

Module transdisciplinaire

Transmission de Puissance (ID22)

Transmission de Puissance Electrique (8hCM, 8hED, 8hTP)

Réseaux, Capteurs, Conversion d'énergie

FD12

- **C1** Intérêts de la transmission d'énergie par moteur électrique alimenté par convertisseur statique
Concept « machine à courant continu » (2h)
- **C2-3** Machines asynchrones et variation de vitesse/couple (4h)
- **C4** Machines synchrones autopilotées (2h)

Intérêts de la transmission d'énergie par moteur électrique alimenté par convertisseur statique

Concept « machine à courant continu »

I. Pourquoi travailler à « vitesse variable » ?

1>Améliorer la valeur ajoutée?

2>Commande synchronisée multimoteurs

3>Variétés de cahiers des charges

II. Le concept « machine à courant continu »

Les équations et la commande

III. La machine à courant continu: objet technologique

Constitution, convertisseurs associés, avenir.

IV. Bibliographie

Pourquoi la vitesse variable?

Objet d'étude:

Procédés industriels permettant,

- de déplacer la matière (ventilation, pompage, levage, ..., convoyage, transport)
- de transformer la forme de la matière par action mécanique (brassage, broyage, concassage, centrifugation, laminage, moulage, extrusion, étirage, ...)

Objectifs:

1> Améliorer la valeur ajoutée du processus

Plus rapide, plus précis, sans vibration, sans bruit, **avec moins d'énergie**

2> Imaginer de nouveaux procédés mettant à profit les potentialités offertes par l'évolution technologique

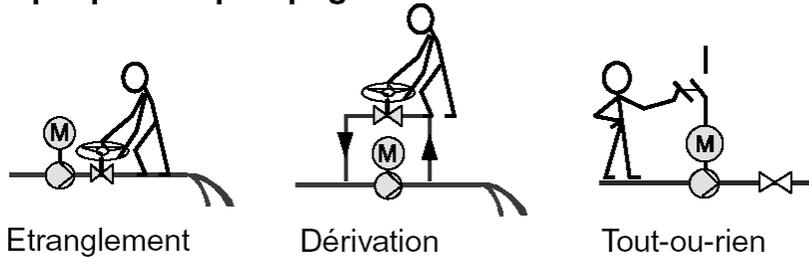
Pourquoi la vitesse variable?

Economies d'Énergie

Un exemple simple: pompage et économie d'énergie

Modification du débit??

Exemple pour le pompage:



- Simplicité de la construction
- Optimisation de la capacité du système difficile à obtenir
- Toute augmentation de capacité exige de modifier l'installation complète
- Régulation par étranglement, recirculation ou commande tout ou rien
- Contraintes imposées à la mécanique lors des démarrages
- Coût d'exploitation élevé



Vous êtes au volant. Que faites-vous?

1. vous gardez votre pied sur l'accélérateur et vous adaptez votre vitesse avec les freins.
2. vous rétrogradez et réduisez la vitesse moteur.

TDn°1

Extrait du guide technique
 vitesse variable d'ABB
 GuideTechnique4_vitesse_
 variable.pdf

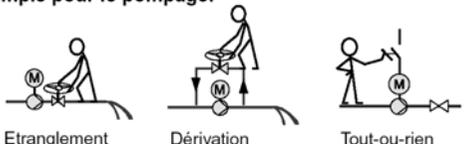
Pourquoi la vitesse variable?

Economies d'Énergie

Un exemple simple: pompage et économie d'énergie

Modification du débit??

Exemple pour le pompage:



- Simplicité de la construction
- Optimisation de la capacité du système difficile à obtenir
- Toute augmentation de capacité exige de modifier l'installation complète
- Régulation par étranglement, recirculation ou commande tout ou rien
- Contraintes imposées à la mécanique lors des démarrages
- Coût d'exploitation élevé

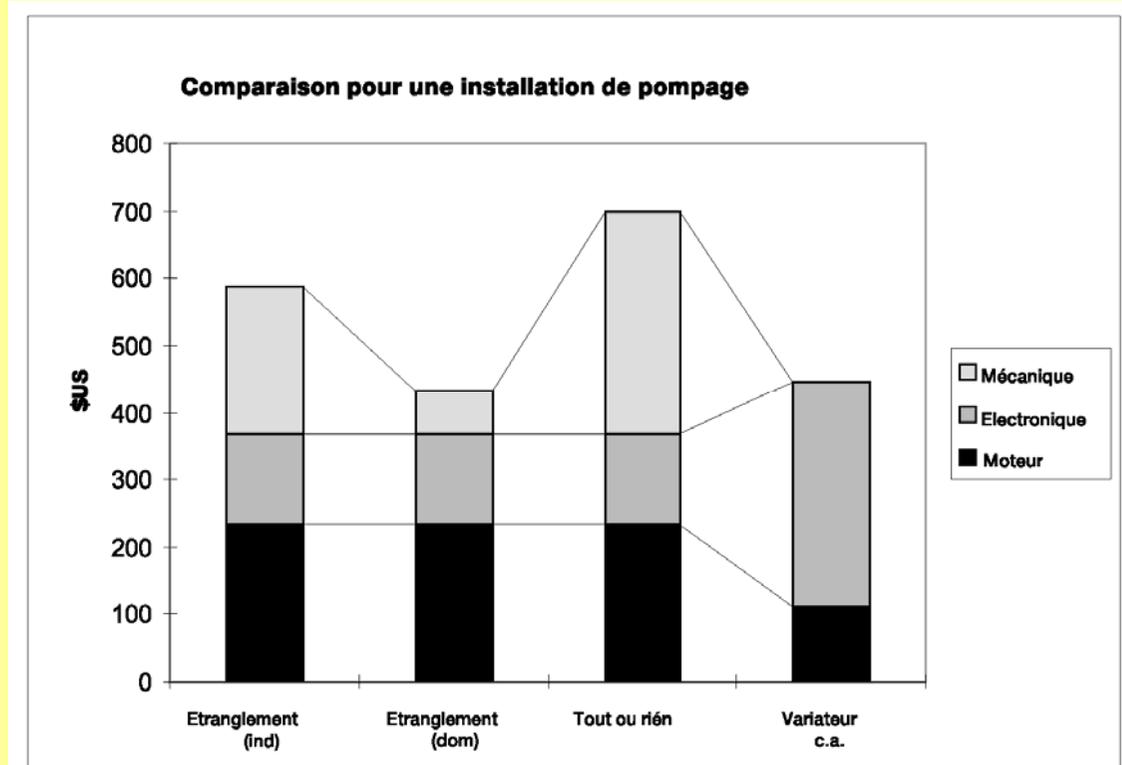
Extrait du guide technique vitesse variable d'ABB
 GuideTechnique4_vitesse_variable.pdf



Vous êtes au volant. Que faites-vous?

1. vous gardez votre pied sur l'accélérateur et vous adaptez votre vitesse avec les freins.
2. vous rétrogradez et réduisez la vitesse moteur.

	Etranglement	Variateur c.a. : 50% d'économie
Puissance absorbée	0,75 kW	0,37 kW
Consommation annuelle pour 4000 heures/an	3000 kWh	1500 kWh
Coût énergétique annuel 0,1 \$US/kWh	300 \$US	150 \$US
Maintenance/an	40 \$US	5 \$US
Coût total/an	340 \$US	155 \$US
Economies sur une année : 185 \$US !		



Pourquoi la vitesse variable?

Economies d'Énergie

Table E.S.1 - Estimated total electricity savings potential in TWh pa, by 2015.

Potential Savings (TWh pa)		VSDs	
		Constant prices	5%/year price decrease
Economic Potential	Total Industry	39	43
	Total Tertiary	8	11
	Total	47	54
Technical Potential	Total Industry	62	9%
	Total Tertiary	22	10%
	Total	84	

Extrait du rapport européen
« VSDs-SAVE for electric motor system »

Consommation estimée en 2015,
 721 TWh dans l'industrie
 224 TWh dans le secteur tertiaire

Table 3.3 - Basic data used to assess the potential savings in the industrial sector.

VSDs	Average Savings (%)	Applicability (%)	Already Applied (%)	Technical Potential (%)
Pumps	35	60	9	51
Fans	35	60	7	53
Air Compressors	15	30	5	25
Cool. Compressors	15	40	4	36
Conveyors	15	60	8	52
Other Motors	15	60	5	55

* Technical Potential = Applicability - Already Applied

Pourquoi la vitesse variable?

Economies d'Énergie

Table E.S.1 - Estimated total electricity savings potential in TWh pa, by 2015.

Potential Savings (TWh pa)		VSDs	
		Constant prices	5%/year price decrease
Economic Potential	Total Industry	39	43
	Total Tertiary	8	11
	Total	47	54
Technical Potential	Total Industry	62	9%
	Total Tertiary	22	10%

Consommation estimée en 2015,
 721 TWh dans l'industrie
 224 TWh dans le secteur tertiaire

Extrait du rapport européen
« VSDs-SAVE for electric motor system »

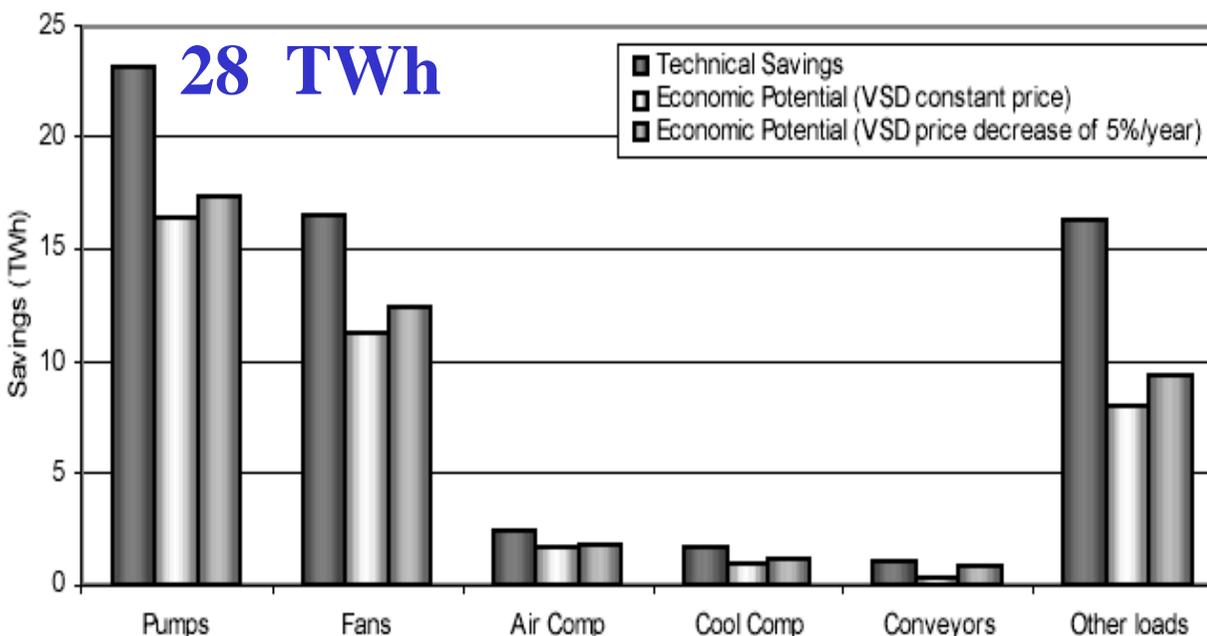
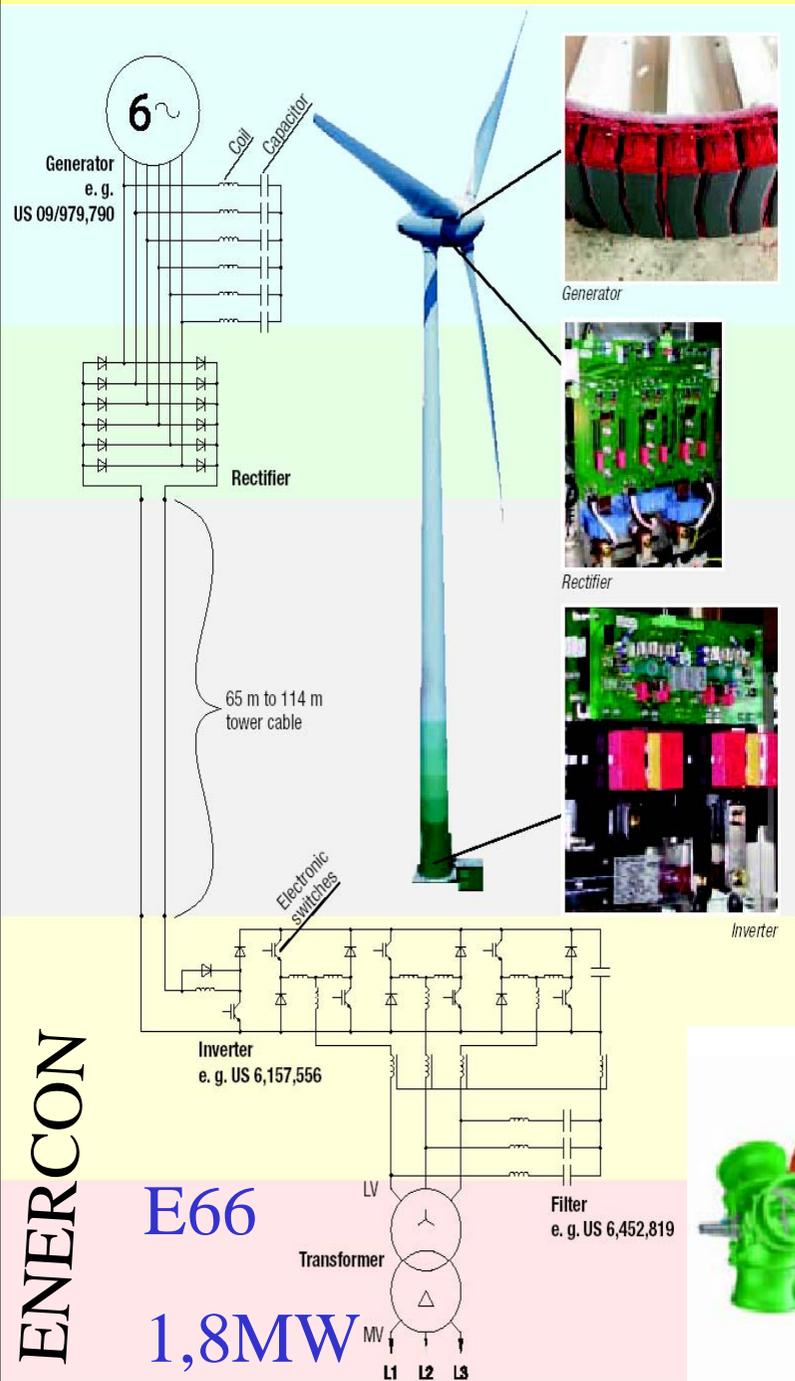


Figure 3.2 - Technical and Economic Savings Potential in Industry by type of load.

VSDs
Pumps
Fans
Air Compressors
Cool. Compressors
Conveyors
Other Motors

Technical Potential (%)
51
53
25
36
52
55

Pourquoi la vitesse variable?



