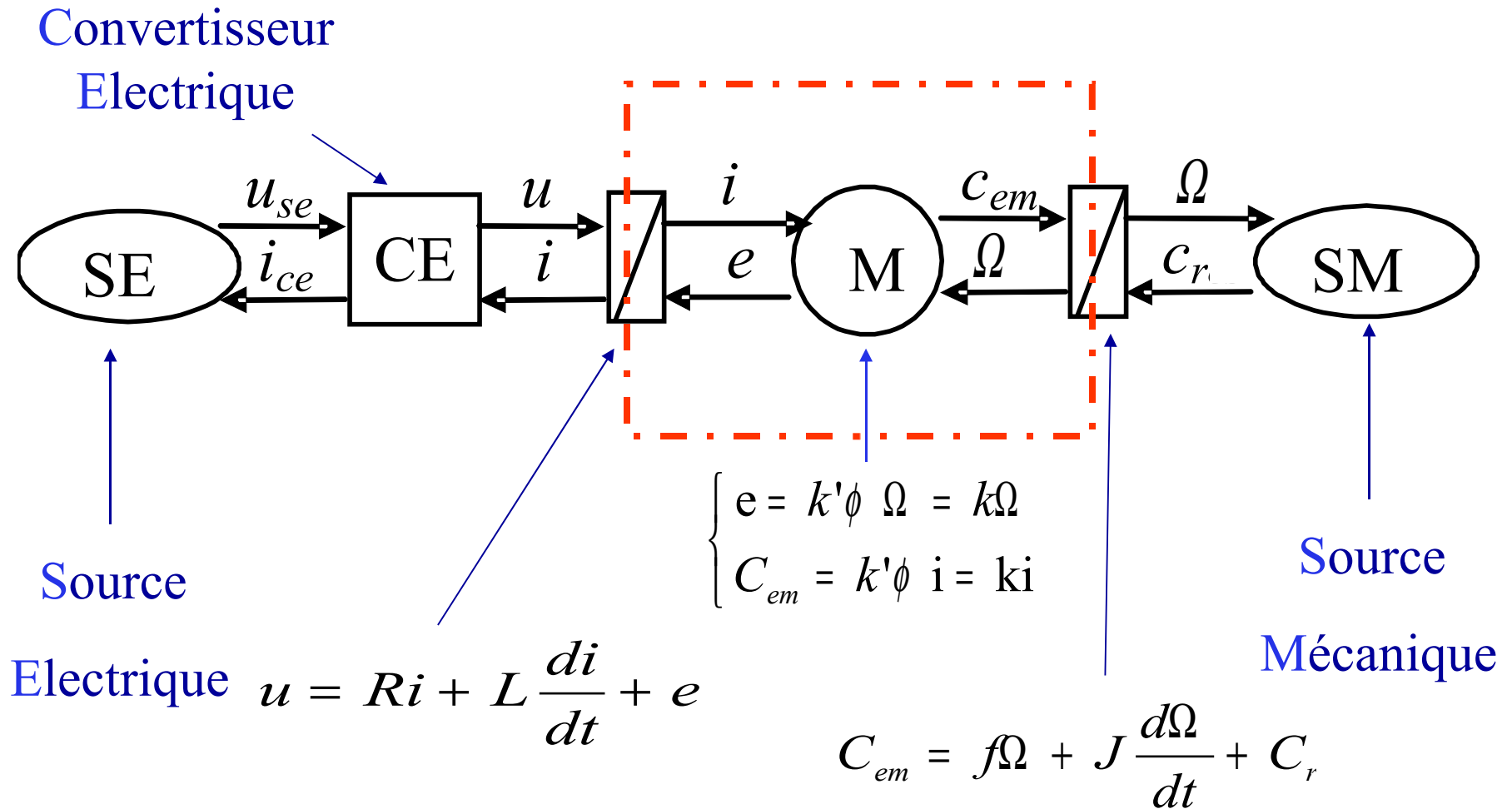




*Machine à courant continu en vitesse  
variable*

*Ponts à thyristors - hacheurs*

# Les équations et interactions avec l'extérieur






L: inductance de la mcc et de l'alimentation

J: moment d'inertie de la mcc et de la charge

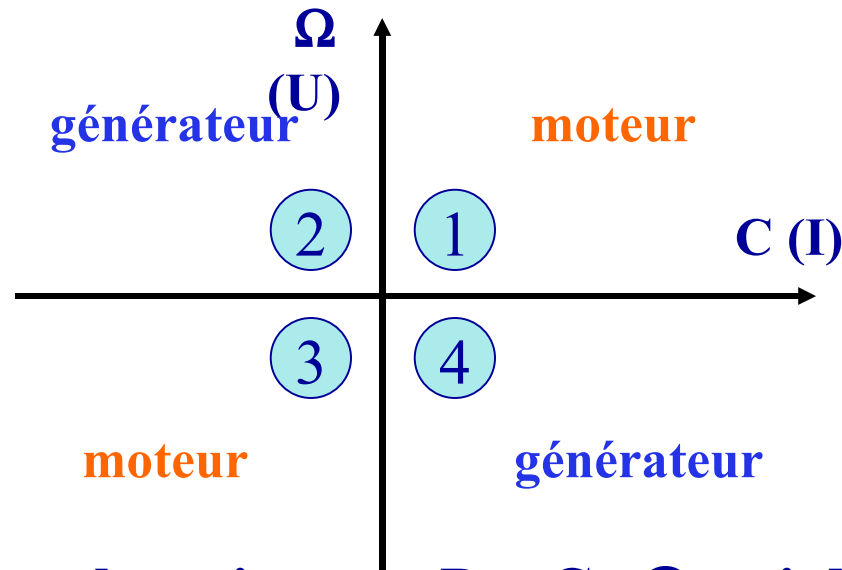
# **CARACTERISTIQUES ET QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT**

## Plaque d'identification d'un moteur à courant continu

IEC 34.1.1990		 <b>LERROY SOMER</b>		MADE IN FRANCE	
		<b>MOTEUR A COURANT CONTINU</b> <b>DIRECT CURRENT MOTOR</b>			
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10		9/1992	
M 249 kg		IM 1001		IP 23	
Classe / Ins class H		IC 06		Temp. 40 °C	
M <sub>nom</sub> / Rated torque 301 N.m		Arit. 1000 m		Temp. 40 °C	
	<b>kW</b>	<b>min<sup>-1</sup></b>	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>V</b>
Nom./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360
	3,63	115	44	9,55	360
	36,3	1720	440	95,5	240
T système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. / Field	
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3 ○	

Les grandeurs  $U$  et  $I$  sont positives ou négatives ;  
donc les grandeurs mécaniques sont positives ou  
négatives.

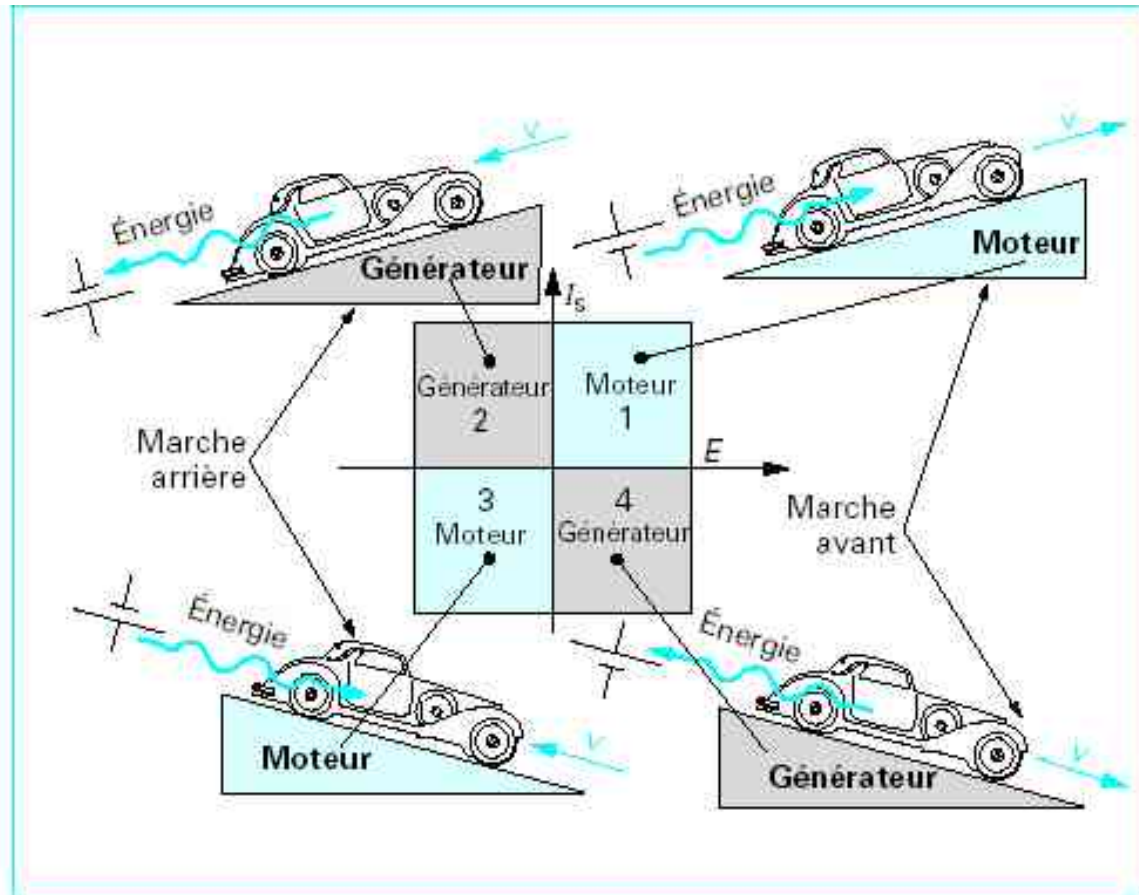
Cela définit les quadrants de fonctionnement  
mécanique et électrique.



C'est la puissance  $P = C \cdot \Omega$  qui définit  
la nature du fonctionnement.

**moteur**  $P > 0$

**générateur**  $P < 0$



Quadrants de fonctionnement pour une voiture électrique

Remarque

$$U \approx E = h I_f \Omega$$

$$C_e = k' \cdot \phi \cdot I = h \cdot I_f \cdot I$$

$$\Omega = \frac{U}{h I_f}$$

$I_f$  = courant d'excitation

## Commande à vitesse variable d'une MCC à Excitation séparée

Vitesse de rotation < Vitesse nominale :

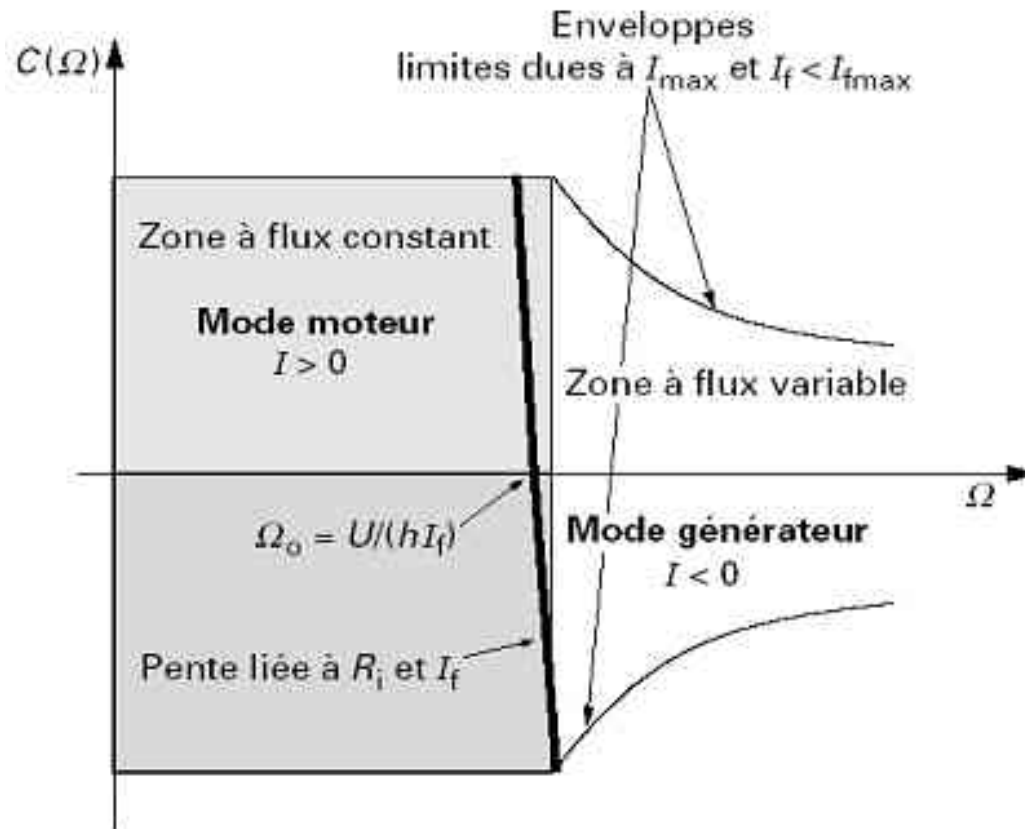
$I_f = I_{fmax}$  (Flux max)  $\Rightarrow$  U variable

Vitesse de rotation > Vitesse nominale :

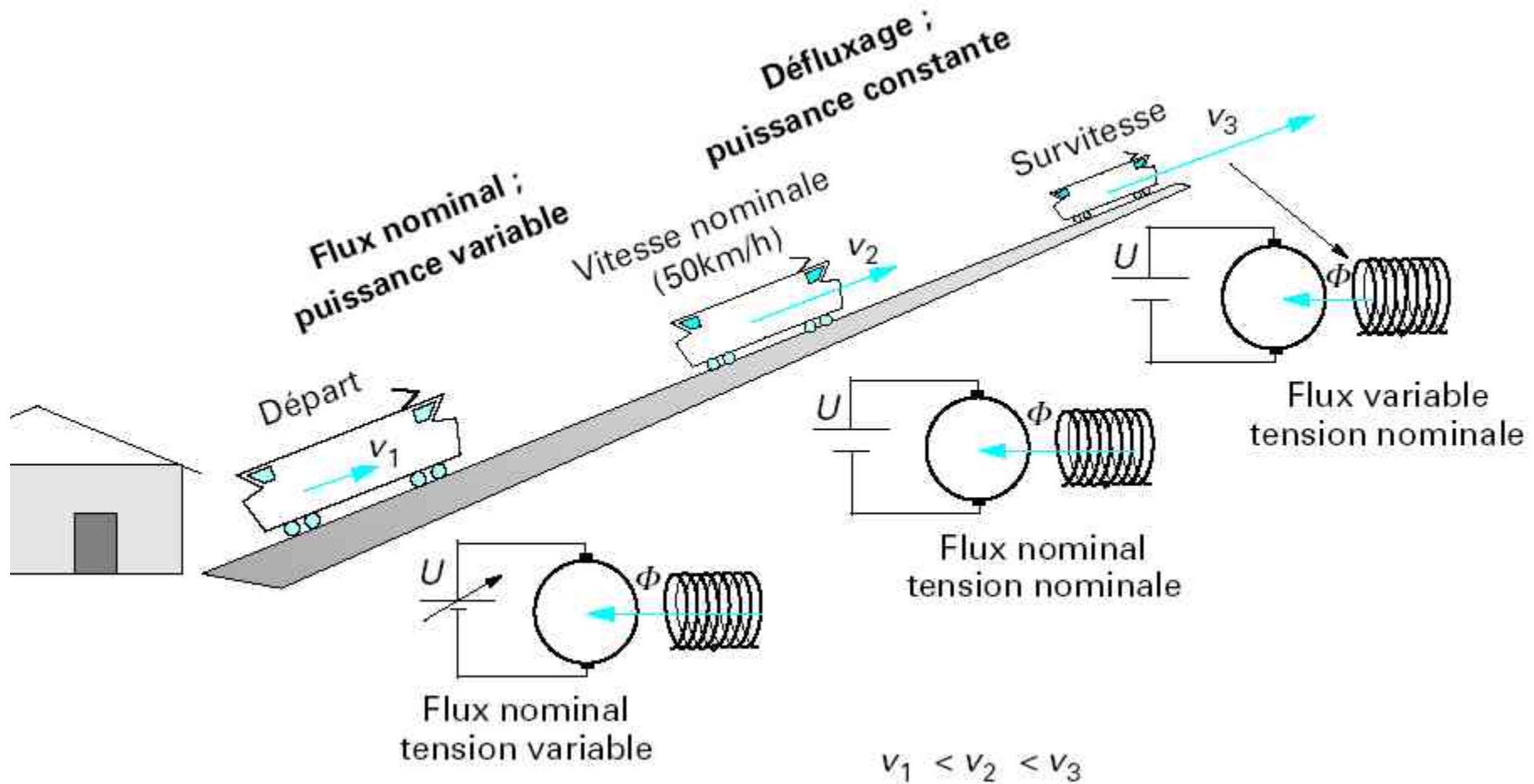
U=Umax :  $I_f$  variable (défluxage)

