

## Chapitre 03

### Commande de la machine asynchrone

#### I. Rappels et généralités sur les propriétés de la machine asynchrone

**1. le glissement :** grandeur caractéristique du fonctionnement du moteur asynchrone.

Dès lors qu'on étudie le fonctionnement d'une machine asynchrone, on distingue deux vitesses de rotations :

- Vitesse de rotation du champ statorique, dite vitesse de synchronisme :  $N_s$  (tr/min) ou  $\Omega_s$  (rad/s) (mécanique) et pour la pulsation électrique :  $\omega_s = p \cdot \Omega_s$  ;  $p$  : nombre de paires de pôles.

- Vitesse de rotation du rotor :  $N_r$  (tr/min) ou  $\Omega_r$  (rad/s) (mécanique) et pour la pulsation électrique :  $\omega_r = p \cdot \Omega_r$

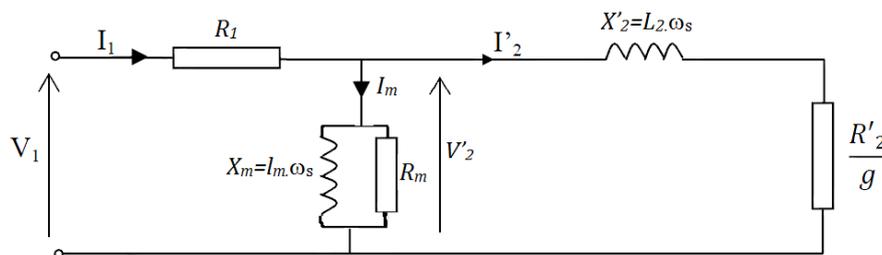
Le glissement décrit l'écart relatif entre ces deux grandeurs, où :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}, \text{ avec } N_s = \frac{60f_s}{p} ; f_s : \text{fréquence des courants statoriques.}$$

Et la fréquence des courants rotoriques  $f_r$  est donnée par :  $f_r = g \cdot f_s$

#### 2. Schéma équivalent monophasé :

En fonctionnement triphasé équilibré, la machine asynchrone peut être modélisée comme un transformateur triphasé, dont le secondaire aurait une pulsation  $g \cdot \omega_s$ . Moyennant quelques approximations, on peut donner un modèle monophasé de la machine asynchrone dans lequel tout est ramené au stator.



$I'_2 = m \cdot I_1$  avec  $m$  rapport de transformation  $m = V_{20}/V_1$

$\frac{R'_2}{g}$  : Résistance équivalente aux conducteurs rotoriques ramenée au stator.

$R_m$  : représente les pertes fers au stator.

$l_m$  : inductance magnétisante (magnétisation de la carcasse métallique du moteur et de l'entrefer)

$X'_2$  : Inductance de fuite ramenée au primaire (stator).

#### 3. Bilan énergétique et rendement :

##### a. Bilan des puissances :

La puissance absorbée par la machine :  $P_a = 3V_1 I_1 \cos\varphi$

Les pertes dans la machine asynchrone sont dues aux :

- Pertes joules stator :  $P_{Js}=3.R_1.I_1^2$
- Pertes fer : (hystérésis et courant de Foucault):  $P_f \approx 3V_1^2/R_m$
- Pertes joules rotor :  $P_{Jr}=3.R'_2.I'_2{}^2$
- pertes mécaniques  $P_m$

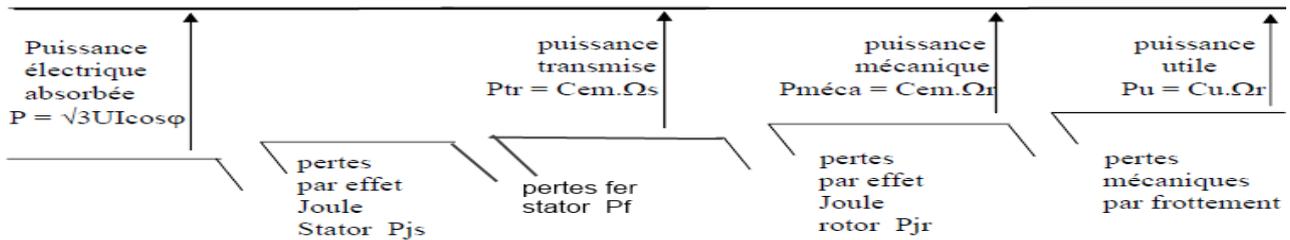


Figure (1) : schématisation du bilan de puissance

La puissance transmise au rotor  $P_{tr}=P_e$  puissance transmise au rotor (électromagnétique) :

$$P_{tr} = 3 \frac{R'_2}{g} I'^2_2 \quad ; \text{ les pertes joules du rotor sont liées à la puissance transmise au rotor par : } P_{Jr}=g.P_{tr} .$$

Relation très utilisées car la résistance du rotor et le courant dans le rotor à cage ne sont pas mesurables.

