans les deux cas, elle réduit les harmoniques de courant de ligne, notamment ceux de rang élevé.

Dans l'option d'une inductance de ligne en amont du variateur, il est possible de la partager entre plusieurs variateurs.

L'intégration de l'inductance de ligne dans le variateur constitue la solution optimale pour conserver le bon $\cos \varphi$ caractéristique des variateurs de vitesse (de l'ordre de 0,9).

Notons qu'en terme d'harmoniques, les alimentations triphasées sont nettement plus performantes que les alimentations monophasées.

3.3.3 Interférence de fréquences radio (RFI)

Lorsque des variateurs de vitesse sont installés, des niveaux élevés d'interférence sont provoqués par une commutation rapide des composants électroniques de l'onduleur sur les hautes tensions utilisées dans le circuit intermédiaire et par la capacité passive. Ceci peut avoir pour résultat des interférences par conduction sur les lignes. Une interférence de fréquence radio (RFI) peut nuire aux appareils électroniques raccordés à la même ligne électrique. Le filtre RFI est conçu pour réduire ces effets.

Il se place en amont du variateur et consiste en un filtre passif en dérivation sur le réseau, réalisant une impédance faible aux fréquences à atténuer.

Suivant les constructeurs, ce filtre peut être intégré ou non dans le variateur.

3.3.4 Installation et câblage

L'installation et le câblage d'un variateur de vitesse ainsi que de ses éventuels accessoires devront faire l'objet d'une attention toute particulière. En effet, il faut toujours avoir à l'esprit que le variateur de vitesse est un générateur de hautes fréquences. Chaque élément conducteur de l'installation devient donc potentiellement une antenne ou une capacité, imposant l'usage de câblages faradisés, de mise à la terre spéciale, etc. Il est donc généralement conseillé de faire appel à un installateur spécialisé.

3.3.5 Protection des installations

Les caractéristiques technologiques des circuits électroniques de puissance ainsi que les caractéristiques de fonctionnement du variateur de vitesse et du moteur

font qu'il est nécessaire de prévoir des protections particulières. Ces protections se distinguent des protections propres à chaque circuit électrique (protection classique située au niveau des départs).

Un certain nombre de fonctionnalités de protection se retrouvent généralement intégrées dans les variateurs de vitesse modernes. Il est intéressant de vérifier leur disponibilité ainsi que l'adéquation de leurs caractéristiques à l'application :

- **Protection de surcharge moteur**

Les variateurs de vitesse peuvent assurer la protection en surcharge du moteur. Ils sont en effet capables de limiter le courant délivré au moteur à un courant plafond de 1,5 fois le courant nominal de fonctionnement. Ils prennent également en charge le calcul de l'énergie dissipée par le moteur et effectuent la corrélation de cette valeur avec la vitesse du moteur de façon à éviter les problèmes de refroidissement à basses vitesses.

- **Protection contre les court-circuits en aval**

Il s'agit ici d'assurer la protection de court-circuits aussi bien au niveau du moteur que de la ligne entre le variateur et le moteur. Toute surintensité est détectée au niveau du variateur et donne lieu à l'émission d'un signal de blocage des composants électroniques de puissance de l'onduleur, assurant ainsi la protection du variateur. Le courant de court-circuit sera suffisamment court pour que le condensateur de filtrage du circuit intermédiaire puisse le prendre en charge et ainsi éviter toute perturbation de la ligne en amont.

- **Autres types de protections**

- Protection des composants du variateur contre les surchauffes. Un capteur thermique permet de provoquer l'arrêt du variateur, évitant ainsi la destruction des composants.
- Protection contre les creux de tension du réseau. Elles permettent d'éviter les dysfonctionnements des circuits de contrôle ainsi que les surintensités au moment du retour à la valeur normale.
- Dans le cas des variateurs triphasés : protection contre les coupures de phase. Ces coupures sont en effet à l'origine d'une augmentation du courant absorbé.

3.3.6 Echauffement du variateur

Les variateurs de vitesse n'ont pas un rendement de 100 % (typiquement 95 %). Suivant la puissance du variateur, les 5 % de pertes thermiques peuvent représenter des échauffements non négligeables. Afin d'assurer

une bonne durée de vie au variateur, il sera important de veiller à maintenir sa température dans les limites spécifiées par le constructeur. Dans le cas d'un variateur situé dans un coffret, il sera parfois nécessaire de recourir à un système de refroidissement.

3.4 Comment savoir si mon application mérite d'être adaptée ?

3.4.1 Facteurs à prendre en compte dans le calcul de rentabilité

- **Durée annuelle de fonctionnement**

Il faut avant tout se demander si la durée de fonctionnement actuelle est justifiée. Penser aux arrêts en été pour les pompes de chauffage (en hiver pour la climatisation) en fonction de la température extérieure, la nuit, le week-end, anticipé le soir, etc. L'arrêt est toujours une économie importante et peu coûteuse : en effet, une horloge et/ou un thermostat suffisent souvent pour plusieurs pompes ou ventilateurs. La marche des installations de ventilation (on/off) ou leur régime de fonctionnement (vitesse) peut dans certains cas être commandée en fonction d'une programmation horaire, d'une détection de présence ou d'une sonde de qualité d'air. On pense tout spécialement aux réfectoires, aux salles de sport, aux salles de conférences, etc. Ensuite, on se préoccupera en priorité des éléments dont le fonctionnement permanent est nécessaire (365 x 24 h, soit 8.760 h/an), puis de ceux à durée de marche importante (plusieurs milliers d'heures / an). C'est à ce niveau que l'étude de la variation de la charge sur les périodes d'utilisation est importante à prendre en considération.

