

**Cours :**  
**Association Machine-Convertisseur**

**Pr. M. KHAFALLAH**

# Finalités de l'unité d'enseignement

## Objectifs pédagogiques :

Donner les bases des association de convertisseurs statiques-machines électriques. Présenter les principes de structures de commande utilisées dans les variateurs de vitesse industriels. Sensibiliser à la robustesse des structures de commande proposées vis-à-vis des contraintes usuelles des applications industrielles de type propulsion et/ou traction électrique.

## Capacités et compétences visées :

Connaissance approfondie des entraînements à vitesse variable pour les applications de traction et/ou propulsion électrique.

## Contenu :

Généralités sur la variation de vitesse

Entraînement de la machine à courant-continu

- ✓ Modélisation de la machine à courant continu
- ✓ Entraînement par redresseurs
- ✓ Entraînement par hacheurs

Entraînement des machines à courant alternatif

- ✓ Modélisation de la machine asynchrone (modèle de Park)
- ✓ Association machine asynchrone-onduleur
- ✓ Commande à MLI
- ✓ Commande scalaire
- ✓ Commande vectorielle

# Introduction générale

L'industrie, au sens le plus large du terme, et les transports, ont de plus en plus **besoin de systèmes à vitesse continûment variable**, doués de souplesse et de précision.

Exemples : Réglage du débit d'une pompe ou d'un ventilateur, réglage de la vitesse de coupe ou d'avance des machines outils, réglage de la vitesse des systèmes de transport (train, ...).

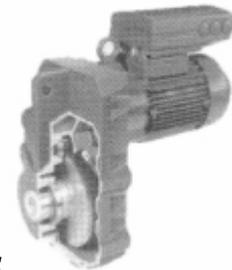
Deux technologies permettent d'obtenir cette variation de vitesse :

1. La technologie mécanique (boîte de vitesse, système poulies-courroie, système pignon-chaîne, ...)
2. La technologie électronique (convertisseur d'énergie).

Bien sûr, **les solutions mécaniques et hydrauliques sont encore utilisées** et dont la structure est la suivante :



Exemple : Système de poulies-courroies ou système d'engrenages

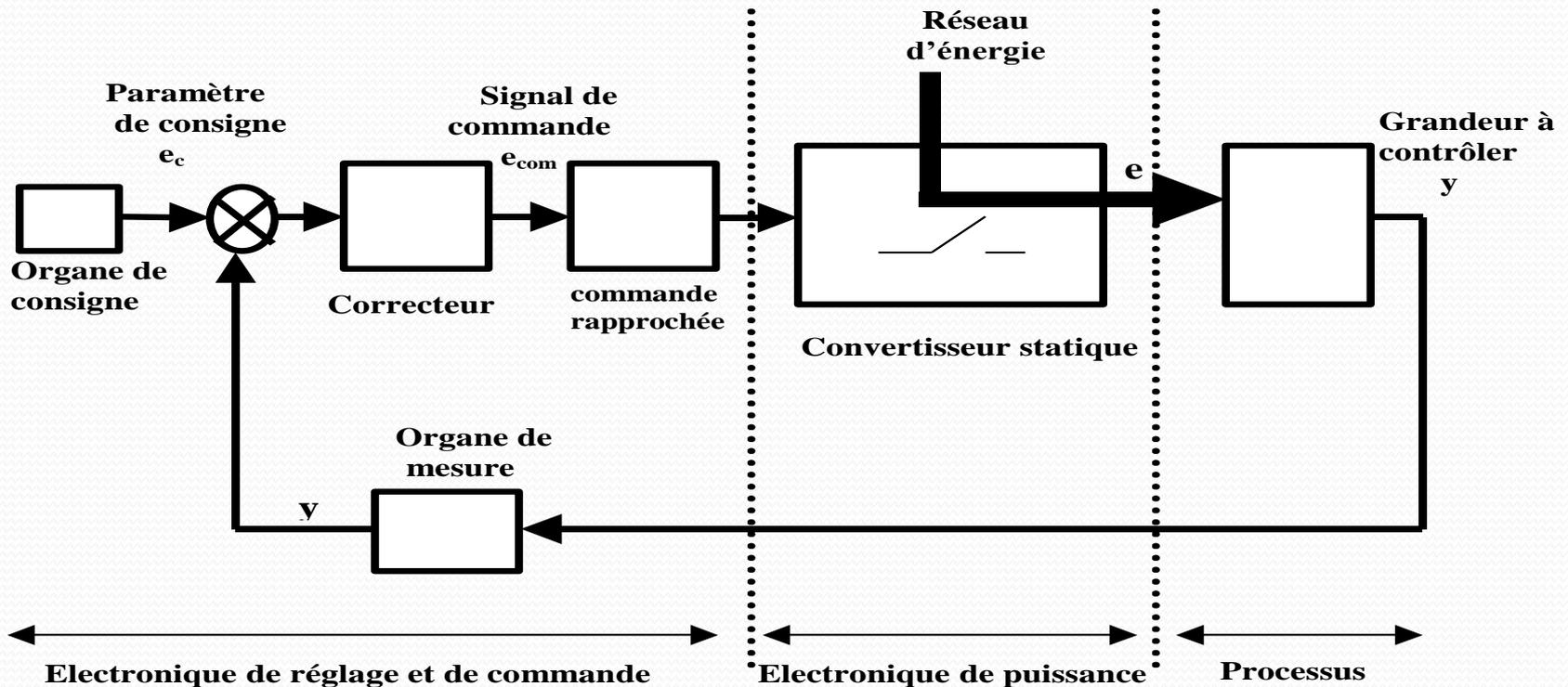


**mais les solutions électriques sont aujourd'hui et de loin, les plus appréciées** et dont la structure est la suivante :



# Introduction générale

De ce fait, les  *systèmes d'entraînement électriques à vitesse variable trouvent énormément d'emploi dans plusieurs secteurs industriels. Ils touchent inévitablement à un grand nombre de disciplines : les convertisseurs électromécaniques (machines électriques), l'électronique de puissance, l'automatique et l'informatique industrielle.*



# Introduction générale

Un variateur de vitesse est un équipement permettant de faire varier la vitesse d'un moteur, une nécessité pour de nombreux procédés industriels

Pour les procédés industriels exigeant une régulation précise de la vitesse, on a d'abord utilisé des moteurs à courant continu (CC) commandés par des variateurs électroniques à semi-conducteurs.

Depuis, l'électronique de puissance a fait des progrès considérables et on installe de plus en plus des variateurs de vitesse à fréquence variable avec des moteurs à courant alternatif. Ces variateurs de vitesse exploitent le plus souvent la **modulation de largeur d'impulsion** (MLI) et les **transistors bipolaires à grille isolée** (IGBT).