# Caractéristiques couple vitesse en excitation séparée

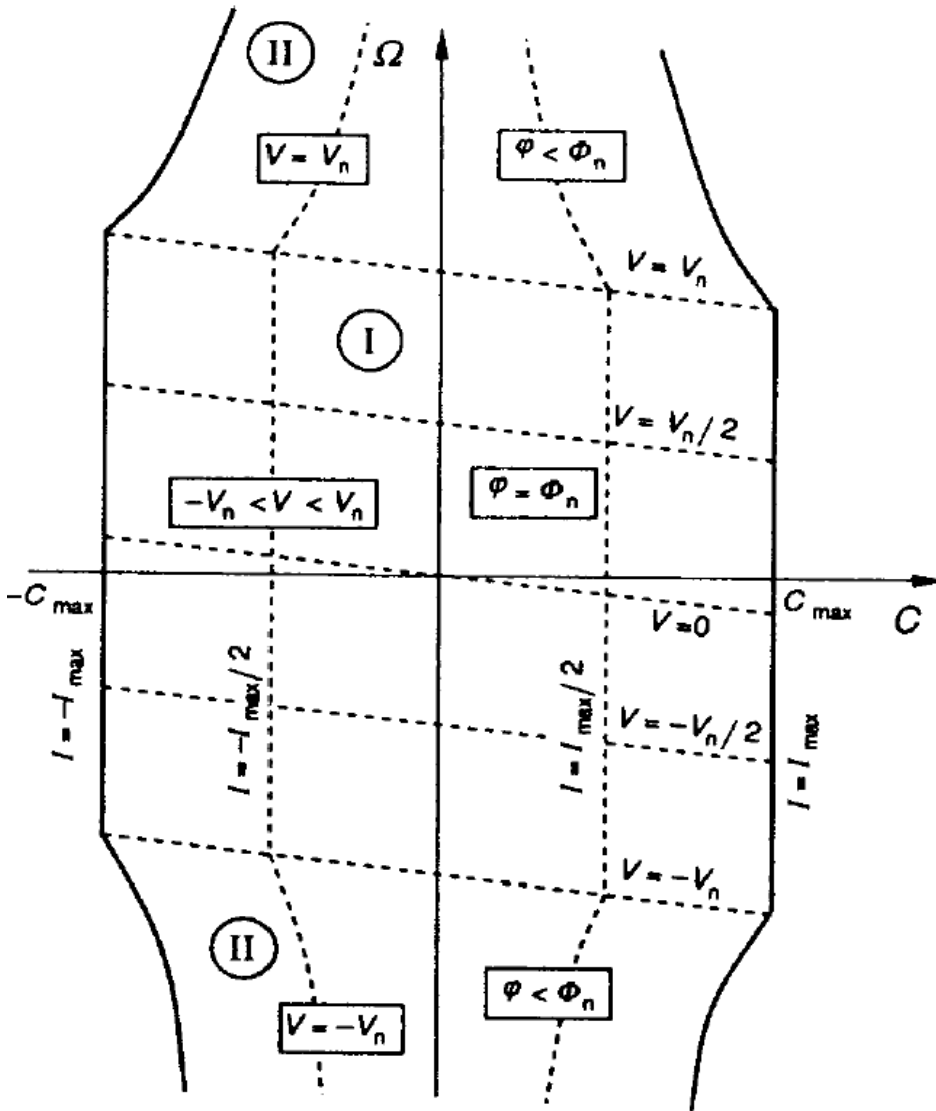
$$C_{\max} = h I_f I_{\max}$$





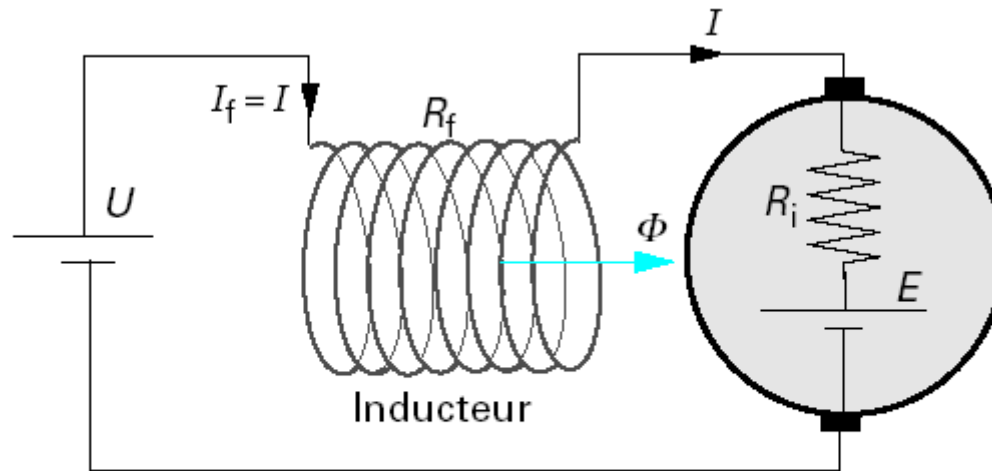


# Caractéristiques statiques Couple/vitesse



Travail à affaiblissement de flux pour les machines excitées par bobinage

# Moteur à Excitation Série



---

- **Excitation série**

$$E = h\Omega I$$

$$U = (R_i + R_f)I + E.$$

$$U - (R_i + R_f)I = h\Omega I$$

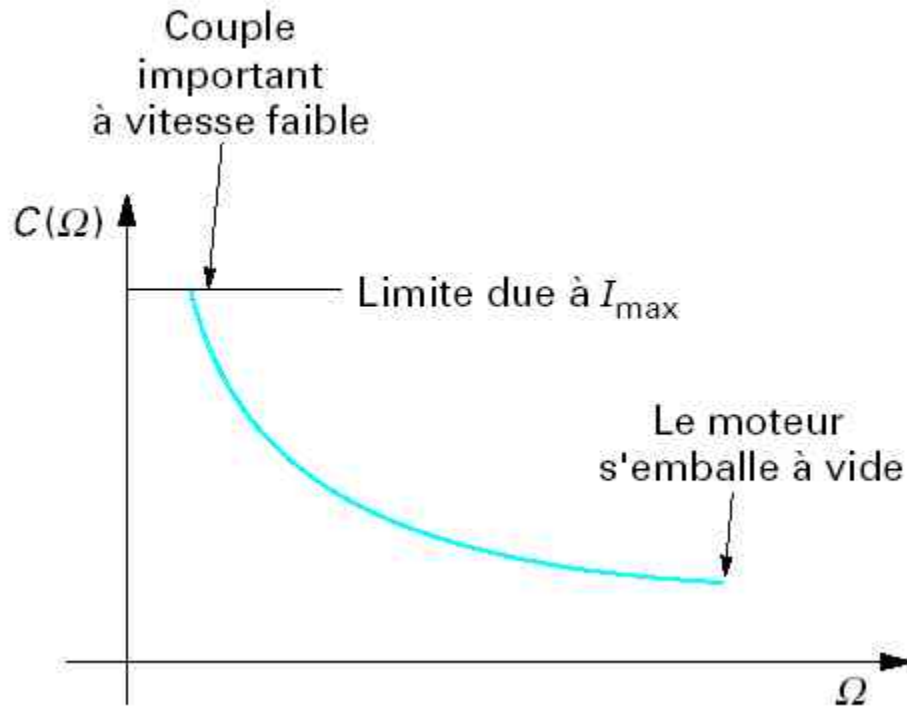
$$I = \frac{U}{(h\Omega + R_i + R_f)}$$

$$C = hI^2$$

$$I = \sqrt{C/h}$$

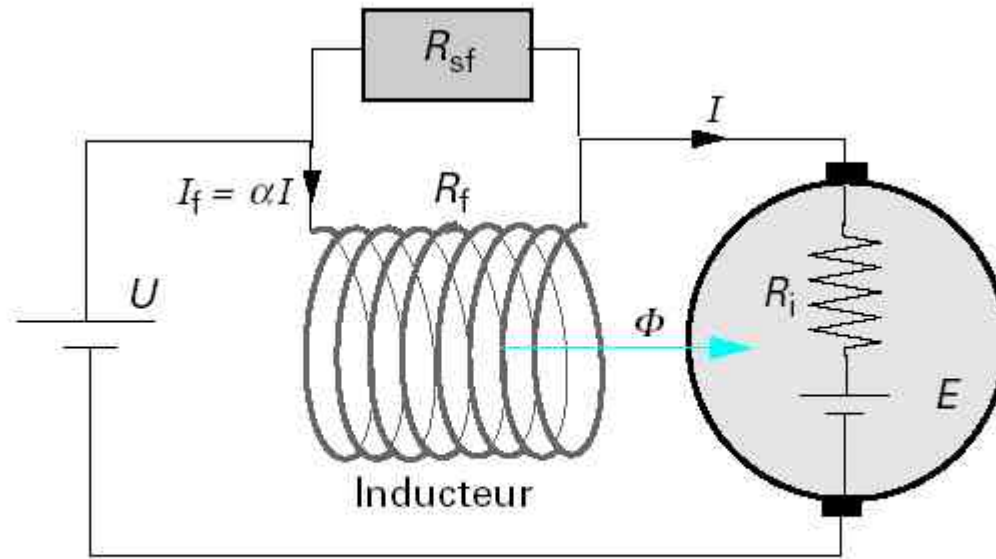
$$\sqrt{\frac{C}{h}} = \frac{U}{h\Omega + R_i + R_f}$$

$$C(\Omega) = h \frac{U^2}{(h\Omega + R_i + R_f)^2}$$



Si  $U$  augmente la courbe s'éloigne des axes.

## Possibilité de défluxage par dérivation d'une partie de I



$R_{sf}$  résistance de défluxage

Les courbes s'éloignent des axes quand  $\alpha$  diminue  $\Rightarrow$  survitesse

## Commande à vitesse variable d'un MCC à Excitation série

Vitesse < Vitesse nominale : Action sur  $U$  avec  $\alpha = 1$

Vitesse > Vitesse nominale : défluxage  $U = U_{\max}$  et  $\alpha$  varie

Machine très utilisée en traction

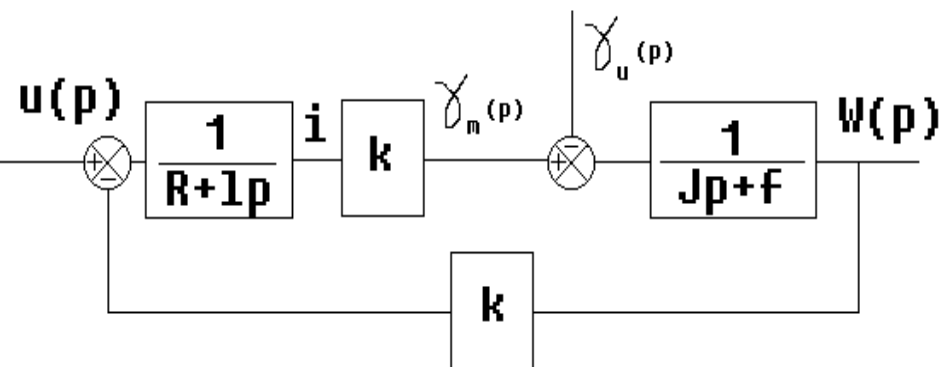
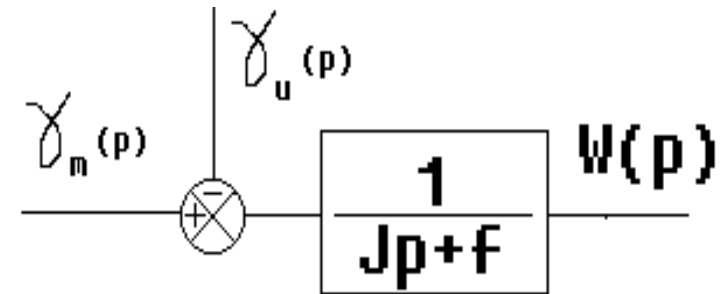
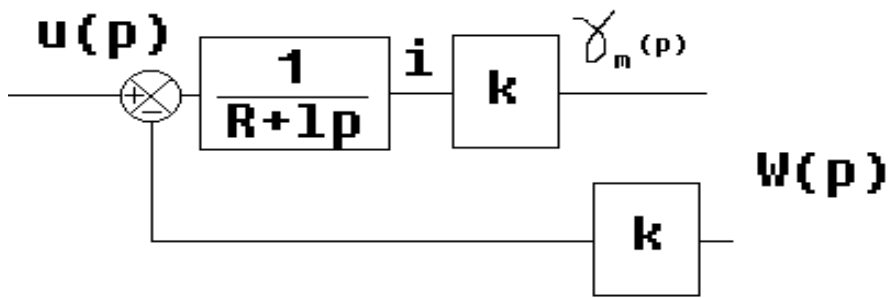
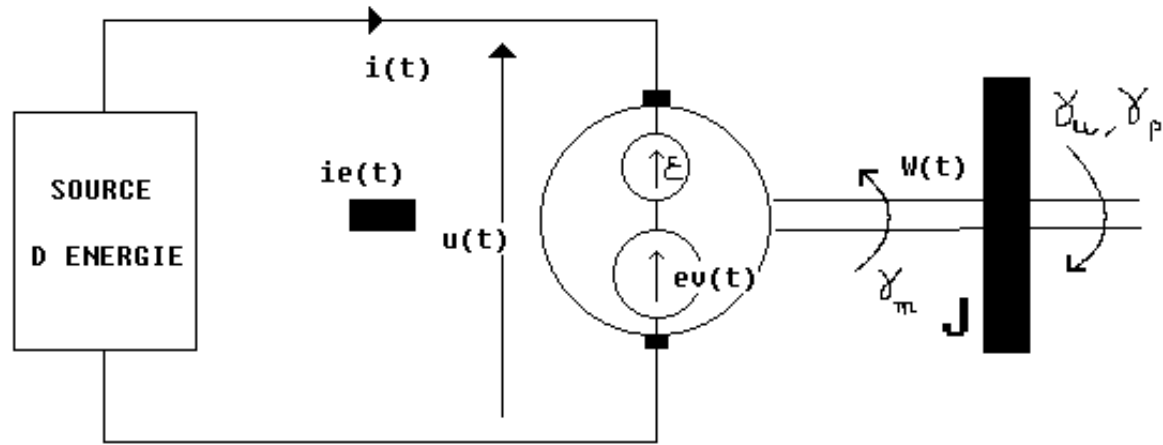
- Robustesse
- Résistance à une mauvaise régulation de courant
- Pb: emballement à vide

