

Plan

- ✓ **Raisons de la variation de vitesse**
- ✓ **Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones**
- ✓ **Principe de réglage de la fréquence**
- ✓ **Bénéfices du variateur de fréquence**
- ✓ **Inconvénients du variateur de fréquence**
- ✓ **Etude de cas : pompage**

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Raison de la variation de vitesse

Plusieurs variable de process dans l'industrie nécessitent des variations de vitesse

- ✓ Débit,
- ✓ pression,
- ✓ température,
- ✓ Vitesse de rotation
- ✓ Etc.

et plusieurs machines sont utilisées :

- ✓ Les pompes
- ✓ Les ventilateurs
- ✓ Les compresseurs
- ✓ Les convoyeurs
- ✓ etc.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Raison de la variation de vitesse -suite-

La variation de la vitesse des machines peut s'accompagner d'une économie substantielle de l'énergie tout en gardant le même degré de confort et de souplesse dans le processus industriel.

✓ Les différentes technologies pour varier la vitesse

- Mécanique
- Hydraulique
- Variateur pour moteur à courant continu
- Convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone

-Le moteur asynchrone couplé avec un variateur de fréquence est de loin le plus intéressant pour la variation de la vitesses.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones

L'expression du couple électromagnétique et du courant satorique

$$C_e = 3 \frac{p V_1^2}{\omega_s} \frac{\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}}{\left(\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}\right)^2 + \left(\frac{L_R \omega_s}{m_o}\right)^2}$$

$$I_s = \frac{V_1^2}{\left(\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}\right)^2 + \left(\frac{L_R \omega_s}{m_o}\right)^2}$$

L_R : Inductance de fuite au rotor

R_R : Résistance du rotor

(ces deux grandeurs sont ramenées
au stator)

m_o : rapport de transformation

V_1 : tension primaire ; I_1 : courant primaire

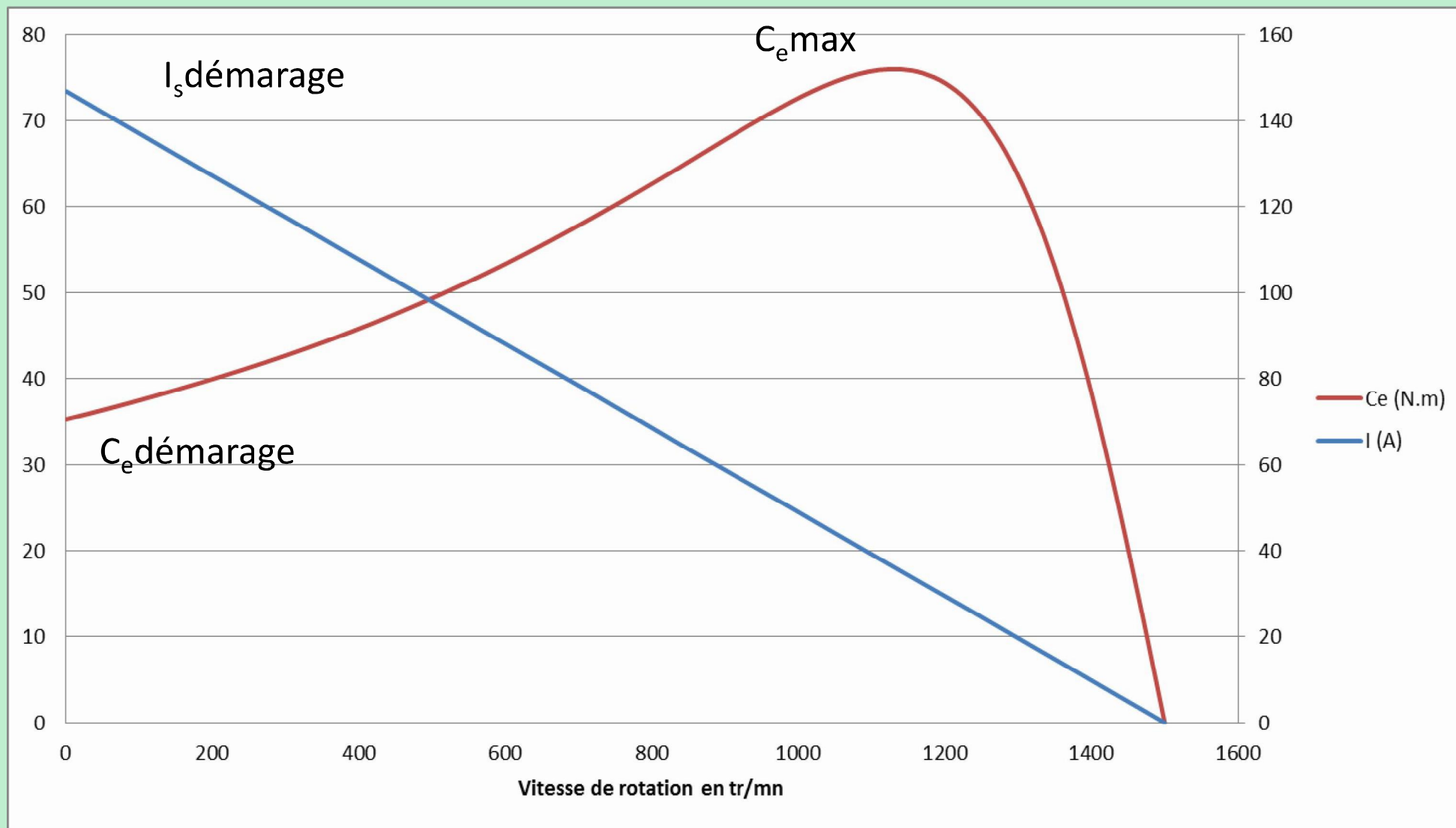
f : fréquence du réseau (50 Hz) ; $\omega_s = 2 \pi f$;

P : nombre de paires de pôles ;

$\Omega_s = \omega_s / p$ vitesse de synchronisme

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones

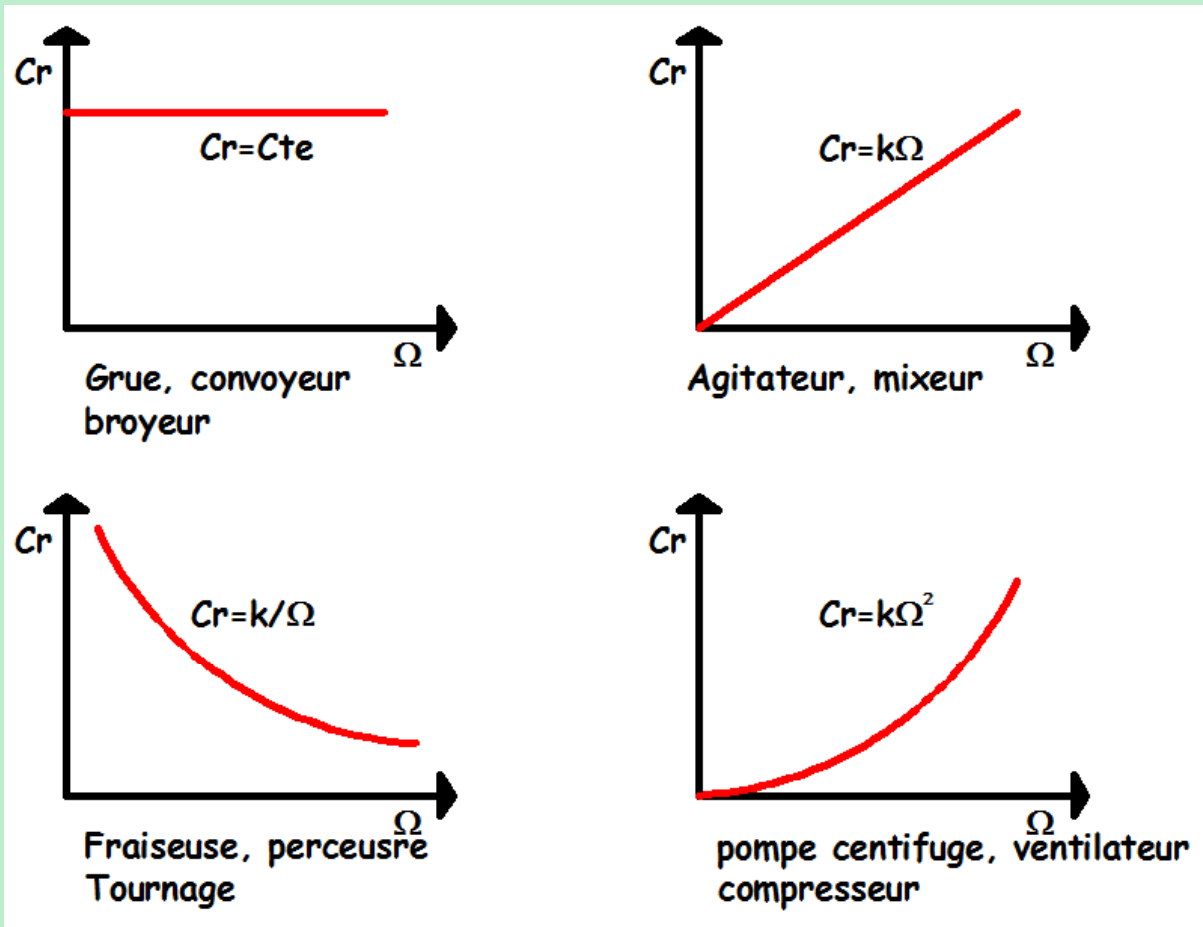


Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones -le point de fonctionnement du moteur-

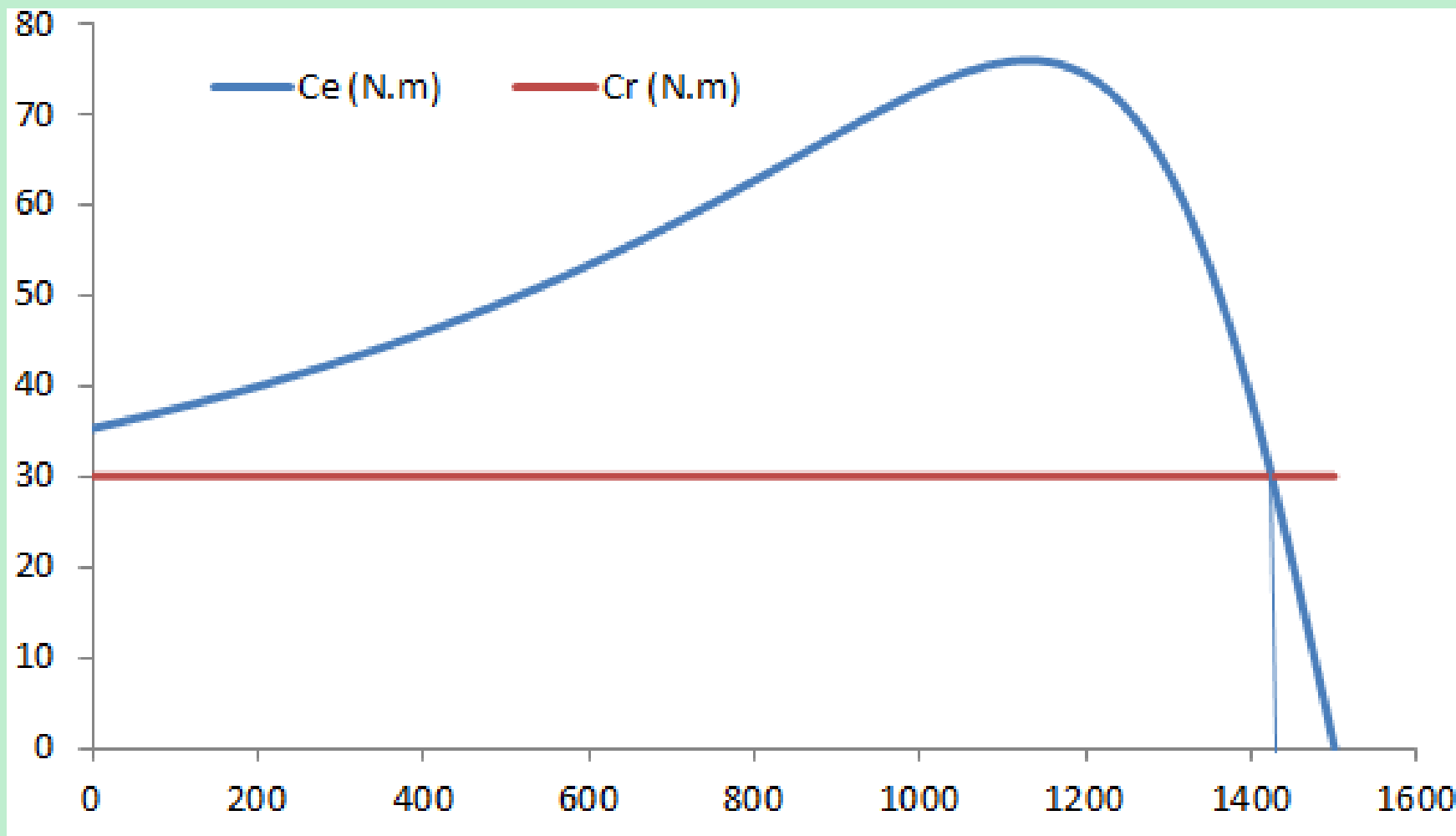
C'est l'intersection entre la courbe du couple résistant qui dépend de la charge et du couple moteur.