Figure 1 : Variateur de vitesse à courant continu

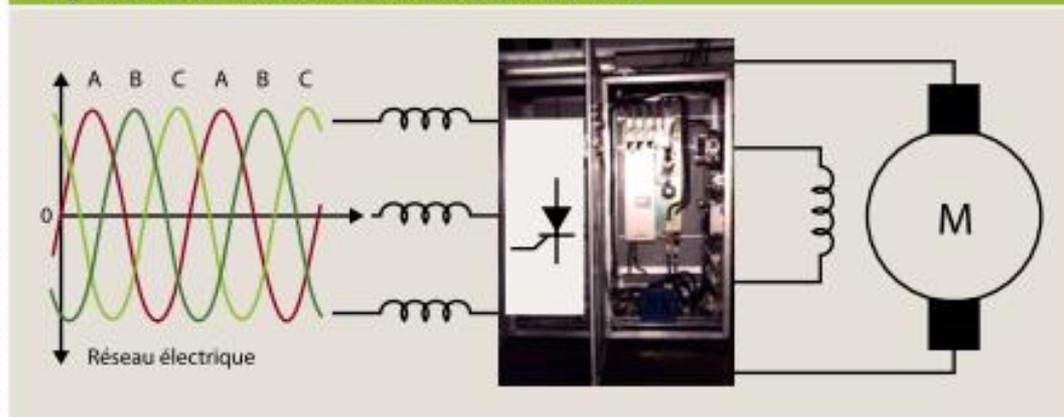
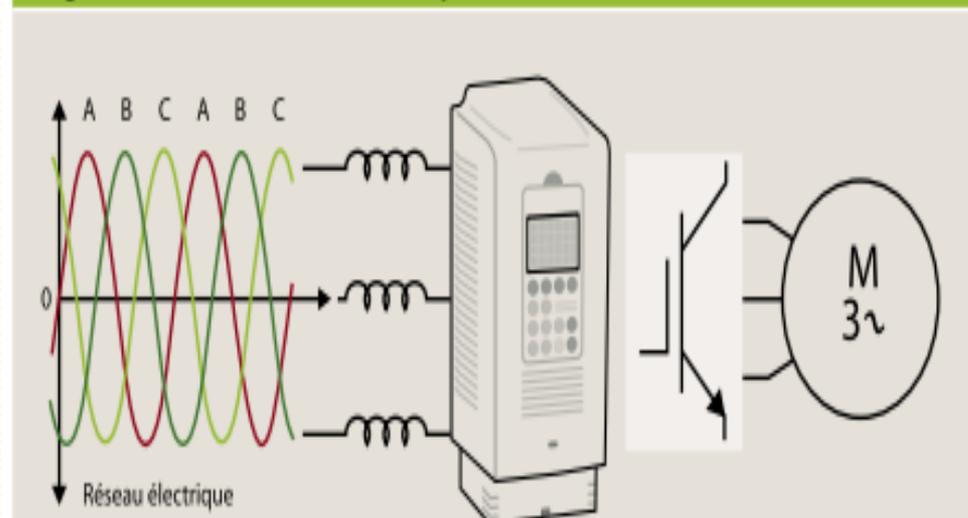


Figure 2 : Variateur de vitesse à fréquence variable



# Généralités sur la variation de vitesse

## Chapitre 1

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable :

1. Activités où la **vitesse variable est indispensable** pour régler le système ou le processus (entraînements de laminoirs, de mélangeurs, de fours rotatifs, de machines-outils, traction et propulsion électrique).

la vitesse variable ne constitue pas une nouveauté et les solutions utilisées ont évolué avec le développement de la technologie.

2. Entraînements de turbomachines (pompes, ventilateurs, compresseurs) qui requièrent un **réglage du point de fonctionnement**, afin d'adapter la machine aux paramètres d'exploitation du processus.

- **Réglage traditionnel** : vannage, aubes directrices ajustables, ... → pertes de charge supplémentaires → augmentation de la puissance consommée.
- **Vitesse variable** : déplacement de la caractéristique de la turbomachine → point de fonctionnement souhaité (puissance consommée = puissance utile nécessaire).

**Augmentation du coût de l'énergie → recherche** en vue d'améliorer **les rendements énergétiques** des différents procédés industriels. Les **entraînements de puissance** peuvent être améliorés par l'utilisation **d'entraînements électriques à vitesse variable**.

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

Le premier intérêt à mettre en vitesse variable des moteurs électriques, c'est : la recherche d'un **rendement global meilleur**, c'est-à-dire économiser l'énergie.

*Pour illustrer ce point, considérons les exemples de régulation de débit d'une pompe à vitesse d'entraînement fixe puis variable :*

### Cas de fonctionnement à vitesse constante :

Le moteur d'entraînement de la pompe tourne à **vitesse constante**, la variation de débit se fait par action directe sur l'écoulement du fluide.

La vitesse étant constante, le couple résistant de la pompe et donc la puissance mécanique absorbée baissent très peu avec le débit.

Autrement dit, si on n'est à 80% du débit nominal, la pompe continuera à absorber à peu près la **même puissance** qu'en débit nominal. En conséquence, le **rendement** de la pompe en débit réduit est **plus faible** que le rendement de la pompe en débit nominal. → **gaspillage d'énergie**

# Généralités sur la variation de vitesse

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

### Cas de fonctionnement à vitesse variable :

Considérons le cas d'une pompe centrifuge dont le débit est proportionnel à la vitesse, le couple résistant croît avec le carré de la vitesse et la puissance croît comme le cube de la vitesse (figure 1).

Débit et vitesse %	Puissance %
100	100
90	73
80	51
70	34
60	22
50	12.5

Tableau n°1

Le tableau n°1 associé démontre d'une manière éloquent à quel point la puissance nécessaire est réduite lorsque le débit baisse.

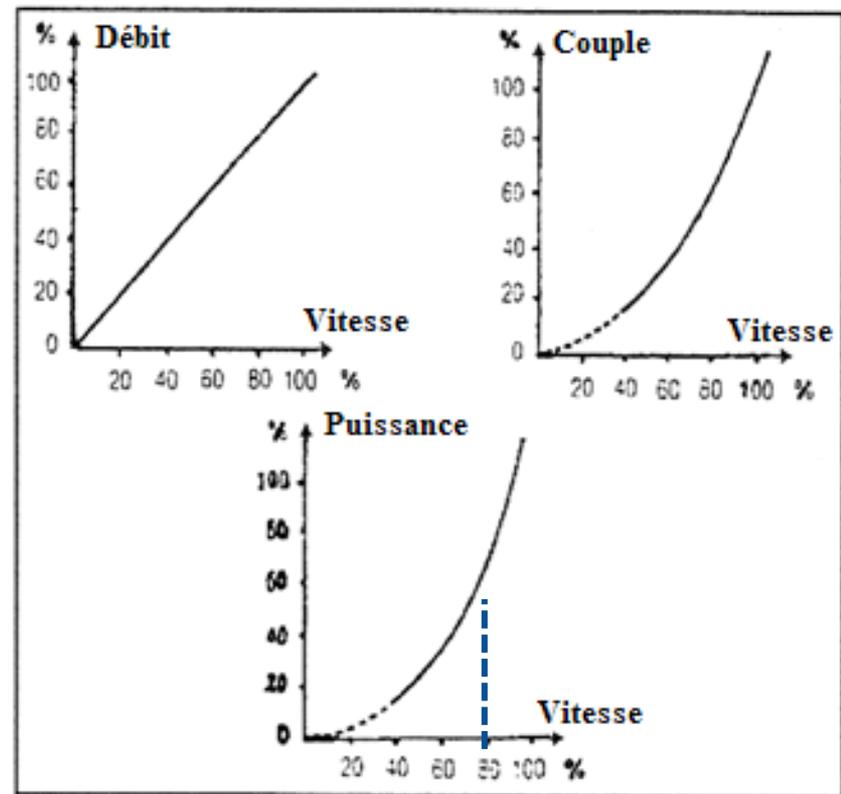


Figure 1 : Allures théoriques des courbes de débit, de couple et de puissance des pompes