## Comparaison de différents type de MCC

Type de moteur	Avantages	Inconvénients
Excitation série	Fort couple au démarrage Vitesse variable Robustesse => Moteur de traction ferroviaire	Risque d'emballement à vide
Excitation indépendante	Commande en tension Vitesse variable	+ fragile que le moteur série : enroulement inducteur faible courant  Rem : Ce problème ne se pose pas dans le cas des MCC à aimants mais on ne peut pas régler l'excitation dans ce cas
Excitation shunt	Applications à vitesse constante ( $\Leftrightarrow$ excitation indépendante avec U et If constant)	moins apte à la variation de vitesse que la MCC à Excitation indépendante
Excitation compound	En désuétude	
Moteurs monophasés à collecteur	Moteurs à excitation série alimentée en tension alternative => petit électroménager ( ce ne sont pas des MCC mais leur constitution est semblable) => même problèmes de maintenance	

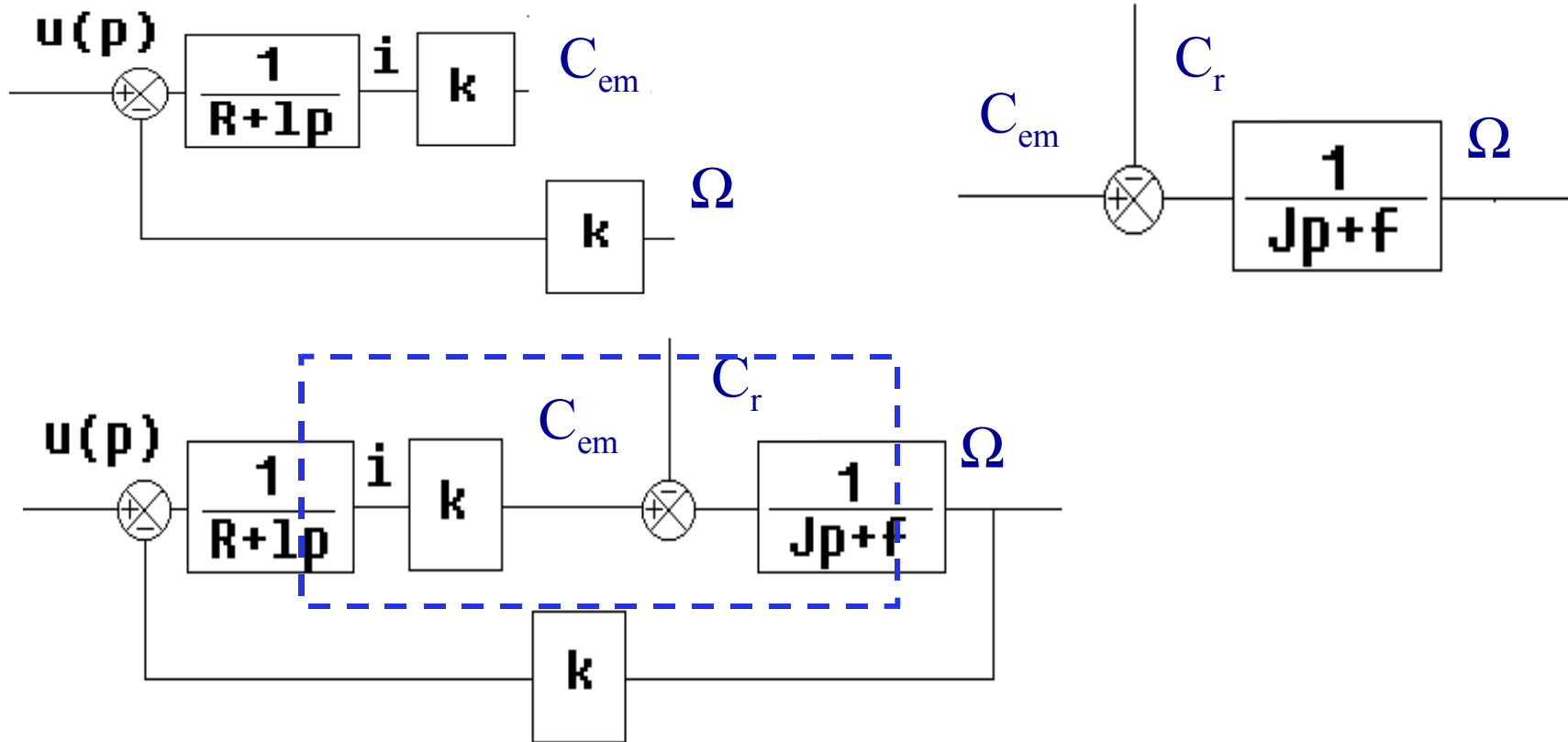
# **SCHEMA FONCTIONNEL DE LA MACHINE**





- $u(t)$ : tension aux bornes du moteur
- $i(t)$ : courant d(induit
- $i_e(t)$ : courant d'excitation s'il n'y a pas d'aimant .
- $e_v(t)$ : force électromotrice " à vide"
- $e(t)$  : chute de tension en charge
- J: moment d'inertie du groupe tournant
- $\gamma_p$  : couple de pertes
- $\gamma_v$  : couple "utile"
- $\gamma_m$  : couple moteur
- $W(t)$ : vitesse angulaire

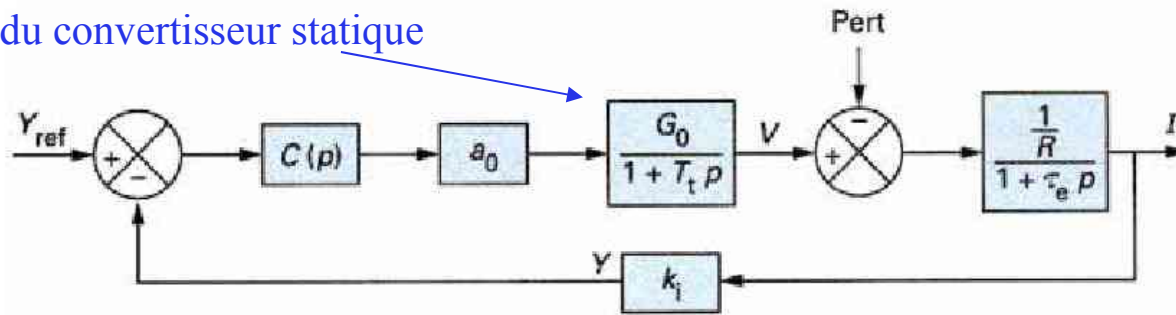
## Représentation par schéma bloc



Un premier ordre perturbé par une force contre électromotrice ...<sub>18</sub>  
lentement variable

# ASSERVISSEMENTS

## Gain du convertisseur statique



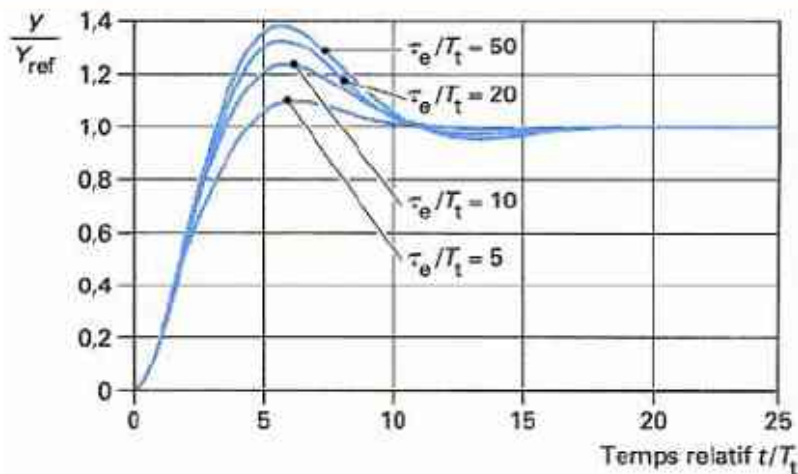
PI

$$\tau = 4T_t$$

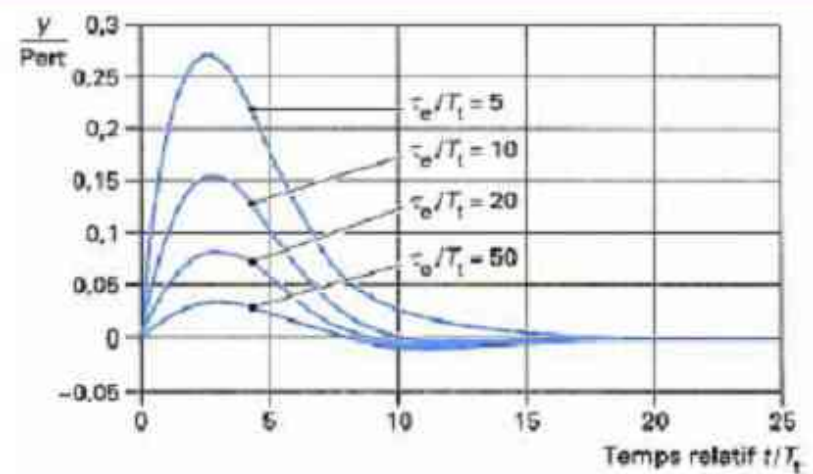
$$\tau_i = 8 \mathcal{K} T_t^2 / \tau_e$$

$$H_{BO}^*(p) = \frac{1 + \tau p}{\tau_i p} \frac{\mathcal{K}}{1 + T_t p} \frac{1}{\tau_e p}$$

Méthode de la réponse harmonique symétrique dite aussi de Kessler

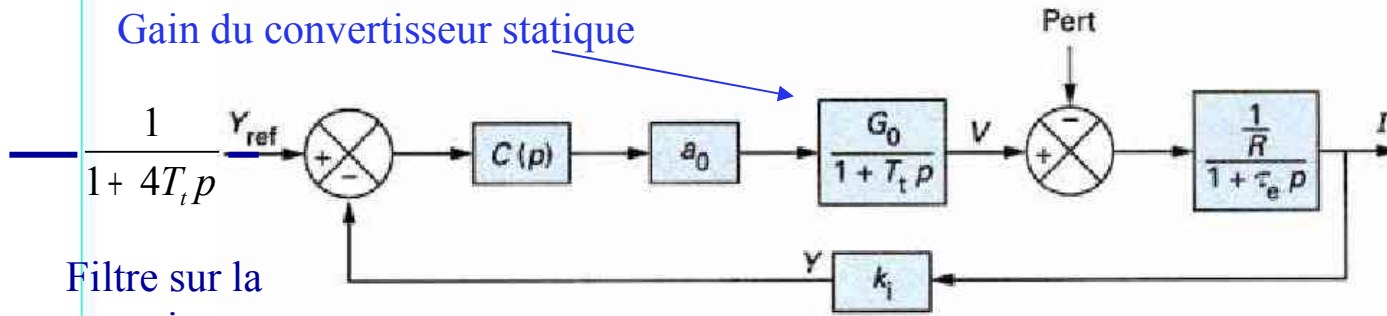


Optimum symétrique : réponse à un échelon de consigne



Optimum symétrique : réponse à un échelon de perturbation

Gain du convertisseur statique



Filtre sur la consigne

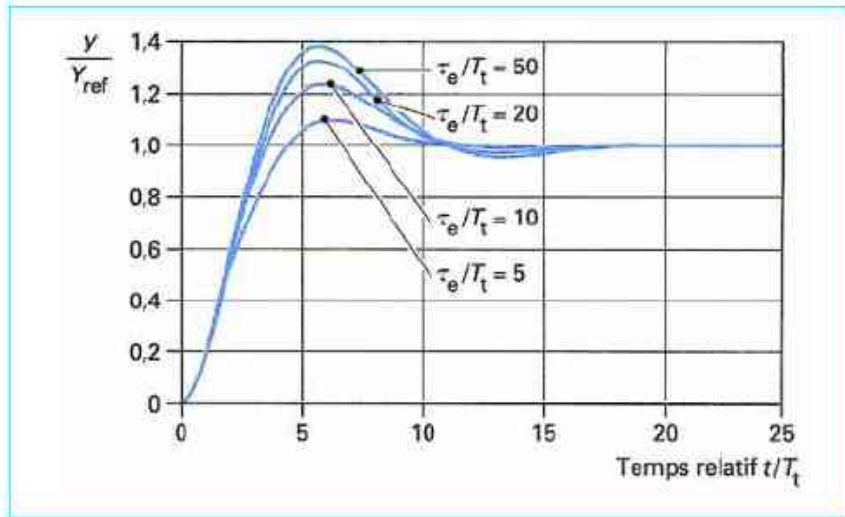
PI

$$\tau = 4T_t$$

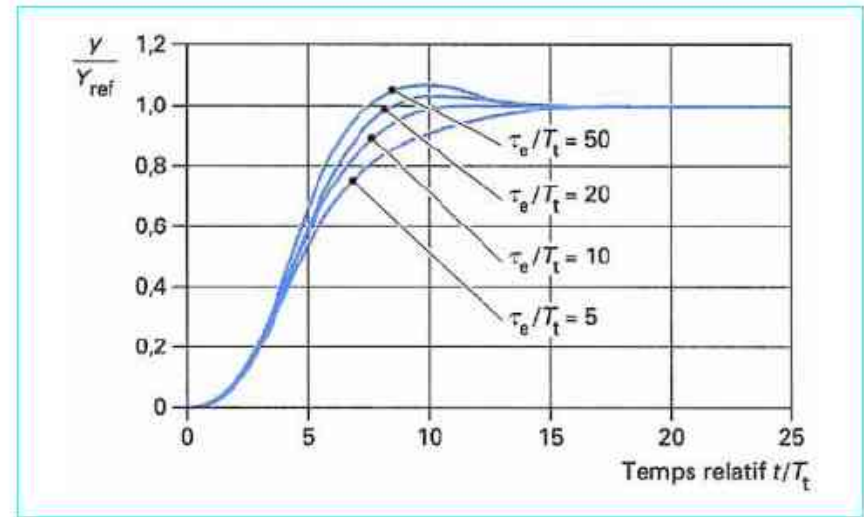
$$\tau_i = 8 \mathcal{K} T_t^2 / \tau_e$$

$$H_{BO}^*(p) = \frac{1 + \tau p}{\tau_i p} \frac{\mathcal{K}}{1 + T_t p} \frac{1}{\tau_e p}$$

Méthode de la réponse harmonique symétrique dite aussi de Kessler



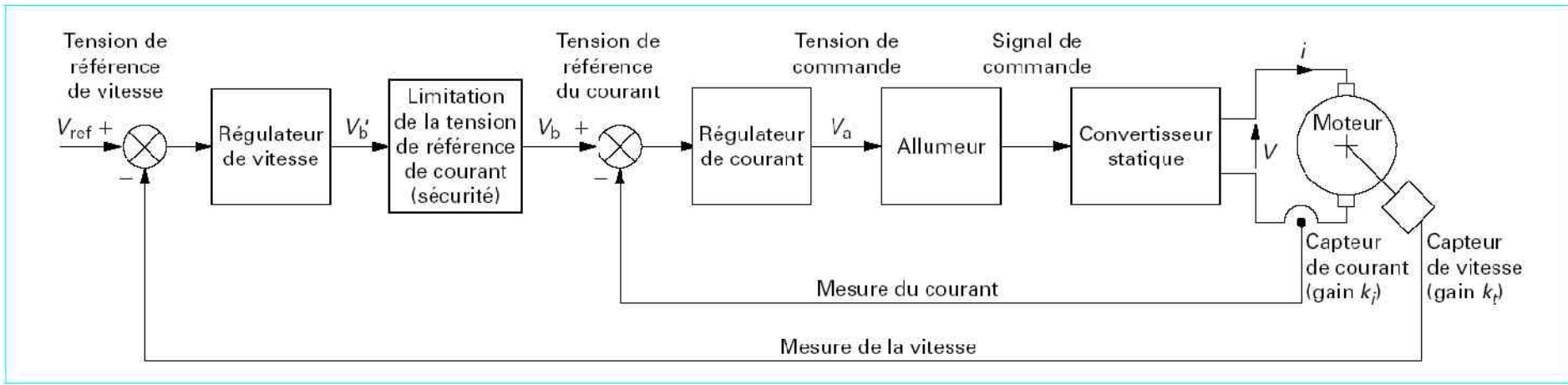
Optimum symétrique : réponse à un échelon de consigne



