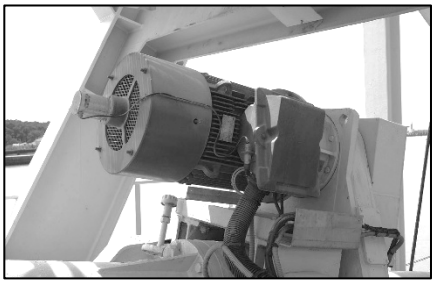
Chapitre 10 : Machines asynchrones triphasées

I. Introduction

La machine asynchrone est le type de machine électrique le plus utilisé, principalement en tant que moteur, où elle occupe une place centrale dans de nombreuses applications industrielles et dans le transport ferroviaire. Elle est également employée comme générateur, notamment dans les centrales électriques exploitant les énergies renouvelables.



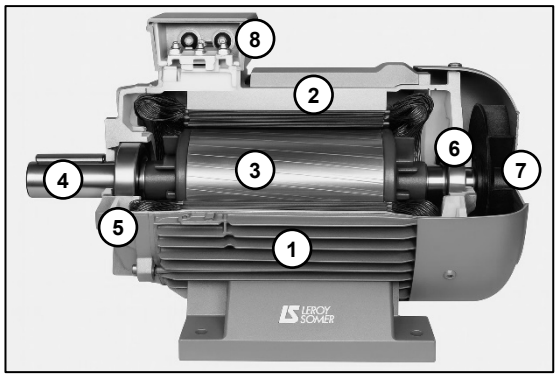
Ses principaux atouts sont :

- **Conception simple et robuste**, coût réduit et entretien aisé.
- **Large plage de puissances nominales**, pouvant atteindre **10 MW**.
- Fonctionnement essentiellement à **vitesse quasi constante**, de zéro à pleine charge.
- **Vitesse déterminée par la fréquence** de la source d'alimentation.

II. Constitutions de la machine asynchrone

La machine asynchrone se compose principalement de :

- **Stator :** muni de **trois** enroulements pouvant être raccordés en étoile (**Y**) ou en triangle (**Δ**), selon le type de réseau d'alimentation.
- **Rotor :** de forme cylindrique, il peut être :
  - **Bobiné :** généralement triphasé comme le stator, avec accès aux enroulements via trois bagues collectrices et trois balais.
  - **À cage d'écureuil :** non accessible, constitué de barres conductrices (souvent en aluminium) court-circuitées par deux couronnes.

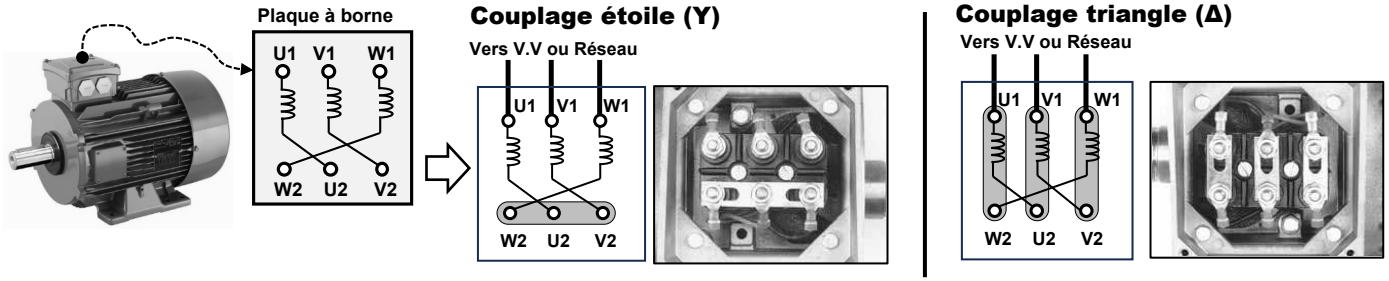


1	Carter à ailettes	3	Rotor (rotor à cage)	5	Flasques paliers	7	Ventilateur
2	Stator	4	Arbre moteur	6	Roulements et graissage	8	Boîte à bornes

La machine asynchrone à cage est la plus utilisée en industrie grâce à sa **robustesse mécanique**, son **coût réduit** et sa **standardisation élevée**, garantissant fiabilité, facilité d'intégration et faible maintenance, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications industrielles.

III. Plaque à bornes, plaque signalétique et choix du couplage

Le stator d'une machine asynchrone triphasée comporte trois enroulements identiques, pouvant être connectés en **étoile (Y)** ou en **triangle (Δ)**. Le choix du couplage dépend à la fois de la tension d'alimentation du réseau et de la tension nominale maximale admissible par chaque enroulement, telle qu'indiquée sur la **plaque signalétique** de la machine.



1- Choix de couplage

Pour déterminer le couplage approprié d'une machine asynchrone (MAS), il est indispensable de connaître au préalable la tension du **réseau d'alimentation** (ou variateur de vitesse) ainsi que les **tensions nominales recommandées** par le **constructeur de la MAS**, généralement indiquées sur la plaque signalétique de la machine. On distingue :

Réseau ou variateur de vitesse (V.V) : 230 / 400V	Moteur MAS : 230 V / 400 V
○ Tension simple V_R : 230 V ○ Tension composée U_R : 400V	La tension supportée par un enroulement V_{MAS} : $V_{MAS} = 230$ V

Méthode de choix :

- Si la tension d'emploi (supportée) V_{MAS} correspond à la tension simple de réseau V_R : **couplage étoile (Y)**
- Si la tension d'emploi (supportée) V_{MAS} correspond à la tension composée de réseau U_R : **couplage triangle (Δ)**

Exemple :

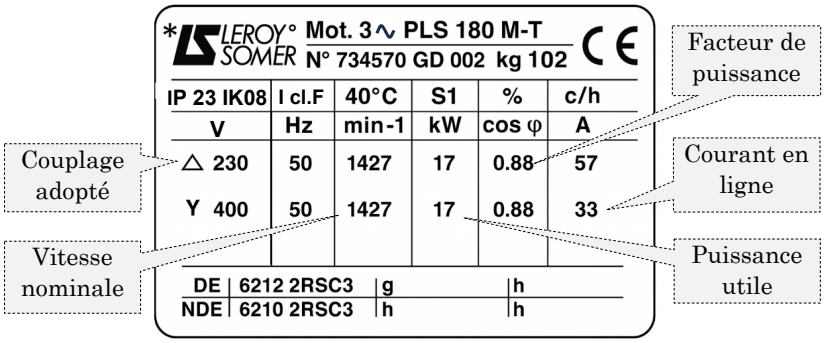
- Exemple 1 : Réseau : 230 V / 400 V | | Moteur MAS : 230 V / 400 V : On a : $V_{MAS} = V_R$ ⇒ Couplage (Y)
- Exemple 2 : Réseau : 230 V / 380 V | | Moteur MAS : 380 V / 658 V : On a : $V_{MAS} = U_R$ ⇒ Couplage (Δ)

2- Plaque signalétique

La plaque signalétique d'une machine asynchrone fournit les données essentielles du constructeur : modèle, caractéristiques électriques et mécaniques, conditions nominales. Elle est indispensable pour déterminer le couplage, assurer un raccordement correct et garantir une exploitation sûre et optimale.