- **La variation de charge au cours de l'utilisation annuelle**

La variation de vitesse représente une économie d'énergie lorsque l'installation a un profil de charge variable. C'est en effet à partir du moment où un moteur peut être utilisé pendant une certaine plage de son fonctionnement à une vitesse inférieure à sa vitesse nominale que le variateur va permettre de faire la différence. Comme nous l'avons montré dans les exemples présentés, le profil de charge de l'application est un élément fondamental à connaître pour faire une évaluation des économies potentielles.

• Le rendement du moteur hors puissance nominale

Il est très important de tenir compte dans son calcul de rentabilité de la modification du rendement du moteur dans les différentes plages de fonctionnement. En effet, le rendement des systèmes tend à marquer un très net recul dans les bas régime de fonctionnement. Or c'est bien sur l'ensemble de ces plages que nous espérons effectuer les plus grandes économies.

• La consommation du variateur

Voici un facteur de correction qui aura une influence sur l'ensemble des régimes de fonctionnement. De plus, comme nous l'avons déjà signalé, le rendement du variateur décroît de façon non négligeable à vitesse réduite.

• Coût de l'énergie électrique

Les tarifs sont très variables en fonction du type de consommateur (basse tension, haute tension), du type ou de la composante tarif (heures pleines, heures creuses, force motrice, horo-saisonnier, pointe, etc.). Les prix moyens se situent généralement dans une fourchette de 0,06 à 0,12 Euro / kWh hors TVA.

Ces coûts moyens peuvent servir de base à une première évaluation des économies possibles.

Toutefois, pour les consommateurs dont le tarif présente les éléments :

- heures pleines ;
- heures creuses ;
- pointes (dont le coût peut être variable suivant les mois ou les heures du jour).

les réductions de consommation dues aux changements de vitesse de chacun des éléments sur lesquels on compte agir, doivent être valorisées en fonction des tarifs en vigueur aux heures de réduction. L'éventuelle influence sur la pointe doit également être prise en considération.

• La durée de vie du matériel mécanique

Les variateurs de vitesse, en modifiant les caractéristiques des moteurs, réduisent les contraintes mécaniques imposées tant au moteur qu'au reste de l'application (surpression dans les canalisations, etc.). Ces effets se font ressentir sur les coûts d'entretien et sur la durée de vie des équipements.

• L'investissement

Il faut tenir compte des investissements périphériques (lutte anti-harmoniques, etc.), de l'éventuelle suppression d'appareillage périphérique (capteurs, etc.) ainsi que des gains de productivité.

3.4.2 Evaluation de la rentabilité

Pour établir le temps de retour de l'investissement, il faut mettre en balance l'investissement nécessaire avec les économies attendues. En général, on considère que si le temps de retour est inférieur à 2-3 ans, la rentabilité est très bonne, de 3 à 5 ans, elle est acceptable. Au delà de 5 ans, peu d'entreprises acceptent d'investir, à moins que des considérations autres que purement économiques n'entrent en jeu (obligation de se conformer à de nouvelles réglementations, raisons écologiques, image de marque, etc.)

Le calcul de l'économie est difficile car de nombreux paramètres sont inconnus ou peuvent avoir des interférences entre eux (par exemple débit et température d'un circuit de chauffage).

Il est à noter que certains constructeurs proposent des outils permettant de tenir compte de toute une série de facteurs propres à l'installation (rendement du moteur, rendement du variateur, profil de charge, etc.) de façon à donner une estimation de l'économie réalisable.

Il est difficile de donner une idée des prix des variateurs de vitesse car leurs caractéristiques (type de commande, etc.) et les fonctionnalités de base disponibles (inductance anti-harmonique, filtre RFI, etc.) influencent énormément le prix, qui peut varier du simple au double.

Les options de base du variateur constituent donc un critère prépondérant. D'autant plus que toute fonction à intégrer nécessitera un dimensionnement et une installation adéquats. Le coût de ces tâches additionnelles est à mettre dans la balance.

Il faut ajouter à cela le coût d'installation. Il peut fortement varier suivant le type d'installation, les tolérances en harmoniques et autres phénomènes de perturbation, la distance entre le variateur et l'installation, etc.

Pour une installation de type HVAC par exemple, compter 50 % pour le variateur et 50 % pour l'installation sera très confortable. La proportion des frais d'installation pourra être moindre dans le cas d'une petite installation standard et nettement plus élevée pour certaines installations très exigeantes, en terme de perturbations par exemple.

Notons qu'avant d'envisager l'investissement d'un variateur de vitesse, il est intéressant d'évaluer successivement les économies réalisables par les actions suivantes :

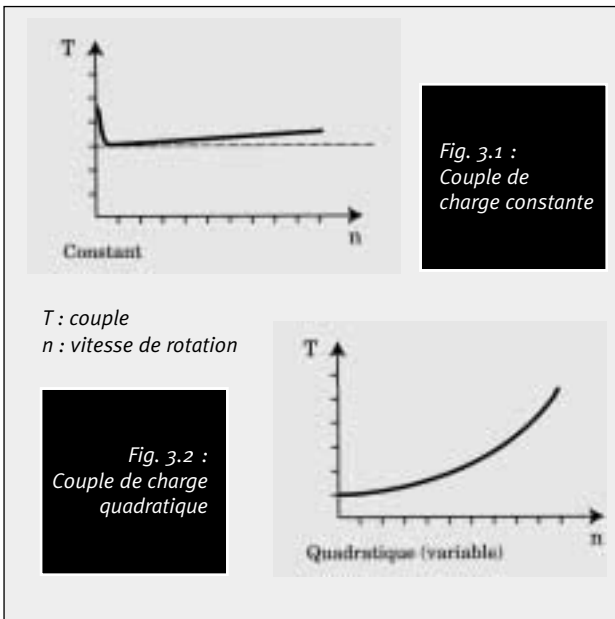
- arrêt de l'appareillage (en été par exemple) ;
- commutation de pompes et ventilateurs sur une vitesse inférieure si le moteur a plusieurs vitesses.