La puissance mécanique :  $P_m=P_{tr} - P_{jr}$

La puissance utile :  $P_u= P_m - \Delta P_m$  , où  $\Delta P_m$  : les pertes mécaniques.

Le rendement :  $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

**b. expression du courant  $I'_2$  :**

Du schéma on voit que :  $\vec{I}'_2 = \frac{\vec{V}'_2}{\frac{R'_2}{g} + jL_2\omega_s}$  , soit donc en module :  $I'_2 = \frac{V'_2}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (L_2\omega_s)^2}}$

**c. expression du couple électromagnétique :**

Cas où les chutes de tensions stator ne sont pas négligées.

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{p.P_e}{\omega_s} = \frac{p.P_{jr}}{\omega_s g} = \frac{3pR_2}{g\omega_s} I'^2_2 = \frac{3pR_2}{g\omega_s} \cdot \frac{V'^2_2}{(L_2\omega_s)^2 + \left(\frac{R'_2}{g}\right)^2}$$

Mais ce n'est pas le cas en général. Alors, il vient si on négligera les chutes du stator ( $R_1=0$ )

$V_1=V'_2$  :

$$C_{em} = \frac{3pR_2}{g\omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{(L_2\omega_s)^2 + \left(\frac{R'_2}{g}\right)^2} \tag{1}$$

en multipliant et en divisant par  $g^2$  , l'éq (1) il vient :

$$C_{em} = \frac{3pR_2}{g\omega_s} \cdot \frac{g^2V_1^2}{(gL_2\omega_s)^2 + g^2\left(\frac{R_2'}{g}\right)^2} = \frac{3pR_2}{g\omega_s} \frac{g^2V_1^2}{(gL_2\omega_s)^2 + (R_2')^2} ; \text{ avec } \omega_r = g\omega_s, \text{ pulsation des courants}$$

rotoriques, l'éq(1) devient :

$$C_{em} = \frac{3pR_2}{\omega_s^2} \frac{\omega_r V_1^2}{(L_2\omega_r)^2 + (R_2')^2} = 3p \left(\frac{V_1}{\omega_s}\right)^2 \frac{R_2\omega_r}{(L_2\omega_r)^2 + (R_2')^2} \quad (2)$$

Si le glissement  $g$  est faible (fortes vitesses), le terme  $L_2\omega_r \ll R_2'$ , alors le couple devient :

$$C_{em} = \frac{3pR_2}{g\omega_s} \cdot \frac{g^2V_1^2}{R_2'^2} = \frac{3p}{\omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{R_2'} g = \frac{3p}{R_2'} \cdot \left(\frac{V_1}{\omega_s}\right)^2 \omega_r \quad (3)$$

Et peut-être écrite :  $C_{em} = \frac{3p}{R_2'} \cdot \left(\frac{V_1}{\omega_s}\right)^2 \omega_r = k\Phi_s^2\omega_r \quad (4)$

Équation d'une droite en fonction de  $g$ .

D'après la relation précédente, on voit que le couple  $C_{em}$  varie en fonction du glissement  $g$  (Donc de la vitesse  $\omega_r$ ) et la caractéristique mécanique sera  $C_{em}=f(g)$  ou  $C_{em}=f(\omega_r)$ .

Au démarrage  $\omega_r=0$  donc :  $g=1$ , le couple de démarrage ou de décollage peut être calculé en remplaçant la valeur de  $g=1$  dans l'éq(1).