On distingue les 4 profils types du couple résistant :



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

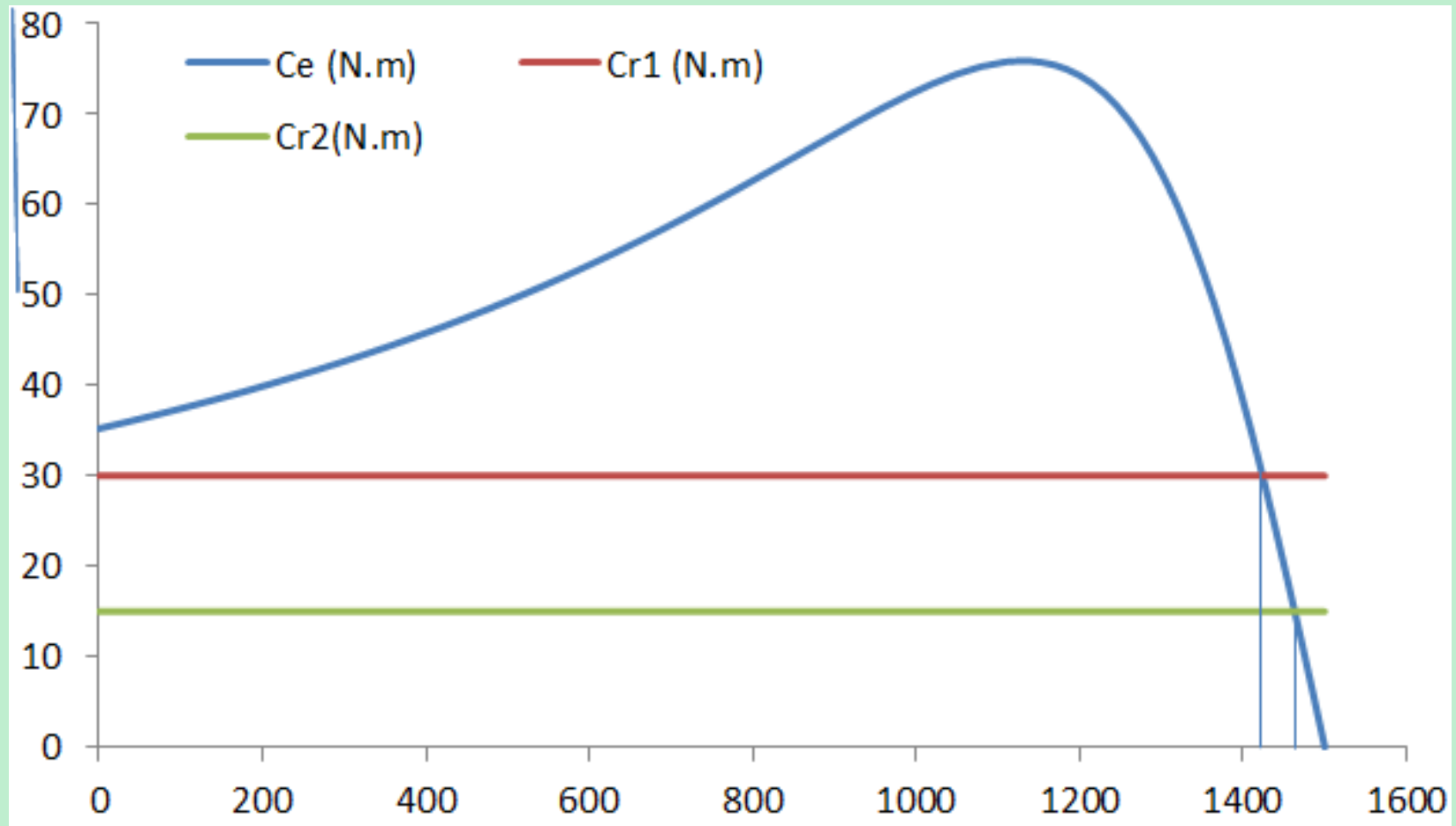
- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones -le point de fonctionnement du moteur-



Le point de fonctionnement $C=30$ N.m et $\Omega=1420$ tr/mn

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones – Evolution de la vitesse en fonction de la charge-



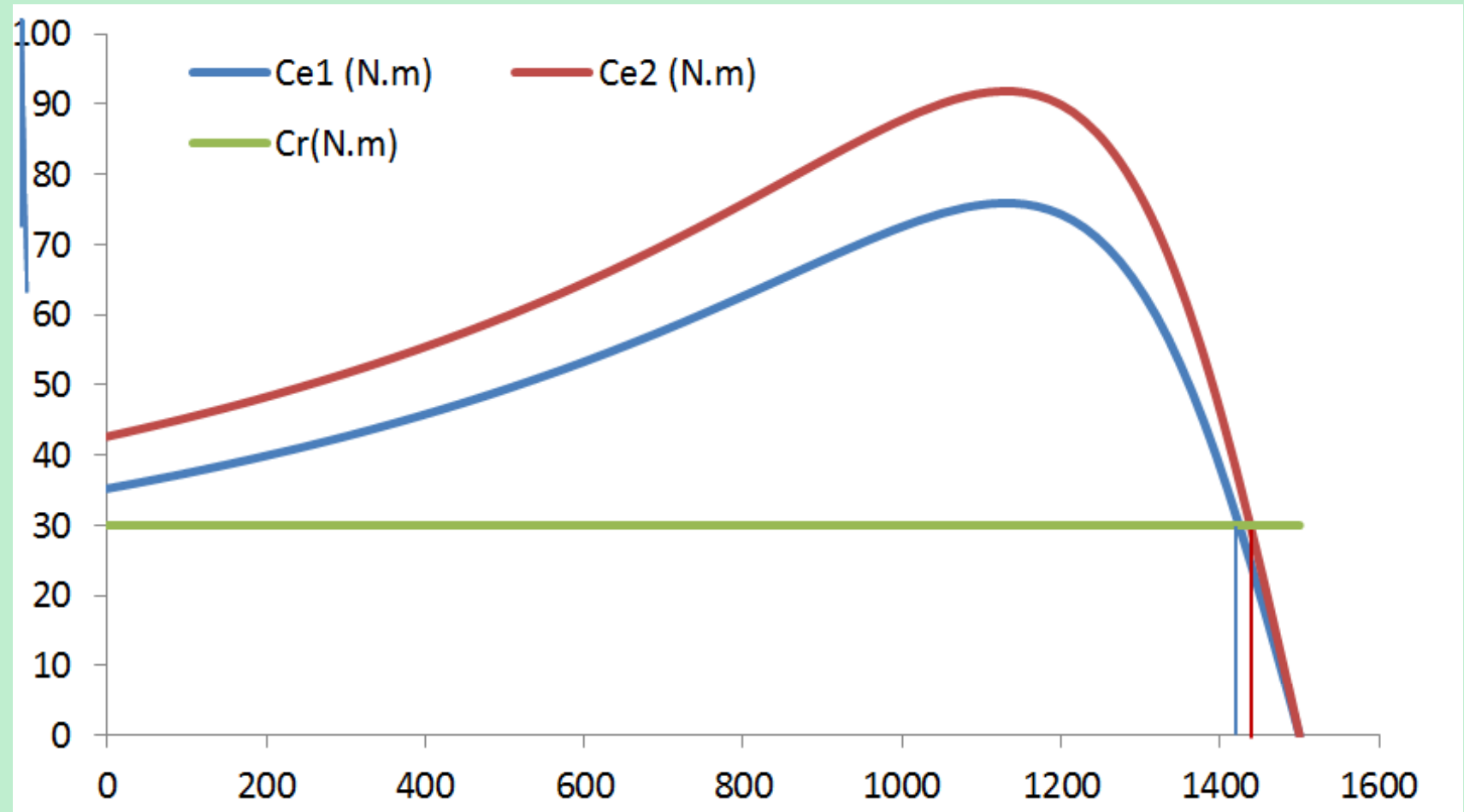
Cr1=30 N.m et $\Omega_1=1425$ tr/mn

Cr2=15 N.m et $\Omega_1=1460$ tr/mn

une diminution de 50% du couple fait varier la vitesse de 2,5% seulement.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones – Evolution de la vitesse en fonction de la tension-