Autre potentialité forte d'économie d'énergie:

l'entraînement direct...sans transmetteur mécanique

Moteurs capables de tourner à basses vitesses...avec:

- peu d'ondulation de couple
- Encombrement spatial réduit
- poids réduit

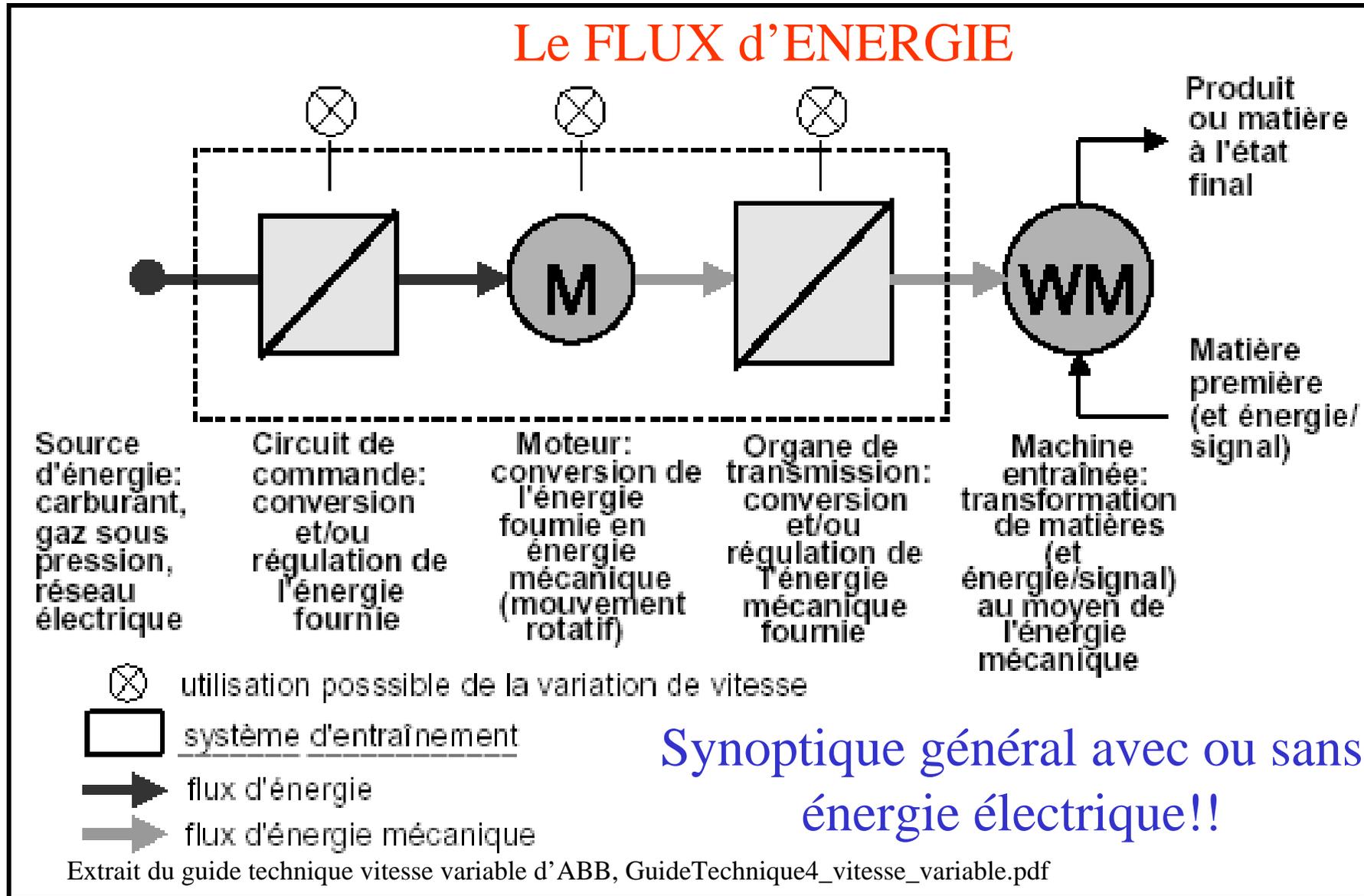
(exemple: éolienne, robotique, levage, traction..)

Ascenseur: TD n°2

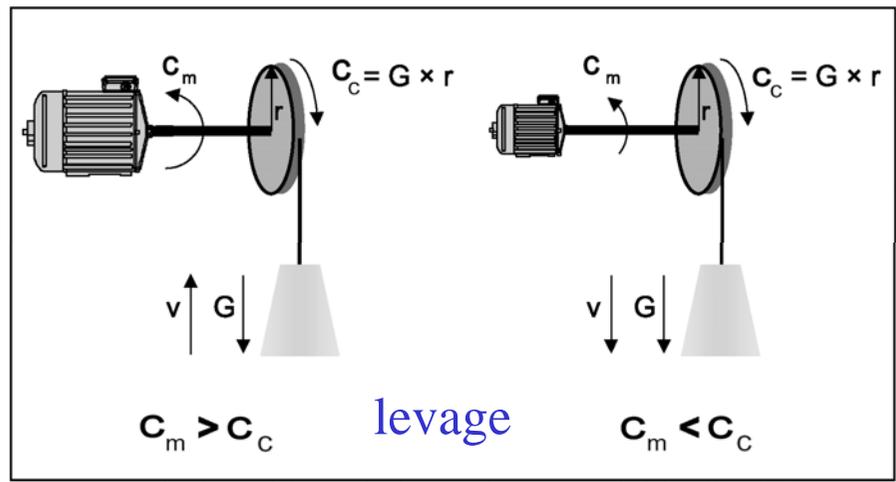


Pourquoi la vitesse variable?

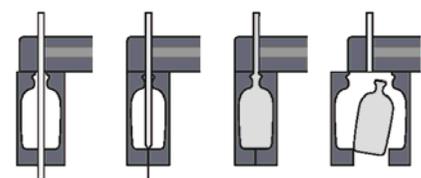
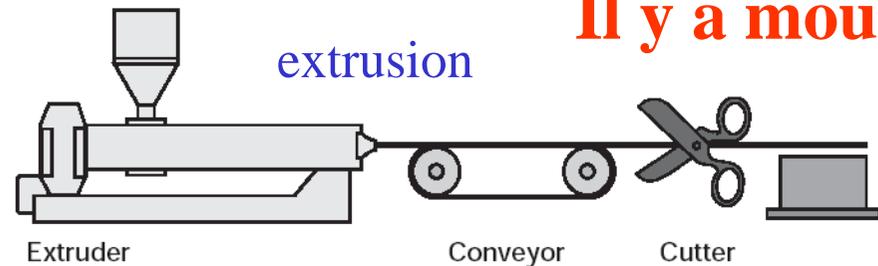
Faire varier la vitesse à différents stades pour MODULER



Pourquoi la vitesse variable?

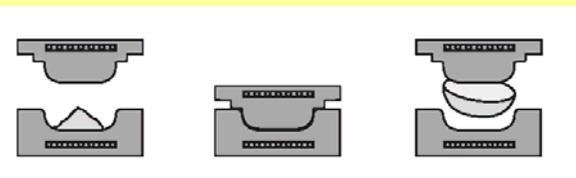


Extrait du guide technique vitesse variable d'ABB
 GuideTechnique4_vitesse_variable.pdf



moulage

TD n°4
 Plus vite et sans casse!



Extrait du guide d'application sur extrudeuses d'ABB

ApplicationGuide1_extruder_lowres.pdf

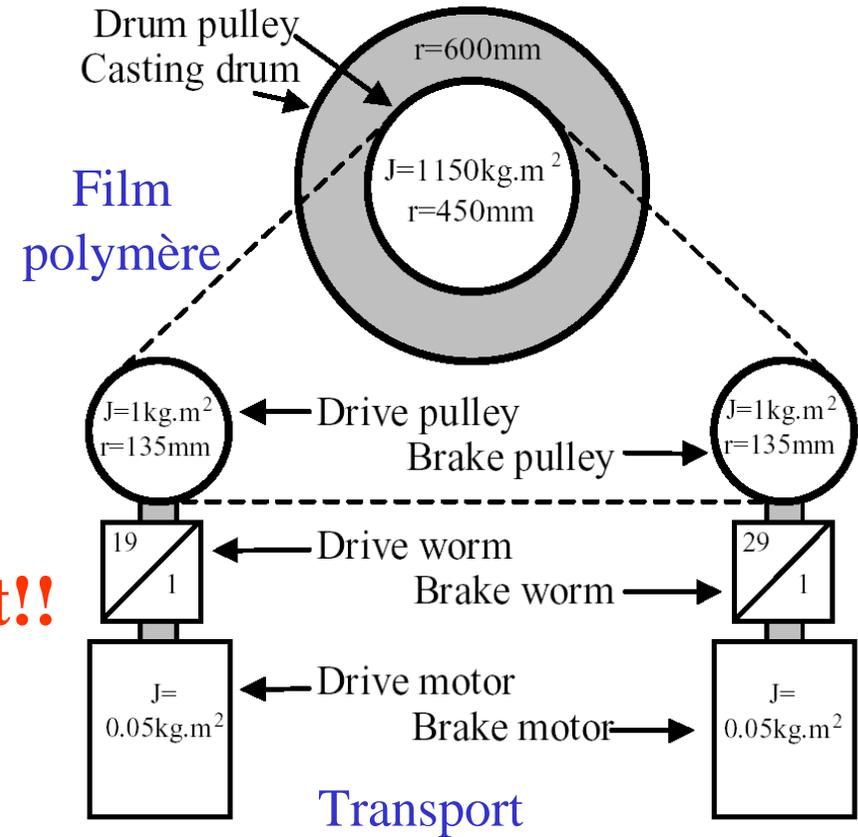
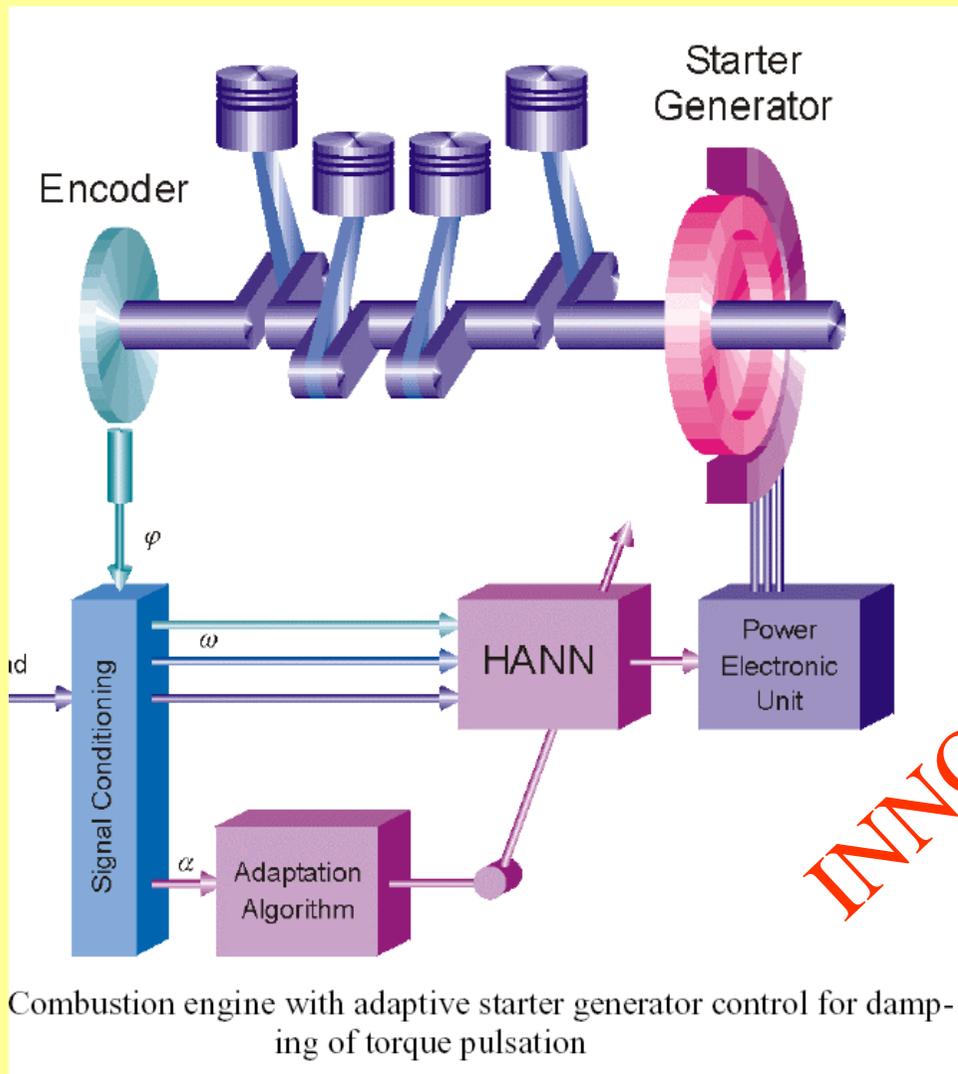


Figure 1: Drive mechanics for the original plant



Figure 2: Drive End of Test Facility

Pourquoi la vitesse variable?



INNOVATIONS

Contrôle plus rapide,

moins de contraintes spatiales

Motorisation électrique du stabilisateur du rotor de l'hélicoptère Lynx

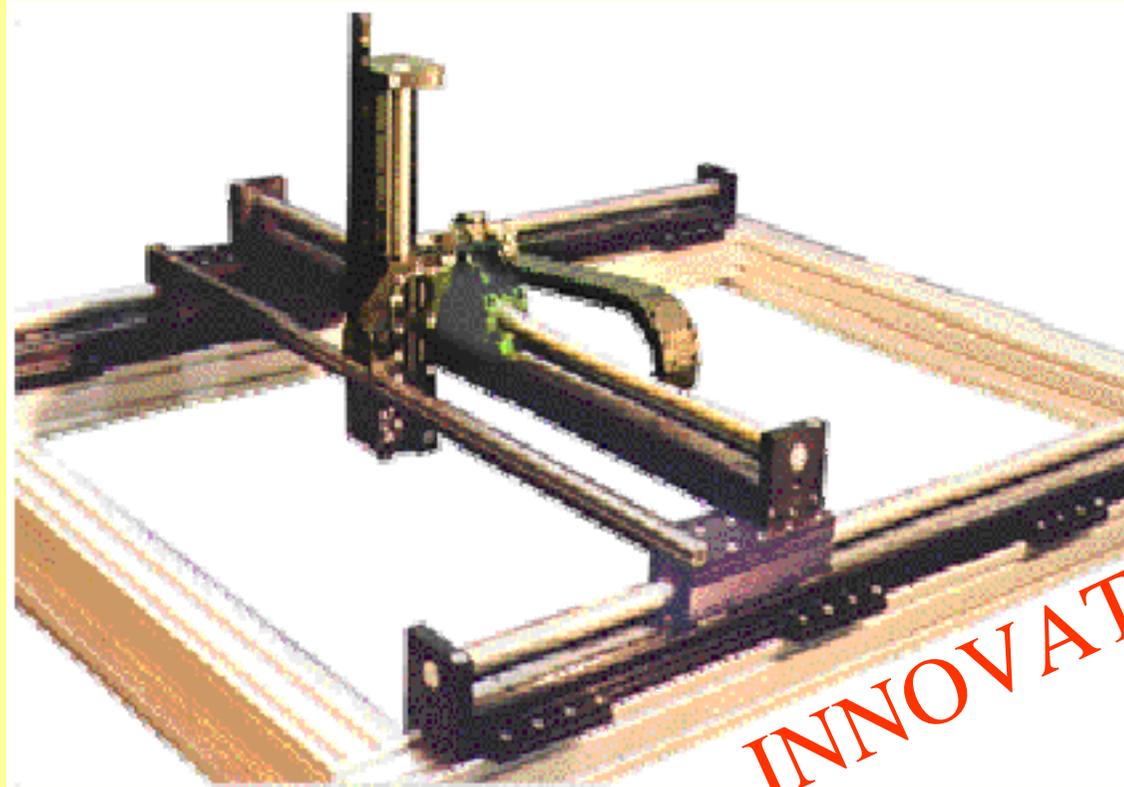
(2MW, 650Volt, moteur à courant continu 1840 Nm, 650 tr/mn)

Extrait de conférence IAS2000-34-02

Industrial Application Society

Réduction des pulsations de couples du moteur thermique par moteur électrique

Pourquoi la vitesse variable?



