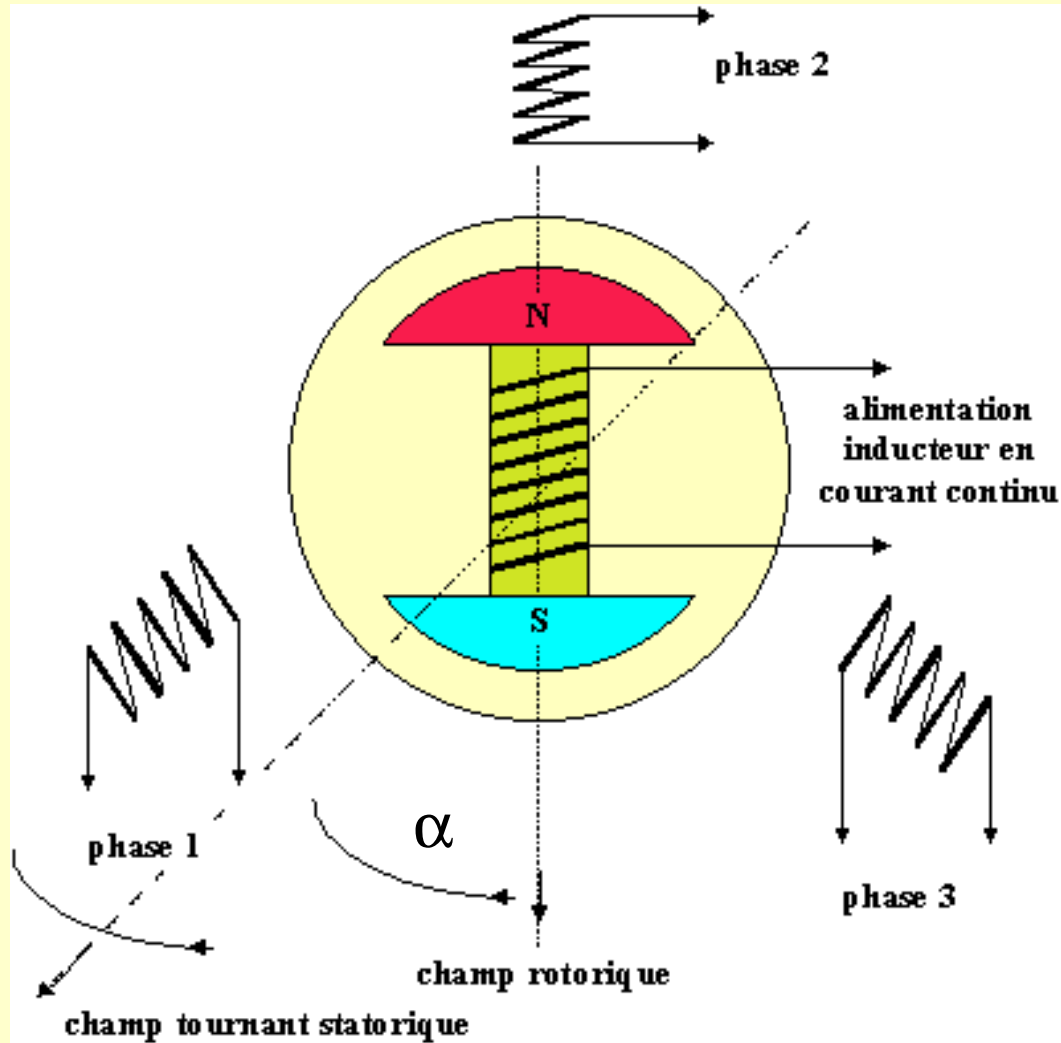


Polytech'Nice-Sophia

Machines Synchrones

GENERALITES

Schéma de principe



Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie (rotor) est égale à la vitesse de rotation du champ tournant généré par les bobinages statoriques.

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.

Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

Si le rotor est bobiné la valeur du champ magnétique rotorique B_r peut être réglée en jouant sur le courant continu I_r .

RELATION ENTRE VITESSE ET NOMBRE DE PAIRES DE PÔLES

<i>valeurs</i>	<i>normalisées</i>
nb paires pôles p	n (tr/min)
1	3000.0
2	1500.0
3	1000.0
4	750.0
5	600.0
6	500.0
7	428.6
8	375.0
10	300.0
12	250.0
16	187.5
20	150.0
24	125.0
32	93.8
40	75.0