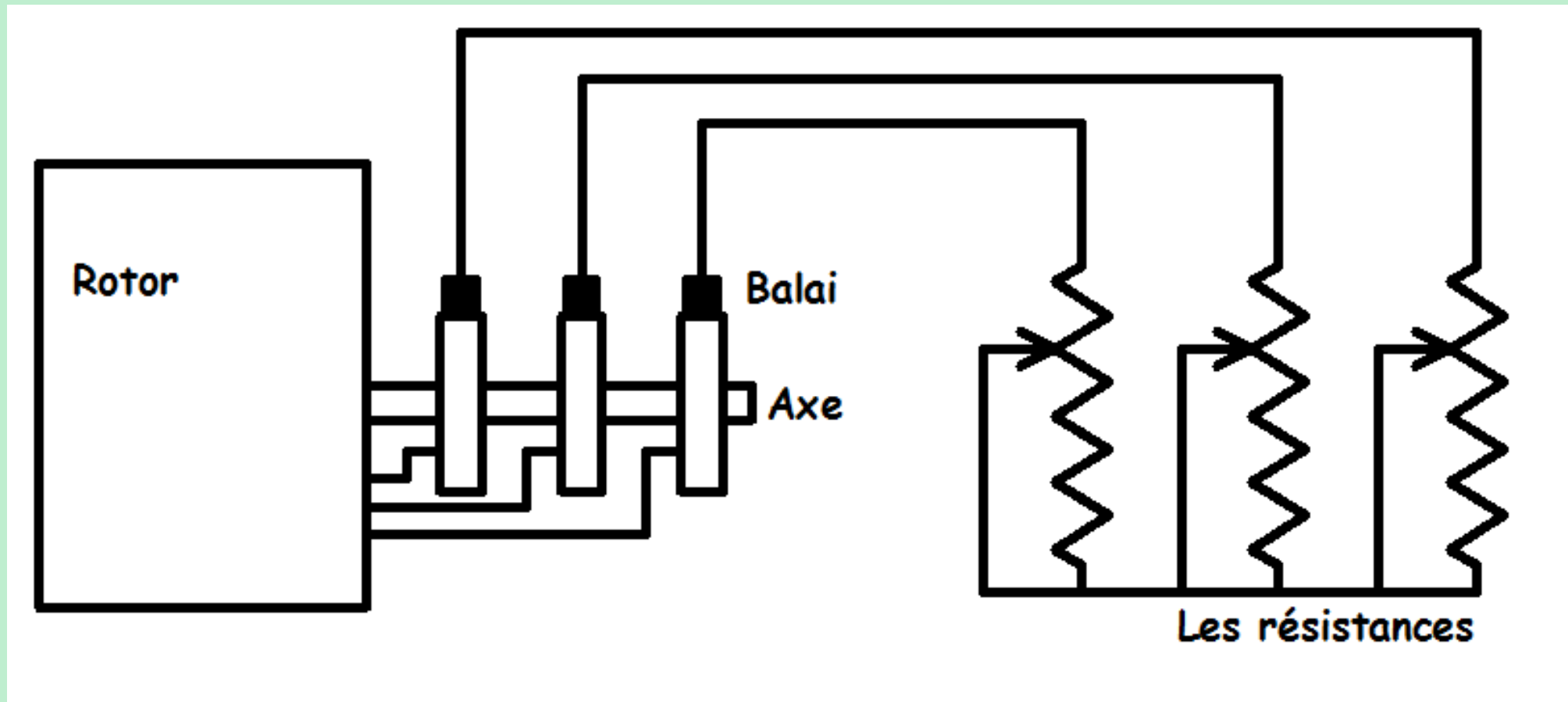
sous une tension de V_1 (la courbe de Ce_1), on a $\Omega_1=1425$ tr/mn

Sous une tension de 10% plus grande Pour (la courbe de Ce_2), on a $\Omega_2=1440$ tr/mn

une augmentation de 10% de la tension ne fait varier la vitesse que de de 1,1%.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones – Evolution de la vitesse en fonction de la Résistance rotorique-



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones – Evolution de la vitesse en fonction de la Résistance rotorique-

Il s'agira donc des moteurs à rotor bobiné donc accessible; On rappelle que :

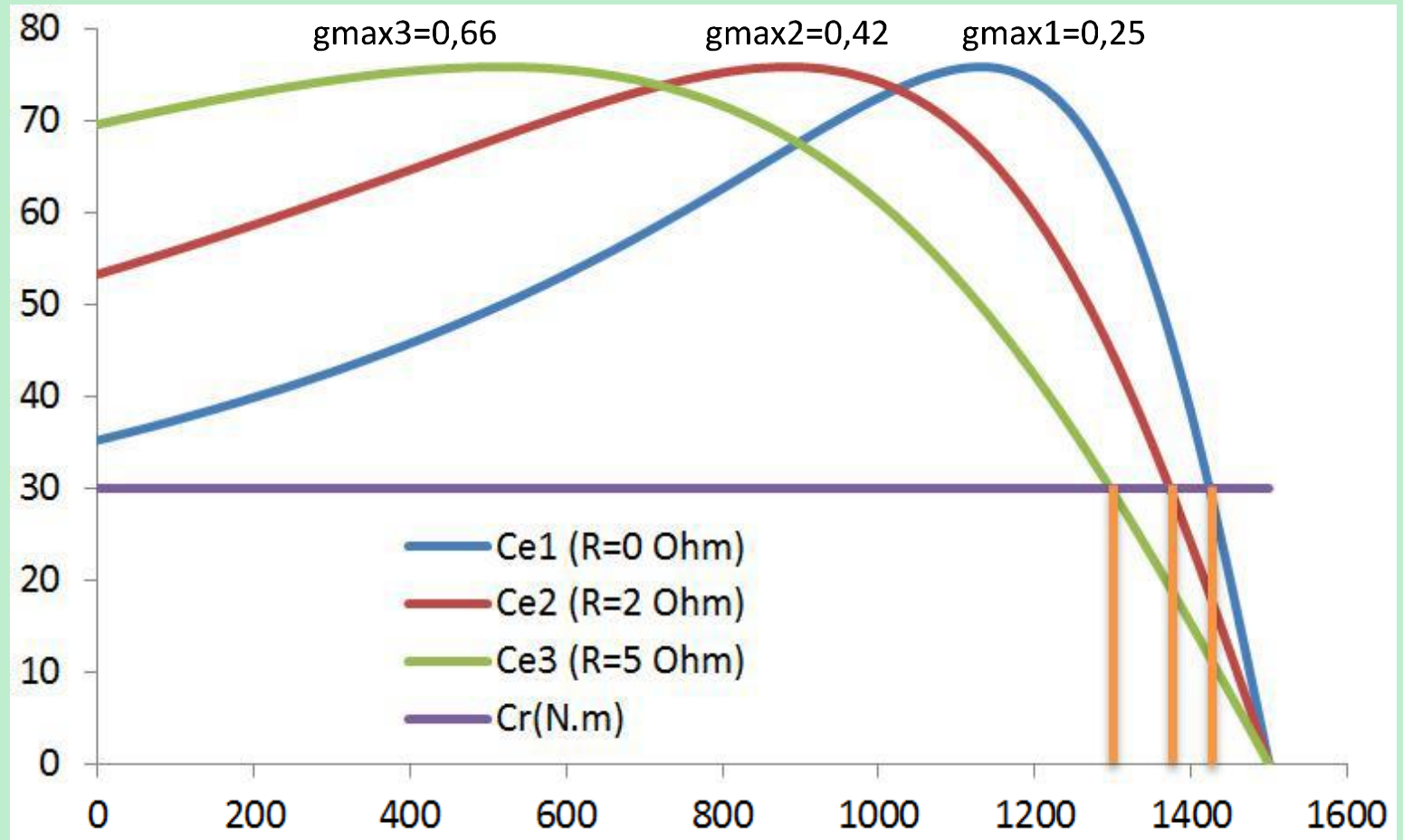
$$C_e = 3 \frac{p V_1^2}{\omega_s} \frac{\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}}{\left(\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}\right)^2 + \left(\frac{L_R}{m_o} \omega_s\right)^2} ; \text{ on monte que : } C_{e \max} = 3 \frac{p V_1^2}{\omega_s^2} \frac{1}{2 \frac{L_R}{m_o}}$$

et que le glissement correspondant au couple maximal est $g_{c \max} = \frac{R_R}{L_R \omega_s}$

$C_{e \max}$ ne dépend pas de R_R et $g_{c \max}$ est proportionnel à R_R

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones – Evolution de la vitesse en fonction de la Résistance rotorique-



$\Omega_1=1425$ tr/mn , $\Omega_2=1370$ tr/mn et $\Omega_3=1290$ tr/mn

Inconvénient : pertes dans les résistances du rotor

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones à cage d'écurueil - action sur la fréquence-

On rappelle encore les expression du couple du couple maximal et du glissement correspondant :

$$C_e = 3 \frac{p V_1^2}{\omega_s} \frac{\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}}{\left(\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}\right)^2 + \left(\frac{L_R}{m_o} \omega_s\right)^2} ; C_e \max = 3 \frac{p V_1^2}{\omega_s^2} \frac{1}{2 \frac{L_R}{m_o}} \text{ et } g_{c \max} = \frac{R_R}{L_R \omega_s}$$

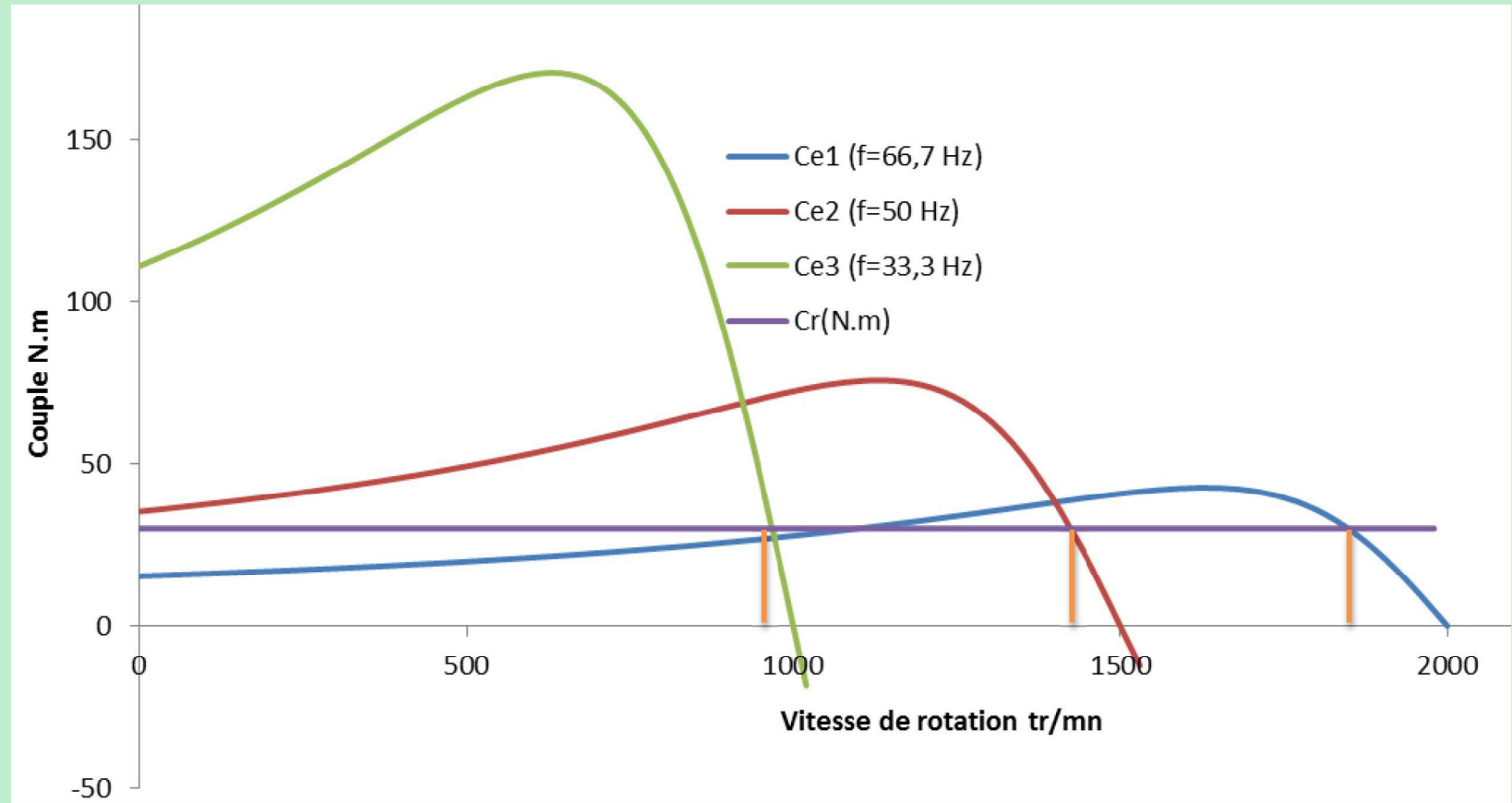
Or $\omega_s = 2\pi f$; il vient donc que :

$$C_e = 3 \frac{p V_1^2}{2\pi f} \frac{\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}}{\left(\frac{R_R}{m_o} \frac{1}{g}\right)^2 + \left(\frac{L_R}{m_o} 2\pi f\right)^2} ; C_e \max = 3 \frac{p V_1^2}{(2\pi f)^2} \frac{1}{2 \frac{L_R}{m_o}} \text{ et } g_{c \max} = \frac{R_R}{L_R (2\pi f)}$$