Optimum symétrique : réponse à un échelon de consigne, avec modèle de référence

# Structure de commande usuellement adoptée

« Boucles imbriquées », « cascade »



Structure d'un variateur de vitesse à régulations en cascade

Extrait des techniques de l'Ingénieur D 3 610

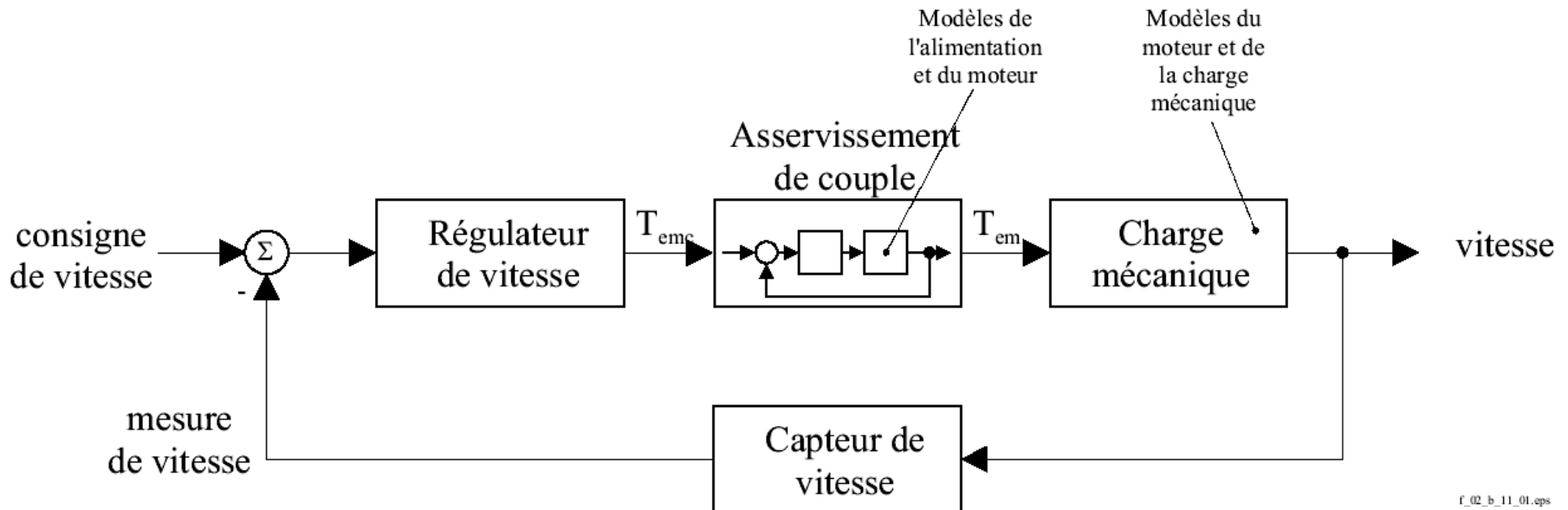
Intérêts:

- on règle tout d'abord la boucle « interne »...de courant puis la boucle de vitesse...par une même méthode
- on peut régler facilement des limitations de courant « absolument nécessaire » dans le domaine de la puissance: **protection**

## Réglage du correcteur de vitesse:

- étant donné que la boucle de courant a été réglé pour se comporter comme grossièrement un premier ordre
- étant donné que l'on a un premier ordre mécanique
- On applique la même méthode de réglage...c'est FINI!!

f\_02\_b\_11\_03.eps



f\_02\_b\_11\_01.eps

## Limites de la méthode:

- Il faut que les constantes de temps électrique et électromécanique ne soient pas trop proches l'une de l'autre (**minimum** un rapport 2).

$$T_{em} = \frac{RJ}{k^2 + Rf} = \frac{J}{f}q \qquad T_e = \frac{\ell}{R}$$

- Attention ces différents coefficients dépendent aussi de la charge et de l'alimentation.

## Résultat

Temps de réponse à 5 % de l'ordre de  $10^* 10^* T_t$  !!!

Mais au fait que vaut  $T_t$ ?



## Valeur approchée de $T_t$

- Pour un hacheur de période de hachage  $T_h$ :  $T_t$  à peu près  $2T_h$
- Pour un pont tout thyristors PD3:  $T_t$  à peu près 7 ms

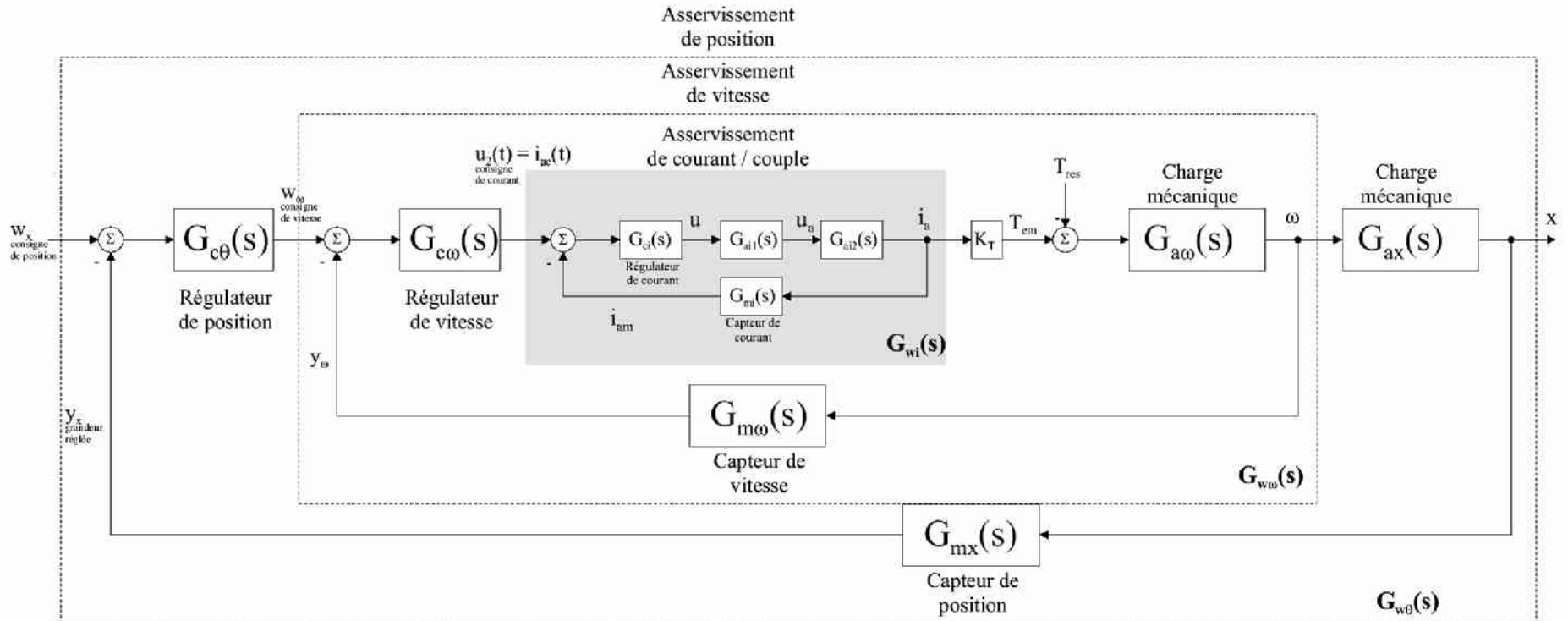
(quelques ms en plus ou en moins selon la technique de contrôle du pont)

Note: si la constante de temps du capteur de courant n'est pas négligeable devant  $T_t$  il faut l'ajouter à  $T_t$  pour obtenir la nouvelle valeur de  $T_t$

**Conclusion:** la bande passante de l'asservissement est conditionnée par  $T_t$ .

Si on veut un temps de réponse en vitesse de 50ms...il faut  $T_h=500 \mu\text{s}$  minimum ...2 kHz...et un pont PD3 à thyristor ne peut convenir.

# Pour un contrôle en position une troisième boucle



f\_01\_d\_04.eps

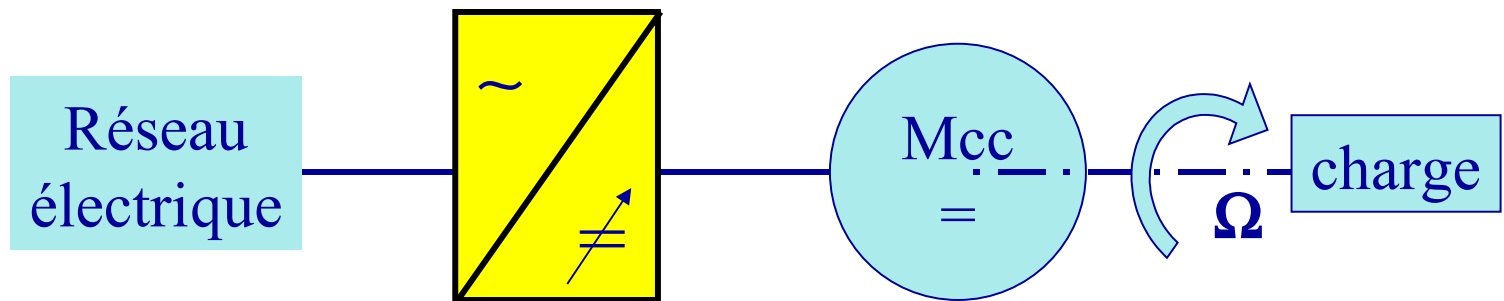
# STRUCTURES DES VARIATEURS

## **Plusieurs critères sont à prendre en compte :**

- Nature de la source d'énergie (continue ou alternative) ;
- type de source d'entrée et de sortie (tension ou courant);
- 1 ou 2 sens de rotation ;
- charge entraînant ou non ;
- freinage naturel ou forcé ;
- puissance du moteur ;
- le moteur fonctionne en couple ou en vitesse ;
- etc....

**La structure interne des variateurs est liée à ces critères.**

# Alimentation par le réseau



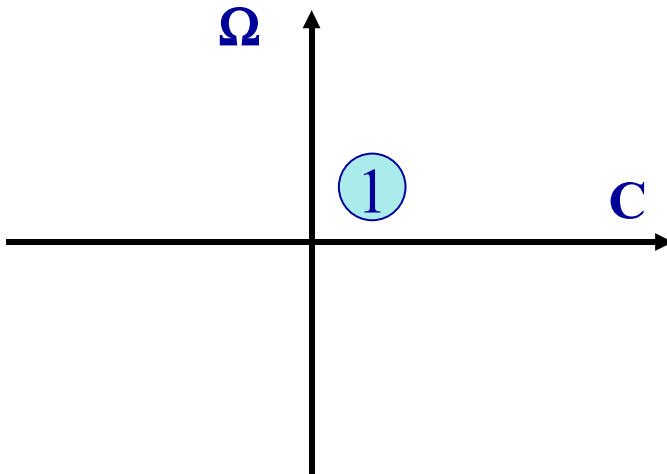
**Le variateur est un redresseur commandé :**

- soit avec un ou deux ponts mixtes ;
- soit avec un ou deux ponts complets.