Translation par moteur linéaire électrique

- plus vite, plus précis
- étude mécanique de vibration à approfondir

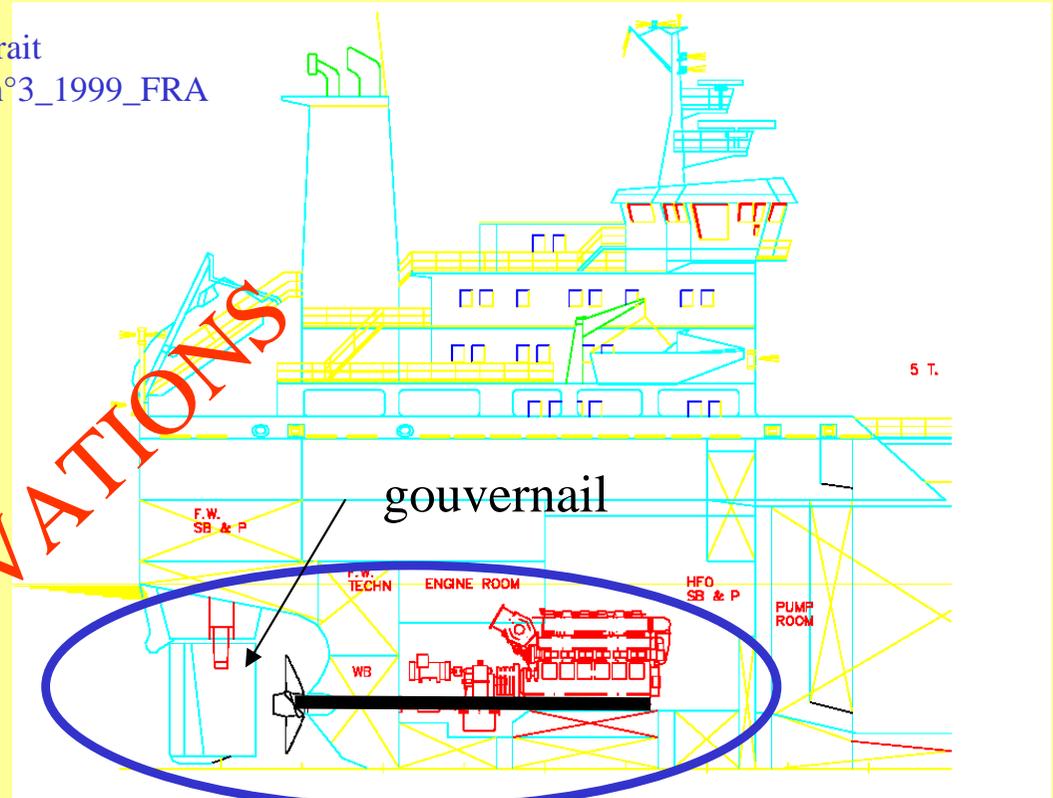


Moteur Lineaire (c/o Aerotech)

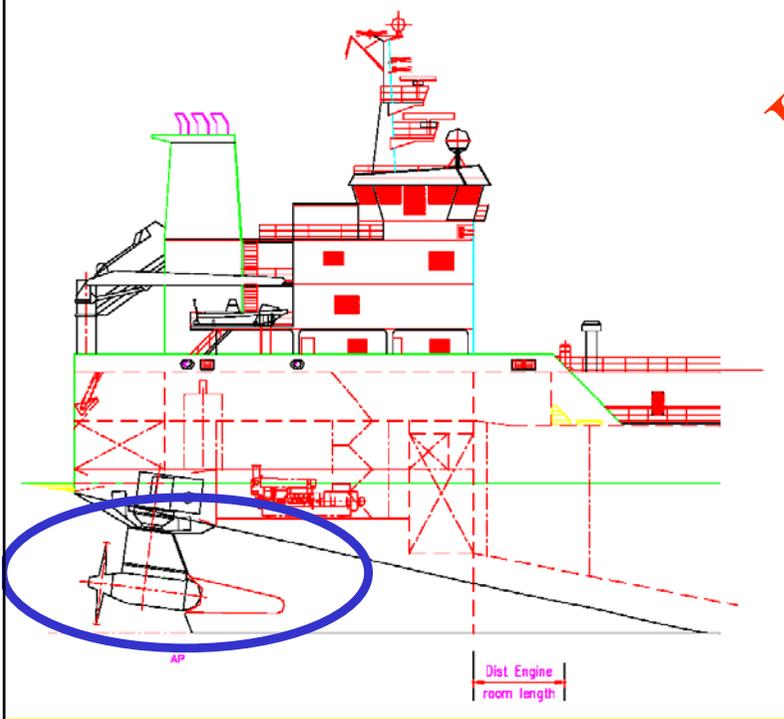
Pourquoi la vitesse variable?



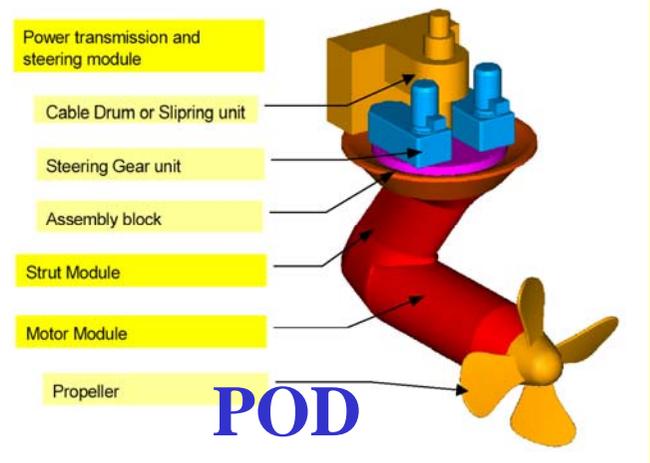
extrait
 ABB_azipod_n°3_1999_FRA



INNOVATIONS

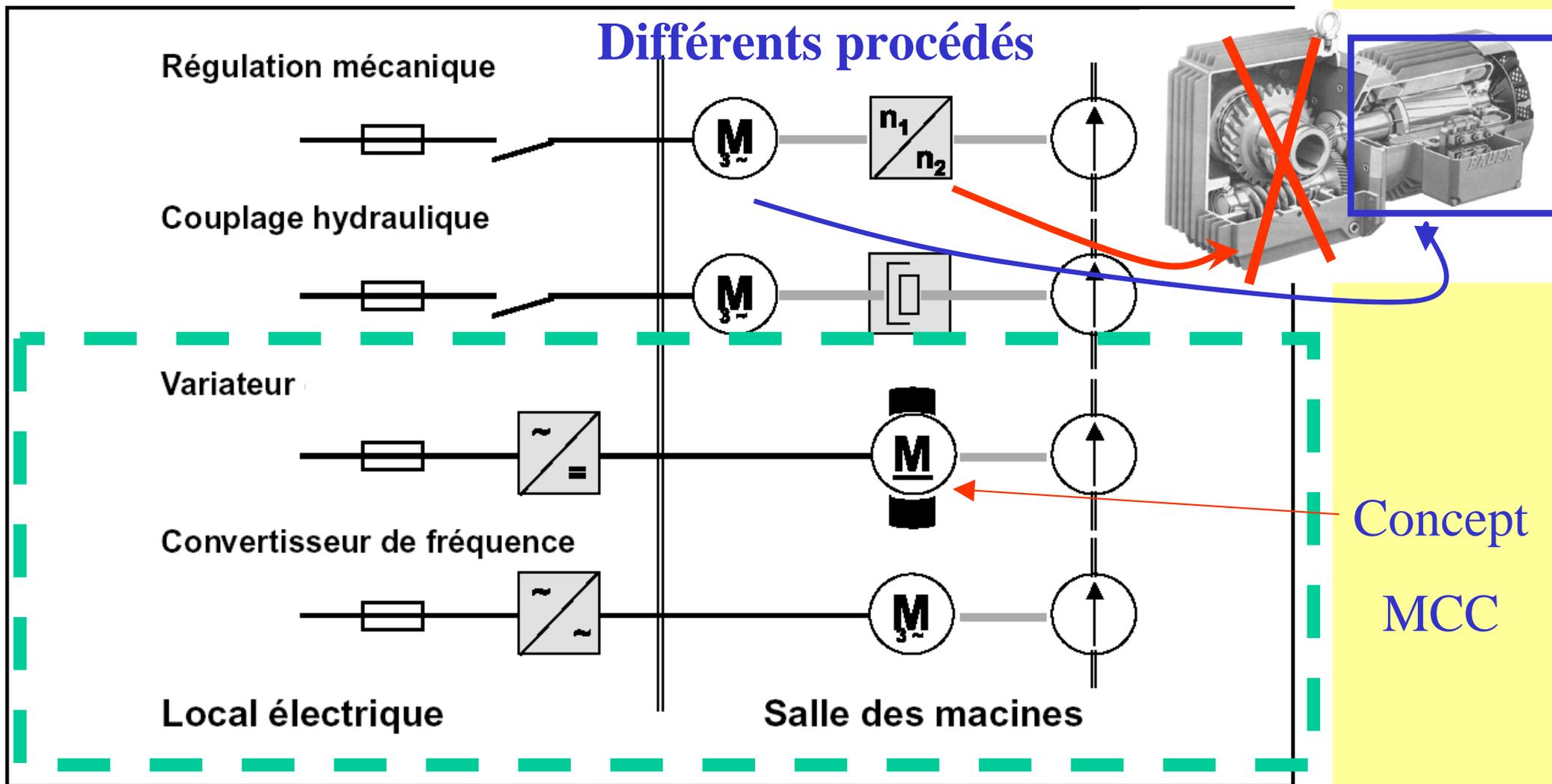


- moteur électrique et convertisseur?
- nouvelle propulsion
- nouvelle architecture de navire
- discrétion/souplesse



Pourquoi la vitesse variable?

Différents procédés



Extrait du guide technique vitesse variable d'ABB
 GuideTechnique4_vitesse_variable.pdf

Couplage hydraulique

Dans un couplage hydraulique, c'est le principe de la turbine qui est mis en oeuvre. En faisant varier le volume d'huile dans le couplage, on agit sur l'écart de vitesse entre l'arbre entraînant et l'arbre entraîné. La quantité d'huile est contrôlée et réglée par des pompes et des vannes.

Pourquoi la vitesse variable?

Commande Multimoteurs

Contrainte de la SYNCHRONISATION



Multimoteurs

Plus d'adhérence, meilleure intégration

TGV Atlantique



Enrouleuse de papeterie

Attention à la casse

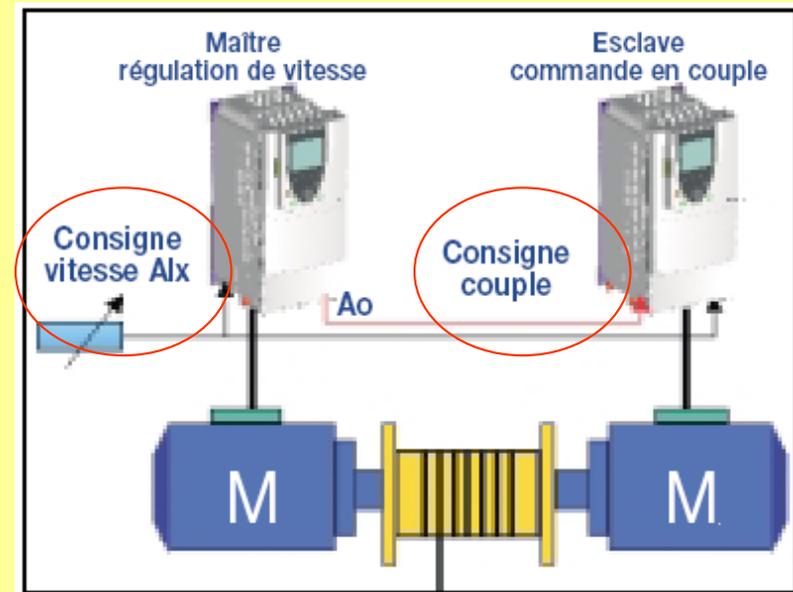
Pourquoi la vitesse variable?

Commande Multimoteurs

Contrainte de la SYNCHRONISATION



Coordinations des mouvements



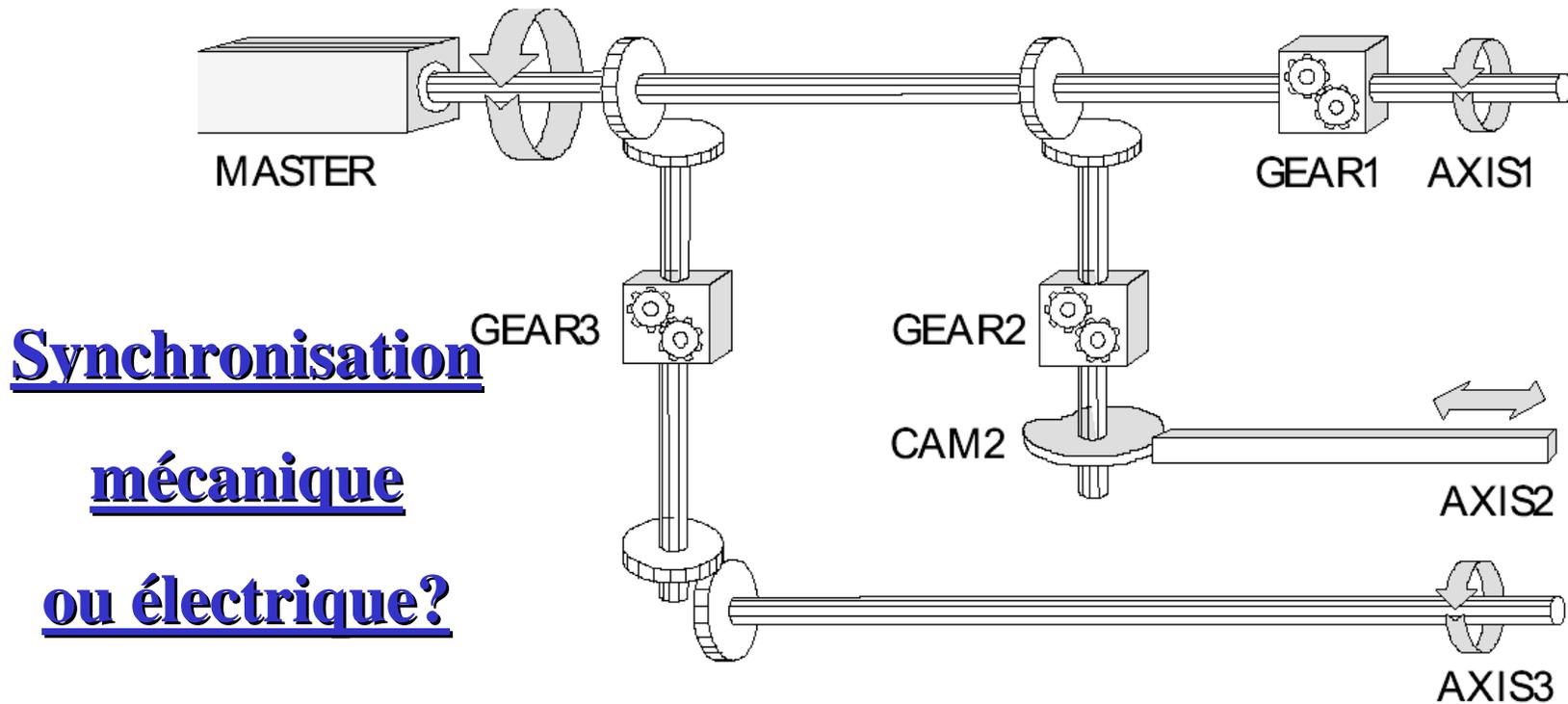
Exemple simple de coordination

(maitre/esclave)

Pourquoi la vitesse variable?