3.5 Choix de la taille du variateur de vitesse

Pour bien choisir un système d'entraînement à vitesse variable, il est important de connaître les contraintes imposées par la charge à l'ensemble réseau / variateur / machine, ainsi que le type de performances attendues :

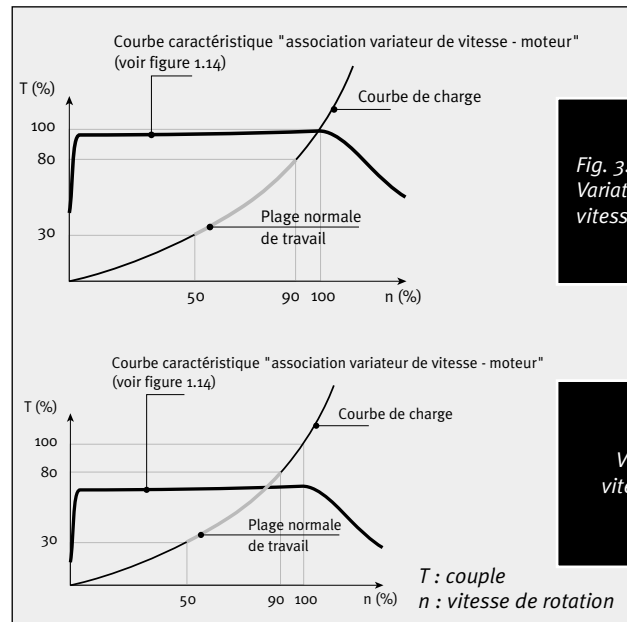
- caractéristique couple vitesse de la machine entraînée ;
- inertie de la machine entraînée ;
- performances statiques et dynamiques attendues (couple d'accélération, temps de rampes de montée et de descente, temps de freinage, temps de fonctionnement) ;
- régime et service dans tous les cas d'exploitation.

Dans le genre d'applications qui nous intéressent, il faut distinguer deux types de caractéristiques de charge différentes: charge constante et charge quadratique (figure 3.1 & 3.2).



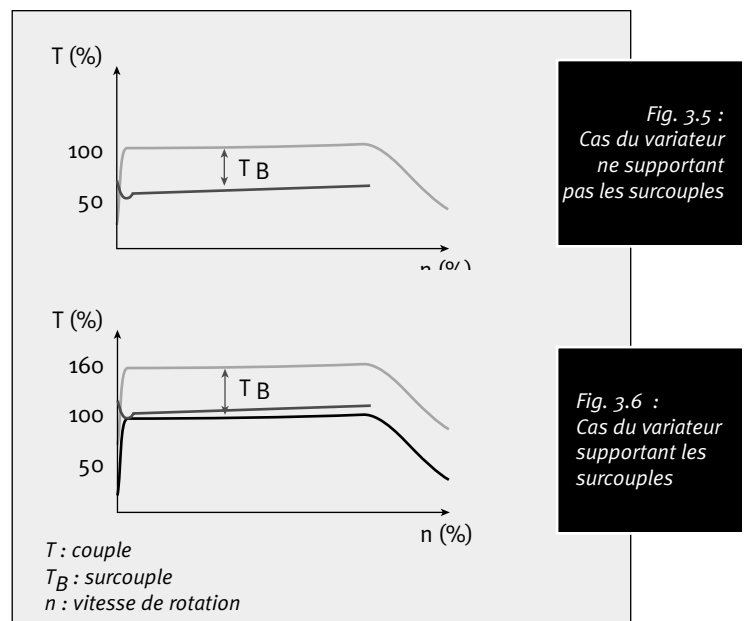
1° Cas de la charge quadratique

Dans le cas des pompes centrifuges et des ventilateurs, la charge augmente proportionnellement au carré de la vitesse. Or la plage de travail normal de tels appareils se situe entre 50 et 90 % de la vitesse nominale. Ce qui donne une plage de charge allant de 30 à 80 %. Il faudra donc veiller à ce que la zone de fonctionnement allant jusqu'à 80 % de la charge (soit 90 % de la vitesse) soit comprise dans la valeur nominale du variateur de vitesse (figure 3.3 & 3.4).



2° Cas de la charge constante

Dans le cas d'une charge constante caractéristique par exemple des transporteurs, le moteur doit être capable de fournir un couple supérieur à cette constante. Si le variateur n'est pas capable de fournir un surcouple, il faudra que son couple nominal soit supérieur ou égal au couple de fonctionnement plus le couple d'accélération (figure 3.5). Dans le cas où le surcouple est supporté par le variateur, il ne sera pas nécessaire de prendre cette marge supplémentaire (figure 3.6). En pratique, un surcouple de l'ordre de 60 % est suffisant pour les applications de type transporteur.



Une fois la caractéristique de charge déterminée, il existe quatre méthodes différentes de calcul de la puissance de sortie nécessaire.

- La méthode la plus simple est de déterminer la quantité de courant absorbée par le moteur à pleine charge. Il suffit, une fois ce courant connu, de sélectionner un variateur dont le courant de sortie maximal continu est supérieur ou égal à cette valeur pour un couple constant ou quadratique

- Détermination de la puissance absorbée par le moteur.