# Alimentation par le réseau monophasé

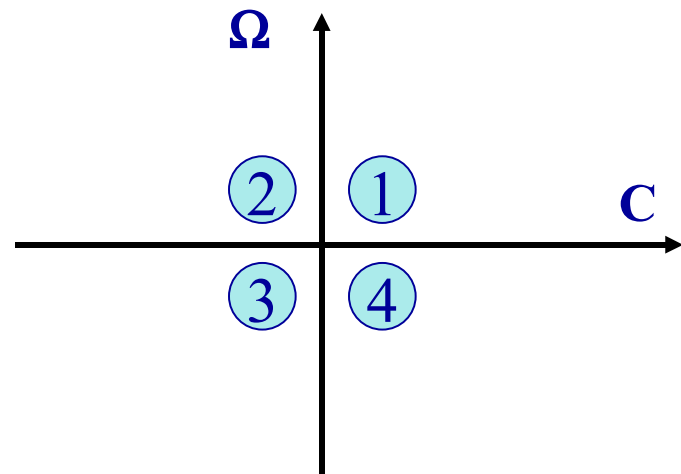
**P < 10 kW**

**Pont PD2 mixte**



**0,65 ..... 9,3 kW**

**Double pont PD2 complet**



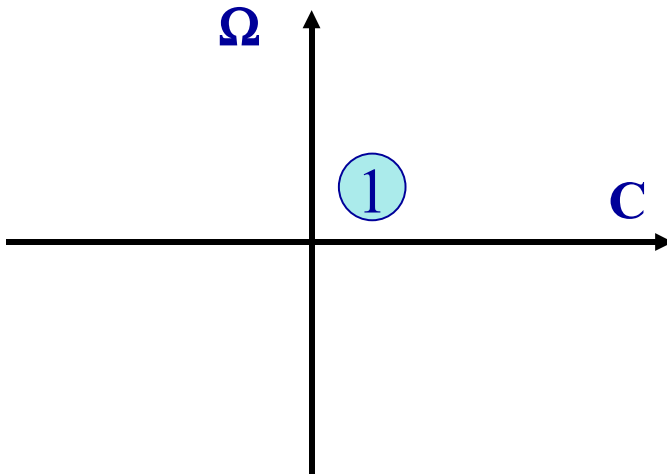
**0,6 ..... 8,6 kW**

Source Schneider Électrique gamme Rectivar

# Alimentation par le réseau triphasé

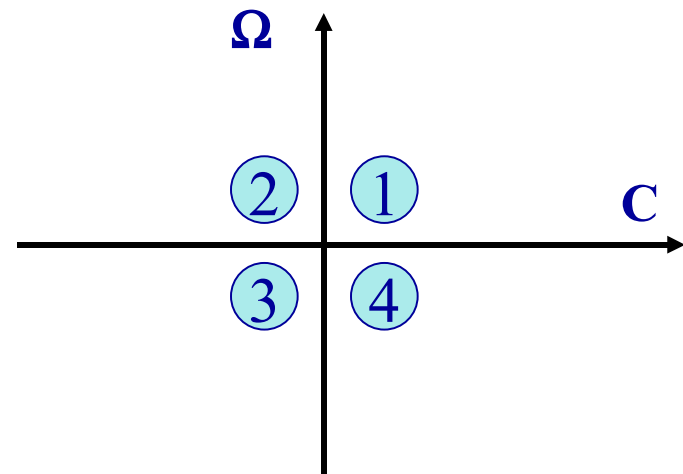
**P > 3 kW**

**Pont PD3 mixte**



**6 ..... 1690 kW**

**Double pont PD3 complet**



**2,7 ..... 1530 kW**

# Avec un pont mixte

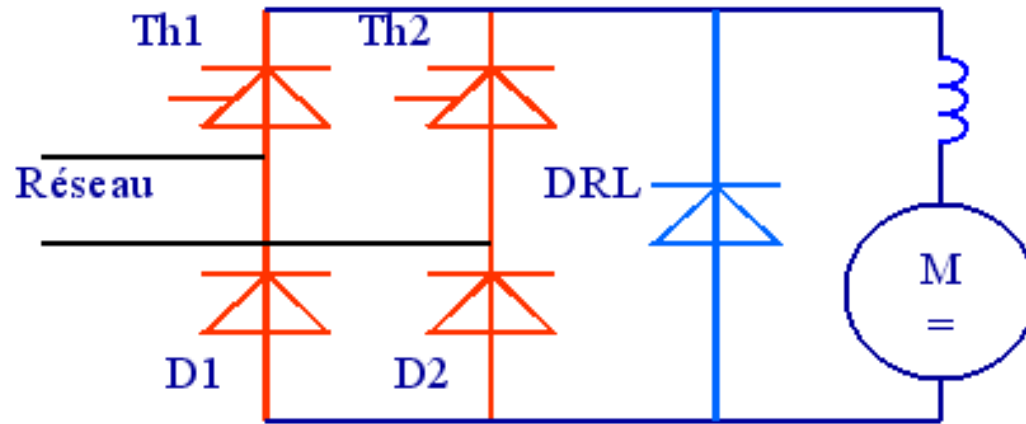
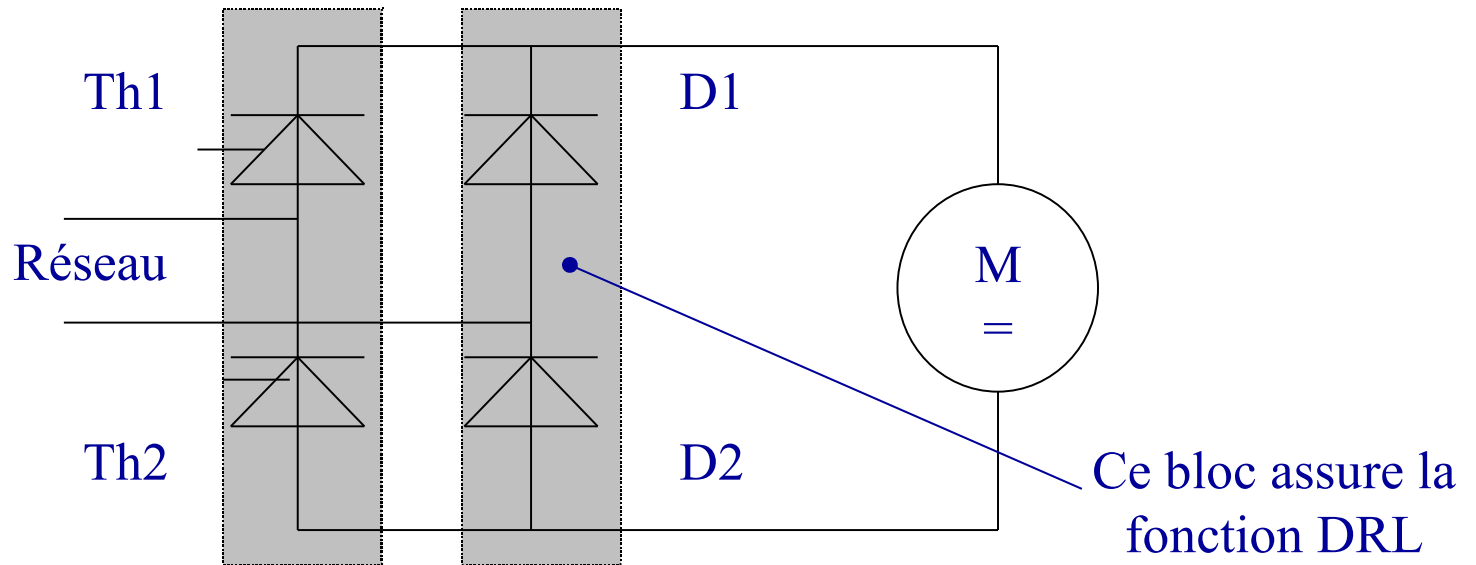


Schéma de principe

- Les I.S (interrupteur statique) sont unidirectionnels en courant (non réversible en couple).
- Un seul sens de rotation car le courant et la tension en sortie du pont sont unidirectionnels.
- 1 seul quadrant de fonctionnement (N°1).
- Montage utilisé lorsqu'il y a aucune contrainte de freinage.



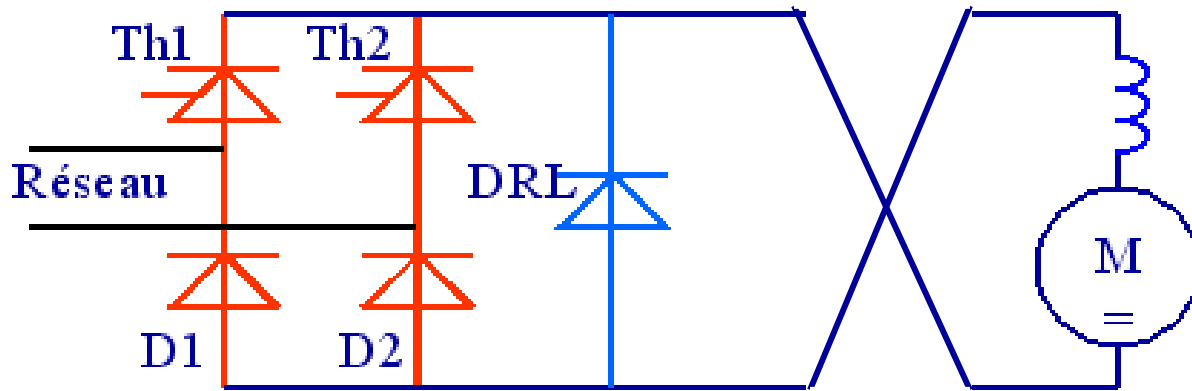
Industriellement on utilise plutôt la structure suivante.



**Les zones ombrées représentent des blocs intégrés.**

## Si on veut un 2<sup>ème</sup> sens de rotation moteur

### 1<sup>ère</sup> solution



Il faut croiser les connexions sur le moteur par :

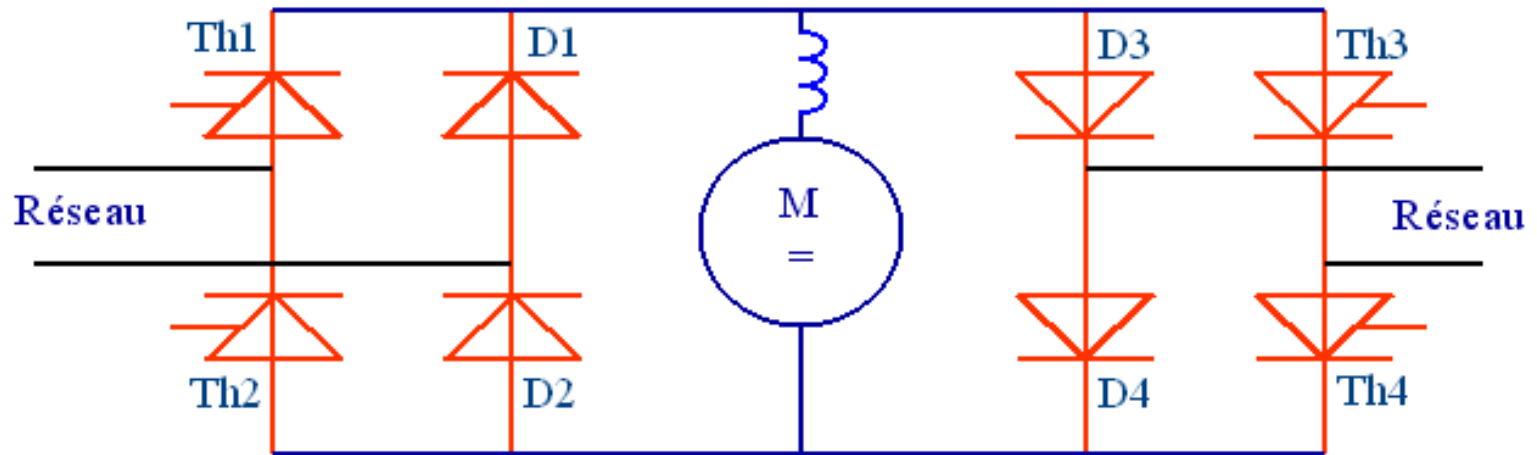
- inversion de polarité sur l'induit (par contacteur);
- inversion de polarité sur l'inducteur à l'arrêt uniquement.

→ **2 quadrants de fonctionnement (N°1 et 3);**

→ **Les conclusions précédentes restent identiques.**

## 2<sup>ème</sup> solution

### Deux ponts mixtes têtes bêtes



→ 2 quadrants de fonctionnement (N°1 et 3).

# Avec un pont complet

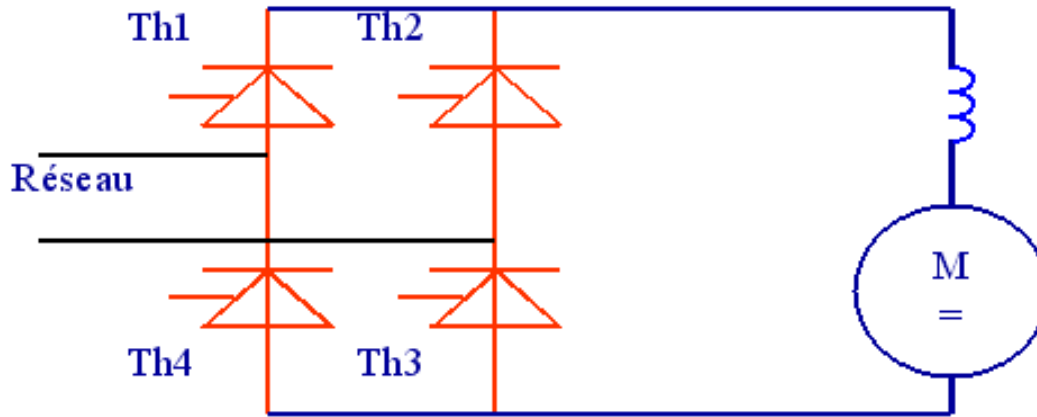
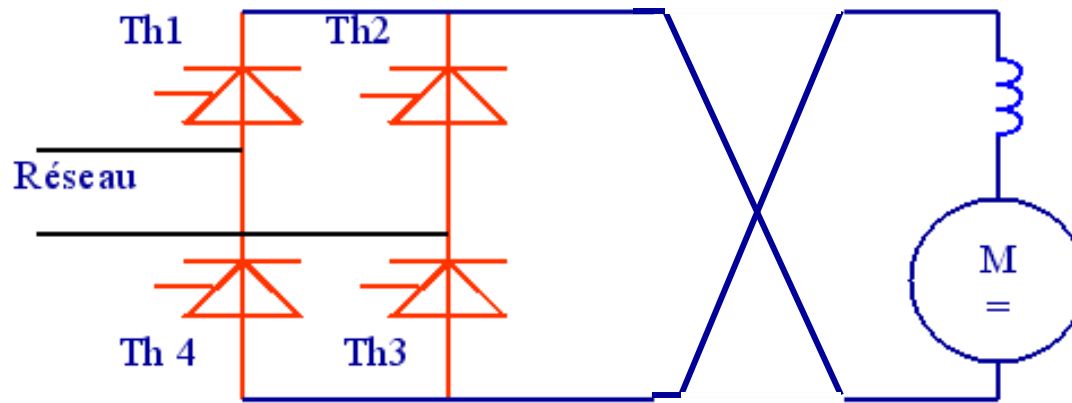


Schéma de principe

- Les I.S sont unidirectionnels en courant (non réversible en couple).
- A la sortie du pont, le courant est unidirectionnel et la tension peut être positive ou négative);
- 1 sens de rotation;
- 2 quadrants de fonctionnement (N°1 et 2);
- Freinage (quadrant N°2: fonctionnement en onduleur non autonome)

## Si on veut un 2<sup>ème</sup> sens de rotation moteur

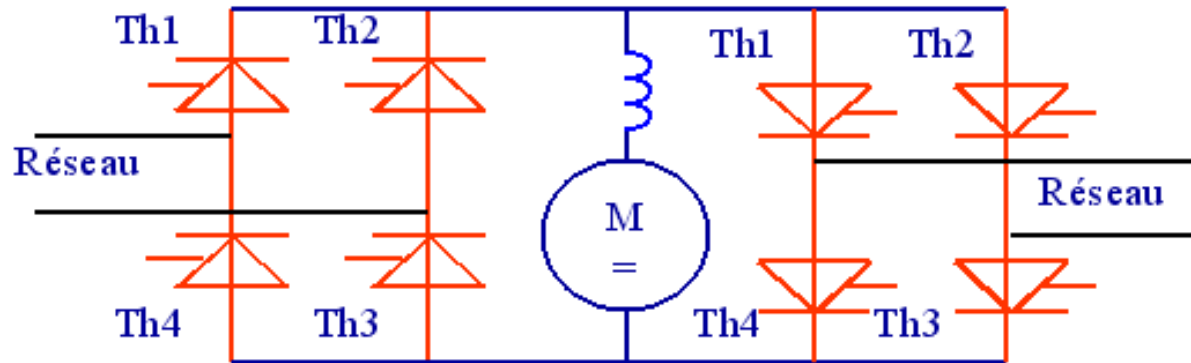
### 1<sup>ère</sup> solution



- Les I.S. sont unidirectionnels en courant;
- 2 sens de rotation;
- 4 quadrants de fonctionnement;
- Freinage (quadrant N°2 et 4).

Il faut croiser les connexions sur le moteur (inversion de polarité) à l'aide d'un contacteur.  
Solution peu retenue industriellement.

## 2<sup>ème</sup> solution double pont



- Les I.S. sont unidirectionnels en courant
- 2 sens de rotation.
- 4 quadrants de fonctionnement
- Freinage (quadrant N°2 et 4).

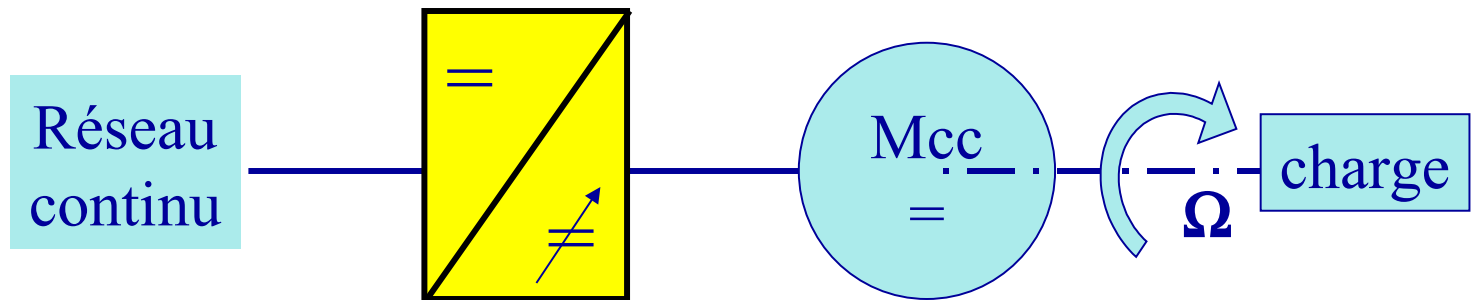
Il faut gérer le passage de la conduction d'un pont sur l'autre (passage Q2 ↔ Q3 et Q1 ↔ Q4)

Industriellement le pont complet n'est utilisé que dans le cas où la récupération d'énergie est possible (levage, traction,....).

De plus le facteur de puissance d'un pont mixte est supérieur à celui d'un pont complet.

Le dimensionnement des constituants sera mieux optimisé.

# Alimentation continue



**Le variateur est un hacheur élévateur ou abaisseur.**

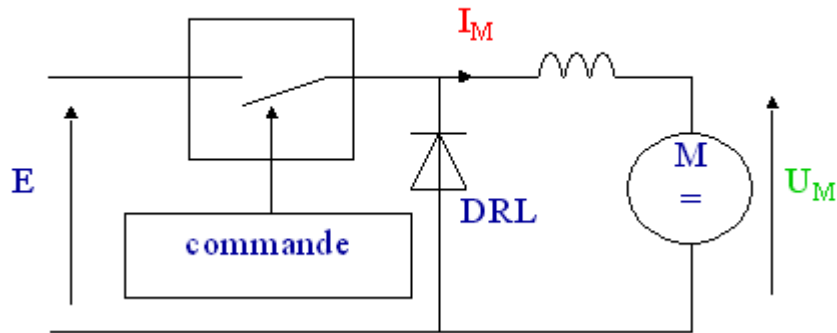
**Le réseau continu provient :**

- soit de batteries;
- soit d'un redresseur à diode.