Si l'on opte pour le couplage étoile (**Y**) :

- Tension d'alimentation : **230/400 V**
- Fréquence d'emploi : **50 Hz**
- Vitesse nominale : **1427 tr/min**
- Puissance nominale : **17 kW**
- Facteur de puissance : **0.88 AR**
- Courant en ligne nominal : **33 A**



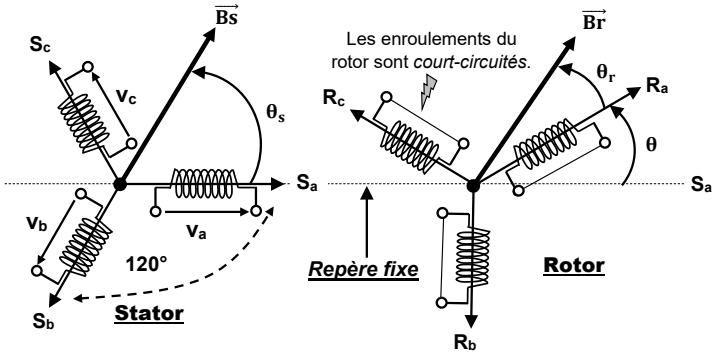
Remarque : *Une autre méthode pour déterminer le couplage consiste à se référer au symbole (étoile ou triangle) indiqué par le constructeur* ***à côté de la tension sur la plaque signalétique,*** *afin d'adapter le raccordement à la tension du réseau :*

Δ 230	Si la tension **entre phases** (composée) du réseau est **230 V**, il faut choisir le couplage **triangle**
Y 400	Si la tension **entre phases** (composée) du réseau est **400 V**, il faut choisir le couplage **étoile**

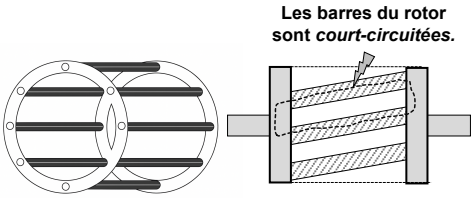
IV. Principe de fonctionnement

Question : *Quel est le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone ?*

Ferraris : Les enroulements statoriques sont déplacés géométriquement de **120°** et alimentés par des courants triphasés de pulsation ω_s ($\omega_s = 2\pi.f$), ce qui crée un champ magnétique tournant ($\vec{B_s}$), tourne à une vitesse synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$, où **p** représente le **nombre de paires de pôles** au stator.

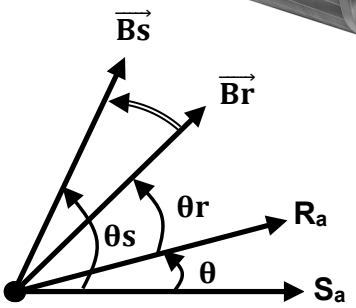


Remarque : *Dans un rotor à cage d'écureuil, les enroulements sont remplacés par des barres conductrices reliées aux extrémités par deux couronnes, formant un circuit court-circuité en permanence.*



Ce champ magnétique tournant ($\overrightarrow{B_s}$) balaie les enroulements du rotor et engendre une tension induite (f.é.m) dans les enroulements du rotor.

Comme les enroulements du rotor sont court-circuités, des courants y sont induits, ce qui engendre à leur tour un champ magnétique rotorique ($\overrightarrow{B_r}$).



Avec :

- $\Omega_s = \frac{d\,\theta_s}{dt}$: Vitesse angulaire (Stator / Champs statorique B_s).
- $\Omega_r = \frac{d\,\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire (Rotor / Champs statorique B_r).
- $\Omega = \frac{d\,\theta}{dt}$: Vitesse angulaire (Stator / Rotor)

L'interaction entre le champ magnétique statorique ($\overrightarrow{B_s}$) et le champ magnétique rotorique ($\overrightarrow{B_r}$) génère un couple électromagnétique C_{em}, responsable de la mise en rotation du rotor : $C_{em} = k\,.\,(\overrightarrow{B_s} \wedge \overrightarrow{B_r})$.

$$C_{em} = k.B_s.B_r.\sin(\theta_s - (\theta + \theta_r)) \quad \Longrightarrow \quad \boxed{C_{em} = k\,.B_s\,.B_r\,.\sin\left((\Omega_s - (\Omega + \Omega_r))t + C_{te}\right)}$$

Remarque : *Le couple électromagnétique, noté C_{em}, est sinusoïdal et sa valeur moyenne est nulle* ($Cem_{moy} = 0$), *ce qui signifie qu'il n'y a pas de rotation. Pour qu'un couple apparaisse et qu'il y ait rotation, il est nécessaire que la valeur moyenne du couple électromagnétique soit différente de zéro* ($Cem_{moy} \neq 0$). *Cela peut être obtenu en respectant la* ***loi d'autopilotage*** *de la machine :* $\Omega_s - (\Omega + \Omega_r) = 0 \Rightarrow \langle C_{em} \rangle = k\,.B_s\,.B_r\,.\sin(C_{te}) \neq 0$.

On a donc : $\Omega_s = \Omega + \Omega_r$, donc $\Omega \neq \Omega_s$. Le terme « **Asynchrone** » vient du fait que la **vitesse du rotor Ω** est différente de celle du **champ tournant Ω_s**, ce qui traduit un état de **désynchronisation** entre les deux.

V. Grandeurs mécaniques de la MAS : Vitesses, glissement et fréquences

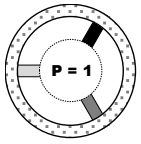
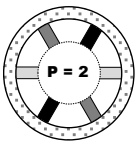
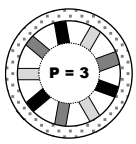
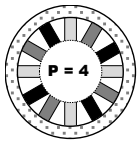
1- Vitesse synchronisme

La vitesse de synchronisme correspond à la vitesse du champ magnétique tournant ($\overrightarrow{B_s}$) produit par le stator. Elle dépend de la **fréquence f** du réseau et du nombre de **paires de pôles p**.