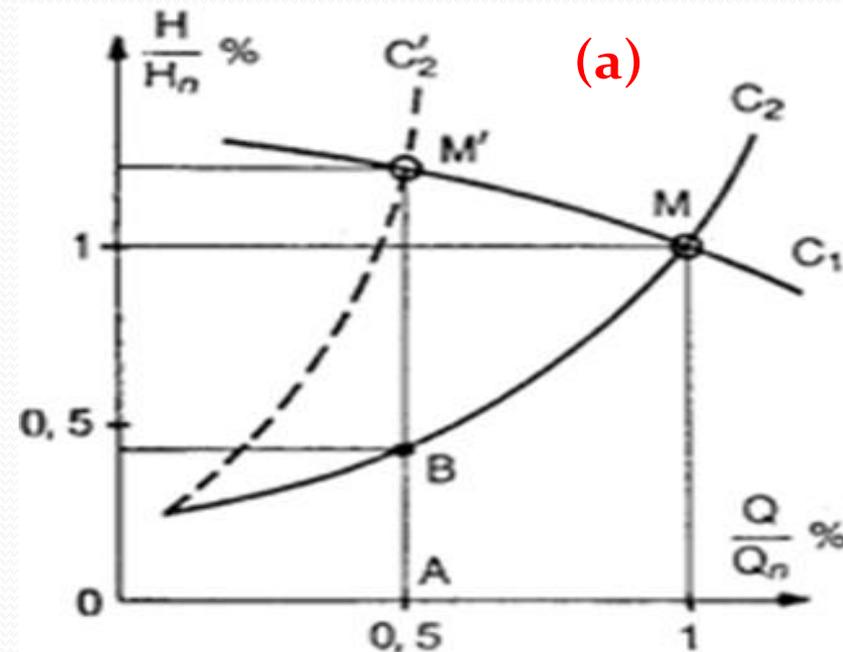
# Généralités sur la variation de vitesse

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

Dans un variateur électronique de vitesse, on ne fait pas varier la vitesse par action sur les pertes d'énergie dans le circuit électrique d'alimentation ou dans le moteur ou dans la charge, mais on modifie la présentation de l'énergie fournie au moteur pour que celui-ci donne avec le minimum de pertes, les caractéristiques mécaniques désirées, la vitesse par exemple,

Pour montrer le gain en énergie consommée, prenons l'exemple simple d'une pompe entraînée à vitesse constante dont on fait varier le débit par une vanne de régulation.

Le groupe moto-pompe est caractérisé par la courbe  $C_1$  (figure (a)) donnant en fonction du débit  $Q$ , la hauteur manométrique totale  $H$  pour un fluide donné. Le point de fonctionnement est donné par l'intersection de  $C_1$  avec la caractéristique  $C_2$  du système qui indique la perte totale de charge en fonction du débit pour le circuit du fluide.

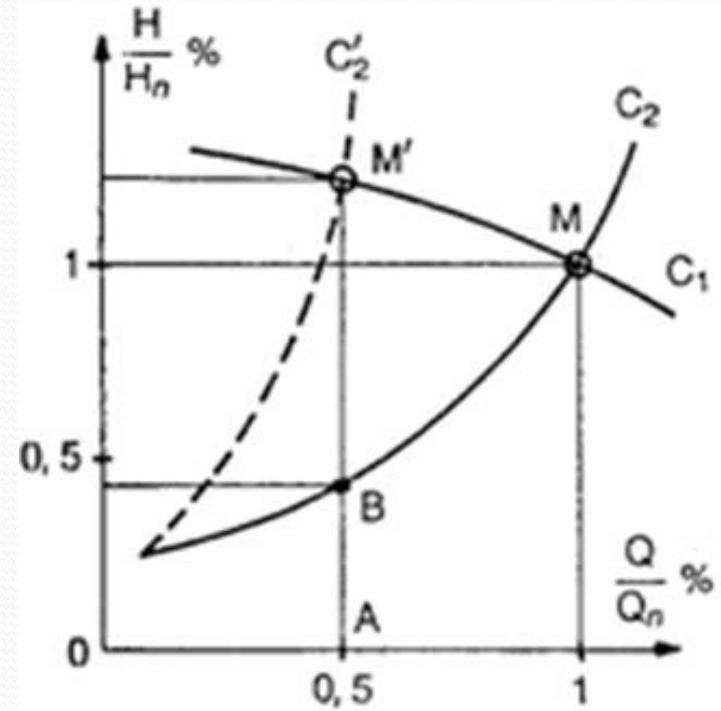


# Généralités sur la variation de vitesse

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

Si la pompe est bien adaptée au système et au fluide, lorsque la **vanne est complètement ouverte**, le point d'intersection M correspond au point nominal (débit nominal  $Q_n$ , hauteur nominale  $H_n$ ).