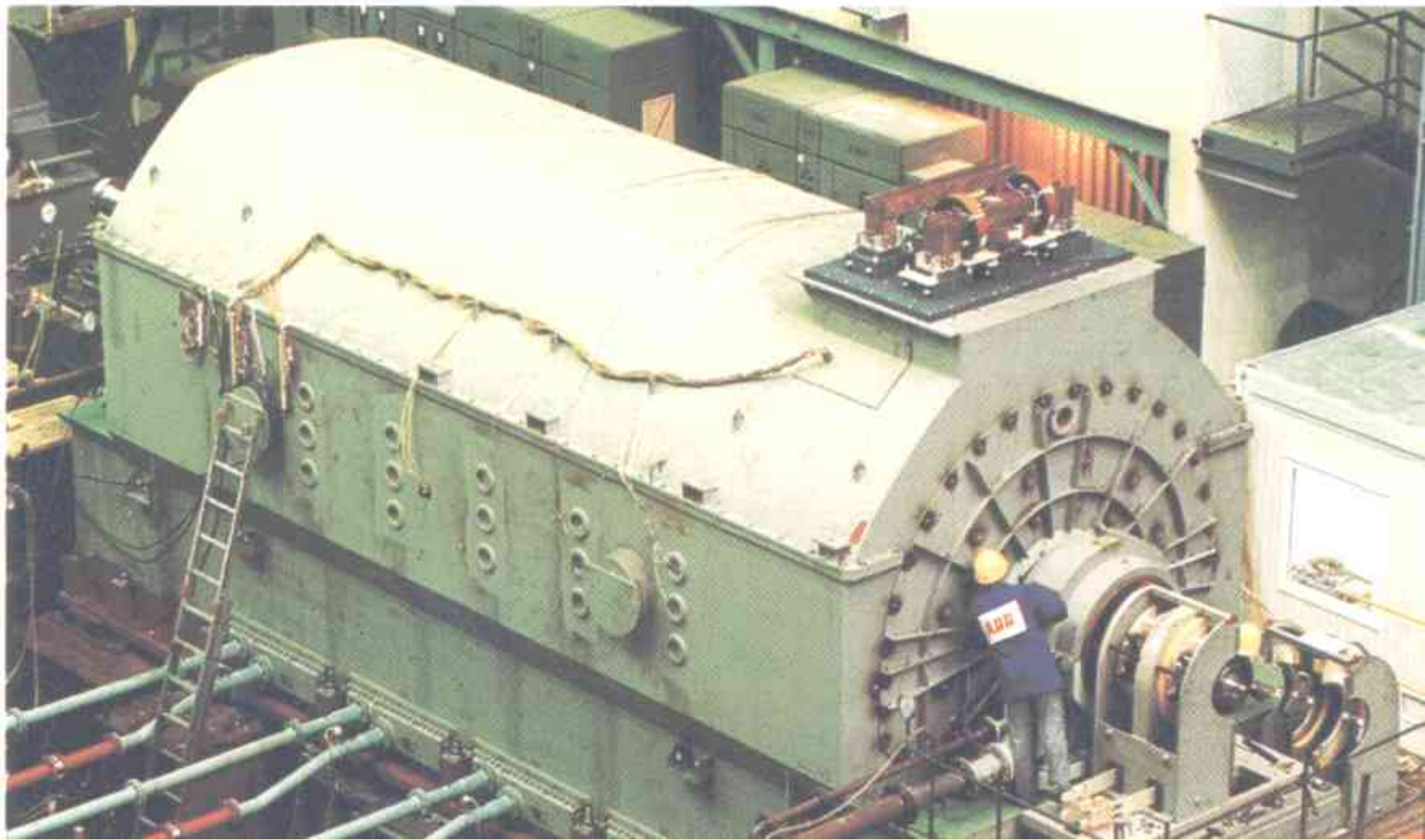
$$\Omega_s(\text{rd/s}) = \omega_s/p = 2\pi f/p$$