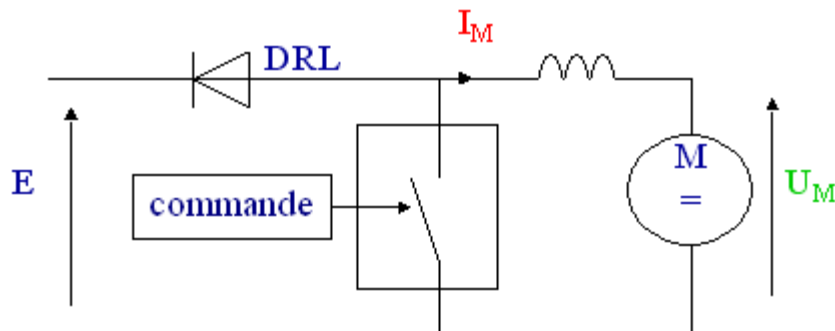
# Principes du hacheur

HACHEUR SERIE OU DEVOLTEUR



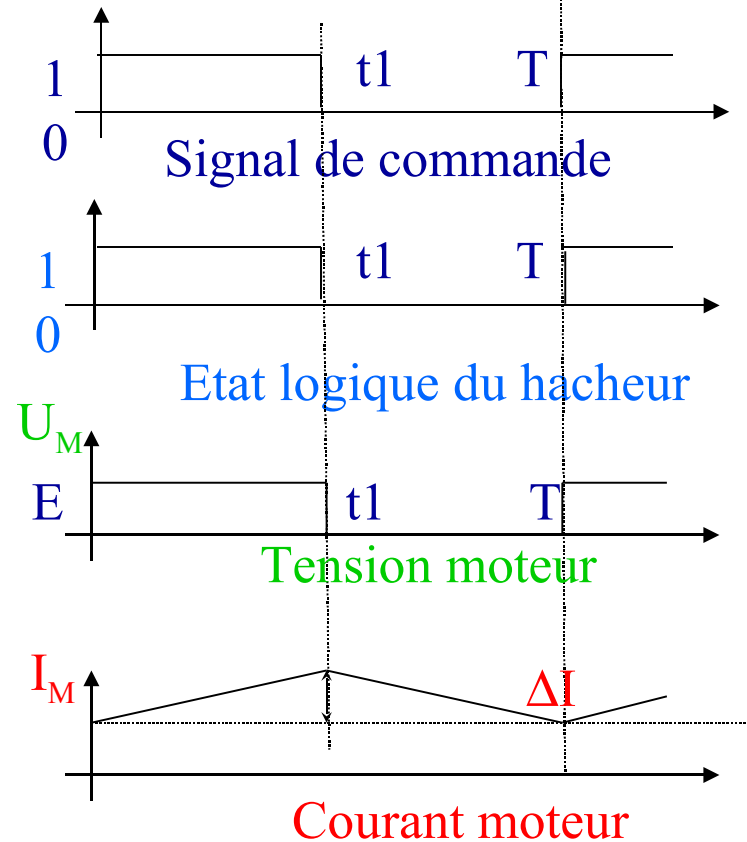
En moteur pour un sens de rotation

HACHEUR PARALLELE OU SURVOLTEUR

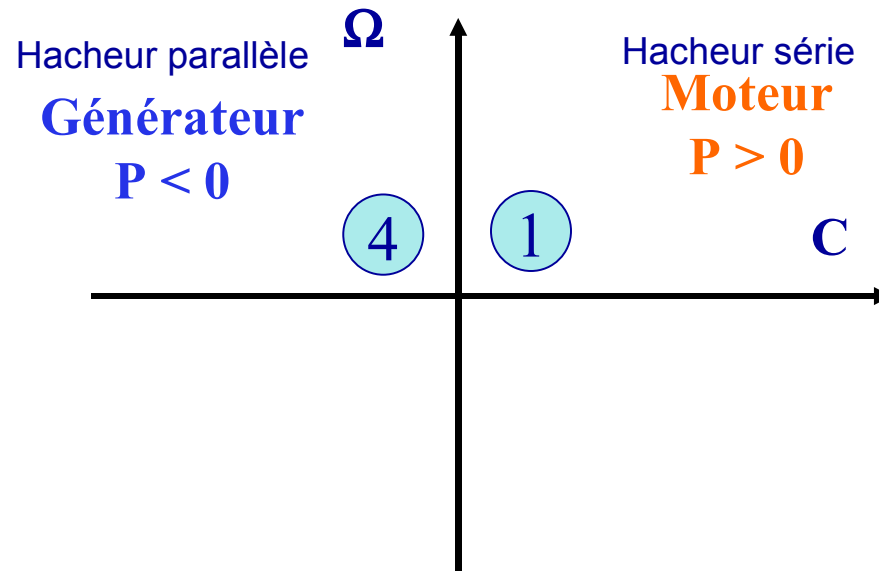


En générateur pour un sens de rotation

FONCTIONNEMENT HACHEUR SERIE



# Quadrant de fonctionnement

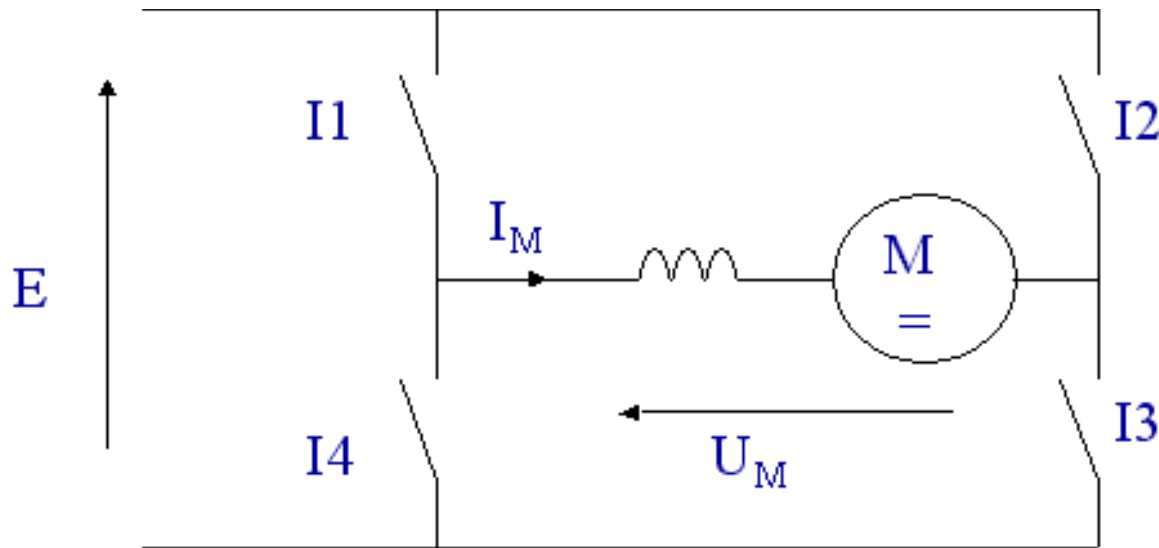


Avec ce type de hacheur on peut travailler dans un quadrant (1) ou 2 quadrants (1 et 4) suivant la réversibilité en courant de l'interrupteur statique et de la source.

## 2 sens de rotation

On peut utiliser un contacteur comme dans la solution “redresseur”.

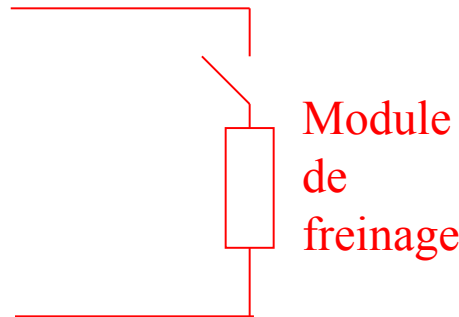
On préfère une structure “pont en H” qui nous permet de fonctionner dans **les 4 quadrants**.



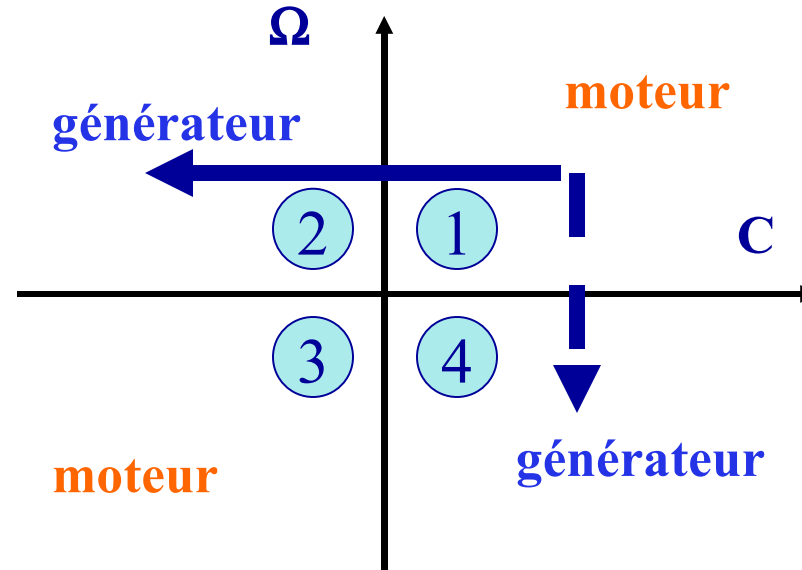
# **Freinage du moteur à courant continu**

**Dans le cas où il est nécessaire de ralentir la charge il y a plusieurs solutions pour dissiper l'énergie cinétique emmagasinée par le rotor et la charge :**

- **Freinage mécanique (non abordé dans ce chapitre)**
- **Renvoi de l'énergie dans la source (déjà traité).**
- **Utilisation d'un module de freinage (résistance électrique) dans lequel vient débiter la Mcc.**



## Point de fonctionnement

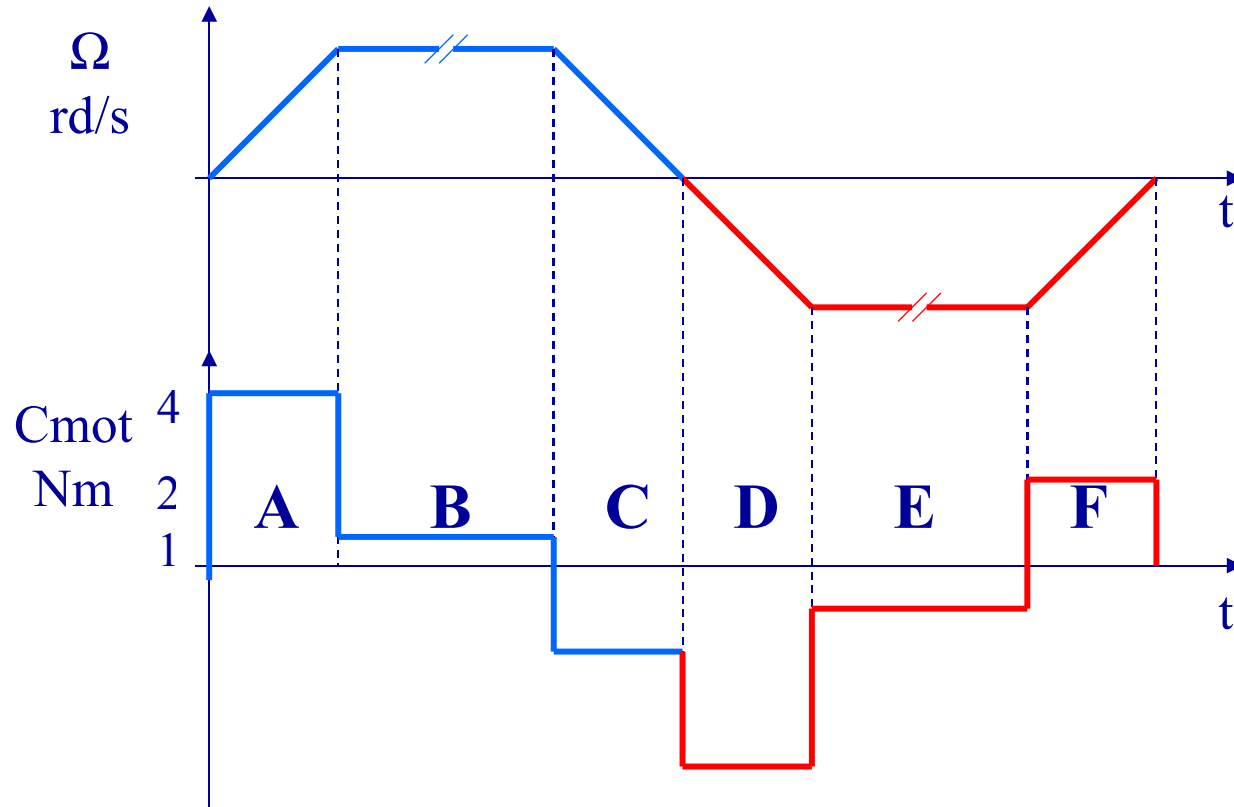


Passage du quadrant 1 vers 2 sur une variation de couple brutale  
(la vitesse ne peut pas varier instantanément.)

Passage du quadrant 1 vers 4 lors d'une inversion de vitesse.  
(Le couple ne peut pas varier instantanément)

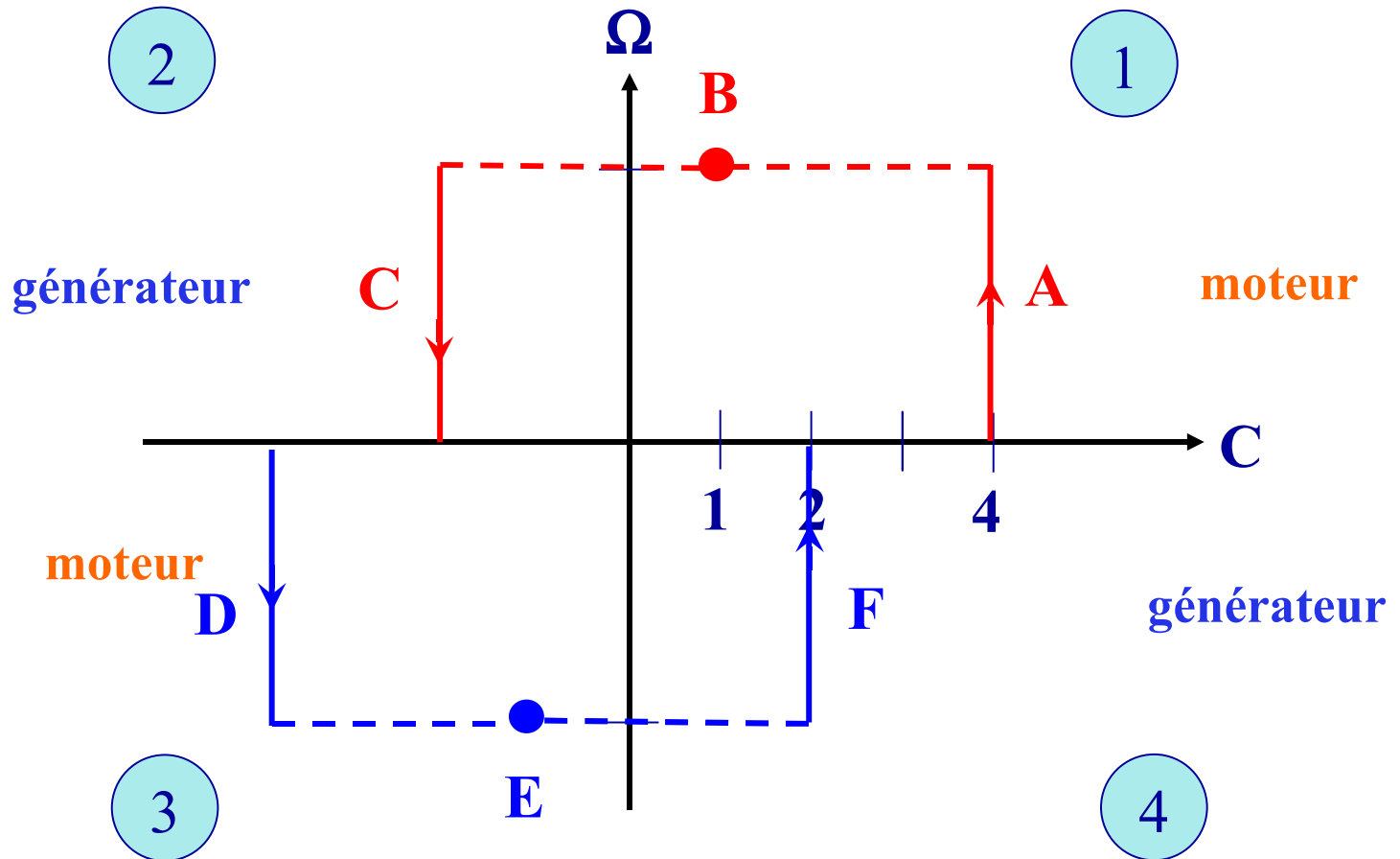
# Exemple

Sur un équipement de levage le moteur doit fournir le profil de vitesse et de couple suivant