- Evaluation de la puissance mécanique fournie par le moteur. Vu que les $\cos \varphi$ et le rendement du moteur varient avec la charge, cette méthode reste imprécise.

- Utilisation du classement des variateurs de vitesse suivant les puissances normalisées des moteurs asynchrones. Ce classement existe pour des raisons pratiques et fournit un moyen très rapide de faire un choix. Remarquons cependant qu'il en résulte un dimensionnement peu précis.

CRITERES DE SELECTION

Une fois prise la décision de passer à la variation de vitesse, les éléments suivants nous permettront de nous orienter au travers des gammes de produits disponibles.

Caractéristique du variateur	Éléments influençant le choix de cette caractéristique et points particuliers à prendre en considération
1. Critères liés à l'application	
<ul style="list-style-type: none"> • La puissance 	<p>C'est une bonne connaissance de l'application qui permettra de la définir. Pour ce faire il faut connaître les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques de la charge (caractéristiques couple-vitesse) et caractéristiques du moteur. Nous avons discuté comment utiliser ces éléments afin de réaliser le dimensionnement. - Caractéristiques dynamiques nécessaires (couple, couple d'accélération, couple de décrochage, etc.). <p>La gamme de puissances disponibles sur le marché est très large, ce qui permet d'optimiser le dimensionnement.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Les fonctionnalités intégrées 	<p>Les spécificités de l'application permettront de définir les fonctionnalités nécessaires (démarrage progressif du moteur, avertissement haute fréquence, saut de fréquence, facilité de programmation, etc.). On tiendra notamment compte des problèmes de refroidissement du moteur à vitesse lente nécessitant la possibilité de programmer des fréquences minimales de fonctionnement.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Le type de commande 	<ul style="list-style-type: none"> - Les caractéristiques dynamiques de l'application, notamment les exigences au niveau de la réaction aux variations de vitesse et de sens. - La plage de régulation de vitesse exigée par l'application.
<ul style="list-style-type: none"> • Les temps de rampe 	<p>Les caractéristiques dynamiques exigées par l'application en terme de temps de rampe de montée et de descente. Les possibilités en terme de temps d'accélération et de décélération varient suivant les produits et se retrouvent sur les fiches techniques des constructeurs.</p>

Pour certaines applications spécifiques on évaluera également :

Caractéristique du variateur

Éléments influençant le choix de cette caractéristique et points particuliers à prendre en considération

2. La longueur de câble supportée entre le variateur et le moteur

La distance imposée, pour tout type de raison, entre le variateur et le moteur. La longueur de câblage entre le variateur de vitesse et le moteur est limitée car ils transportent les hautes fréquences générées par le variateur de vitesse. Les longueurs maximales utilisables suivant les puissances et le type de câble utilisés (câble faradisé) peuvent fortement varier suivant les constructeurs (pratiquement entre 3 et 150 m).

3. Critères liés aux harmoniques et aux interférences

- Inductance anti-harmonique (présence/absence, position)

Toujours conseillé. Dans la plupart des cas de faible puissance, la seule présence d'une inductance correctement dimensionnée sera suffisante. On regardera notamment la valeur du TPF qui sera idéalement le plus proche possible de l'unité. Pour des raisons de qualité du $\cos \varphi$ et de facilité d'installation, on préférera une solution avec inductance intégrée dans le circuit intermédiaire du variateur.

- Filtre RFI (présence/absence)

Toujours conseillé. Voir si un filtre RFI pour classe A ou B est livré en standard ou doit être acquis séparément.

4. Critères liés aux protections (opérateur - variateur - moteur)

- Protection contre les surintensités

Présence et caractéristiques électriques des protections de surcharge moteur et des protections contre les court-circuits en aval.

- Autres protections

Présence et efficacité des protections contre les creux de tension du réseau, contre les coupures de phase, contre la surchauffe des composants, etc.

5. Critères financiers

- Le coût d'acquisition

Les prix des variateurs de vitesse peuvent varier du simple au double pour une même puissance.

- Les options de base disponibles

Ces options peuvent fortement varier suivant les modèles et auront un impact important sur le coût final. Il s'agit typiquement des filtres harmoniques, des filtres RFI, etc. C'est sur ce point que se jouent généralement les grandes différences de prix observables.

6. Respect des normes et des réglementations

- Respect des normes

Voir les fiches techniques des fabricants

- Respect des réglementations particulières en vigueur dans le secteur d'activité

Voir les fiches techniques des fabricants

Les éléments ci-dessus seront à évaluer pour chaque cas particulier et ne sont que certains aspects que nous conseillons de regarder de près. Il existe un très grand nombre de paramètres qui caractérisent les variateurs de vitesse et qui pourront faire l'objet d'un critère pour telle ou telle application spécifique. Le choix d'un variateur de vitesse nécessite beaucoup d'expérience et il est souvent préférable avant d'effectuer son choix de visiter des installations de référence.

4.1 Ventilateur piloté : l'étranglement mécanique remplacé par la variation de vitesse

Les ventilateurs sont utilisés dans toute une série d'applications : ventilation des espaces intérieurs, conditionnement d'air, systèmes d'extraction d'air, apport en air frais, élimination des gaz rejetés dans les processus de productions, etc.

L'exemple décrit concerne un ventilateur de 7,5 kW utilisé pour l'extraction d'air dans une scierie. Nous comparons l'économie d'énergie réalisée entre une installation avec un régulateur de vitesse contrôlant le ventilateur pour obtenir le débit souhaité et l'installation utilisant le système classique d'étranglement mécanique.

