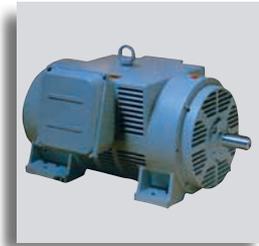


Force motrice électrique de puissance

Guide de solutions



- solutions basse et moyenne tension
- puissances supérieures à 100 kW
- moteurs asynchrones à cage



Merlin Gerin
Square D
Telemecanique

Guide de solutions

Présentation	2 - 3
Panorama des solutions	4 - 5
Force motrice électrique Le moteur asynchrone Solutions basse et moyenne tension	6 - 7
Ingénierie de la force motrice électrique Les modes de démarrage Les applications et charges mécaniques Exemples	8 - 19
Les process Les fonctions du process Process discontinus et continus Transitique Utilités	20 - 25
Communication et dialogue homme-machine	26 - 27
Dimensionnement et mise en œuvre Exemples	28 - 31
Annexes techniques Caractéristiques du moteur asynchrone Bibliographie	33 - 35



*Ce guide a été préparé par Gérard Geneviève, expert en moteurs et en variation de vitesse électronique.
Il est actuellement Responsable du Centre de Compétences Transports de Schneider Electric.*



La force motrice électrique dans l'industrie et les infrastructures

Dans l'industrie, le tertiaire et les infrastructures, la force motrice électrique est largement utilisée.

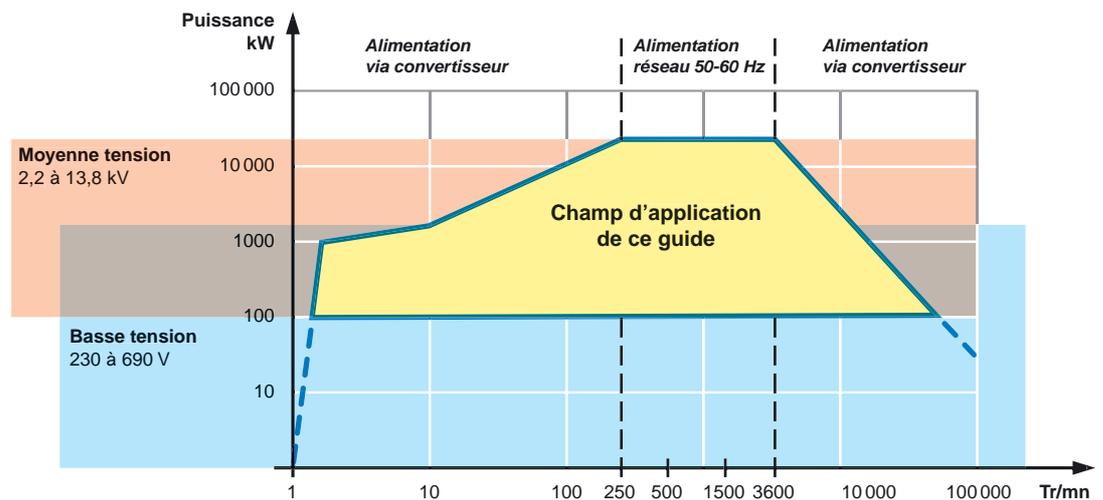
Les types de moteurs et d'entraînement sont variés et les puissances des machines tournantes s'échelonnent de quelques kW à plusieurs milliers de kW.

Le but de ce **Guide de solutions** est de présenter les solutions de basse et moyenne tension Schneider Electric destinées aux entraînements usuels, en se limitant aux **puissances supérieures à 100 kW** et aux **moteurs asynchrones à cage**.

Objectifs du document

Ce guide a pour objectifs :

- d'apporter les connaissances minimales permettant d'orienter le choix d'une solution d'entraînement,
- de positionner les différentes solutions,
- d'orienter vers la solution la plus appropriée.



Champ d'application

Le diagramme ci-dessus montre, dans un repère puissance/vitesse/tension, le champ d'application de ce guide. Il sera traité en particulier :

- des applications et des charges mécaniques,
- des différents modes de démarrages : direct, sous tension réduite, par variateur de vitesse
- des équipements mis en œuvre dans chaque solution :
 - le moteur électrique,
 - les équipements électromécaniques et électroniques de démarrage ou de contrôle.

Schneider Electric fournit des produits et équipements et est en mesure au cas par cas, de proposer aux concepteurs, bureaux d'études, ingénieries une solution globale qui intègre l'ensemble des équipements, études et services. Cette solution va du point de raccordement au réseau jusqu'à l'accouplement sur l'arbre machine.

Une expertise pour relier le monde électrique au monde mécanique

Une solution globale d'entraînement résulte de la prise en compte :

- des critères mécaniques en termes de couple, vitesse, répétitivité des cycles, temps de démarrage, etc.,
- des caractéristiques du réseau électrique : tension, fréquence, puissance de court-circuit,
- des contraintes environnementales : encombrement, température, humidité, normes, ...

La solution technique doit être conforme au fonctionnement et aux performances requis par la machine entraînée, avec un raccordement au réseau non perturbant, et doit satisfaire les objectifs économiques en termes d'investissement, de coûts d'exploitation et de maintenance.



Motorpact
Tableau MCC MT



Trihal
Transformateur sec enrobé



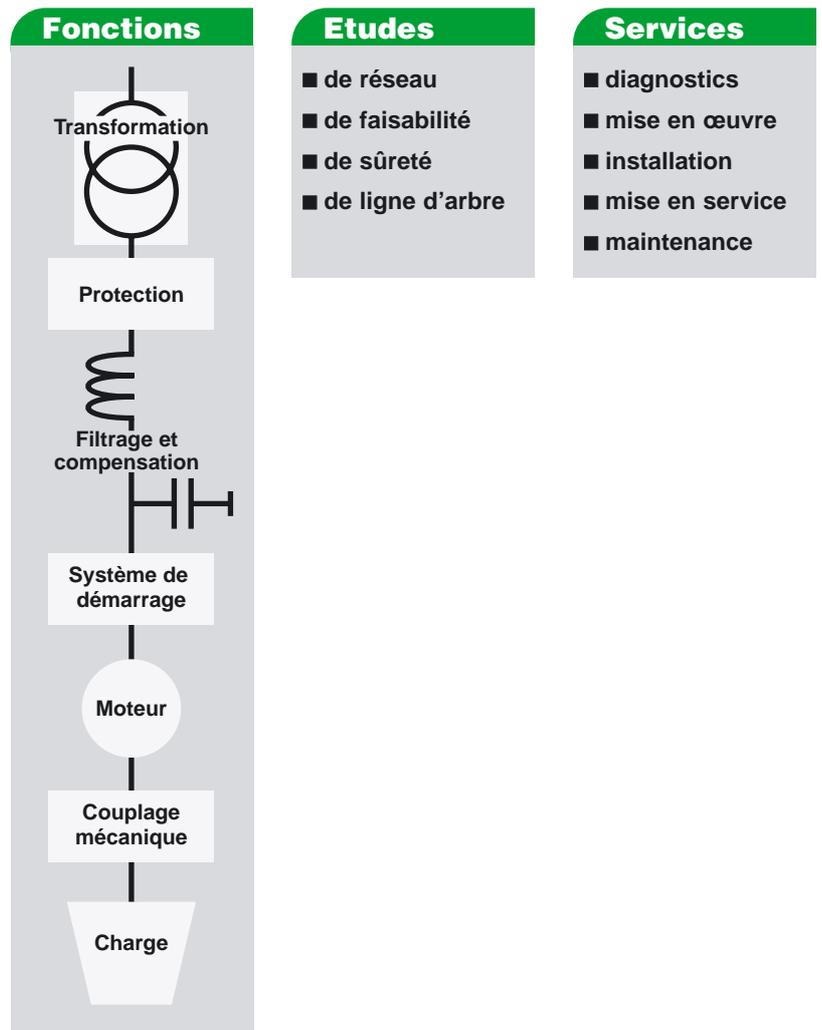
Okken
Tableau PCC/MCC BT



Varplus
Batterie de condensateurs



ATV 68
Variateur de vitesse en armoire



Départs moteurs Directs

Basse tension

Moyenne tension

Sectionnement et protection contre les courts-circuits



GS1



ou Compact NS

Commande



LC1 F ou V



ou CV1, CV3, LC1 B



Motorpact FVNR



SM6 ou MCset contacteur

Relais de protection



LR9 F



LT6



TesySU



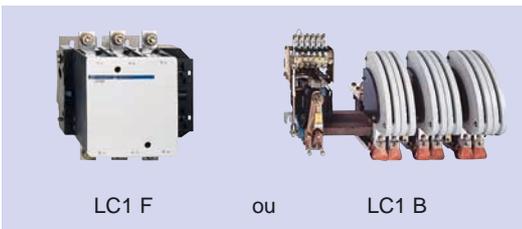
Sepam

U _e max	400 - 690 V		3,3 - 7,2 kV	3,3 - 12 kV
P max	900 kW ⁽¹⁾		4000 kW	2350 kW
Mesure	–	■	■	■
Communication	–	Modbus	Modbus	Modbus
Dialogue homme-machine				
■ exploitation	■	■	■	■
■ diagnostic	–	–	■	■
■ historique	–	–	■	■
■ perturbographie	–	–	■	■

(1) P limitée à 800 kW en cas d'association disjoncteur-contacteur avec coordination. Lorsque la fréquence de commande est faible, on peut utiliser un seul appareil pour le sectionnement, la protection et la commande : disjoncteur Compact NS250 à NS800, équipé d'un relais électronique Micrologic.

Départs moteurs Progressifs

Etoile - Triangle



Soft starter BT



Soft starter MT



Autotransfo. MT



400 - 690 V 900 kW ⁽¹⁾		400 - 690 V 1200 kW ⁽²⁾	3,3 - 7,2 kV 4000 kW	3,3-7,2kV 4000 kW	2,3-12kV 2200 kW
-	■	■	■	■	■
-	Modbus	Modbus	Modbus	Modbus	Modbus
■	■	■	■	■	■
-	-	■	■	■	■
-	-	■	■	■	■
-	-	-	-	■	■

(2) P limitée à 950 kW en cas d'association disjoncteur-contacteur avec coordination.

Départs moteurs avec **variation de vitesse**

Basse tension



ATV 38/68/71/78

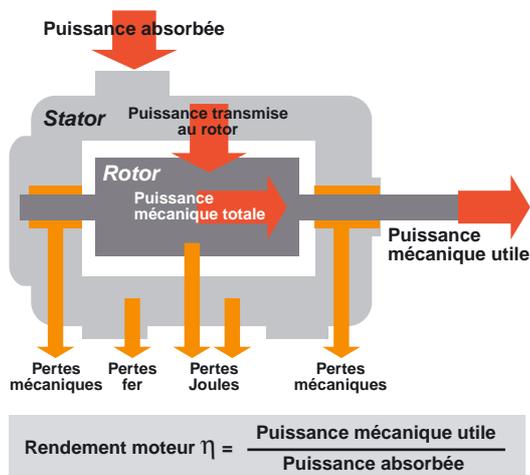
400 - 690 V

1500 kW



Modbus/Ethernet





Le moteur asynchrone est constitué d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie tournante). C'est une machine à induction, c'est-à-dire que les courants du rotor sont induits par le flux tournant généré au stator.

Il se présente sous deux technologies :

■ **le moteur asynchrone dit à cage d'écureuil**

Dans ce type de moteur, les enroulements du rotor sont, par construction, en court-circuit. Les courants rotoriques ne sont que des courants induits.

■ **le moteur asynchrone à rotor bobiné**

Dans ce type de moteur, les enroulements du rotor sont accessibles sur des bagues. Les courants induits dans le rotor peuvent être ajustés à l'aide de résistances variables placées à l'extérieur du moteur.

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est le plus largement utilisé et sera le seul pris en compte dans ce document.

Le moteur asynchrone à cage

Dans ce type de moteur, la puissance absorbée au stator se transforme en :

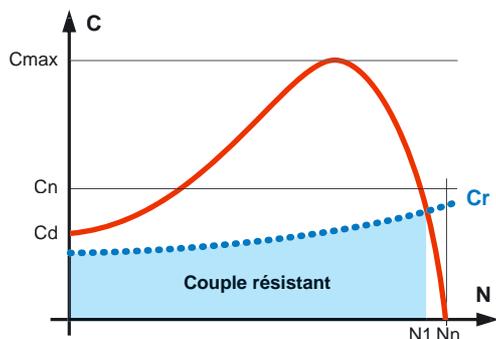
- une puissance transmise au rotor qui va servir à fournir la puissance mécanique utile
- une puissance dissipée sous forme de pertes liées à la construction du moteur et à son mode d'utilisation :
 - pertes Joules,
 - pertes fer,
 - pertes mécaniques,
 - pertes dues à la ventilation.

Le **rendement** du moteur est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance absorbée.

De plus, l'énergie absorbée au stator se décompose en :

- énergie active qui sert à produire le couple (courant actif),
- énergie réactive qui sert à magnétiser le rotor (courant réactif).