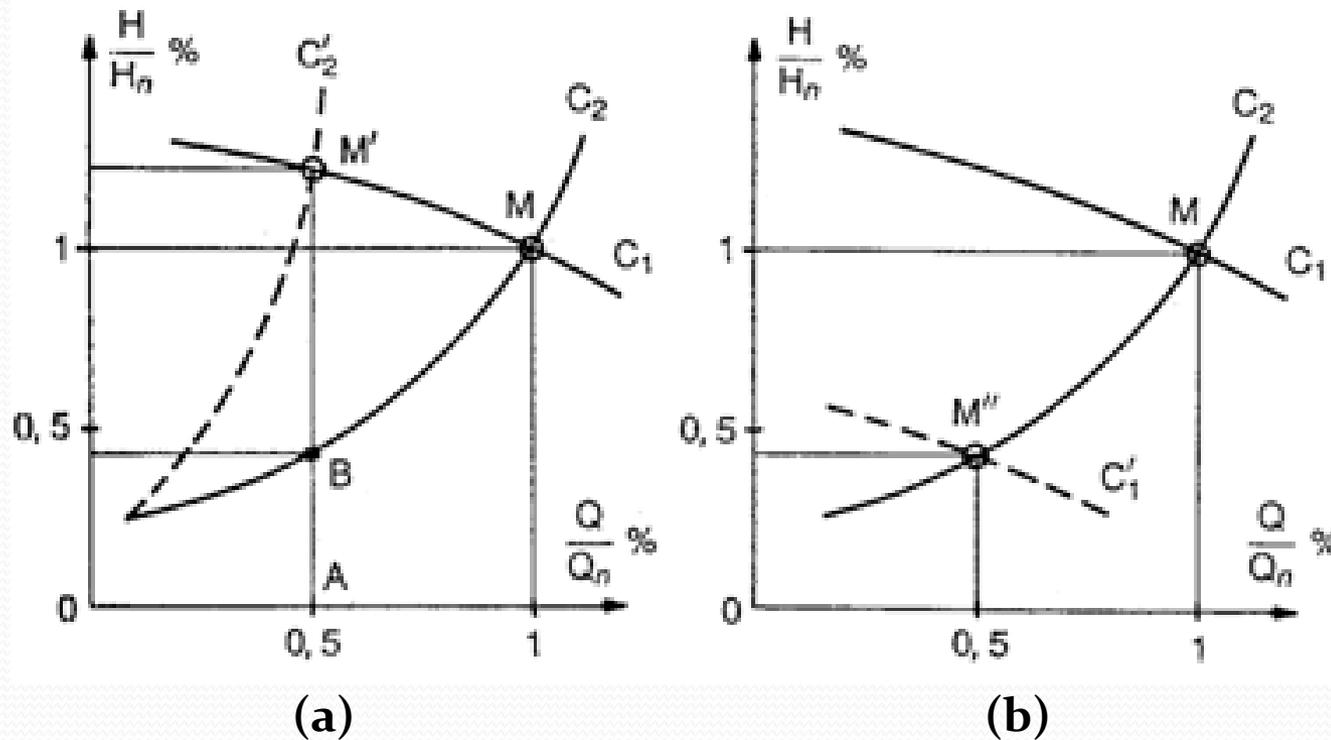
Si on veut réduire le débit, on augmente les pertes de charge par action sur la fermeture de la vanne, passant de la courbe  $C_2$  à la courbe  $C'_2$ . Le point de fonctionnement passe en  $M'$  ; la fraction  $BM'/AM'$  de la puissance fournie par la pompe est dépensée en pertes par vannage.



# Généralités sur la variation de vitesse

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

Si on supprime la vanne de régulation et si on alimente le moteur par un variateur de vitesse, pour réduire le débit il suffit de diminuer la vitesse par action sur l'alimentation du moteur. On passe (figure (b)) pour le groupe moto-pompe de la caractéristique  $C_1$  à la caractéristique  $C'_1$  : toutes les pertes dues au vannage de la solution précédente sont supprimées.



# Généralités sur la variation de vitesse

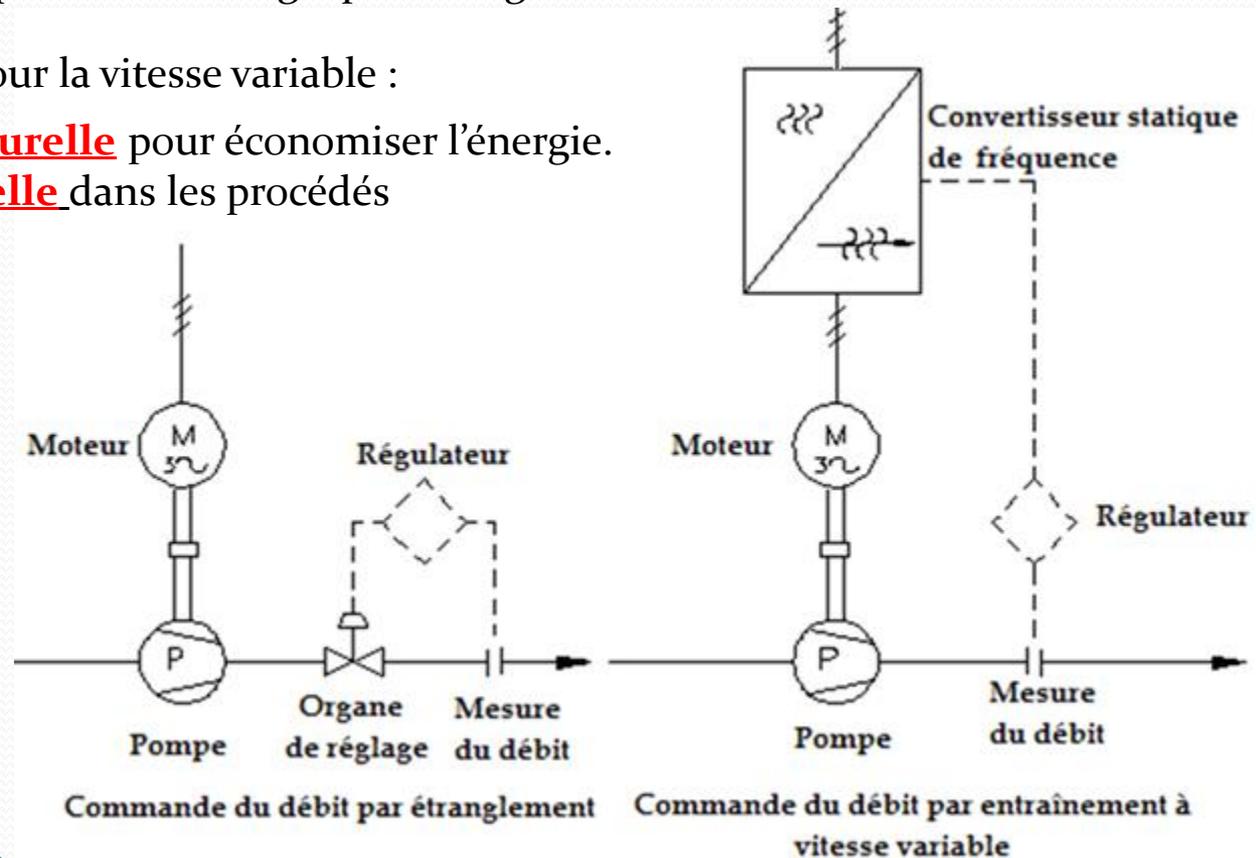
## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

Il existe un **autre apport** en vitesse variable **en termes de structure** ce qui permet d'avoir une **grande flexibilité**.

Les entraînements électriques peuvent effectivement se substituer à d'autres modes d'entraînement, turbines par exemple, ou grâce à leur vitesse variable, adapter les conditions de fonctionnement en évitant de perdre de l'énergie par strangulation de veines fluides. Etc.

Donc deux grands domaines pour la vitesse variable :

- ✓ La vitesse variable **conjoncturelle** pour économiser l'énergie.
- ✓ La vitesse variable **structurelle** dans les procédés



## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

### Autres avantages de la vitesse variable

Les avantages des entraînements électriques à vitesse variable ne résident pas seulement dans les économies d'énergie qui, d'ailleurs, ne concernent pas toutes les applications. En fonction de l'application considérée, l'un ou l'autre ou plusieurs des avantages que nous allons énumérer peuvent être déterminants.