Elle est donnée par les relations suivantes : $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ en (rad/s) ou $N_s = \frac{60\,.\,f}{p}$ en (tr/min) $\left(avec\ \Omega_s = \frac{2\pi\ N_s}{60}\right)$

Avec :

- **f**,ω_s : Fréquence de réseau en (**Hz**) et pulsation des courants statoriques en (**rad/s**).
- **p** : Nombre de paires de pôles au stator (et au rotor).
- Ω_s, N_s : Vitesse angulaire du champ tournant en (rad/s) et la fréquence de rotation du champ tourant (**tr/min**).
- **Ω** : Vitesse angulaire du rotor en (**rad/s**).

MAS Bipolaire	MAS Tétrapolaire	MAS Hexapolaire	MAS Octopolaire
P = 1 ⇒ 2 pôles	P = 2 ⇒ 4 pôles	P = 3 ⇒ 6 pôles	P = 4 ⇒ 8 pôles
			
N_s = 3000 tr/min (si f = 50Hz)	N_s = 1500 tr/min	N_s = 1000 tr/min	N_s = 750 tr/min

2- Glissement

Le **glissement** g d'une machine asynchrone correspond à l'écart de vitesse relatif entre la rotation du champ statorique (synchronisme N_s) et celle du rotor (**N**), tel que : $g = \Omega_s - \Omega$ en absolue et $g = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S} \Leftrightarrow g = \frac{N_s - N}{N_s}$

Il est essentiel au fonctionnement, car sans glissement, aucun courant ni couple ne seraient produits dans le rotor.

3- Fréquence des courants rotoriques fr

La vitesse relative du champ statorique par rapport au rotor est : $N_s - N = g.N_s$, Avec p paires de pôles, la fréquence des f.é.m. et des courants dans le rotor est : $f_r = p \cdot (g \cdot N_s)$.

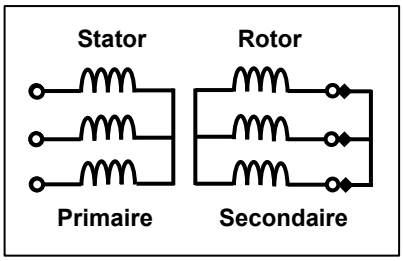
Or, comme $N_s = \frac{f}{p}$, on obtient : $f_r = \cancel{p} \cdot g \cdot \frac{f}{\cancel{p}} \Rightarrow f_r = g \cdot f$

Ainsi, la fréquence des grandeurs rotoriques est proportionnelle au glissement. En fonctionnement normal, le glissement étant faible, la fréquence rotorique est également faible, généralement de quelques hertz. Au démarrage .....

VI. Modèle électrique monophasé de la machine asynchrone

1- Analogie avec un transformateur

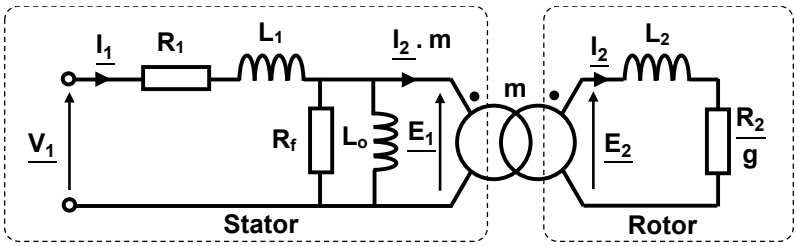
La machine asynchrone à rotor bobiné fonctionne comme un **transformateur à champ tournant** : le stator correspond au primaire et le rotor au secondaire. Les courants statorique et rotorique produisent des forces magnétomotrices qui créent un flux commun. Du fait du glissement, la fréquence rotorique est proportionnelle à ce glissement, et la résistance rotorique peut être représentée par une valeur équivalente R_2/g, ce qui permet d'utiliser un schéma équivalent similaire à celui du transformateur.



La figure suivante illustre le modèle monophasé de la machine synchrone, représenté selon l'analogie avec un transformateur monophasé.

Avec :

- R_1 : Résistance d'une phase du stator
- R_2 : Résistance d'une phase du rotor
- L_1 : Inductance de fuites au stator
- L_2 : Inductance de fuites au rotor
- L_o : Inductance de magnétisation
- R_f : Résistance modélisant les pertes ferromagnétiques



2- Modèle électrique de la MAS ramené au stator en régime permanent

À partir du schéma précédent, on applique une série de transformations permettant de **ramener les éléments du rotor vers le stator**. Pour simplifier l'étude, on adopte les hypothèses suivantes :

Hypothèses simplificatrices :

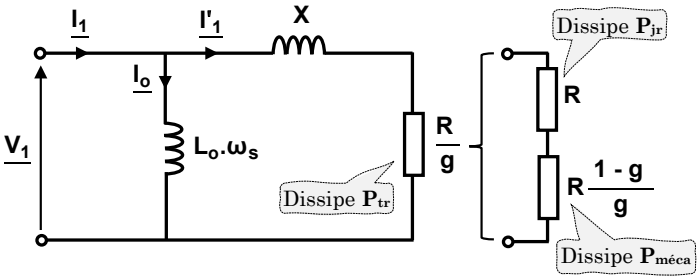
- On néglige la chute de tension aux bornes de **la résistance R_1** et de **l'inductance de fuite L_1** du stator. Cette approximation reste valable sauf aux basses fréquences et faibles tensions.
- Les pertes fer étant faibles, on néglige la résistance R_f qui les modélise.

En posant : $R = \frac{R_2}{m^2}$ et $X = \frac{L_2 \cdot \omega_s}{m^2}$

Et en ramenant les éléments du secondaire au primaire, on obtient alors le **schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone**.

On distingue :

- **L_o :** Inductance de magnétisation
- **R :** inductance rotorique ramenée au stator
- **X :** réactance de fuite rotorique ramenée au stator ;
- **V_1 :** Tension efficace aux bornes d'une phase du stator
- **I_1 :** Courant efficace dans une phase du stator



P_{tr} : Puissance transmise au rotor **P_{jr} :** Pertes joules rotoriques **$P_{méca}$:** Puissance mécanique