L'angle de déphasage entre le courant actif et le courant réactif définit le **facteur de puissance** du moteur ($\cos \Phi$).



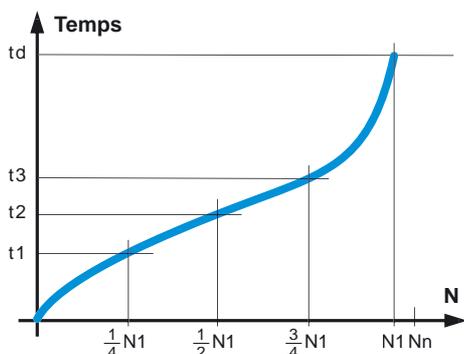
Courbes de fonctionnement du moteur asynchrone

La caractéristique de couple d'un moteur asynchrone repose sur 3 valeurs intrinsèques :

- le couple de démarrage Cd,
- le couple maximal Cmax,
- le couple nominal Cn.

Pendant la phase de démarrage, le couple évolue comme le montre la courbe ci-contre. La mécanique entraînée présente un couple résistant et une des conditions de sa mise en mouvement est fixée par la condition : $C_{\text{moteur}} > C_{\text{résistant}}$

La différence entre le couple moteur et le couple résistant est le couple d'accélération.



Caractéristiques du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est caractérisé par :

- des paramètres électriques,
- des paramètres mécaniques,
- des paramètres thermiques.

La connaissance de ces paramètres permet de dimensionner et de choisir le moteur dans chaque recherche de solution d'entraînement.

Voir en annexe 1 la liste de ces paramètres.

Solutions basse et moyenne tension

Au-dessus de 100 kW, on trouve aussi bien des moteurs BT que des moteurs MT. La puissance des moteurs basse tension est limitée par la valeur du courant qui devient importante lorsque la puissance augmente : dimensionnement du moteur, de l'appareillage, des câbles, etc.

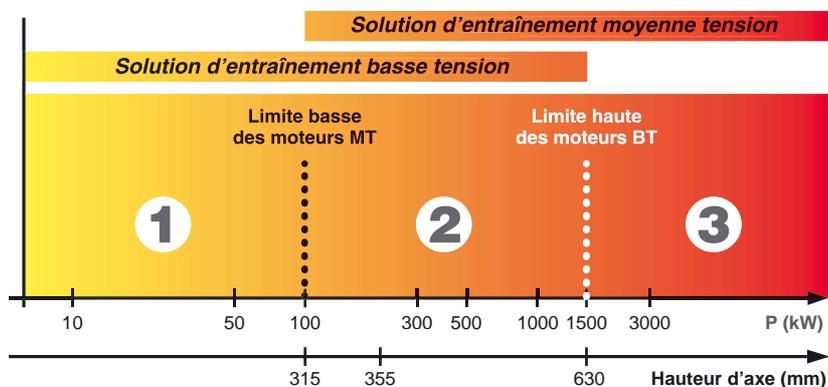
Exemple : un moteur de 1500 kW sous 690 V appelle, en régime établi, environ 1500 A.

Les moteurs basse tension

Les moteurs BT sont monophasés (pour les petites puissances) ou triphasés et sont alimentés sous des tensions qui s'échelonnent de 220 à 690 V. Jusqu'à 355 mm de hauteur d'axe, ce qui représente environ 200 kW pour un moteur 2 pôles et 300 kW pour un moteur 4 pôles, ces moteurs sont classés par gammes standard d'un point de vue électrique et mécanique.

Les moteurs moyenne tension

Les moteurs MT sont généralement triphasés. Ils sont alimentés sous des tensions qui s'échelonnent de 2,2 kV à 13,8 kV. Il n'y a pas véritablement de standard, chaque constructeur proposant ses gammes de moteurs.



P < 100 kW

Pour des puissances inférieures à 100 kW, seuls les moteurs BT existent :

- 95 % du parc mondial des moteurs,
- gammes de moteurs standard.

Ces puissances ne rentrent pas dans le champ d'application de ce guide.

100 kW < P < 1500 kW

C'est la zone de recouvrement des solutions BT et MT. D'une manière générale, plus la puissance mise en jeu est importante, plus la solution MT présente des avantages.

P > 1500 kW

Pour des puissances supérieures à 1500 kW, seuls les moteurs MT existent :

- tensions : de 2,2 kV à 13,8 kV,
- gammes de moteurs non standard.

Critères de choix entre solution BT et solution MT

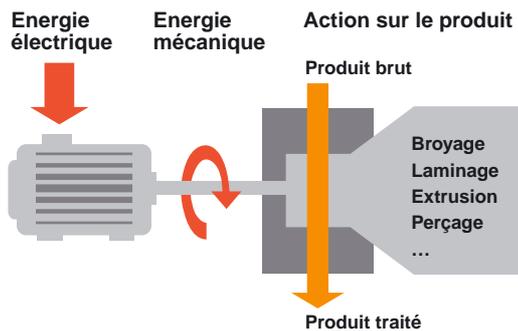
Le choix entre solution BT et solution MT dépend :

- des zones géographiques (habitudes, normes) ; dans les zones d'influence IEC, la tendance est d'aller le plus haut possible en BT, alors que dans les zones d'influence NEMA, la tendance est d'aller le plus bas possible en MT,
- des habitudes propres à un secteur (pétrole, chimie, etc.),
- de la présence de personnel qualifié ou habilité,
- de la mise en œuvre d'équipements de contrôle :
- disponibilité de la solution en BT et/ou MT,
- coût de la solution.

Le choix entre solution BT et solution MT résulte de la prise en compte de nombreux autres critères explicités dans la suite de ce guide.

Ingénierie de la force motrice électrique

Le choix d'un moteur électrique et de son système de démarrage doit intégrer les contraintes imposées par les différents phénomènes et conduit à une solution technique conforme aux régimes de fonctionnement et aux performances requises par la mécanique entraînée. Ce choix satisfait les objectifs économiques en termes d'investissement, de coûts d'exploitation et de maintenance.



Pour construire et dimensionner une solution globale d'entraînement, il faut prendre en compte les aspects ayant un impact sur le choix.

Le réseau électrique

Le choix des composants utilisés doit prendre en compte les caractéristiques du réseau électrique :

- tension, fréquence,
- puissance de court-circuit,
- taux d'harmoniques préexistant,
- niveau de perturbation (creux de tension, microcoupures, foudre, ...).

Le mode de démarrage

Le mode de démarrage du moteur a un impact sur :

- le courant de démarrage,
- le couple disponible durant la phase de démarrage,
- la répétitivité des démarrages dans le temps,
- le temps de démarrage.

Le mode de démarrage doit prendre en compte :

- le niveau de sollicitation thermique acceptable par le moteur,
- le niveau de sollicitation mécanique acceptable par le moteur, le système d'accouplement et la charge entraînée.

L'application et la charge mécanique

L'application : broyage, laminage, ventilation..., est l'action sur le produit à traiter (voir schéma ci-contre).

Les contraintes mécaniques de la charge se traduisent par des réactions sur le moteur et donc sur le réseau d'alimentation, par exemple :

- la variation de couple de la charge entraîne une variation du courant moteur,
- l'inertie du moteur et l'inertie de la charge influent sur le temps de démarrage,
- la vitesse de rotation de la charge peut nécessiter une adaptation de la vitesse du moteur,
- ...

Les contraintes liées au procédé

L'application concernée est souvent incluse dans un procédé global.

Les procédés sont caractérisés par des critères de performance :

- rapidité d'exécution,
- répétitivité des cycles,
- précision.

Satisfaire ces critères est dimensionnant pour le moteur et son système d'entraînement.

Les contraintes liées à l'environnement

Enfin, il est nécessaire de connaître les contraintes d'environnement :

- température ambiante,
- poussières,
- nature de l'atmosphère (gaz explosifs...),
- altitude,
- hygrométrie,
- vibrations et chocs, ...

Les modes de démarrage

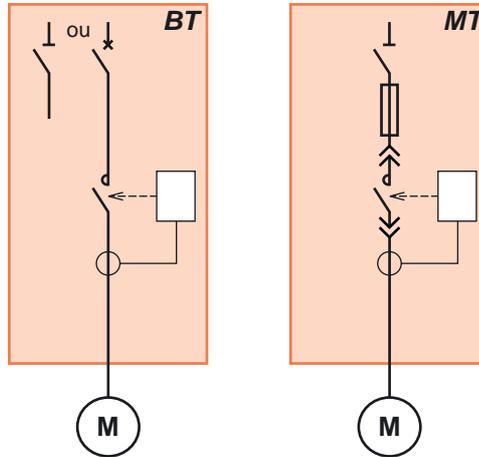
Démarrage direct

Le mode de démarrage le plus simple et le plus économique si :

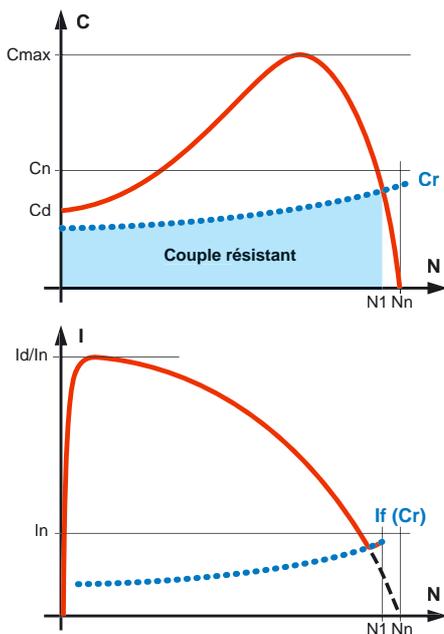
- la charge admet un couple de démarrage important,
- le réseau permet un courant de démarrage pouvant aller jusqu'à 10 fois le courant nominal.

Il est plus adapté pour le démarrage :

- de moteurs de faible puissance,
- de machines de faible inertie.



Spécificités



Réseau électrique

Courant de démarrage	5 à 10 x In
Creux de tension	Important (fonction de la Pcc réseau)
Perturbation harmonique	Importante pendant le démarrage, nulle en régime établi
Facteur de puissance	Faible pendant le démarrage
Maîtrise de la consommation électrique	Non

Moteur

Nombre de démarrages successifs	Limité
Couple disponible	Maximum (démarrage brutal)
Sollicitation thermique	Très importante (rotor)
Calibrage des protections	Suivant données constructeur
Autres	

Charge mécanique

Sollicitation des accouplements	Très importante
Types de charges adaptées	Charge à faible inertie
Vitesses critiques	Pas d'incidence
Couples pulsatoires	Pas d'incidence
Démarrages de fortes inerties	Dimensionnement spécial du moteur

Procédé

Contrôle de la vitesse	Non
Performances	Fonctionnement en tout ou rien
Fiabilité/Disponibilité	Elevée
Maintenabilité	Bonne
Dialogue homme-machine	Exploitation simple. Possibilité d'IHM numérique et réseau de communication

Les modes de démarrage

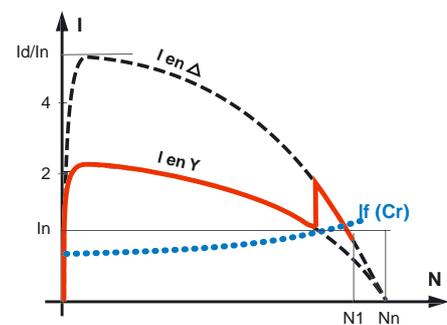
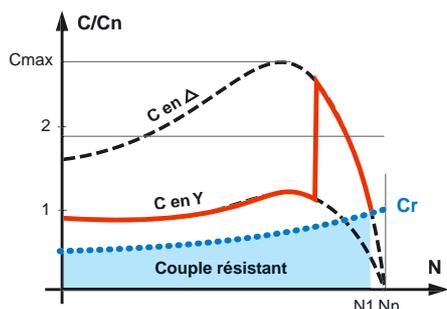
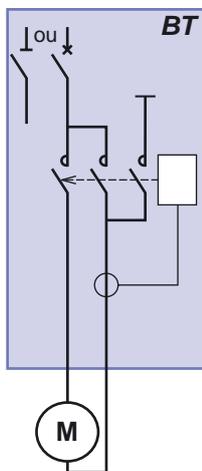
Démarrage étoile-triangle

Un mode de démarrage simple et économique si :

- la charge admet un couple au démarrage = 1/3 du couple nominal,
- le réseau supporte la surintensité au changement de couplage.

Il est particulièrement adapté :

- au démarrage de moteurs de faible puissance en BT < 150 kW,
- aux charges présentant de faibles inerties et dont la caractéristique de couple est de type quadratique (exemple : pompes centrifuges).