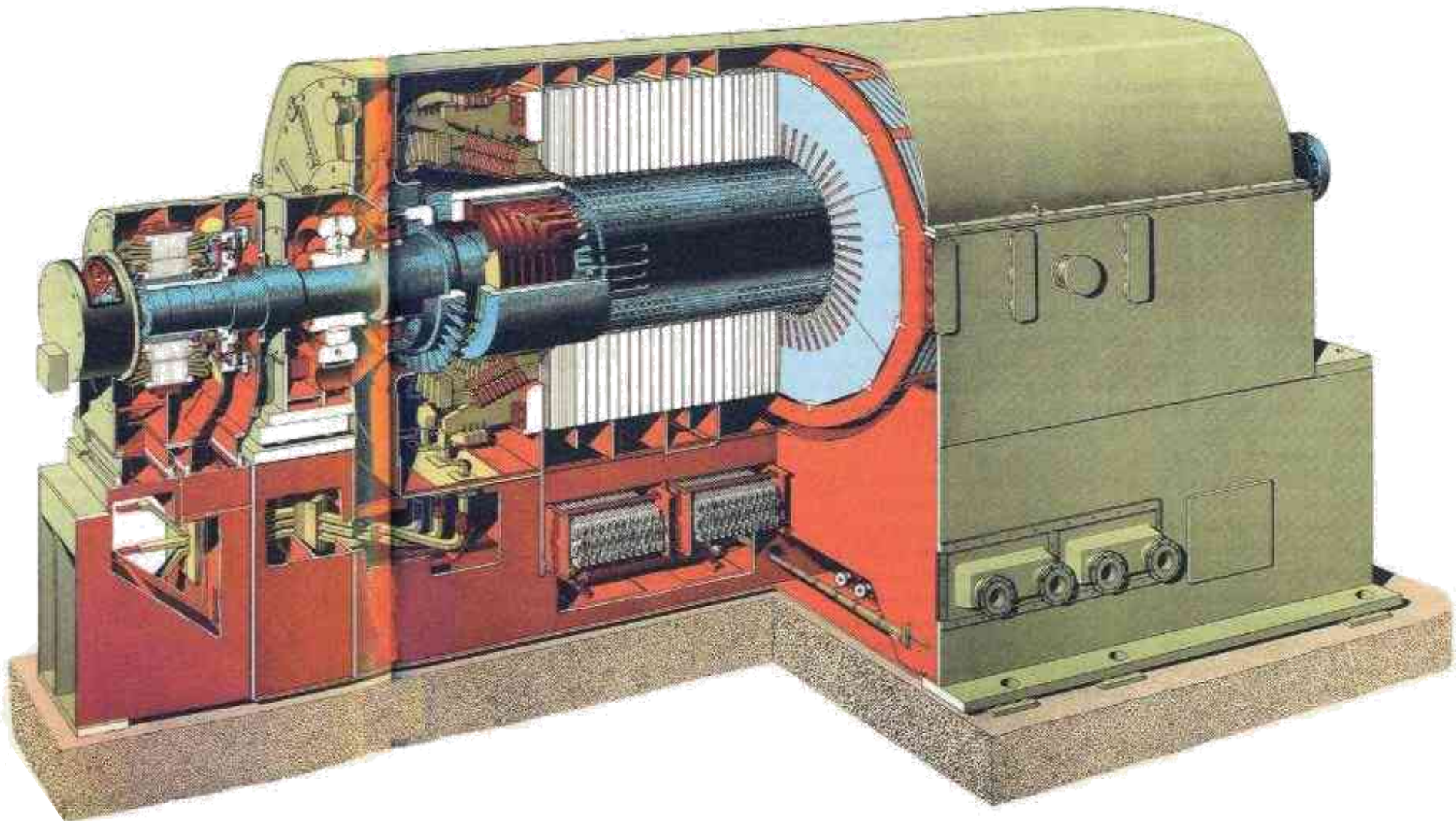
$$N_s(\text{tr/min}) = 60\Omega_s/(2\pi) = 60f/p$$

