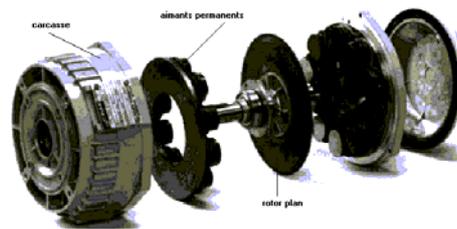
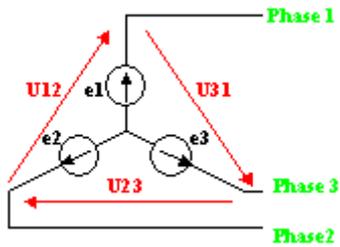
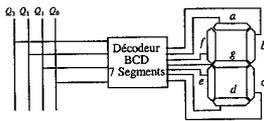


DOCUMENT N° 1



Electrotechnique, machines électriques,



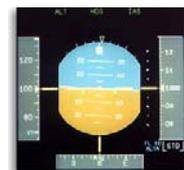
Electronique Numérique #



Electronique Analogique



pour l'avionique



Sommaire :

Pré-requis: PEA301 et PEA302 semestre 3 Licence Sciences et Technologies, Université Bordeaux 1

MERCI à Franck Cazaurang pour sa contribution...

A. Généralités

A.1. Plan du cours : iMA401 : 6 crédits

12 cours et TD de 2 heures

Electrotechnique
Electronique numérique
Electronique analogique

9 TP de 4 heures

4 TP électrotechnique : MAS 3 ~ , Alternateur 3 ~ , MCC, Transformateur 2 ~
4 TP élect # : logique combinatoire, logique séquentielle, CPLD, GRAFCET
1 TP élect analogique

3 GROUPES DE TP

A.2. les enseignements à venir

A.2.1. Licence 2 : iMA402 : Automatique et commande de vol :

Initiation à la commande automatique en aéronautique.

A.2.2. Licence 3

Avionique, Radiocommunication et RadioNavigation
Stage, documentation ATA
Génération électrique avion (EADS Sogerma)
Stage

A.2.3. Master 1 M&E

Langage C, JAVA, micro-contrôleur, BUS avionique ARINC, Test automatique
TP Labview, TP Hangar avion,
HF, ondes et adaptation
GPS, visu tête haute... (THALES)
Stage & Projet

A.2.4. Master 2 « avionique »

Electronique « temps réel »
Logistique (DASSAULT)
Spatial (CNES)
.....
Stage & Projet

A.3. Fiche UE iMA401 :

Elect. pour l'Avionique 1				IMA 401			
Parcours	Spécialité Maintenance Aéronautique			Sem. 4	6 crédits		

UFR de Physique
 Institut de Maintenance Aéronautique
 Pré requis : PEA301 et PEA302

Electronique numérique pour l'Avionique 1

Objectifs : *Notion de Bus avioniques, codage de l'information,*

Principe de la Maintenance pour l'avionique et les systèmes embarqués.

	s	1	3	5	7	9	11	13
6h C -1h DS		X		X	DS	X		
6h TD			X	X			X	
4 TP de 3h				X	X	X	X	
24 hf					C : 2h – TD 2h – TP 3h			

PROGRAMME

Technologie des bus avionique (1C)

- Historique, vocabulaire
- L'ARINC
- Nouvelles technologies

Codage de l'information en aéronautique (1C – 2 TD)

- Code pour l'aide à la navigation
- Codage sur Bus ARINC 429
- Principe de la maintenance embarquée : Build In Test Equipment,
- Les informations dans le Cockpit : exemple Airbus et Falcon.

Exploitation de la documentation de maintenance (1C – 1 TD)

- Exemple sur Bus ARINC
- Exploitation de l'A.M.M

Electrotechnique – génération électrique Avion 1

Objectifs : Principe des réseaux électriques sur aéronef et des actionneurs.

	s	1	3	5	7	9	11	13
6h C -1h DS		X		X	DS	X		
6h TD			X	X			X	
4 TP de 3h					X	X	X	X
24 hf					C : 2h – TD 2h – TP 3h			

PROGRAMME
Génération Electrique (1C – 1TD)

- Historique, vocabulaire
- Exemple de schéma avion
- Alternateur avion.

Réseaux Electriques sur aéronef (1C – 1TD)

- Alternatif, Continu,
- Sécurité des équipements et des personnes
- Exploitation de documentation : ATA.
- Veille technologique : l'A380.

Les actionneurs sur avions (1C – 1TD)

- Moteurs
- Alimentation, transformateur et redresseur.
- Servo-commande électrique.
- Les BREAKERS
- Les batteries, les groupes de parc.

Electronique analogique pour l'Avionique 1
Objectifs : Notion d'Electronique pour Radionavigation.

Capteurs en aéronautique.

	s	1	3	5	7	9	11	13
2h C				X				
0 TD								
4 TP de 3h					X	X	X	X

14 hf

C : 2h – TD 2h – TP 3h

PROGRAMME
Généralités (1C)

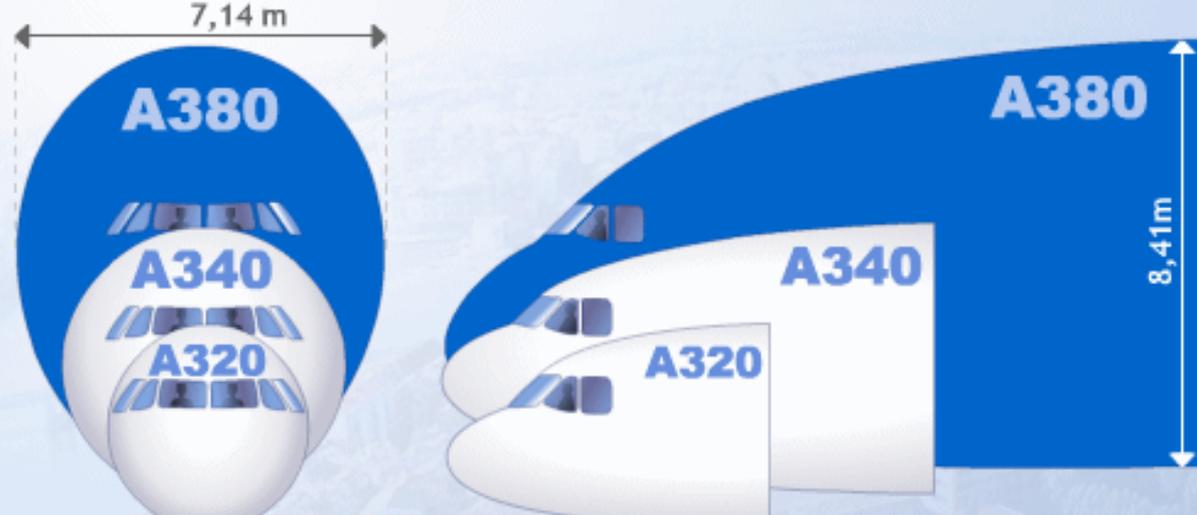
- Les signaux en radionavigation et radiocommunication
- Etude de quelques structures associées aux capteurs sur aéronef

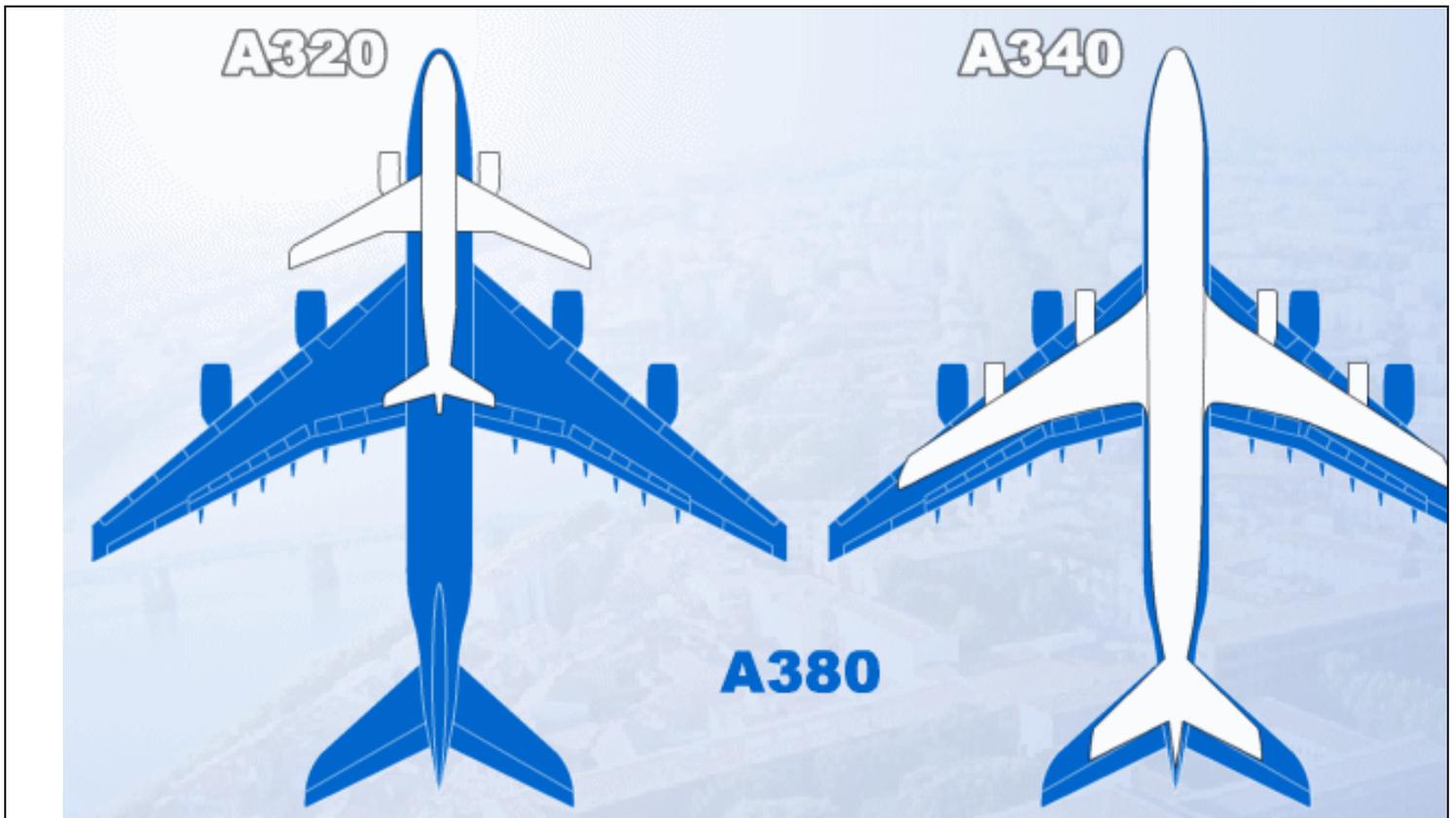
Modalités de contrôle des connaissances

Epreuves de la session 1	Durées	Coefficients
Electronique numérique pour l'Avionique 1		
Devoir surveillé	1h00	0.05
Examen	1h30	0.25
Contrôle continu TP	-	0.15
Electrotechnique – génération électrique Avion 1		
Devoir surveillé	1h00	0.05
Examen	1h30	0.25
Contrôle continu TP	-	0.15
Electronique analogique pour l'Avionique 1		
Contrôle continu TP	-	0.10
Epreuves de la session 2	Durées	Coefficients
Examen Elect num avionique 1	1h30	0.35
Examen Electrotech géné avion 1	1h30	0.35
Report contrôle continu TP Elect num avio 1	-	0,10
Report contrôle continu TP Elect géné avion 1	-	0,10
Report contrôle continu TP Elect ana avio 1	-	0,10

B. L'aéronautique: mise en situation

B.1. Gamme AIRBUS

 <p>A 318</p> <p>A 319</p> <p>A 320</p> <p>A 321</p>	 <p>A 310</p> <p>A 300-600R</p> <p>A 300-600F</p>
 <p>A 330-200</p> <p>A 330-300</p> <p>A 340-300</p> <p>A 340-500</p> <p>A 340-600</p>	
 <p>7,14 m</p> <p>A380</p> <p>A340</p> <p>A320</p> <p>8,41m</p> <p>A380</p> <p>A340</p> <p>A320</p>	



Assemblage A380



A300-600 ST BELUGA

Génération électrique avion (1h)

B.2. L'A300-600

Présentation

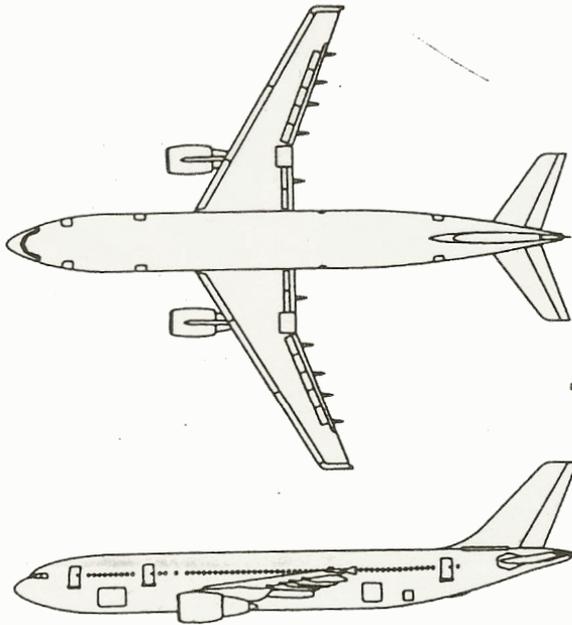
Type de réseau électrique

Génération alternative, APU, CSD

Génération Continue : transfo redresseur & batterie

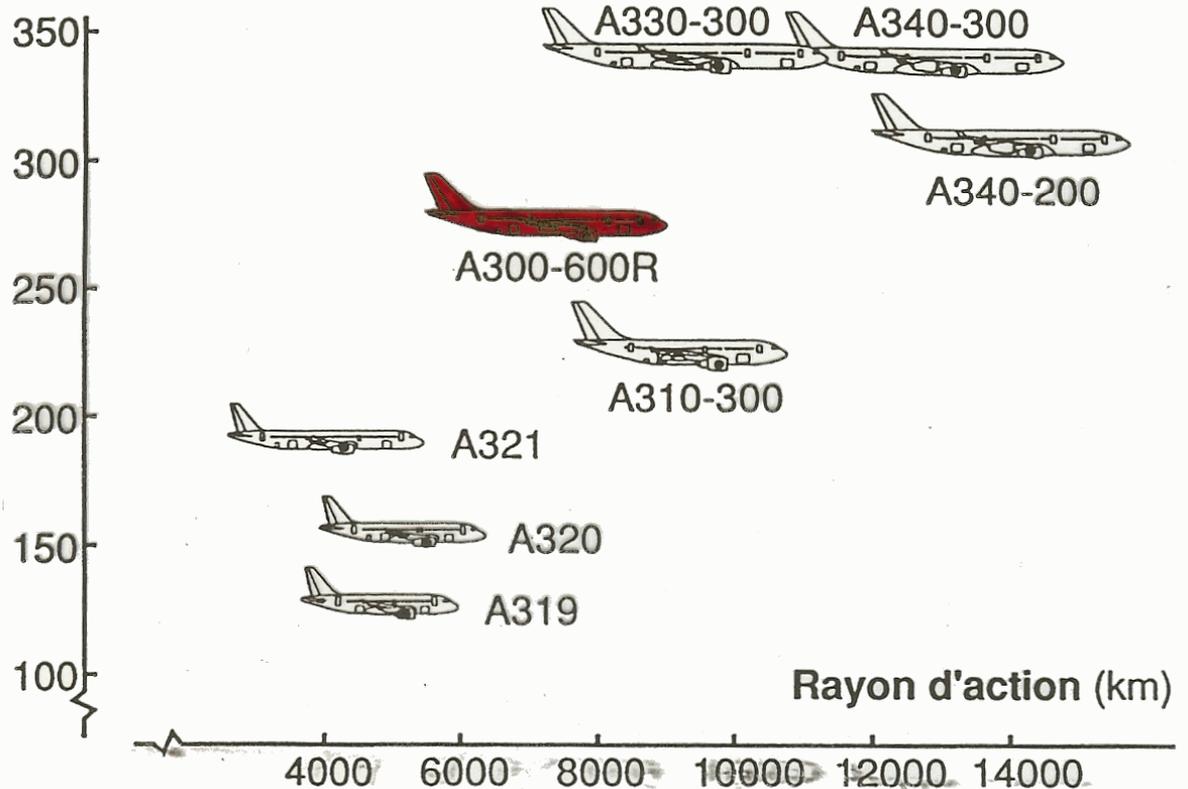
Groupe de parc

AIRBUS A300



Envergure	44,84 m
Longueur	54,08 m
Hauteur	16,53 m
Diamètre du fuselage	5,64 m

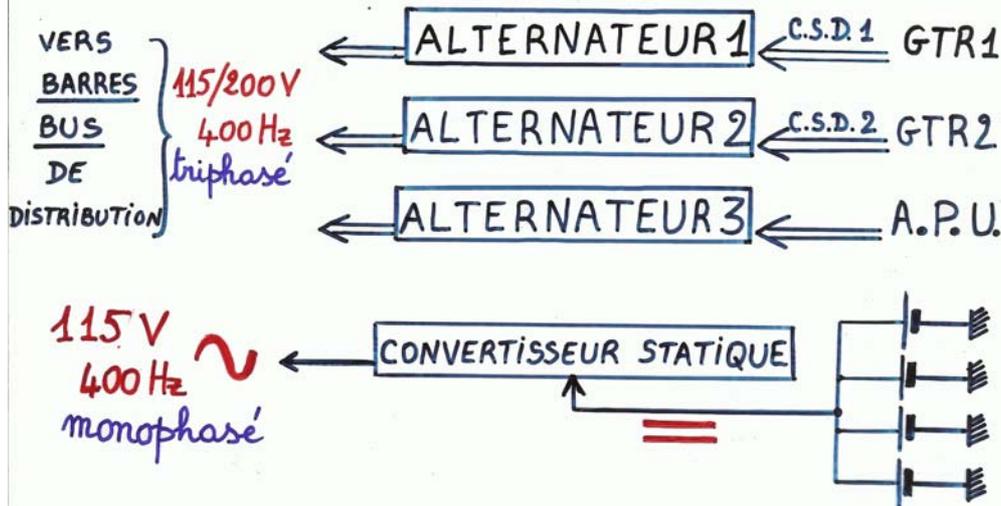
Nombre de sièges



GENERATION ALTERNATIVE A 300

A) GENERALITES ET DESCRIPTION :

1) Source principale d'énergie électrique :



2) Caractéristiques alternateurs :

- Fréquence pour 8000 tr/min : 400 Hz
- Refroidissement : par air
- Puissance : 90 KVA
- Lubrification : par circuit d'huile
- Tension entre phases et neutre : 115 V

3) Distribution alternative 26 V, 400 Hz :

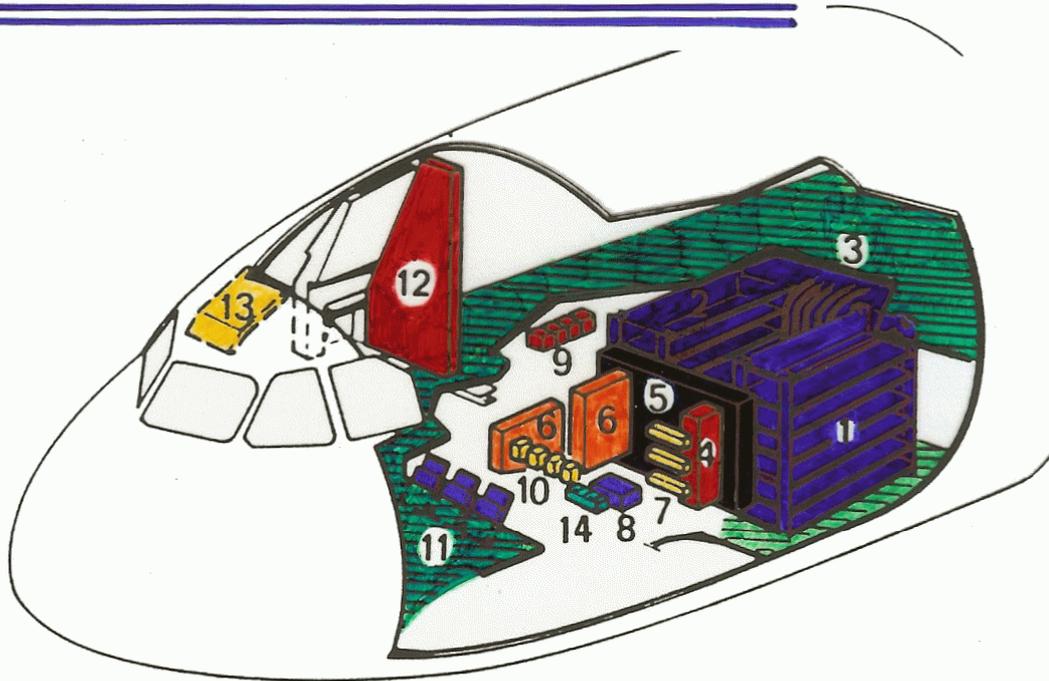
A partir des barres bus alternatives (auto-transformateurs)

4) Réseaux VOL/SOL et SOL

Alimenté en alternatif ou continu :

- * par groupe de parc
- * par réseau de bord (interrupteur maintenance bus) ou APU