On peut calculer le couple maximal par :  $dC_{em}/dg=0$  ce qui donne :  $g_{max}=R_2'/L_2\omega_s$

Le couple maximal sera alors :

$$C_{max} = \frac{3p}{2\omega_s} \frac{V_1^2}{L_2\omega_s} = \frac{3p}{2L_2} \frac{V_1^2}{\omega_s^2} \quad (4)$$

**d. Formule de Kloss :**

L'expression du couple en fonction du glissement  $g$  et  $C_{emax}$  est la formule de Kloss qui est :

$$C_e = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}} \quad (5)$$

On peut alors tracer l'évolution du couple en fonction du glissement ou de la vitesse du rotor :

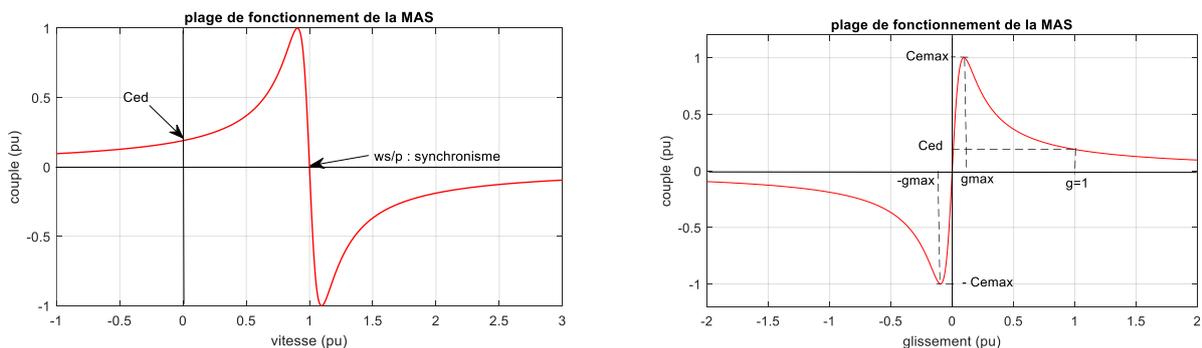


Figure (2) : évolution du couple en fonction de la vitesse et le glissement

Sur ces courbes il y a une zone linéaire (lorsque le glissement est faible, près de la vitesse de synchronisme) zone de fonctionnement stable. Cette zone correspond au point de fonctionnement nominal du moteur.

Le couple de démarrage  $C_{ed}$  s'obtient pour  $g=1$ . La zone  $g>g_{max}$  est instable, ces points ne sont parcourus qu'en régime transitoire.

Lorsque  $g<0$ , le rotor tourne à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme. On est alors en fonctionnement hypersynchrone. La machine asynchrone fonctionne en générateur.

**II. Réglage de la vitesse**

Les méthodes simples permettant de régler la vitesse de la machine pour une charge donnée, en agissant sur l'alimentation et sur les paramètres de la machine. Ces méthodes peuvent être étudiées à partir du modèle à impédances groupées et de la formule simplifiée du couple :

$$C_e = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}}, \text{ avec } C_{emax} = \frac{3p}{2L_2} \left(\frac{V_1}{\omega_s}\right)^2 = \frac{3p}{2L_2 \cdot (2\pi)^2} \left(\frac{V_1}{f_s}\right)^2 = kp \left(\frac{V_1}{f_s}\right)^2 \text{ et } g_{max} = \frac{R'_2}{X'_2} = \frac{R'_2}{L_2 \omega_s}$$

Les paramètres de réglage sont donc :

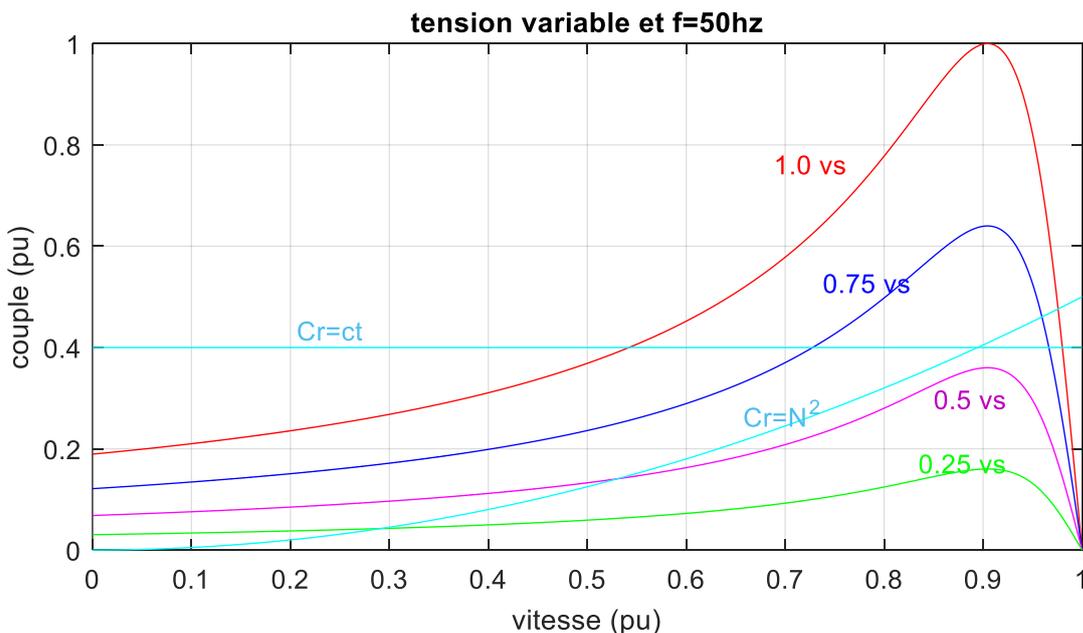
- ✓ la tension efficace stator  $V_1$ .
- ✓ la fréquence d'alimentation  $f_s$ .
- ✓ la résistance du rotor  $R'_2$  qui peut être modifiée seulement pour les machines à rotor bobiné.
- ✓ Le nombre de pair de pôles.