Si l'on part d'un coût de l'énergie de 0,12 EUR / kWh, on constate que le système avec le ventilateur piloté permet une économie en énergie de 1008 EUR par an. Dans ce cas d'installation, le coût total de l'adaptation à la variation de vitesse est de 1000 EUR (incluant le variateur et le poste de contrôle). L'amortissement est donc assuré en un an.

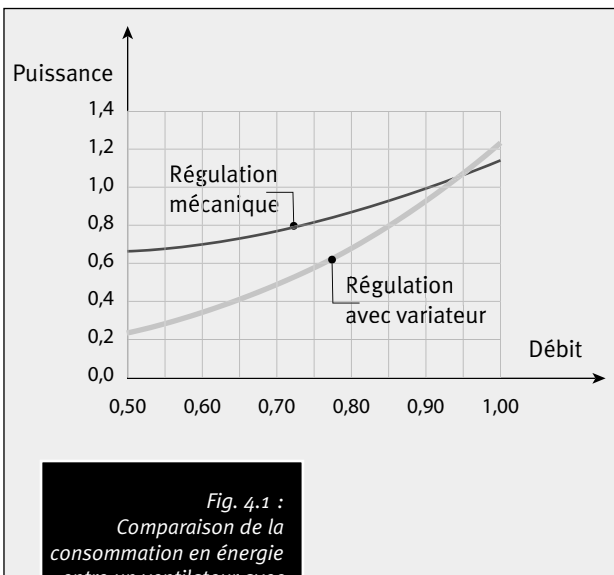


Fig. 4.1 :
Comparaison de la
consommation en énergie
entre un ventilateur avec
système mécanique
d'étranglement et
un ventilateur contrôlé par
un variateur de fréquence

- Economie d'énergie : 8.400 kWh par an
- Economie sur la consommation d'électricité : 1008 EUR par an
- Temps d'amortissement : 1 an

Temps annuel de fonctionnement	4.000 heures
Débit moyen	70 % de la valeur nominale
Consommation d'énergie avec étranglement	5,7 kW
Consommation d'énergie avec variateur de vitesse	3,6 kW
Coût de l'énergie	0,12 EUR / kWh
Economie d'énergie	8.400 kWh par an

4.2 Ascenseur : le contrôle de vitesse par pôles remplacé par le variateur de vitesse

Un ascenseur avec une charge maximale de 1000 kg, une distance de déplacement vertical de 17 mètres et 5 positions d'arrêts est habituellement contrôlé par un moteur à variation de pôle de 8,8 kW. La figure 4.2 présente une comparaison des consommations énergétiques pour les différentes alternatives envisageables.

Les résultats sont impressionnants. Comparé à la solution classique, un moteur de 6,3 kW alimenté par un variateur de vitesse, monté avec une unité de récupération d'énergie de freinage et une boîte de transmission à faible perte, donne une économie d'énergie allant jusqu'à 81 %. Avec un taux d'utilisation de 1.400 voyages par jour, l'investissement le plus conséquent est amorti en une période d'approximativement 18 mois.

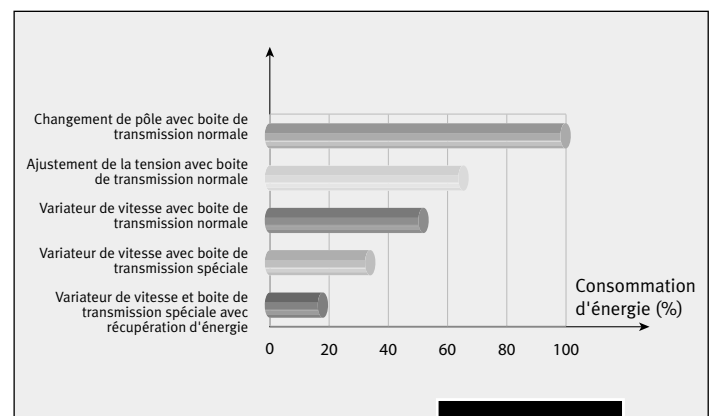


Fig. 4.2 :
Consommation
d'énergie de
l'ascenseur

- Economie d'énergie : 81 %
- Temps d'amortissement : 1,5 an

4.3 Pompe d'eau sale : l'étranglement mécanique remplacé par le contrôle de la vitesse

Pour une station de pompage extérieure, nous disposons des données suivantes. Le débit maximal d'eau sale à traiter est de 750 m³/h et le débit moyen d'eau sale à traiter est de 400 m³/h. La hauteur de pompage habituelle est de 12 m. La hauteur est de 18 m lorsque la quantité maximale d'eau sale est atteinte. La pompe fonctionne 8.000 h / an. L'installation a été dimensionnée pour pomper 900 m³/h, et pour ce faire on a besoin d'une puissance à la sortie du moteur de 70 kW. La puissance d'entrée du moteur est de 73 kW. Trois méthodes de régulation de la pompe en fonction du niveau d'eau sont comparées d'un point de vue de leur consommation énergétique. Dans ce cas, on considère que le débit moyen en eau sale est de 400 m³/h, que la pompe fonctionne 8.000 h/an et que le coût de l'électricité est de 0,12 EUR/kWh.