POSTE ET SOUTE ELECTRONIQUE A 300-B



- ① } Meubles équipements électriques et électroniques
- ② }
- ③ Zone de distribution électrique générale
- ④ Relais de délestage (offices)
- ⑤ Génération alternative (contacteurs de ligne, de transfert, etc...)
- ⑥ Génération continue (contacteurs batteries, disjoncteurs, fusibles)
- ⑦ Bloc de régulation, de contrôle et de protection courant alternatif (GCU alternateurs 1 et 2 et APU)
- ⑧ Convertisseur statique
- ⑨ Batteries
- ⑩ Transfo-redresseurs (TR 1, TR 2, TR ESS, TR AUX)
- ⑪ Relais divers (dont liaison barre Normale / Essentielles DC TIE)
- ⑫ Panneau principal des disjoncteurs
- ⑬ Panneau supérieur des disjoncteurs
- ⑭ Régulateurs de charge des batteries

B) ALTERNATEUR DE BORD :

1) Description :

- type sans balai
- constitué de 3 alternateurs :

- P.M.G.
- alternateur d'excitation
- alternateur principal

- 3 stators
- 3 rotors montés sur même arbre
donc entraînés à la même vitesse.
(8000 tr/min)

2) Fonctionnement :

(voir schéma)

ALTERNATEUR DE BORD

A 300

P.M.G.
(Permanent magnet generator)
Alternateur à aimants permanents

Alternateur d'excitation

Alternateur de puissance

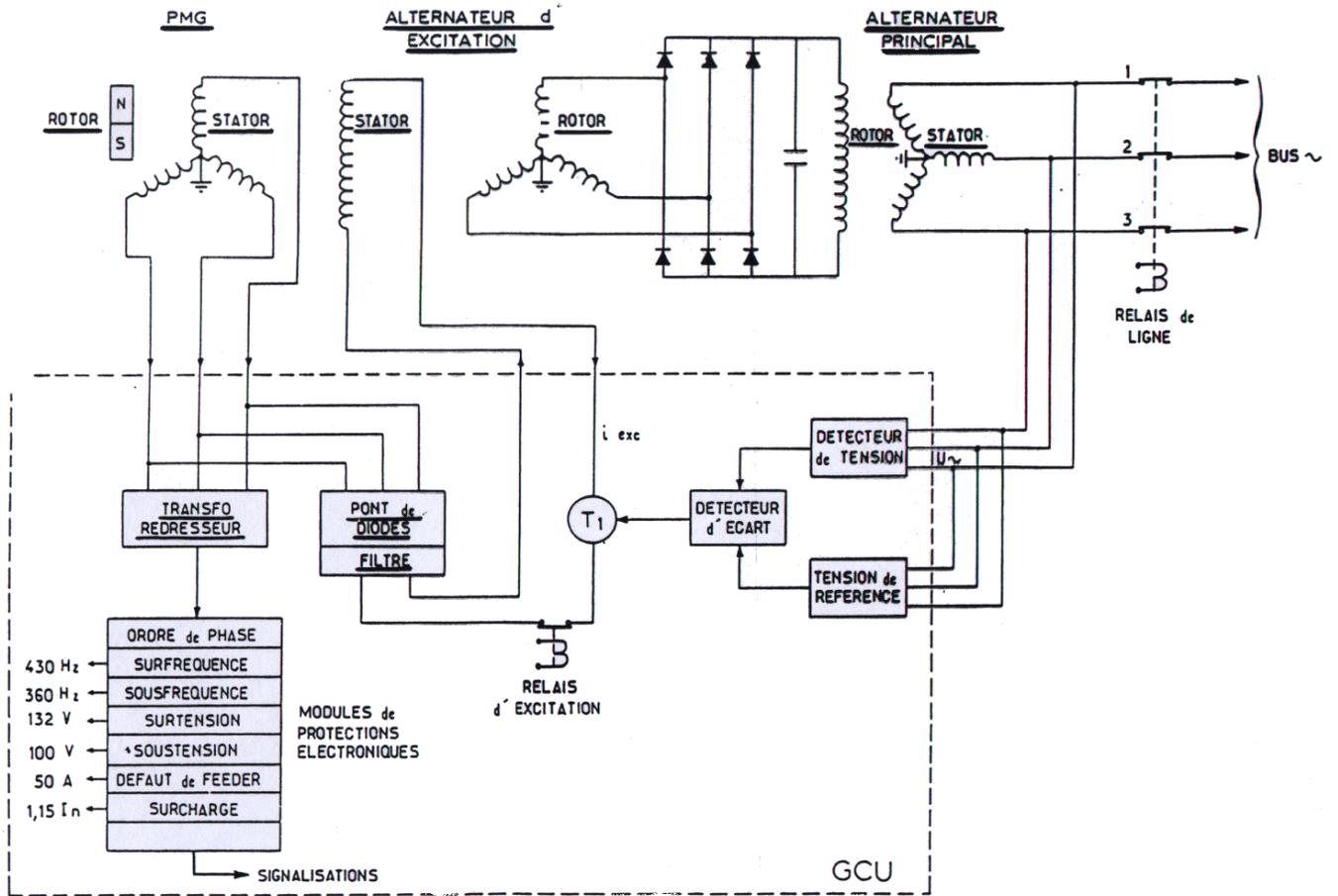
Diodes tournantes

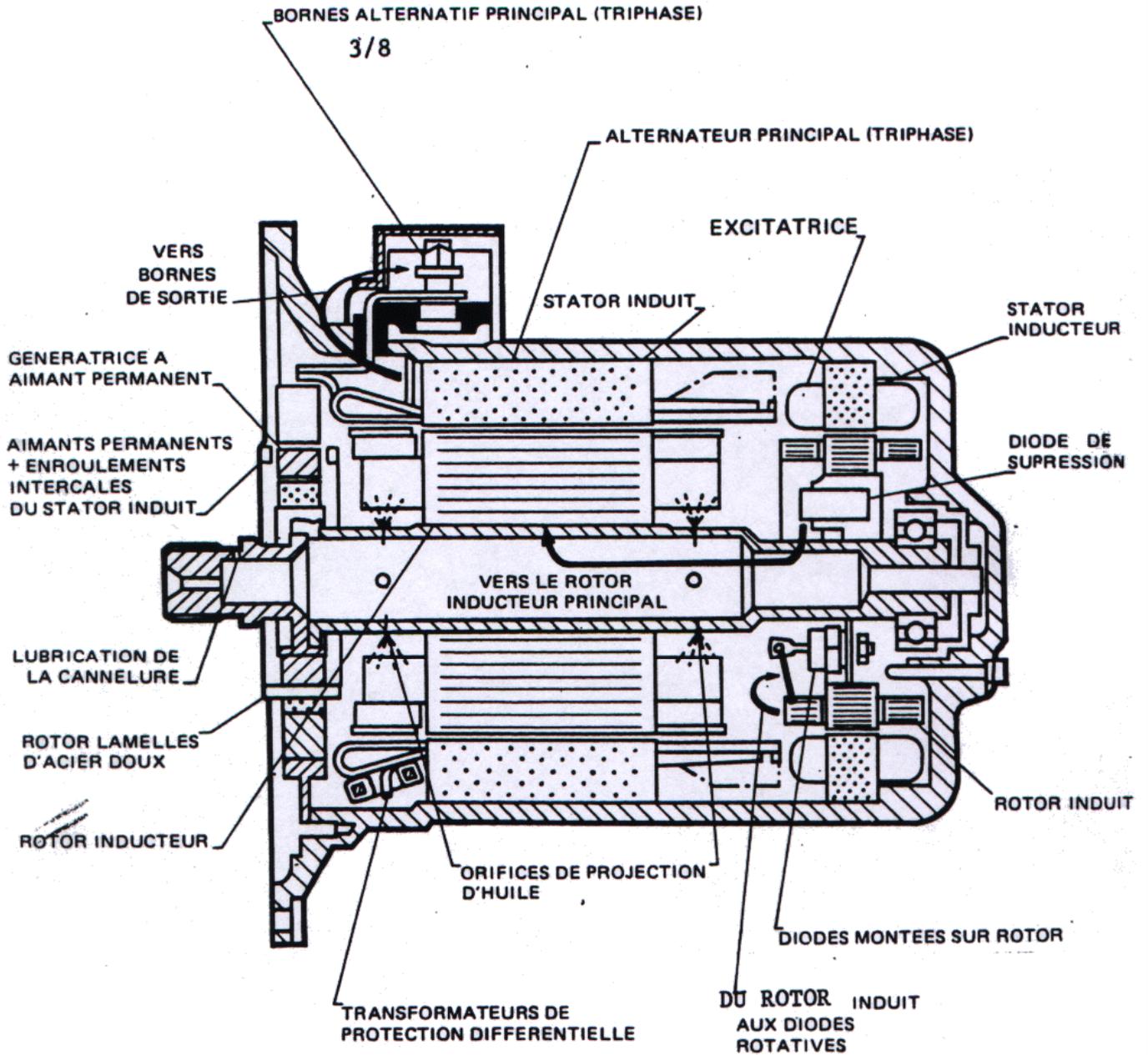
Vers contacteur de ligne
115 V/400 Hz

Excitation
et
régulation

Surveillance
et
protection

BOITIER DE PROTECTION G.C.U.

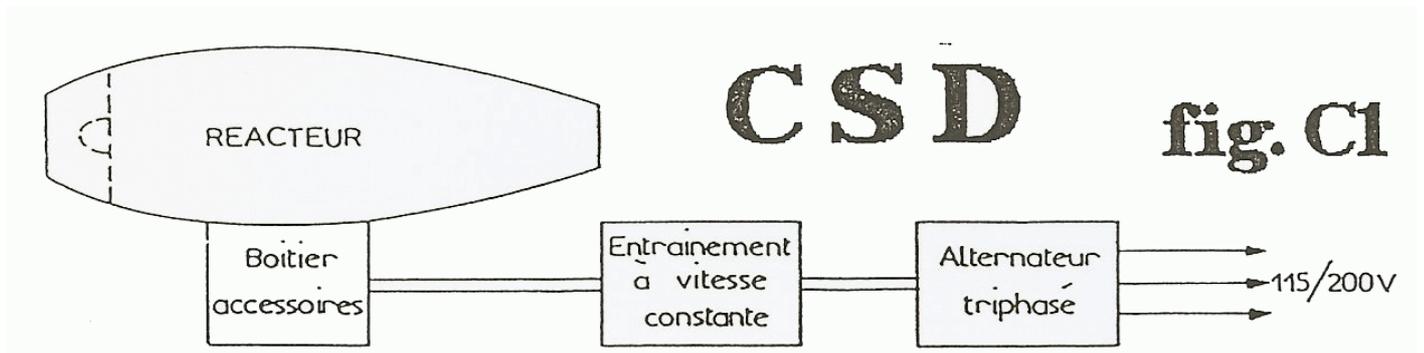




VUE EN COUPE D'UN ALTERNATEUR (A1-A2)

Figure 8

MERCURE AIR-INTER



CSD

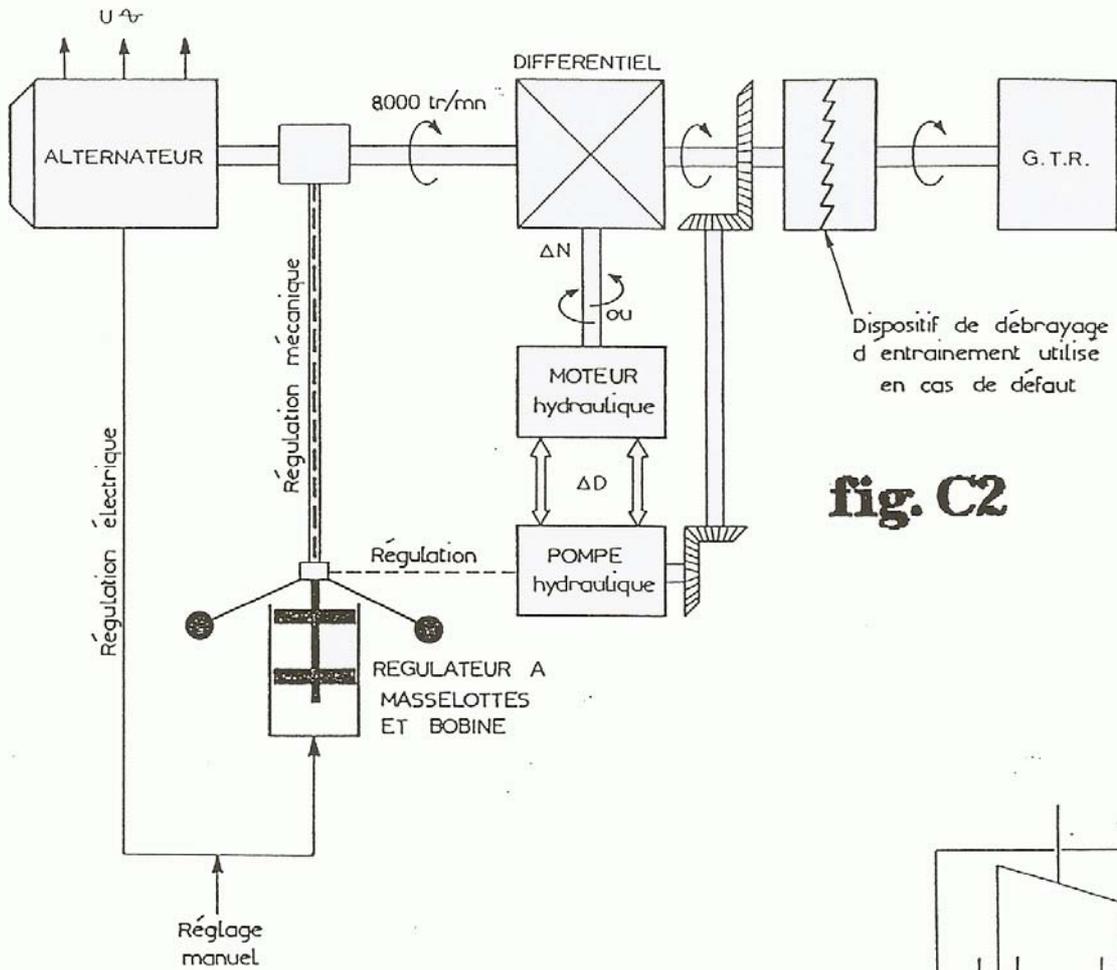


fig. C2

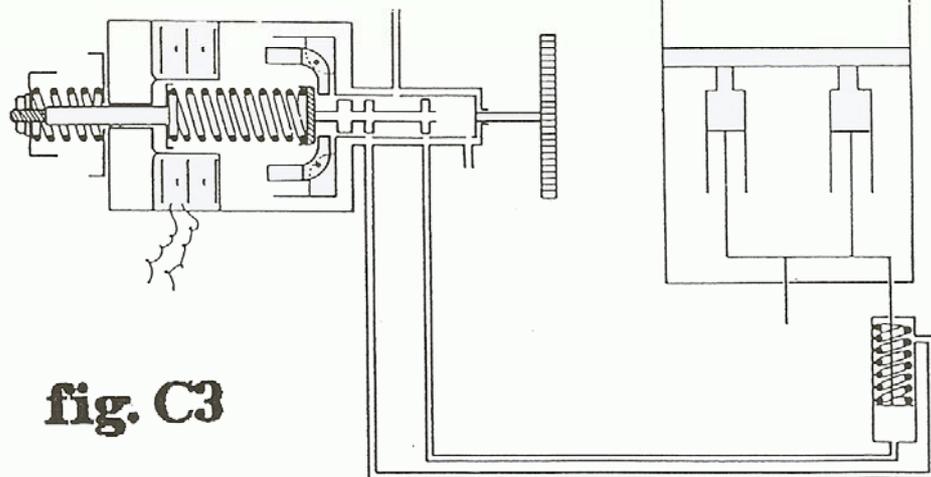
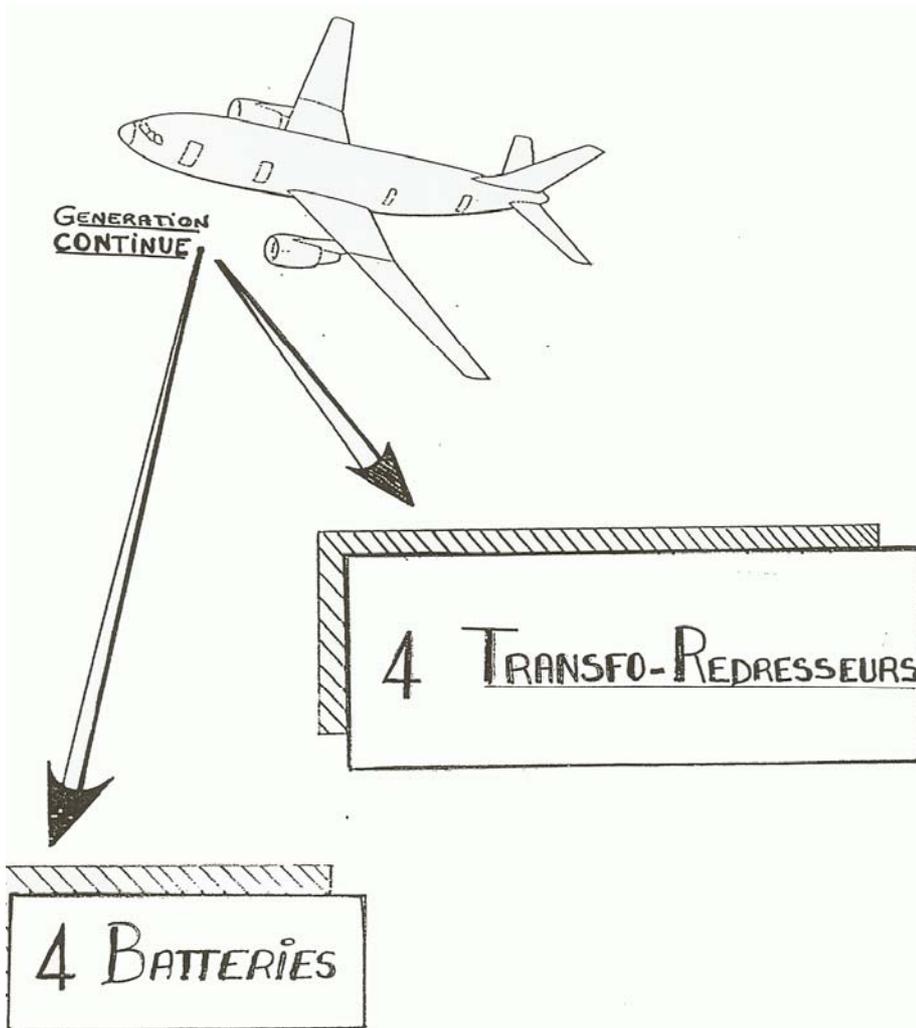


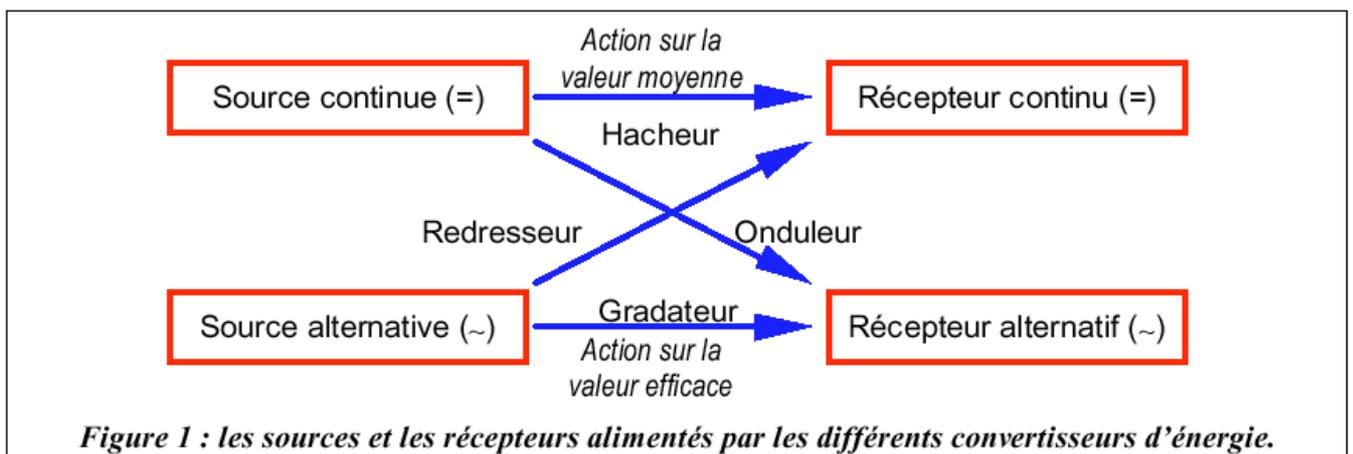
fig. C3



Nécessité de la conversion d'énergie

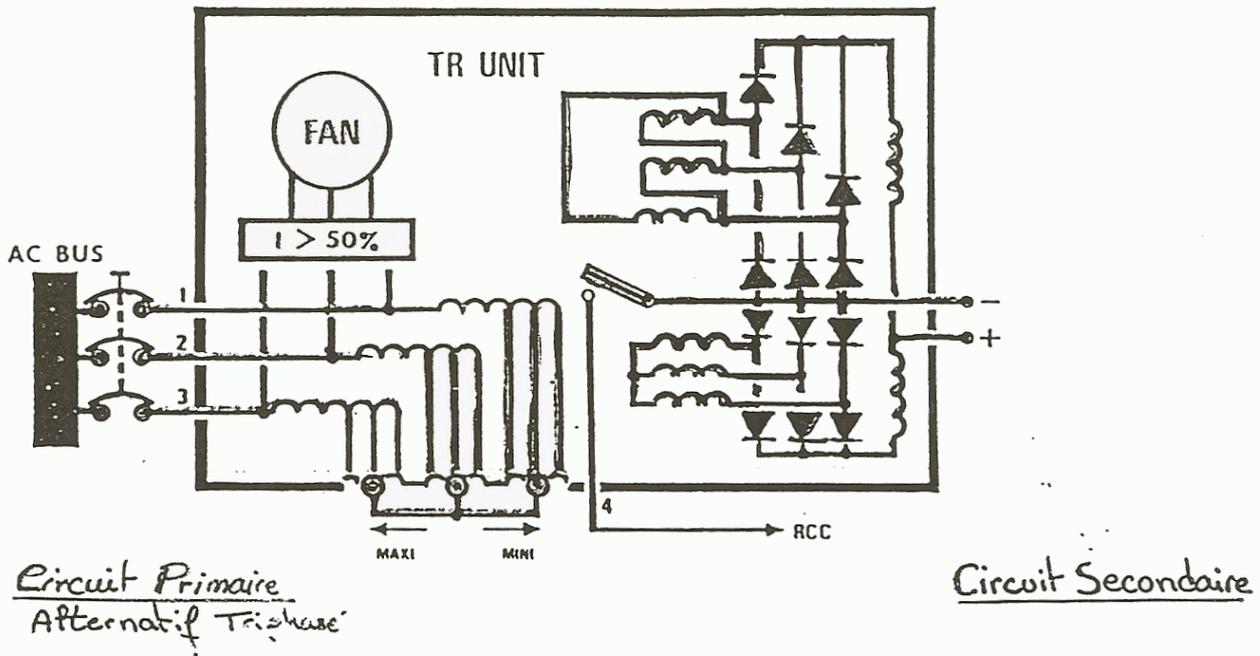
Les différents réseaux électriques industriels alimentent de nombreux actionneurs. Cette énergie apparaît sous deux formes : **alternative** (tensions ou courants sinusoïdaux à *valeur moyenne nulle*) ou **continue**.

Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent à la **Figure 1**.

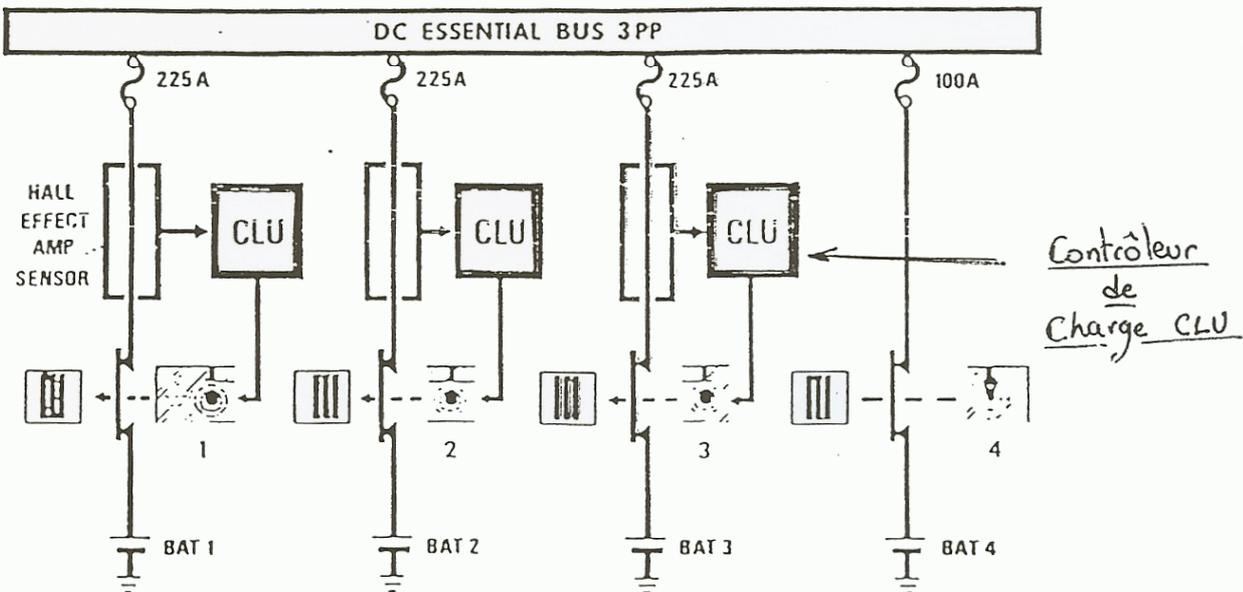


GENERATION ELECTRIQUE..

* Transfo - Redresseur :



* Circuit Batterie :



DC ESS BUS BATTERY SUPPLY -SCHEMATIC

B.3. L'A380 en bref

555 passagers maxi, 150 t carburant, 5600 NM ou 250 tonnes de carburants maxi pour 8000 NM maxi

Nouveau câblage : fibre optique + aluminium

Mesure des pressions amont et aval des électrovannes : fiabilité.

VFG : Variable Frequency Generator : 300 à 750 Hz

IMA : Integrated Modular Avionics

Gyroscopie sans déplacement: fibre optique + laser

Pression Hydraulique 5000 psi = 350 bars (usuellement 300 psi soit 210 bars)

Alternateurs : 4 x 150 kVA/générateur + 2xAPU = 2x120kVA

SWITCH :

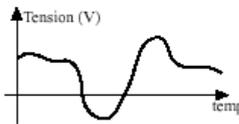
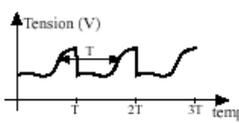
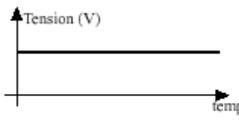
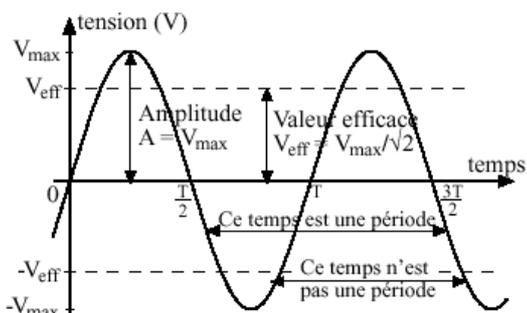
- > 15 A : Relais ou PEPDC (Primary Electrical Power Distributor enter)
- < 15 A : SEPDS : Photo MOSFET, pour circuit non essentiel, reconfigurable



C. Plan : Machines électriques

RAPPEL PEA301 : Systemes Triphasés - Puissance en régime triphasé:

I. Grandeurs caractéristiques associées à un dipôle:

<p>Tension variable</p> <p>Tension variable C'est une tension qui varie dans le temps.</p>  <p>Tension périodique C'est une tension variable qui reprend la même valeur au bout de chaque période de temps T.</p>  <p>Tension constante Elle ne varie pas dans le temps.</p> 	<p>Tension sinusoïdale</p> <p>C'est une tension périodique. Elle est caractérisée par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - son amplitude A en volts (V) ; - sa valeur efficace V_{eff} ou V (V) ; - sa période T en secondes (s) ; - sa fréquence f en Hertz (Hz). <p>La fréquence indique le nombre d'oscillations que fait la tension en une seconde.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">$f = \frac{1}{T}$</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">$V_{eff} = \frac{A}{\sqrt{2}}$</div> </div> <p>Les valeurs efficaces servent à calculer les puissances en électricité.</p>	 <p>Attention à ne pas confondre l'amplitude A avec la tension crête à crête $V_{cc}=2.A$</p>
---	--	--

1.1 Valeur moyenne

1.2 Valeur efficace, **RMS**

1.3 Représentation des grandeurs sinusoïdales FRESNEL - COMPLEXE

II. Notions de puissance associées à un dipôle:

2.1 Puissance instantanée

2.2 Puissance active: **P en W**

2.3 Puissance réactive: **Q en VAR**

2.4 Puissance apparente: **S en VA**

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{énergie réactive}}{\text{énergie active}} = \frac{Q(\text{VAR})}{P(\text{W})}$$

2.5 Facteur de puissance: **$\cos \varphi$**

2.6 Théorème de Boucherot: **$Q = \sum q$, $P = \sum p$ et $S^2 = P^2 + Q^2$**

III. Réseaux en triphasé:

3.1 Représentations d'un système triphasé équilibré direct de tensions.

3.2 Récepteur en étoile

3.3 Récepteur en triangle

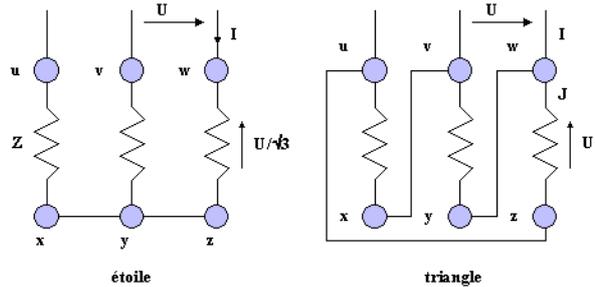
3.4 Puissance active

3.5 Puissance réactive

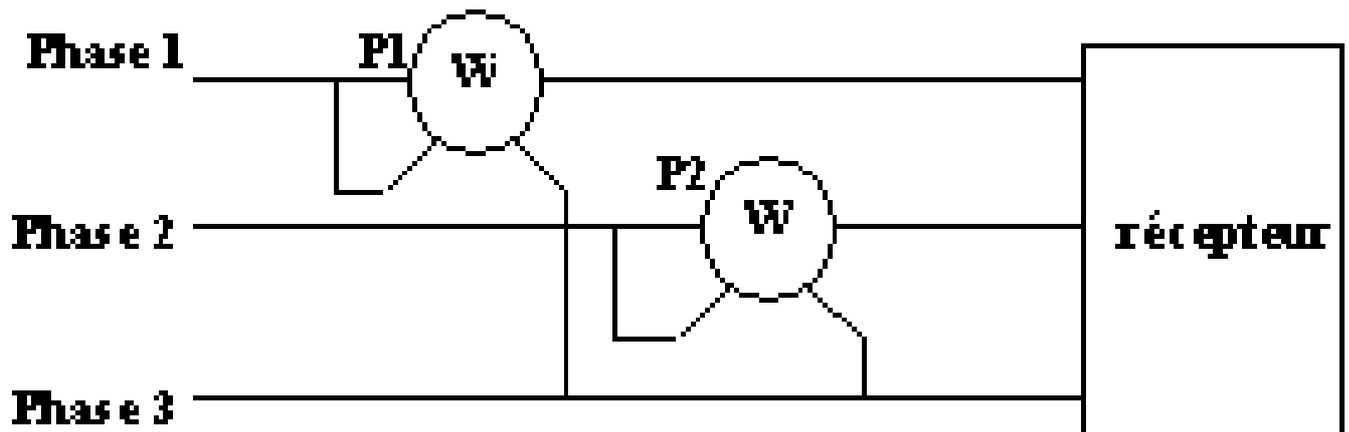
3.6 Puissance apparente

3.7 Facteur de puissance

3.8 Théorème de Boucherot



3.9 Mesures de puissance en triphasé: méthode des deux wattmètres



Transformateur: (1h30 cours + 2h TD + 1 TP)

I. Transformateur monophasé à deux enroulements:

1.1 Définitions

1.2 Constitution

II. Equations du transformateur

2.1 Relation de Boucherot

2.2 Equations de base

2.3 Expression des fems primaire et secondaire

2.4 Relations électriques

2.5 Schéma équivalent simplifié

2.6 Détermination des éléments du circuits équivalents

III. Fonctionnement en charge

3.1 Equations au secondaire du transformateur

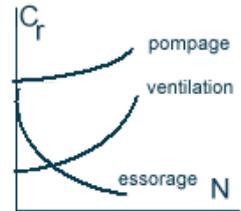
3.2 Equations au primaire du transformateur

3.3 Rendement du transformateur

Machines à courant continu (2h cours + 2h TD + 1 TP)

I. Description générale

- 1.1 Le stator - inducteur
- 1.2 Le rotor - induit
- 1.3 Le collecteur et les balais



II. Principe de fonctionnement

- 2.1 Champs magnétique dans l'entrefer
- 2.2 Force électromotrice dans une spire rotor
- 2.3 Force électromotrice résultante aux bornes des balais
- 2.4 Bilan énergétique - Couple électromagnétique

III. Modes d'excitation et démarrage

- 3.1 Excitation indépendante
- 3.2 Excitation shunt
- 3.3 Excitation série
- 3.4 Démarrage des moteurs à courant continu

Champs tournants (0h30 cours)

I. Champ magnétique créé par une armature tournante alimentée par un courant constant

II. Champ magnétique créé par une armature fixe alimentée par des grandeurs sinusoïdales

- 1.1 Champ magnétique d'une armature monophasée : Théorème de Leblanc
- 1.2 Champ magnétique d'une armature triphasée : Théorème de Ferraris

III. Flux induit dans une phase par induction tournante

- 3.1 Flux induit dans une phase d'une machine triphasé
- 3.2 fem en convention générateur
- 3.3 fem en convention moteur

Machine synchrone (1h 30 cours + 2h TD + 1 TP)

I. Constitution

II. Principe de fonctionnement

- 2.1 fonctionnement en génératrice isolée
- 2.2 Modèle de Behn Eschenburg
- 2.3 Fonctionnement sur le réseau EDF

Machine Asynchrone (1h 30 cours + 2h TD + 1 TP)

I. Généralité sur la machine asynchrone

- 1.1 Stator
- 1.2 Rotor
- 1.3 Fréquences - vitesses

II Schéma équivalent électrique par phase en régime établi

- 2.1 Définitions et hypothèses simplificatrices
- 2.2 Modèle équivalent simplifié

III Bilan des puissances - Expression du couple électromagnétique

- 3.1 Bilan des puissances à partir du schéma équivalent
- 3.2 Caractéristiques mécaniques
- 3.3 Démarrage de la machine à rotor bobiné.

D. Transformateur



Transformateur statique monophasé

I. Transformateur monophasé à deux enroulements :

1.1 Définitions :

Un transformateur est une machine statique à induction électromagnétique destinée à transformer une tension alternative appelée tension primaire en une nouvelle tension alternative appelée tension secondaire de même fréquence mais d'amplitude généralement différente.

Pour ce faire, le transformateur monophasé est constitué d'un circuit magnétique fermé portant deux enroulements appelés "primaire" et "secondaire". Le primaire est alimenté par une source de tension, et le secondaire débite sur un circuit de charge, sous une tension généralement différente de celle du primaire.

Un transformateur est un quadripôle réversible permettant de transmettre des puissances active et réactive avec un très bon rendement.

1.2 Constitution :

Le transformateur monophasé standard est formé de deux bobines électriques fortement couplées. Le couplage magnétique est réalisé à l'aide de matériaux ferromagnétiques. Il s'agit généralement d'acier auquel on a ajouté du silicium qui a pour propriété de réduire les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Cet acier se présente sous forme de tôles dites à grains orientés ce qui se traduit par une anisotropie magnétique (ceci étant obtenu par un laminage à froid). Leur épaisseur tourne autour de 0,25 à 0,35 mm et leur qualité va de 0,55 à 1,6 W/kg. Les tôles sont serrées au mieux afin de limiter les entrefers, leur présence se traduisant par une élévation du courant magnétisant (appelé aussi courant à vide). De plus, afin de ne pas reconstituer un matériau massif, les tôles sont isolées électriquement les unes des autres par un traitement de surface adéquat. Ces tôles ont forme de E et I alternées comme le montre la figure suivante. Les enroulements primaire et secondaire sont bobinés dans le même sens autour du noyau central et remplissent les deux fenêtres. Il se compose de n_1 spires pour le primaire et de n_2 spires pour le secondaire.

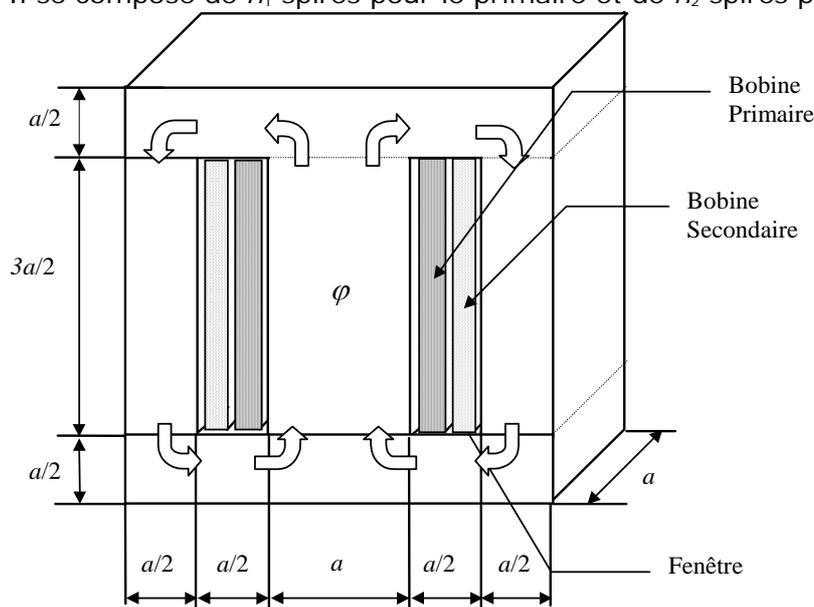


Figure 1

Du point de vue magnétique le transformateur précédent est équivalent au schéma suivant:

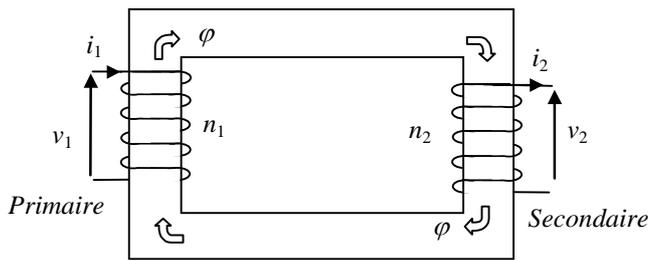


Figure 2

Les grandeurs indicées "1" sont relatives au **primaire** qui est relié à une source d'énergie (réseau E.D.F. ou à un alternateur par exemple). Les grandeurs indicées "2" sont relatives au **secondaire**, enroulement connecté au récepteur (charge ou barre de distribution).

Un transformateur permet de convertir des niveaux des courants et des tensions. Dans le cas du transformateur parfait, il ne consomme pas d'énergie ou de puissance. Dans ces conditions la puissance instantanée est conservée: $v_1 i_1 = v_2 i_2$. Ainsi en fonction du rapport entre les spires du primaire et du secondaire il est possible d'avoir une tension secondaire différente du primaire :

- Lorsque $V_2 < V_1$, on parle de transformateur abaisseur de tension.
- Lorsque $V_2 > V_1$, on parle de transformateur élévateur de tension.
- Lorsque $V_2 = V_1$, on parle de transformateur d'isolation (isolation galvanique).

Quel que soit le type de transformateur considéré, le principe de fonctionnement est toujours le même: une tension variable v_1 est appliquée au primaire. La circulation d'un courant magnétisant fait apparaître un flux variable dans la masse magnétique. Les n_2 spires du secondaire qui enlacent ce flux variable sont le siège de f.é.m. induites. Si ce secondaire est fermé sur une charge, alors un courant secondaire circule, ce qui a pour effet "d'appeler" un courant au primaire. Ainsi on pourra rencontrer une grande variété de transformateur dont les bobinages pourront être monophasés, triphasés, multi-sorties etc. Citons quelques exemples d'utilisations:

- Transformateurs élévateurs des centrales électriques: primaire: 20kV, secondaire: 250 kV, 400kV-50 Hz.
- Transformateurs abaisseurs en distribution: primaire: 15 kV, secondaire: 230/400 V fréquence 50 Hz
- Transformateurs avion: primaire: 200 V, secondaire 26 V fréquence 400 Hz.
- Transformateurs ferrite pour les alimentations à découpage des téléviseurs: le primaire est alimenté par une tension en créneau 0-300 V (continue hachée), obtenue par redressement et filtrage de la tension du réseau 230V/50Hz. Cette tension continue est ensuite découpée (ou hachée). Les secondaires sont ici multiples et permettent d'obtenir des tensions alternatives qui sont ensuite filtrées pour obtenir des tensions continues de 5 V (ou 3,3V), 12 V, 200 V.

II. Equations du transformateur :

2.1 Relation de Boucherot

Lorsqu'on alimente une bobine par une tension alternative sinusoïdale $v(t)$, la bobine génère un champ magnétique alternatif $b(t)$. Il se produit ainsi à travers les spires de la bobine un flux alternatif $\varphi(t)$. La relation de Boucherot traduit la dépendance existant entre la valeur efficace V de la tension aux bornes d'une bobine et la valeur maximale B_{max} du champ magnétique $b(t)$.

En effet considérons le circuit suivant :

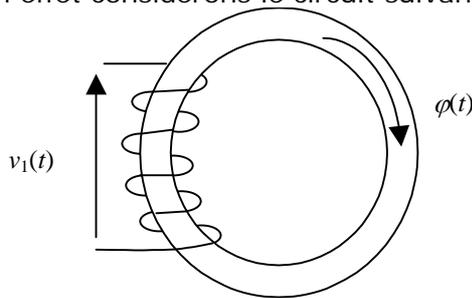


Figure 3

Le tore est fait dans une substance magnétique (fer-silicium par ex.) permettant de canaliser le flux magnétique $\varphi(t)$.

$$v_1 = R_1 i_1 + n_1 \frac{d\varphi}{dt} ; \text{ sachant que } R_1 \cong 0 \text{ on a } v_1 = n_1 \frac{d\varphi}{dt} .$$

D'après la relation précédente si l'on impose une tension $v_1(t)$ sinusoïdale alors on impose également au flux d'être sinusoïdal est déphasé de 90° . On parle alors de fonctionnement à flux forcé. On obtient pour le flux $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \frac{1}{n_1} \int v_1 dt = \frac{1}{n_1} \int V \sqrt{2} \cos \omega t dt = \frac{V \sqrt{2}}{n_1 \omega} \sin \omega t = \varphi_{\max} \sin \omega t$$

En exprimant le flux maximal φ_{\max} en fonction de V , n_1 , S et ω on obtient alors la relation de Boucherot :

$$V = \frac{n_1 \omega}{\sqrt{2}} \varphi_{\max} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B_{\max} n_1 S f = 4,44 B_{\max} n_1 S f$$

Le champ magnétique maximal est en général compris entre 0,8 et 1,7 Tesla dans les matériaux magnétiques classiques. Le rapport entre le nombre de spires au primaire et au secondaire est fixé par le rapport entre la tension primaire et la tension secondaire. Pour minimiser la dimension et le poids d'un transformateur on a tendance à prendre un nombre de spires faible. Ainsi l'encombrement de la fenêtre est réduit. En contre partie plus n_1 sera petit et plus le produit de la section S par la fréquence f sera important. A fréquence fixe, il faudra donc une section plus grande. On obtient donc deux contraintes antinomiques, et il existe une solution optimale à trouver.