Commande Multimoteurs

Contrainte de la SYNCHRONISATION



Synchronisation
mécanique
ou électrique?

Synchronisation mécanique ou électrique?

FIG. 1.5 – Représentation schématique d'un système multi-axes à coordination mécanique (f_01_b.dsf)

Pourquoi la vitesse variable?

Commande Multimoteurs

Contrainte de la SYNCHRONISATION

Synchronisation

mécanique

ou électrique?

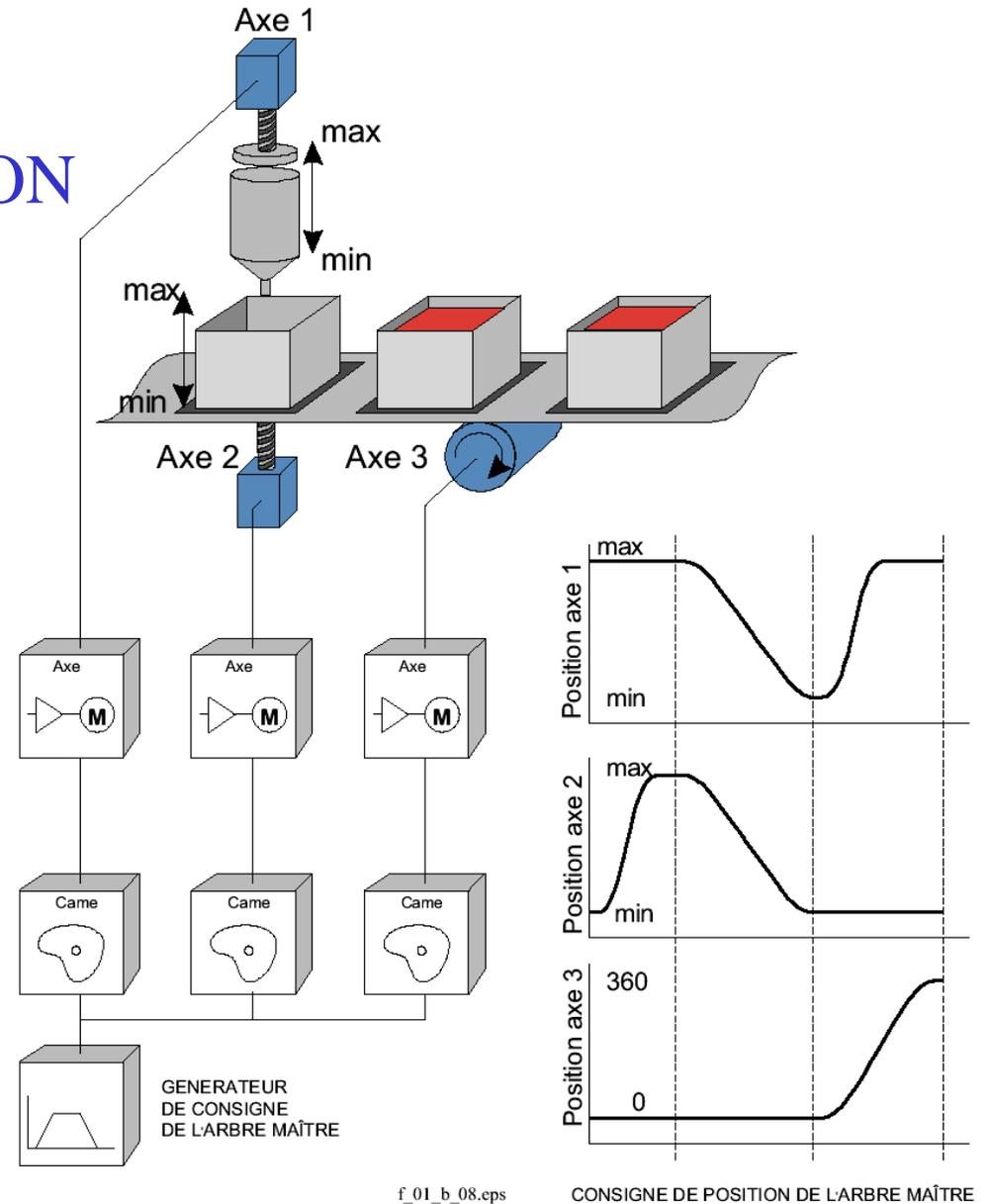
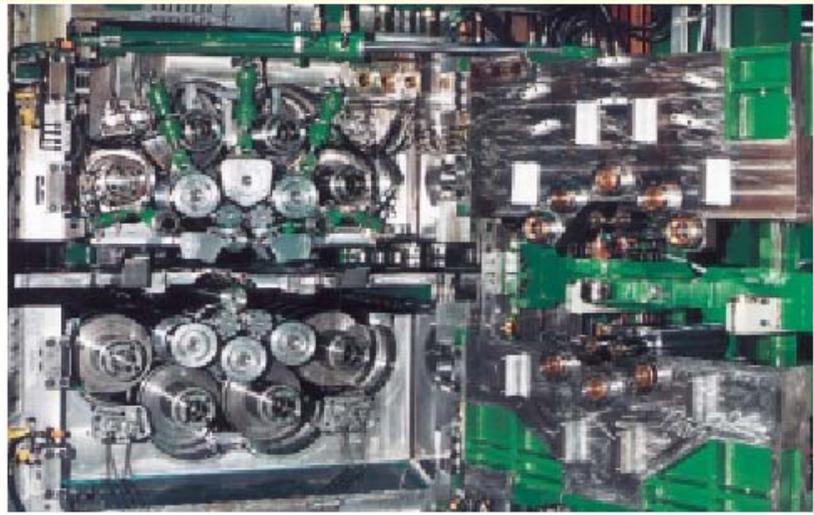
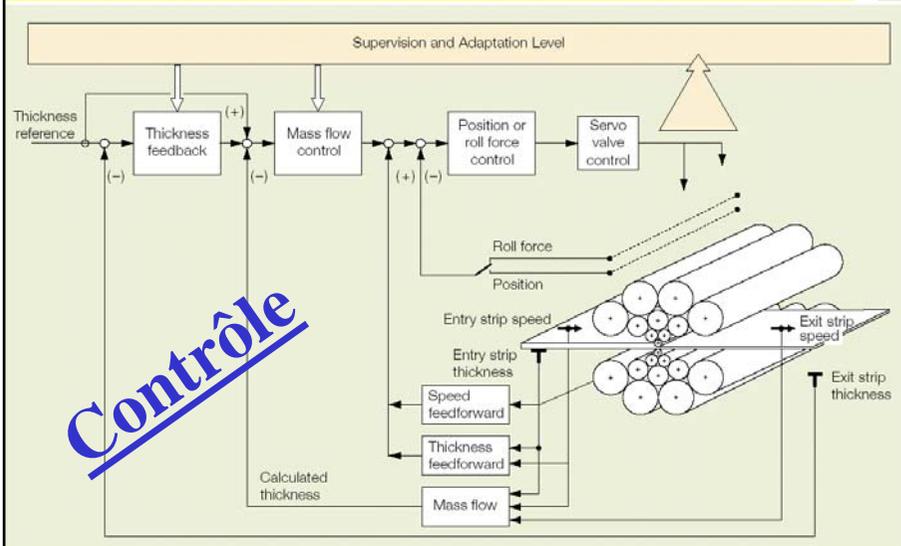
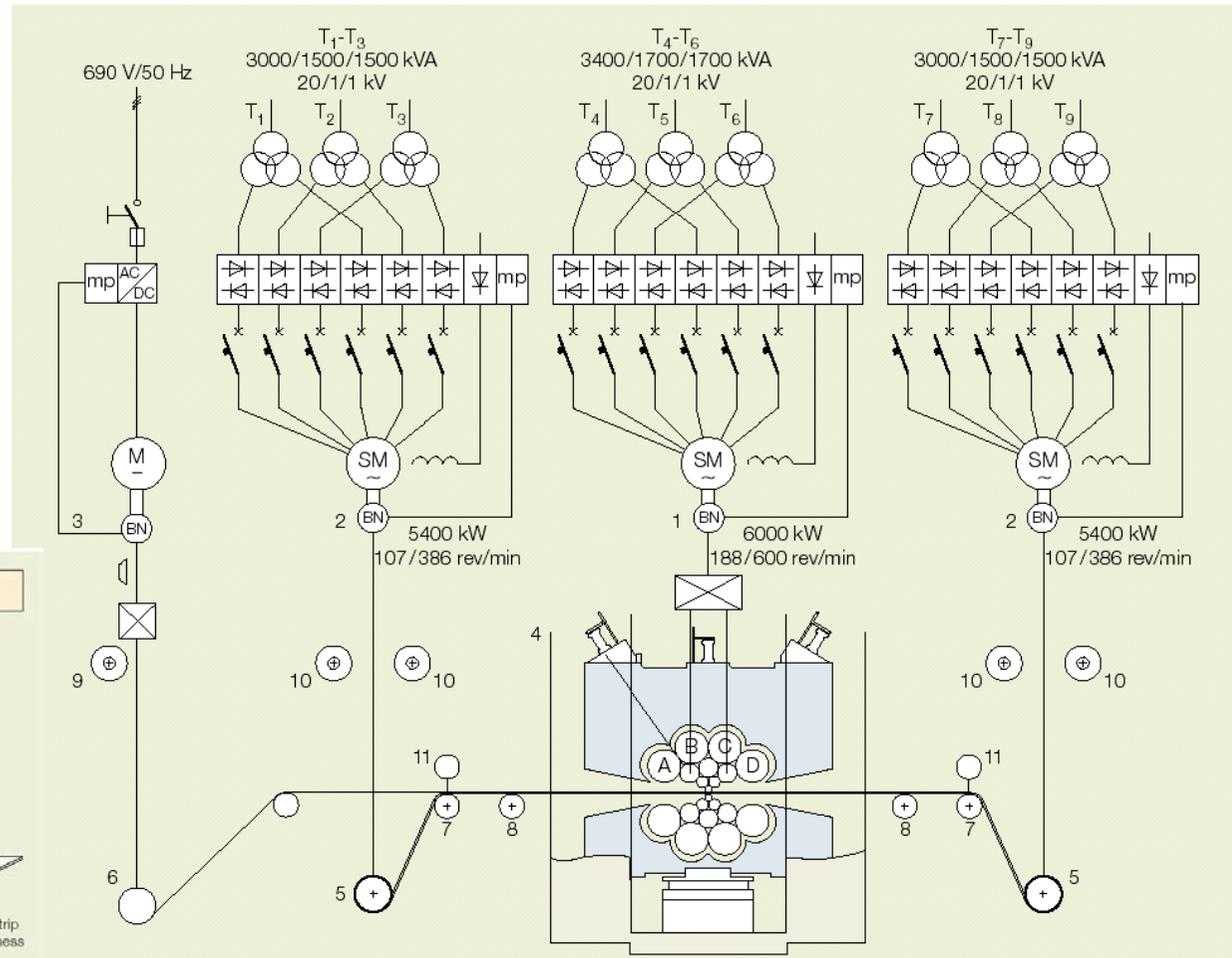


FIG. 1.7 – Cames "logicielles" pour un système de remplissage à trois axes (ACC-Motion S.A.) (f_01_b.dsf).



Entraînements principaux du laminoir multicylindre d'Outokumpu à Tornio

- | | | | | | |
|---|---|---|----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 1 | Entraînement principal de la cage du laminoir | 5 | Dérouleur, resp. enrouleur | 9 | Dérouleur à papier |
| 2 | Entraînements des dérouleurs/enrouleurs | 6 | Dérouleur | 10 | Enrouleurs à papier |
| 3 | Entraînement du dérouleur | 7 | Rouleau de renvoi | 11 | Capteur |
| 4 | Cage du laminoir | 8 | Rouleau du stressomètre | T ₁ - T ₉ | Transformateurs. |



Principe du fonctionnement de la régulation de l'épaisseur de la bande
 Schéma du déroulement du calcul du diamètre des cylindres de travail

Gestion globale du procédé d'un laminoir multicylindre pour feuillards en acier inoxydable

Revue ABB 3/1997

Moteur à courant continu

Ponts à thyristors

Pourquoi la vitesse variable?

Commande Multimoteurs

Contrainte de la SYNCHRONISATION

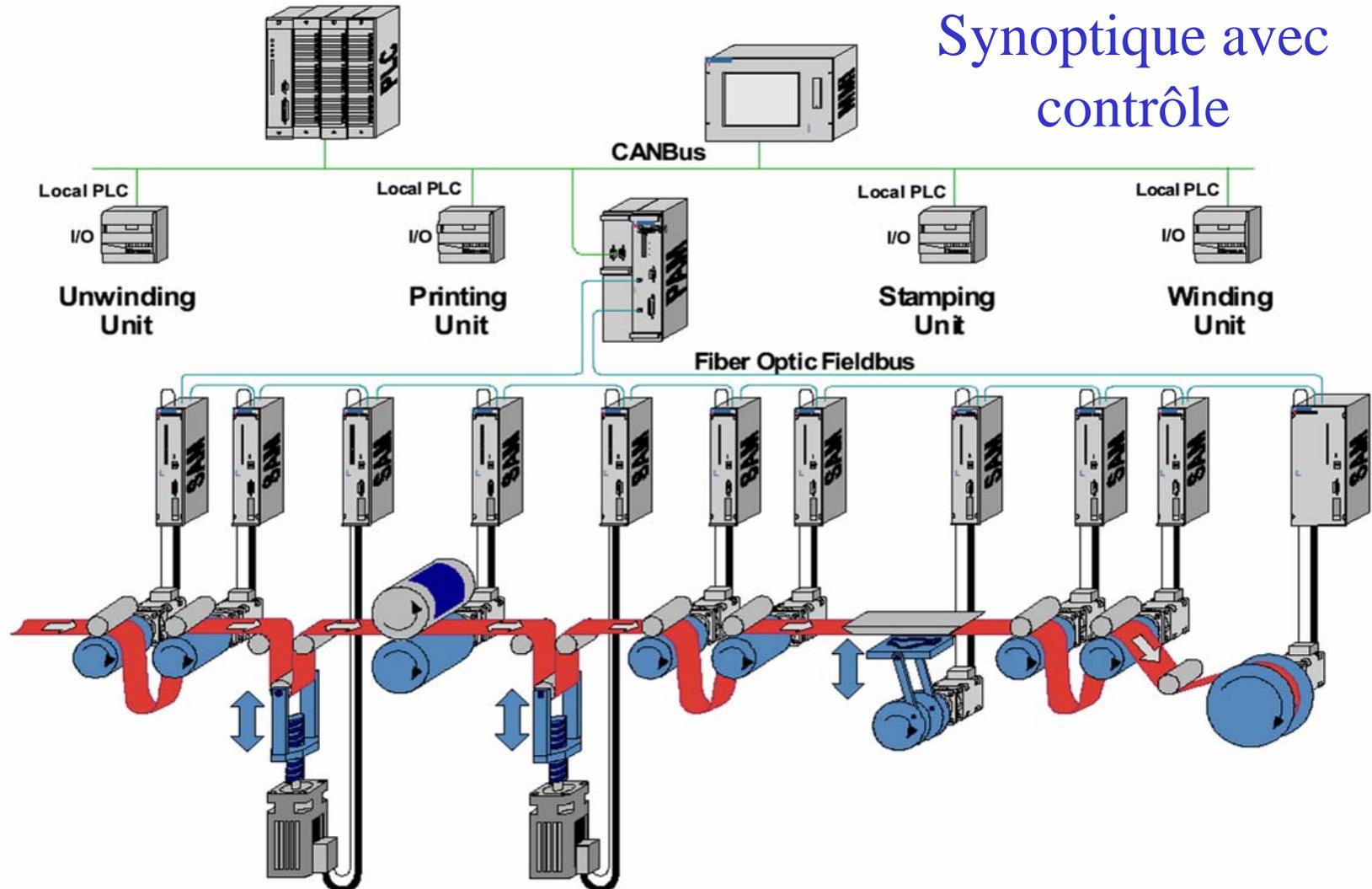


FIG. 1.13 – Machine d'impression (ACCmotion S.A.) (F01_b.dsf).