Spécificités

Réseau électrique

Courant de démarrage	2 à 3 x I_n
Creux de tension	Important au changement de couplage
Perturbation harmonique	Importante pendant le démarrage, nulle en régime établi
Facteur de puissance	Dégradé pendant le démarrage
Maîtrise de la consommation électrique	Non

Moteur

Nombre de démarrages successifs	2 à 3 fois plus important qu'en direct
Couple disponible	Divisé par 3 pendant le démarrage
Sollicitation thermique	Moins importante qu'en direct
Calibrage des protections	Suivant données constructeur
Autres	

Charge mécanique

Sollicitation des accouplements	Moins importante qu'en direct
Types de charges adaptées	Pompes, ventilateurs, compresseurs
Vitesses critiques	Sans incidence
Couples pulsatoires	Sans incidence
Démarrages de fortes inerties	Non

Procédé

Contrôle de la vitesse	Non
Performances	Fonctionnement tout ou rien
Fiabilité/Disponibilité	Bonne
Maintenabilité	Bonne
Dialogue homme-machine	Exploitation simple. Possibilité d'IHM numérique et réseau de communication

Les modes de démarrage

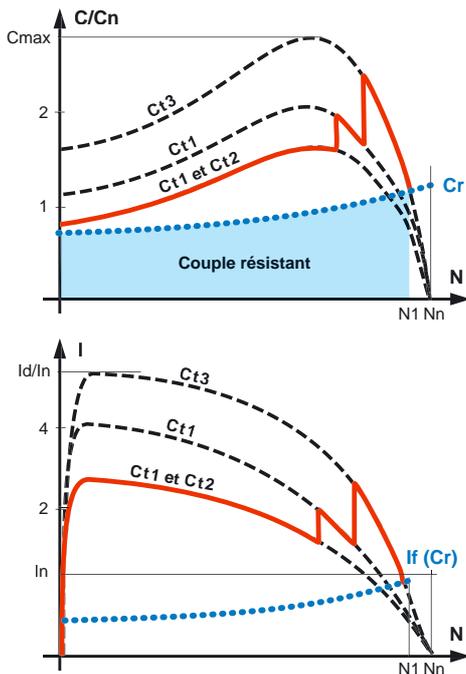
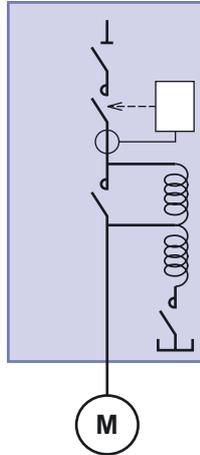
Démarrage par autotransformateur

Un mode de démarrage utilisé plus particulièrement :

- en BT pour des puissances > 150 kW,
- en MT.

Il est plus adapté :

- pour le démarrage de moteurs de forte puissance,
- pour les mécaniques présentant de faibles inerties et dont la caractéristique de couple supporte la dégradation du couple moteur dans un rapport allant de 0,4 à 0,85 du C_d moteur.



Spécificités

Réseau électrique

Courant de démarrage	= $k \times I_d$ (k = rapport de transformation)
Creux de tension	Faible
Perturbation harmonique	Faible
Facteur de puissance	Dégradé pendant le transitoire
Maîtrise de la consommation électrique	Non

Moteur

Nombre de démarrages successifs	2 à 3 fois plus important qu'en direct
Couple disponible	$k^2 \times C_d$ (0,4 à 0,85 x C_d)
Sollicitation thermique	Plus faible qu'en direct
Calibrage des protections	Suivant données constructeur
Autres	

Charge mécanique

Sollicitation des accouplements	Moins importante qu'en direct
Types de charges adaptées	Suivant inertie et courbe de couple
Vitesses critiques	Pas d'incidence
Couples pulsatoires	Pas d'incidence
Démarrages de fortes inerties	Non

Procédé

Contrôle de la vitesse	Non
Performances	Fonctionnement tout ou rien
Fiabilité/Disponibilité	Bonne
Maintenabilité	Bonne
Dialogue homme-machine	Relais protection et contrôle numérique, avec IHM et réseau de communication

Les modes de démarrage

Démarrage par soft starter

Un mode de démarrage performant qui permet un démarrage et un arrêt en douceur.

Il peut être utilisé :

■ en limitation de courant :

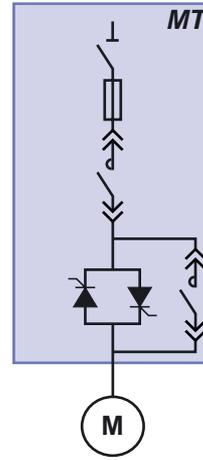
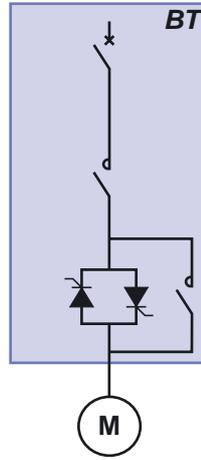
le courant est fixé à une valeur de 3 à 4 x I_n pendant la phase de démarrage, le couple de démarrage étant réduit.

Ce mode est particulièrement adapté aux "turbomachines" (pompes centrifuges, ventilateurs,...)

■ en régulation de couple :

les performances en couple sont optimisées.

Ce mode est plus particulièrement adapté aux pompes centrifuges et aux machines à couple constant, ou ayant un fort couple résistant au démarrage.



Spécificités

Réseau électrique

Courant de démarrage	Dépend du mode de contrôle
Creux de tension	Réduit
Perturbation harmonique	Importante pendant le démarrage
Facteur de puissance	Dégradé pendant le démarrage
Maîtrise de la consommation électrique	Non

Moteur

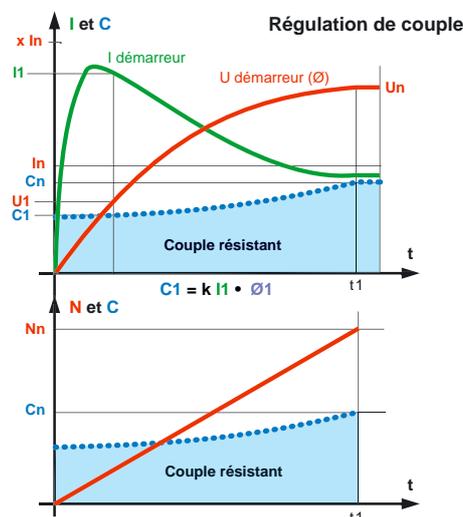
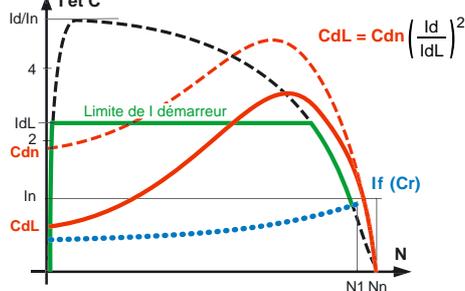
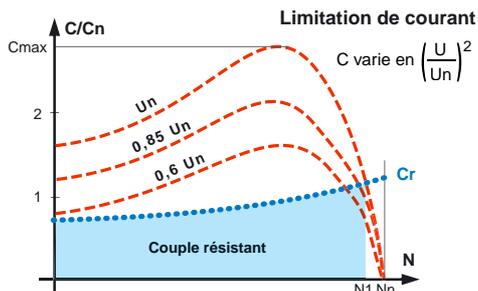
Nombre de démarrages successifs	Considérablement augmenté
Couple disponible	Dépend du mode de contrôle et du niveau de limitation de courant
Sollicitation thermique	Réduite
Calibrage des protections	Suivant données constructeur
Autres	

Charge mécanique

Sollicitation des accouplements	Réduite
Types de charges adaptées	Dépend du mode de contrôle
Vitesses critiques	Sans incidence
Couples pulsatoires	Sans incidence
Démarrages de fortes inerties	Oui en régulation de couple

Procédé

Contrôle de la vitesse	Non
Performances	Très bonnes
Fiabilité/Disponibilité	Bonne
Maintenabilité	Très bonne - outils de diagnostic et de mesure intégrés
Dialogue homme-machine	IHM numérique et réseau de communication



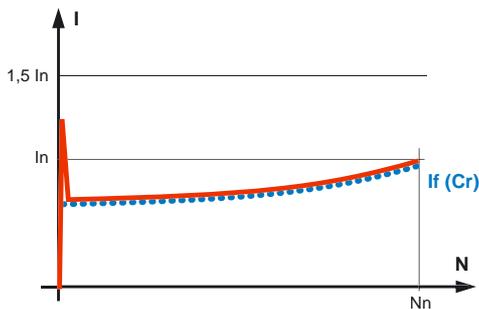
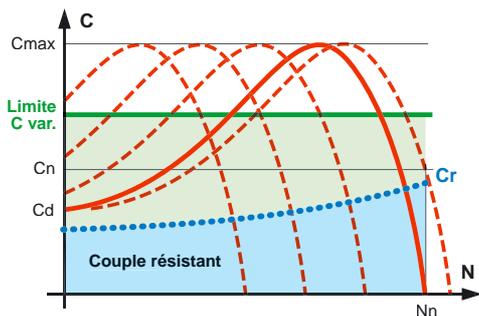
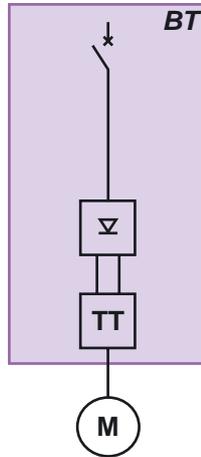
Les modes de démarrage

Variation de vitesse par convertisseur de fréquence

Un mode de démarrage performant utilisé dès qu'il est nécessaire de contrôler la vitesse. Il permet entre autres :

- de démarrer des charges de forte inertie,
- de démarrer des charges importantes sur un réseau de faible pouvoir de court-circuit,
- d'optimiser la consommation d'énergie électrique en fonction de la vitesse sur les turbomachines.

Utilisable sur tous types de machines.



Spécificités

Réseau électrique

Courant de démarrage	Limité suivant la charge (1,5 In)
Creux de tension	Fortement limité
Perturbation harmonique	Nécessite un dispositif de filtrage
Facteur de puissance	> 0,95 sur toute la plage de vitesses
Maîtrise de la consommation électrique	Oui

Moteur

Nombre de démarrages successifs	Non limité
Couple disponible	Ajustable jusqu'à 1,5 à 2 Cn
Sollicitation thermique	Fortement limitée
Calibrage des protections	Suivant données constructeur
Autres	Distance moteur-convertisseur < 50 m

Charge mécanique

Sollicitation des accouplements	Fortement limitée
Types de charges adaptées	Toutes
Vitesses critiques	Peuvent être occultées
Couples pulsatoires	Nécessite une étude de ligne d'arbre pour les très fortes puissances
Démarrages de fortes inerties	Oui

Procédé

Contrôle de la vitesse	Oui
Performances	Elevées – dépendent du mode de régulation
Fiabilité/Disponibilité	Bonne (peuvent être améliorées par des systèmes redondants)
Maintenabilité	Très bonne – outils de diagnostic et de mesure intégrés
Dialogue homme-machine	IHM numérique et réseau de communication

Les applications et charges mécaniques

Pour déterminer la solution d'entraînement, il faut :

- identifier les paramètres mécaniques,
- identifier les performances attendues,
- caractériser la chaîne de transfert mécanique.

Les paramètres mécaniques

L'inertie

Elle est d'autant plus importante que la masse de la charge est grande et s'oppose à la mise en mouvement. Elle est caractérisée par le **moment d'inertie J** , qui s'exprime en kg/m^2 .

Le couple

Il définit l'effort que la charge mécanique oppose au maintien de sa mise en mouvement. Il s'exprime en Newton mètre (Nm). Chaque type de mécanique peut être classé suivant sa caractéristique couple/vitesse (voir courbes page suivante) :

- couple constant,
- couple linéaire,
- couple quadratique...

Le couple de décollage et les couples transitoires sont des paramètres à identifier pour le dimensionnement correct de l'entraînement.

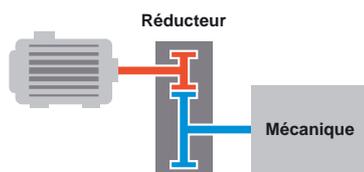
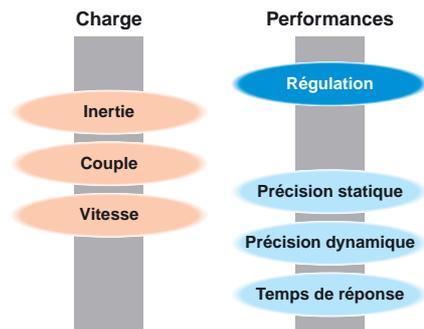
La vitesse

C'est la qualification du mouvement d'une charge présentant une certaine inertie et soumis à un couple. Pour les moteurs électriques, elle s'exprime en tours par minute (Tr/mn).

Les performances attendues

Ce sont généralement les contraintes de l'application et du procédé qui fixent les performances de l'entraînement. Elles concernent les deux paramètres couple et vitesse de la charge et se caractérisent par les notions de :

- précision statique : écart entre la valeur attendue par le procédé et la valeur réelle de ces paramètres en régime établi.
- précision dynamique : écart entre la valeur attendue par le procédé et la valeur réelle de ces paramètres en régime transitoire.
- temps de réponse : temps mis par l'entraînement pour stabiliser ces paramètres en régime établi suite à un régime transitoire.