EXPERIENCE



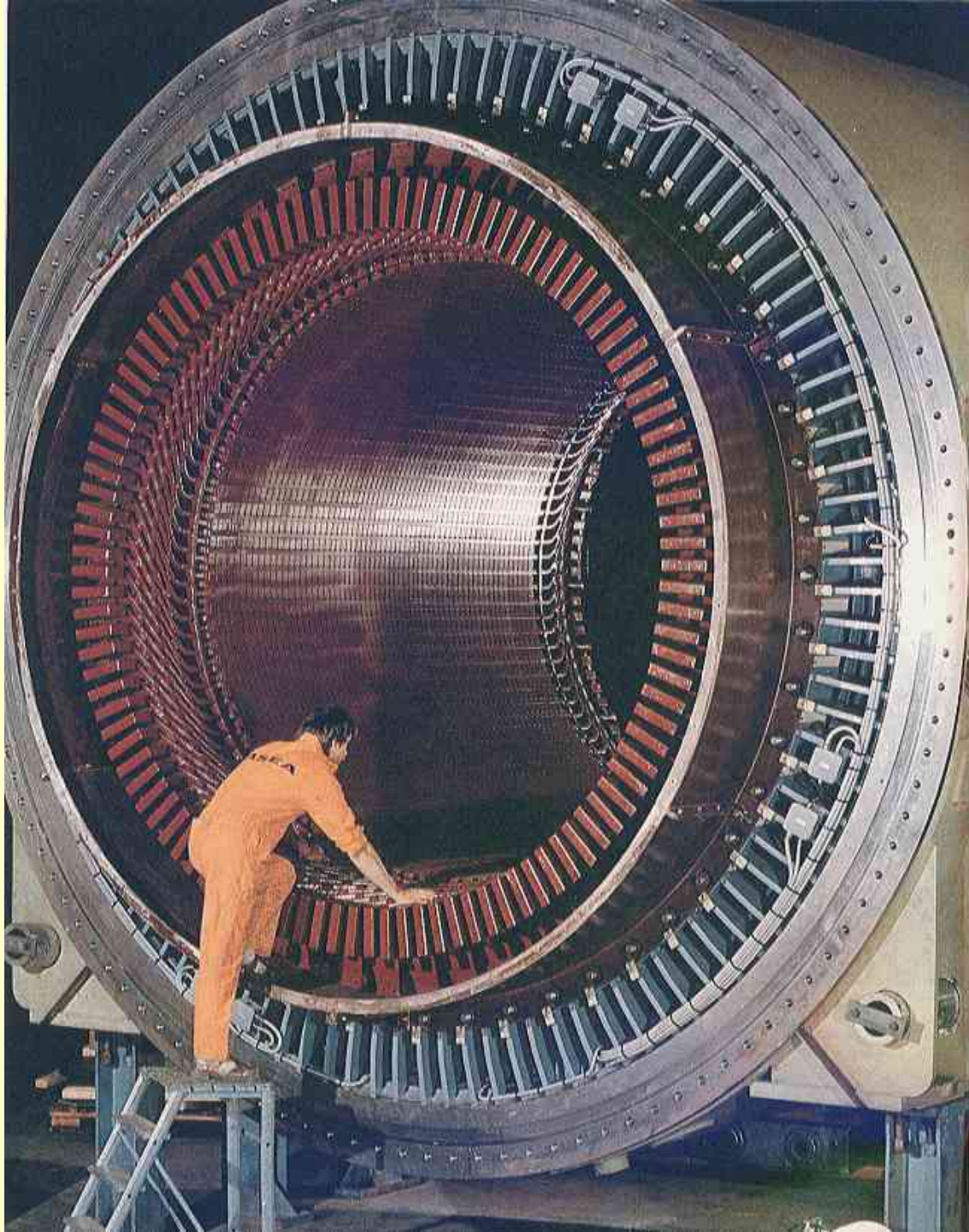
TECHNOLOGIE





LE STATOR

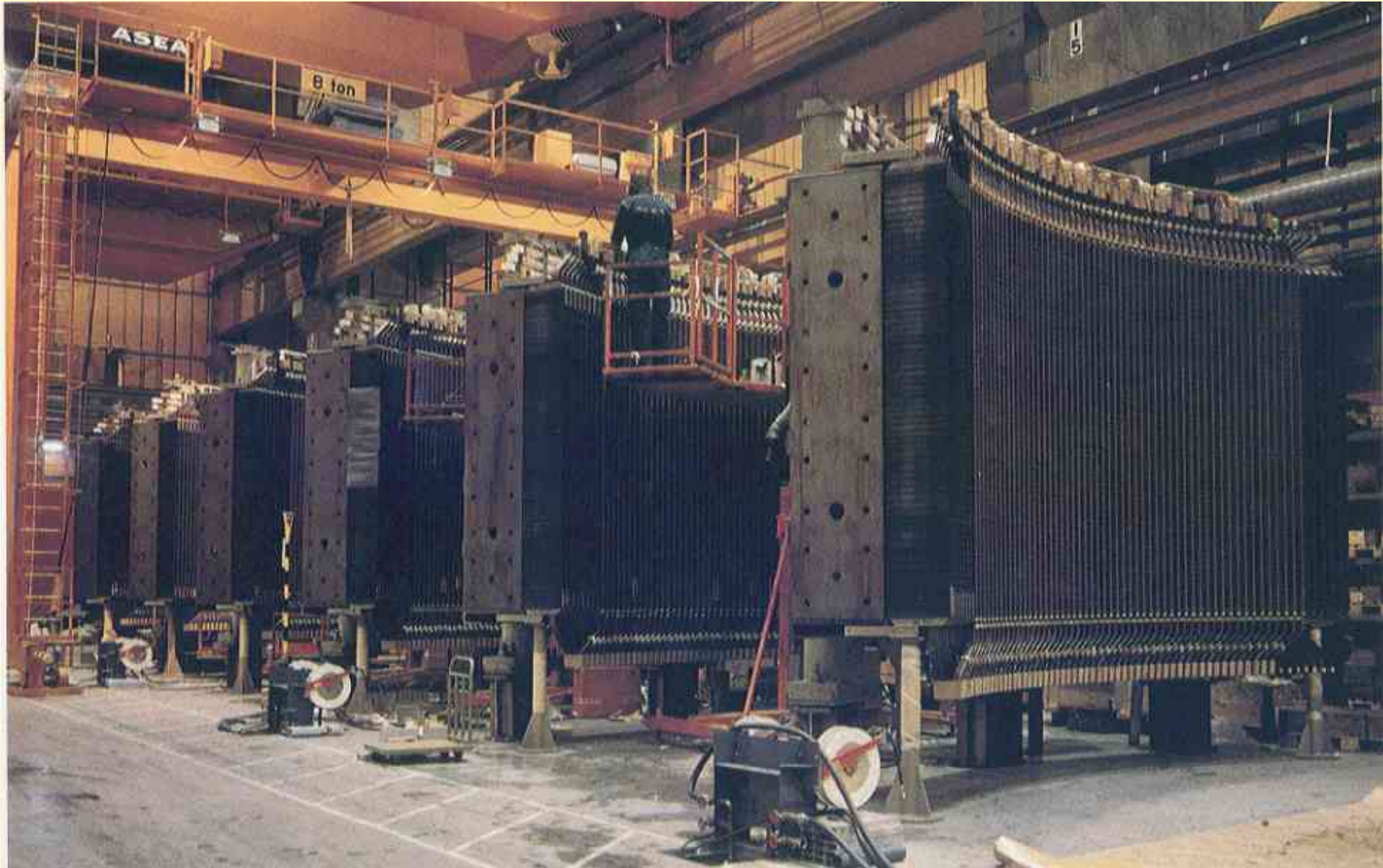
Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