VII. Moteur triphasé alimenté à tension et fréquence constantes

1. Relations des puissances active d'une MAS

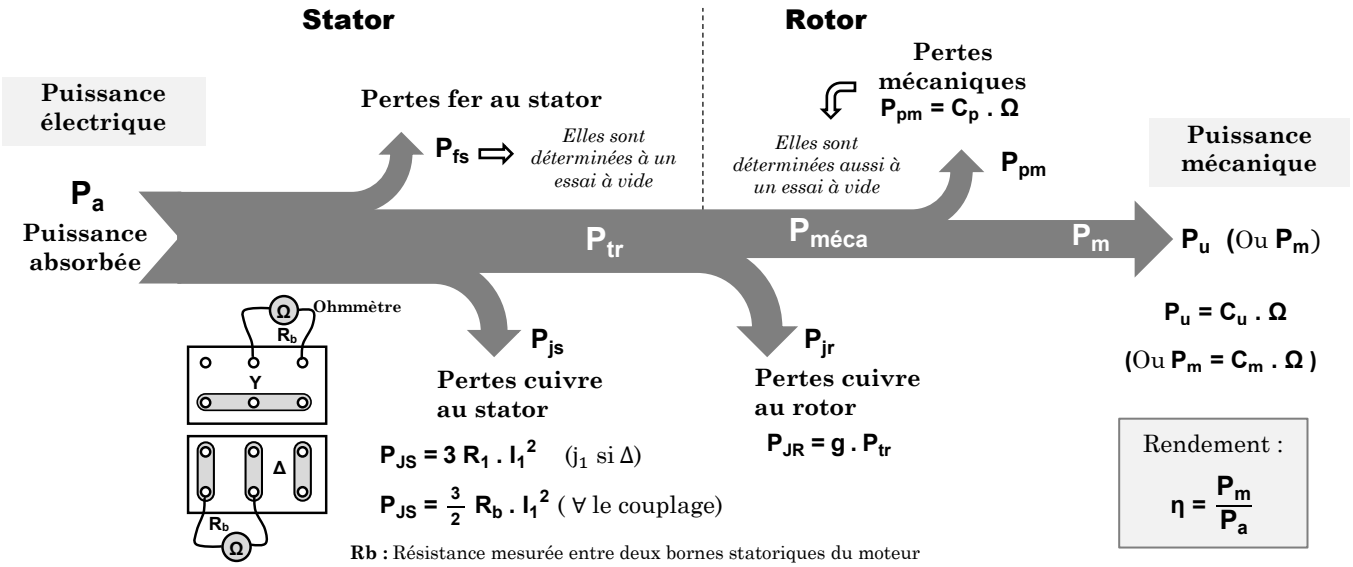
Le tableau suivant présente les différentes puissances actives de la machine asynchrone en fonctionnement moteur, à fréquence fixe :

Ses relations pour un couplage (Y)

Puissance active absorbée **P_a**	$P_a = \sqrt{3}\, U \,.\, I \,.\, \cos(\varphi)$ Avec : $I = I_1$
Pertes joules au stator **P_{js}**	$P_{JS} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2$
Puissance transmise du stator au rotor **P_{tr}**	$P_{tr} = 3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_1^2$
Pertes joules au rotor **P_{jr}**	$P_{JR} = g \cdot P_{tr}$
Puissance mécanique sur le rotor **$P_{méca}$**	$P_{méc} = P_{tr} - P_{JR} = (1-g) \cdot P_{tr}$
Puissance utile **P_u**	$P_u = P_{méc} - P_{pm}$

2. Bilan de puissances

La puissance électrique fournie à une machine asynchrone suit un parcours précis : elle entre au stator, se transforme en énergie électromagnétique, puis en puissance mécanique transmise au rotor, avant d'être restituée sur l'arbre de sortie. Chaque étape s'accompagne de pertes caractéristiques à la conversion et à la transmission.



La puissance **P_{tr}**, également appelée **puissance électromagnétique P_{em}**, correspond à l'énergie transmise du stator vers le rotor. La puissance **$P_{méca}$**, quant à elle, représente la **puissance mécanique disponible** au rotor **avant les pertes mécaniques**. Elles s'expriment par les relations suivantes :

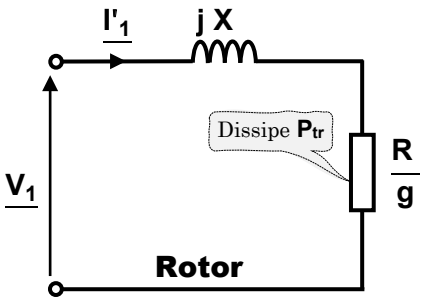
$$P_{tr} = C_{em} \,.\, \Omega_s \quad \text{Ou} \quad P_{em} = C_{em} \,.\, \Omega_s \quad \text{et} \quad P_{méca} = C_{em} \,.\, \Omega$$

Note : *Seule la **puissance P_{tr}** (ou P_{em}) s'exprime en fonction de la vitesse de **synchronisme Ω_s**.*

3. Couple mécanique C_m (ou C_u)

Le couple électromagnétique développé par une machine asynchrone traduit l'interaction entre le champ tournant statorique et le champ rotorique. Sa connaissance est fondamentale pour comprendre l**e démarrage**, le **fonctionnement en charge** et la **stabilité mécanique** du moteur.

La figure suivante représente l'isolement de la partie rotorique dans le schéma équivalent de la machine asynchrone (MAS) :



> **Hypothèse :** *En négligeant les pertes mécaniques, le couple mécanique utile* **C_m** *est considéré égal au couple électromagnétique* **C_{em}** *:* **$C_m = C_{em}$**

Le couple électromagnétique est exprimé par : $C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$.

Et À partir du schéma équivalent isolé du rotor, la puissance transmise est dissipée dans la résistance équivalente R/g, de sorte que : $P_{tr} = 3 . \frac{R}{g} . I'_1{}^2$ (Le **3** désigne : **3 phases**)

• Expression du courant I'_1

D'après le schéma équivalent :

Expression du courant complexe $\underline{I'_1}$	Valeur efficace I'_1
d'après la loi des mailles : $\underline{V_1} = \left(\frac{R}{g} + jX\right) \cdot \underline{I'_1} \Rightarrow$ d'où : $\underline{I'_1} = \frac{\underline{V_1}}{\frac{R}{g} + jX}$	Donc : $I'_1 = \frac{V_1}{\sqrt{(R/g)^2 + X^2}}$

• Expression de couple moteur Cm

On en déduit finalement l'expression du couple électromagnétique **C_{em}**, équivalent (sous l'hypothèse de pertes mécaniques négligées) au couple mécanique utile **C_m** :

$P_{pm} \Rightarrow C_m = C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$ avec : $P_{tr} = 3 . \frac{R}{g} . I'^2$

donc : $C_m = \frac{3}{\Omega_s} . \frac{R}{g} . I'^2$

$\Leftrightarrow C_m = \frac{3}{\Omega_s} . \frac{R}{g} . \overbrace{\frac{V_1^2}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}}^{I'^2}$

d'où : $C_m = \frac{3 V_1^2}{\Omega_s} . \frac{\frac{R}{g}}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}$

3.1. Le couple maximal C_{max}

On s'intéresse particulièrement à la valeur maximale du couple. Pour la déterminer, on recherche le glissement g qui maximise l'expression de **C_m**, puis on substitue cette valeur dans la relation du couple établie précédemment :