*En ce qui concerne le réseau d'alimentation*, les principaux avantages sont :

- ✓ La suppression des forts surintensités du courant appelé par le moteur au démarrage.
- ✓ La diminution de la puissance du système d'alimentation qui, dans le cas du démarrage direct des moteurs, doit être déterminée pour tenir compte des appels de courant et des chutes de tensions qu'ils provoquent.

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

### Autres avantages de la vitesse variable

En ce qui concerne le *moteur*, le principal avantage est *l'allongement de sa durée de vie*.

✓ La durée de vie d'un moteur est en partie limitée par son nombre de démarrages. En effet, les démarrages directs sur le réseau provoquent des échauffements importants dans le rotor du moteur, qui conduisent à des dilatations différentielles des parties constitutives du rotor.

➔ les fortes contraintes magnétiques au démarrage conduisent à la détérioration du moteur. C'est pour cette raison que la fréquence des démarrages des moteurs alimentés en direct est limitée par exemple à deux démarrages par jour dans le cas de très grosses unités.

Au contraire, les entraînements électriques à vitesse variable permettent des démarrages à courant limité avec des temps d'accélération contrôlés. Il n'y a plus de limitation à la fréquence de démarrage des moteurs. Par ailleurs, l'absence de surcoups transitoires tend à augmenter la durée de vie des coupleurs et des dents d'engrenage.

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

### Autres avantages de la vitesse variable

En ce qui concerne le *moteur*, le principal avantage est *l'allongement de sa durée de vie*.

- ✓ Les moteurs à vitesse variable fonctionnent souvent au dessous de leur vitesse nominale ; or lorsqu'on diminue la vitesse, on augmente la durée de vie des roulements. → cas de petits entraînements utilisant des roulements à billes, dont la durée de vie est inversement proportionnelle à la puissance  $1,6$  de la vitesse.
- ✓ Dans un moteur fonctionnant à puissance réduite, les échauffements sont eux aussi réduits. Or la durée de vie d'un isolement double chaque fois que la température diminue d'environ  $10^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ On peut noter aussi que le convertisseur isole le moteur du réseau, ce qui a pour effet de lui éviter un certain nombre d'inconvénients, tels que le déséquilibre des tensions qui provoque des échauffements et des couples parasites.

## 1- Intérêt des entraînements électriques à vitesse variable:

### Autres avantages de la vitesse variable

C'est évidemment au niveau de la charge entraînée que se situent les principaux avantages des entraînements à vitesse variable.

- ✓ Les démarrages s'effectuent sans-à-coup de couple, à couple ou accélération constante. Le bruit, les vibrations de l'équipement entraîné et les contraintes anormales auxquelles il est soumis lors du démarrage du moteur directement sur le réseau sont supprimés.
- ✓ Le contrôle du couple des équipements à vitesse variable permet de s'affranchir de certains défauts, les creux de tension par exemple.

Avec un moteur directement relié au réseau, un creux de tension peut entraîner une importante chute de vitesse. Le retour à la tension normale trouve le moteur à une vitesse où son couple est faible, il y a risque de décrochage et arrêt du processus, avec les pertes considérables que cela peut provoquer.

Avec un équipement à vitesse variable, le couple du moteur est contrôlé tant pendant le creux de la tension que lors du retour de celle-ci à la valeur normale.

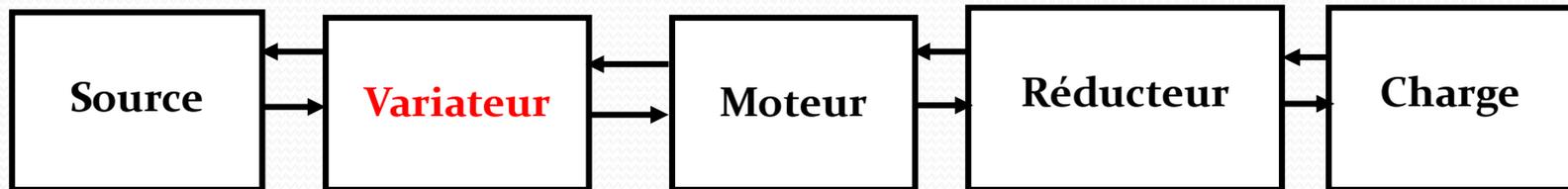
- ✓ Mais c'est surtout la souplesse, la flexibilité, la précision et la rapidité des régulations que permettent les entraînements à vitesse variable qui constituent leur principal avantage. Cela se traduit par un accroissement de la productivité, moins de matière première perdue, augmentation des vitesses de réalisation, passage d'un système discontinu à un système continu... La qualité de la régulation facilite l'automatisation d'un ensemble et son adaptation aux évolutions d'un processus industriel.

## 3- Chaîne de transfert de l'énergie :

La chaîne de transfert d'énergie comprend d'une façon générale :

- Les éléments mécaniques de la machine entraînée ;
- Le réducteur de vitesse ;

Et elle comprend (figure 5) :



**Figure 5. Chaîne de transfert de l'énergie**

Source : Secteur industriel, groupe électrogène, batterie, ...

Variateur : Convertisseur statique assurant le contrôle du flux d'énergie ;

Réducteur : Adaptateur de la forme de l'énergie mécanique ;

Charge : Application ( pompe, machine-outil, convoyeur, grue, ...).

Le transfert de l'énergie peut se faire dans les 2 sens → Ceci suppose **la réversibilité du variateur**. IL se manifeste lors de certaines phases transitoires ou même en régime permanent lorsque la charge est entraînant, cas de freinage par exemple (conversion d'énergie mécanique en électrique).

## 4 - Caractéristiques mécaniques d'un groupe moteur-machine entraînée

### □ Les différentes phases du mouvement d'une machine

Tout mouvement connaît trois types de phases :

- ✓ des phases d'accélération lors du démarrage ou lors de toute augmentation de vitesse ;
- ✓ des phases de régime établi (permanent) lorsque la vitesse est stabilisée ;
- ✓ des phases de décélération lors du ralentissement précédant l'arrêt ou lors de toute autre réduction de vitesse.