Figure24 Label Printing Machine Schematic Diagram

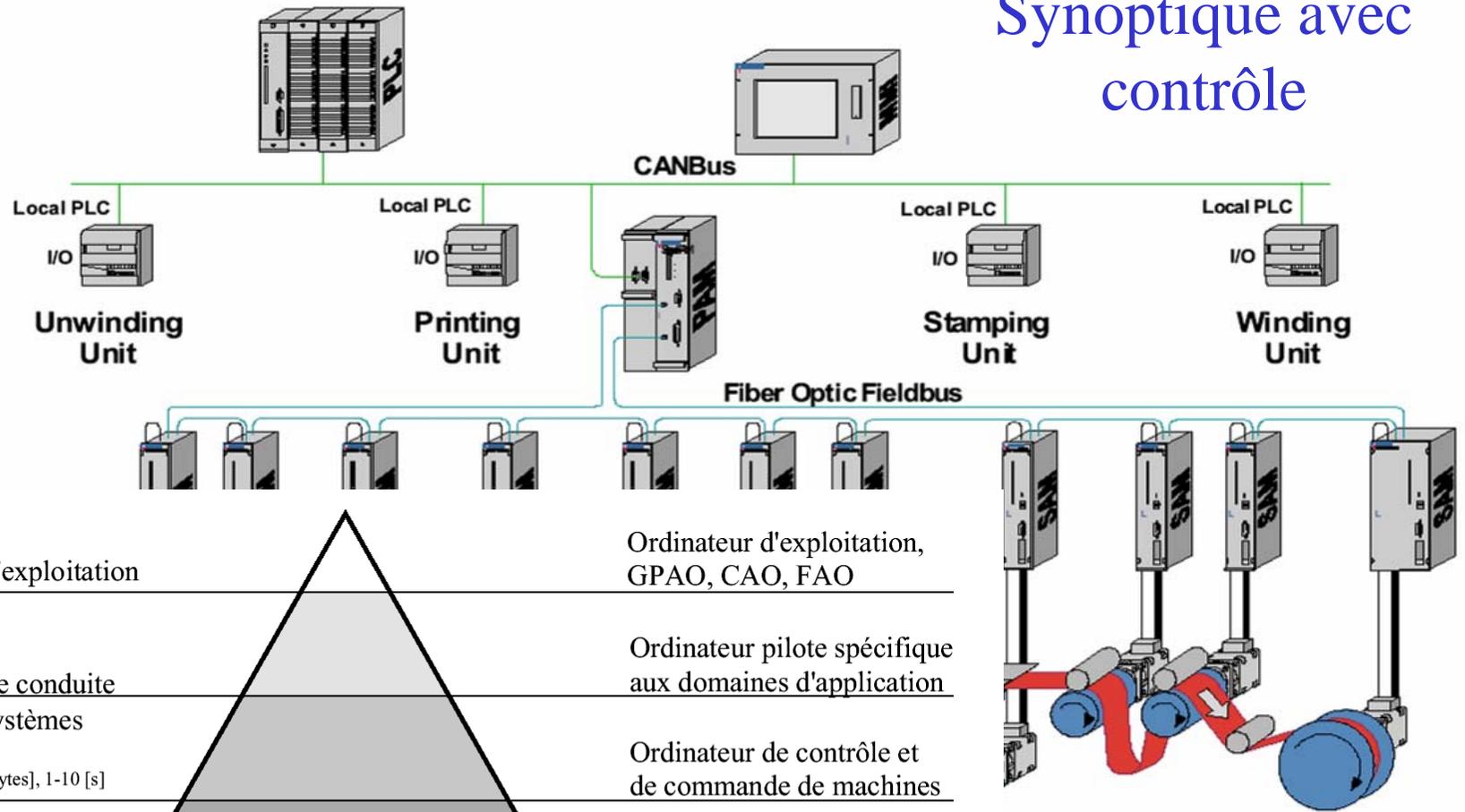
Pourquoi la vitesse variable?

Commande Multimoteurs

Contrainte de la SYNCHRONISATION

Synoptique avec contrôle

Fig. 1.13 – Machine d'impressi



Niveau d'exploitation

Ordinateur d'exploitation, GPAO, CAO, FAO

Niveau de conduite

Ordinateur pilote spécifique aux domaines d'application

Niveau systèmes (cellule)

1[kbit]-1 [MBytes], 1-10 [s]

Ordinateur de contrôle et de commande de machines

Niveau commandes industrielles

10-500 [Bytes], 1-10 [ms]

Automates (API), coordinateur d'axes, systèmes de mesure

Niveau capteurs et actionneurs

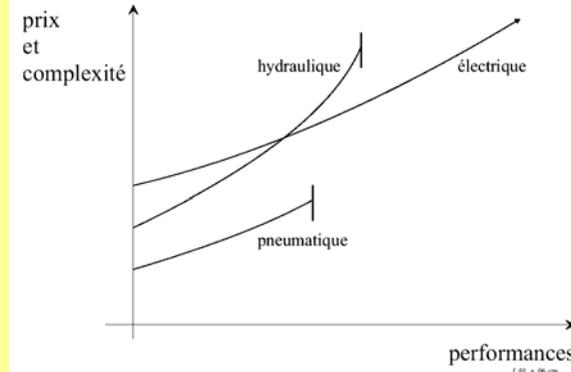
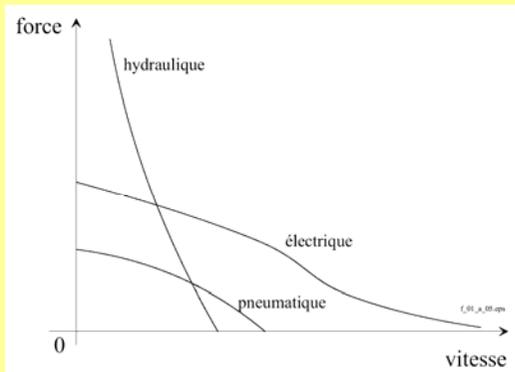
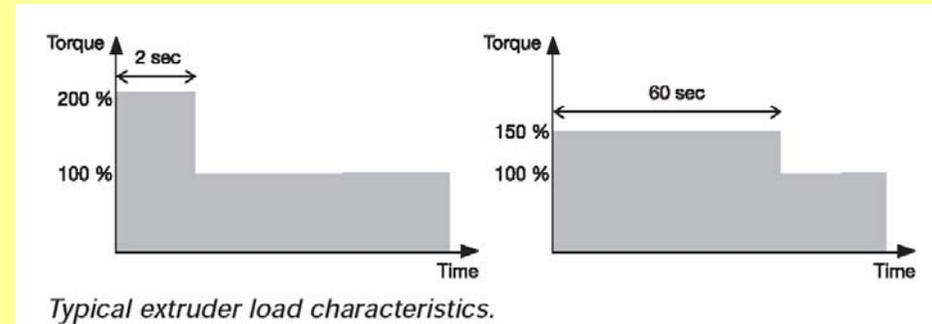
1-8 [Bytes], 5-100 [µs]

Capteurs, actionneurs, commandes d'axes

Pourquoi la vitesse variable?

Les cahiers des charges?

- Couple de charge « statique »: (à vitesse « fixe »)
- suivi de profils de couple, de vitesse, de position
(dynamique/précision): couple « inertiel »
- Contraintes massique, volumique: par exemple système embarqué ou robotique.
- Contraintes de vibration, de bruit
- Contraintes de prix, de brevet, de...



Concept Machine à courant continu

MCC

Concept Machine à courant continu

Qu'est ce que le concept Machine à Courant Continu?

Idée:

Distinguer le concept de la réalisation technologique

Pourquoi ?

Histoire:

La machine à courant continu (objet technologique) possède des équations de fonctionnement très simples...

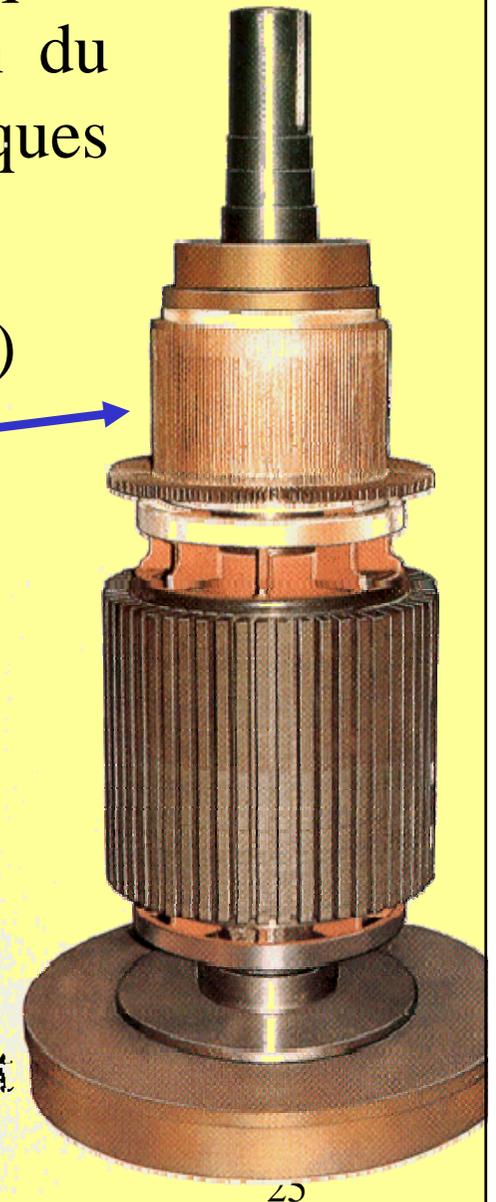
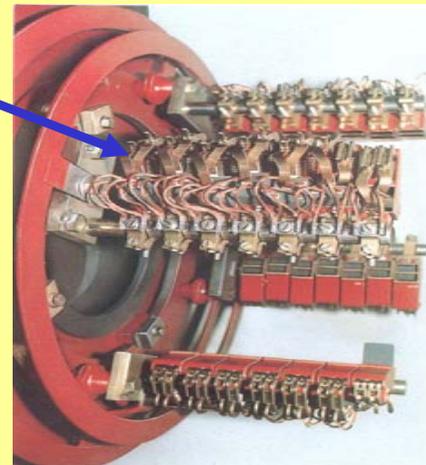
C'est la machine de référence.

L'objectif a été de mettre autour des machines à courant alternatif (synchrone, asynchrone) ce qu'il faut (électronique de puissance et commande) pour que l'ensemble ait les mêmes équations qu'une mcc. Vu d'un peu loin pas de différences!!

Concept Machine à courant continu

La machine à courant continu (l'objet technologique) comporte un dispositif mécanique de commutation du courant...dispositif génial mais à l'origine de quelques unes de ses limitations technologiques:

- usure (balais qui assure la commutation à remplacer)
- vitesse maximale (frottement de balais sur un collecteur)
- couple maximum
- couple volumique et massique

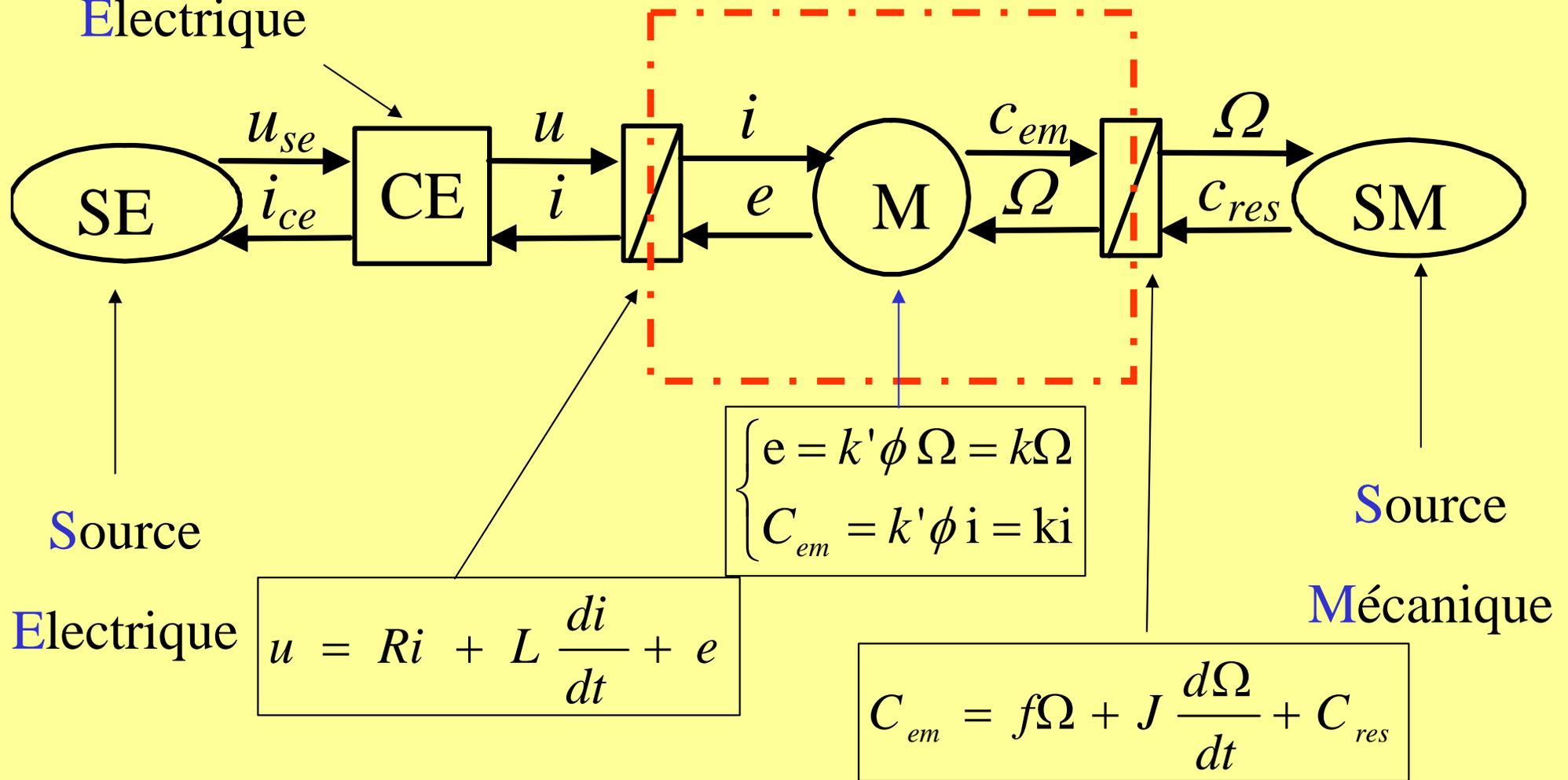


D'où les nouveaux actionneurs dits machine à courant continu sans balais: « DC brushless motors »

Concept Machine à courant continu

Convertisseur **LES EQUATIONS** et Interactions avec l'extérieur

Electrique



L: inductance de la mcc **et** de l'alimentation

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

Concept Machine à courant continu

Analyse causale:

1> Le courant est maîtrisé par action sur la tension d'alimentation u imposée par le convertisseur.