On obtient les caractéristiques suivantes.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones à cage d'écurueil - action sur la fréquence-



$$\Omega_1(66,7 \text{ Hz})=1815 \text{ tr/mn} ; \Omega_2(50 \text{ Hz})=1425 \text{ tr/mn} , \Omega_3(33,3 \text{ Hz})=965 \text{ tr/mn}$$

C_e max est Inversement proportionnel à f^2

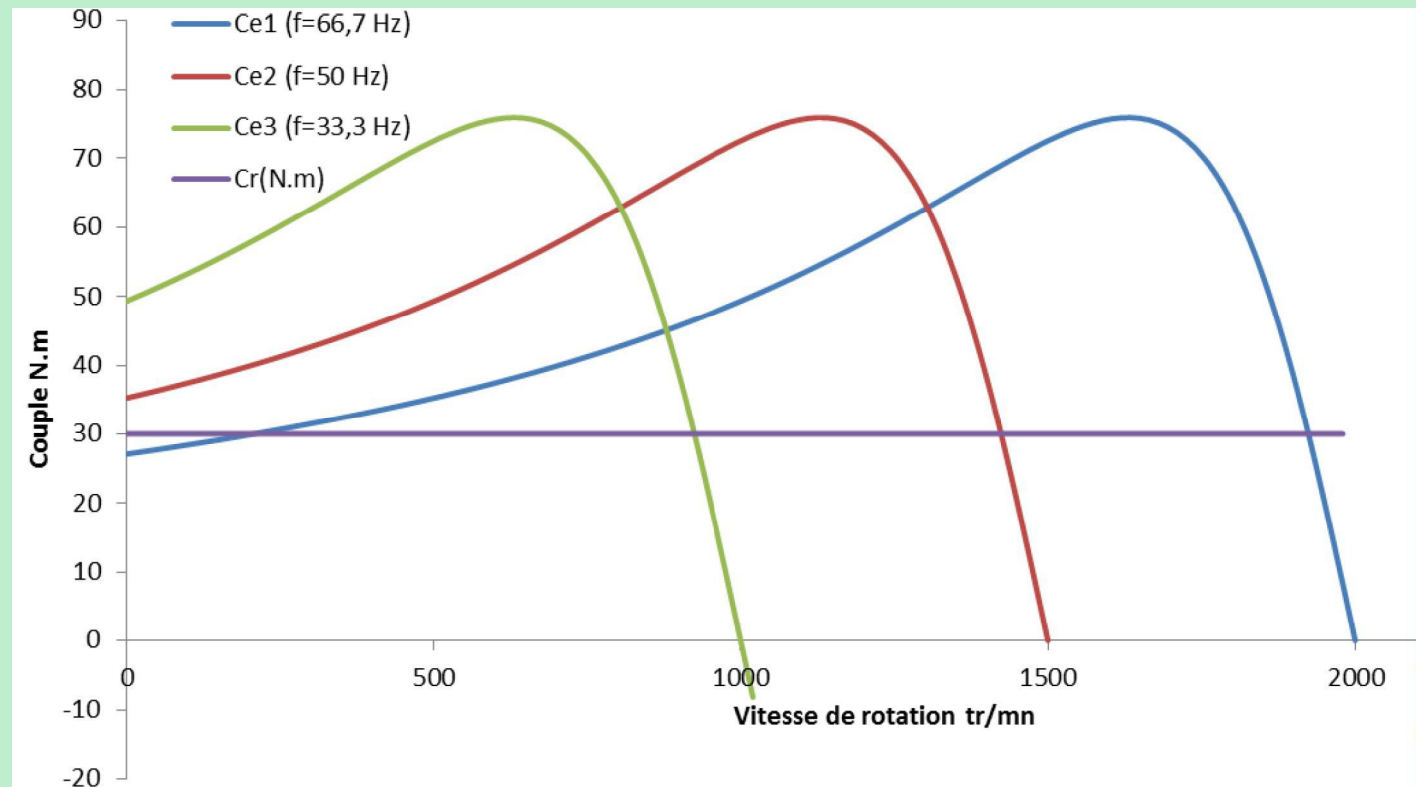
$g_{c_{max}}$ Inversement proportionnel à f

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones à cage d'écurueil - action sur la fréquence-

Pour que la machine garde ses performances magnétiques, on cherche un fonctionnement à flux constant ; or le flux est proportionnel au rapport de la tension par la fréquence.

L'évolution de la commande électronique a permis d'avoir ce réglage.



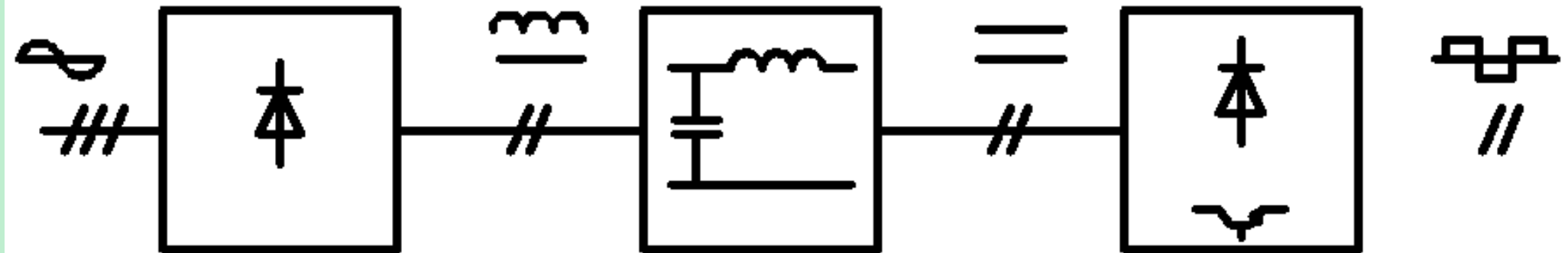
Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones à cage d'écurueil – combinaison redresseur onduleur autonome-

Pour que la machine garde ses performances magnétiques, on cherche un fonctionnement à flux constant ; or le flux est proportionnel au rapport de la tension par la fréquence.

Plusieurs commandes électroniques permettent d'avoir ce fonctionnement.

combinaison redresseur onduleur autonome



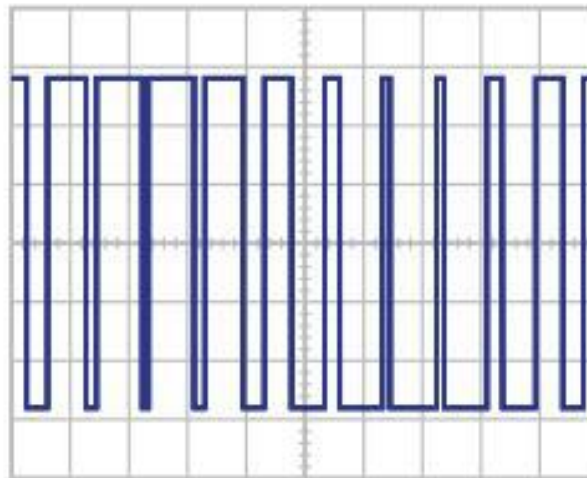
Les courants générés ne sont pas de forme sinusoïdale ce qui entraîne des pertes supplémentaires dans le fer. Conséquence : déclassement de la machine.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

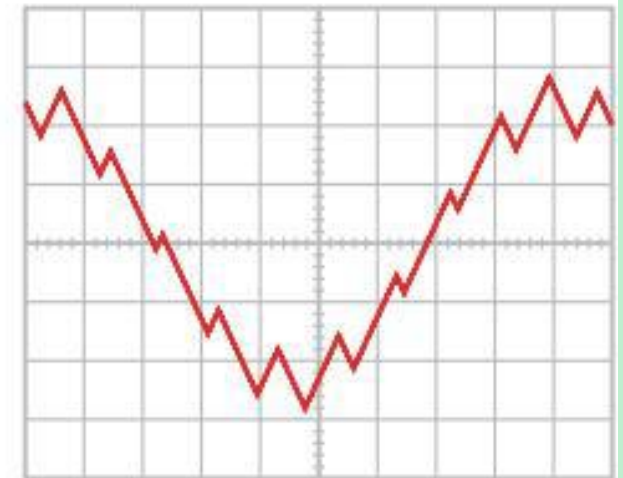
✓ Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones à cage d'écurueil – variateur de fréquence MLI-

Le variateur de fréquence Variation de fréquence avec Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) permet d'obtenir des formes d'onde plus proches de la sinusoïdes; d'où les avantages :

- Pertes plus faibles
- Rotation harmonieuse du moteur
- Déclassement inférieur à 5%



Allure de la tension en sortie d'un variateur de vitesse MLI.



Allure du courant en sortie d'un variateur de vitesse MLI.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etude de cas : pompage

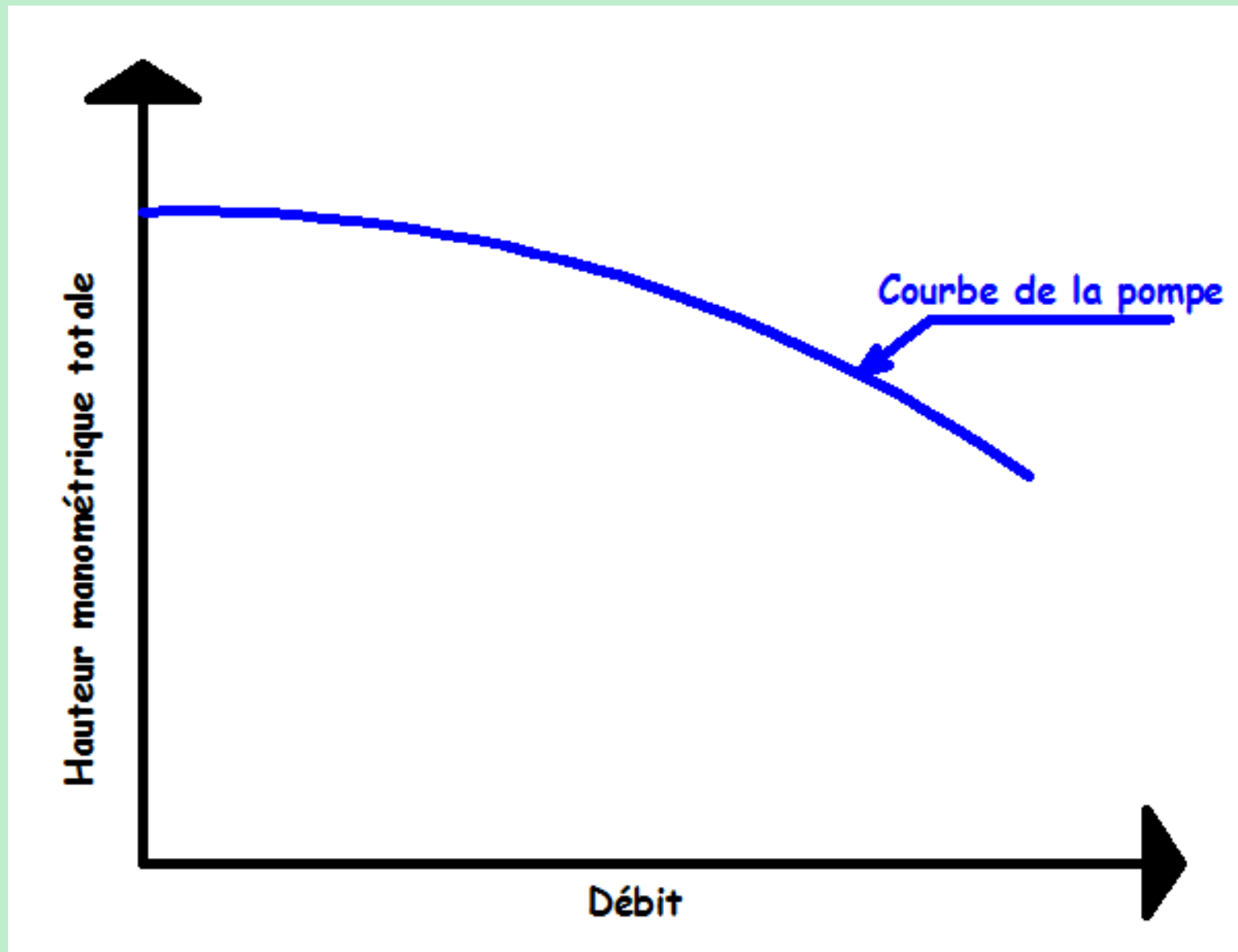
Les systèmes de pompes sont omniprésents dans divers secteurs industriels; on estime à plus de 40% leur quota part dans la consommation énergétique.