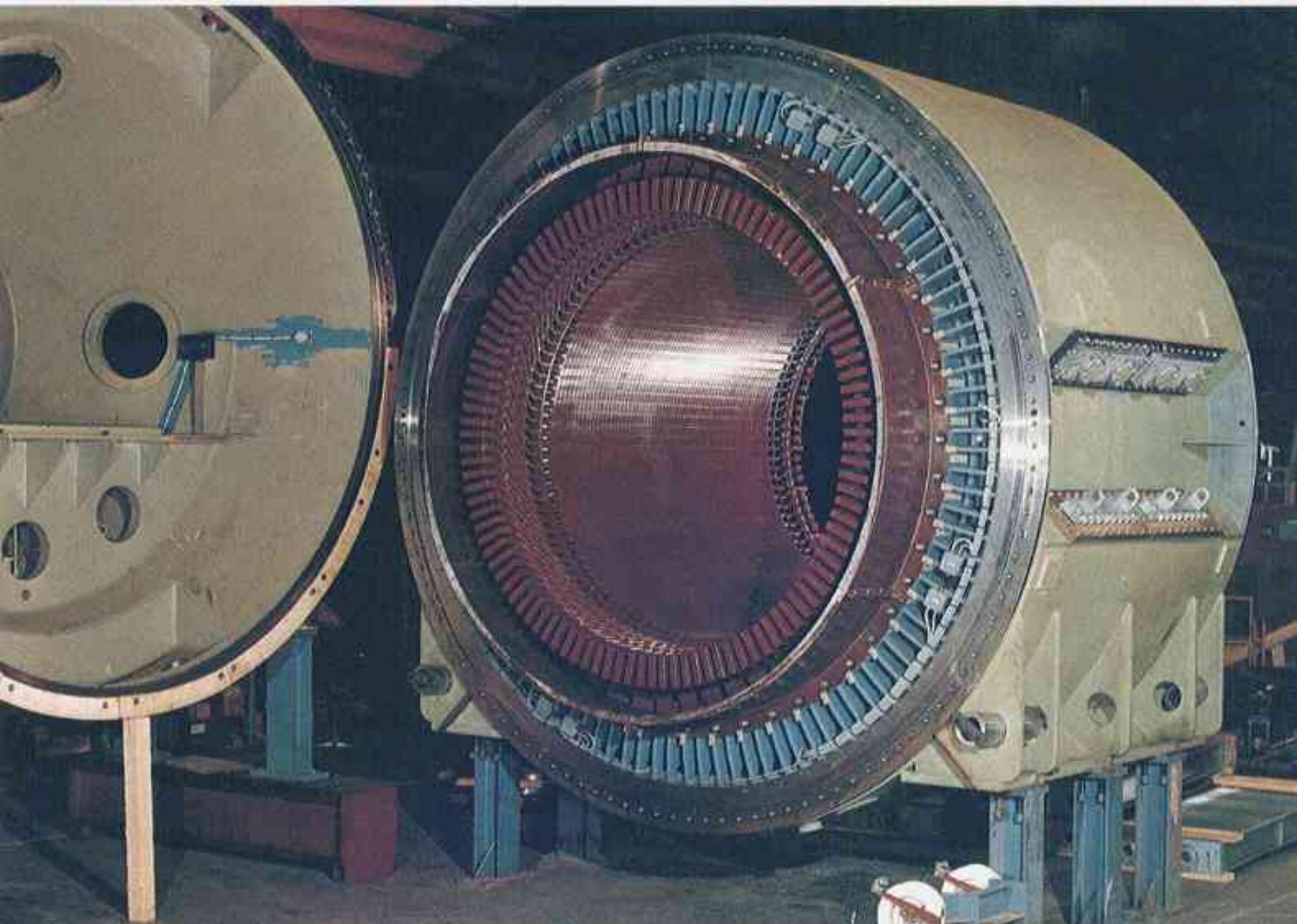


Enroulement turbo-alternateur 825 MVA, 20 kV



Enroulements sections stator alternateur 300 MVA centrale de Chicoasén Mexique



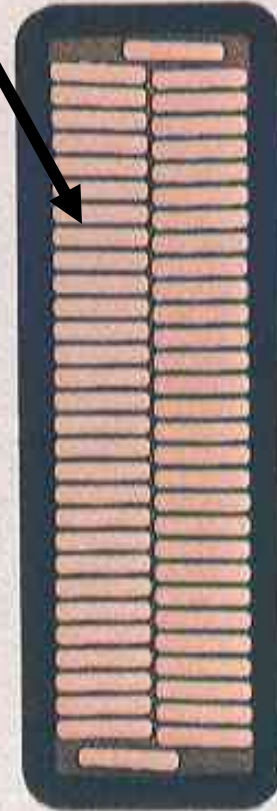