Comme : $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \Rightarrow$

$$C_m = \frac{3 . p . V_1^2}{\omega_s} \frac{R}{\frac{R^2}{g} + X^2 . g}$$

- **Expression de g_{max} :** La valeur **g_{max}** peut être déterminée en annulant la dérivée $\frac{d C_m}{d g} = 0$, mais les calculs sont complexes. Alors à tension constante, le couple atteint son maximum lorsque la somme $R^2/g + X^2 g$ est minimale, ce qui se produit lorsque les deux termes sont égaux. Ce qui donne : $\frac{R^2}{g} = X^2 . g$

$\Leftrightarrow g^2 X^2 = R^2 \Rightarrow g = \frac{R}{X}$, donc le couple Cm est maximal lorsque : $g = g_{max} = \frac{R}{X}$

- **Expression du couple maximal C_{max} :** En remplaçant **g** par sa valeur **g_{max}**, on obtient :

Expression 1 : $C_{max} = f(V_1, p, X$ et $\omega_s)$	Expression 2 : $C_{max} = f(V/f)$
Le glissement maximal : $g_{max} = \frac{R}{X}$	Nous avons que : $X = L . \omega_s$ Avec $\omega_s = 2\pi . f$
On a : $C_m = \frac{3 . P . V_1^2}{\omega_s} . \frac{R}{\frac{R^2}{R/X} + X^2 . \frac{R}{X}} \Rightarrow$ d'où : $C_m = \frac{3 . P . V_1^2}{2 . \omega_s . X}$	On a : $C_m = \frac{3 . P . V_1^2}{2 . \omega_s . X}$ $\Leftrightarrow C_m = \frac{3 . P . V_1^2}{2 . (2\pi . f) . (L . 2\pi f)}$ $\Leftrightarrow C_m = \frac{3 . P . V_1^2}{8 . \pi^2 . L . f^2} = \frac{3 . P}{8 \pi^2 . L} . \left(\frac{V_1}{f}\right)^2$ d'où : $C_m = k . \left(\frac{V_1}{f}\right)^2$ $k = \frac{3 . P}{8 \pi^2 . L}$

3.2. Couple de démarrage C_d

Le **couple de démarrage** correspond au couple électromagnétique produit par la machine asynchrone lorsque le **rotor est immobile** (**N** = 0). Il caractérise la capacité du moteur à **vaincre l'inertie** et les **couples résistants** dès la mise sous tension. Il est exprimé par :

Au démarrage le rotor est immobile ⇒ **N = 0** ⇒ le glissement : $g = 1$ ⇒ $C_d = C_m(g=1) = \frac{3.P.V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{R}{R^2 + X^2}$

3.3. Couple à faible glissement

À **faible glissement** (**g ≈ 0**), la vitesse du rotor est proche de la vitesse synchrone. Dans cette zone, la machine fonctionne en régime normal, il est exprimé par : $C_{mo} \approx \lim_{g \mapsto 0} C_m$

On a : pour $g \to 0$ ⇒ $\frac{R}{g} \to +\infty$, donc : $\left(\frac{R}{g}\right)^2 \gg X^2$

donc on néglige X^2 devant $\left(\frac{R}{g}\right)^2$

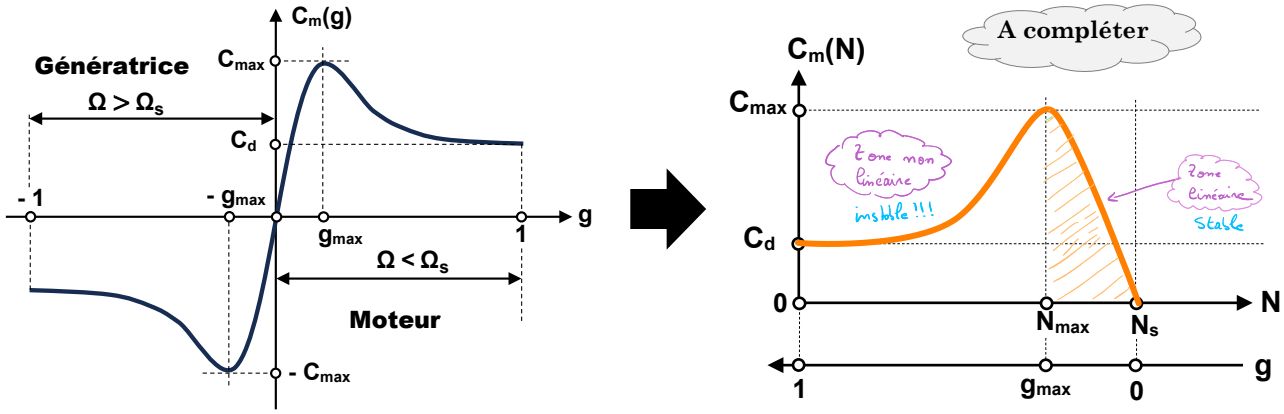
⇒ $C_m \simeq \frac{3.P.V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R}{g}}{(R/g)^2}$ ⇒ $C_m = \frac{3.P.V_1^2}{R.\omega_s} \cdot g$

d'où : $\boxed{C_m = k.g}$ avec : $k = \frac{3.P.V_1^2}{R.\omega_s}$

Le couple moteur maintenant est proportionnel au glissement **g**, assurant une rotation stable adaptée aux charges industrielles courantes.

4. Caractéristique mécanique C_m=f(N)

La **caractéristique mécanique** d'une machine asynchrone décrit l'évolution du couple mécanique C_m en fonction de la vitesse de rotation **N**. Elle permet d'analyser le **démarrage**, la **zone de fonctionnement stable** et la **limite de charge** du moteur.



VIII. Control à vitesse variable de la MAS

1- Présentation

La machine asynchrone peut être commandée en vitesse grâce aux variateurs de fréquence. Cette technique permet d'adapter la vitesse de rotation aux exigences de la charge, offrant flexibilité, économies d'énergie et performances optimisées dans les systèmes industriels actuels. La vitesse **Ω** du moteur asynchrone est exprimée par : $\Omega = \frac{\omega_s}{p}(1 - g)$

Le réglage de la vitesse d'une MAS peut être réalisé selon trois méthodes principales :

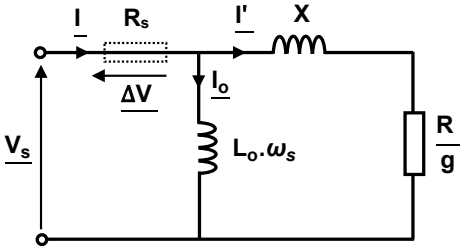
- **Variation du nombre de paires de pôles p :** nécessite un bobinage spécial et n'autorise qu'un réglage par paliers, donc non continu.
- **Variation du glissement g (par modification de la tension statorique V1) :** cette technique offre une plage de réglage limitée, réduit fortement le rendement et le couple, et génère des harmoniques (utilisation de **gradateurs**). Elle reste inadaptée aux entraînements à couple constant.
- **Variation de la fréquence d'alimentation f :** c'est la méthode la plus utilisée dans les variateurs de vitesse modernes. Elle permet de maintenir un couple constant sur une large plage de vitesses et assure une commande efficace aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique.