On peut voir également ici l'intérêt que l'on peut avoir à augmenter la fréquence f . En à puissance donnée, la taille d'un transformateur diminue si sa fréquence de fonctionnement augmente. L'utilisation de la fréquence 400 Hz à bord des avions a pour conséquence la réduction du poids des alternateurs et des transformateurs. Mais cette augmentation de la fréquence est limitée par le fait que les pertes dans les circuits magnétiques augmentent en fonction de la fréquence.

2.2 Equation de base

L'enroulement primaire de résistance r_1 est composé de n_1 spires qui embrasse le flux φ_{1T} . Ce flux contient le flux commun φ et le flux de fuite de la bobine primaire φ_{f1} . De même l'enroulement secondaire de résistance r_2 est composé de n_2 spires qui embrasse le flux φ_{2T} . Ce flux contient le flux commun φ et le flux de fuites de la bobine secondaire φ_{f2} .

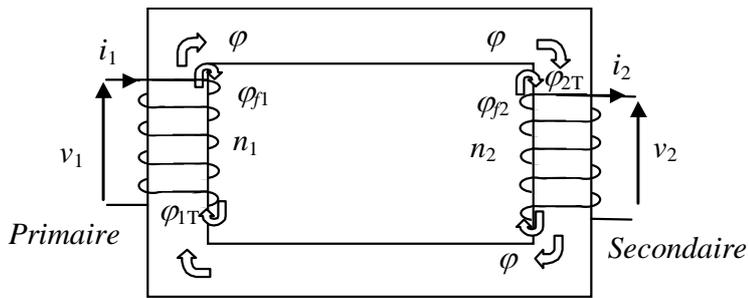


Figure 4

Les bobines sont le siège de forces électromotrices e_1 et e_2 qui s'écrivent:

$$e_1 = n_1 \frac{d\varphi_{1T}}{dt} \text{ (primaire en convention récepteur); } e_2 = -n_2 \frac{d\varphi_{2T}}{dt} \text{ (secondaire en convention générateur).}$$

La loi des mailles appliquée au primaire et au secondaire donne les deux équations suivantes:

$$v_1(t) = r_1 i_1(t) + e_1(t) = r_1 i_1(t) + n_1 \frac{d\varphi_{1T}}{dt}$$

$$v_2(t) = -r_2 i_2(t) + e_2(t) = -r_2 i_2(t) - n_2 \frac{d\varphi_{2T}}{dt}$$

Magnétiquement, le circuit est équivalent au schéma suivant:

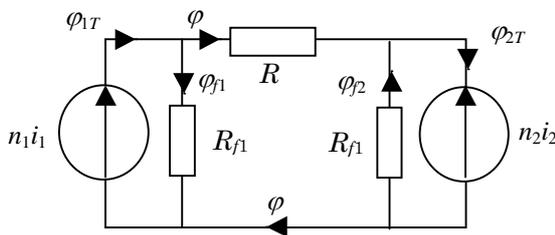


Figure 5

R_f et R désignent les réluctances magnétiques, et représentent la résistance au passage du flux magnétique. La réluctance R_f correspond à un trajet du flux dans l'air. La réluctance R correspond au trajet du flux dans le fer. R_f est beaucoup plus grande que R , car le fer a une réluctance environ 1000 fois plus faible que l'air ambiant pour un champ magnétique inférieur à 0,6 T. En appliquant le théorème d'Ampère, ce qui revient à appliquer la loi des mailles au circuit équivalent précédant, on obtient, si on néglige les réluctances R_f la relation suivante:

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = R \varphi = n_1 i_{10} \quad (1)$$

Le flux étant imposé par la tension d'alimentation, d'après le théorème de Boucherot, le courant à vide i_{10} sera d'autant plus faible que la réluctance R sera faible.

2.3 Expressions des f.e.m primaire et secondaire

Le flux dans la bobine primaire se décompose de la façon suivante: $\varphi_{1T} = \varphi + \varphi_{f1}$. Le flux de fuites embrassé par les n_1 spires est proportionnel au courant i_1 : $n_1 \varphi_{f1} = l_1 i_1$, avec l_1 l'inductance de fuites au primaire. La f.e.m s'écrit alors:

$$e_1 = n_1 \frac{d\varphi_{1T}}{dt} = n_1 \frac{d(\varphi + \varphi_{f1})}{dt} = n_1 \frac{d\varphi}{dt} + n_1 \frac{d\varphi_{f1}}{dt} = n_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} = e_1$$

De même pour la bobine secondaire le flux se décompose de la façon suivante: $\varphi_{2T} = -\varphi + \varphi_{f2}$. Le flux de fuites embrassé par les n_2 spires est proportionnel au courant i_2 : $n_2\varphi_{f2} = l_2i_2$ avec l_2 l'inductance de fuites au secondaire. La f.é.m s'écrit alors:

$$e_2 = -n_2 \frac{d\varphi_{2T}}{dt} = -n_2 \frac{d(-\varphi + \varphi_{f2})}{dt} = n_2 \frac{d\varphi}{dt} - n_2 \frac{d\varphi_{f2}}{dt} = n_2 \frac{d\varphi}{dt} - l_2 \frac{di_2}{dt} = e_2$$

2.4 Relations électriques et schéma équivalent

Equation au primaire: $v_1(t) = r_1 i_1(t) + l_1 \frac{di_1(t)}{dt} + n_1 \frac{d\varphi(t)}{dt}$ (2)

Equation au secondaire: $v_2(t) = -r_2 i_2(t) - l_1 \frac{di_1(t)}{dt} + n_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} = -r_2 i_2(t) - l_1 \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{n_2}{n_1} n_1 \frac{d\varphi(t)}{dt}$ (3)

Un transformateur parfait est un transformateur de tension sans pertes. Il se schématise de la manière suivante:

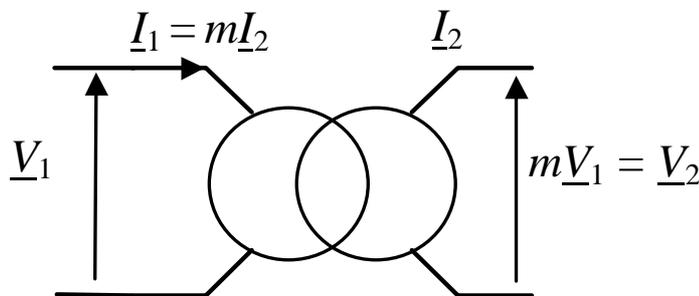


Figure 5

La relation (1) peut se représenter comme un nœud de courant avec $m = \frac{n_2}{n_1}$:

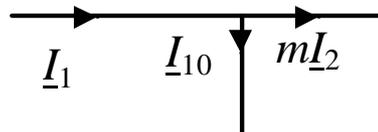


Figure 6

A partir des deux éléments précédents, les équations (2) et (3) peuvent être représentées par le schéma équivalent suivant:

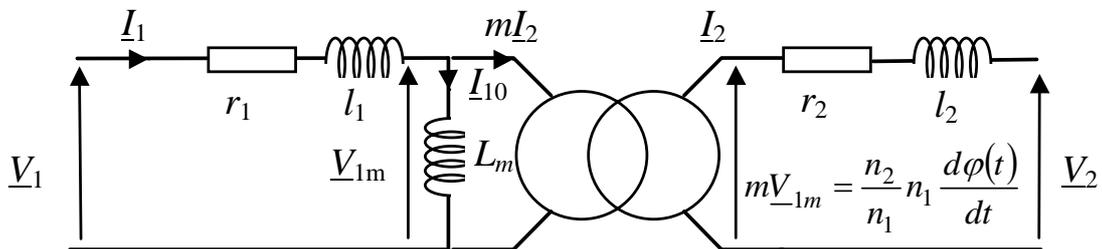


Figure 7

L_m est l'inductance magnétisante du transformateur, elle dépend de la réluctance R et du nombre de

spires primaire n_1 : $n_1 \frac{d\varphi}{dt} = L_m \frac{di_{10}}{dt}$ et $n_1 i_{10} = R\varphi$ d'où $L_m = \frac{n_1^2}{R}$

Remarques:

On vérifie aisément qu'en faisant l'hypothèse que les tensions aux bornes de r_1 et l_1 sont négligeables devant la tension d'alimentation $v_1(t)$, le transformateur est bien une machine à flux forcée, car dans ce cas:

$$v_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \phi(t) = \frac{1}{n_1} \int v(t) dt = \frac{V\sqrt{2}}{n_1\omega} \sin \omega t \quad \text{si} \quad v(t) = V\sqrt{2} \cos \omega t$$

Le rapport de transformation m se définit comme le rapport du nombre de spires secondaire n_2

sur le nombre de spires primaire n_1 :

$$m = \frac{n_2}{n_1}$$

Sous l'hypothèse que les tensions aux bornes de r_1 et l_1 sont négligeables devant la tension

d'alimentation $v_1(t)$, on a: $\frac{V_{20}}{V_1} = m = \frac{n_2}{n_1}$ avec V_{20} et V_1 les valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire à vide.

L'hypothèse " les tensions aux bornes de r_1 et l_1 sont négligeables " est d'autant plus justifiée que le courant primaire est faible. On pourra donc effectuer une mesure approchée de m , lorsque le secondaire n'est pas chargé. Dans ce cas on parle de mesure à vide, le courant primaire est alors faible par rapport à sa valeur nominale (environ 10% du courant nominale). Le rapport de transformation m est approché en effectuant le rapport des valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire à vide.

Un transformateur standard est alimenté par une tension sinusoïdale, le flux est donc sinusoïdal. Ce flux alternatif génère des pertes dans les tôles du circuit magnétique appelées pertes fer, et donc un échauffement.

™ Pertes par hysteresis

™ Pertes par courant de Foucault

On modélise cet échauffement par une résistance R_f placée en parallèle avec l'inductance de magnétisation L_m

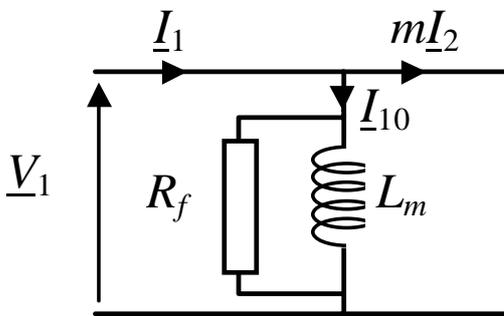


Figure 8

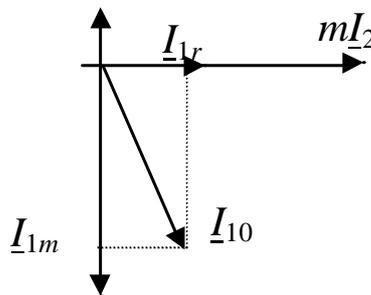


Figure 9

$$I_{1r} = \frac{V_1}{R_f}$$

$$I_{1m} = \frac{V_1}{jL_m\omega}$$

$$I_{10} = I_{1m} + I_{1r}$$

2.5 Schéma équivalent simplifié

Si l'on néglige les chutes de tensions aux bornes de r_1 et l_1 devant la tension d'alimentation $v_1(t)$, le schéma équivalent peut-être simplifié de la façon suivante:

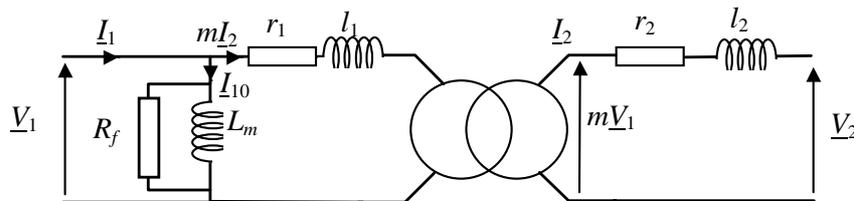


Figure 10

On peut encore transformer ce schéma en ramenant soit la résistance r_1 et l'inductance l_1 au secondaire, soit la résistance r_2 et l'inductance l_2 au primaire. Les éléments équivalents doivent alors consommer les mêmes puissances.

Le schéma équivalent simplifié ramené au primaire est alors le suivant

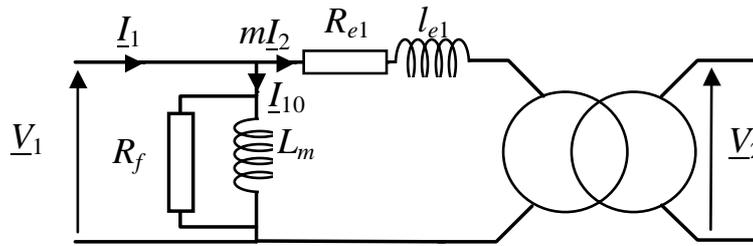


Figure 11

$$\text{Avec } R_{e1}(mI_2)^2 = r_1(mI_2)^2 + r_2(I_2)^2 = \left(r_1 + \frac{r_2}{m^2}\right)(mI_2)^2 \Rightarrow R_{e1} = r_1 + \frac{r_2}{m^2}$$

$$\text{Et } l_{e1}\omega(mI_2)^2 = l_1\omega(mI_2)^2 + l_2\omega(I_2)^2 = \left(l_1 + \frac{l_2}{m^2}\right)\omega(mI_2)^2 \Rightarrow l_{e1} = l_1 + \frac{l_2}{m^2}$$

De même on obtient le schéma équivalent simplifié ramené au secondaire suivant:

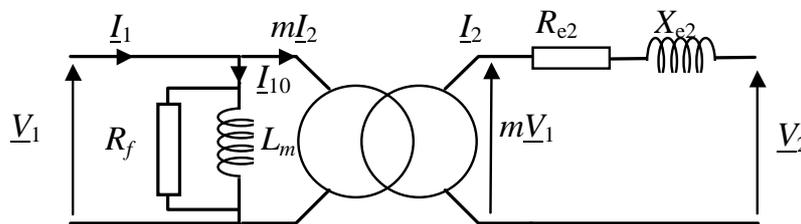


Figure 12

$$\text{Avec } R_{e2}I_2^2 = r_1(mI_2)^2 + r_2(I_2)^2 = (r_1m^2 + r_2)I_2^2 \Rightarrow R_{e2} = r_1m^2 + r_2$$

$$\text{Et } l_{e2}\omega I_2^2 = l_1\omega(mI_2)^2 + l_2\omega(I_2)^2 = (l_1m^2 + l_2)\omega I_2^2 \Rightarrow l_{e2} = l_1m^2 + l_2$$

2.6 Détermination des éléments du schéma équivalent simplifié (voir TD +TP)

↳ Essai à vide:

Le transformateur absorbe à vide une puissance active correspondant essentiellement aux pertes fer. La mesure de la puissance à vide et de la valeur efficace de la tension d'alimentation V_1 nous permettra d'en déduire R_f .

Le transformateur absorbe à vide une puissance réactive qui correspond essentiellement à la magnétisation du circuit magnétique. La détermination de la puissance réactive à vide à partir de la mesure de la puissance active, de la valeur efficace de l'intensité à vide I_{10} , et de la valeur efficace de la tension d'alimentation V_1 , nous permettra de calculer la valeur de L_m .

↳ Essai en court circuit **sous tension réduite (Attention à bien respecter cette condition en TP)**:

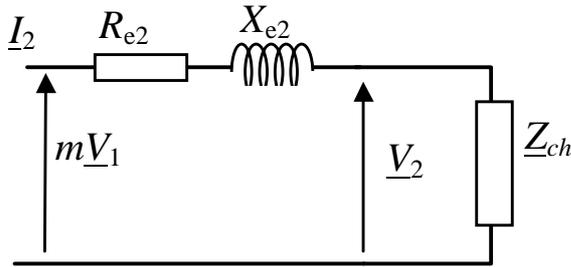
Le transformateur absorbe en court-circuit une puissance active correspondant essentiellement aux pertes joules dans les enroulements. La mesure de la puissance en court-circuit et de la valeur efficace de l'intensité en court-circuit au primaire I_{1cc} ou au secondaire I_{2cc} nous permettra d'en déduire R_{e1} ou R_{e2} .

Le transformateur absorbe en court-circuit une puissance réactive qui correspond essentiellement aux flux de fuites. La détermination de la puissance réactive en court-circuit à partir de la mesure de la puissance active, de la valeur efficace de l'intensité en court-circuit I_{1cc} (resp. I_{2cc}), et de la valeur efficace de la tension d'alimentation V_1 , nous permettra de calculer la valeur de l_{e1} (resp. l_{e2}).

III Fonctionnement en charge

3.1 Equations au secondaire du transformateur

On se place dans le cadre du modèle simplifié proposé au paragraphe 2.5, et on considère qu'une charge d'impédance \underline{Z}_{ch} est placée aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur.



$$\underline{V}_2 = \underline{Z}_{ch} \underline{I}_2$$

$$\underline{V}_{20} = m\underline{V}_1 = R_{e2} \underline{I}_2 + jX_{e2} \underline{I}_2 + \underline{V}_2$$

Figure 13

En prenant la tension \underline{V}_2 comme référence de phase (\underline{V}_2 sur l'axe des réels), les deux équations précédentes peuvent se représenter dans le plan complexe ainsi:

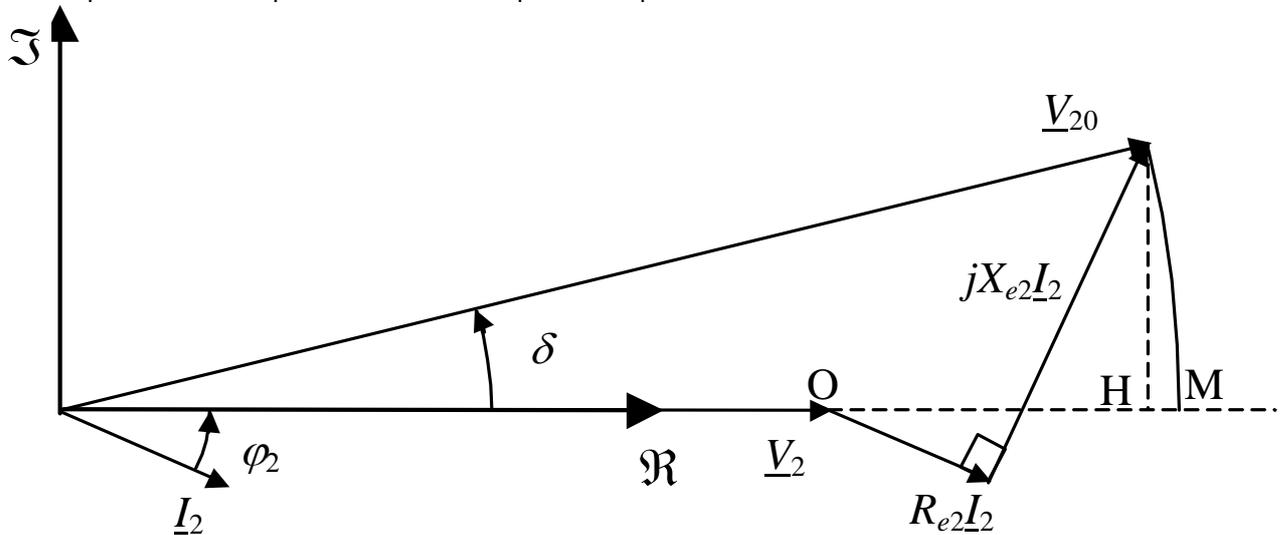


Figure 14

La chute de tension au secondaire se définit de la manière suivante:

$$\Delta V = |\underline{V}_{20}| - |\underline{V}_2| = OM \cong OH \quad \text{car } \delta \approx \text{quelques degrés}$$

$$\Delta V \cong OH = R_{e2} I_2 \cos \varphi_2 + X_{e2} I_2 \sin \varphi_2$$

3.2 Equations au primaire du transformateur

Les équations du secondaire vont être ramenées au primaire. Pour ce faire, on utilise le schéma suivant dans lequel la tension \underline{V}_{20} est présente. En choisissant \underline{V}_1 comme tension de référence, ceci revient à prendre également \underline{V}_{20} comme tension de référence. Ceci revient à faire pivoter d'un angle δ l'ensemble des tensions du diagramme précédent.