La performance d'une pompe peut être illustrée directement sur sa courbe caractéristique.

Les courbes caractéristiques indiquent la hauteur manométrique totale fournie par la pompe, sa puissance et son efficacité à partir du débit nul jusqu'à la capacité maximale.

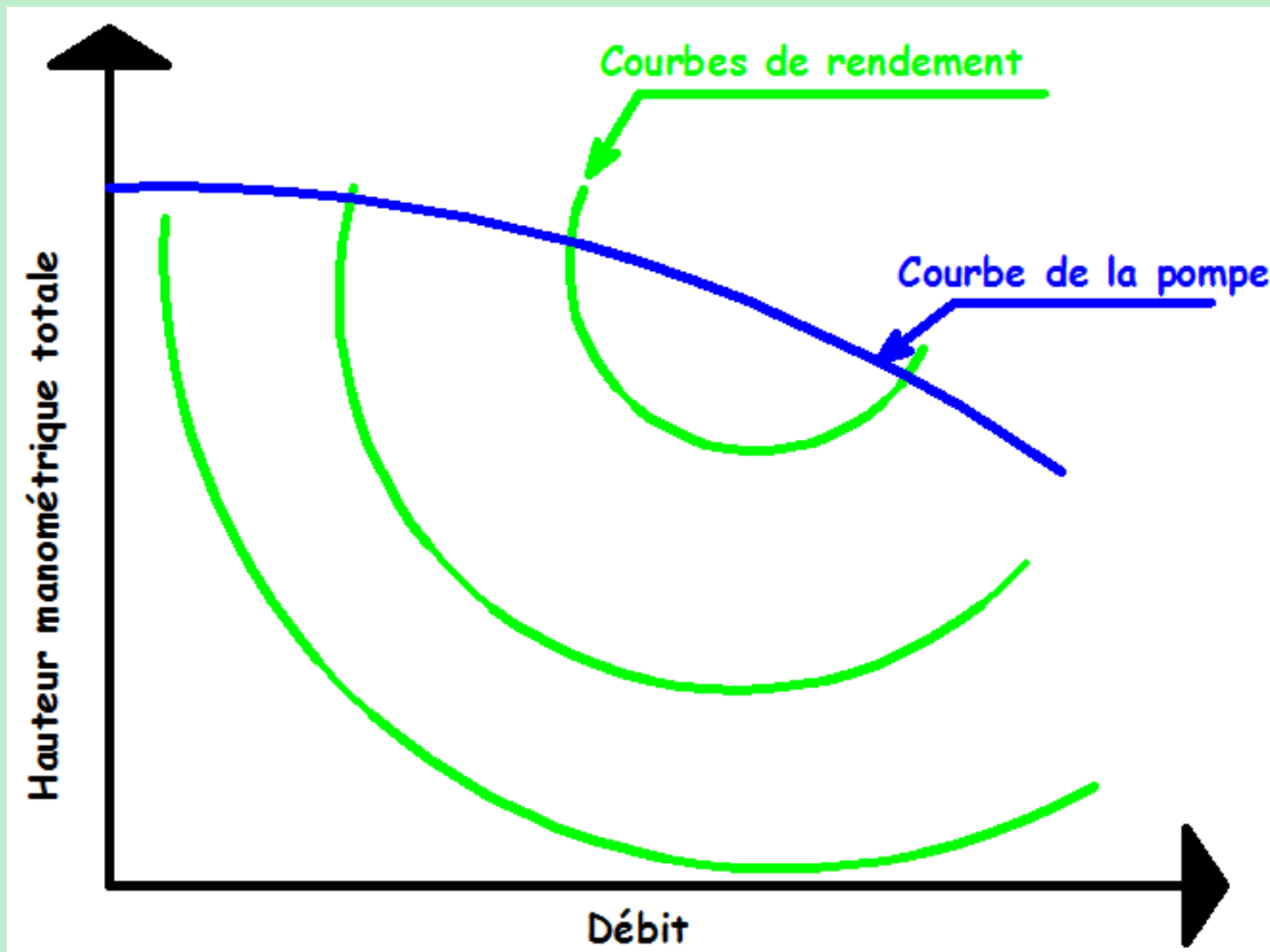
Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etude de cas : pompage – courbe caractéristique de la pompe centrifuge



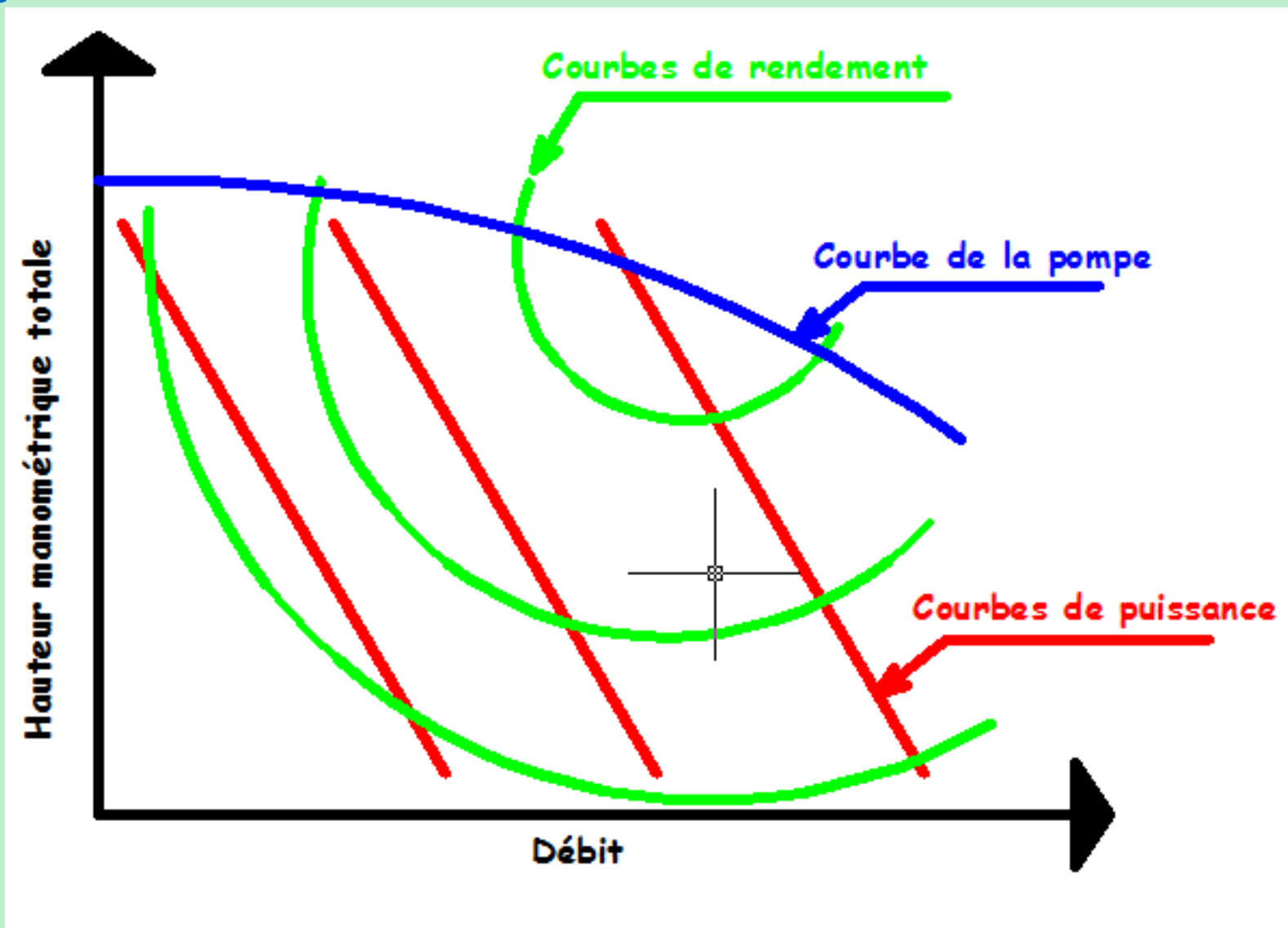
Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etude de cas : pompage – courbe caractéristique de la pompe centrifuge



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etude de cas : pompage – courbe caractéristique de la pompe centrifuge



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etude de cas : pompage – courbe du réseau

Il est possible d'établir la courbe du réseau en déterminant la hauteur manométrique totale pour une gamme de débits.