2- Réglage par variation de vitesse à fréquence variable f

Deux approches dominent la commande des machines asynchrones à fréquence variable. La **commande scalaire (V/f constant)**, simple et robuste, maintient le flux constant et assure un couple quasi nominal sur une large plage de vitesses, mais reste limitée en dynamique. **La commande vectorielle**, plus élaborée, agit sur l'amplitude et la phase des grandeurs électriques, permettant un contrôle précis du couple et de la vitesse, y compris à **vitesse nulle**, mais au prix d'une complexité de calcul accrue. Dans ce cours, nous nous limiterons juste à la **commande scalaire**.

2.1. Représentation de la commande scalaire

Les techniques de commande scalaire visent à réguler le module du **flux magnétique Φ** afin de maintenir des performances optimales et d'assurer que le **couple maximal** disponible reste **constant sur l'ensemble de la plage de vitesses**.



En régime permanent, la tension statorique s'écrit : $\underline{V_S} = R_s\,\underline{I} + j\,\omega_s\,\underline{\Phi_S}$

À forte vitesse, la chute de tension ohmique **ΔV = Rs. I** est négligeable devant **Vs**. On obtient alors : : $\underline{V_S} \approx j\,\omega_s\,.\,\underline{\Phi_S}$ ⟹ En module : $\boxed{V_S \approx \omega_s\,.\,\Phi_S}$

Enoncé de la loi de commande scalaire : Cette relation montre que le rapport $\Phi_S \approx \frac{V_S}{\omega_s}$ **doit rester constant** afin de maintenir le module du flux statorique constant. Il en résulte la loi de commande scalaire : **V / f = constante**.

Conséquences du maintien du rapport V/f constant :

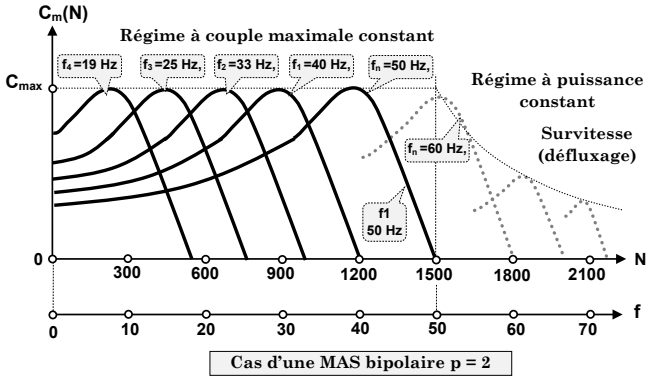
- **Flux statorique constant :** le flux Φs, créé principalement par le courant magnétisant **Io**, reste inchangé.
- **Courant magnétisant stabilisé :** $I_o = \frac{V_S}{L_o\,\omega_s} = C_{te}$

  Le maintien d'un flux constant permet de limiter l'échauffement et d'assurer une bonne stabilité thermique.
- **Couple maximal constant** : le couple maximal ne dépend plus de la vitesse et reste constant dans toute la plage de variation : $C_{max} = \frac{3\,.\,p}{2\,.\,L}\left(\frac{V_S}{\omega_s}\right)^2 \Rightarrow C_{max} = K\,.\left(\frac{V_S}{\omega_s}\right)^2 = C_{te}$
- **Caractéristiques mécaniques Cm = f(N) obtenues en commande scalaire V/f sont parallèles entre elles**. Elles se déplacent simplement vers la gauche ou la droite en fonction de la fréquence d'alimentation **f**.

Le nom « **commande scalaire** » vient du fait que l'on agit uniquement sur des **grandeurs scalaires** (Vs, f, Φ_S sans direction)

2.2. Caractéristiques mécaniques à V/f constant et implantation de loi V/f constant.

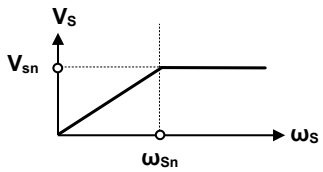
Dans la commande scalaire, le maintien du rapport **V/f** constant garantit des caractéristiques mécaniques parallèles, qui se déplacent en fonction de la fréquence **f**.



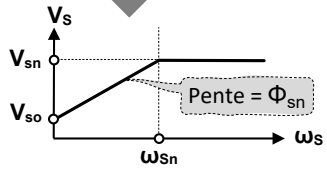
Cas d'une MAS bipolaire p = 2

À basse fréquence et faible tension, la chute ohmique **Rs.I** devient significative face à **Vs**, dégradant le rapport V/f et les performances de la MAS. Pour compenser **ΔV**, une **tension de seuil Vso** est ajoutée afin de maintenir le flux statorique constant.

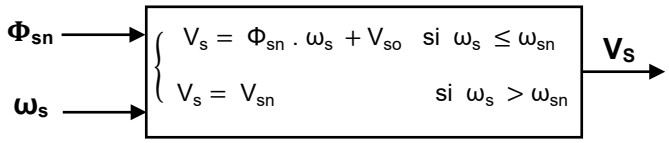
À haute fréquence, la tension statorique est limitée à **Vn** pour protéger les isolants. Au-delà de **50 Hz,** le rapport **V/f** diminue, plaçant la machine en régime de **défluxage** : la vitesse augmente, mais le couple maximal disponible se réduit



$$\begin{cases} V_s = \Phi_{sn}\,.\,\omega_s + V_{so} & \text{si } \omega_s \le \omega_{sn} \\ V_s = V_{sn} & \text{si } \omega_s > \omega_{sn} \end{cases}$$



On peut ainsi représenter la loi de commande scalaire **V/f** par le bloc suivant :



Exemple : une MAS de **230/400 V**, **50 Hz**

- Le rapport V/f : $\frac{V_{sn}}{f_n} = \frac{230}{50} \Rightarrow \frac{V_{sn}}{f_n} =$ **4.6 V/Hz**
- Le flux nominal Φ_{sn} : $\Phi_{sn} \approx \frac{V_{sn}}{\omega_{sn}} = \frac{230}{2\pi \,.\, 50}$

Avec : $\omega_{sn} = 100\pi$ **rad/s** $\Rightarrow \Phi_{sn} \approx$ **0,73 Web**