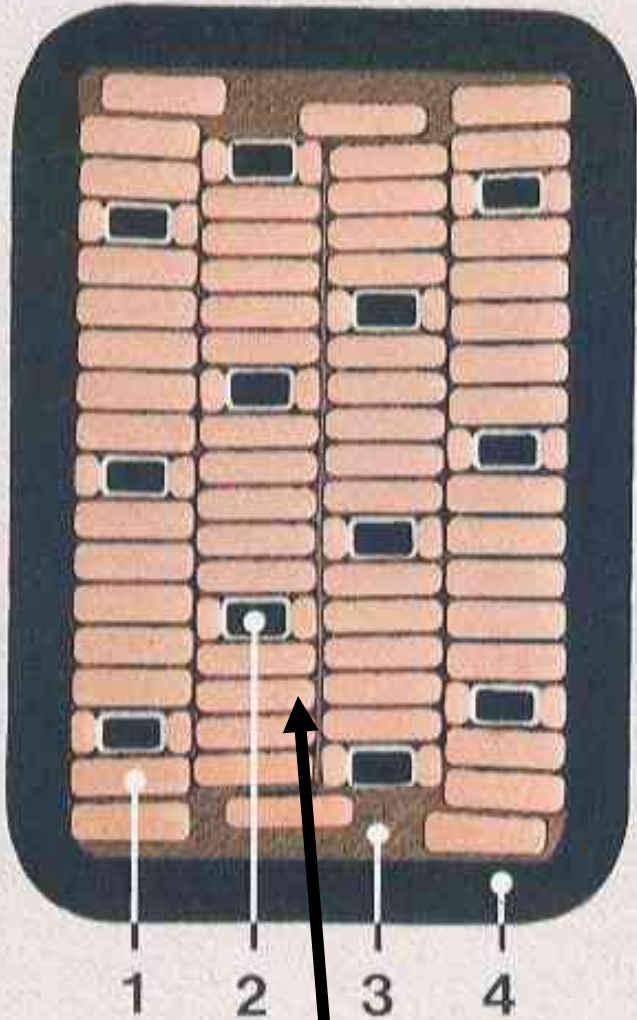


Compensateur synchrone de 200 MVA

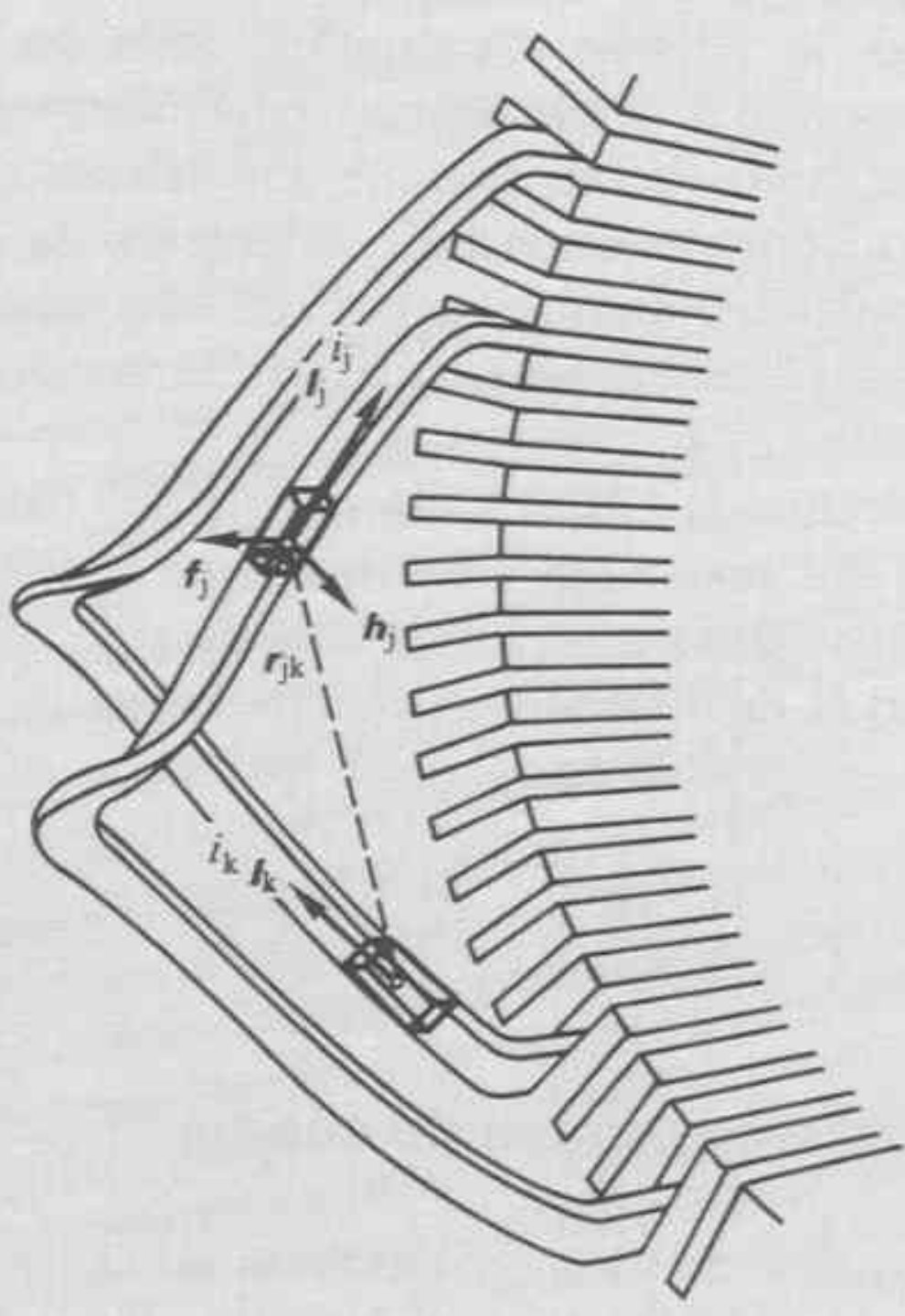
Enroulements terminaux d'un alternateur de centrale hydroélectrique