On contrôle donc le couple de la mcc: chemin d'action

2> La mcc impose un couple, la charge aussi....d'où une vitesse

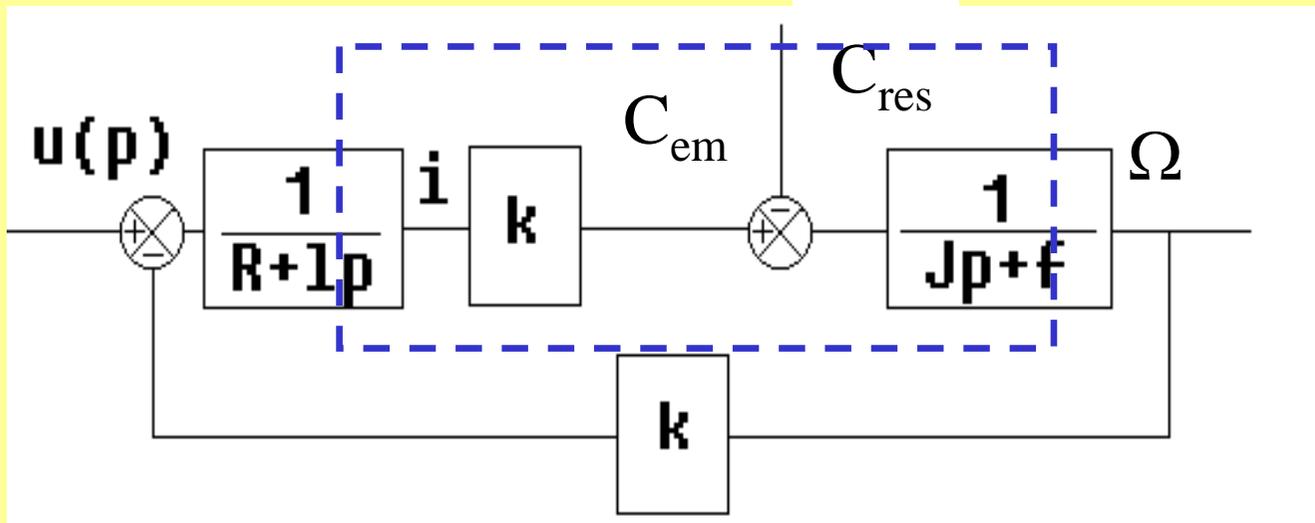
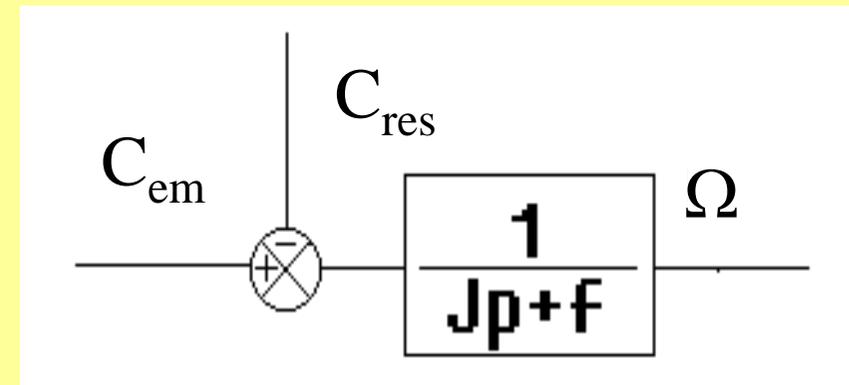
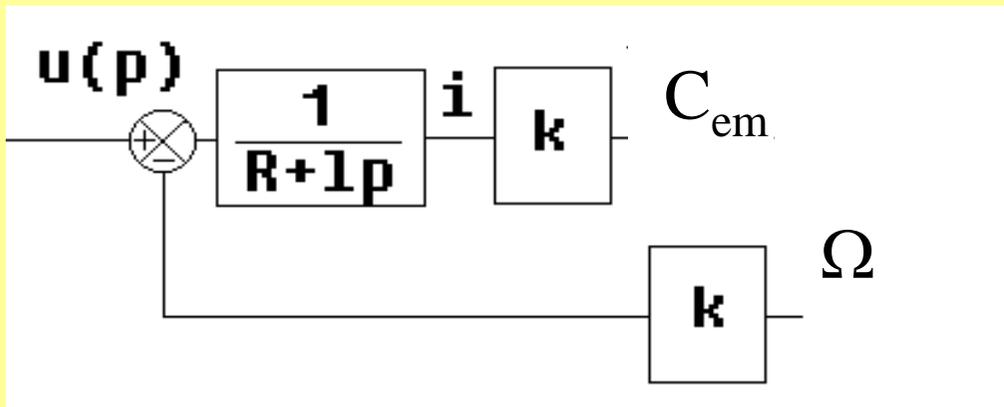
On contrôle la vitesse d'une mcc

en réglant son couple

Le convertisseur statique doit être capable d'imposer une tension.

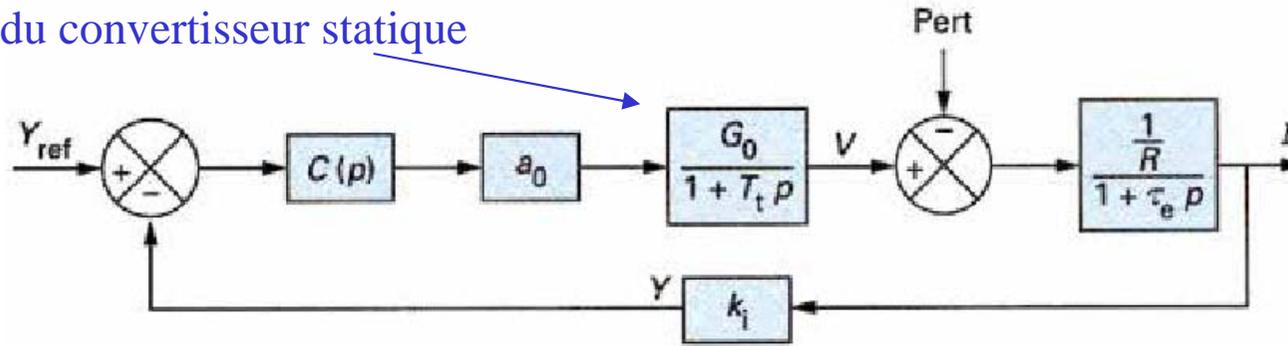
Concept Machine à courant continu

Représentation par schéma bloc



Un premier ordre perturbé par une force contre électromotrice
 ...lentement variable

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

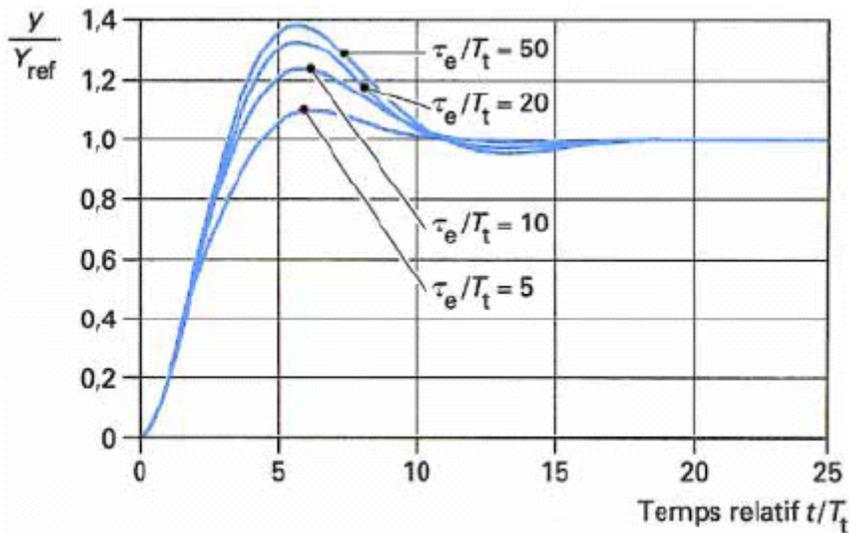


Figure 6 - Optimum symétrique : réponse à un échelon de consigne

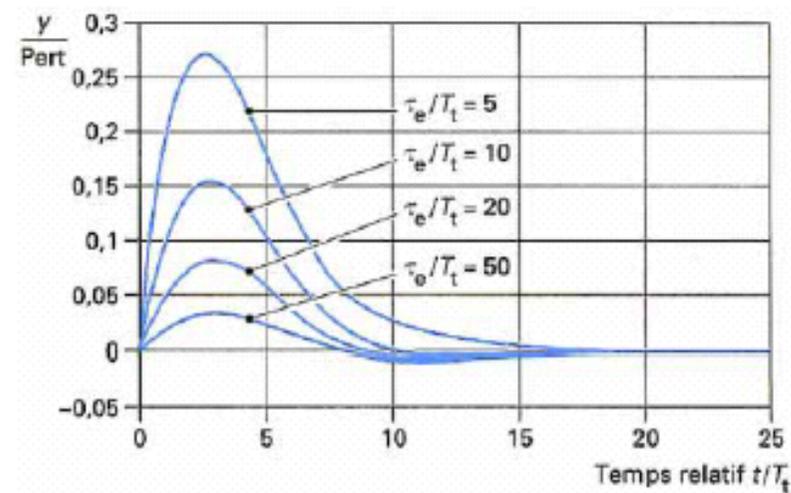
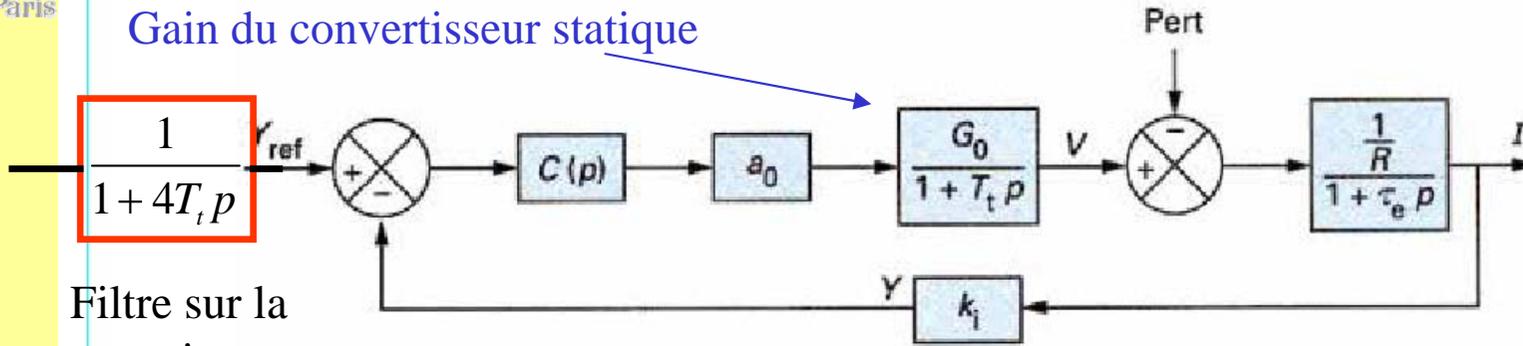


Figure 7 - Optimum symétrique : réponse à un échelon de perturbation

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

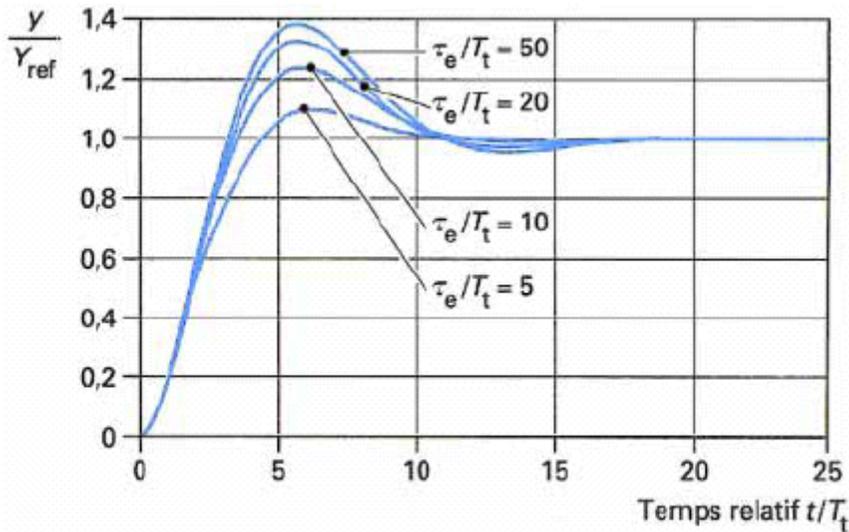


Figure 6 - Optimum symétrique : réponse à un échelon de consigne

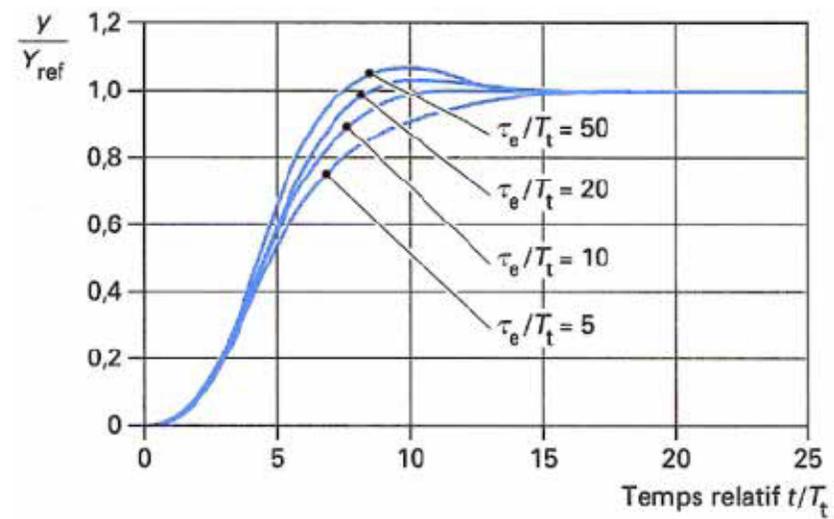


Figure 8 - Optimum symétrique : réponse à un échelon de consigne, avec modèle de référence

Concept Machine à courant continu

Structure de commande usuellement adoptée:

« Boucles imbriquées », « cascade »