2.3. Structure d'un variateur de vitesse à commande scalaire en tension

La commande scalaire étant définie en régime permanent, il est justifié d'utiliser le modèle de la machine dans ce même régime. Selon la section (**IIV, 3.1**), le couple mécanique s'exprime alors par :

$$C_m = \frac{3.\,p.V_s^2}{\omega_s}\,\frac{\frac{R}{g}}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2} \Rightarrow C_m = \frac{3.\,p.V_s^2}{\omega_s}\,\frac{R\,g}{R^2 + (X.g)^2} \xrightarrow{X = L\,.\,\omega_s} C_m = \frac{3.\,p.V_s^2}{\omega_s\,.\,\omega_s}\,\frac{R\,.\,g\,.\,\omega_s}{R^2 + (L\,.\,\omega_s.g)^2}$$

Il a été établi que la pulsation rotorique s'exprime sous la forme : $\omega_r = g.\omega_s \Rightarrow C_m = 3.p.\,R.\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \frac{\omega_r}{R^2 + (L.\,\omega_r)^2}$

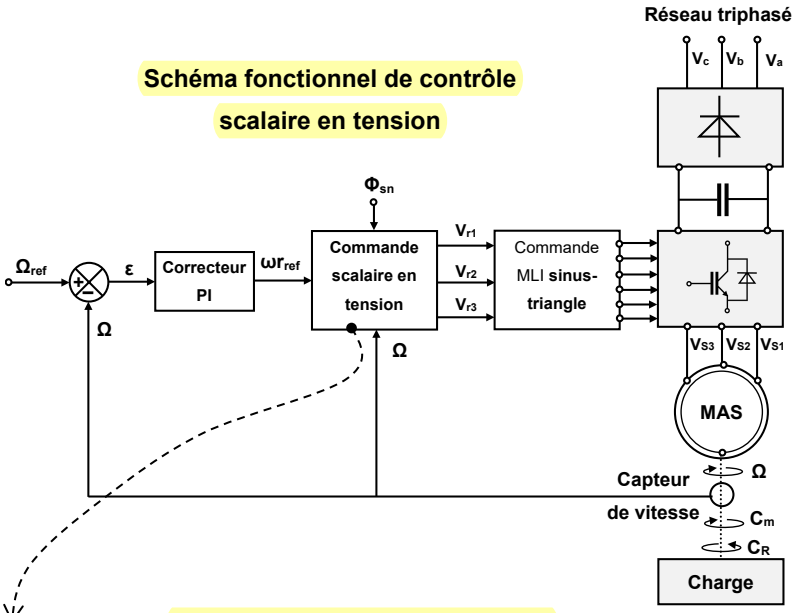
En régime permanent, la pulsation rotorique ω_r étant très faible, on admet $(L.\,\omega_r)^2 \ll R^2$. En appliquant cette simplification, l'expression du couple se réduit à : $C_m = 3.\frac{p}{R}.\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2.\ \omega_r$

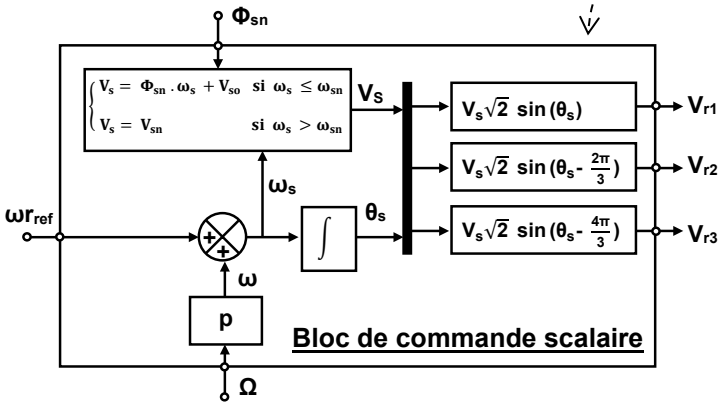
Puisque le rapport **V/f contant**, garantie un flux statorique constant $V_s / \omega_s = C_{te}$, la pulsation rotorique reflète le couple. L'expression simplifiée du couple peut alors s'écrire en fonction de ω_r comme suit : $\boxed{C_m = K_C\,.\ \omega_r}$ Avec $K_C = 3.\frac{p}{R}.\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2$

Conclusion : le contrôle de la machine asynchrone se traduit effectivement par la maîtrise de la **pulsation rotorique** ω_r. Celle-ci constitue l'image directe du couple développé. Le régulateur de vitesse, à travers la loi d'autopilotage, calcule la référence appropriée afin de commander l'onduleur, qui ajuste tension et fréquence statoriques pour assurer le fonctionnement souhaité.

Ce schéma représente la commande scalaire d'une machine asynchrone. La vitesse est mesurée par un capteur, fournissant la vitesse réelle. Un **correcteur PI** compare cette mesure à la consigne et estime la **pulsation rotorique** ωr_{ref}, qui est convertie en **pulsation statorique de référence** grâce à la loi d'autopilotage. Cette référence alimente le bloc de commande scalaire en tension appliquant la loi **V/f**, puis modulée par la **MLI sinus-triangle**. L'onduleur génère alors les tensions triphasées nécessaires pour alimenter la **MAS** et entraîner la charge.

Schéma fonctionnel de contrôle scalaire en tension



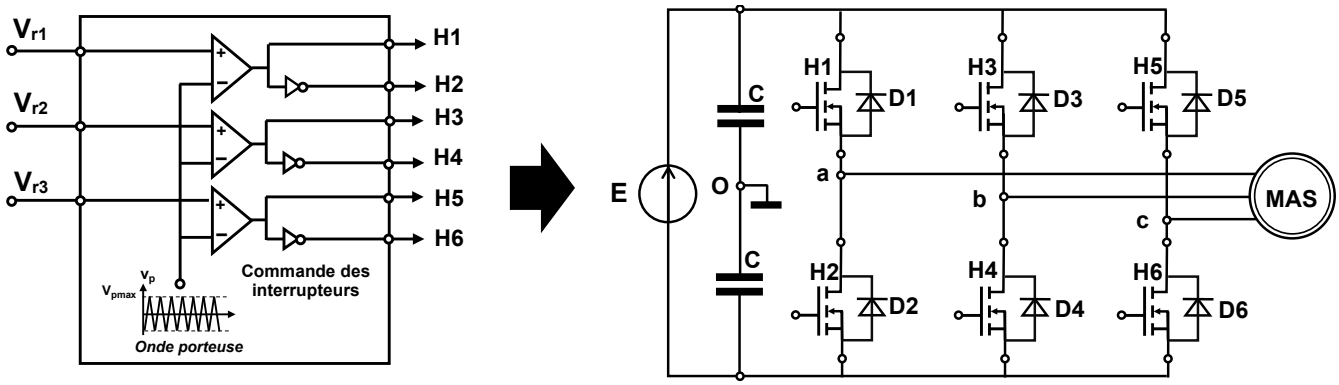


Bloc de commande scalaire :