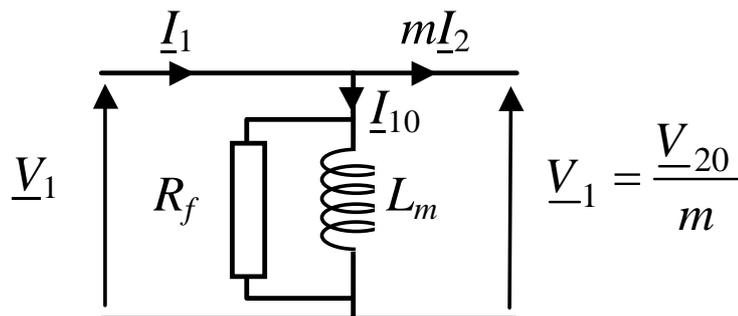


Figure 15

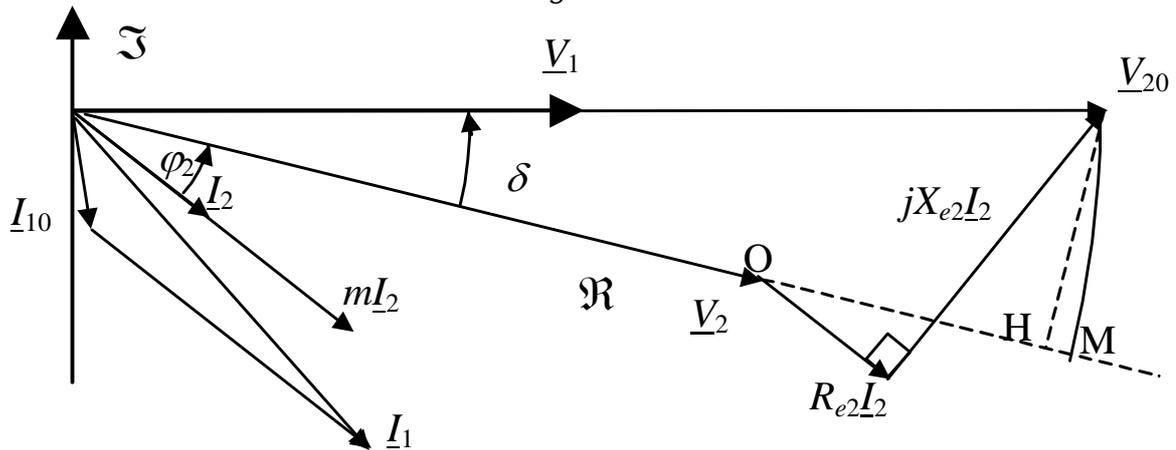


Figure 16

3.3 Rendement du transformateur

Le rendement se définit comme le rapport de la puissance active de sortie sur la puissance active d'entrée.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_1 I_1 \cos \varphi_1}$$

Généralement le récepteur est connu ainsi que la tension V_2 . On choisit donc l'expression:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \text{pertes}} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + P_{\text{fer}}} \approx \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_{e2} I_2^2 + P_{10}}$$

Le transformateur possède en charge un rendement proche de 1. Pour un petit transformateur (1 KVA) le rendement est de l'ordre de 0,95. Pour de plus forte puissance (900 KVA pour les transformateurs de distributions) le rendement est environ de 0,99, ce qui fait environ 9 kW de pertes qu'il faut évacuer.

IV Grandeurs caractéristiques d'un transformateur

4.1 Intensité nominale

A l'intensité nominale du transformateur correspondent des pertes joules nominales et un échauffement maximum des bobines primaires et secondaires. Dépasser le courant nominal peut provoquer un échauffement important qui peut engendrer un vieillissement précoce des isolants, voir une destruction de l'isolant ce qui provoque une mise en court circuit des enroulements.

4.2 Tension et fréquence nominales

A la tension nominale du transformateur correspond des pertes fers nominales et un circuit magnétique atteignant son coude de saturation. Dépasser la tension nominale provoque un échauffement et une saturation forte du matériau qui provoque une pointe de courant importante. Ceci provoque généralement le déclenchement du système de protection. Par contre il est possible de travailler sous tension plus faible.

La fréquence ne doit pas être augmentée sous peine de changer l'amplitude du flux et donc d'accroître, pour une même valeur efficace de la tension, les pertes fer.

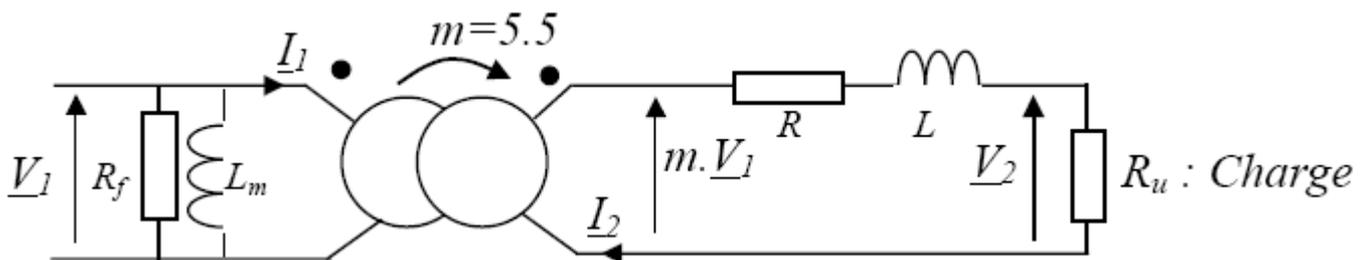
4.3 Puissance nominale

Pour un transformateur absorbant une intensité efficace I_{1n} sous la tension efficace V_{1n} la puissance apparente en service est $S_n = V_{1n} I_{1n}$. Le constructeur d'appareils indique la puissance apparente nominale. Elle correspond au produit des grandeurs nominales pour lesquelles l'appareil a été conçu. On donne également à S_n le nom de **puissance de dimensionnement**, car la dimension et le poids du transformateur dépendent de S_n .

Il est tout à fait possible dans le cas de charge fortement inductive de consommer une puissance active de 6 kW et d'avoir 8 KVAR de puissance réactive. La puissance apparente est alors de 10 KVA. S'il faut placer un transformateur en tête, il devra avoir une puissance apparente de 10 KVA alors que la puissance active utilisée n'est que de 6 kW, d'où une surcharge supplémentaire. Le facteur de puissance correspondant est de 0,6 (valeur maximale 1). En aéronautique on privilégiera un fonctionnement avec un facteur de puissance égal à 1 afin de minimiser la masse embarquée donc la puissance apparente totale. On préférera utiliser un condensateur pour relever le facteur de puissance car il pèse moins lourd que la surcharge équivalente du transformateur.

V Exercices

On considère un transformateur monophasé 2200VA, 220V / 1160V dont le schéma équivalent est représenté ci dessous :



On souhaite déterminer la valeur des éléments d'imperfection d'après deux essais :

1) essai à vide : $V_1=220V$ $P_1=90W$ $I_1=0.8A$

On calcule R_f et L_m d'après les formules $R_f = V^2/P_1 = 537.7\Omega$

Puis $Q_1 = \sqrt{(S_1^2 - P_1^2)} = 151.24 \text{ VAR}$ et $L_m = V^2/(\omega \cdot Q_1) = 1.01\Omega$

2) essai en c-c : $V_1=8.5V$ $P_1=80W$ $I_1=10A$

On sait que $m=5.5$

On calcule $R = m^2 \cdot P_1 / I_{12}^2 = 24.2\Omega$ On calcule $Q_1 = 28.7 \text{ VAR}$ et $L = Q_1 \cdot m^2 / \omega I_1^2 = 27 \text{ mH}$

On souhaite calculer la tension V_2 en pleine charge :

La charge nominale correspond au fonctionnement nominal du transformateur. C'est dans ces conditions qu'on a $S = 2200 \text{ VA} = V_{1n} \cdot I_{1n}$ c'est à dire que le courant de pleine charge est $I_{1n} = 10A$.

En conséquence le courant $I_{2n} = 10/5.5 = 1.8A$

On calcule alors la chute de tension au secondaire avec la formule :

$$\Delta V_2 = mV_1 - V_2 \cong R \cdot I_2 \cdot \cos\varphi + L \cdot \omega \cdot I_2 \cdot \sin\varphi$$

sachant que $\tan\varphi = L\omega/R = 0.35$ c'ad $\cos\varphi = 0.94$ et $\sin\varphi = 0.33$

on trouve $\Delta V_2 = 46.43$

Ainsi, à vide le transformateur délivre $220 \times 5.5 = 1210V$ et en pleine charge $1210 - 46.43 = 1163.6V$, tension qui correspond bien aux 1160V de sortie indiqués dans les données globales.

On souhaite chiffrer le rendement du transformateur :

Pour calculer le rendement on écrit :

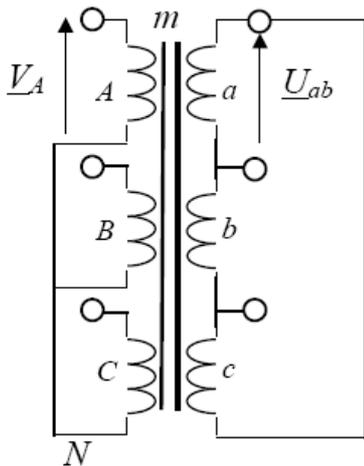
$$I\eta = P_{RU} / (P_{RU} + P_R + P_{Rf}) = 1163,6 \times 1,8 / (1163,6 \times 1,8 + 220^2 / R_f + R \cdot (1,8)^2) = 0,92$$

Ce qui est normal pour un transformateur.

VI Transformateurs triphasés

Afin de transformer l'amplitude des tensions d'un système triphasé, il faut théoriquement se servir de 3 transformateurs monophasés, dont les phases seront couplées, en fonction des contraintes, en étoile ou en triangle. En réalité, on se sert d'un seul circuit magnétique sur lequel sont bobinés les 6 bobinages. On appelle cela un transformateur triphasé. Il est de plus possible de coupler différemment le primaire et le secondaire pour, par exemple créer un neutre local ou apporter un déphasage entre certaines tensions.

On représente ci dessous, **en tant qu'exemple**, le symbole d'un transformateur triphasé dont le primaire est câblé en étoile et le secondaire en triangle.



On notera de façon conventionnelle les bobinages **primaires en majuscule (A,B et C)** et **secondaires en minuscules (a,b et c)**.

Les bobinages représentés côte à côte sont dits "en regard" et les tensions à leurs bornes sont proportionnelles de rapport n_a/n_A . C'est à dire qu'ici $U_{ab} = (n_a/n_A).V_A$

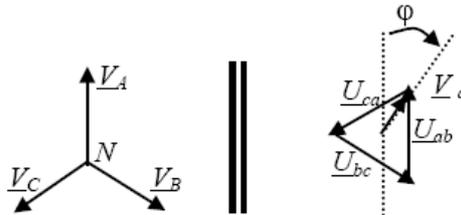
NB : attention, n_a/n_A n'est pas toujours égal à m

Le couplage est toujours indiqué par un symbole :

- Y ou y : couplage **étoile** primaire ou secondaire
- Δ ou d : couplage **triangle** primaire ou secondaire
- Z ou z : couplage **Zig-Zag** primaire ou secondaire

Rapport de transformation :

On désigne par rapport de transformation, m , le rapport entre une tension simple au secondaire et la tension simple correspondante au primaire.



Les tensions primaires et secondaires **de l'exemple ci-dessus** se représentent comme ci contre.

On note deux caractéristiques importantes :

- $$m = \frac{V_a}{V_A} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}.V_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_a}{n_A}$$
- Le déphasage entre \underline{V}_A et \underline{V}_a vaut $\pi/6 = 2\pi/12 = 1h$

La relation qui relie \underline{V}_A et \underline{V}_a est donc :
$$\underline{V}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_a}{n_A} \underline{V}_A \cdot e^{j\pi/6}$$
 indice horaire m

Les tensions primaires et secondaires **de l'exemple ci-dessus** se représentent comme ci contre.

On note deux caractéristiques importantes :



Le déphasage entre \underline{V}_A et \underline{V}_a vaut $\pi/6 = 2\pi/12 = 1h$

La relation qui relie \underline{V}_A et \underline{V}_a est donc : $\underline{V}_a = \underline{V}_A \cdot e^{j\pi/6}$

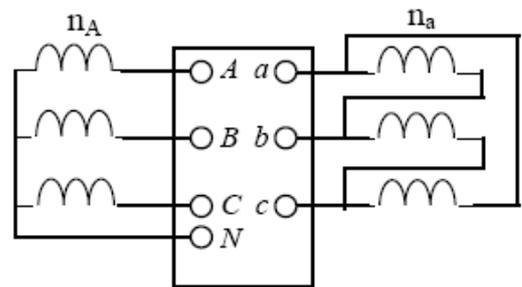
Afin de caractériser un transformateur triphasé, on donnera toujours **son couplage, son rapport de transformation et son indice horaire**, c'est à dire le déphasage entre \underline{V}_A et \underline{V}_a .

NB : l'indice horaire sera souvent exprimé en heures pour plus de commodité puisque ce sera toujours un multiple de $\pi/6 = 1h$.

Autre symbolisation:

La symbolique ci dessous apparaît souvent pour unifier les symboles des transformateurs triphasés, le rectangle avec les bornes représente la plaque de connections du transformateur.

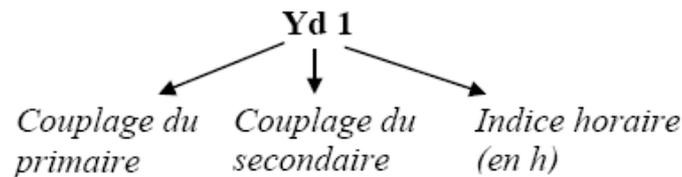
Cette symbolisation suffit tout comme le schéma complet dont elle est le reflet, pour déterminer les caractéristiques de transformation du transformateur.



Nom conventionnel :

Pour simplifier la représentation, on donne aux transformateurs triphasés un nom qui résume toutes les caractéristiques.

Le transformateur utilisé **comme exemple** correspond à :



De la même manière on peut trouver : Yy, Yd, Yz, Dy, Dd, Dz, Zy, Zd, Zz , avec de plus les différents indices horaires possibles.

On retiendra les cas les plus communs explicités dans le tableau ci après³

Symbole	V_s/V_A	Montage électrique des phases	Diagramme vectoriel
Yy0	$\frac{n_2}{n_1}$		
Yd1	$\frac{n_2}{\sqrt{3}n_1}$		
Yz11	$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{n_2}{n_1}$		
Dy11	$\sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$		
Dd0	$\frac{n_2}{n_1}$		
Zy1	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{n_2}{n_1}$		

³ Source : Electrotechnique industrielle Seguiet, Notelet

E. Machine à Courant Continu

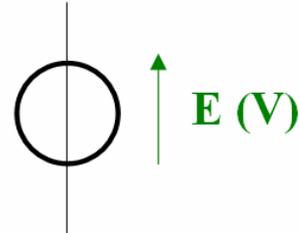


Les relations

fem :

$$\mathbf{E} = \mathbf{K} \times \boldsymbol{\varphi} \times \boldsymbol{\Omega}$$

↖ Vitesse
↙ Flux



Couple :

$$\mathbf{T} = \mathbf{K} \times \boldsymbol{\varphi} \times \mathbf{I}$$

D'où : $\mathbf{T} \times \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{E} \times \mathbf{I}$

Si flux constant : $\mathbf{K} \times \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{K}_\varphi$

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}_\varphi \times \boldsymbol{\Omega}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}_\varphi \times \mathbf{I}$$

MCC

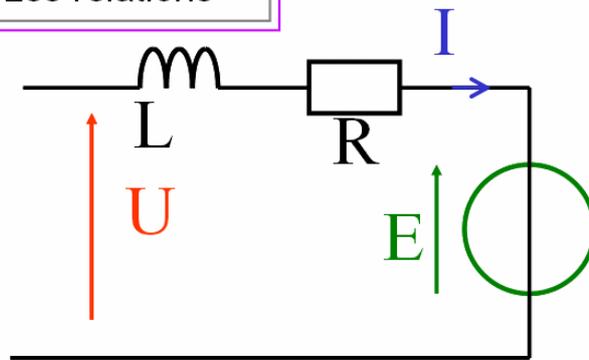
TS



Les relations

Côté électrique :

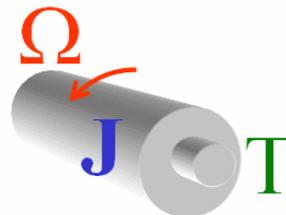
$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{e}(t) + R \cdot \mathbf{i}(t) + L \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt}$$



Côté mécanique :