**1. Fonctionnement à tension d'alimentation variable et fréquence fixe**

La machine est alimentée par une tension variable à travers un variateur de vitesse, d'un gradateur par exemple.

Le couple est proportionnel au carré de la tension selon l'équation (01).

Les courbes couple-vitesse représentant ce mode d'alimentation est donné par la figure (3).



**Figure (3) :** les caractéristiques couple-vitesse pour différents tensions d'alimentation

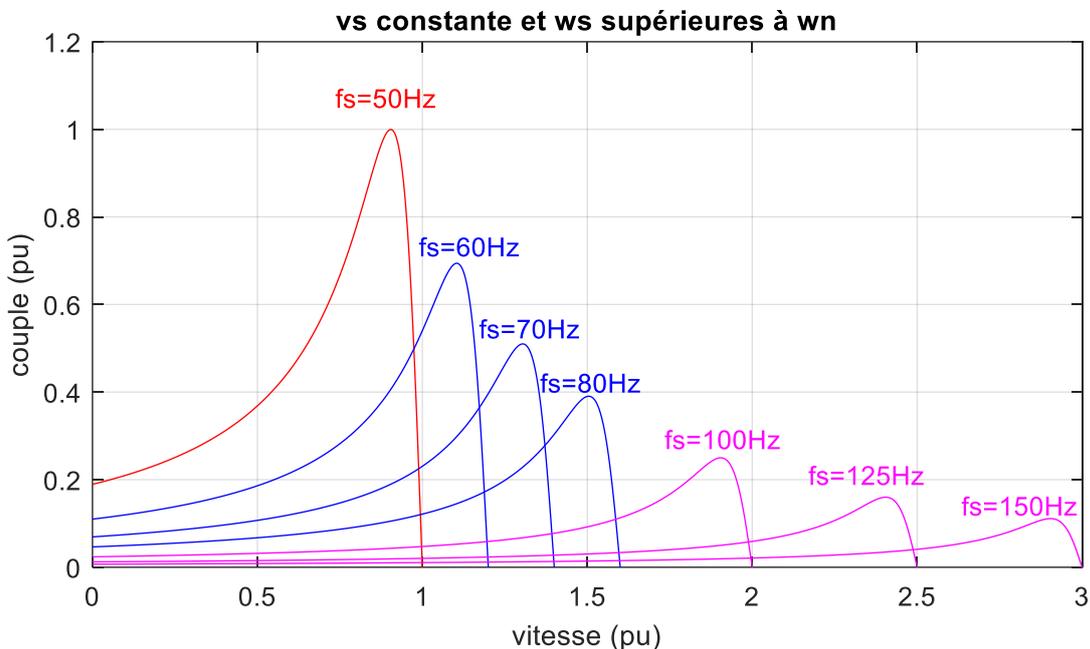
Pour une charge donnée ( $C_r = ct$  ou  $C_r \sim N^2$ ), le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des courbes de charge avec le couple dans la zone linéaire.

**2. Fonctionnement à tension d'alimentation fixe et fréquence variable**

À tension d'alimentation constante, pour faire varier la caractéristique couple-vitesse de la machine on peut agir sur la fréquence d'alimentation, deux cas sont à envisager les fréquences supérieures à la fréquence nominale et les fréquences inférieures à la fréquence nominale.