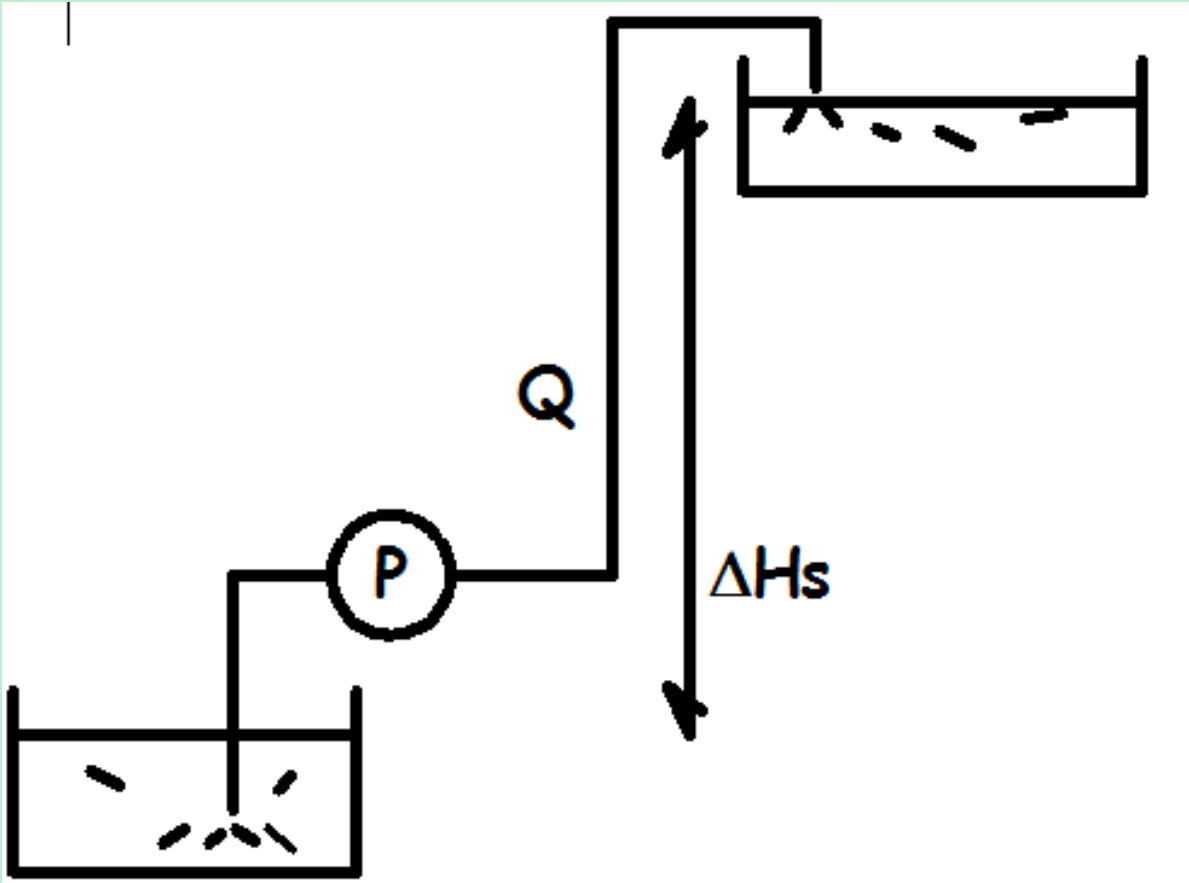
La hauteur statique du système est définie par la hauteur manométrique totale, là où le débit est nul.

À mesure que le débit s'accroît, une hauteur supplémentaire est requise afin de surmonter la résistance du système à l'écoulement. Cette résistance est généralement proportionnelle au carré du débit.

Cette résistance exprime les pertes linéaires proportionnelles à la longueur de la conduite (L) et aux pertes singulières.

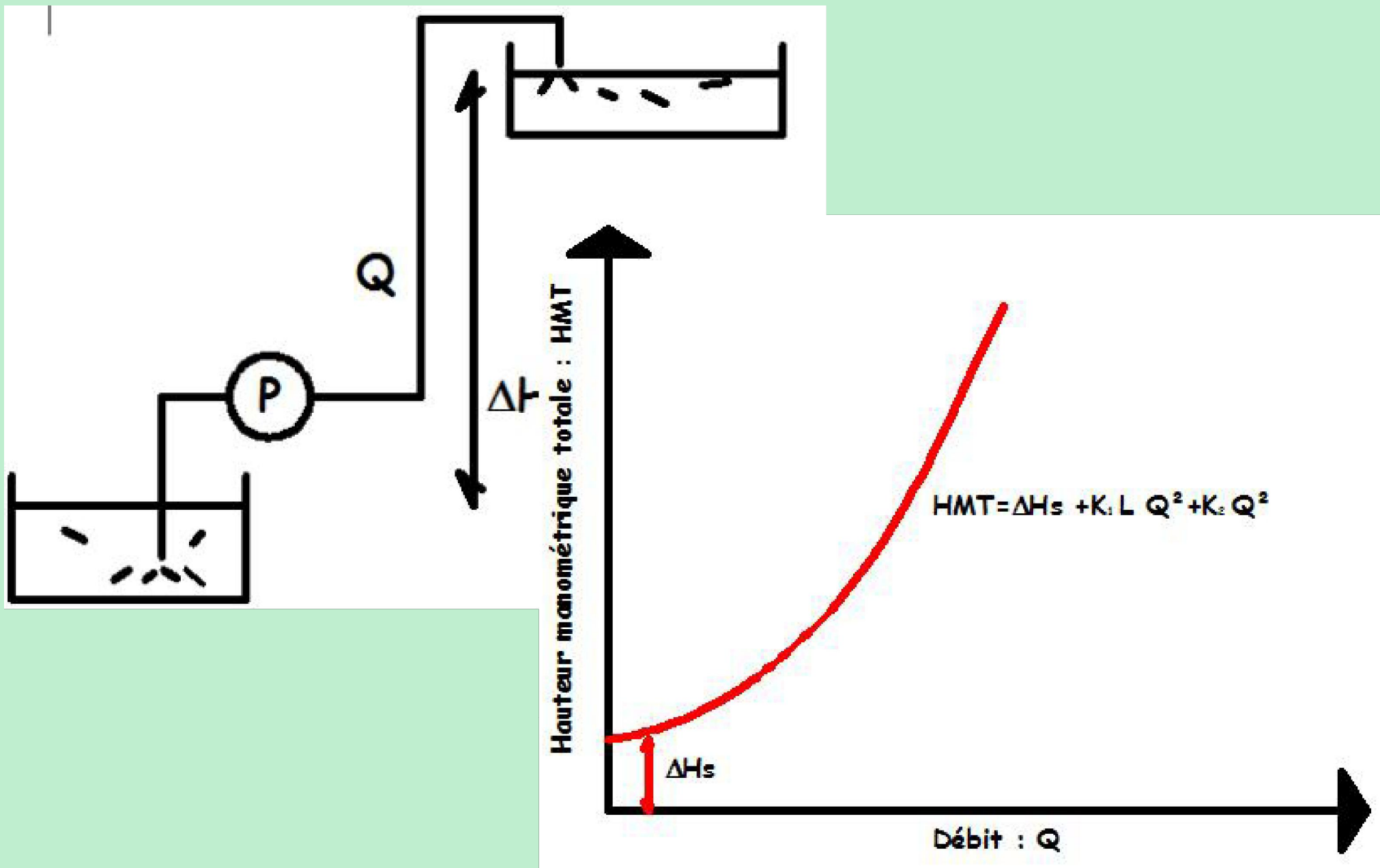
Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etude de cas : pompage – courbe du réseau



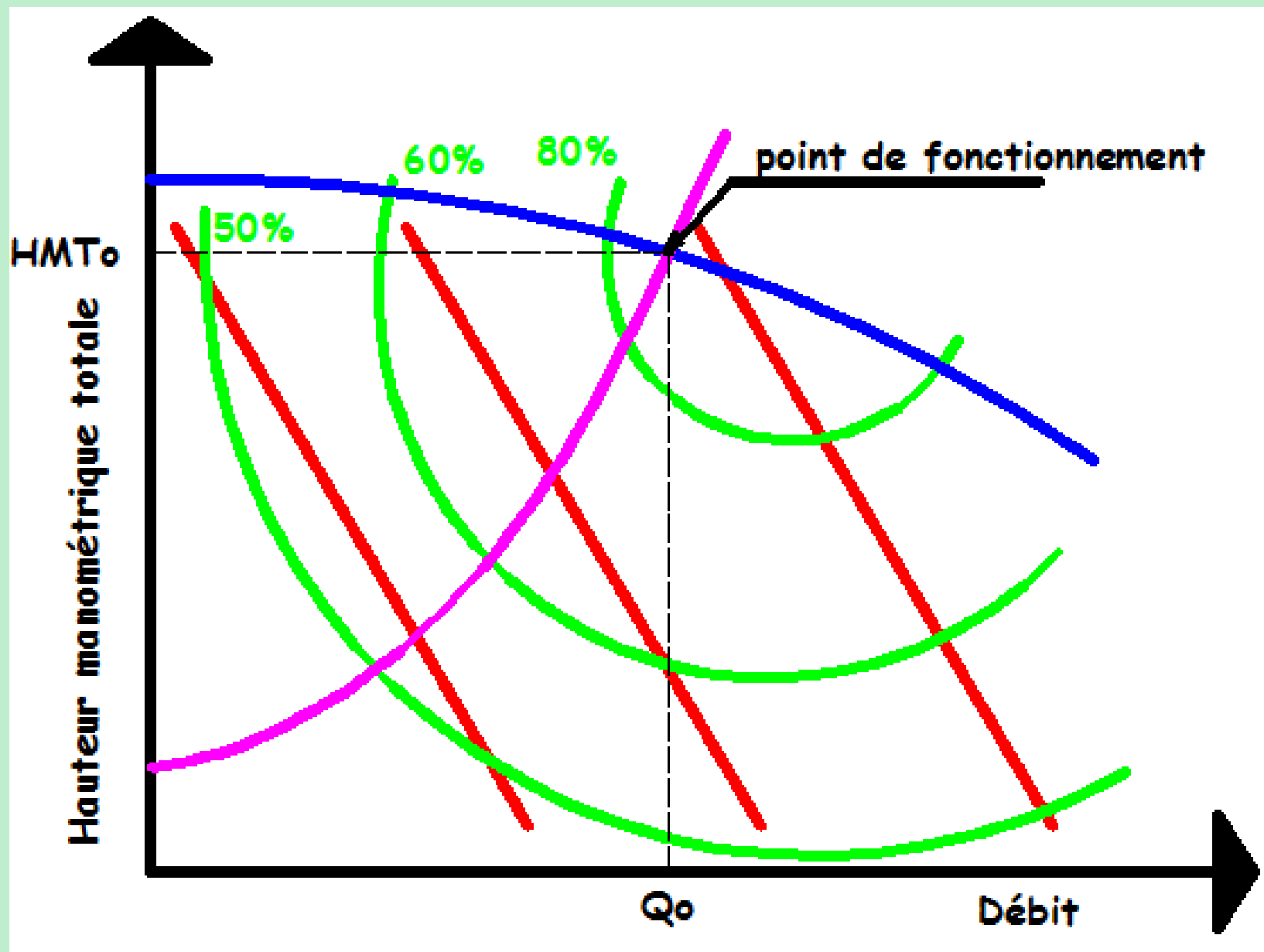
Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etude de cas : pompage – courbe du réseau



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etude de cas : pompage – le point de fonctionnement



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etude de cas : pompage -la puissance mise en jeu

La puissance demandée par la pompe nécessaire au déplacement du liquide et à vaincre les différents frottements au niveau de la roue de la pompe est :

$$P = (\rho g Q H) / \eta$$

P : la puissance demandée par la pompe [Watt]

ρ : la masse volumique du fluide à transporter [Kg/m^3]