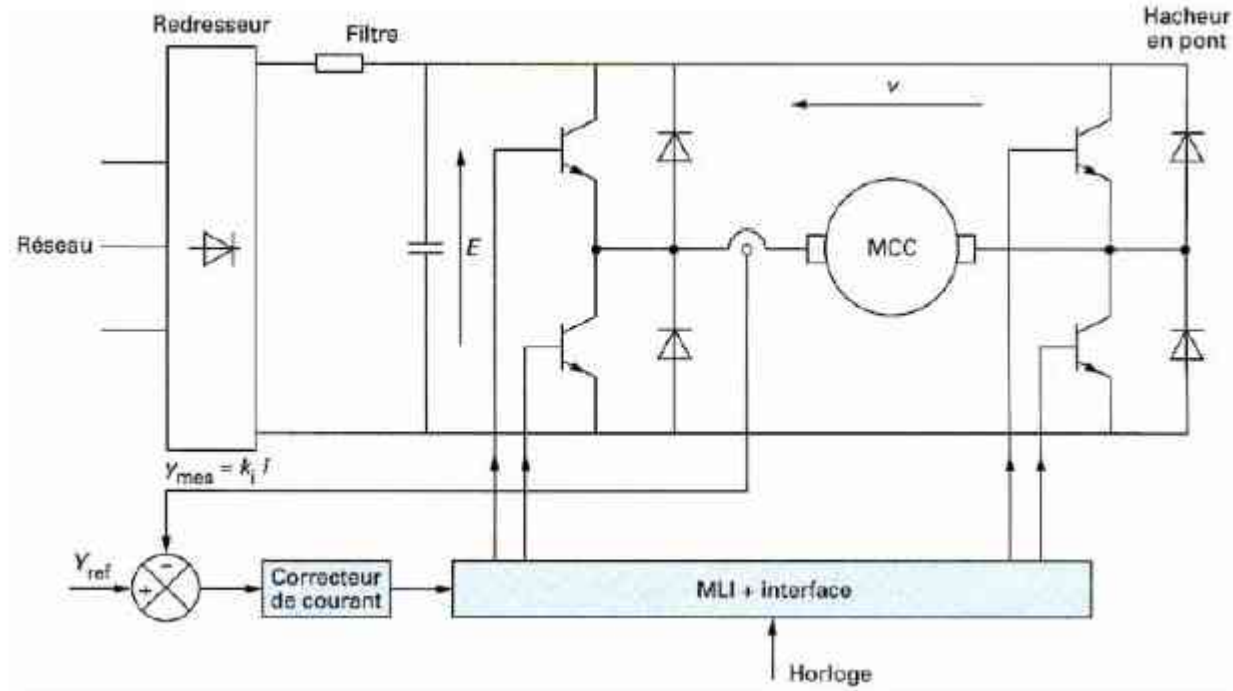
On peut en déduire la nature de la réversibilité statique et dynamique du moteur.

Cela permet de faire le choix du moto-variateur





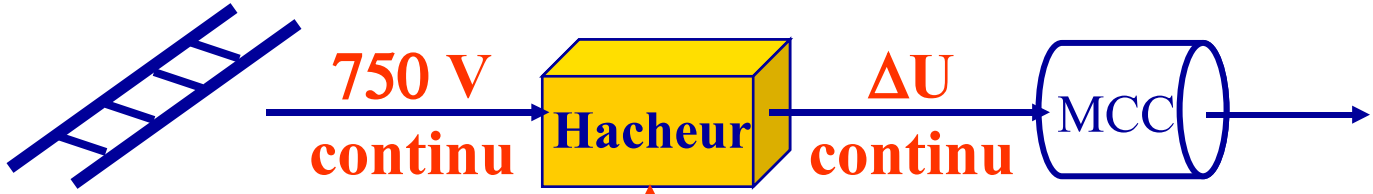
# EXEMPLES DE REALISATIONS



## Autre type d'alimentation: ponts à thyristors

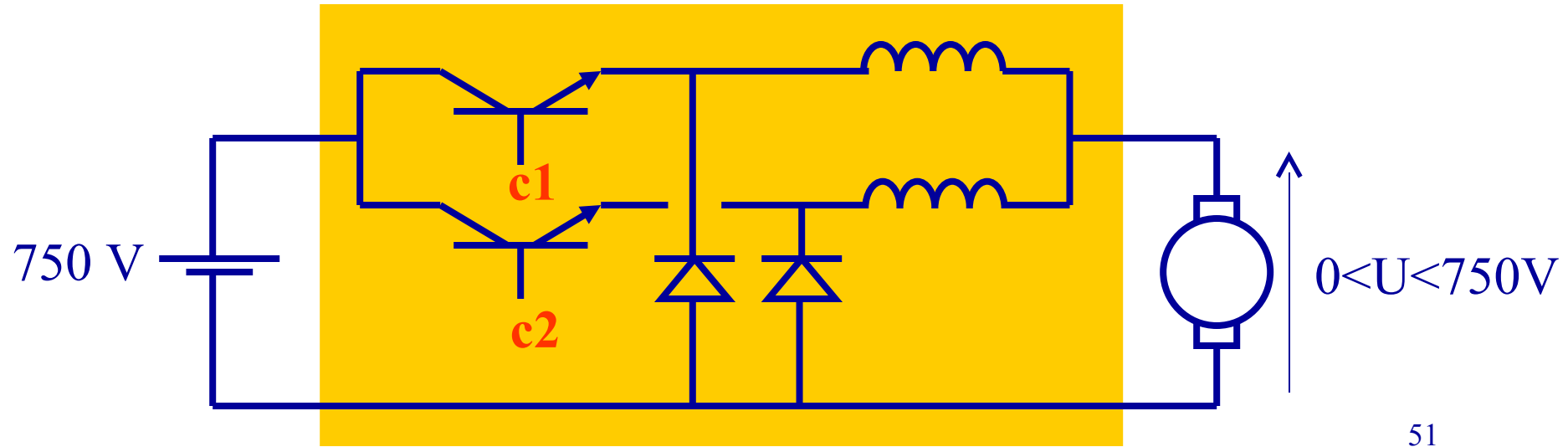
- moins bonne dynamique qu'avec hacheur
- réversibilité aisée avec le réseau électrique Alternatif
- mauvais facteur de puissance

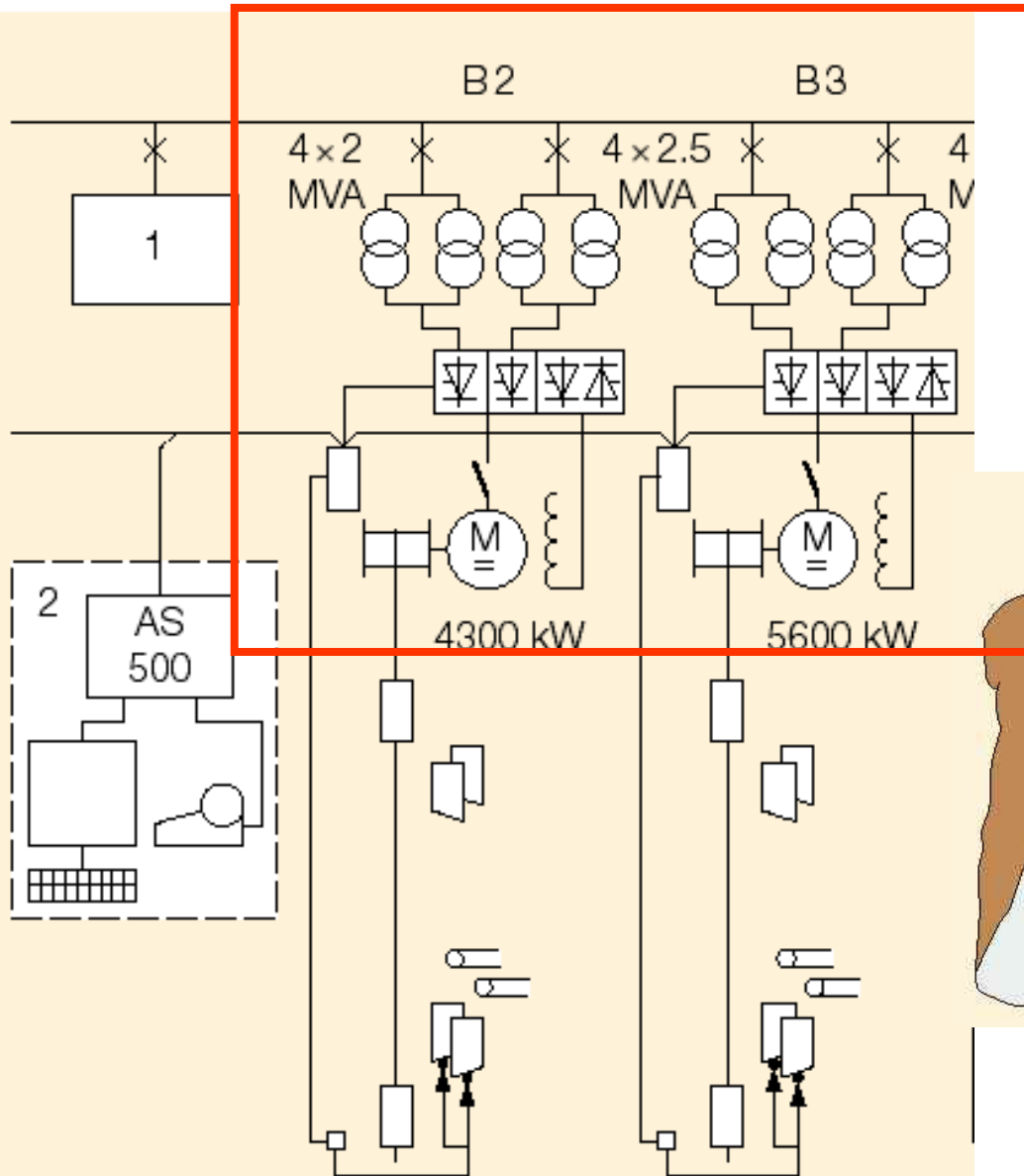
# *Le Hacheur du métro automatique VAL 206*



Conception années 70/80

↑  
commande des interrupteurs

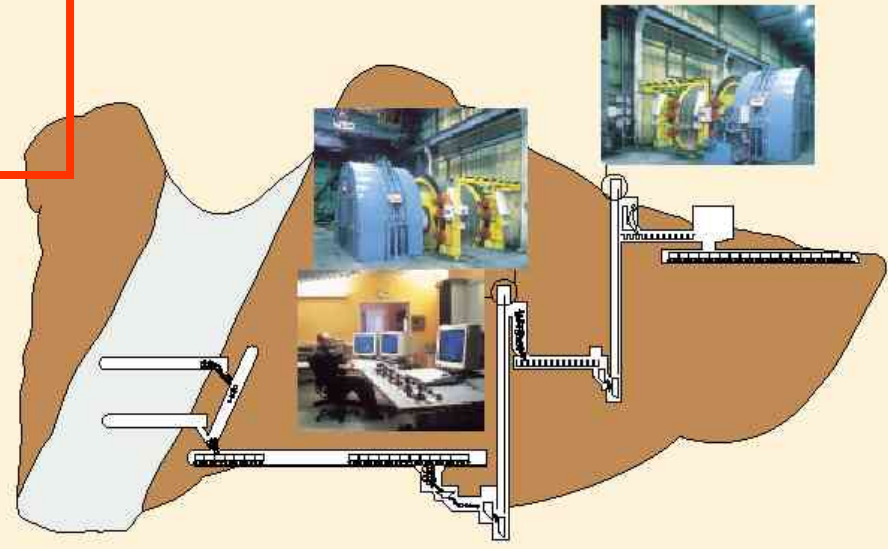


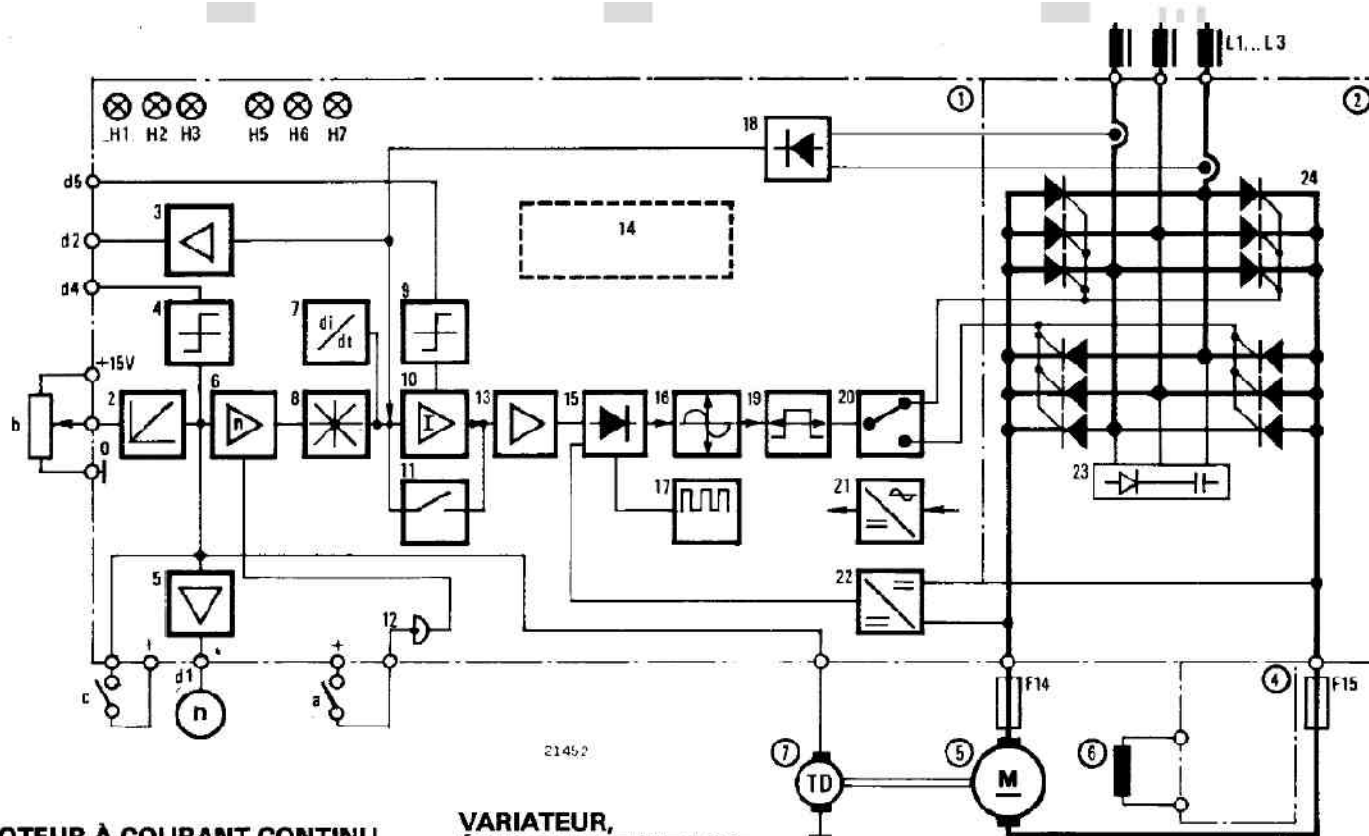


## Modernisation de la plus grande installation d'extraction de puits du monde à Kiruna

L'entreprise minière LKAB à Kiruna, Suède septentrionale, exploite l'une des mines de minerai les plus productives du monde. Environ 500 person-