**a. fréquence supérieure à la fréquence nominale.**

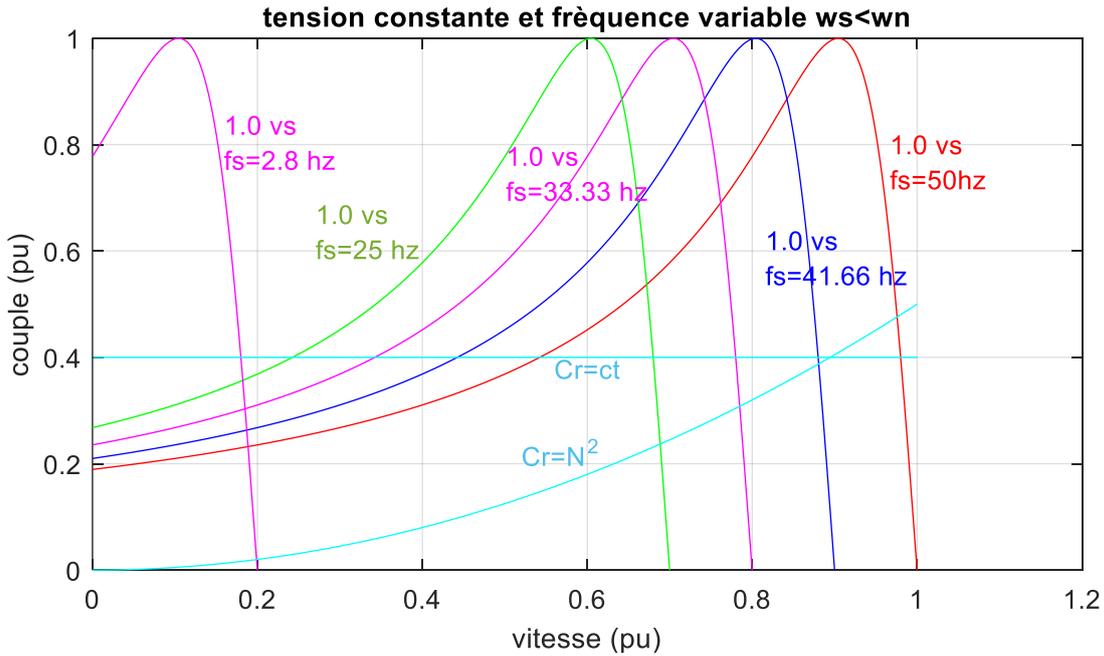
Dans ce premier cas, le flux  $\Phi_s$  (proportionnel à  $V_s/\omega_s$ ) va diminuer lors de l'augmentation de la fréquence. Et le produit  $C_{max} \cdot \omega_s^2$  est constant. Le maximum du couple sera porté par une enveloppe hyperbolique. La capacité de charge de la machine diminue.



**Figure (4) :** les caractéristiques couple-vitesse pour tension fixe et fréquences variables supérieures à la fréquence nominale.

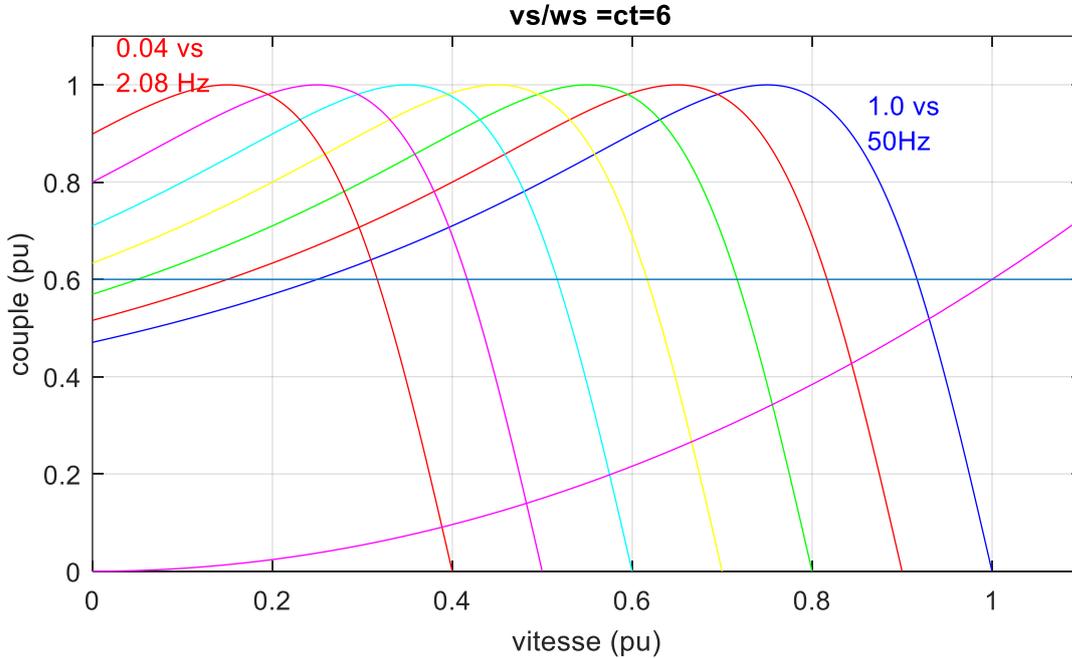
**b. fréquence inférieure à la fréquence nominale.**