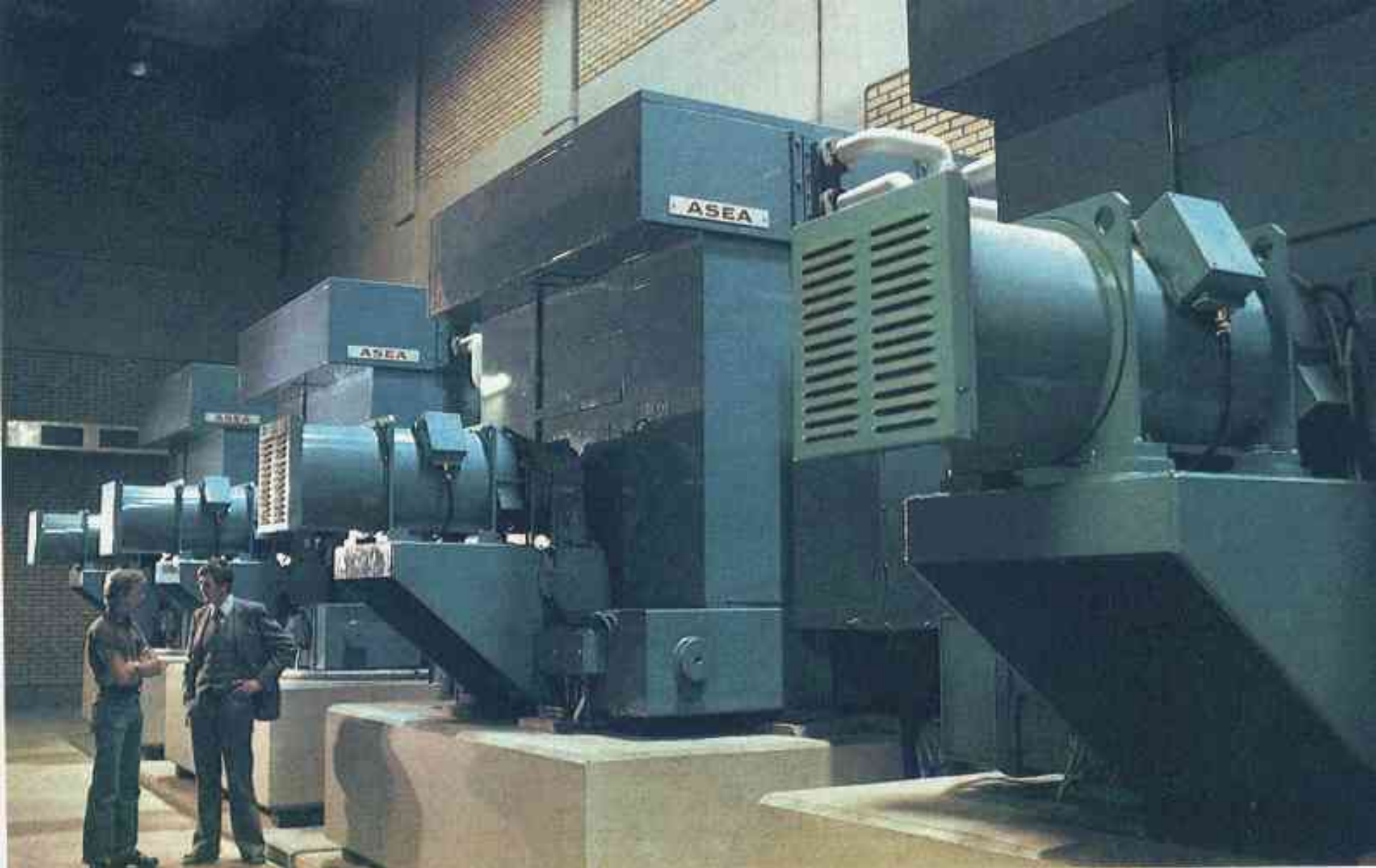
a
Barre en deux piles, refroidissement indirect
b
Barre simple, refroidissement indirect
c