La chaîne de transfert mécanique

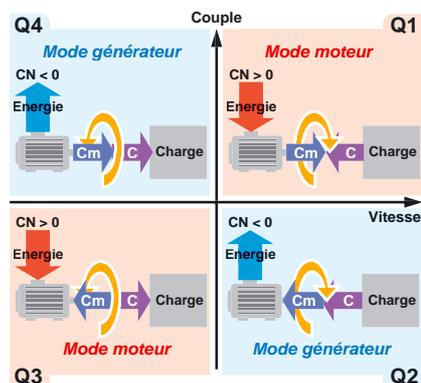
Le couplage de l'arbre moteur à la mécanique entraînée peut être :

- direct,
- via un réducteur ou un multiplicateur de vitesse :
 - poulie - courroie,
 - engrenage - chaîne,
 - coupleur...

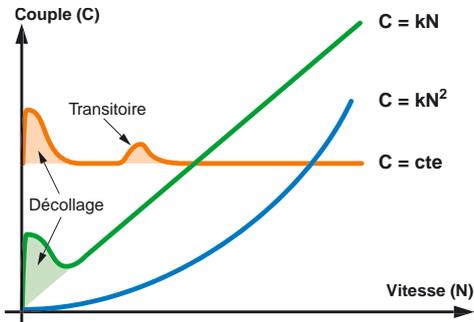
Cette chaîne de transfert a une incidence sur le transfert d'inertie et de couple entre la charge et le moteur. D'autre part, elle pénalise le rendement global de l'entraînement.

La notion de quadrants

Cette notion permet d'identifier le mode de fonctionnement de la charge. Elle est représentée dans le repère couple-vitesse du schéma ci-contre. Elle permet, entre autres, de différencier les charges résistantes (qui s'opposent au mouvement) et les charges entraînant (qui favorisent le mouvement). Le fonctionnement dans les 4 quadrants est requis pour les applications avec récupération d'énergie.



Les applications et charges mécaniques



Le tableau ci-dessous donne un aperçu des différentes machines concernées par ce document. Il n'y apparaît que les machines équipées de moteurs susceptibles d'avoir une puissance de plus de 100 kW.

Les pompes centrifuges, ventilateur et compresseurs centrifuges (turbomachines) représentent **plus de 70 % des applications**.

Légende :

- loi du couple : voir courbes ci-contre.
- plage de vitesse indiquée : rapport moyen entre la vitesse minimum et la vitesse maximum (cas d'utilisation de variation de vitesse).
- colonnes Q1 à Q4 : fonctionnement dans le repère des quadrants.
- colonnes BT et MT : indication de la faisabilité dans l'une ou l'autre des gammes de tension : basse tension ou moyenne tension.

Types de machines	Secteurs d'activité	Loi C/N	Plages de vitesses	Puissances en kW	Q1	Q2	Q3	Q4	BT	MT
Convoyeurs	Ciment - Carrières - Agroalimentaire	C	1 à 10	0,37 à 500	■			■	■	
Rotatives	Imprimerie	C	1 à 10	10 à > 200	■	■			■	
Pompes volumétriques et doseuses	Chimie - Pharmacie - Agroalimentaire	C	1 à 10	0,37 à 200	■				■	
Pompes centrifuges	Eau - Chimie - Agroalimentaire	kN ²	1 à 5	0,37 à 5000	■				■	■
Pompes diphasiques	Pétrole - Gaz	kN ²	1 à 5	200 à 2000	■				■	■
Ventilateurs	HVAC - Fours - Infrastructures	kN ²	1 à 5	0,1 à 1500	■	■			■	■
Soufflantes	Bancs d'essais	kN ²	1 à 10	2,2 à 50 000	■	■			■	■
Compresseurs	Gaz - Pétrochimie	kN ²	1 à 10	2,2 à 50 000	■	■			■	■
Fours	Ciment	C	1 à 10	100 à 1500	■	■			■	■
Extrudeuses	Pétrochimie - Plastique - Agroalimentaire	C-P	1 à 10	10 à 2500	■				■	■
Presses mécaniques	Mécanique - Automobile	C	1 à 10	50 à 700	■	■			■	
Enrouleuses - Dérouleuses	Métallurgie - Papier	C-P	1 à 20	3 à 300	■	■	■	■	■	
Pulpeurs	Papier	C	1 à 10	500 à 2000	■				■	■
Machines sectionnelles	Métallurgie - Papier	C	1 à 10	10 à 700	■	■	■	■	■	
Bancs d'essais	Automobile - Aéronautique	C-P	1 à 100	10 à 500	■	■	■	■	■	
Broyeurs	Ciment - Carrières - Agroalimentaire	C	1 à 10	10 à 1000	■				■	■
Mélangeurs	Chimie - Pharmacie - Agroalimentaire	kN	1 à 5	30 à 300	■				■	
Malaxeurs - Calandreuses	Chimie - Caoutchouc	C-P	1 à 10	< 1000	■				■	
Centrifugeuses	Chimie - Pharmacie	kN ²	1 à 10	10 à 200	■	■			■	
Machines de lavage	Bâtiments - Infrastructures	C	1 à 100	10 à 500	■	■	■	■	■	

C = Couple constant
 kN² = Couple quadratique
 C-P = Couple constant et puissance constante
 kN = Couple linéaire

Les applications et charges mécaniques

Exemple : pompe centrifuge



Gamme de puissance	De 0,37 à 5000 kW
Gamme de tension	BT ou MT suivant la puissance
Gamme de vitesse	De 1 à 10
Type de démarrage	
Direct	Acceptable (coup de bélier possible)
A tension réduite	Possible
Soft starter	Bonne solution
Variateur de vitesse	Bonne solution

Spécificités de la pompe centrifuge

Dans une pompe centrifuge :

- le débit est proportionnel à la vitesse,
- la pression est proportionnelle au carré de la vitesse,
- la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse.

Caractéristiques mécaniques

Couple/Vitesse

Les pompes centrifuges présentent une caractéristique spécifique : le couple résistant varie comme le carré de la vitesse de rotation (couple quadratique). Ce qui veut dire qu'à la vitesse nominale N_n , le couple résistant est égal au couple nominal C_n , et à $N_n/2$, $C_r = C_n/4$.

Le couple résistant de la pompe s'oppose en permanence au couple moteur. De plus, le sens de rotation d'une pompe centrifuge ne peut être inversé. Ainsi, le fonctionnement d'une telle machine s'effectue dans le quadrant Q1.

Inertie

L'inertie d'une pompe centrifuge peut être considérée comme faible et n'a que peu d'incidence sur le temps de démarrage.

Mode de fonctionnement

"Tout ou rien"

La plupart des pompes centrifuges fonctionnent en permanence à vitesse constante et sont démarrées et arrêtées à intervalles réguliers.

"Régulation de flux"

La régulation de pression ou de débit d'une pompe peut s'effectuer de deux manières :

- traditionnellement par des systèmes mécaniques comme les vannes motorisées ou les dispositifs de by-pass. Ces systèmes sont dits "à perte de charge".

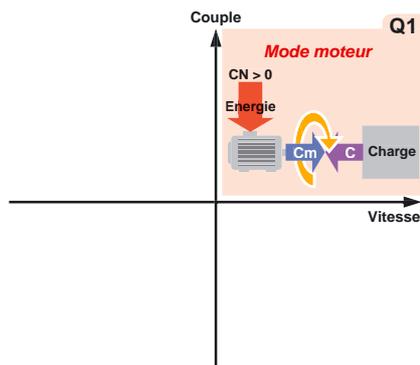
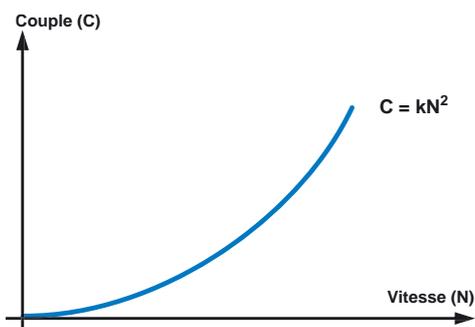
La vanne motorisée permet de réduire la section de la conduite de la pleine ouverture à un niveau de fermeture acceptable par la pompe.

- une des caractéristiques intrinsèques des pompes étant que le débit est proportionnel à la vitesse de rotation, le contrôle du débit ou de la pression peut aussi être effectué en faisant varier la vitesse de la pompe.

Incidence sur la solution d'entraînement

Le choix du moteur est directement lié à la puissance consommée par la pompe à son point nominal de fonctionnement (débit – pression) pour une courbe de charge réseau donnée. Généralement, cette puissance est fixée par le constructeur de la pompe.

Le mode de démarrage et son dimensionnement sont fixés par le type de réseau où la pompe fonctionne (adduction, surpression, distribution...) et en particulier par les performances requises sur la régulation de pression ou de débit.



Les applications et charges mécaniques

Exemple : ventilateur



Gamme de puissance	De 0,1 à 50 000 kW
Gamme de tension	BT ou MT suivant la puissance
Gamme de vitesse	De 1 à 10
Type de démarrage	
Direct	Acceptable (stress mécanique possible)
A tension réduite	Difficile si inertie importante
Soft starter	Bonne solution
Variateur de vitesse	Bonne solution

Spécificités du ventilateur centrifuge ou hélicoïdal

Dans un ventilateur centrifuge ou hélicoïdal :

- le débit est proportionnel à la vitesse,
- la pression est proportionnelle au carré de la vitesse,
- la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse.

Caractéristiques mécaniques

Couple/Vitesse

Ces ventilateurs présentent une caractéristique spécifique : le couple résistant varie comme le carré de la vitesse de rotation. Ce qui veut dire que, à la vitesse nominale N_n , le couple résistant est égal au couple nominal C_n et à $N_n/2$, $C_r = C_n/4$.

Le couple résistant du ventilateur s'oppose au couple moteur pendant les phases d'accélération. De par son inertie, le ventilateur "entraîne" le moteur pendant les phases de ralentissement. Le sens de rotation d'un ventilateur ne s'inverse que rarement. Ainsi, le fonctionnement d'une telle machine s'effectue généralement dans les quadrants Q1 et Q2.

Inertie

En fonction du débit pour lesquels ils sont conçus, certains ventilateurs et en particulier les hélicoïdaux présentent de très importants moments d'inertie. Ce paramètre a une incidence sur le temps d'accélération de la machine en fonction de la puissance mise en jeu.

Mode de fonctionnement

"Tout ou rien"

La plupart des ventilateurs fonctionnent en permanence à vitesse constante et sont démarrés et arrêtés à intervalles réguliers.

"Régulation de flux"

La régulation de débit d'un ventilateur peut s'effectuer de deux manières :

- traditionnellement par des systèmes mécaniques comme les ventelles ou les inclineurs. Ces systèmes sont dits "à perte de charge".

Les ventelles permettent de réduire la section de la gaine d'air de la pleine ouverture à un niveau de fermeture acceptable par le ventilateur.

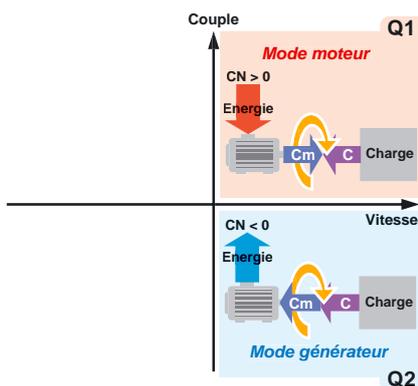
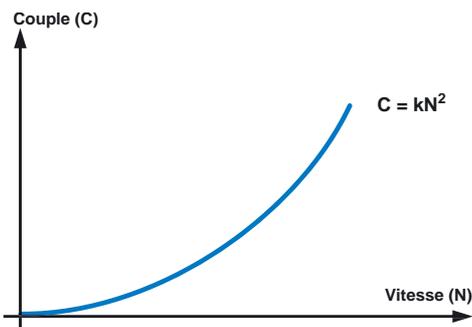
- une des caractéristiques intrinsèques des ventilateurs étant que le débit est proportionnel à la vitesse de rotation, le contrôle du débit peut être effectué en faisant varier la vitesse du ventilateur.

Incidence sur la solution d'entraînement

Le choix du moteur est directement lié à la puissance consommée par le ventilateur à son point nominal de fonctionnement (débit – pression) pour une courbe de charge donnée. Généralement, cette puissance est fixée par le constructeur du ventilateur. Le dimensionnement du moteur devra tenir compte de l'inertie du rotor et de celle du ventilateur : le rapport J_r/J_v doit être supérieur à 1.

Le mode de démarrage et son dimensionnement sont fixés par le type de réseau où le ventilateur fonctionne (extraction, injection, circulation...) et en particulier par les performances requises sur la régulation de pression ou de débit.