$$\mathbf{J} \times \frac{d\boldsymbol{\Omega}(t)}{dt} = \mathbf{T}(t)$$

$$T(t) = T_M(t) - T_R(t)$$



MCC

TS

F. Champ Tournant



G. Machine Synchrone

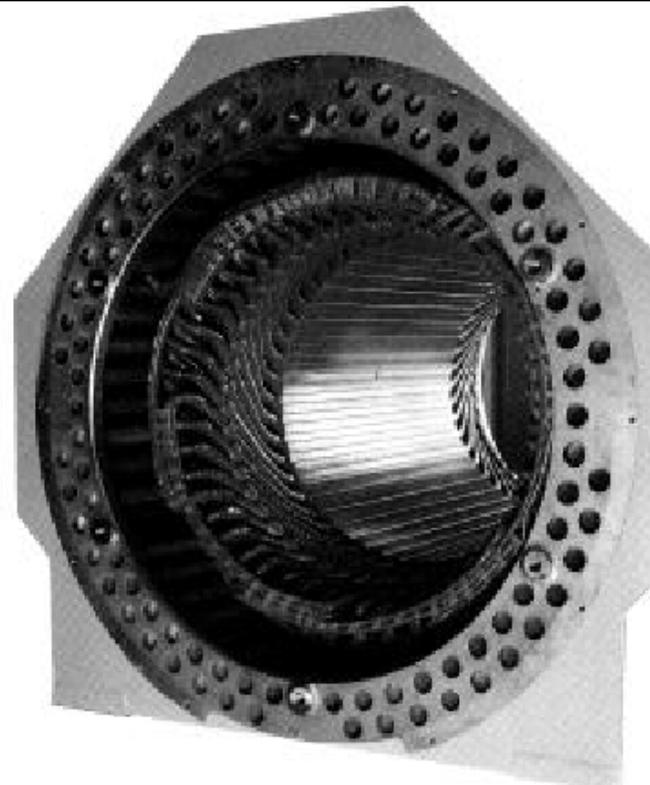


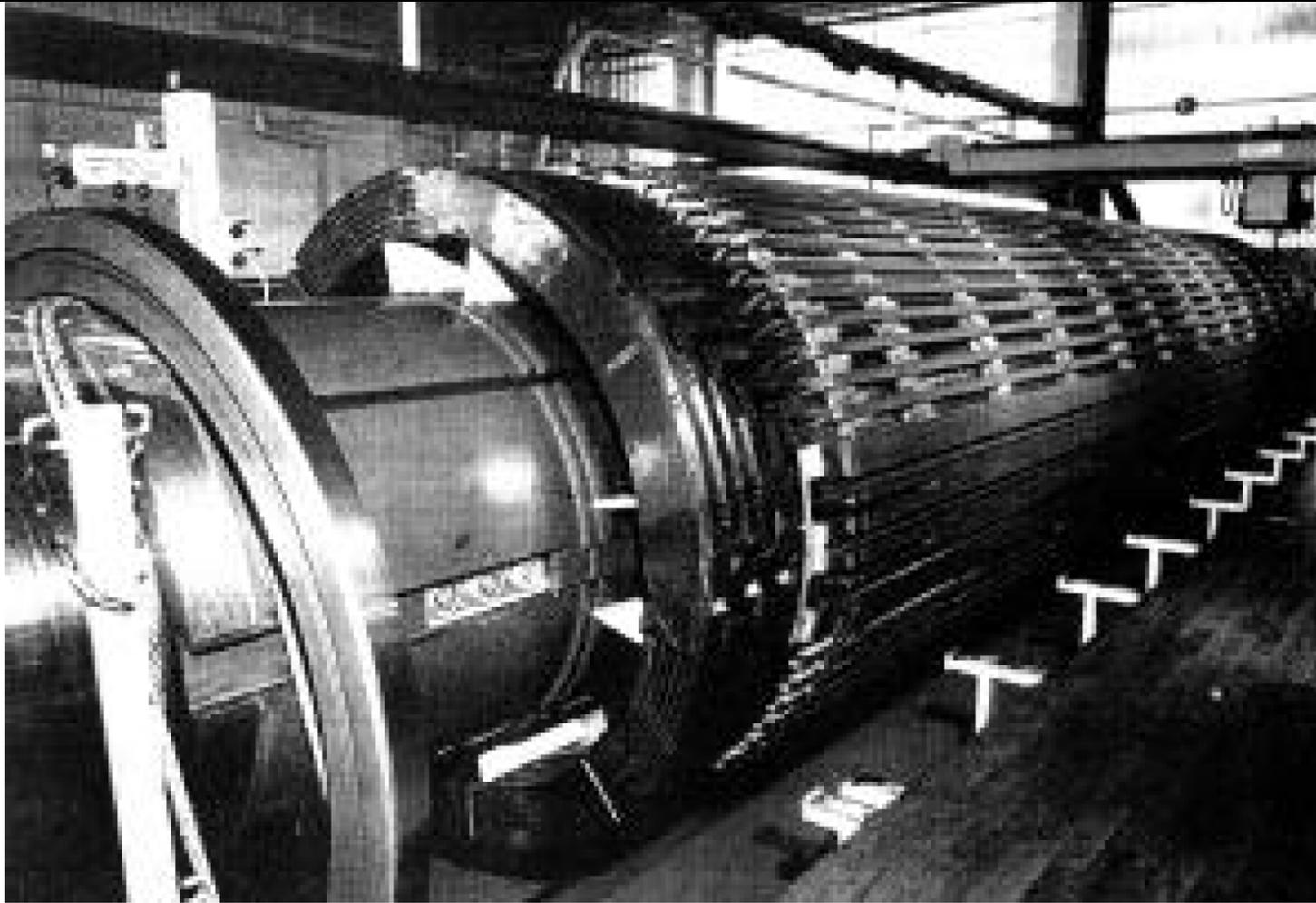
Machines Synchrones

I Constitution de la machine synchrone

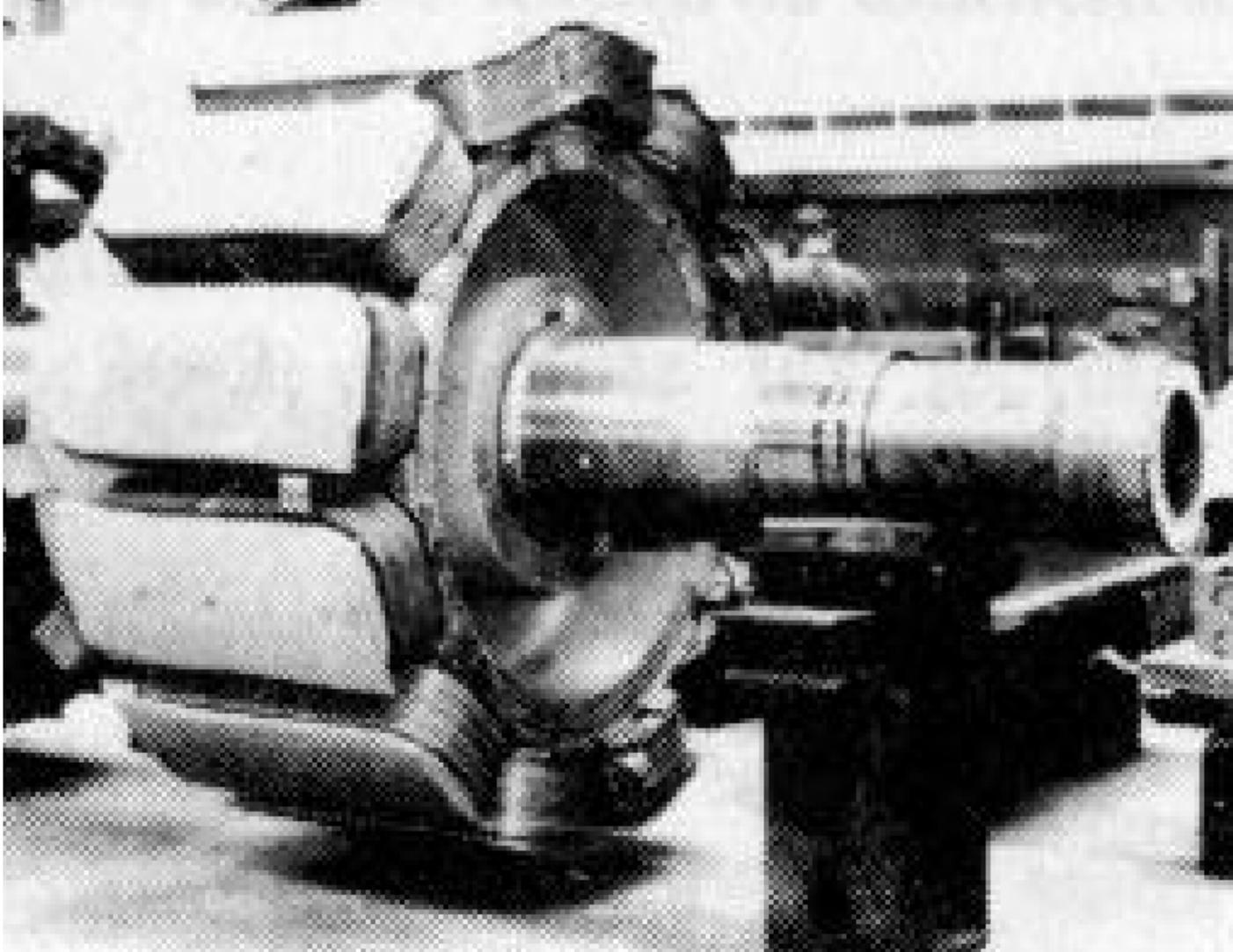
Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone (voir ci-contre).

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants :

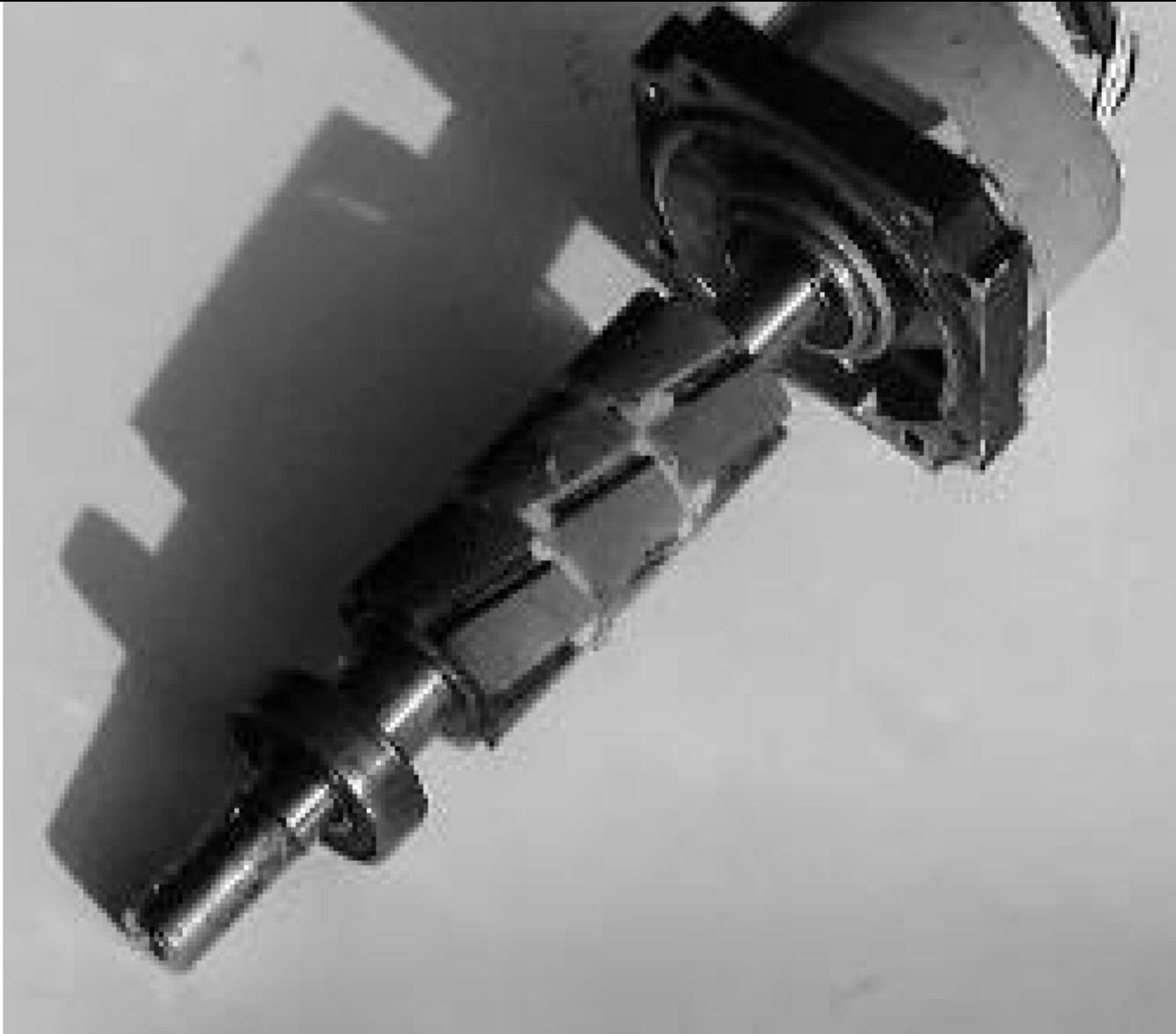




Rotor à pôles lisses

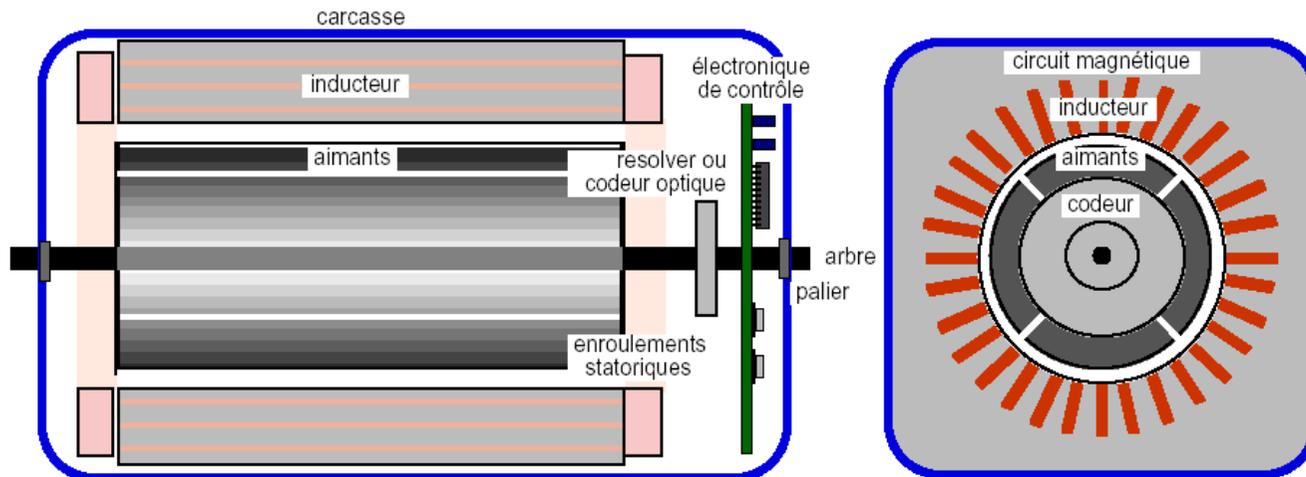


Rotor à pôles saillants



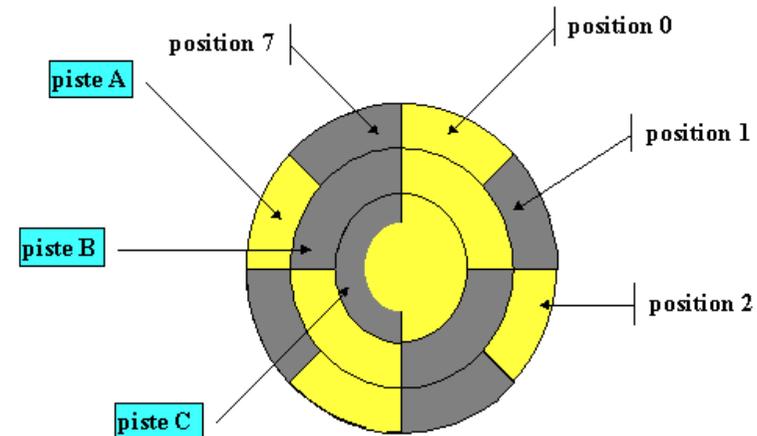
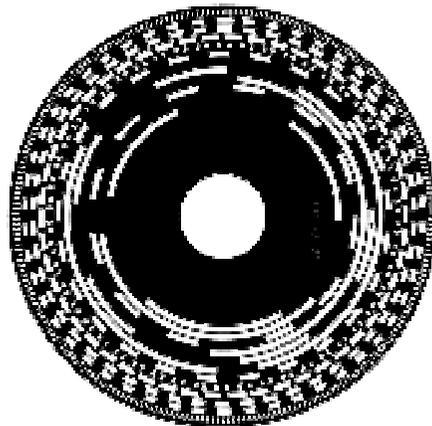
Rotor à aimants

Exemple : moteur "brushless" (schéma simplifié) :



• **Caractéristiques (moteurs brushless) :**

- Fortes caractéristiques dynamiques (accélération, couple de démarrage)
- Vitesse élevée (> MCC)
- Durée de vie élevée
- Intégration facile dans les applications d'entraînement et d'asservissement

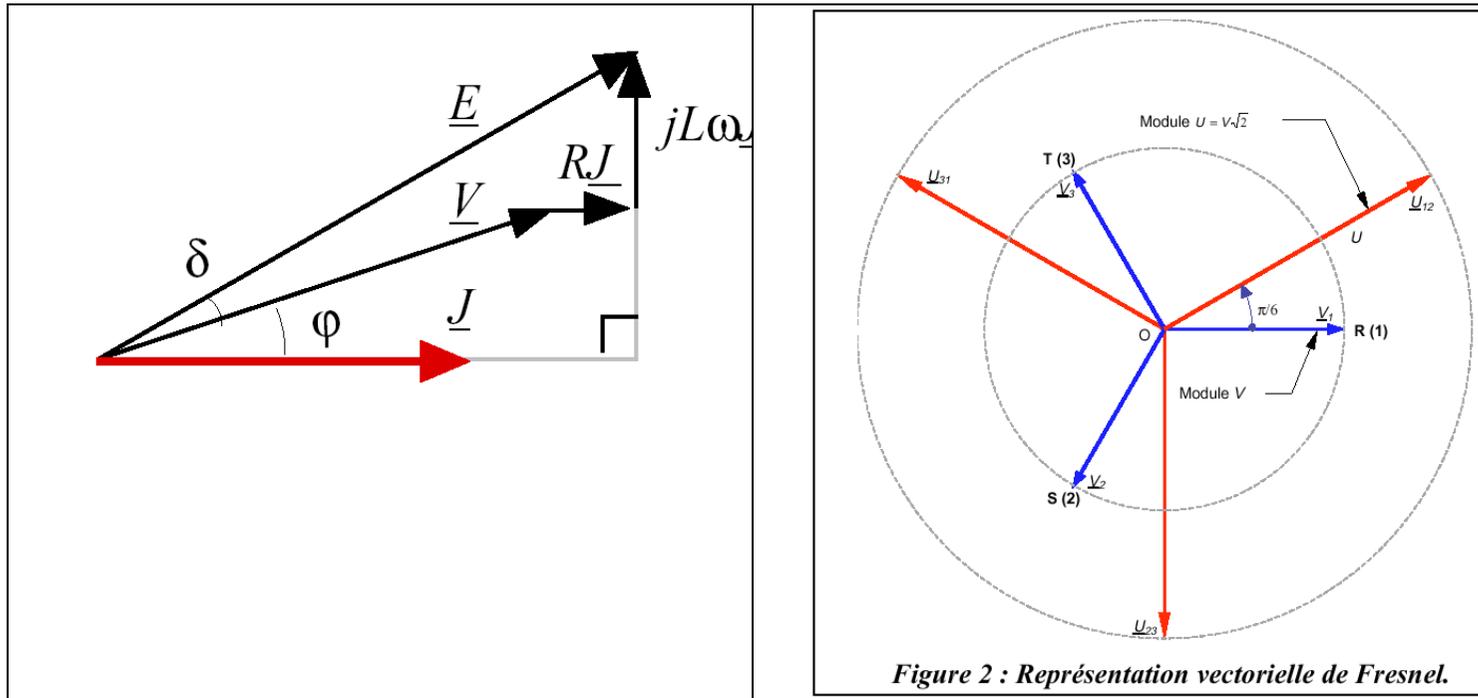


II Principe de fonctionnement

21 Fonctionnement en génératrice isolées

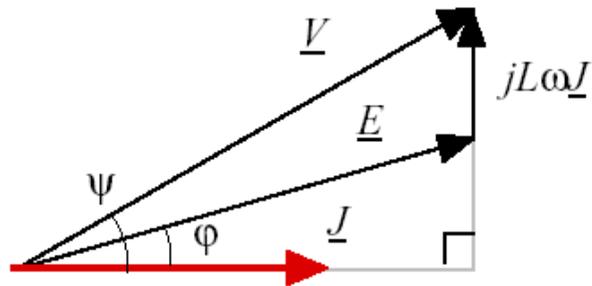
Nombre de paire de pôles	50	60	400	Hz	
P					
1	3000	3600	24000	tr/min	RPM
2	1500	1800	12000		
3	1000	1200	8000		
4	750	900	6000		
5	600	720	4800		
6	500	600	4000		
7	428,6	514,3	3428,6		
8	375	450	3000		
10	300	360	2400		
12	250	300	2000		
14	214,3	257,1	1714,3		
16	187,5	225	1500		
20	150	180	1200		
24	125	150	1000		
32	93,8	112,5	750		
40	75	90	600		

22 Modèle de Behn Eshenburg

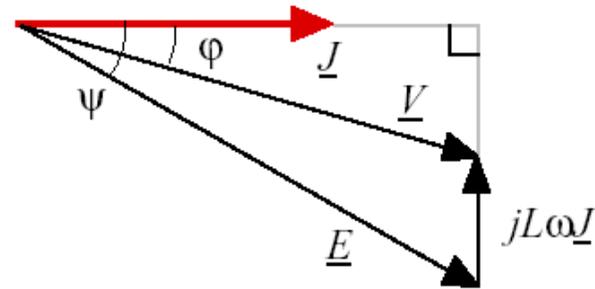


23 Fonctionnement sur le réseau

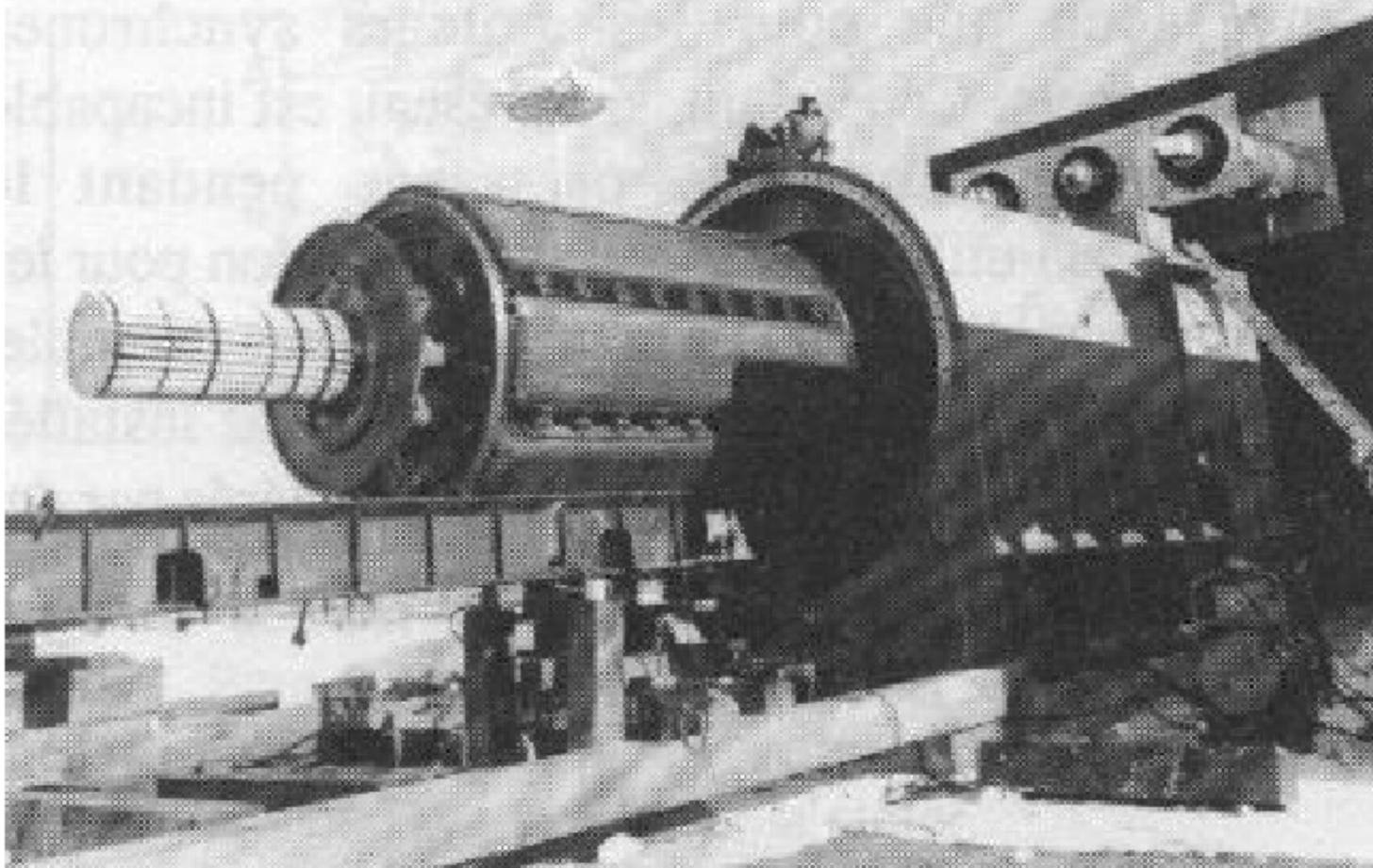
a: Fonctionnement en alternateur



machine "sous-excitée" : $E < V$
 $\Rightarrow \varphi > 0$: MS \approx récepteur inductif



machine "sur-excitée" : $E > V$
 $\Rightarrow \varphi < 0$: MS \approx récepteur capacitif

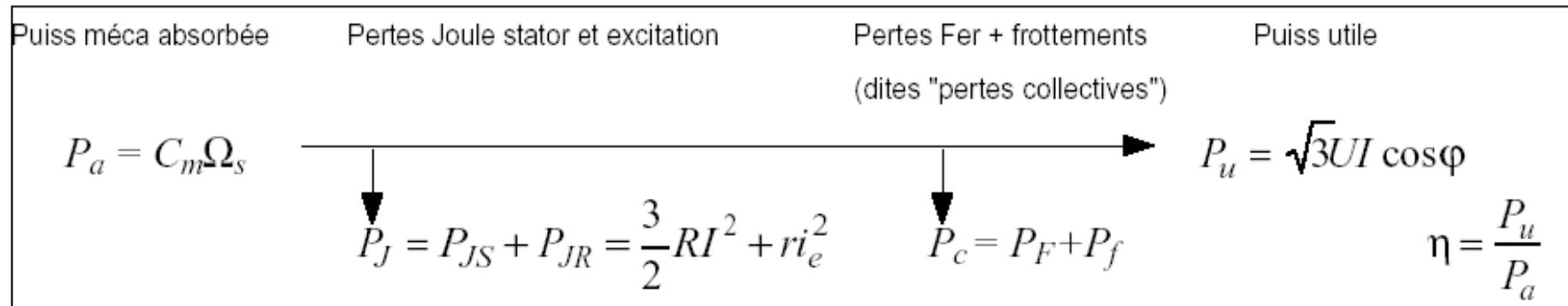


Compensateur synchrone triphasé de -200 à +300MVARs, 16 kV, 900 r/min, 60 Hz installé au poste de Lévis, Québec, pour régulariser la tension du réseau à 735 kV entre Churchill Falls et Montréal. Caractéristiques mécaniques: masse du rotor: 143 t; diamètre du rotor: 2670 mm; longueur axiale du fer: 3200 mm; longueur de l'entrefer: 39,7 mm.