1995





### MOTEUR À COURANT CONTINU

- Ⓚ Induit
- Ⓛ Inducteur
- Ⓣ Dynamo tachymétrique

### VARIATEUR, ÉQUIPEMENT EXTERNE

- a Contact blocage onduleur
- b Potentiomètre (affichage de la référence de vitesse)
- c Contact mise à zéro de la réf. vitesse
- d1 Image de la vitesse (0...10 V)
- d2 Image du courant (0...10 V)
- d4 Détection vitesse atteinte ou survitesse
- d5 Détection maximum de courant
- F14...F15 Fusibles ultra-rapides
- L1...L3 Self réseau

### VARIATEUR, ÉQUIPEMENT INTERNE

- ① Partie électronique de régulation
- 2 Générateur de rampe
- 3 Amplificateur (image du courant)
- 4 Détecteur de survitesse
- 5 Amplificateur (image de la vitesse)
- 6 Régulateur de vitesse
- 7 Limiteur di/dt
- 8 Inverseur de polarité
- 9 Détecteur du maximum de courant
- 10 Régulateur de courant
- 11 By-pass régulateur de courant
- 12 Blocage de l'onduleur
- 13 Commande force électromotrice
- 14 Option plaque complémentaire à équiper
- 15 Commande force électromotrice
- 16 Générateur d'ondes sinusoïdales
- 17 Dispositif courant impulsionnel pour couple à l'arrêt
- 18 Image du courant
- 19 Générateur d'impulsions
- 20 Inverseur d'impulsions
- 21 Alimentation de l'électronique
- 22 image F.E.M.
- H1...H7 Diodes lumineuses
- ② Partie électronique de puissance
- 23 Para surtension
- 24 Thyristors
- ③ Partie excitation

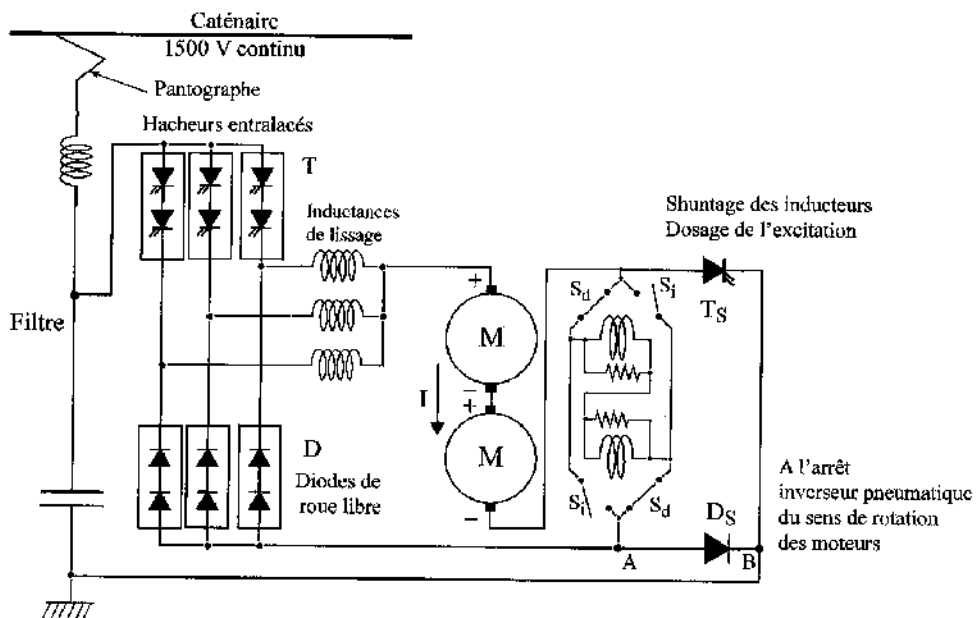
# TRACTION ELECTRIQUE

C'est avec l'arrivée, en 1973, des premiers composants (diodes et thyristors) de puissance, qui permettent de commuter des courants importants, et supportant des tensions inverses conséquentes, que la SNCF équipe ces locomotives de puissance de hacheurs à thyristors. Les formules bicourants (1.5kV DC et 25kV AC 50Hz) étant équipées, en amont du hacheur, d'un ensemble transformateur + redresseur type pont mixte.

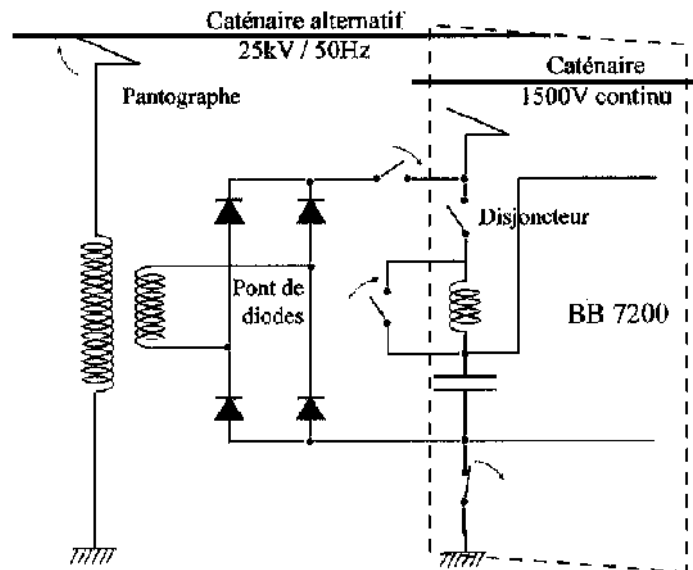
On retrouve parmi les modèles conçus sur ce type d'architecture les BB15000 (à courant monophasé), BB7200 (à courant continu), BB22200 (bi courant) , les TGV SE, les éléments automoteurs, type Z8100 (interconnexion RAPT/SNCF) ou Z2N (automoteur continu ou bicourant, à 2 niveaux).

# Schémas de principe

Locomotive BB 7200



Locomotive BB 22200

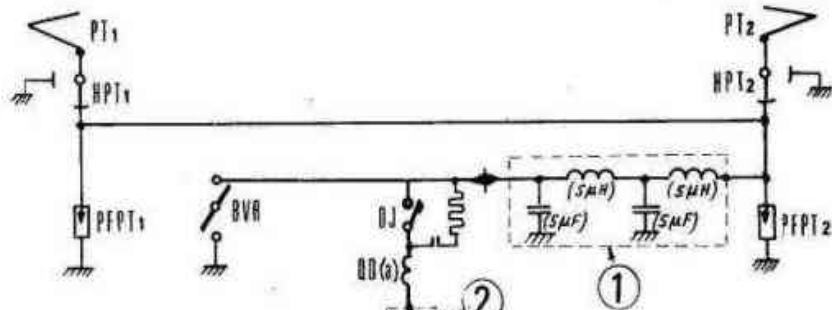


La présence d'un filtre est indispensable dans la locomotive. La ligne étant inductive, à chaque « lâcher » du pantographe la tension augmente.

Avec la fréquence normale de hachage des semi-conducteurs de puissance, le filtre placé à l'entrée du hacheur est lourd.

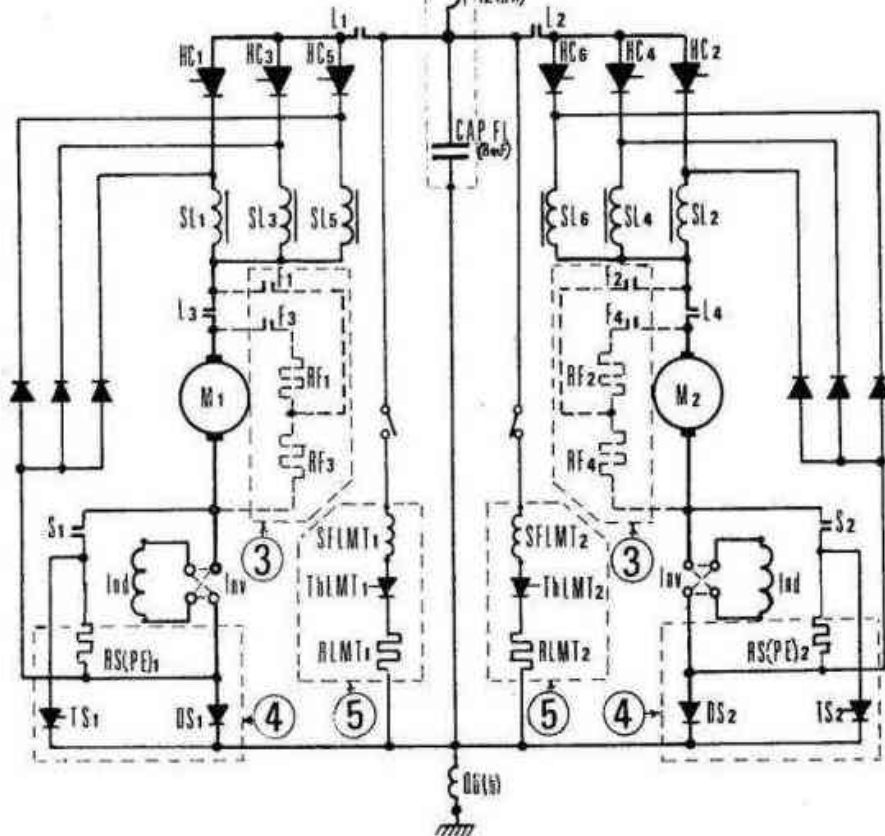
Pour réduire l'importance du filtre, on augmente artificiellement la fréquence de hachage par l'entrelacement des hacheurs. Dans le Z2N, train tricolore de la banlieue parisienne, des groupes de thyristors en parallèle permettent d'atteindre 600Hz. Dans la motrice à courant continu BB 7200, la fréquence de hachage est de l'ordre de 1000Hz.





**Fig. 4 — Locomotives BB 7200**  
**Circuit de puissance**

- 1 : Filtre HF
  - 2 : Filtre de ligne
  - 3 : Circuits de freinage
  - 4 : Dispositifs de shuntage
  - 5 : Limiteurs de surtensions
- PT1 et PT2 : Pantographes  
 DJ : Disjoncteur  
 HC1 à HC6 : Hacheurs  
 SL1 à SL6 : Selfs de lissage  
 M1 et M2 : Induits des moteurs de traction  
 RF1 à RF4 : Résistances de freinage  
 Inv : Inverseurs  
 Ind : Inducteurs

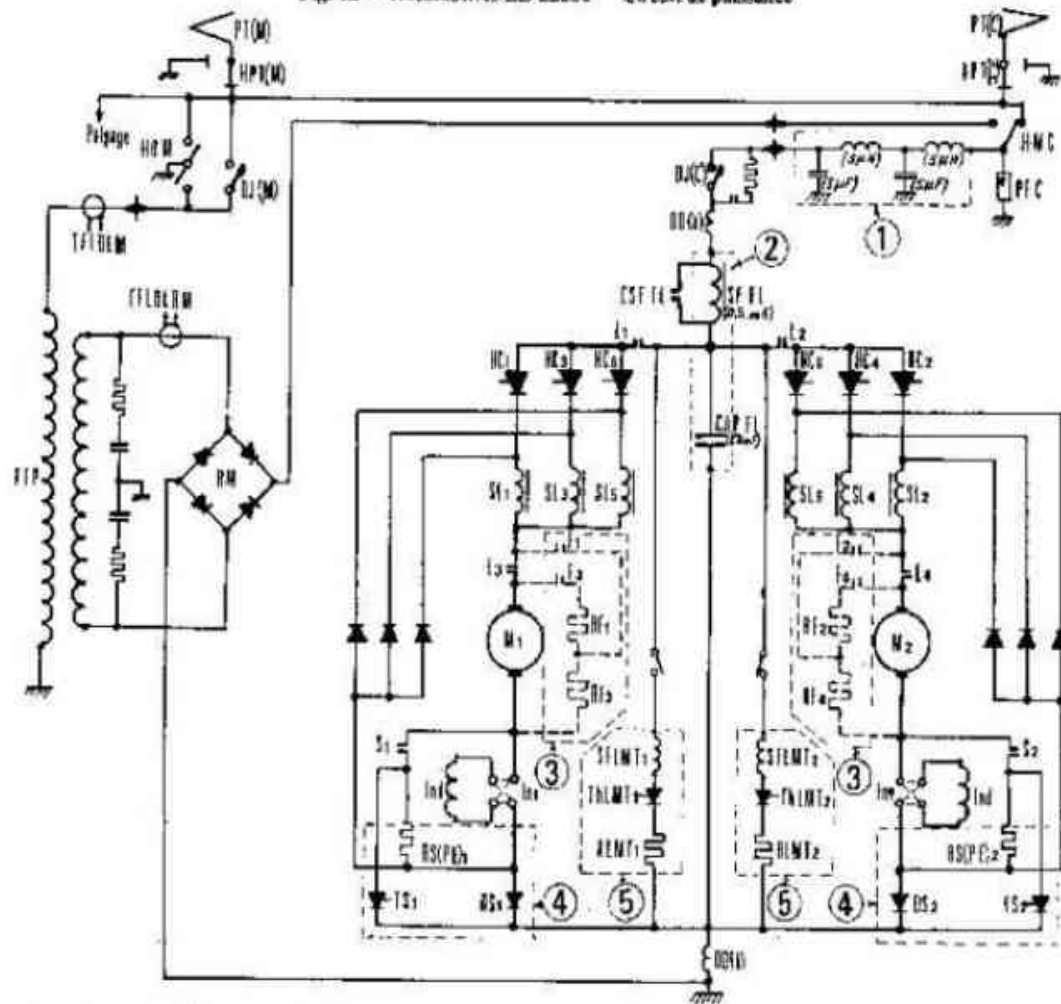


*description*

On retrouve sur cet engin :

- des hacheurs pour le réglage de la tension moteur
- des thyristors de dérivation pour le réglage du champ
- un système de freinage rhéostatique

Fig. 12 — Locomotives BB 22200 — Circuit de puissance



1 : Filtre IIF — 2 : Filtre de ligne — 3 : Circuits de freinage — 4 : Dispositifs de shuntage — 5 : Limiters de surtensions — PT(M) et PT(C) : Pantographes — DJ(M) : Disjoncteur monophasé — DJ(C) : Disjoncteur « continu » — HMC : Commutateur « monophasé-continu » — TFP : Transformateur principal — RM : Redresseur principal — HCl à HC6 : Hacheurs — SL1 à CL6 : Sels de lissage — M1 et M2 : Induits des moteurs de traction — RF1 à RF4 : Résistances de freinage — Inv : Inverseurs — Ind : Inducteurs — RS(PE) : Résistance de shuntage permanent

Cet engin reçoit, en plus par rapport à la BB7200, un transformateur principal, un redresseur principal (RM) composé en réalité de 40 diodes 2800V / 500A et la capacité (CAP FL) du filtre passe bas est portée à 28 mF au lieu de 8 sur la BB7200. Le reste est identique à ce qui est décrit précédemment pour la motrice à courant continu.

## Caractéristiques des locomotives à thyristors BB15000/BB7200/BB22200

**Nombre de moteur** : 2 (à courant continu d'environ 2.2 MW chacun)

**Puissance en régime continu** : 4.4 MW (à vitesse de définition) et 4.6 MW (à vitesse maxi)

**Vitesse maximale** : 180 km/h

**Masse par essieu** : 22.3 t (BB15000) ; 21.2 t (BB7200) ; 22.6t (BB22200)

# Encore un avenir pour la mcc (objet technologique?)