Dans ce second cas, le flux  $\Phi_s$  (proportionnel à  $V_s/\omega_s$ ) va augmenter lors de la diminution de la fréquence, ce qui entraîne la saturation rapide de la machine avec une augmentation du courant absorbé. Le maximum du couple est porté par une enveloppe droite. La capacité de charge de la machine diminue. Les graphes de la figure (5) présentent ces variations.



**Figure (5) :** les caractéristiques couple-vitesse pour tension fixe et fréquences variables inférieures à la fréquence nominale.

Aux très basses vitesses où les chutes de tensions sont négligées nécessite d'intervenir pour diminuer le flux dans l'entrefer. La solution réside donc dans l'alimentation ( $v_s/\omega_s = ct$ ).



**Figure (4) :** les caractéristiques couple-vitesse pour  $v_s/\omega_s = constant$

### III. généralisation du fonctionnement à fréquence variable

La majorité des systèmes de contrôle des machines électriques à vitesse variable fonctionnent à tension et fréquence d'alimentation variables.

Les différentes caractéristiques couple-vitesse vues précédemment sont regroupés sur la figure (6).

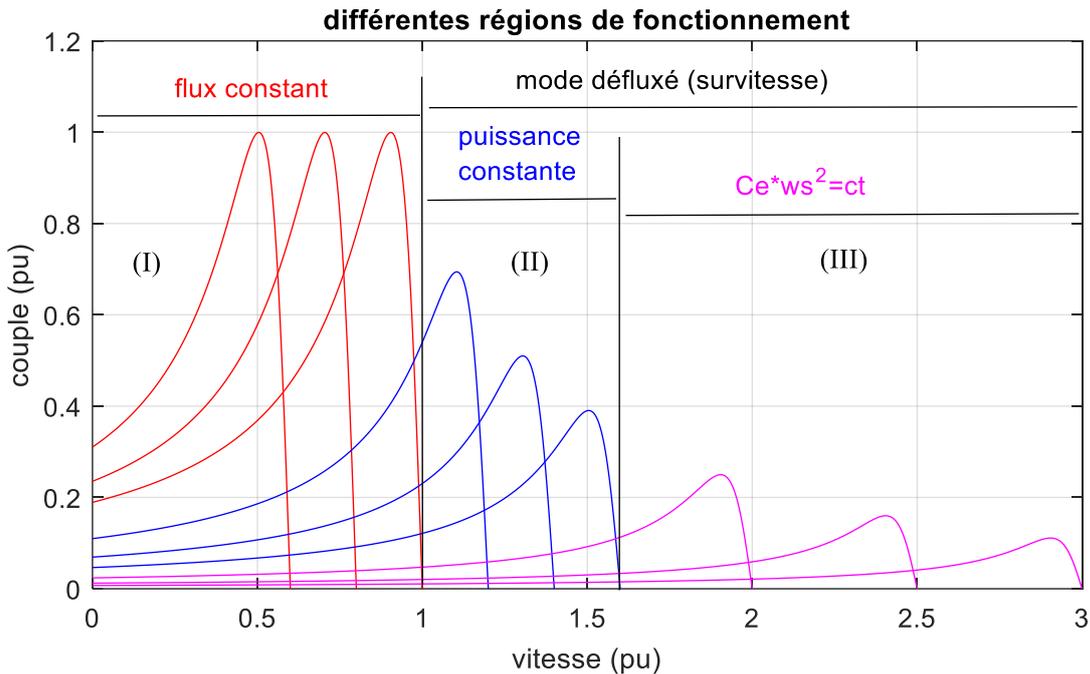


Figure (6) : les différentes régions de fonctionnement, alimentation à tensions et fréquences variables,

**La région I :** le couple utile est inférieur au couple maximal disponible (problème de limitation de courant). Ici le flux est constant par variation simultanée de la tension  $V_s$  et la pulsation  $\omega_s$ . cette région correspond au fonctionnement à couple constant.