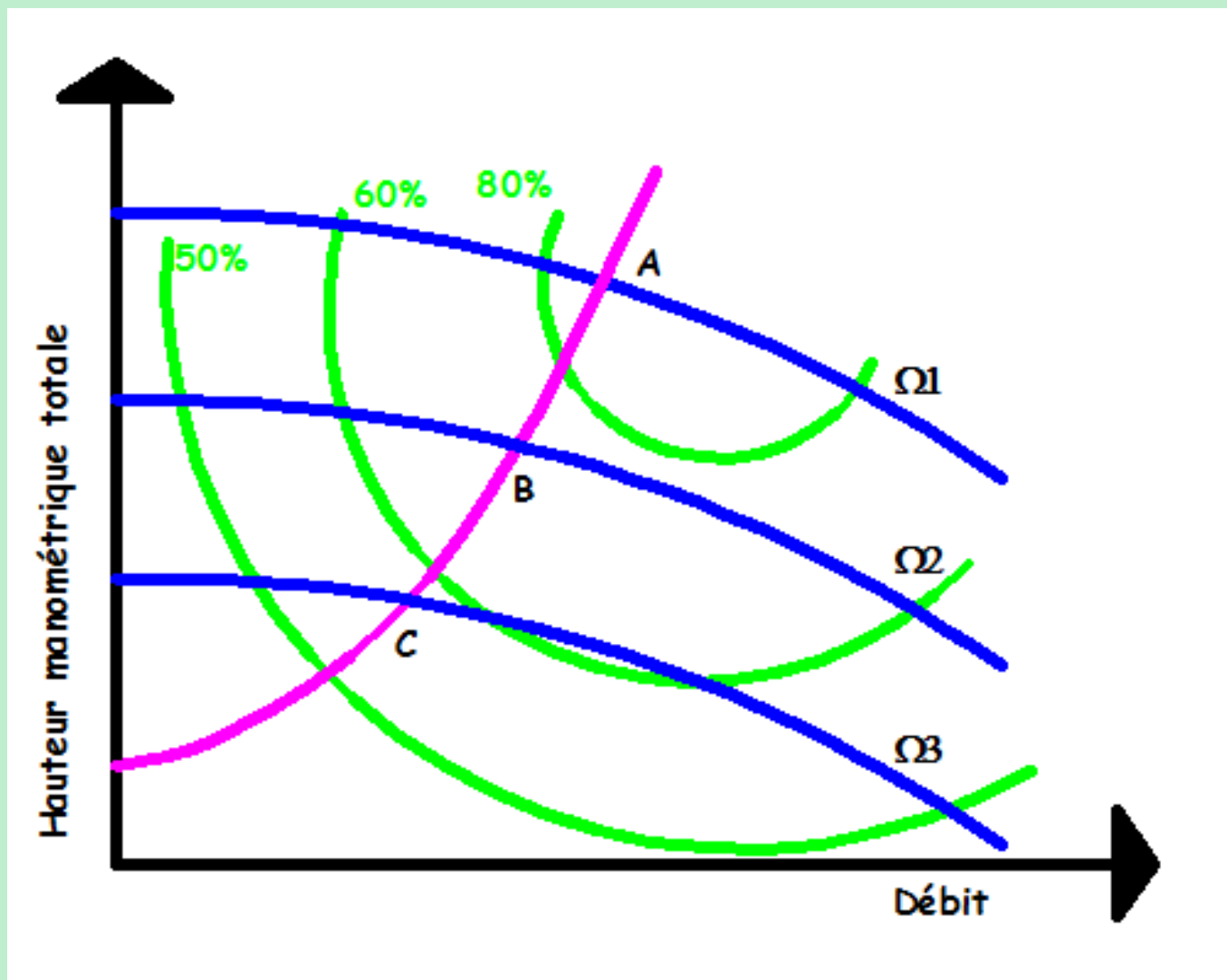
g : l'accélération de la pesanteur [m/s^2]

Q : le débit [m^3/s]

H : la hauteur manométrique totale [m]

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etudes de cas - pompage – le caractéristiques de la pompe à plusieurs vitesses



Quand la vitesse passe de Ω_1 a Ω_3 le point de fonctionnement passe de A à C

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ **Etudes de cas - pompage – l'avantage de la variation de vitesse pour les pompes.**

La pompe centrifuge est une turbo pompe caractérisée par les équations suivantes :

$$H = k_1 Q^2 \text{ et } P = k_2 H Q$$

P : la puissance demandée par la pompe [Watt]

Q : le débit [m^3/s]

H : la hauteur manométrique [m]

K1 et k2 des constantes

Si le débit passe de Q1 à Q2 la puissance passe de P1 à P2

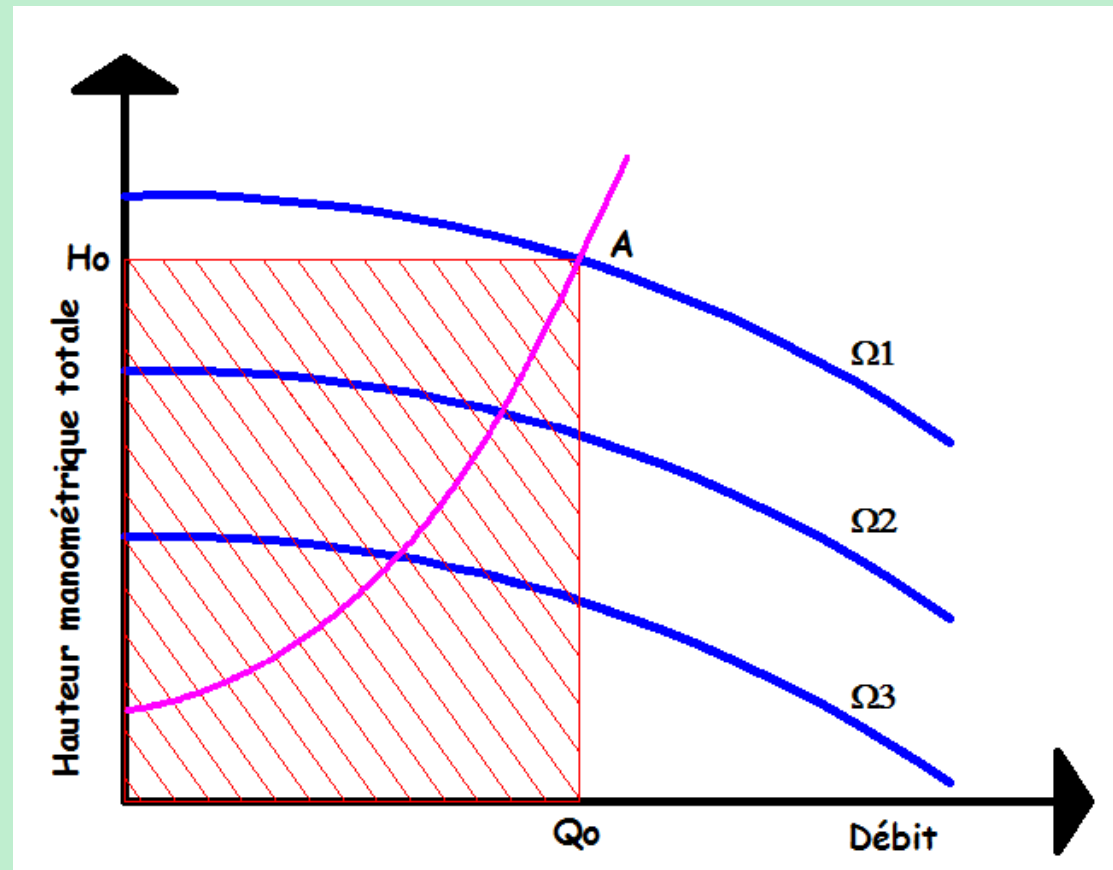
$$P_2 = P_1 (Q_2/Q_1)^3$$

Si la vitesse (et par suite le débit) est divisée par 2, la puissance est divisée par 8.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etudes de cas - pompage – l'avantage de la variation de vitesse pour les pompes.

Considérons un circuit hydraulique alimenté par une pompe. Celle-ci est entraînée par un moteur tournant à une vitesse Ω_1 .



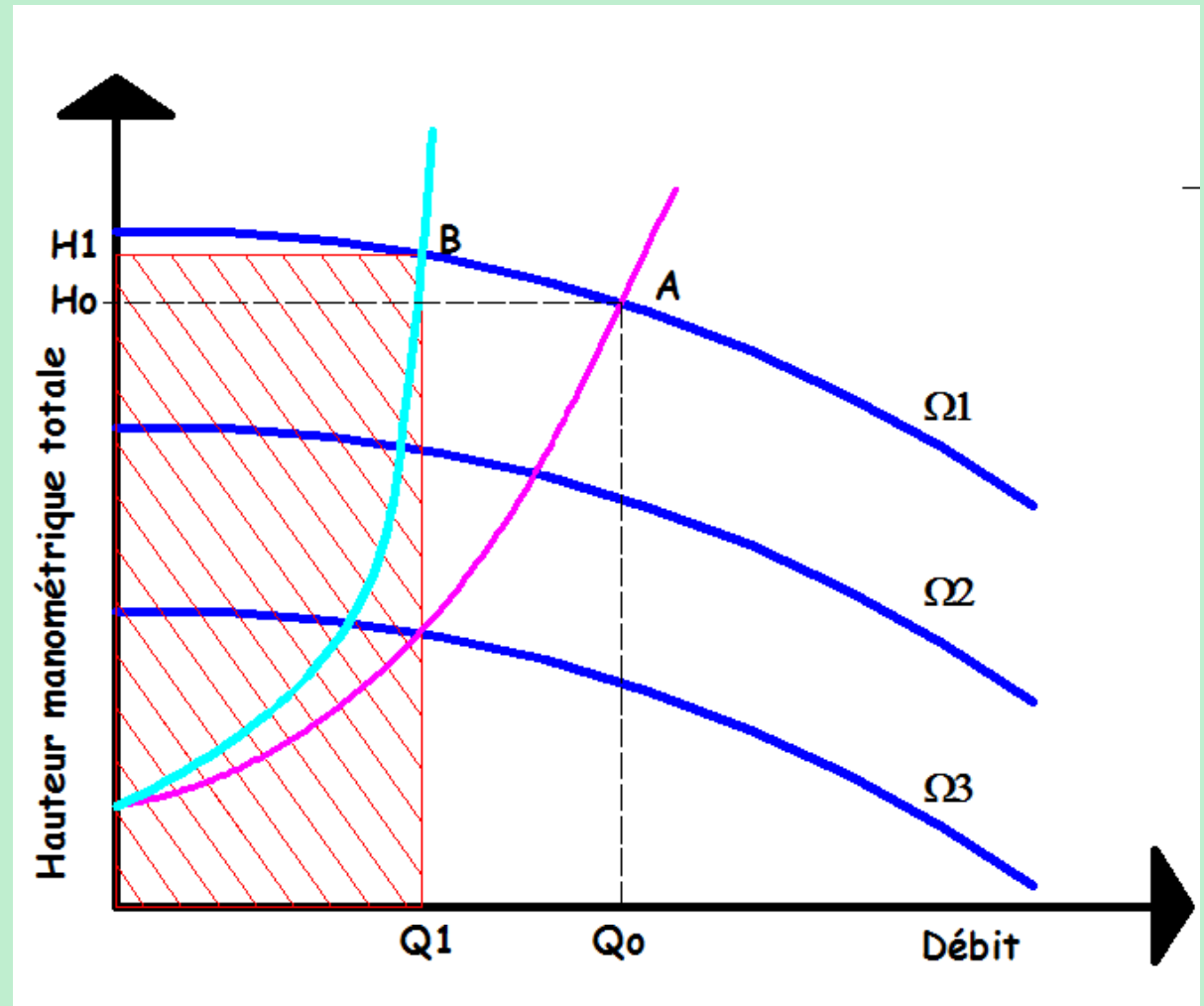
La puissance appelée par la pompe est représentée par la surface hachurée du rectangle.

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etudes de cas - pompage – l'avantage de la variation de vitesse pour les pompes.

On voudrait diminuer le débit de Q_0 à Q_1 . L'opération la plus immédiate et la plus simple consiste à fermer partiellement une vanne dans le circuit. La fermeture partielle de la vanne a pour effet d'augmenter les pertes de charge du circuit de H_0 à H_1 .

La puissance appelée par la pompe est représentée par la surface hachurée du rectangle.