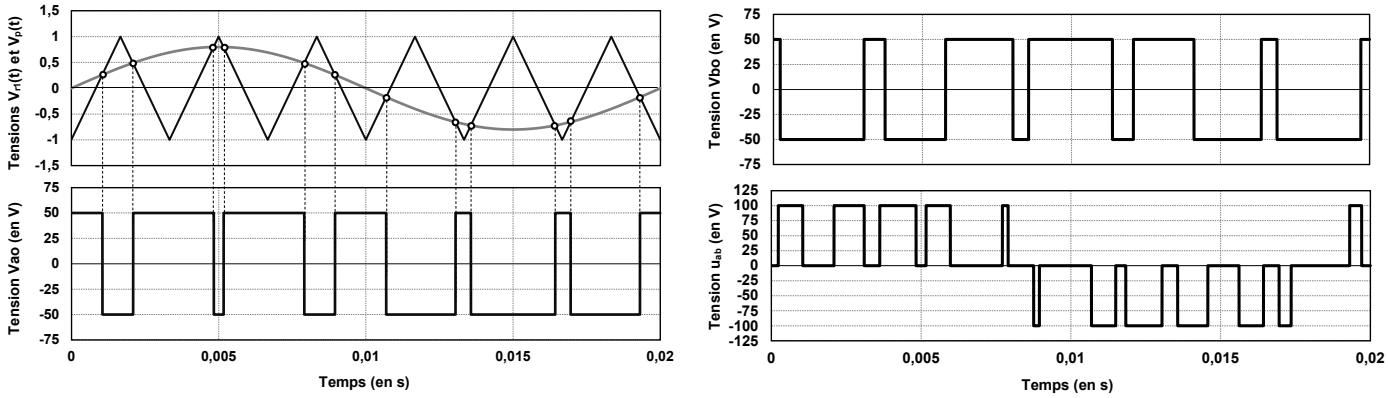
Après avoir fixé le flux statorique nominal via le rapport **V/f**, le bloc reçoit la pulsation réelle mesurée $\omega = p.\Omega$ et la pulsation rotorique de référence ωr_{ref} liée également au couple C_m. La **loi d'autopilotage** calcule la pulsation statorique $\omega s = \omega + \omega r_{ref}$. Le bloc détermine ensuite la tension **efficace** V_s et **l'angle** θ_s (après une intégration). Alors Trois tensions **sinusoïdales de référence** sont générées pour alimenter la **MLI sinus-triangle**.

2.4. Alimentation de la MAS : Onduleur de tension à commande MLI sinus-triangle

Les variantes de commande scalaire se distinguent selon le type d'alimentation. On distingue deux catégories principales : **la commande en tension (abordé seulement dans ce cours)**, qui agit sur l'onduleur **MLI en tension en sinus-triangle** (souvent utilisée pour les petites et moyennes puissances), et **la commande en courant**, qui agit sur les courants de la MAS via **MLI à hystérésis ou commutateur de courant,** adaptée aux moyennes et grandes puissances.



La commande **MLI sinus-triangle (SPWM)** compare les ondes de **référence** sinusoïdales $v_{r1}(t)$, $v_{r2}(t)$ et $v_{r3}(t)$, issues de la loi de commande scalaire, à une onde triangulaire **porteuse** $v_p(t)$. Les comparateurs génèrent alors les signaux de commande des interrupteurs H_1 à H_6, ajustant la largeur des impulsions. Cette technique permet de faire varier régulièrement la fréquence **f** et la valeur efficace V_s des tensions statoriques, tout en maintenant **naturellement le rapport V/f constant**.

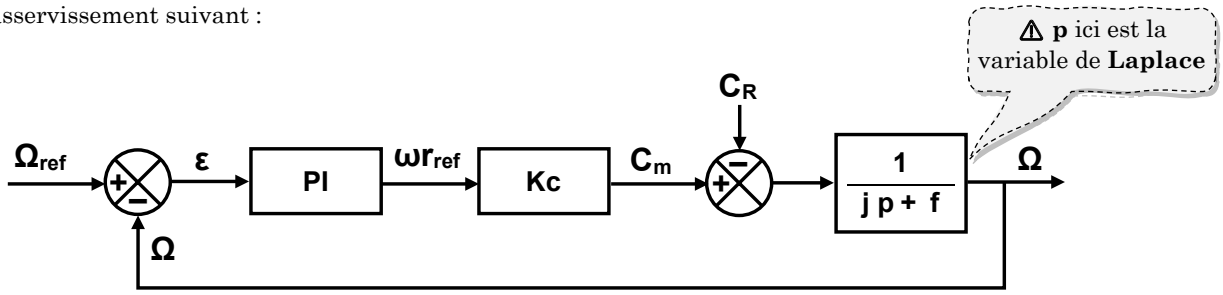


2.5. Modèle simplifié d'asservissement de vitesse à V/f constant.

Le schéma d'asservissement, bien que non linéaire, peut être approximé par un modèle linéaire continu grâce aux hypothèses retenues. Ce modèle permet de dimensionner le **correcteur PI**, largement utilisé en commande des machines électriques : l'action proportionnelle accélère la dynamique, tandis que l'action intégrale supprime l'erreur statique.

Equations simplifiées linéaire de la machine asynchrone	
L'équation couple mécanique	**L'équation mécanique (PFD)**
$C_m = K_C \cdot \omega_r$ Avec $K_C = 3.\frac{p}{R}.\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2$ (⚠ **p** ici paire de pôles)	$j\,\frac{d\,\Omega(t)}{d\,t} + f\,.\Omega(t) = C_m(t) - C_r(t)$

Après application de la transformation de **Laplace** et conversion des équations en schéma bloc, on obtient le schéma fonctionnel d'asservissement suivant :



Références bibliographiques :

Claude CHEVASSU. Machines asynchrones : cours et problèmes [PDF]. Version 25 mars 2020. Licence Libre. Disponible sur : http://mach.elec.free.fr

Christophe FRANÇOIS, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016.

Azan, J.-L., Gyzelinck, J.-C., Le Gall, F., Meunier, J., & Torrus, A. (2015). Sciences appliquées – BTS électrotechnique.

Pierre Tréhin, Sciences industrielles de l'ingénieur (SII) - spécial ATS, Ellipses 2019

A, ESSADKI, cours de mon professeur d'électrotechnique en Master GE, ENSAM RABAT, Année universitaire 2015/2016

Université Mohamed Boudiaf – M'sila. Commande scalaire de la machine asynchrone [PDF]. Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique, Master 1 CMT+CE, Algérie, 2018

A. OUAANABI (Version 2025/2026)

Génie électrique (TSI) – CPGE OUJDA