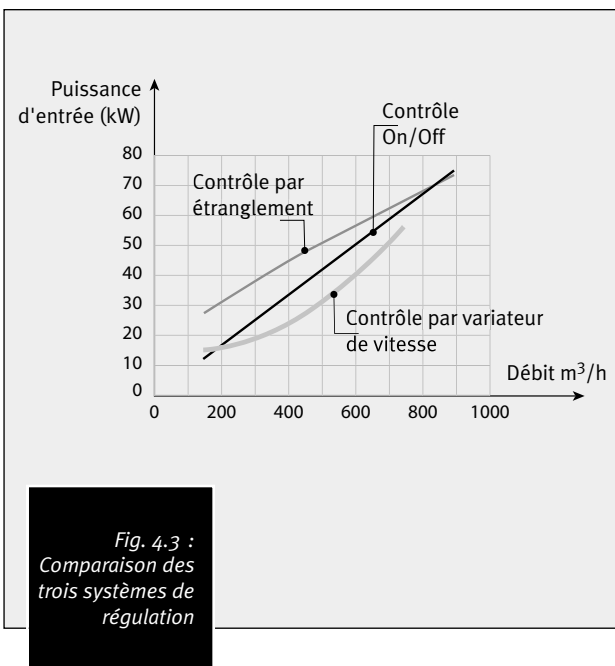


Fig. 4.3 :
Comparaison des
trois systèmes de
régulation

	Puissance moyenne d'entrée en kW
Contrôle par étranglement	44,4
Contrôle On / Off	32,4
Contrôle par variateur de vitesse	23,0

Le coût d'un variateur de vitesse avec son installation et son poste de contrôle est de 9.000 EUR. Cette installation est amortie en une demi-année par rapport à une installation initiale contrôlée par étranglement, et en deux ans par rapport à une installation initiale avec contrôle on/off.

	Economie d'énergie en kWh	Economie annuelle en EUR
Remplacement d'un contrôle On / Off par un contrôle par variation de vitesse	75.200	9024.-
Remplacement d'un contrôle par étranglement par un contrôle par variation de vitesse	172.000	20.640.-

- Economie d'énergie : 172.000 kWh par an
- Economie sur la consommation d'électricité : 20.640 EUR par an
- Temps d'amortissement : 0,5 an

4.4 Variateurs de vitesse associés à des tours de refroidissement

Comme nous l'avons vu précédemment, sur une tour de refroidissement, il est a priori possible de faire intervenir la variation de vitesse à deux niveaux différents. D'une part sur les ventilateurs de la tour proprement dite et d'autre part sur la pompe de circulation d'eau froide.

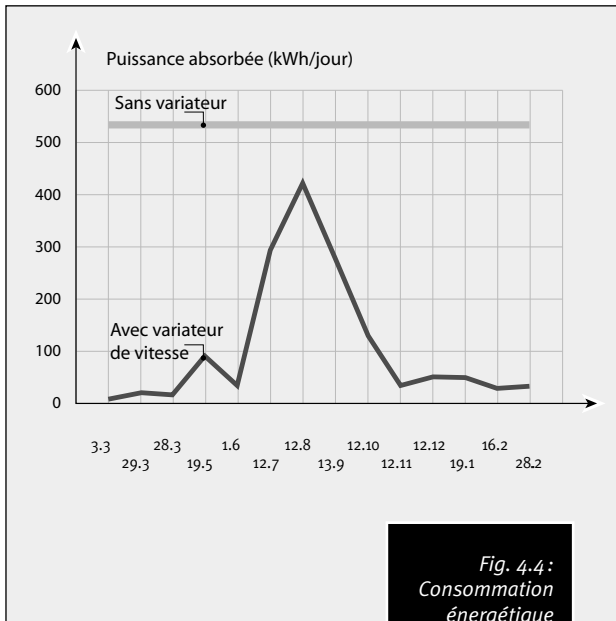
Nous avons vu que l'intervention sur ces deux plans mène à la solution la plus optimale en terme de rendement et donc de consommation énergétique.

Nous présentons ici un exemple chiffré dans le cas de ce double contrôle de vitesse.

Rappelons qu'avec la variation de vitesse, on peut faire varier la puissance de refroidissement en jouant sur la variation du débit. On maintient alors une différence de température, ΔT , constante et donc un rendement constant.

La figure 4.4 montre l'évolution de la puissance électrique de la tour de refroidissement au cours d'une année de fonctionnement.

- Investissement : 7.500 EUR
- Economie : 10.500 EUR par an
- Temps d'amortissement : 10,5 mois



*Fig. 4.4 :
Consommation
énergétique
de la tour de
refroidissement*

5.1 Introduction

Jusqu'ici nous avons présenté la technologie et certaines applications des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones. Cette technologie permet de faire varier en continu la vitesse de rotation des moteurs asynchrones en faisant varier la fréquence de la tension d'alimentation. Le but ici est d'exposer une technologie différente mais présentant le même type de fonctionnalités que celles offertes par l'association d'un variateur de fréquence et d'un moteur asynchrone.

Ce chapitre a donc pour but d'ouvrir les perspectives sur d'autres possibilités technologiques permettant d'obtenir un contrôle de vitesse sur une application.

Il faut d'emblée avoir à l'esprit que la technologie présentée est une solution de contrôle de vitesse intégrant l'ensemble comprenant un module de contrôle, un moteur et application. Par exemple ici, un groupe de ventilation. Cette technologie se différencie fondamentalement de celle des variateurs de fréquence présentée ci-dessus. En effet, les variateurs de vitesse présentés précédemment ne constituent que le maillon 'module de contrôle' de la chaîne 'module de contrôle - moteur - application' et peuvent donc être utilisés dans une très large gamme d'applications. En pratique, toute application utilisant un moteur asynchrone.

En ce sens, la technologie décrite ici n'est pas en tant que telle une alternative au variateur de fréquence.

Nous verrons cependant à quel point ces technologies sont comparables et nous en discuterons les avantages, limitations et inconvénients.