L'équation (4) avec  $\omega_r = g\omega_s = cte$  . donc pour un flux constant, le couple est proportionnel à  $\omega_r$ .

**La région II :** lorsque la tension d'alimentation atteint sa valeur maximale, elle reste limitée à cette valeur et le flux  $\Phi_s$  décroît. Un fonctionnement à Puissance constante ( $P_{em} = C_{em} \cdot \omega_s = ct$ ) est obtenu, en augmentant le glissement. Une variation de  $\omega_r$  proportionnelle à  $\omega_s$  l'éq. (4) devient :  $C_{em} = k' / \omega_s \Rightarrow C_e \cdot \omega_s = cte$ . Ce type de fonctionnement est équivalent à une MCC à excitation séparée.

**La région III :** Le couple maximum disponible est atteint et la vitesse peut être augmentée en augmentant la fréquence, mais en diminuant le courant du stator. Le produit ( $C_{em} \cdot \omega_s^2 = ct$ ).

Un tel fonctionnement est équivalent à une MCC à excitation série.

Les courbes de variation des différents paramètres sont sur la figure (7).

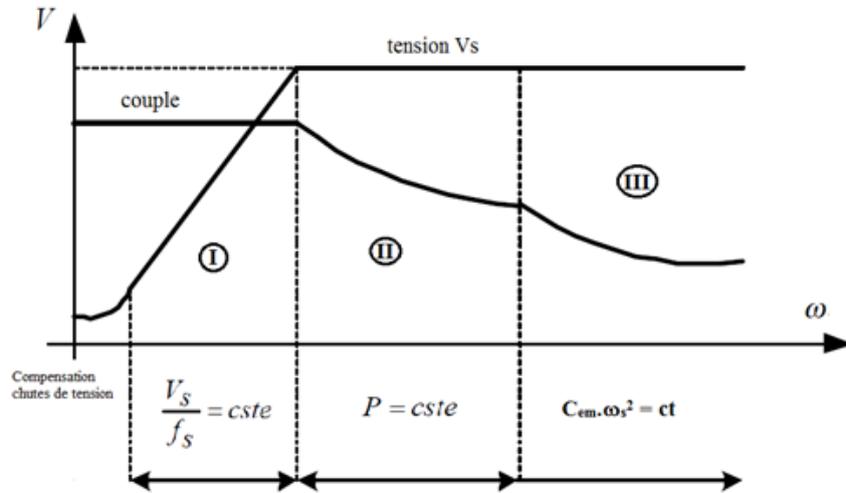


Figure (7) : caractéristiques de fonctionnement à vitesse variable

## II. Fonctionnement à courant statorique variable

Au lieu de la tension d'alimentation de la machine, on peut contrôler directement le courant statorique par le contrôle du couple.

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{p \cdot P_{em}}{\omega_s} = \frac{p \cdot P_j r}{\omega_s g} = \frac{3pR_2}{\omega_r} I_2'^2 \quad (6)$$

Le couple dépend directement du courant rotorique  $I_2'$  et de la fréquence  $\omega_r$ . le courant du rotor à cage n'étant pas toujours accessible, on peut ramener l'équation (6) au courant du stator, schéma de la figure (1) lorsque  $L_2 \omega_r \ll \frac{R_2'}{g}$  (faibles glissements) et pertes fer négligées + pertes joules statoriques négligées  $R_1=0$ .

$$I_2' = \frac{l_m \omega_s}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{g}\right)^2 + (l_m \omega_s)^2}} I_1 \quad (7)$$

Après substitution (7) dans (6) on aura :

$$C_{em} = \frac{3pR_2'}{\omega_r} \frac{l_m \omega_s}{\left(\frac{R_2'}{g}\right)^2 + (l_m \omega_s)^2} I_1^2 = 3pR_2' \frac{l_m^2 \omega_r}{R_2'^2 + (l_m \omega_r)^2} I_1^2 \quad (8)$$

De cette expression on peut contrôler le couple par :

- $I_1$  : courant du stator.
- $\omega_r$  : pulsation rotorique.