Certaines applications doivent supporter de fortes variations de température du fluide, ce qui entraîne des variations de charge non négligeables.



Les applications et charges mécaniques

Exemple : broyeur



Gamme de puissance	De 50 à 10000 kW
Gamme de tension	BT ou MT suivant la puissance
Gamme de vitesse	De 1 à 10
Type de démarrage	
Direct	Acceptable (stress mécanique important)
A tension réduite	Non
Soft starter	Possible
Variateur de vitesse	Bonne solution

Spécificités du broyeur

Il existe différents types de broyeurs :

- broyeur à lames, à couteaux,
- broyeur à rouleaux, à marteaux, ...

Ils sont généralement intégrés dans une ligne de fabrication, que ce soit en cimenterie ou en agroalimentaire. Ils ont pour fonction de produire un matériau défini généralement par des critères de granulométrie à partir d'un matériau brut.

Caractéristiques mécaniques

Couple/Vitesse

Tous les broyeurs présentent une caractéristique spécifique : le couple résistant est constant quelle que soit la vitesse de rotation. Le couple résistant du broyeur s'oppose au couple moteur pendant les phases d'accélération et de ralentissement. Le sens de rotation ne s'inverse quasiment jamais.

Ainsi, le fonctionnement d'une telle machine s'effectue dans le quadrant Q1.

Une particularité du couple réside dans la phase de démarrage, notamment lorsque le broyeur démarre en charge (après une coupure de réseau par exemple).

Ce couple de décollage peut atteindre 1,5 à 2 fois le couple nominal. D'autre part, des couples transitoires importants peuvent apparaître en cours de fonctionnement.

Inertie

En fonction du type de broyeur, l'inertie sera à considérer, en particulier avec les broyeurs à marteaux.

Mode de fonctionnement

« Tout ou rien »

Dans les carrières, les mines, l'agroalimentaire, les broyeurs fonctionnent généralement à vitesse constante. Vu les couples importants mis en jeu, la mécanique doit être robuste et dotée de systèmes électriques et mécaniques de protection.

« Régulation de flux »

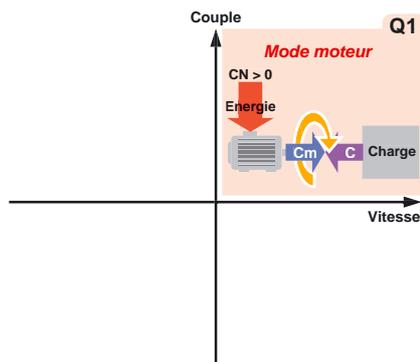
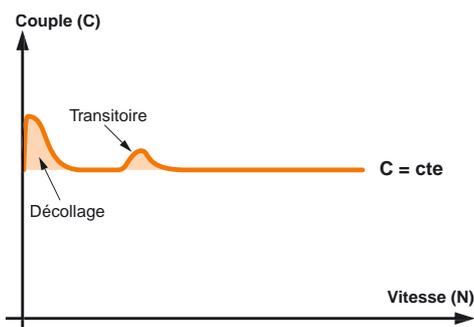
La régulation en vitesse du broyeur permet de s'adapter au débit du système de chargement et de déchargement. De plus, en jouant sur la vitesse, l'utilisateur agit directement sur le taux de granulométrie du produit fabriqué.

Incidence sur la solution d'entraînement

Le moteur et son système de démarrage doivent particulièrement tenir compte des couples de décollage et transitoire qui peuvent être très importants.

Ceci conduit généralement à un surdimensionnement en puissance de l'entraînement.

La variation de vitesse, grâce à un couple disponible au démarrage plus important, permet un bon compromis entre démarrage en charge et surdimensionnement.



Les applications et charges mécaniques

Exemple : machine de levage



Gamme de puissance	De 50 à 1000 kW
Gamme de tension	BT
Gamme de vitesse	De 1 à 100
Type de démarrage (conditionné par les performance requises)	
Direct	Possible
A tension réduite	Possible
Soft starter	Bonne solution
Variateur de vitesse	Bonne solution

Spécificités des machines de levage

Ces machines se présentent sous de nombreux types :

- treuils, grues, ponts roulants, portiques...
- ascenseurs, monte-charges...

Elles ont la fonction de déplacer des charges d'un niveau 1 à un niveau 2.

Elles sont assujetties à des normes de sécurité strictes, de plus en plus contraignantes quand l'on passe du déplacement de matériaux au déplacement de personnes.

Caractéristiques mécaniques

Couple/Vitesse

Les machines de levage présentent une caractéristique spécifique : le couple résistant est constant quelle que soit la vitesse de rotation. A la montée, le couple résistant s'oppose au couple moteur. A la descente, le sens de rotation s'inverse et la charge tend à entraîner le moteur qui, pour maintenir une vitesse de descente constante, doit retenir la charge. Le moteur devient générateur.

Les machines de levage travaillent dans les 4 quadrants Q1, Q2, Q3 et Q4 suivant les phases de travail.

Inertie

En fonction du type de levage à traiter, l'inertie sera à considérer (diamètre du tambour d'enroulement). Cependant, il est fréquent qu'un réducteur mécanique de vitesse soit monté entre le moteur et ce tambour, ce qui a pour effet de réduire l'inertie (elle est alors divisée par le carré du rapport de réduction).

Mode de fonctionnement

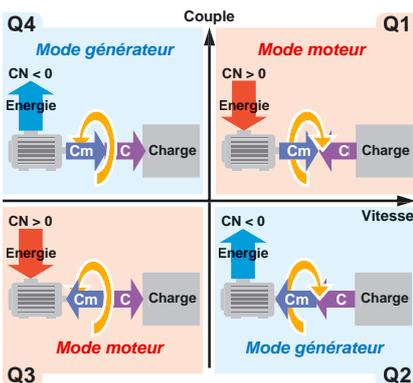
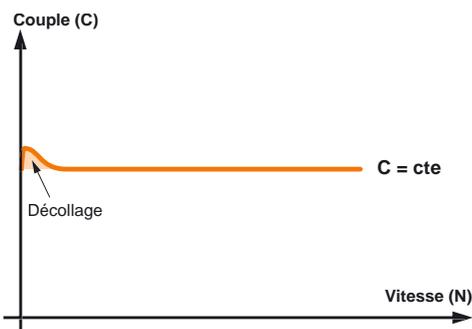
La grande diversité de ces machines fait que l'on retrouve tous les modes de fonctionnement :

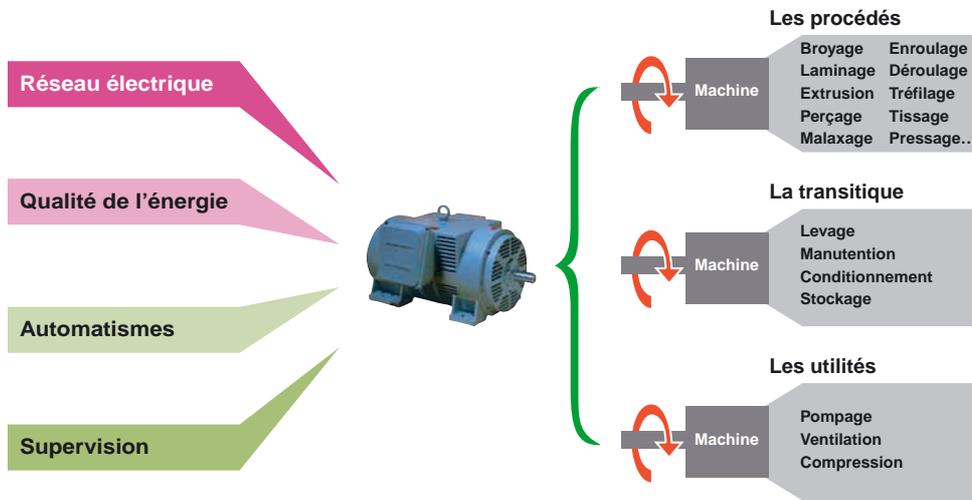
- pour un simple treuil, le fonctionnement se fera en tout ou rien,
- pour un monte-charge utilisé dans un "magasin automatique", on fera appel à une fonction de positionnement,
- pour la commande d'un pont de chargement de containers on fera appel à des fonctions sophistiquées de régulation : positionnement, indexage, antiballant...

Incidence sur la solution d'entraînement

Le dimensionnement en puissance de l'entraînement est étroitement lié aux caractéristiques mécaniques décrites ci-dessus. Le surdimensionnement est la conséquence des marges de sécurité imposées par les normes.

Le choix du mode de démarrage est conditionné par les performances imposées par l'application.





Les process

Qu'ils soient liés à la transitique, aux utilités, ou aux procédés, les process mettent en œuvre une ou plusieurs machines standard ou spécifiques effectuant des opérations identifiées et enchaînées suivant un scénario prédéfini.

Le **procédé** est constitué par la fonction de base, par exemple : le broyage, le mélange, le levage, le pompage ; d'une manière générale, c'est la mise en mouvement d'une pièce mécanique qui transforme l'énergie qu'elle reçoit en une action bien précise sur le produit traité. Cette action est maîtrisée en intensité et dans le temps par la **conduite de process**.

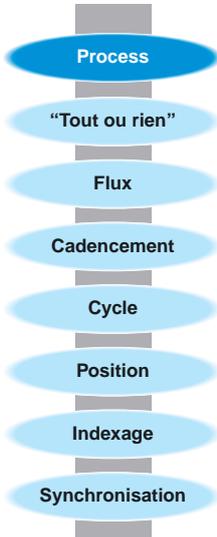
Pour assurer des opérations plus complexes, des fonctions auxiliaires sont mises en œuvre. Ces fonctions ont généralement un rôle d'optimisation de la fonction de base et sont activées suivant les différents cycles d'exploitation. Elles rendent ainsi le procédé plus flexible et plus performant.

Exemple : dans la production de granulés de polyéthylène, la fonction principale est constituée par le procédé d'extrusion.

Les fonctions auxiliaires nécessaires sont le gavage (chargement du matériau) et la granulation (découpe du produit fini en sortie de filière). L'enchaînement chargement – extrusion – granulation, représente le process de fabrication.

La conduite du process est gérée par un **système d'automatisme et de supervision**. La disponibilité et la productivité du process, en particulier dans les process continus, sont indissociables de la qualité du réseau électrique d'alimentation : microcoupures, coupures brèves, variation de tension, déséquilibre de phase... Les entraînements intégrés dans ces process devront supporter, dans des limites fixées, ces événements transitoires. Dans certains cas de non-qualité du réseau, la conduite du process pourra opter pour des marches dégradées ou des arrêts sécurisés.

Caractérisation du process



Caractériser le process

Suivant leur complexité, les différents process font appel à des modes de fonctionnement précis. Qu'il s'agisse de contrôler des opérations en tout ou rien, en flux, en cadencement, en cycle, en positionnement, en indexage ou en synchronisation, il correspond à chaque fois une solution d'automatisme de commande.

L'entraînement mis en œuvre pour chaque opération doit répondre aux critères de performance de cette opération.

La variation électronique de vitesse dans les process

A l'exception du contrôle en tout ou rien, dès que l'on aborde les process plus sophistiqués, la variation électronique de vitesse devient incontournable.

Elle apporte, par ses performances, la souplesse, la précision, la flexibilité et la répétitivité nécessaire au process dans lequel elle est mise en œuvre.

L'utilisation de la variation de vitesse est dite **structurelle** lorsqu'elle est liée aux performances de la machine. C'est le cas dans les process de fabrication comme les **chaînes d'embouteillage, d'usinage, d'assemblage** et des **lignes sectionnelles** (ex. papier, carton, industrie métallurgique).

Dans les applications de **transitique**, outre pour ses performances, la variation de vitesse est utilisée pour des fonctions de sécurité.

Lorsque les applications de **pompage** ou de **ventilation** deviennent des process à part entière, la variation de vitesse se justifie pleinement.

Les avantages de la variation électronique de vitesse

C'est la solution la plus sophistiquée et la plus performante pour les systèmes de démarrage et de contrôle du moteur électrique.

Pour les moteurs asynchrones à cage, le convertisseur de fréquence s'est imposé comme la meilleure solution. Aujourd'hui, grâce aux technologies de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques numériques, ces équipements répondent aux contraintes des applications les plus pointues.

La variation électronique de vitesse est une solution technique mature, avec un retour d'expérience sur un très large domaine d'applications (références), et qui permet :

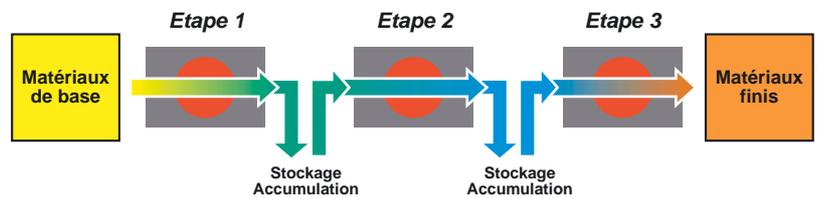
- une fiabilité et une disponibilité élevées,
- une souplesse d'exploitation et une grande adaptabilité,
- l'intégration naturelle aux automatismes existants (interface numérique),
- un dialogue homme-machine très développé :
- outil de paramétrage et autoréglages intégrés,
- outil de diagnostic intégré,
- une maintenance aisée à coût réduit.