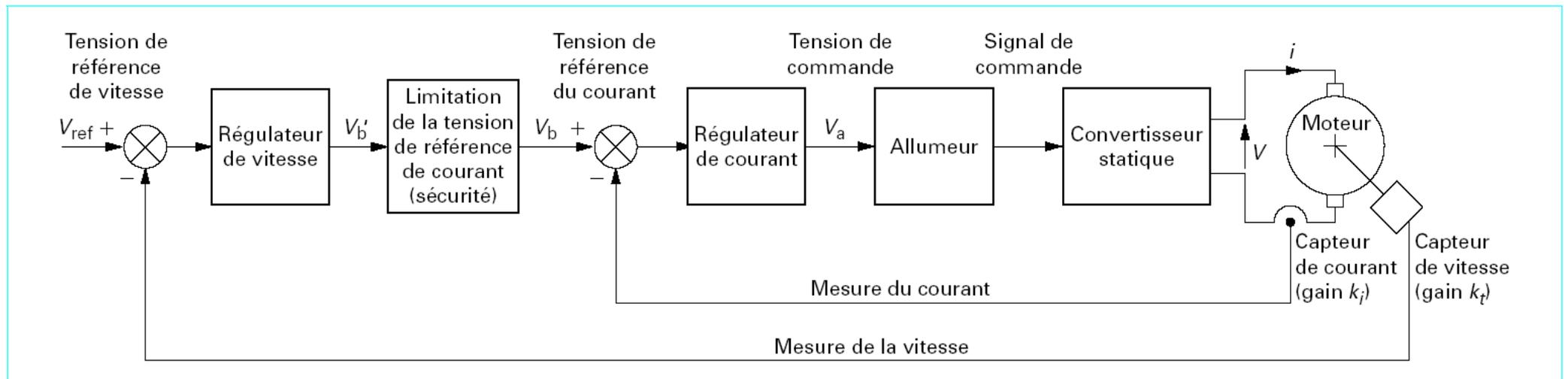


Figure 21 - Structure d'un variateur de vitesse à régulations en cascade

Extrait des techniques de l'Ingénieur

D 3 610

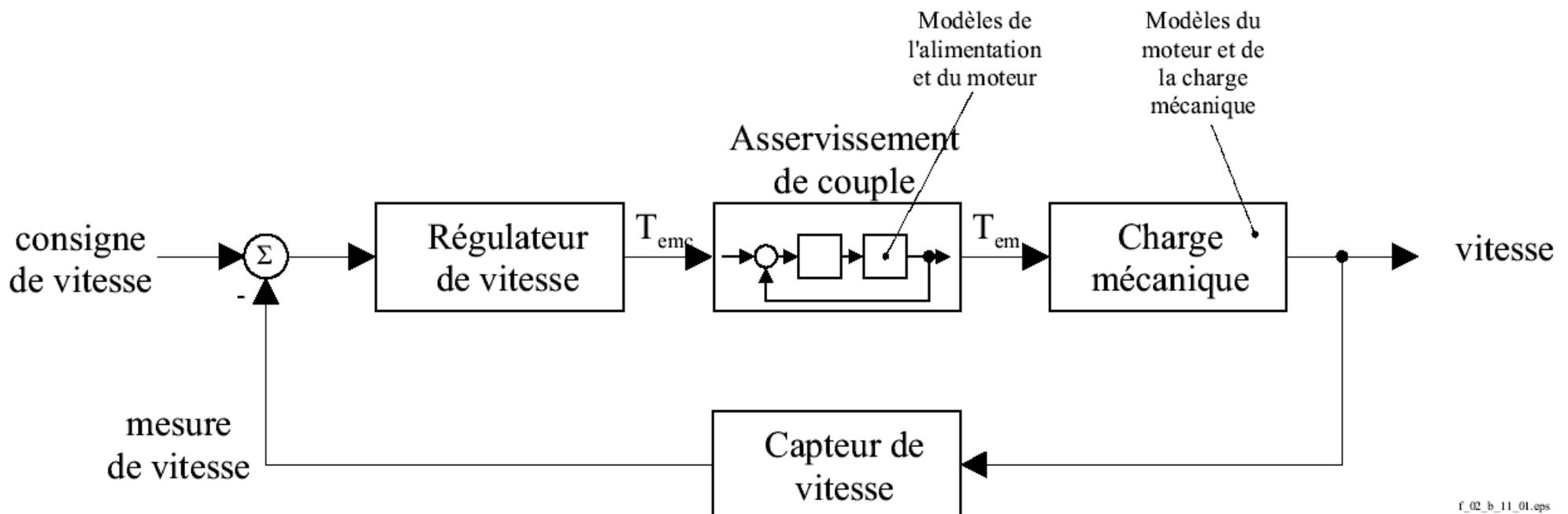
Intérêts:

- 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**

Concept Machine à courant continu

Réglage du correcteur de vitesse:

- étant donné que la boucle de courant a été réglée 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

Concept Machine à courant continu

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 ?

Concept Machine à courant continu

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)

(voir Buhler, « Convertisseurs Statiques » pour plus de précisions)

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 .

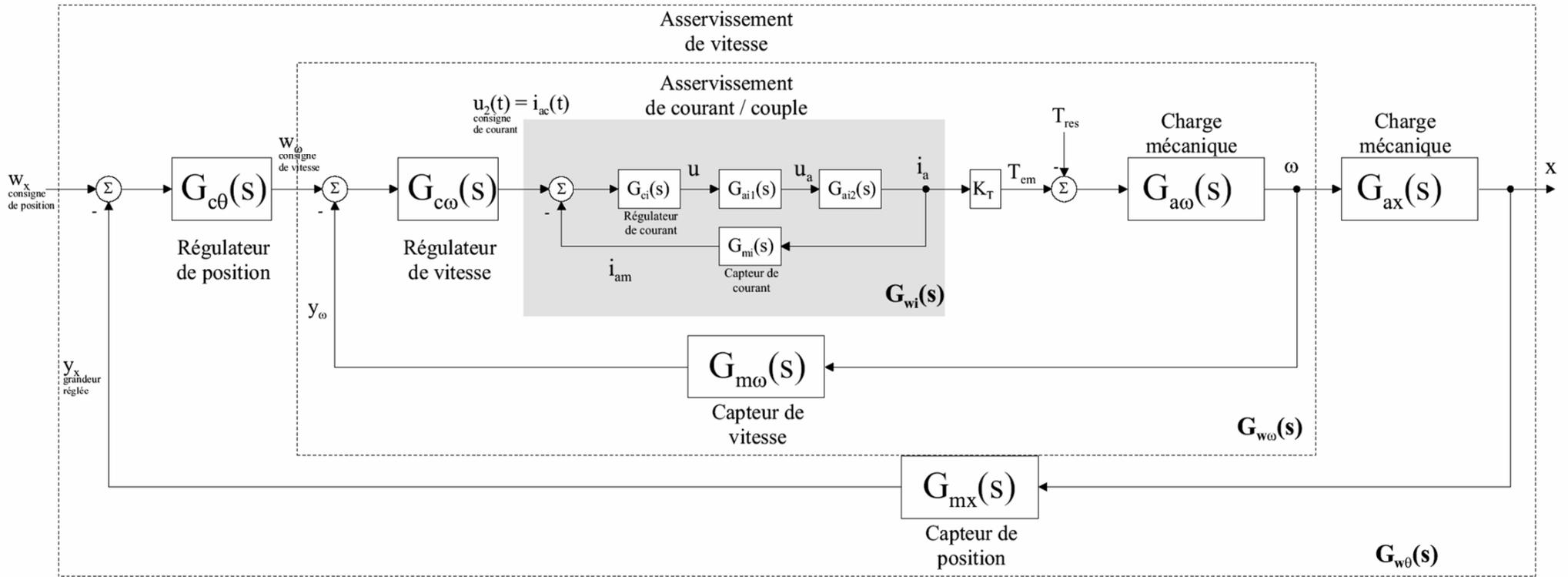
Si on veut un temps de réponse en vitesse de 50ms...il faut $T_h=500 \mu\text{s}$ minimum ...2 kHz...et un pont PD3 à thyristor ne peut convenir.

Concept Machine à courant continu

Asservissement de position

Asservissement de vitesse

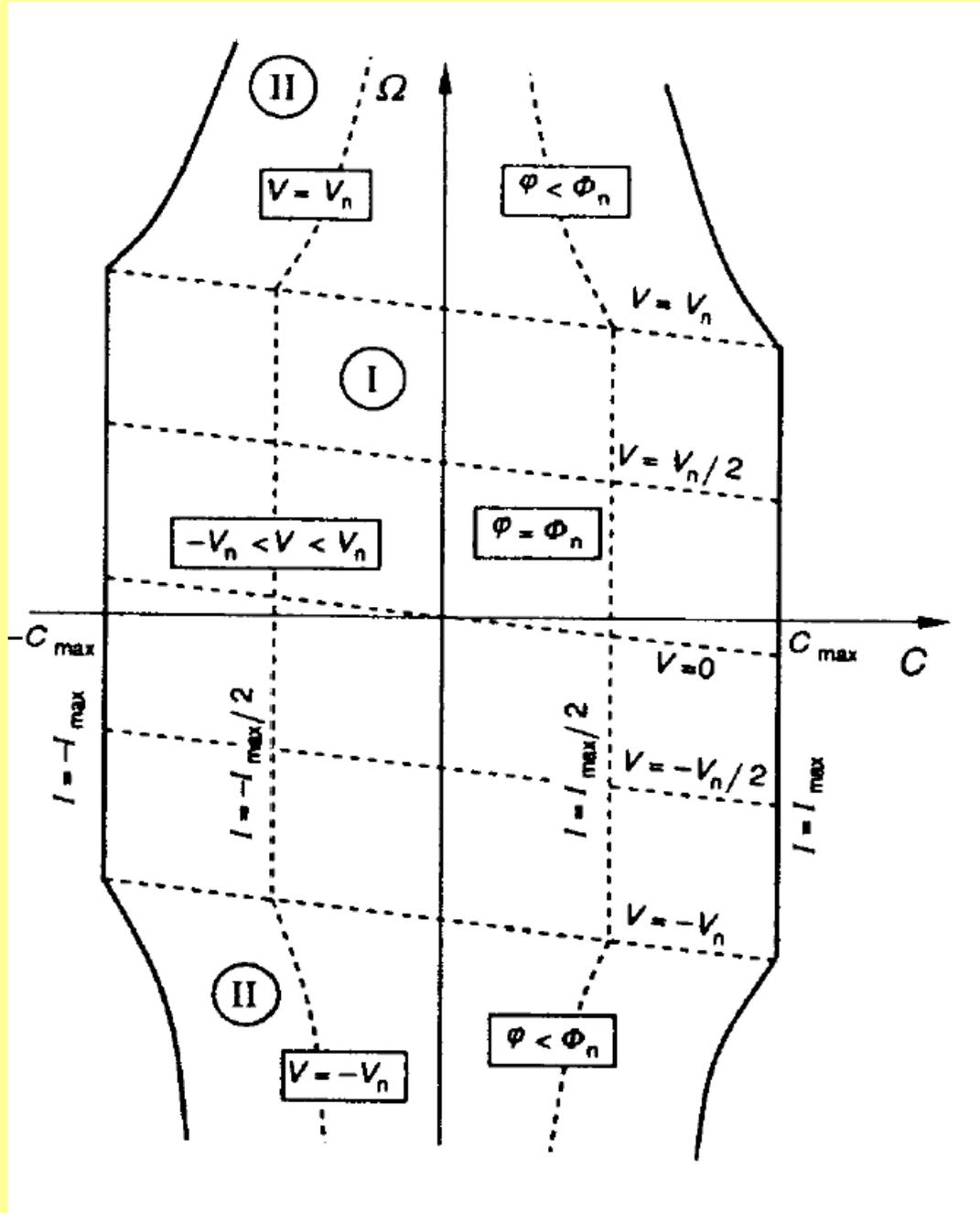
Asservissement de courant / couple



f_01_d_04.cps

Pour un contrôle en position
une troisième boucle

Concept Machine à courant continu

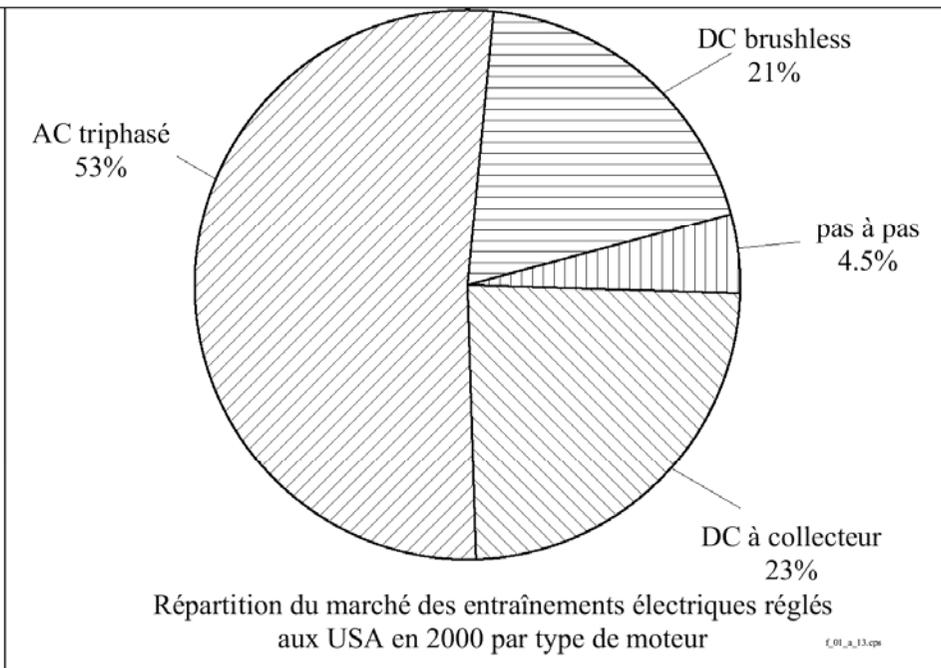
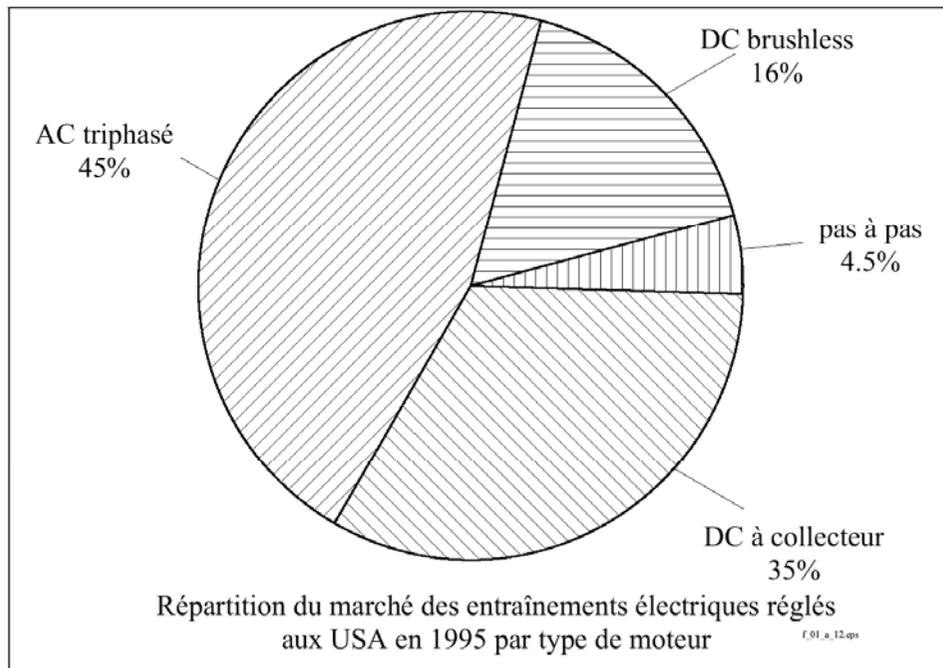
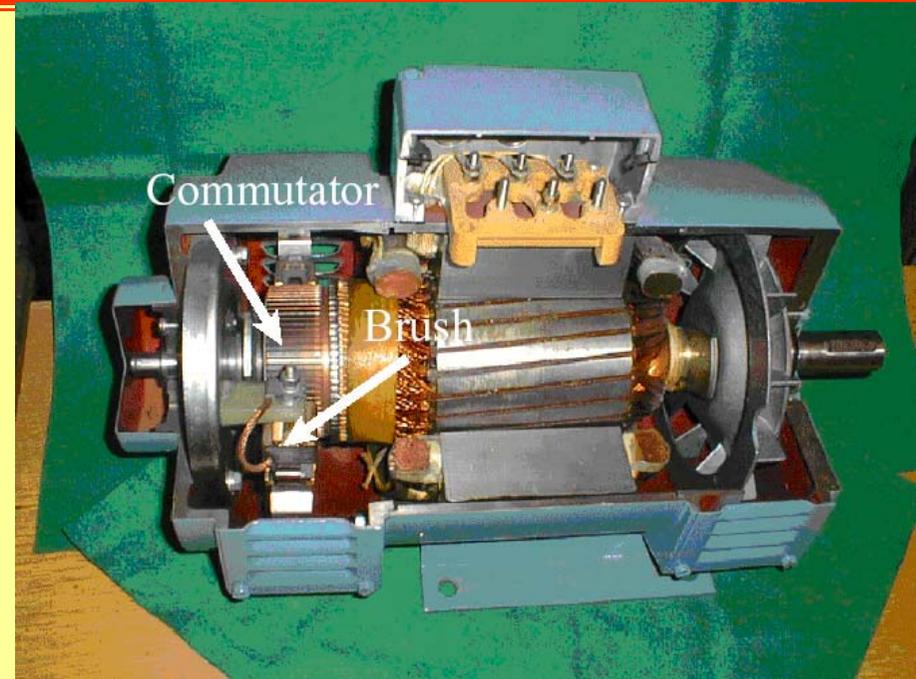