b: Fonctionnement en moteur

c: Remarque sur les conventions moteurs et générateurs

- Bilan des puissances



CONVENTION Générateur:

Puissance FOURNIE par la machine sur le réseau :

$$P_F = 3VI' \cos \varphi' \quad \text{et} \quad Q_F = 3VI' \sin \varphi'$$

CONVENTION Moteur:

Puissance ABSORBÉE par la machine au réseau :

$$P_a = 3VI \cos \varphi \quad \text{et} \quad Q_a = 3VI \sin \varphi$$

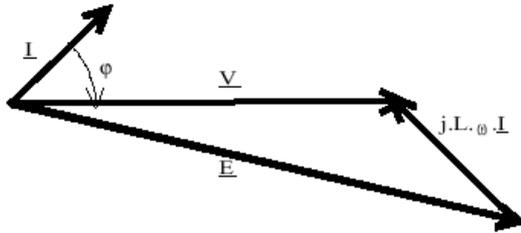
$$\underline{I}' = - \underline{I} \quad \underline{S}' = - \underline{S} \quad P_F = - P_a \quad Q_F = - Q_a$$

Machine SYNCHRONE avec convention

Puissance Active et Réactive

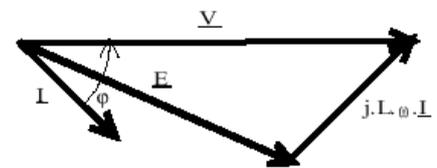
Machine SYNCHRONE

$$\begin{cases} P > 0 \\ Q < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi > 0 \\ \sin \varphi < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0 \right]$$

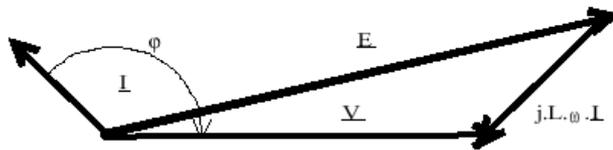


P: Puissance active

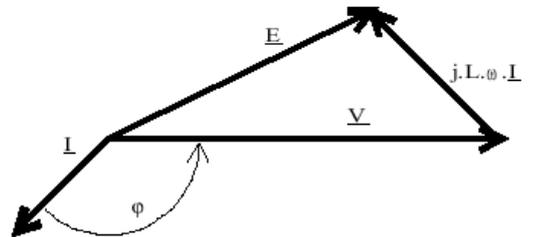
$$\begin{cases} P > 0 \\ Q > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi > 0 \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right]$$



Q: Puissance réactive

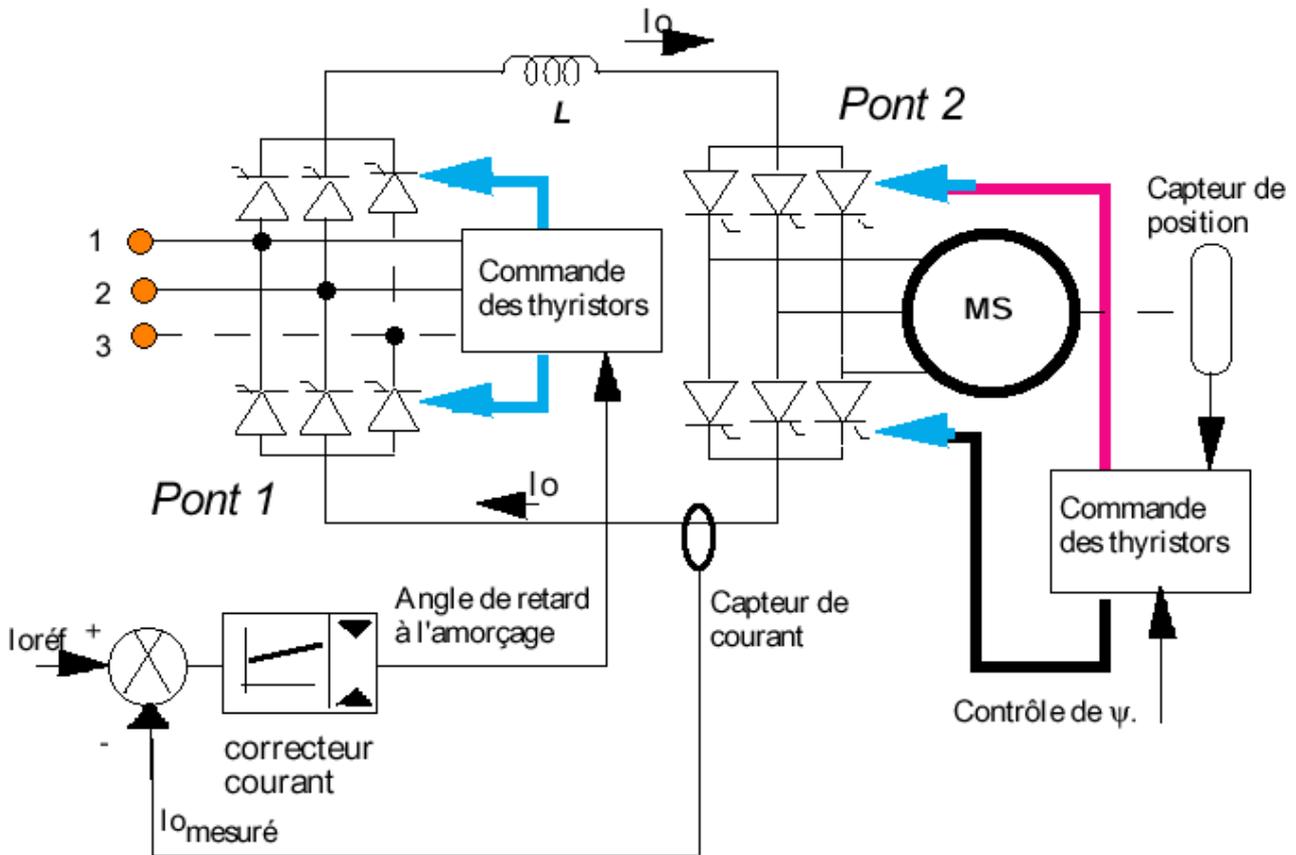


$$\begin{cases} P < 0 \\ Q < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi < 0 \\ \sin \varphi < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2} \right]$$



$$\begin{cases} P < 0 \\ Q > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \varphi < 0 \\ \sin \varphi > 0 \end{cases} \Leftrightarrow \varphi \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right]$$

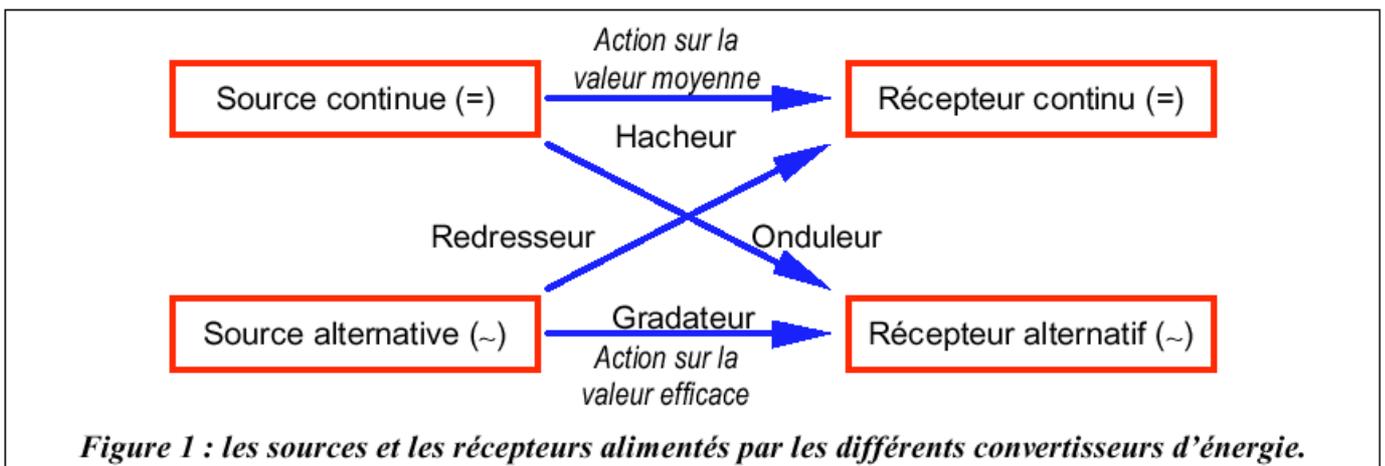
24 Fonctionnement avec redresseur et onduleur



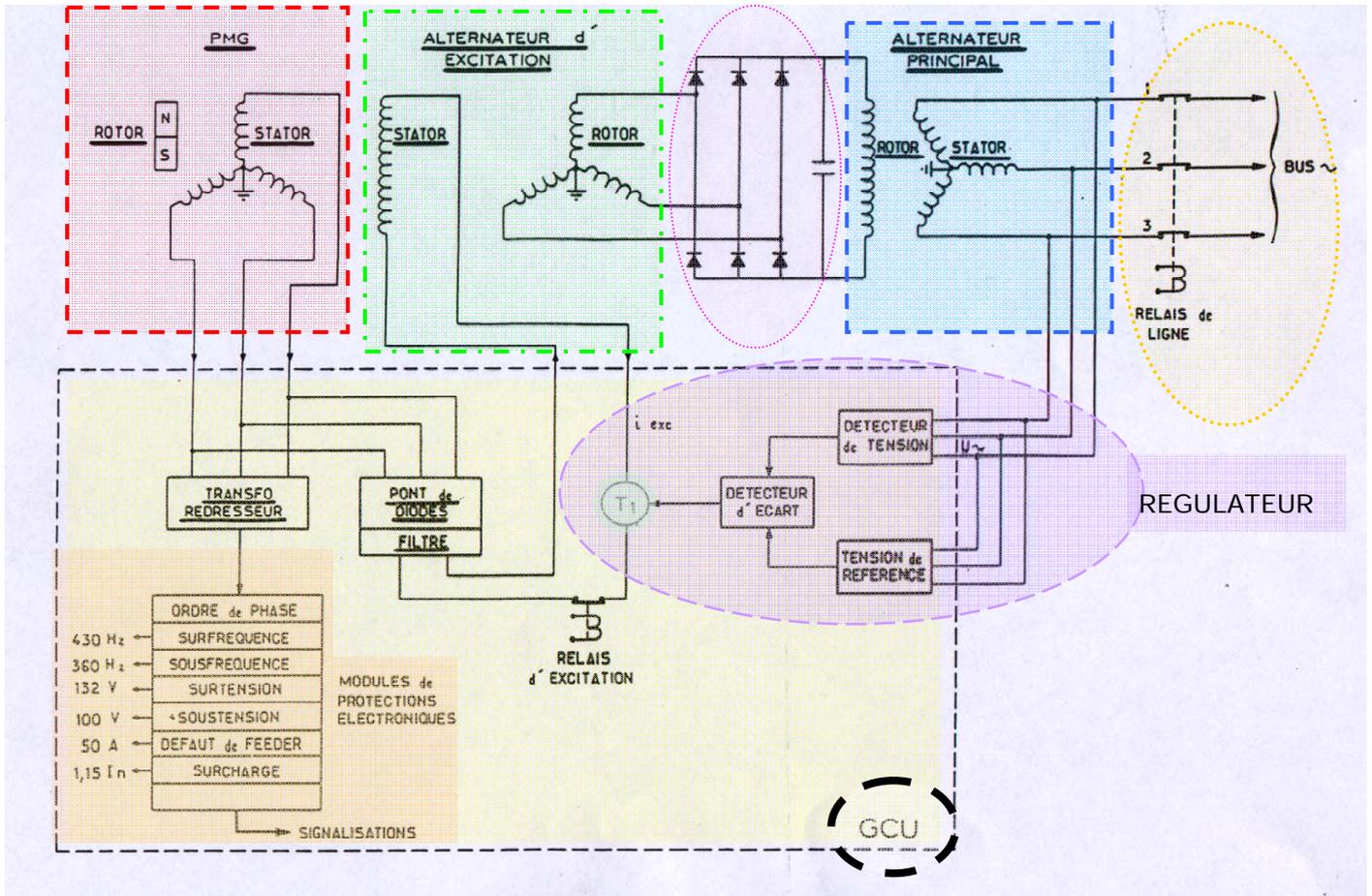
Nécessité de la conversion d'énergie

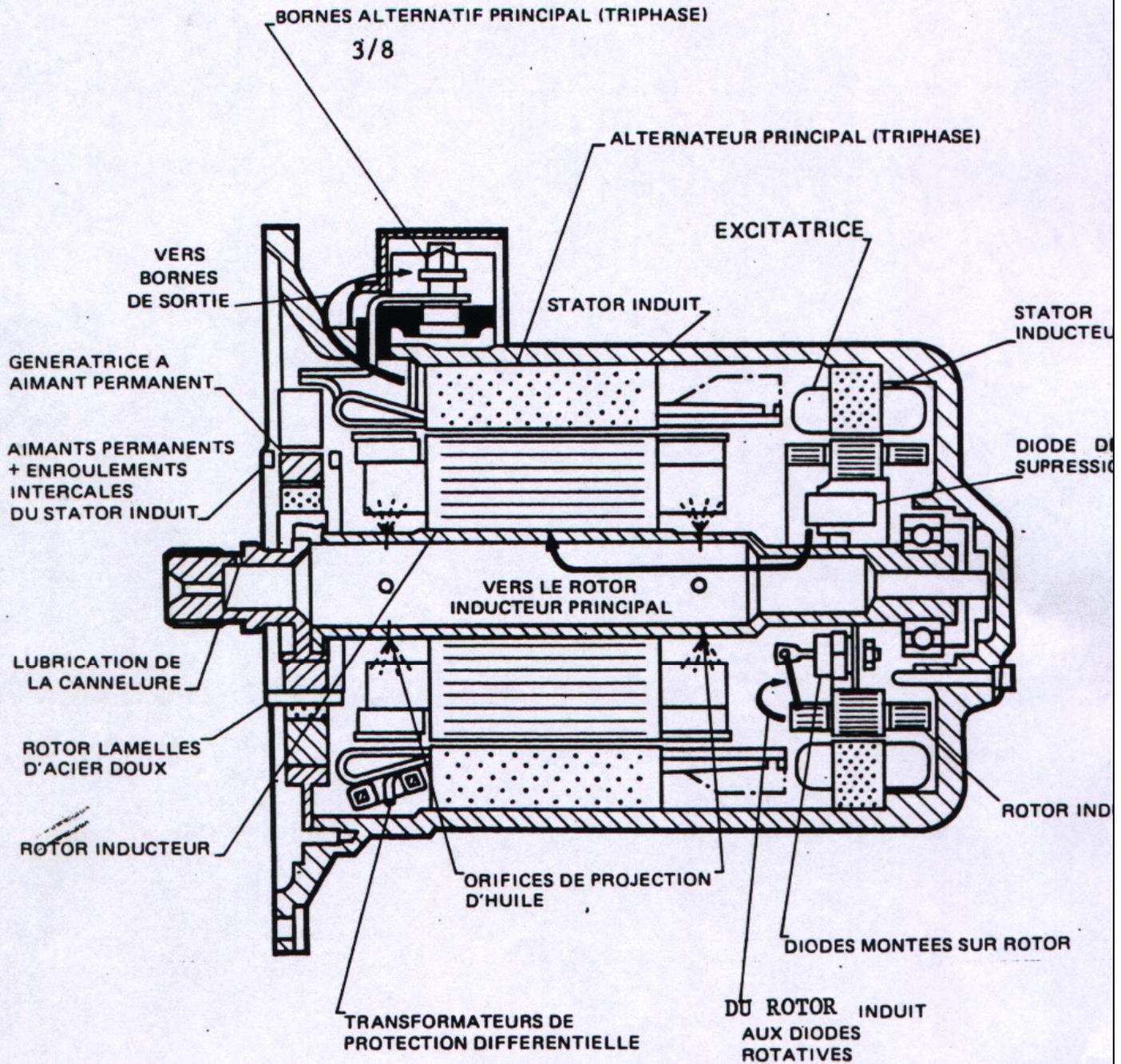
Les différents réseaux électriques industriels alimentent de nombreux actionneurs. Cette énergie apparaît sous deux formes : **alternative** (tensions ou courants sinusoïdaux à *valeur moyenne nulle*) ou **continue**.

Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent à la **Figure 1**.



PMG	ALTERNATEUR EXCITATION	REDRESSEUR EXCITATION SUR ROTOR	ALTERNATEUR PRINCIPAL "MAIN"	RELAIS LIGNE BUS AVION 115V - 400 Hz
------------	-----------------------------------	--	---	---

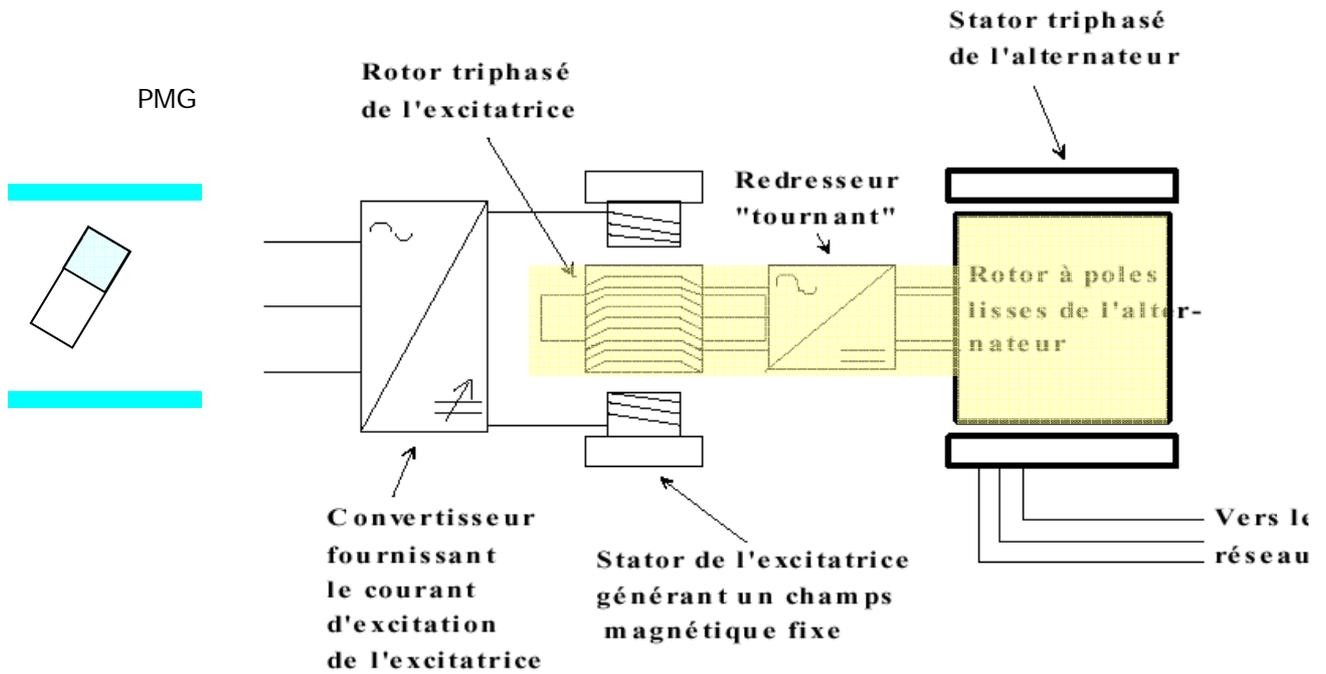




VUE EN COUPE D'UN ALTERNATEUR (A1-A2)

Figure 8

"TRIPLE" ALTERNATEUR SYNCHRONES



L'excitatrice est en fait un alternateur inversé où le circuit d'excitation est placé sur le stator, le rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur.

H. Machine Asynchrone



Machine Asynchrone triphasée à rotor bobiné

I - Généralités sur la **machine asynchrone**

1.1 - Stator

La machine asynchrone est une machine à champ tournant (on dit aussi à force magnétomotrice tournante).

Ce champ tournant est obtenu par application de tensions triphasées de pulsation ω aux enroulements polyphasés statoriques à $2p$ pôles par phase. Ce champ est constitué d'une succession de $2p$ pôles alternativement nord et sud tournant à la vitesse de

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} .$$

synchronisme

On obtient ainsi un champ magnétique tournant par un processus purement statique.

1.2 - Rotor

Le rotor est formé d'enroulements polyphasés répartis sur un cylindre magnétique. Ces enroulements constituent un succession de $2p$ pôles comme ce du stator. La machine des T.P. est à rotor bobiné, il existe d'autres rotors dits à "cage d'écureuil". Dans tous les cas, les enroulements ainsi constitués sont fermés sur eux-mêmes. (Rotor en court-circuit).