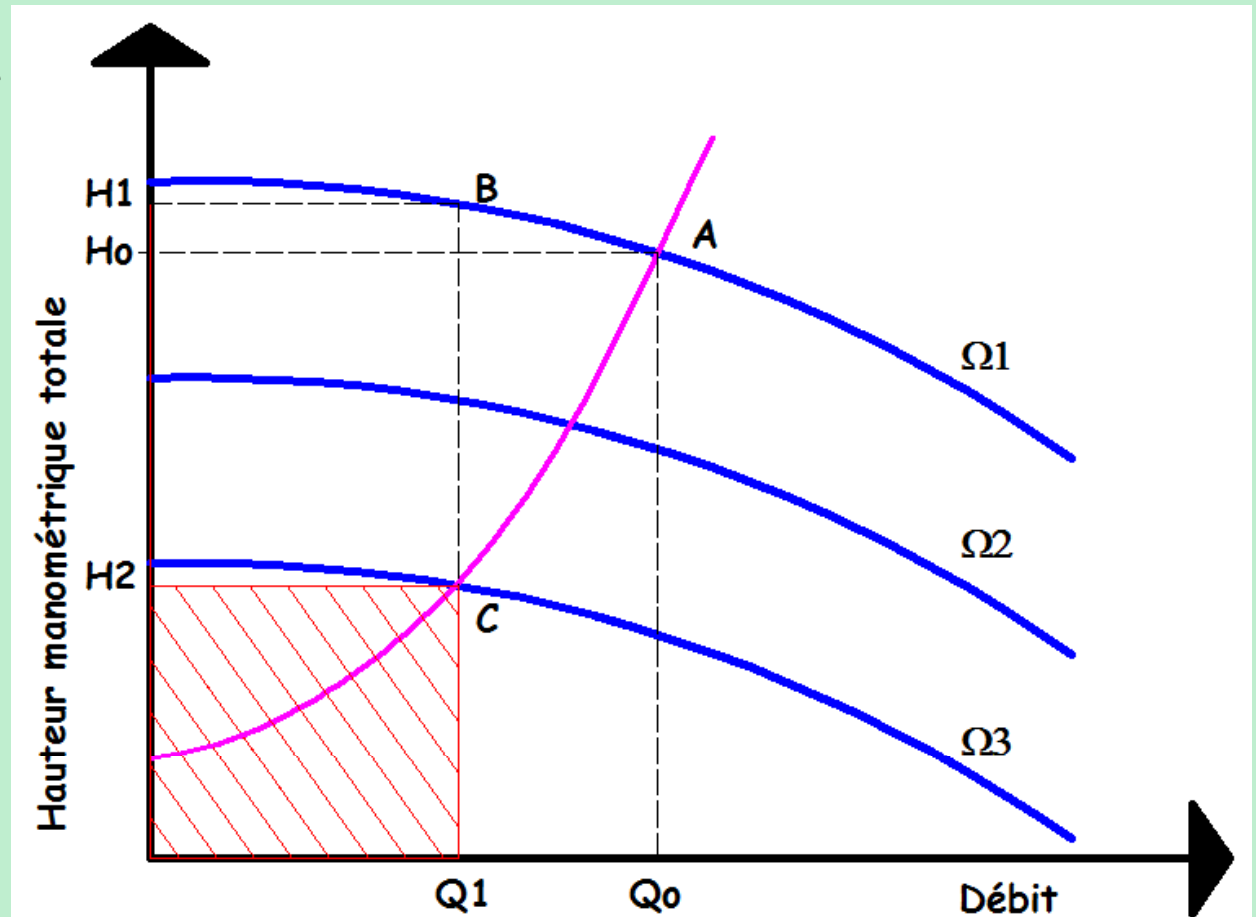
Variateurs de vitesses des moteurs électriques

- ✓ Etudes de cas - pompage – l'avantage de la variation de vitesse pour les pompes.

L'autre option consiste à faire varier la vitesse du moteur entraînant la pompe à l'aide d'un variateur de vitesse. (de Ω_1 à Ω_3).

La pompe va passer d'une courbe caractéristique à une autre.

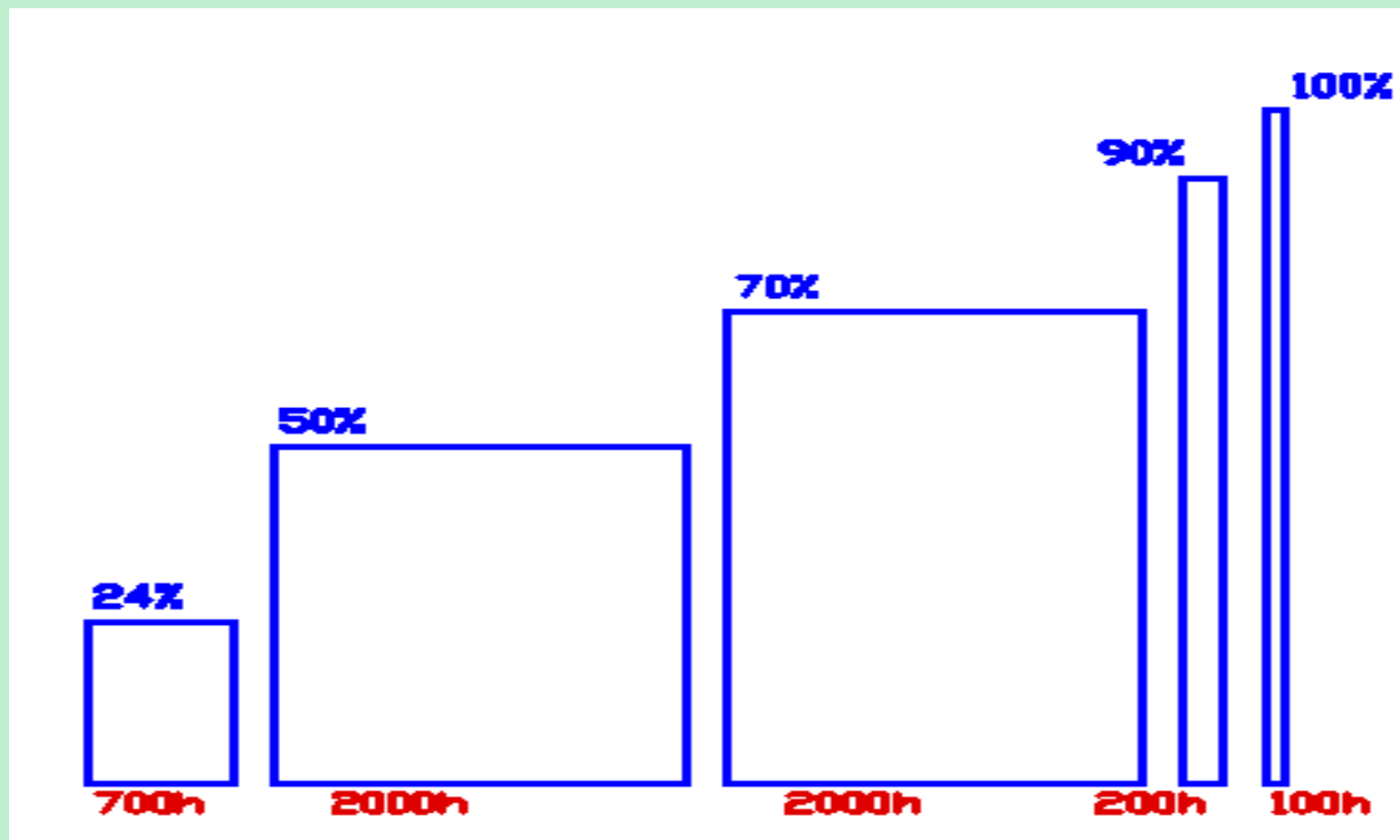
La puissance développée par la pompe (et donc fournie par le moteur), est plus faible.



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etudes de cas - pompage – Exemple pratique

un moteur asynchrone d'une puissance de 150 kW entraine une pompe centrifuge (14m et 1135 m³/h) dont le profil des charges est comme suit :



Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etudes de cas - pompage – Exemple pratique

Dans une première partie on détermine l'énergie annuelle consommée, le moteur tournant à une vitesse constante (la variation du débit étant assurée par une vanne).

Point de fonctionnement		Q1	Q2	Q3	Q4	Qn
débit	m ³ /h	275	568	795	1 022	1 135
Hauteur statique	m	12,00	12,00	12,00	12,00	14,00
Pertes de charges	m	0,60	2,50	4,90	6,70	10,10
Pertes de charges de la vanne	m	21,30	18,30	14,30	9,10	1,70
Hauteur manométrique totale	m	33,90	32,80	31,20	27,80	25,80
Rendement de la pompe	%	40	65	77	82	83
Puissance appelée par la pompe	kW	64	105	118	127	129
Charge du moteur (Pn=150kW)	%	42	70	78	84	86
Rendement du moteur	%	88	91	91	91	92
Puissance absorbée par le moteur		72	115	129	139	140
Heures de fonctionnement	kW	700	2 000	2 000	200	100
Consommation de l'énergie	kWh	50 519	230 104	258 611	27 816	14 008
Consommation totale kWh		581 059				

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etudes de cas - pompage – Exemple pratique

On se décide d'installer un variateur de vitesse pour varier le débit, et on recalcule la consommation énergétique.

Point de fonctionnement		Q1	Q2	Q3	Q4	Qn
débit	m ³ /h	275	568	795	1 022	1 135
Hauteur statique	m	12,00	12,00	12,00	12,00	14,00
Pertes de charges	m	0,60	2,50	4,90	6,70	10,10
Hauteur manométrique totale	m	12,60	14,50	16,90	18,70	24,10
Rendement de la pompe	%	40	62	75	77	77
Puissance appelée par la pompe	kW	24	49	65	91	130
Charge du moteur (Pn=150kW)	%	16	32	44	60	87
Rendement du moteur	%	37	67	80	89	92
Puissance absorbée par le moteur	kW	64	72	82	102	141
Vitesse de rotation	tr/mn	580	625	710	790	875
Rapport de vitesse	%	58	63	71	79	88
Rendement du variateur de vitesse	%	83,2	84,7	86,9	89	91,2
Puissance absorbée	kW	77	86	94	114	155
Heures de fonctionnement	kW	700	2 000	2 000	200	100
Consommation de l'énergie	kWh	53 676	171 011	188 252	22 892	15 466
Consommation totale kWh		451 297				

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ Etudes de cas - pompage – Exemple pratique

Comparons à présents les 2 scenarii :

La consommation annuelle à vitesse constante : 581 000 kWh

Soit un coût annuel de l'énergie électrique de : 464 000 ,00MAD (0,80MAD/kWh)

La consommation annuelle avec variateur de vitesse : 451 000 kWh

Soit un coût annuel de l'énergie électrique de : 361 000 ,00MAD

Soit une économie annuelle de l'ordre de 100 000,00 MAD

La deuxième solution impliquerait un coût d'investissement lié à l'acquisition et a l'installation d'un variateur de vitesse pour moteur de 150 kW

Ce coût est de l'ordre de 200 000,00 MAD

Le temps de retour de cet investissement est d 'environ deux années

On note aussi que l'empreinte carbone est diminuée de 75 000 kg

Variateurs de vitesses des moteurs électriques

✓ En guise de conclusion

On a passé en revue deux manières améliorer l'efficacité énergétique des moteurs électriques.

1/ minimiser les pertes en dimensionnant correctement son moteur et en adoptant des moteurs à haut rendement : IE2, IE3 voire IE4. on arrive facilement à une amélioration de 2% à 5% du rendement et un temps de retour sur investissement de l'ordre d'un an.

2/ Optimiser la variation du vitesse électronique du moteur, surtout lorsqu'il est régulièrement amené à fonctionner en charge partielle ;

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse d'une charge.

Les économies potentielles sont intéressantes en tertiaire où la force motrice représente 30% de la puissance consommée et surtout en milieu industriel cette proportion passe à 70%.

La généralisation de l'utilisation des filtres va atténuer l'effet des harmoniques dans le réseau électrique.