Travail à affaiblissement de flux pour les machines excitées par bobinage

Caractéristiques
 statiques
 Couple/vitesse

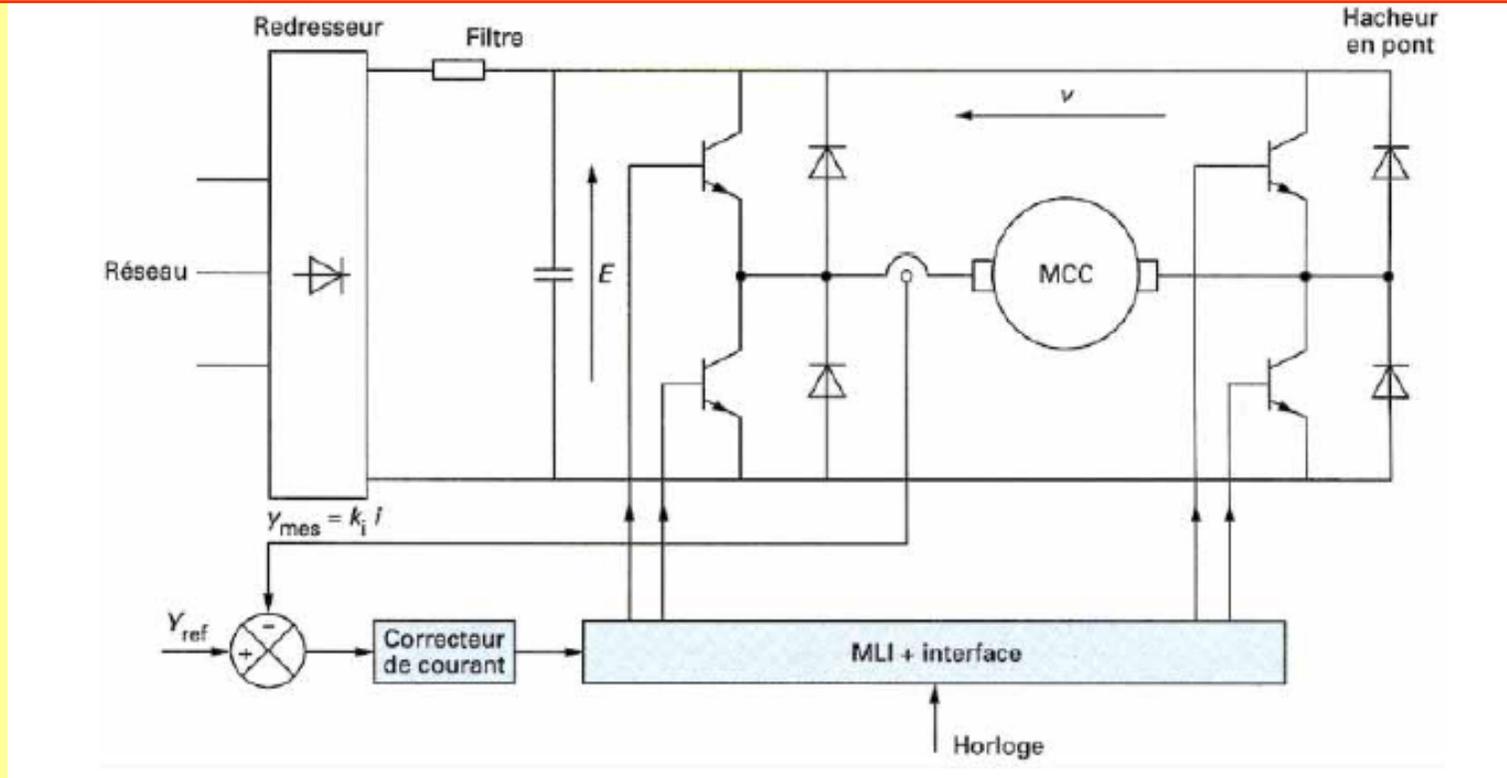
Machine à courant continu: objet technologique

Encore un avenir pour la mcc
(objet technologique?)



Machine à courant continu: objet technologique

Alimentation par hacheur 4Q



Autre type d'alimentation: ponts à thyristors

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

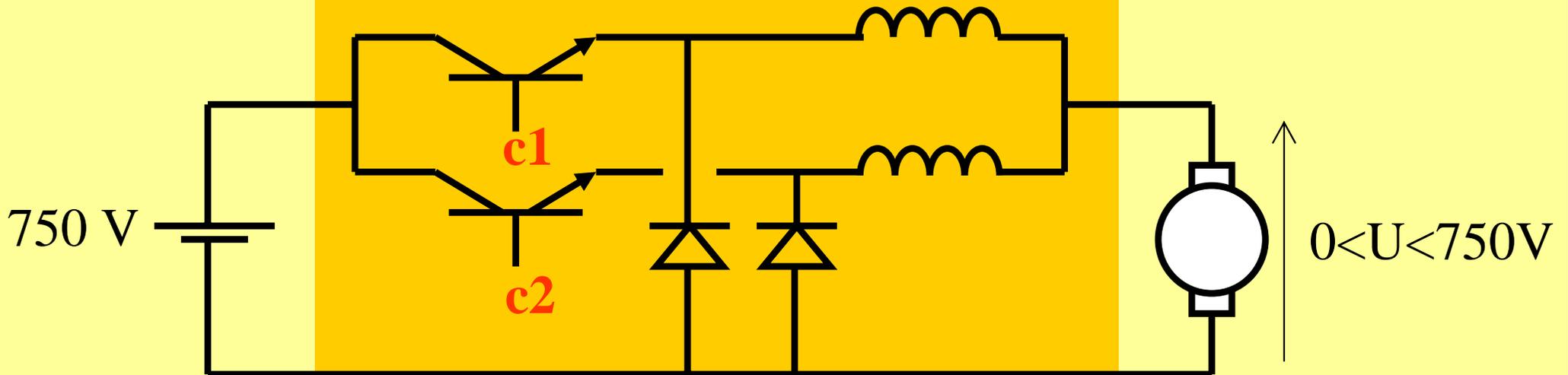
Machine à courant continu: objet technologique



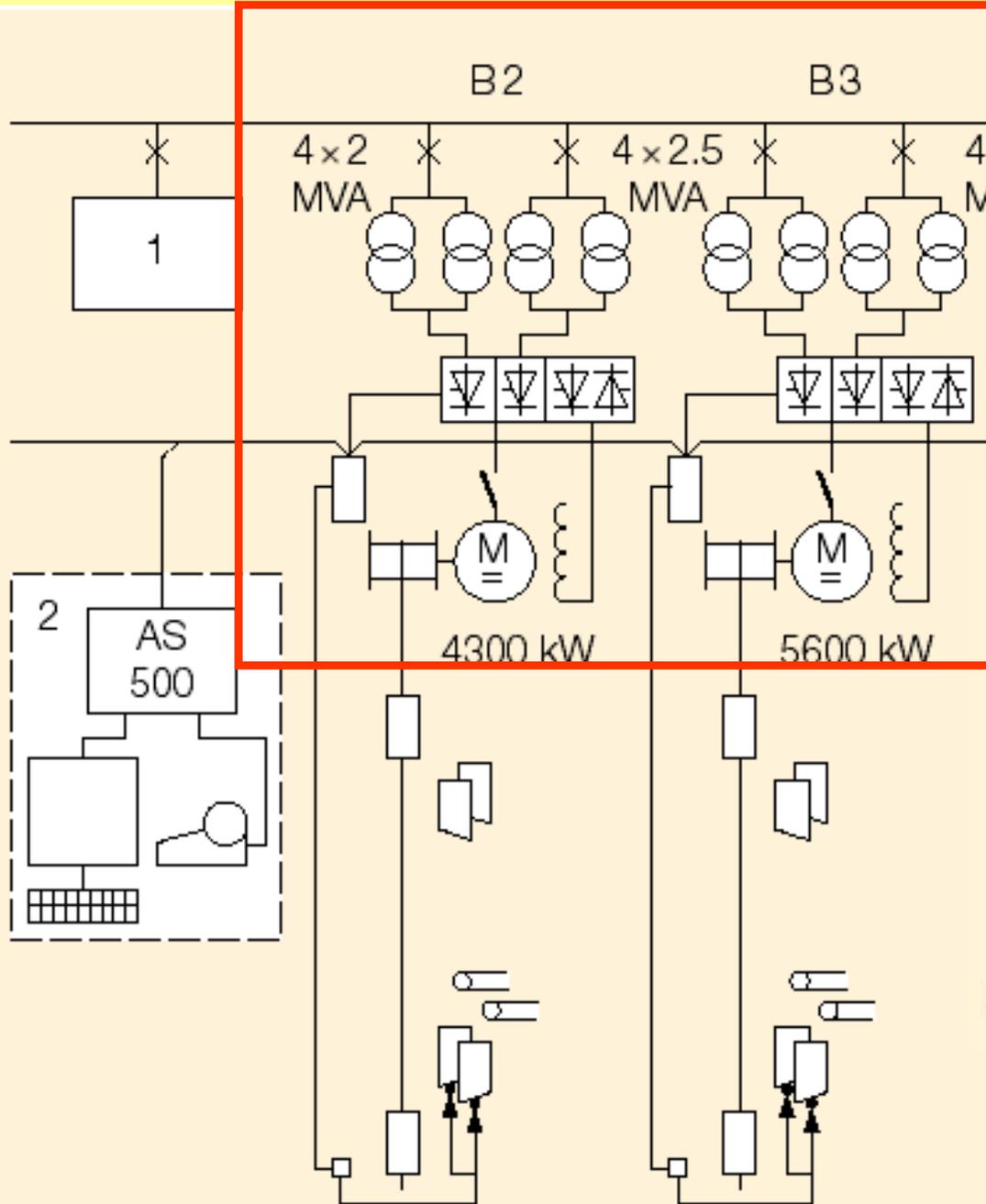
Conception années
70/80

↑
commande des
interrupteurs

Le Hacheur du VAL 206



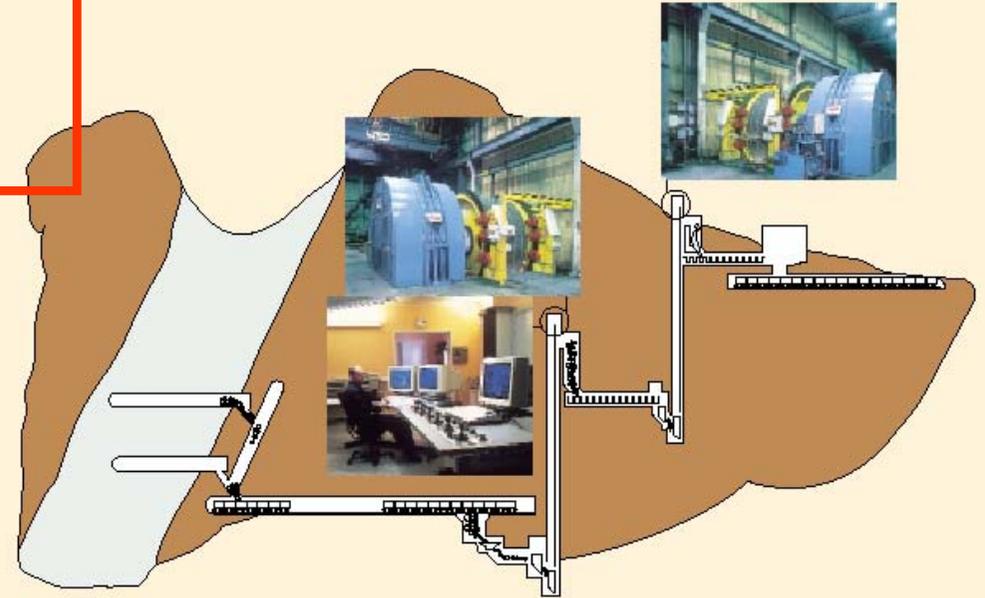
Machine à courant continu: objet technologique



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



Machine à courant continu: objet technologique

Contraintes générales et entretien

- ✓ maintenance périodique toutes les deux mille à cinq mille heures --> blocage de l'activité de la machine . (5000 h= 208 jours plein= 833 jours à 6h/jour). Il faut du personnel...mais est ce toujours un problème?...d'autant que les pièces sont peu coûteuses.
- ✓ Dépoussiérage périodique (~ 100 à 200 H)
- ✓ Différentes opérations à effectuer plus ou moins régulièrement
 - dépoussiérage complet pour éliminer le charbon (risques d'incendie) ;
 - changement des charbons et usinage du collecteur ;
 - graissage ;
 - nettoyage des filtres à air.
- ✓ coût d'achat élevé pour la machine mais faible pour le variateur

Conclusion

Remplacer une mcc existante par un système à courant alternatif ?

Installer un système avec mcc: peu probable en Europe.

Éléments de bibliographie disponible sur Internet « pour approfondir » scientifiquement et sur les aspects « choix »

- Polycopiés de l'école d'ingénieurs du Canton de Vaud de Michel Etique
- « *Variation de vitesse des machines à courant alternatif* ». Philippe Ladoux
- « *Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones* »
- « AC Motor Speed Control », T.A. Lipo, Karel Jezernik, University of Wisconsin University of Maribor, Madison WI, U.S.A Maribor Slovenia.
- « Propriétés générales de la variation de vitesse des machines électriques », C. Glaize, Médiathèque EEA
- Rapport européen « VSDs for Electric Motor Systems »
- « Guide des entraînements à vitesse variable », Guide technique No. 4 ABB
- « La technologie DTC ou le contrôle direct de couple », Guide technique No. 1 ABB
- « La Variation de Vitesse au cœur des applications industrielles », *Le magazine Schneider Electric* « Intersections » mai 2005
- Polycopiés de l'université Aalborg Institute of Energy Technology

Eléments de bibliographie « ouvrages »

- Modélisation et commande de la machine asynchrone par JP CARON et JP HAUTIER (Editions TECHNIP)
- Control of Electrical Drives, W.Leonhard, Springer - Verlag, 1984,
- Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, J.R.Hendershot Jr, TJE Miller, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994,
- Machines électriques, J.Chatelain, Traité d'Electricité, vol. X, PPUR, 1983
- Convertisseurs statiques, H.Bühler, PPUR, 1991
- Vector Control of AC Machines, P.Vas, Clarendon Press, Oxford, 1990,
- Réglage de systèmes d'électronique de puissance, vol. 1, théorie, vol. 2 : entraînements réglés, H.Buhler, PPUR, 1997