Solutions généralement mises en œuvre		
Démarrage moteur	Basse tension	Moyenne tension
Direct (D.O.L)		
Etoile-triangle		
Autotransformateur		
Soft starter		
Variateur de vitesse	Solutions	



Process discontinus

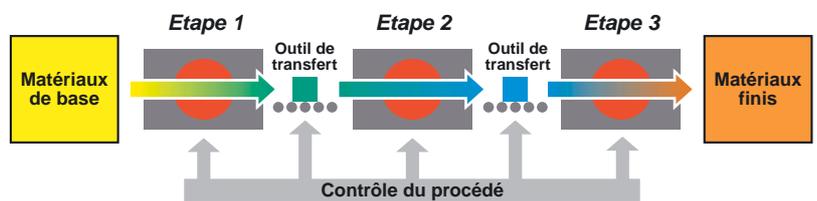
Comme leur nom l'indique, ce sont des process constitués de **plusieurs machines** effectuant chacune une opération spécifique. Le passage d'une étape à l'autre du produit en cours de fabrication se fait au travers d'un état de stockage ou d'accumulation. La **conduite de process** peut être simple puisque chaque étape est autonome par rapport à celle qui la précède et celle qui la suit.



Process continu

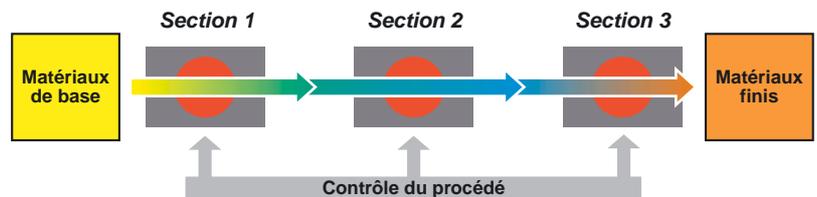
Ce qui différencie un process continu d'un process discontinu réside dans le fait que la phase entre les étapes est assurée par un **outil de transfert** qui tient compte des conditions de l'étape amont et des conditions de l'étape aval.

Alors que dans le cas du process discontinu on peut assimiler le fonctionnement à une marche tout ou rien, du moins en ce qui concerne chaque étape, dans le cas du continu **conduite de process doit gérer la régulation et la synchronisation** entre les opérations réalisées à chaque étape et les phases de transfert. Une modulation des cadences de production est possible en agissant sur la vitesse d'exécution de chaque opération.



Process continu "Lignes sectionnelles"

C'est le cas le plus complexe. On le trouve dans les applications de la fabrication du papier et du carton. C'est aussi la représentation des laminoirs en métallurgie, des machines à tréfiler et de certaines machines textiles. Le produit traité dans une ligne sectionnelle, papier ou barre d'acier, représente un lien mécanique entre les différentes étapes (sections). Pour simplifier l'explication d'un tel système, on peut dire que la section amont "pousse" le produit vers la section aval qui elle-même le "tire" pour le traiter et le "pousser" à nouveau vers la section suivante.



Transitique

Solutions généralement mises en œuvre

Démarrage moteur	Basse tension	Moyenne tension
Direct (D.O.L)	Solutions	
Etoile-triangle		
Autotransformateur		
Soft starter	Solutions	
Variateur de vitesse		

Transitique

La Transitique englobe tous les systèmes permettant de déplacer des matériaux ou des personnes. On trouve entre autres :

■ **les machines de manutention** (bande transporteuse, convoyeur...),

■ **les équipements de déplacement de personnes** (ascenseur, escalator, tapis roulant, téléphérique...),

■ **les systèmes de levage** que l'on peut classer en 4 catégories :

- les machines simples comme les treuils ou les palans,
- les grues utilisées dans la construction des bâtiments,
- les ponts roulants spécifiques exploités dans les domaines :
 - manutention de charges dangereuses (nucléaire...),
 - manutention de métaux en fusion (sidérurgie, aluminium...),
- les engins de manutention dans les infrastructures portuaires :
 - portiques de parc,
 - portiques de quai.

La plupart de ces systèmes font appel à des performances qui nécessitent la mise en œuvre de la variation électronique de vitesse. Pour les entraînements attachés au mouvement de levage, la fonction de **récupération d'énergie** sur le réseau est requise (4 quadrants) .

Les fonctions d'automatisme et de régulation sont indissociables de ces entraînements.

■ synchronisation pour les mouvements de translation,

■ positionnement pour les mouvements de levage.

Des fonctions de contrôle, encore plus sophistiquées, peuvent être utilisées :

■ antiballant par exemple.

Dans les applications de levage, le variateur de vitesse assure des fonctions de sécurité (freinage, maintien des charges, etc.).

Afin d'être complet dans cette présentation de la force motrice de puissance, on ne peut omettre les applications liées aux **transports**. Ainsi, on retrouve des entraînements électriques dans :

La propulsion de navires

- propulsion principale plusieurs milliers de kW
- et propulsion d'étrave plusieurs centaines de kW :
 - en marine militaire,
 - de sous-marins,
 - en marine marchande,
 - paquebots de croisière, car-ferries.

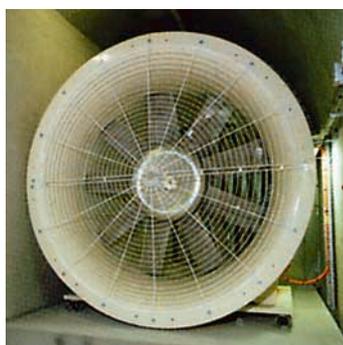
La traction ferroviaire

- traction lourde :
 - motrice électrique,
 - TGV (plus de 8 x 1100 kW par rame),
 - métro/RER (1500 kW par rame),
- traction légère :
 - tramway,
 - trolleybus...



Solutions généralement mises en œuvre		
Démarrage moteur	Basse tension	Moyenne tension
Direct (D.O.L)	Solutions	
Etoile-triangle		
Autotransformateur		
Soft starter		
Variateur de vitesse		

La force motrice électrique dans les **Utilités** représente près de 70 % du parc moteur installé. On entend par utilités toutes les fonctions utilisées dans la périphérie des procédés industriels et d'infrastructures. Dans certains cas, la fonction pompage, ventilation, ou compression peut être considérée comme un procédé à part entière. Les puissances mises en jeu peuvent être très élevées. Les Utilités représentent le plus gros poste de consommation d'électricité dans l'industrie.



La ventilation

La ventilation trouve ses applications dans de nombreuses fonctions sous la forme d'injection, d'extraction et de circulation (d'air ou de gaz) :

- ventilation d'espaces clos : gares souterraines, parkings, métros, tunnels routiers et ferroviaires...
- échangeur et climatisation : salles blanches...
- combustion : fours, incinérateurs...
- bancs d'essais : soufflerie, wind tunnel...



Le pompage

Le pompage trouve ses applications pour assurer les régulations de débit et de pression du liquide traité dans les fonctions telles que :

- l'adduction,
- la distribution,
- l'aspersion,
- l'irrigation,
- la surpression,
- la circulation : piscine, échangeur...
- le pompage immergé : eau, pétrole...



La compression

Il existe de nombreux types de compresseurs :

- les compresseurs centrifuges : ils présentent des caractéristiques de couple en kN^2 ,
- les compresseurs volumétriques : ils présentent des caractéristiques de couple constant :
 - compresseur à vis ou à pistons,
 - compresseur à lobes,
 - compresseur dit "à queue de cochon".

Les compresseurs servent à compresser de l'air ou d'autres gaz.

On les trouve :

- en production de froid,
- en chimie, pétrochimie...
- pour certaines applications manufacturières et métallurgiques.

Solutions généralement mises en œuvre

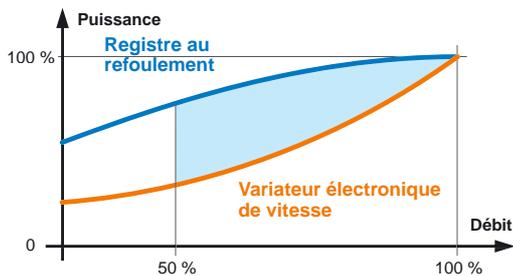
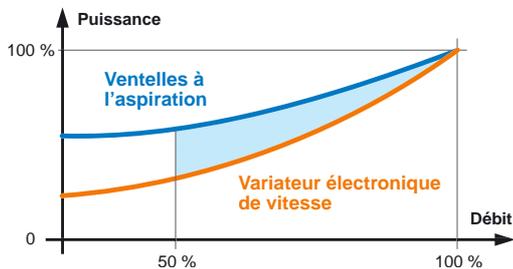
Démarrage moteur	Basse tension	Moyenne tension
Direct (D.O.L.)		
Etoile-triangle		
Autotransformateur		
Soft starter		
Variateur de vitesse	Solutions	

L'utilisation de la variation de vitesse est conjoncturelle lorsqu'elle concerne les machines qui ne nécessitent pas, a priori, la mise en œuvre d'une telle solution. C'est le cas dans les **Utilités**. Elle se justifie sur des points tels que :

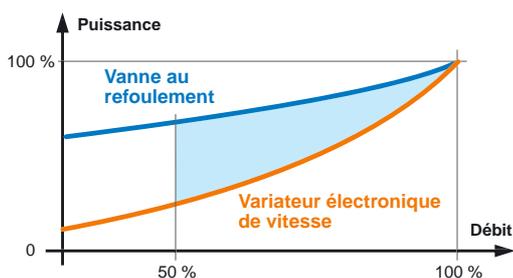
- le démarrage d'une machine sur un réseau à faible puissance de court-circuit,
- le démarrage d'une machine présentant une forte inertie.

Dans ces deux cas, la variation de vitesse évite les pointes de courant dues aux démarrages en direct sur le réseau des moteurs asynchrones. Par ailleurs, l'utilisation de la variation de vitesse se justifie par la substitution des systèmes à pertes de charge dans les applications utilisant des pompes, des ventilateurs centrifuges et des compresseurs. Elle contribue à maîtriser la consommation d'électricité en fonction des régimes de fonctionnement.

Ventilateurs



Pompes



La variation électronique de vitesse appliquée à la ventilation

Dans les systèmes de ventilation classique et fonctionnant avec des moteurs électriques à vitesse fixe, le contrôle du débit d'air s'effectue avec des moyens mécaniques dits à "pertes de charge" tels que les registres ou les inclineurs. La figure ci-contre montre qu'avec des ventelles placées à l'aspiration du ventilateur et lorsque l'angle d'ouverture correspond à un débit de 50 %, la consommation en énergie électrique reste à 60 % (courbe bleue).

Pour obtenir ce même débit en faisant varier la vitesse de rotation du ventilateur, on constate une consommation d'électricité **réduite à 30 %** (courbe orange).

Avec la deuxième courbe ci-contre, on constate un écart encore plus significatif entre une régulation faite avec des registres au refoulement et l'utilisation de la variation de vitesse. Il est à noter que pour des raisons de coût, les registres au refoulement sont le plus souvent utilisés.

En dehors des aspects énergétiques, la variation de vitesse permet de réguler parfaitement le débit de l'air en fonction de paramètres extérieurs, par exemple :

- en salle blanche, pour :
 - maintenir une qualité d'air parfaite en fonction du taux d'utilisation,
- en espace clos, tels que parking ou tunnel pour :
 - maintenir une qualité d'air en fonction d'un niveau de pollution,
 - assurer un "balayage hygiénique" en période de faible exploitation,
 - assurer les fonctions de désenfumage.

La variation électronique de vitesse appliquée au pompage

Tout comme avec les ventilateurs, la régulation de débit ou de pression s'effectue classiquement avec des dispositifs à pertes de charge comme le by-pass ou la vanne au refoulement. La figure ci-contre montre un écart important, pour un point de fonctionnement à 50 % du débit nominal, de plus de 40 % en consommation d'énergie électrique.

Mise en œuvre de la vitesse électronique variable dans les Utilités

Il est évident que l'étendue du parc des moteurs installés dans les Utilités présente un champ d'application important pour la variation de vitesse. Cependant, il ne faut jamais oublier que chaque application doit faire l'objet d'une étude particulière en prenant en compte tous les paramètres mécaniques de la pompe ou du ventilateur, mais aussi les caractéristiques des réseaux d'air ou d'eau, ainsi que les contraintes d'exploitation.

C'est dans ce contexte que l'entraînement sera correctement dimensionné.

L'utilisation des architectures et des produits communicants Schneider Electric permet :

- une mise en service plus rapide du process,
- une plus grande facilité d'exploitation,
- la réduction des arrêts intempestifs,
- la réduction des coûts et temps de maintenance.