D'après la figure (8) , on voit que :

- Le couple de démarrage à  $I_n=cste$ ,  $C_{dl} < C_{dv}$  au couple de démarrage à  $V_n=cste$ .

- Le flux est très faible.

Pour les glissements faibles (proche de zéro=grandes vitesses), quand  $I_s$  ou  $V_s$  augmente donc le flux  $\Phi_s$  augmente ( $V_s \sim k \Phi_s$ ) par conséquence le couple augmente aussi.

Il y aura une saturation de la machine ce qui provoque la création de perturbation du couple indésirable.

Si on néglige la saturation le couple atteint une valeur maximale et décroît très rapidement au synchronisme, en réalité la saturation limite cette augmentation du couple.

Les deux caractéristiques à  $I_n$  et  $V_n$  constants se coupent au point A qui présente le point de fonctionnement nominal de la machine, mais il se trouve sur la partie instable de la courbe.

Par contre le point B est stable et a la même valeur du couple que A mais il lui correspond une tension d'alimentation plus élevée ce qui engendre des pertes fer plus grandes et un état de saturation de la machine inacceptable. Donc, il est souhaitable de faire fonctionner la machine au point A avec une boucle fermée, par contrôle du couple moyennant le courant du stator et du glissement faible de façon à maintenir le flux constant équation (8), cad, de faire varier le pt A sur la courbe du couple obtenu à tension constante, figure(8).

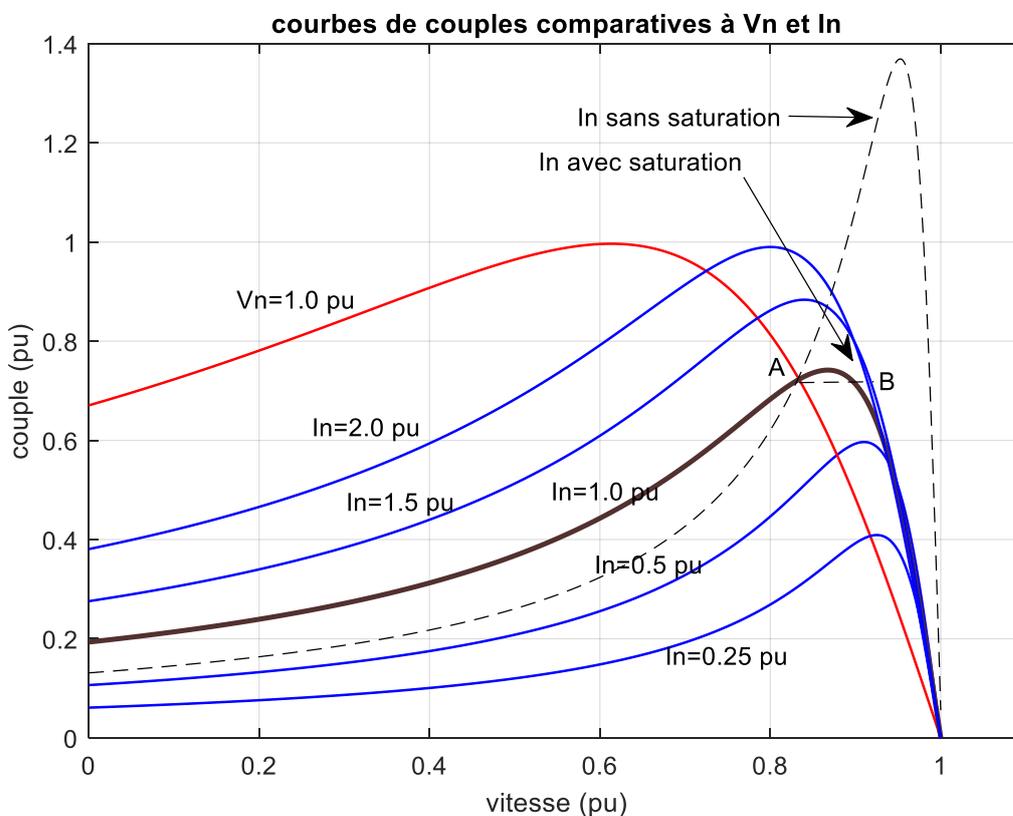


Figure (8) : courbes couple vitesse à courant nominal ou à tension nominale constante