Admettons que le rotor tourne. La vitesse angulaire Ω du rotor est nécessairement différente de la vitesse du champ tournant qu'il voit donc défiler. En effet : s'il y a rotation c'est qu'il s'est développé un couple, ce dernier résulte de l'interaction des champs statorique et champ rotorique. Or le champ rotorique est induit, c'est à dire qu'il résulte de la génération de courants polyphasés induits par le stator dans le rotor. Cela signifie que chaque enroulement rotorique est le siège d'une fém induite donc d'une variation de flux, ceci n'est possible que dans la mesure où la vitesse du champ tournant ("inducteur") se déplace à une autre vitesse que celle de l'enroulement ("induit") rotorique.

1.3 - Fréquences - Vitesses

Le champ statorique tourne à la vitesse

$$\omega_s = \frac{\omega}{p} = 2\pi \frac{f}{p} = 2\pi \cdot N_s$$

Avec f la fréquence du réseau d'alimentation, N_r la vitesse du rotor en tr/s, et Ω_r la vitesse du rotor en rad/s. On notera la pulsation des courants rotoriques ω_r . En fonctionnement moteur, la vitesse relative du champ statorique par rapport à la vitesse du rotor est $\Omega_s - \Omega_r > 0$. On définit alors le glissement g de la manière suivante:

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$$

Les courants polyphasés induits dans le rotor circulent dans des enroulements polyphasés, leur fréquence est $f_r = gf$. Ils engendrent un champ tournant dont la vitesse absolue est N_s (ou Ω_s), c'est à dire que la machine asynchrone est en fait synchrone du point de vue magnétique (synchronisme des champs magnétiques et rotoriques). C'est le rotor qui glisse par rapport à son propre champ, d'où le qualificatif de "asynchrone".

Les champs statorique et rotorique tournent à la vitesse de synchronisme Ω_s . Il se composent pour former un champ magnétique tournant résultant, ou un flux tournant résultant. Si on pose ϕ la valeur efficace du flux dans un enroulement statorique et dans un enroulement rotorique, alors les fém qui y sont induites ont respectivement pour valeurs efficaces :

$$\begin{aligned} E_1 &= K_1 N_1 f \phi && (e_1(t) \text{ en instantané}) \\ E_2 &= K_2 N_2 f_r \phi && (e_2(t) \text{ " " "}) \end{aligned}$$

K_1 et K_2 sont des coefficients de bobinage, N_1 et N_2 des nombres de spires.

Ces deux relations font penser à celles obtenues pour un transformateur. Mais dans le cas de la machine asynchrone la f.e.m. $e_1(t)$ a pour fréquence f alors que la f.e.m. $e_2(t)$ a une fréquence $f_r = gf$ qui varie en fonction de la charge. Dans un transformateur, la fréquence qui apparaît au secondaire est fixe et égale à celle imposée

au primaire. le rapport de transformation m de la machine asynchrone se définit à partir de la relation suivante:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{K_2 N_2}{K_1 N_1} g = mg$$

1.4 - Modèle équivalent monophasé

Afin de se raccrocher à des choses connues, il a été établi une représentation schématique de la machine asynchrone que l'on appellera "modèle".

Sachant que stator et rotor fonctionnent en régime alternatif et qu'ils sont magnétiquement couplés, il est tentant de modéliser la machine asynchrone à partir du transformateur monophasé auquel on associera les inductances de fuites l_1 et l_2 puis les résistances r_1 et r_2 , les pertes fer et le courant magnétisant ayant pour supports R_0 et L_0 respectivement. On définira ainsi les impédances de fuites: $\underline{z}_1 = r_1 + j l_1 \omega$ et $\underline{z}_2 = r_2 + j l_2 \omega_r = r_2 + j l_2 g \omega$.

Une difficulté persiste cependant car, comme nous l'avons vu, les fréquences f_r des courants rotoriques sont différentes de f contrairement à ce qui se passe pour le transformateur. Pour tenir compte de la spécificité de la machine asynchrone, on avance les arguments suivants :

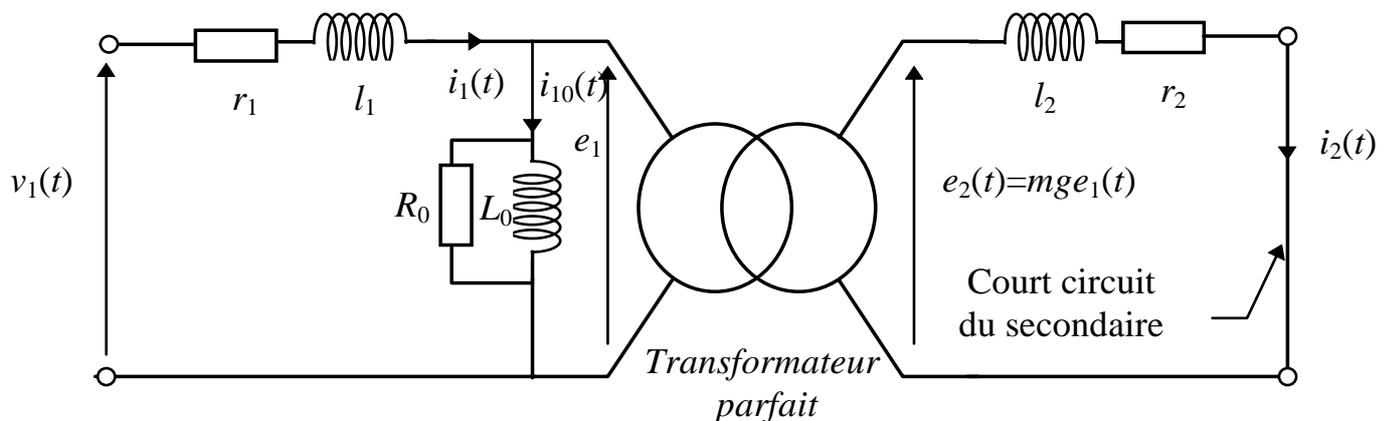
α - La valeur efficace du champ tournant rotorique ne dépend que de la valeur efficace des ampères-tours (AT) rotoriques, c'est à dire $N_2 I_2$, quelle que soit la fréquence f_r de ces courants.

β - La vitesse de rotation N_s du champ tournant résultant est obtenue par des courants rotoriques polyphasés de fréquence $f_r = g f$ entraînés par le rotor à la vitesse N_r .

γ - On peut également créer un même champ tournant rotorique tournant à la vitesse N_s en bloquant le rotor et en l'alimentant par des courants de fréquence f et de même valeur efficace.

Ces arguments sont exploités pour utiliser le schéma équivalent du transformateur.

Le stator devient primaire alimenté sous une tension $v_1(t)$ de fréquence f . Le rotor devient secondaire, il développe une fém induite de valeur efficace $E_2 = mgE_1$ de fréquence f , l'impédance des fuites \underline{z}_2 conservant sa valeur $r_2 + j l_2 g \omega$.



Remarques :

♦ On suppose que la machine asynchrone fonctionne en régime équilibré. Cela signifie que les trois phases sont équivalentes, d'où la représentation monophasée qui en découle.

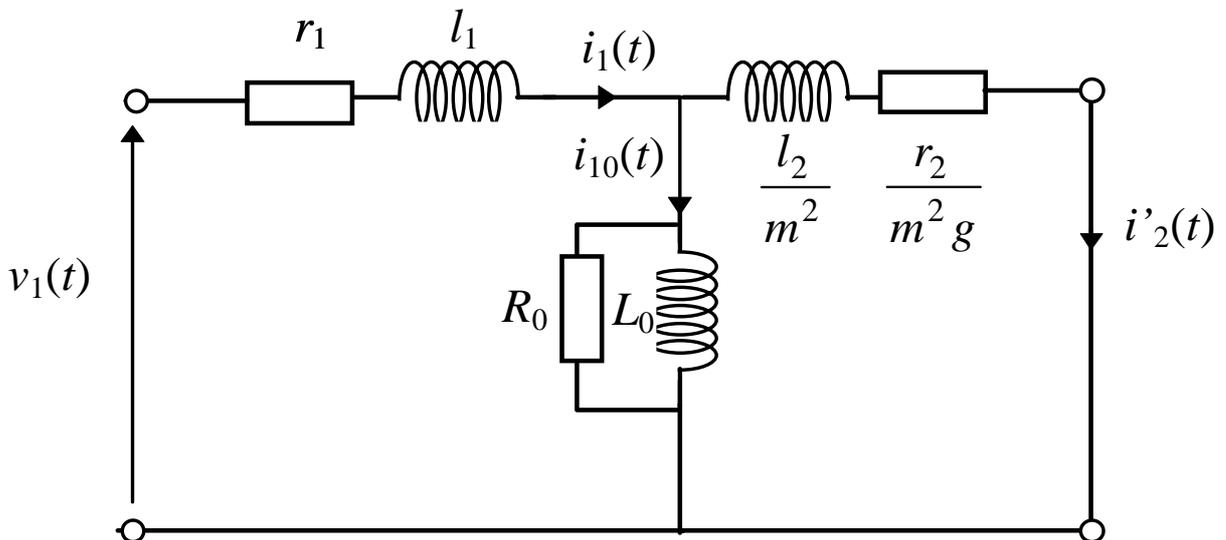
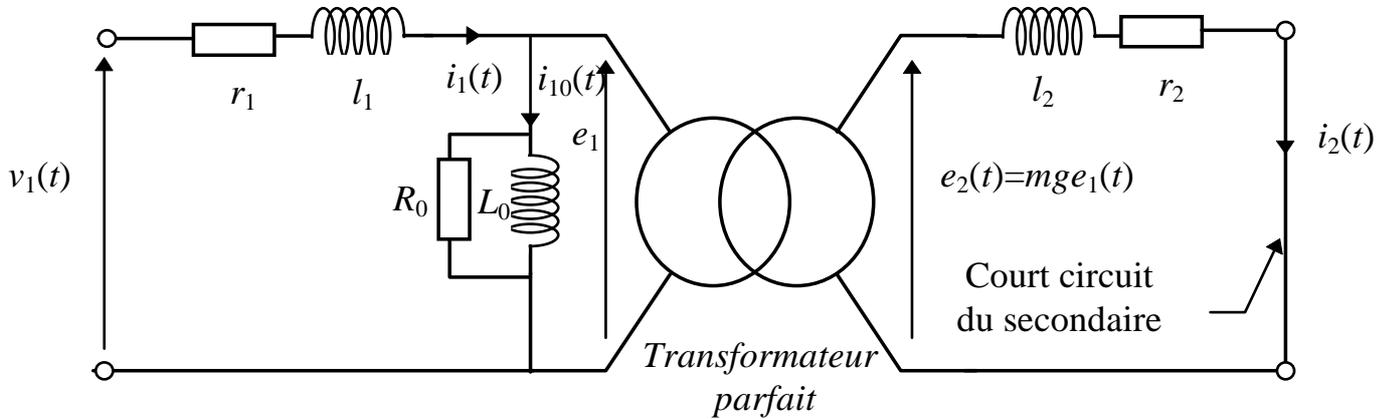
♦ Lorsque le glissement g est égal à un ce qui correspond à une vitesse du rotor N_r nulle (rotor bloqué), la machine asynchrone se comporte alors comme un transformateur dont le secondaire est court-circuité, dans ce cas $f_r = f$.

1.5 - Schéma électrique simplifié

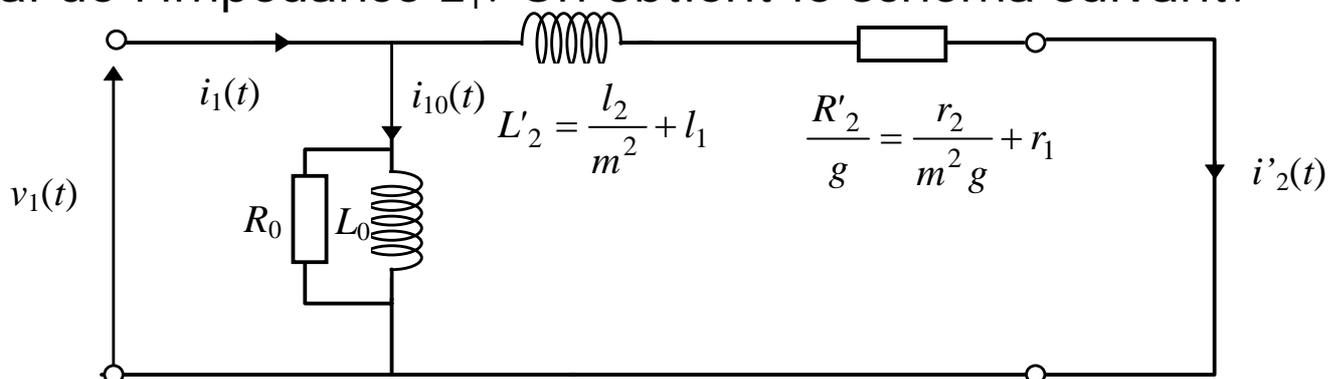
Nous allons dans un premier temps supprimer le transformateur parfait en utilisant la même démarche que pour le transformateur, c'est à dire "ramener" au stator (primaire) les éléments du rotor (secondaire). On

cherche donc à déterminer l'impédance équivalente parcourue par le courant $i'_2 = mi_2$, sous la tension e_1 .

$$Z_{eq} = \frac{E_1}{I_1 - I_{10}} = \frac{E_1}{I'_2} = \frac{E_2}{mg} \cdot \frac{1}{mI_2} = \frac{E_2}{I_2} \cdot \frac{1}{m^2 g} = (r_2 + jl_2 g \omega) \cdot \frac{1}{m^2 g} \Rightarrow Z_{eq} = \frac{r_2}{m^2 g} + j \frac{l_2}{m^2} \omega$$



Afin de s'affranchir du diviseur de tension (z_1, L_0, R_0) on opère une ultime transformation qui constitue une approximation. On déplace le circuit de magnétisation en aval de l'impédance z_1 . On obtient le schéma suivant:



Dans les applications courantes de la machine asynchrone, il arrive généralement que

$$r_1 \ll \frac{r_2}{m^2 g} \quad \text{alors} \quad \frac{R'_2}{g} \cong \frac{r_2}{m^2 g}$$

1.6 - Bilans énergétiques du modèle simplifié

1.6.1 - Puissance et couple électromagnétique

La résistance R_0 modélise les pertes électromagnétiques et dissipe une puissance constante pour une tension d'alimentation fixée. La résistance R'_2/g du modèle dissipe la puissance électromagnétique, notée P_{em} . Elle transite du stator au rotor via l'entrefer. Sachant que le champ magnétique résultant tourne à la vitesse angulaire $\Omega_s = \omega/p$, on déduit le couple électromagnétique C_{em} de l'expression de la puissance électromagnétique $P_{em} = C_{em} \Omega_s$ Soit :

$$C_{em} = \frac{1}{\Omega_s} \frac{3R'_2}{g} I'^2_2$$

$$I'^2_2 = \frac{V_1^2}{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (L'_2 \omega)^2}$$

avec

on obtient l'expression du couple électromagnétique suivante:

$$C_{em} = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}} \quad \text{avec} \quad C_{max} = \frac{3 V_1^2}{2 \Omega_s} \frac{1}{L'_2 \omega}; \quad g_{max} = \frac{R'_2}{L'_2 \omega}$$

1.6.2 - Couple mécanique

On peut également rechercher l'expression du couple mécanique. La puissance mécanique est $P_{mec} = P_{em} - P_{JR}$ en appelant P_{JR} les pertes joules rotoriques. Les pertes joules effectives au rotor sont $P_{JR} = 3R'_2 I'_2{}^2$. D'où :

$$P_{mec} = 3 \frac{R'_2}{g} I'_2{}^2 - 3R'_2 I'_2{}^2 = 3R'_2 I'_2{}^2 \left(\frac{1-g}{g} \right)$$

Cette puissance est distribuée à la vitesse angulaire rotorique $\Omega_r = \Omega_s(1 - g)$. Le couple mécanique C_{mec} est donné par:

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega_r} = 3 \frac{R'_2}{g} I'_2{}^2 \frac{1}{\Omega_s} = \frac{P_{em}}{\Omega_s}$$

Il y a donc égalité entre les couples mécanique et électromagnétique. On obtient de plus les relations suivantes entre les puissances:

$$P_{meca} = \frac{\Omega_r}{\Omega_s} P_{em} = (1-g) P_{em}; \quad P_{JR} = P_{em} - P_{meca} = g P_{em}$$

1.6.3 - Puissance utile - Couple utile

La puissance mécanique utile est définie par la relation suivante: $P_u = P_{mec} - P_p$, en désignant par P_p les pertes

mécaniques. Le couple utile s'en déduit de la manière suivante:

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_r} = \frac{P_{mec} - P_p}{\Omega_r}$$

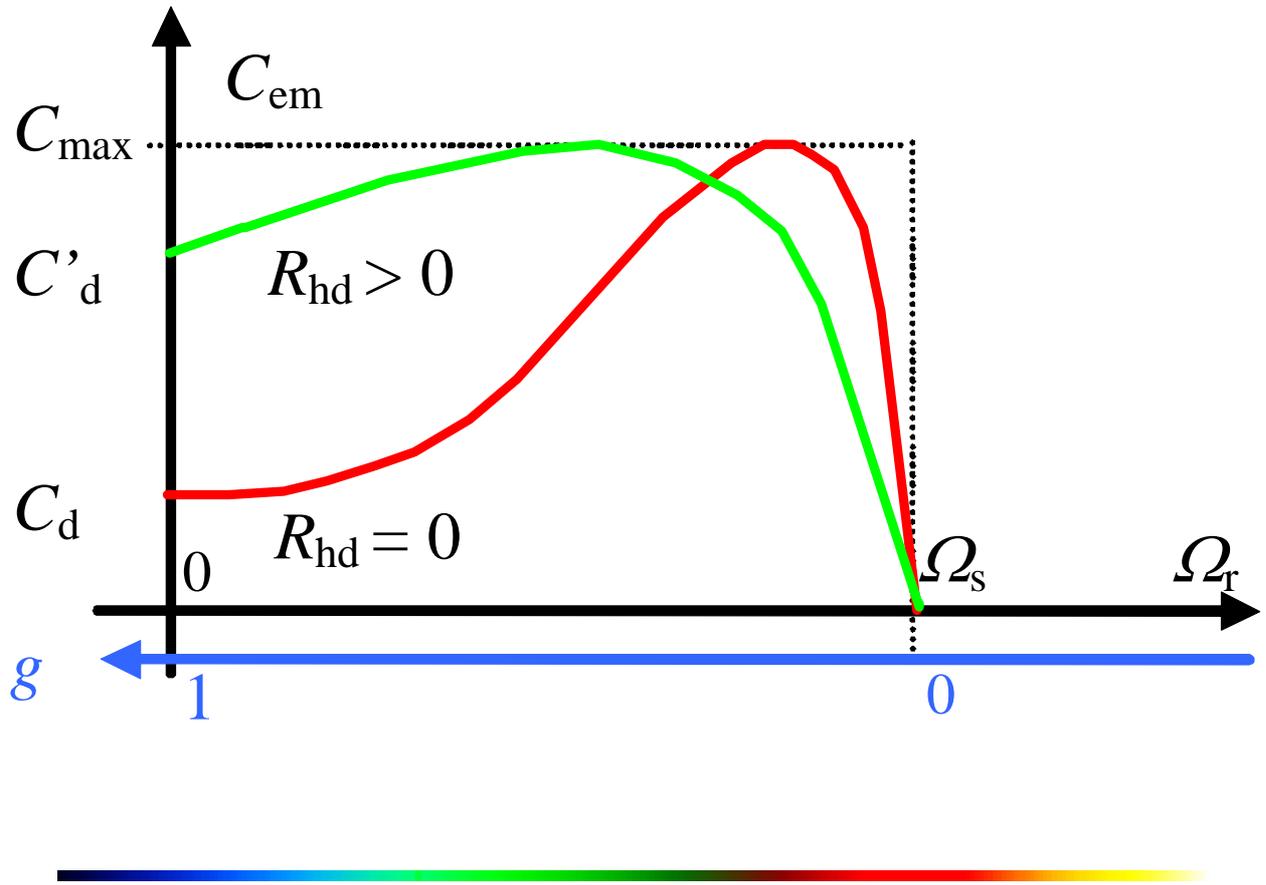
1.6.4 - Couple au démarrage de la machine asynchrone

Le couple instantané au démarrage est obtenu en remplaçant dans l'expression du couple électromagnétique g par un. On obtient l'approximation du couple de démarrage C_d suivante sachant que g_{max} est de l'ordre de 10%.

$$C_d \equiv 2C_{max} g_{max} = \frac{3 V_1^2}{2 \Omega_s} \frac{R'_2}{L'_2{}^2 \omega^2}$$

Cette quantité est généralement faible (10 à 20% du couple max.), et lorsque le moteur est chargé il peut ne pas démarrer.

Une solution consiste à augmenter artificiellement la résistance rotorique (par un rhéostat extérieur) pour accroître le couple au démarrage. Le rhéostat est progressivement court-circuité au fur et à mesure que le rotor prend de la vitesse. (Cf TP MAS)



I. Glossaire : sigles & acronymes.

I.1. Bibliographie

I.1.1. Web

<http://airalph.free.fr/> <http://www.meriweather.com/340/340-fd.html>

<http://meteosat.pessac.free.fr/IMA/>

I.2. Glossaire : sigles & acronymes.

A300- A310 (Wide Body)

Famille A320 (Single Aisle)

A330-A340 (Long range)

A380 (Double Deck)

Engine Indication and Crew Alert System (EICAS)

Glossaire :

- [OSI](#) : *Open Systems Interconnection*
- [ISO](#) : *International Standards Organization*
- [IETF](#) : *Internet Engineering Task Force*
- [IEEE](#) : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- [ITU](#) : *International Telecommunication Union*
- **CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection:**