5.2 Technologie

- Le ventilateur est équipé d'un moteur DC brushless à aimants permanents, dont la commutation est contrôlée électroniquement. Il intègre une électronique de puissance assurant la conversion AC-DC.
- Le ventilateur comprend également une électronique de contrôle permettant le pilotage du moteur et le contrôle de son point de fonctionnement à partir de signaux de contrôle. C'est la raison pour laquelle on parle de système intégré 'module de contrôle - moteur - application'.
- Le système ainsi obtenu permet tout type de régulation de vitesse du ventilateur. En fonction de sondes externes

(température, pression, CO₂, etc.) ou sans sonde externe lorsqu'il s'agit de maintenir une pression ou un débit constant à sa sortie.

- L'ensemble de ces modes de fonctionnement sont rendus possibles grâce à une modélisation complète du comportement du ventilateur, insérée dans le module de contrôle. La modélisation est basée sur la construction de modèles aérauliques qui permettent de faire une liaison directe entre le point de fonctionnement du moteur et les caractéristiques physiques de fonctionnement de l'application de ventilation.

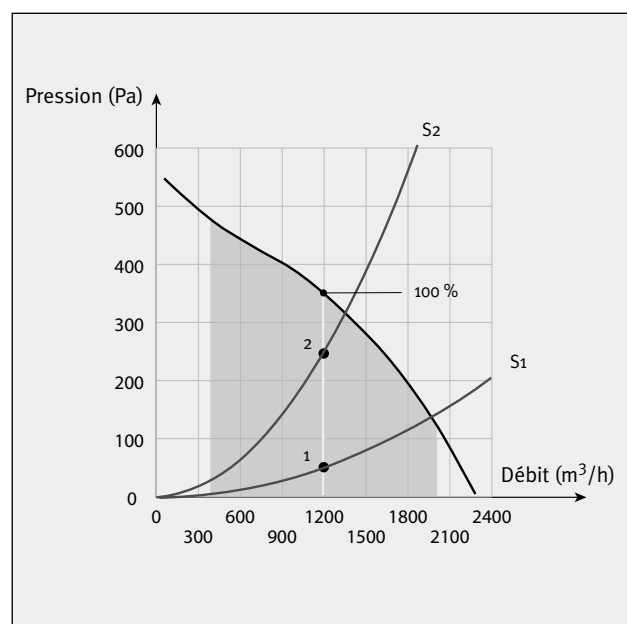
5.3 Illustrations de modes de fonctionnement de la technologie

5.3.1 Fonctionnement à débit constant (sans capteur externe)

Réaction d'un ventilateur programmé en débit constant suite à un changement de pression.

Le ventilateur passe du point 1 au point 2 suite à une augmentation des pertes de charge de S1 vers S2 (fermeture de volets).

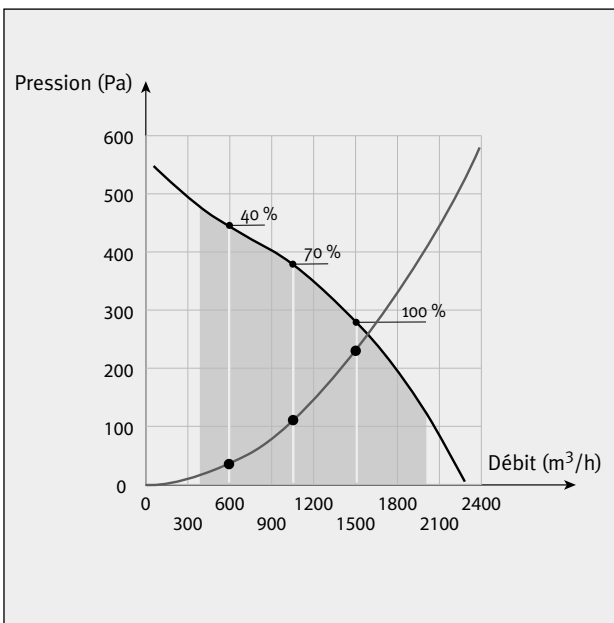
Il adapte donc son point de fonctionnement pour maintenir les 1200 m³/h demandés, alors que la perte de charge est passée de 50 Pa à 240 Pa.



Réaction d'un ventilateur programmé en débit constant suite à un changement de demande de débit.

Le ventilateur passera de 1500 m³/h à 1050 m³/h puis à 600 m³/h indépendamment de la perte de charge, en fonction d'un horaire, par exemple.

Il adapte donc son point de fonctionnement pour obtenir le débit demandé, quel qu'il soit (dans les limites mécaniques du ventilateur, bien sûr).



5.3.2 Fonctionnement en fonction d'une consigne de température

Réaction d'un ventilateur programmé pour réaliser un lien entre une température mesurée par sonde 0/10V et un débit, et ce indépendamment de la perte de charge.