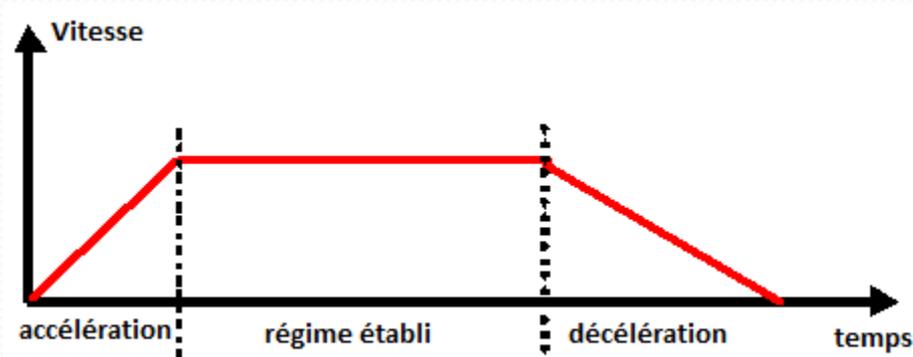


Figure 6 : Phases du mouvement d'une machine

## 4 - Caractéristiques mécaniques d'un groupe moteur-machine entraînée

*Ce qui conditionne le bon fonctionnement d'une machine c'est la capacité pour le moteur de fournir à tout instant l'effort nécessaire. Cet effort imposé à tout instant au niveau de l'arbre d'entraînement est le couple.*

### □ Le couple

*Tout moteur est un transformateur d'énergie : il transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, c'est à dire fournit **un couple** et **une vitesse** sur l'arbre.*

*De façon plus précise, disons qu'il prélève au réseau l'énergie qui est demandée par la charge qu'il entraîne.*

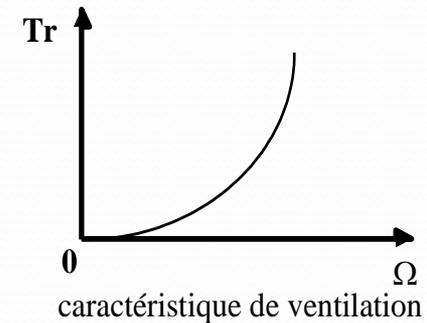
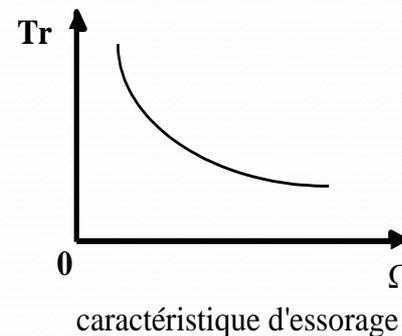
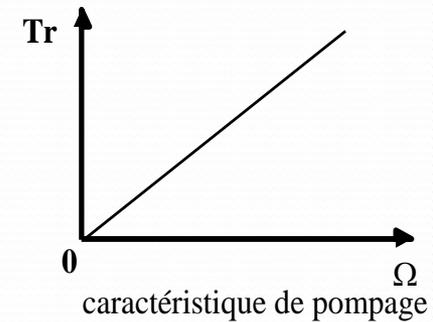
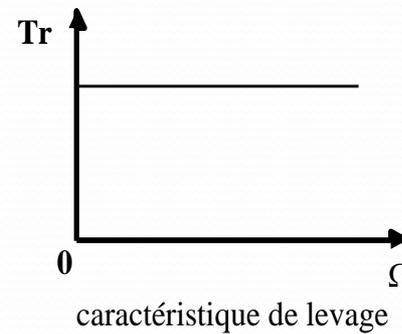
Les procédés industriels, dans la grande majorité des cas, demandent des couples constants dans la plus grande partie de la plage de variation de vitesse et, dans la partie restante, des couples variant en raison inverse de la vitesse.

## 4 - Caractéristiques mécaniques d'un groupe moteur-machine entraînée

### □ Le couple

La *caractéristique couple/vitesse* de la charge entraînée joue un rôle essentiel. On distinguera les charges caractérisées par un couple :

Couple proportionnel à	Puissance proportionnelle à	Exemples
$N^2$	$N^3$	Pompes Ventilateurs Compresseurs
Constant	$N$	Compresseurs Pompes à engrenages Laminaires Engins de levage
$1/N$	constante	Bobineuses Tours Dérouleuses



Diversité des couples

## 4 - Caractéristiques mécaniques d'un groupe moteur-machine entraînée

### □ Régime dynamique

Tout mouvement est régi par l'équation générale de la dynamique :  $T_{em} - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$

avec  $T_{em}$  : couple développé par le moteur ;

$T_L$  : couple résistant ;

$J$  : somme des moments d'inertie ramenés à l'arbre du moteur de toutes les masses en mouvements ( $\text{kg.m}^2$ ).

### ○ Régime établi

Le régime est établi lorsque la vitesse est constante, soit :  $\frac{d\Omega}{dt} = 0$  donc :  $T_{em} = T_L$

Il y a **équilibre** dynamique correspondant à l'égalité entre le couple moteur et le couple résistant.

### ○ Accélération :

C'est la phase de montée de la vitesse. Dans ce cas :  $\frac{d\Omega}{dt} > 0$  donc :  $T_{em} > T_L$

Le moteur doit donc développer un couple supérieur à celui qu'il développe en régime établi. Un **couple accélérateur**  $T_a$  est nécessaire pour vaincre l'inertie qui s'oppose à la variation positive de vitesse :

$$T_{em} > T_L \quad \text{d'où :} \quad T_a = T_{em} - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

## 4 - Caractéristiques mécaniques d'un groupe moteur-machine entraînée

### □ Régime dynamique

#### ○ Décélération :

C'est la phase de ralentissement où  $d\Omega/dt < 0$ . Trois cas peuvent se présenter :

#### 1. **Décélération naturelle :**

Dans ce cas la machine est laissée à elle même, le couple développé par le moteur est nul ( $T_{em} = 0$ ). Le ralentissement est produit uniquement par le couple résistant  $T_L$  de la machine.

#### 2. **Décélération lente :**

Le convertisseur d'énergie fonctionne en moteur mais il doit développer un couple moteur plus faible que le couple résistant :  $0 < T_{em} < T_L$ .

#### 3. **Décélération rapide :**

Pour avoir une décélération plus rapide que la décélération naturelle, on peut procéder de 2 façons :

- Produire un couple de freinage mécanique ;
- Inverser le sens du couple moteur ( $T_{em} < 0$ ) : freinage électrique.  
Dans ce cas le moteur fonctionne en mode générateur.

## 4 - Caractéristiques mécaniques d'un groupe moteur-machine entraînée

### □ Les quadrants de fonctionnement

Les différentes relations entre le couple et la vitesse sont représentés conventionnellement par les quatre quadrants de fonctionnement.