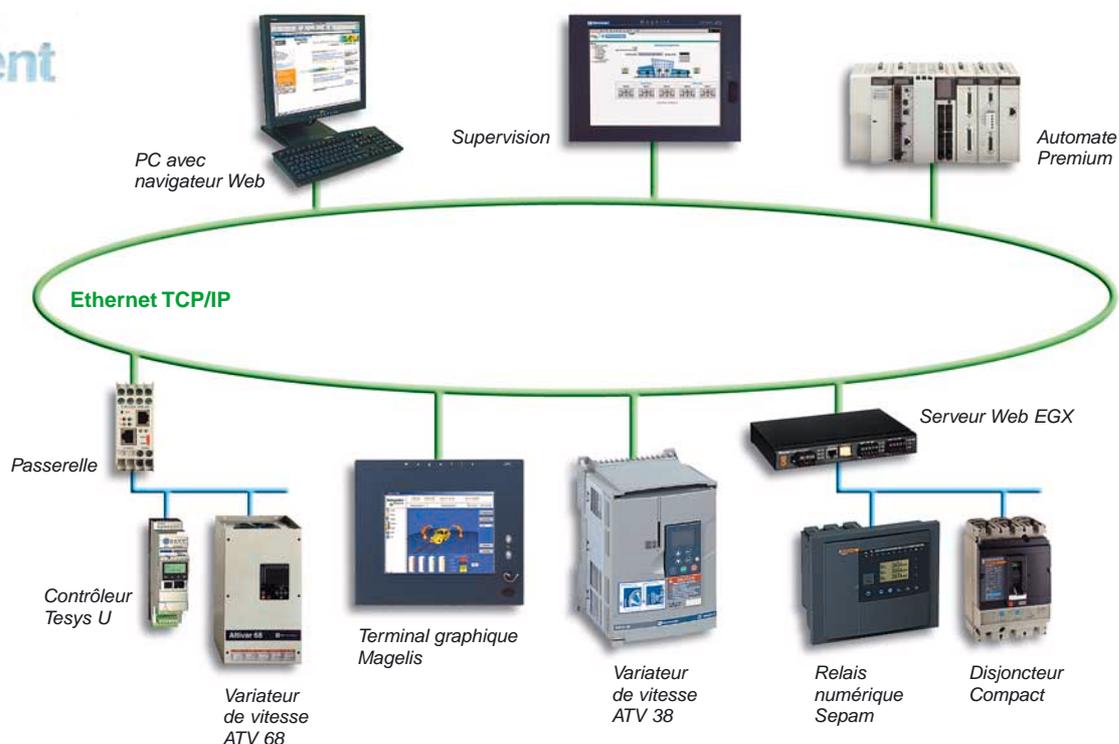


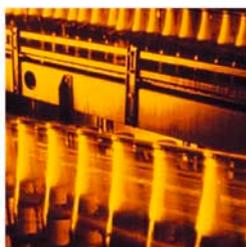
Afin d'améliorer les performances de l'outil de production, Schneider Electric propose de nombreux produits ouverts aux NTIC. Intégrant les technologies d'Ethernet TCP/IP et du Web, ils permettent de réaliser des architectures performantes :

- solutions d'automatismes homogènes, intégrables directement à la gestion de production,
- fonctions d'aide à la mise en route et de diagnostic avec visualisation sur afficheurs, écrans, terminaux graphiques (intégrés dans les produits ou déportés),
- accès aux informations en temps réel sur les moteurs, les fonctions d'automatismes et l'alimentation en énergie électrique, de n'importe quel point de l'installation.

Les solutions **Transparent Ready™** utilisent des standards : Ethernet TCP/IP, PC, navigateur Web. **Transparent Ready™** permet ainsi de réaliser d'importantes économies de câblage, maintenance et formation.

Web-enabled Power & Control
Transparent Ready™





Les solutions Schneider Electric pour le Power & Control

Les solutions Transparent Ready™ de Schneider Electric consistent à intégrer les technologies Ethernet et Web aux produits afin de les rendre "transparent".

Transparent Ready™ permet aux utilisateurs habilités un accès simple, rapide et sécurisé à l'information, et ce, en tout lieu et à tout moment.

Un réseau universel

Le réseau Ethernet TCP/IP dispose de services de messagerie adaptés aux automatismes industriels. Ethernet TCP/IP peut être utilisé en tout point de l'installation.

Un accès aux informations localement ou à distance

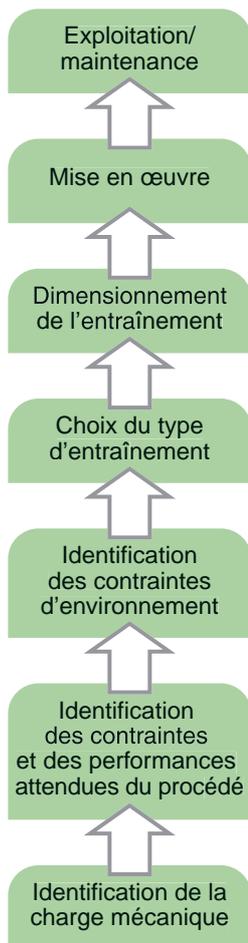
Les technologies de l'Internet réduisent les difficultés et les surcoûts d'accès aux informations à distance. Les personnes autorisées, en ligne avec l'installation, peuvent réagir en toutes circonstances.

Un simple navigateur Web

L'accès aux informations se fait depuis un simple navigateur Internet sur PC, au travers des serveurs Web intégrés dans les produits.

Plus besoin de licences logiciels pour les utilisateurs et les équipes de maintenance.





La mise en œuvre d'une solution d'entraînement est l'aboutissement des différentes étapes présentées dans les chapitres précédents.

Les pages suivantes fournissent des préconisations sur le dimensionnement dans 3 exemples : démarrage direct, par soft starter, utilisation d'un variateur de vitesse électronique.

De la qualité de la mise en œuvre, dépendront, en partie :

- les performances et la pérennité des matériels,
- l'atteinte des objectifs fixés par l'exploitant.

Les conditions de maintenance y sont intimement liées. Elles concernent :

- l'implantation des équipements,
- l'installation sur le site,
- les raccordements de puissance et de commande,
- la mise en service,
- les essais.

Implantation des équipements

L'implantation des équipements doit prendre en compte :

- les distances entre les appareils (calibrage des câbles),
- l'installation "indoor" ou "outdoor" (choix du degré de protection IP),
- la nature des locaux (air ambiant qualifié en température, poussière, salin, présence de gaz corrosifs ou déflagrants...),
- les normes applicables sur le site.

Installation sur le site

L'installation des équipements doit prendre en compte :

- l'encombrement et le poids des matériels :
 - accessibilité des locaux,
 - moyens de manutention et de levage,
- les contraintes d'environnement :
 - niveau de bruit émis (moteur, ventilation variateur...),
 - transmission des vibrations (nature du socle moteur),
 - évacuation de pertes calorifiques,
 - sécurité du personnel exploitant,
- l'accès aux équipements pour l'exploitation, la sécurité et la maintenance.

Raccordements de puissance et de commande

- Position de la boîte à bornes moteur,
- Accessibilité des borniers de raccordement,
- Cheminement des câbles : la cohabitation des câbles de puissance et de commande dans le même chemin de câble est à proscrire pour des problèmes de rayonnement électromagnétique (CEM),
- Nécessité d'utiliser ou non du câble blindé pour la puissance et/ou pour la commande,
- Mise à la terre des masses.

Mise en service

La mise en service est une étape importante de la mise en œuvre : elle conduit à personnaliser les réglages des différents matériels entrant dans la composition de l'entraînement :

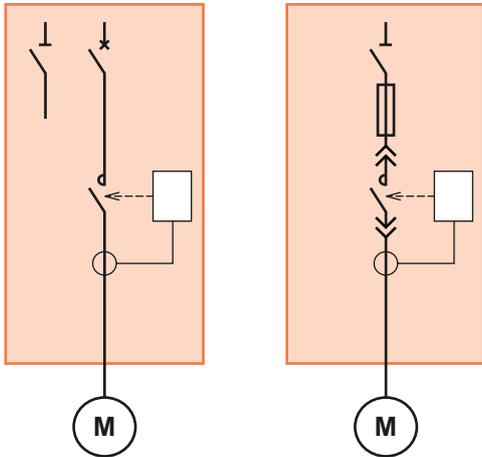
- réglages des paramètres pour s'adapter à la charge mécanique à entraîner (couple, vitesse, inertie),
- réglages des paramètres liés aux performances du procédé,
- réglages de paramètres liés aux protections et à la sécurité de l'entraînement, (limite de surcharge, surintensité, surtension...),
- configuration des informations de commandes et de dialogue.

Essais

La mise en service se termine par une série d'essais qui permet de qualifier l'installation par rapport au Cahier des Charges fixé à l'origine.

Les essais fonctionnels, les essais à vide et en charge conduisent à l'essai de réception en production. Le succès de cette série d'essais dépend de la qualité et du travail méthodique effectué en amont. L'optimisation de leur durée est un gage de confiance entre le fournisseur de l'entraînement et l'exploitant.

Exemple : démarrage direct



Impact sur le réseau électrique

L'impact le plus important se place dans la phase de démarrage. Il dépend du **paramètre I_d/I_n** du moteur. Le **courant de démarrage** peut atteindre jusqu'à 10 fois le courant nominal.

En fonction de la puissance de court-circuit du réseau d'alimentation, le démarrage provoque des chutes de tension plus ou moins importantes. Le réseau électrique doit pouvoir supporter cette contrainte, avec une chute de tension acceptable.

La **consommation d'énergie réactive** est directement liée au facteur de puissance du moteur et à la charge. Exemple pour un moteur de 300 kW :

- à 100 % de la charge, le facteur de puissance est égal à 0,95,
- à 50 % de la charge, le facteur de puissance est égal à 0,93.

Impact sur le fonctionnement du moteur

Différents paramètres réseau sont à considérer :

- le niveau de perturbation harmonique préexistant
Toute perturbation harmonique de rang impair (5, 7, 11, 13...) se traduit par un surchauffement du moteur qui doit être déclassé pour fournir son couple nominal.
- le niveau de déséquilibre des tensions d'alimentation

Les caractéristiques du moteur sont données par le constructeur pour une tension d'alimentation équilibrée. Tout déséquilibre entraîne une augmentation des courants de phase et par conséquent un surchauffement du moteur, une diminution du couple utile et génère l'apparition de couple pulsatoire.

Dimensionnement du transformateur

Dans ce type de démarrage, le transformateur n'est pas un composant critique de la chaîne. Il peut être standard mais doit supporter les contraintes énumérées ci-dessus. De plus, son dimensionnement thermique doit être adapté au nombre de démarrages par heure, au temps de démarrage du ou des moteurs qu'il alimente.

Protections

Les protections mises en œuvre sont liées aux contraintes subies par le moteur : contraintes thermiques, électriques et mécaniques.

Contraintes thermiques

Elles peuvent être dues à des variations de tension d'alimentation, à des déséquilibres de tension, à la répétitivité des démarrages, à la défaillance du système de ventilation, à une température ambiante trop élevée, à une surcharge...

Pour mesurer l'impact de ces contraintes, le moteur peut être équipé de sondes de température placées au stator.

Défauts électriques

Ce sont principalement des défauts d'isolation dus aux contraintes diélectriques trop importantes. Ils se traduisent par des amorçages entre spires des bobinages, des courts-circuits entre phases, des mises à la terre d'un bobinage...

Les protections qui agissent sur le disjoncteur ou le contacteur placés en amont du moteur devront détecter ces différents défauts.

Contraintes mécaniques

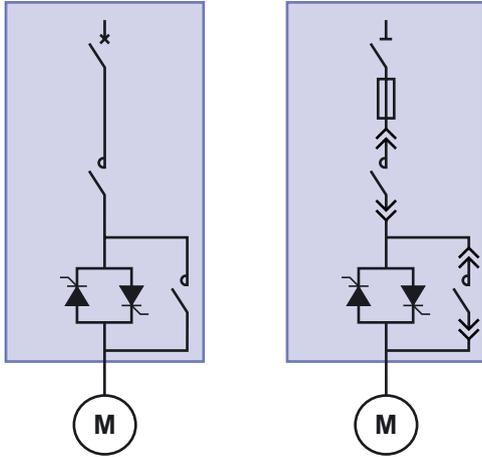
Elles s'exercent plus particulièrement au niveau des paliers du moteur. Ce sont les charges radiales et axiales supportées et causées par les organes d'accouplement mécaniques et la charge. Elles sont directement liées à la mécanique entraînée qui peut générer des surcouples transitoires de forte amplitude et/ou des couples pulsatoires (vitesses critiques). Ces contraintes se traduisent par des vibrations que l'on peut mesurer par des sondes.

Dimensionnement du moteur

Le moteur est dimensionné thermiquement et électriquement en fonction :

- du réseau électrique d'alimentation : tension, fréquence,
- de la charge mécanique à entraîner ; couple, vitesse, inertie,
- du cycle d'utilisation (service) : continu, discontinu, répétitivité des démarrages.