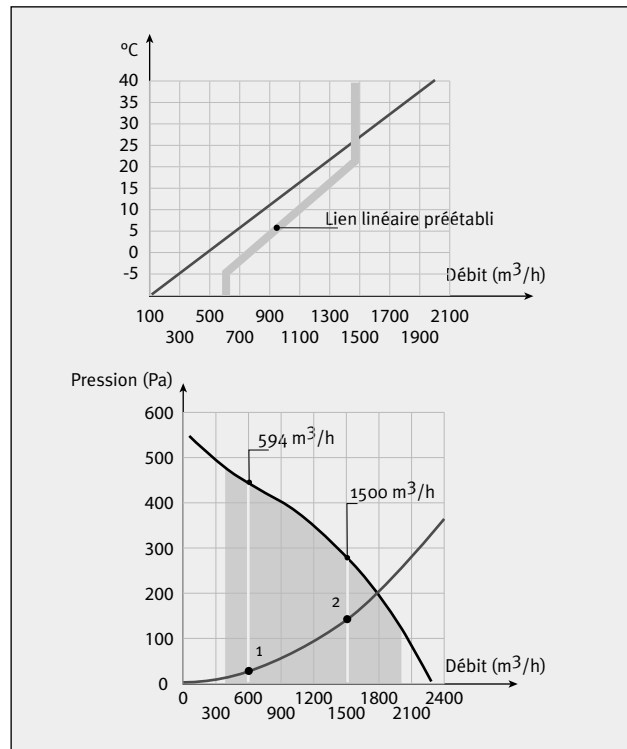
Le lien configuré entre la température et le débit est illustré par le graphique repris ci-après :

Pour une T° de -5°C, le débit doit être de 600 m³/h.

Pour une T° de +22°C le débit doit être de 1500 m³/h.

Le ventilateur passera du point 1 au point 2, selon le lien linéaire préétabli, suite à un changement progressif de température de -5°C à +30°C.

Il adapte donc son point de fonctionnement pour satisfaire la relation linéaire entre température et débit d'air, indépendamment de la perte de charge.



5.4 Avantages et inconvénients de la technologie

La technologie exposée dans ce chapitre est caractérisée par une intégration du module de contrôle du moteur et de l'application. De cette caractéristique découle des avantages et des limitations.

Avantages

- Facile à installer et à configurer.
- Interface de contrôle simple.
- L'association module de commande et moteur est optimisée pour un rendement toujours maximal.

Limitation

- Ne constitue pas une alternative aux variateurs de vitesse mais une alternative pour le contrôle de vitesse des applications de ventilation.
- Pas de possibilité d'adaptation d'une installation déjà en place, nécessité du remplacement complet du ventilateur.

Avantages généraux

- Le principe de la technologie permet, dans beaucoup d'applications, le contrôle du ventilateur sans nécessité de sonde additionnelle.
- Le moteur commandé est un moteur à courant continu. Il n'y a donc pas de pont onduleur générant des hautes fréquences avec tout ce que cela entraîne comme désagréments : courant d'harmoniques, interférences, etc.

CONCLUSION

Les variateurs de vitesse s'adaptent sur toutes les applications utilisant des moteurs asynchrones. Leur utilisation se justifie essentiellement lorsque l'application présente un profil de charge variable comme dans le cas des systèmes d'air à volume constant ou variable, dans les systèmes de contrôle de débit ou de pression, ...

L'avantage principal de ce système est l'importante économie d'énergie réalisable. Il est courant d'obtenir des économies d'énergie de 30 à 50 % avec des temps de retour de moins de deux ans. Cet intérêt est souvent combiné à l'amélioration de la qualité du processus commandé.

Le principe de base des variateurs de vitesse est relativement simple. Cependant derrière ce principe simple se cache une technologie poussée faisant intervenir des composants électroniques de puissance ainsi que des circuits de commande de plus en plus complexes.

C'est pourquoi la configuration d'une installation équipée d'un variateur de vitesse n'est pas une opération simple. Il est important de bien s'informer et de recourir à des installateurs compétents.

Chaque cas demande une analyse et un paramétrage particulier qui conditionneront l'économie réalisée.

Le choix du variateur, lui-même, demande une grande attention. Il dépendra notamment de l'application à commander. Il faudra définir les fonctionnalités de commande souhaitées et être attentif à limiter les effets néfastes des variateurs sur le réseau électrique : qualité des filtres, position du variateur, qualité du câblage, ...

Il ne faut pas que par un mauvais choix ou un mauvais paramétrage, l'intérêt de la variation de vitesse sur les moteurs soit remise en cause et le principe abandonné en cours de l'exploitation.

BIBLIOGRAPHIE

- Réf. 1 – **«Les techniques de commande du moteur asynchrone»**, Intersections, Groupe Schneider, juin 1998.
- Réf. 2 – **«Saving Energy with Electrical Drives»**, Fachverband Elektrische Antriebe (Division Electric Drive Systems) in the ZVEI, août 1999.
- Réf. 3 – **«Ventilateurs centrifuges intelligents à haut rendement»**, P. Lemmens Air Movement Company.
- Réf. 4 – **«VLT 6000 HVAC Application Booklet»**, Danfoss.
- Réf. 5 – **«L'essentiel sur les variateurs de vitesse»**, Danfoss Drives A/S, 1999, 1ère édition.
- Réf. 6 – **«Régulation de vitesse et moteurs à haut rendement»**, Electrabel, août 1999.
- Réf. 7 – J. Schonek, Y. Nebon, **«Protections BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence)»**, Cahier technique n° 204, Collection Technique, Schneider Electric, mai 2002.
- Réf. 8 – Ph. Ferraci, **«La qualité de l'énergie électrique»**, Cahier technique n°199, Collection Technique, Schneider Electric, février 2001.
- Réf. 9 – Philippe Marique, **«L'adaptation des pompes et des ventilateurs aux besoins – Variation de vitesse»**, Fascicule Technique, Ministère de la Région Wallonne, DGTRE - Service de l'Energie, 1997.

Réalisation : Institut Wallon asbl
Boulevard Frère Orban, 4
5000 Namur

en collaboration avec le bureau NAVITAS

Pour le compte de :

Ministère de la Région wallonne
Direction Générale des Technologies,
de la Recherche et de l'Énergie (DGTRE)
Avenue prince de Liège, 15
5100 Jambes

Mars 2003