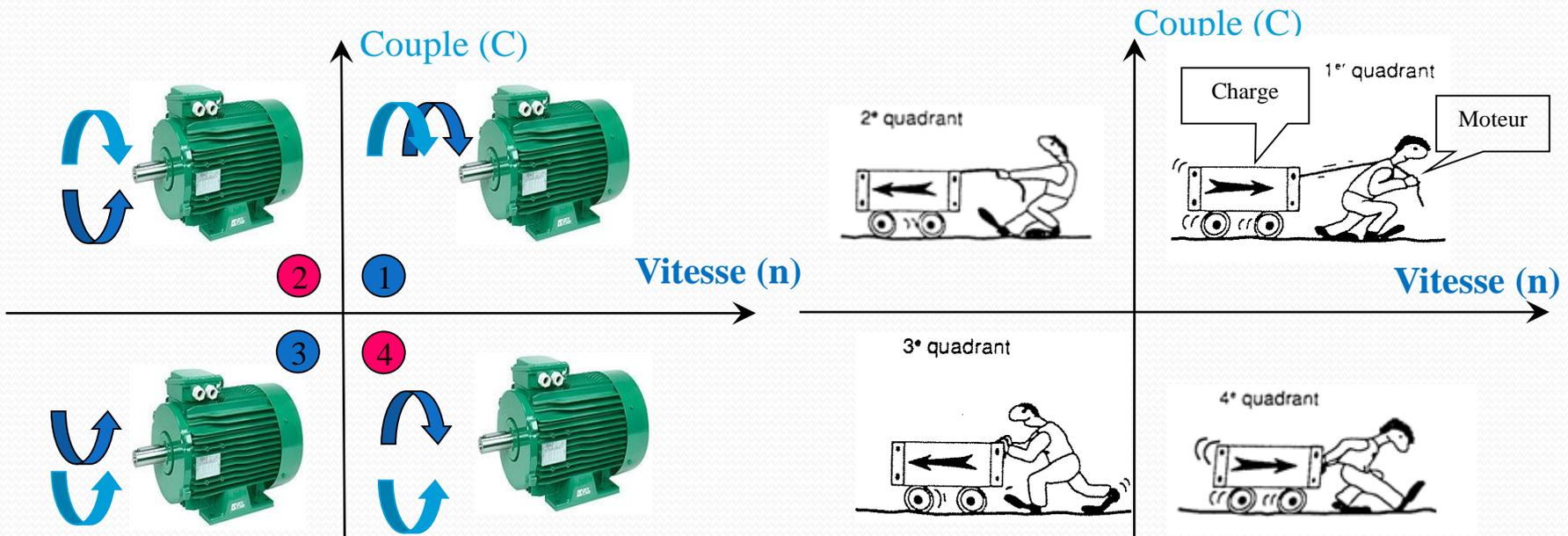


Figure 7 : Quadrants de fonctionnement

La définition des quadrants de fonctionnement trouve sa justification dans les besoins réels des processus industriels à inverser le sens de marche et à avoir des temps de freinages brefs. Elle permet de déterminer, de façon très simple, ***la réversibilité*** du variateur.

## 5 – Caractéristiques et fonctions d'un variateur de vitesse

### □ Caractéristiques idéales :

Le but d'un variateur de vitesse est de contrôler la vitesse des charges entraînées par un moteur. Ce contrôle doit assurer un **découplage entre la vitesse et le couple**. Autrement dit, c'est avoir la possibilité de faire varier le **couple indépendamment de la vitesse** et la **vitesse indépendamment du couple**. La figure 8 représente le réseau des caractéristique idéales d'un variateur-moteur.

Les moteurs sont le siège de différentes origines. Leurs caractéristiques couple/vitesse présentent toujours des pentes finies. Plus le réseau des caractéristiques est **proche du réseau idéal**, plus le procédé est **bon**. Pour avoir un réseau le plus proche du réseau idéal, il faut que la transformation apportée par le variateur à la caractéristique Couple/vitesse du moteur soit une **translation parallèle** à l'axe du couple.

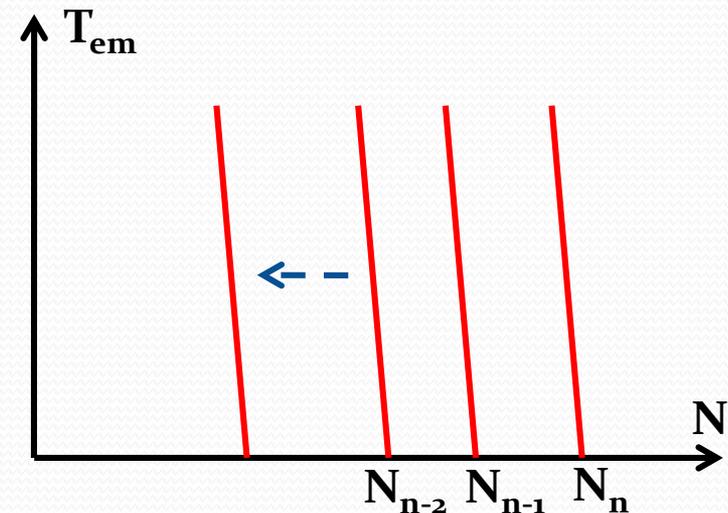


Figure 8 : réseau de caractéristiques idéales d'un ensemble variateur - moteur

## 5 – Caractéristiques et fonctions d'un variateur de vitesse

### ☐ Fonctions et structures

Selon la précision souhaitée, la fonction principale d'un équipement de variation de vitesse peut-être :

#### ✓ Une fonction de démarrage :

Un démarreur sert seulement à « lancer » une mécanique jusqu'à une vitesse donnée en douceur et en tenant compte du temps de démarrage imposé et de l'intensité absorbée. Il n'est pas nécessaire d'avoir une précision importante.

#### ✓ Une fonction de variation de vitesse :

Lorsque la précision souhaitée est compatible avec la précision propre de l'ensemble variateur – moteur, on utilise l'équipement électronique en boucle ouverte. La précision propre dépend du moteur et du variateur. En effet :

- Chaque moteur a une précision propre qui dépend de la pente de sa caractéristique :
  - Pour un moteur sans perte, c'est à dire ayant une caractéristique verticale, la précision est totale. La vitesse reste constante quelque soit le couple.
  - Plus la pente diminue, moins la précision est bonne .
- Le variateur peut conserver la précision propre du moteur, s'il permet de déplacer la caractéristique parallèlement à elle même dans la direction des vitesses.

#### ✓ Une fonction de variation et régulation de vitesse :

C'est le cas quand la précision propre du moto-variateur ne suffit pas. On doit alors asservir la vitesse du moteur. L'asservissement de la vitesse ne peut être utilisé sans d'autres précautions (limitation de courant).

## Choix d'un système d'entraînement :

Le *choix d'un système d'entraînement*  $\Leftrightarrow$  caractéristiques et conditions d'emploi.

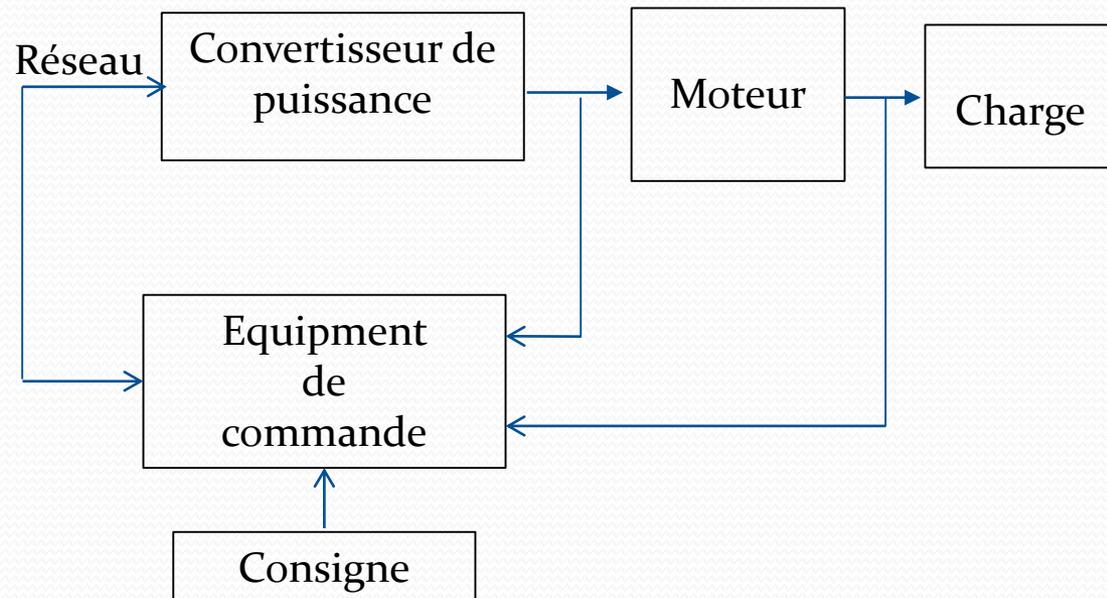
Puissance maximale, vitesse maximale, plage de réglage de la vitesse, caractéristique du couple/vitesse, performances dynamiques, synchronisation avec d'autres machines.