Le choix de sa technologie est défini par les contraintes environnementales : température ambiante, altitude, degré d'hygrométrie et nature de l'atmosphère (poussière, acide, explosive, marine...).



Soft starter

Nous considérerons le soft starter dans sa configuration classique, composé de trois interrupteurs à thyristors bidirectionnels à ouverture et fermeture commandée.

Impacts sur le réseau électrique

Le fonctionnement du soft starter, basé sur le réglage de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors qui composent le pont de puissance, est intrinsèquement un système perturbateur. L'impact sur le réseau se traduit par :

- un fort taux de réjection harmonique* pendant la phase de démarrage,
- une dégradation du facteur de puissance pendant cette même phase.

Contraintes liées au soft starter

En fin de démarrage, le soft starter fournit la pleine tension au moteur. Cependant, les thyristors qui constituent le pont de puissance, présentent une chute de tension relativement faible mais suffisante pour générer des échauffements qui peuvent présenter un inconvénient dans certaines applications, notamment lors de l'intégration dans des coffrets ou des armoires.

La solution consiste à utiliser un contacteur de by-pass en fin de démarrage, ce qui permet de concilier les avantages du démarreur électronique durant les phases de démarrage et l'absence d'échauffement en régime établi.

Dans ce cas, le by-pass est un simple passeur de courant et la protection thermique du moteur est assurée par le soft starter.

Dimensionnement du transformateur

Dans ce type de démarrage, le transformateur n'est pas un composant critique de la chaîne. Il peut être standard mais doit supporter les contraintes énumérées ci-dessus. De plus, son dimensionnement thermique doit être adapté au nombre de démarrages par heure et au temps de démarrage du moteur qu'il alimente.

Générateur de secours :

Dans le cas où le réseau peut être secouru par un groupe électrogène, il convient de vérifier que ce groupe est capable de supporter le taux d'harmonique généré durant la phase de démarrage.

Protections

Des protections moteur complètes sont intégrées dans le module de protection et contrôle du soft starter :

- surcharge thermique,
- déséquilibre de phases,
- sous-charge,
- démarrage trop long,
- rotor bloqué,
- ...

By-pass utilisé en secours

La mise en œuvre d'un by-pass de secours doit prendre en compte :

- L'automatisation de la commande par le soft starter lui-même,
- Le calibrage des protections liées à la branche by-pass. Ce calibrage se fera sur les mêmes bases que celles appliquées au démarrage direct du moteur alimenté.

Utilisation particulières du soft starter

Il est possible de connecter le démarreur dans le triangle du moteur. Ce type de raccordement permet de gagner un facteur racine de 3 sur le dimensionnement en courant du démarreur.

Dimensionnement du moteur

A dimensionnement égal, le moteur est capable de supporter 2 à 3 fois plus de démarrages par heure par rapport au démarrage direct.

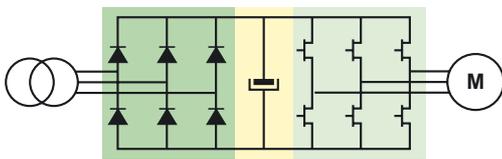
(* En fonction de la puissance de court-circuit du réseau (impédance du réseau), les courants harmoniques se transforment en tensions harmoniques. Ce sont ces tensions harmoniques qui peuvent avoir un impact sur le réseau et sur les autres appareils électriques raccordés sur le même réseau (pertes supplémentaires, suréchauffement).

Exemple : démarrage par variateur de vitesse

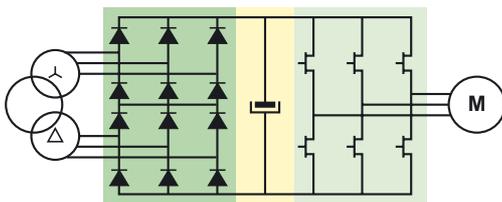
Variateur de vitesse

Nous considérerons ici le convertisseur de fréquence de type "source de tension" composé d'un pont réseau de type redresseur à diode (6 pulses hexaphasé ou 12 pulses dodécaphasé) et d'un pont moteur type onduleur de tension à IGBT commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

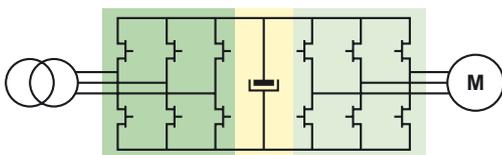
Ces caractéristiques représentent la grande majorité des matériels utilisés actuellement. Pour les autres types de variateurs, les préconisations ci-dessous ne sont pas applicables en l'état.



Redresseur **hexaphasé** également appelé **6 pulses**.
Il est alimenté par un transformateur triphasé.
Il génère des harmoniques de rang 5 et rang 7.



Redresseur **dodécaphasé** également appelé **12 pulses**.
Il est alimenté par un transformateur avec deux enroulements secondaires étoile-triangle.
Ce montage élimine les harmoniques de rangs 5 et 7.



Redresseur **piloté type hexaphasé** appelé aussi redresseur à **prélèvement sinusoïdal**.
Il est alimenté par un transformateur triphasé.
Il se comporte comme un filtre actif et ne génère pas d'harmoniques sur le réseau. De plus, il est capable de gérer un freinage dynamique par rejet de l'énergie sur le réseau.

Impacts sur le réseau

- Faible consommation d'énergie réactive quelles que soient la vitesse de fonctionnement et la charge du moteur (facteur de puissance > 0,95).
- Réjection de courants harmoniques plus ou moins forte en fonction de la configuration du redresseur (6 pulses ou 12 pulses).

Dimensionnement du transformateur

Le convertisseur de fréquence est une charge "non linéaire" c'est-à-dire, qu'à la différence d'une charge résistive dite "linéaire", il consomme un courant qui n'est pas sinusoïdal. Le redresseur côté réseau est généralement de type hexaphasé (6 pulses), le courant absorbé est entaché d'harmoniques, en particulier celles de rang 5 et de rang 7. Ces harmoniques provoquent des pertes supplémentaires au niveau du transformateur et donc un surchauffement.

Le calcul du transformateur doit en tenir compte.

Filtrage des harmoniques

Le filtrage des harmoniques peut être traité par :

- la configuration du redresseur, 6 pulses ou 12 pulses, associé à un transformateur adapté. (secondaire à simple enroulement ou double enroulement étoile-triangle). La solution 12 pulses supprime les harmoniques 5 et 7.
 - la mise en place de réactances correctement dimensionnées en amont du convertisseur.
 - l'utilisation de filtres "actifs" mais le coût en reste élevé.
 - la mise en œuvre d'un redresseur piloté à prélèvement sinusoïdal.
- Solution idéale qui présente également l'avantage de rendre l'équipement réversible (4 quadrants) c'est-à-dire capable de gérer un freinage dynamique par rejet de l'énergie de freinage sur le réseau d'alimentation.

Compatibilité électromagnétique (CEM)

La mise en œuvre doit être faite dans les règles de l'art et suivant les normes liées à la CEM (phénomènes perturbants "conduits" ou "rayonnés").

- qualité du câblage et des raccordements, blindage, filtres radiofréquence, stratégie de mise à la terre des masses (régime neutre isolé)...

Liaison variateur-moteur

Le convertisseur de fréquence génère un courant moteur presque sinusoïdal.

En revanche, la tension produite présente de très forts "dV/dt" (fronts de tension d'amplitude importante et de très faible durée).

Le câble utilisé entre le variateur et le moteur se caractérise par sa nature et sa longueur :

- plus le câble est long, plus les pertes liées à sa résistance sont importantes et plus sa "capacité parasite" est importante,
 - en règle générale, au-delà de 50 à 100 m on doit faire l'analyse de l'impact du câble sur le bon fonctionnement de l'entraînement. La mise en place de réactances en sortie du variateur limite les effets de la capacité parasite.
- Un mode de régulation adapté permet de compenser les pertes en ligne.
- Pour certaines applications, la mise en place d'un "filtre sinus" peut s'avérer nécessaire :
- limitation des couples pulsatoires,
 - suppression des effets des fronts de tension (dV/dt).

Dimensionnement du moteur

Le moteur est dimensionné en fonction de la charge mécanique entraînée.

Le fait d'être alimenté par un convertisseur de fréquence doit être précisé au constructeur (impact de la forme de tension et des "dV/dt" sur le bobinage statorique du moteur).

Dans certains cas, un déclassement en puissance peut être nécessaire (5 à 10 %).

Dans les applications imposant des temps longs de fonctionnement à basse vitesse (< 50 % de la vitesse nominale), une "motoventilation" du moteur doit être envisagée.

L'utilisation de la variation de vitesse sur des moteurs "qualifiés" (en température, antidéflagrant...) conduit à la déqualification de ces moteurs. Une "qualification globale" peut être entreprise.

Annexes

Caractéristiques du moteur asynchrone

Caractéristiques mécaniques

- Type de carcasse (fonte, alu, mécanosoudée...),
- Hauteur d'axe,
- Nombre de paires de pôles,
- Vitesse de rotation,
- Forme de montage IM..
- Degré de protection IP..
- Antidéflagrant (ADF) EExd, EExde...
- Types de paliers,
- Types de roulements,
- Equilibrage - Classe N, R, S,
- Mode de refroidissement :
 - motoventilé,
 - sur échangeur...
- Type d'accouplement :
- charges radiales admissibles,
- charges axiales admissibles,
- Classe d'isolation,
- Classe d'échauffement,
- Couple disponible à l'arbre,
- Moment d'inertie du rotor,
- Niveau de bruit,
- Poids.

Caractéristiques électriques

- Tension,
- Fréquence,
- Courant nominal,
- Puissance disponible,
- Facteur de puissance,
- Rendement,
- Courant de démarrage (Id/In),
- Couple de démarrage (Cd/Cn),
- Couple max (Cm).

Accessoires montés sur le moteur

- Sondes de température bobinage,
- Sondes de température paliers,
- Sondes de vibrations paliers,
- Capteur de rotation,
- Capteur de vitesse,
- Type de peinture,
- Nature de la plaque à bornes,
- Résistance de réchauffage.

Limites d'utilisation - Déclassement suivant :

- Conditions de service (S..),
- Température ambiante,
- Altitude.

Chaque constructeur de moteurs propose des gammes de machines répondant à chaque type d'exploitation. Les catalogues constituent des guides de choix permettant à l'utilisateur de sélectionner le moteur le plus approprié à son application. La finesse du renseignement de chaque paramètre conduira à la meilleure solution.

Bibliographie

Avertissement

L'étendue du sujet traité fait appel à des connaissances sur :

- la technologie des machines à courant alternatif,
- la modélisation de ces machines en vue de leur commande,
- la technologie des appareils électromécaniques de coupure,
- les semi-conducteurs de puissance,
- la technologie des convertisseurs statiques et leur commande,
- les variateurs électroniques de vitesse.

La bibliographie sur ces sujets est vaste et souvent cantonnée au domaine universitaire. Cependant certains ouvrages sont disponibles, vous en trouverez une liste très limitée ci-dessous

Ouvrages Schneider Electric

Cahiers techniques :

- CT 152 - 183 - 202 sur les harmoniques
- CT 204 - *Protection BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence)*
- CT 206 - *Les économies d'énergie dans le bâtiment*
- CT 207 - *Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger*
- CT 208 - *Démarrateurs et variateurs de vitesse électroniques*

Nous renvoyons également aux nombreux catalogues Telemecanique ou Merlin Gerin de produits de commande, contrôle et protection moteur, et aux catalogues des variateurs de vitesse Telemecanique.

Autres ouvrages

- EDF et GIMEC - *La Vitesse Variable : L'électronique maîtrise le mouvement* TECHNO-NATHAN Paris 1992
- Jean BONAL et Guy SEGUIER - *Entraînements électriques à vitesse variable - Volume 1*
- Jean BONAL et Guy SEGUIER - *Entraînements électriques à vitesse variable - Volume 2*
- Jean BONAL et Guy SEGUIER - *Entraînements électriques à vitesse variable - Volume 3*
- Jean BONAL - *L'utilisation industrielle des moteurs à courant alternatif* Technique et Documentation Lavoisier Paris 2001
- R. CHAUPRADE - F. MILSANT - *Commande électronique des moteurs à courant alternatif*
- Dossier thématique du CFE – *La variation électronique de vitesse – Guide d'utilisation*

Photographies

Nos remerciements à la Société Weg, constructeur de moteurs, pour les photographies d'applications.

Notes

Schneider Electric Industries SAS

Adresse postale
Centre PLM
F-38050 Grenoble Cedex 9
France
Tél. : 33 (0)4 76 57 60 60
<http://www.schneider-electric.com>

En raison de l'évolution des normes et du matériel, les caractéristiques indiquées par les textes et les images de ce document ne nous engageant qu'après confirmation par nos services.



*Ce document a été imprimé
sur du papier écologique*

Conception : Schneider Electric
Réalisation : Graphème
Impression : Imprimerie du Pont de Claix /JPF