- Conditions d'environnement, possibilités d'entretien.
- Conditions provenant du réseau d'alimentation.
- Masse, encombrement.
- Coût d'investissement et d'exploitation.

## Classification des entraînements électrique :

D'une manière générale, un entraînement électrique à vitesse variable est formé :

- ✓ D'un convertisseur électronique de puissance
- ✓ D'un moteur électrique
- ✓ De la charge mécanique entraînée
- ✓ D'un équipement de commande



## Classification des entraînements électrique :

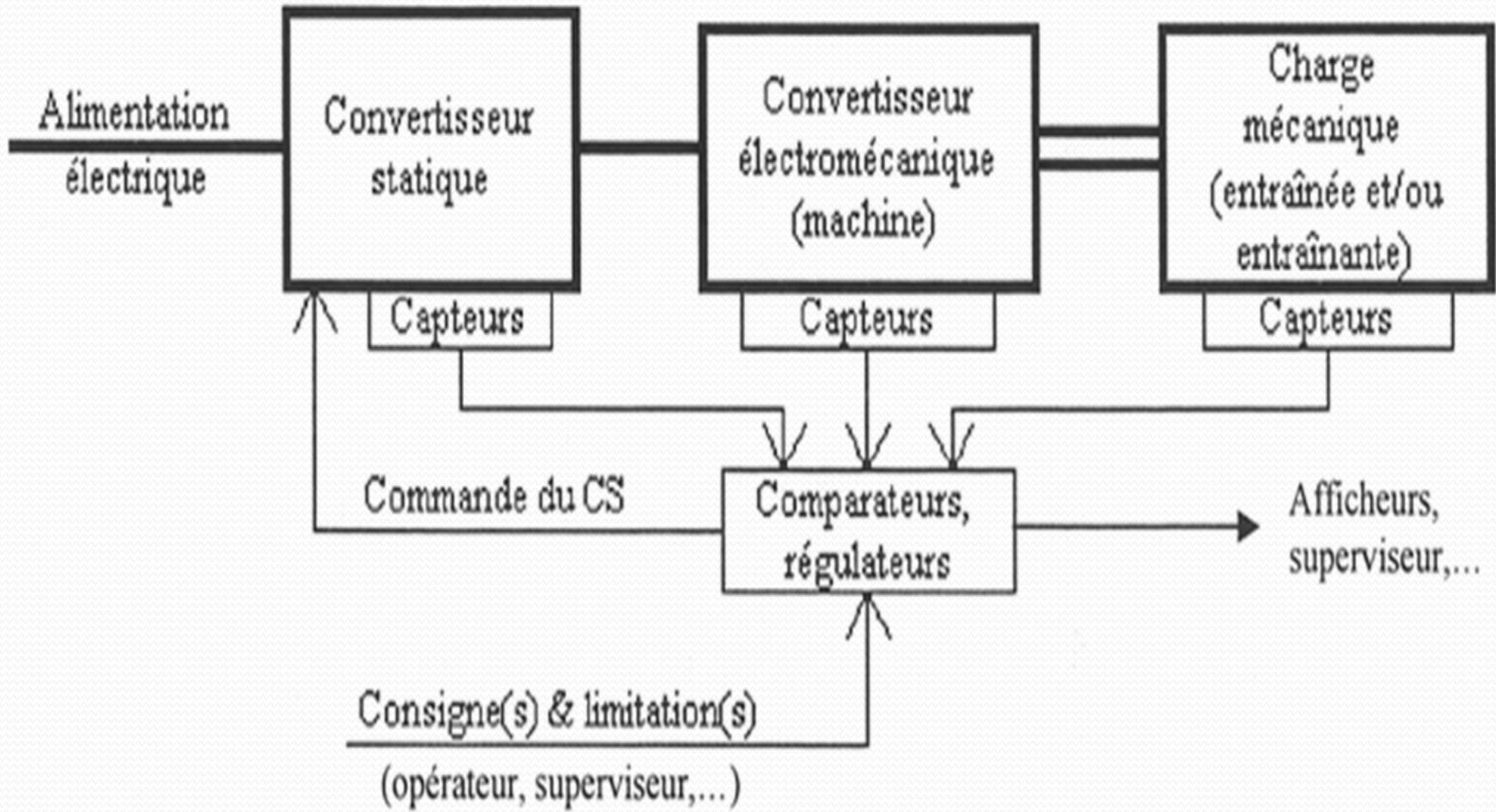
- ✓ Le convertisseur statique, alimenté par le réseau industriel, transforme la présentation de l'énergie électrique pour lui donner la forme désirée (tension, courant, fréquence). La mise au point de composants semi-conducteurs performants et l'amélioration de la maîtrise de leur fonctionnement ont permis de réaliser des convertisseurs délivrant, avec un excellent rendement et un faible temps de réponse, des signaux qu'on ne pouvait obtenir auparavant, tout au moins au niveau de puissance désirée,
- ✓ Le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique à la charge entraînée. On utilise depuis longtemps le moteur à courant continu qui se prête bien à la variation de vitesse (solution traditionnelle), mais qui voit son utilisation limitée par des contraintes technologiques et environnementales liées à la présence du collecteur → limites de vitesse et de puissance → Développement d'entraînements à vitesse variable avec machines sans collecteur.

L'évolution des semi-conducteurs permet maintenant la réalisation de convertisseurs électroniques de fréquence qu'on associe à des moteurs à courant alternatif, synchrones ou asynchrones, pour réaliser des entraînements à vitesse variable.

- ✓ L'équipement de commande élabore les signaux de commande des semi-conducteurs du convertisseur, à partir des consignes de pilotage du processus et des mesures de tension, courant, vitesse, couple accélération,... fournies par les divers capteurs placés à l'entrée et à la sortie du convertisseur et sur l'arbre du moteur.

Les progrès en matière de microinformatique ont joué un grand rôle dans l'évolution des variateurs de vitesse en permettant d'améliorer les performances et de réduire le nombre de capteurs nécessaires.

## Architecture d'un variateur électronique de vitesse :



FIN