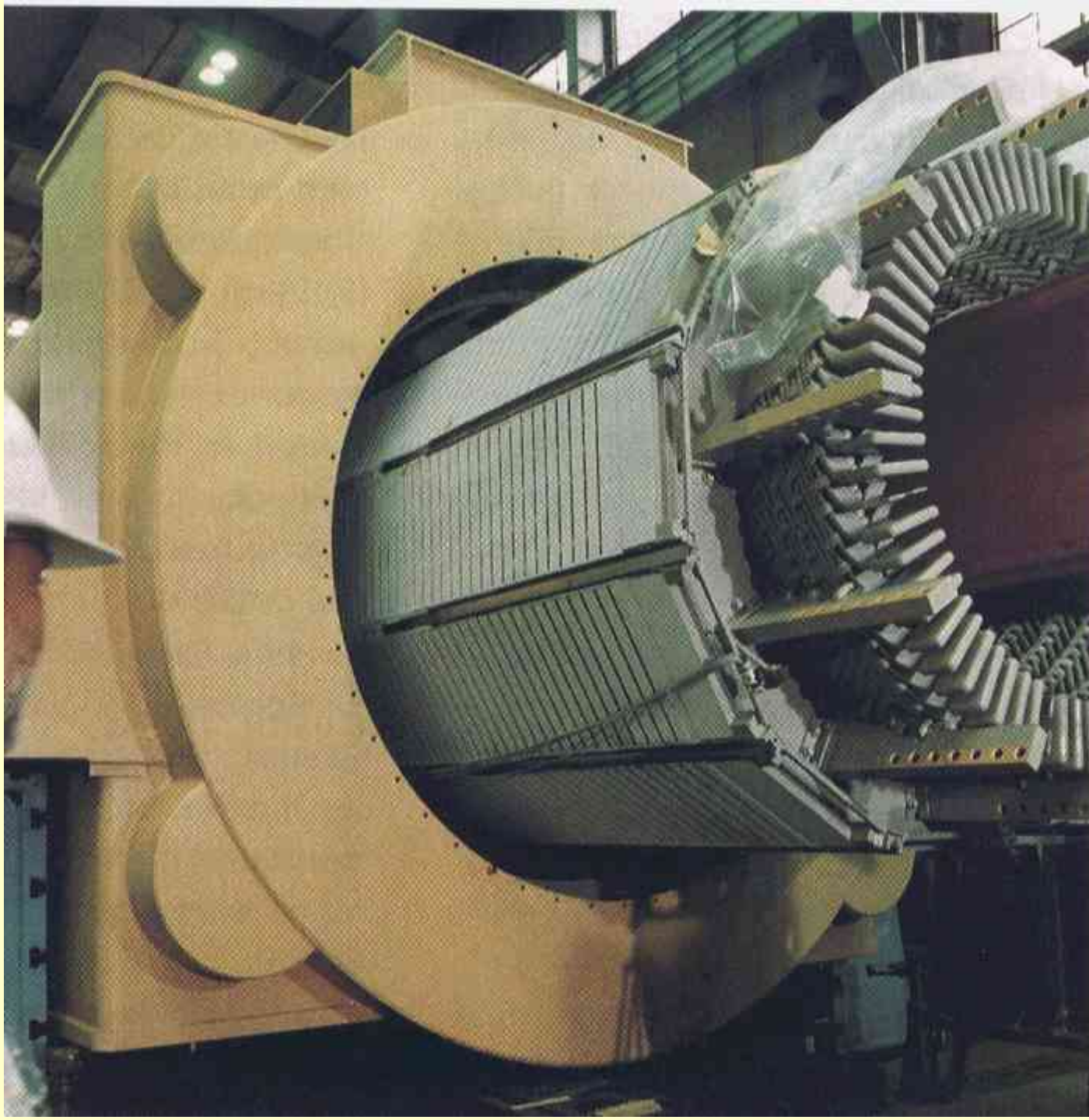


Barre en quatre piles à refroidissement liquide direct









LE ROTOR

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique:

- à pôles lisses ;

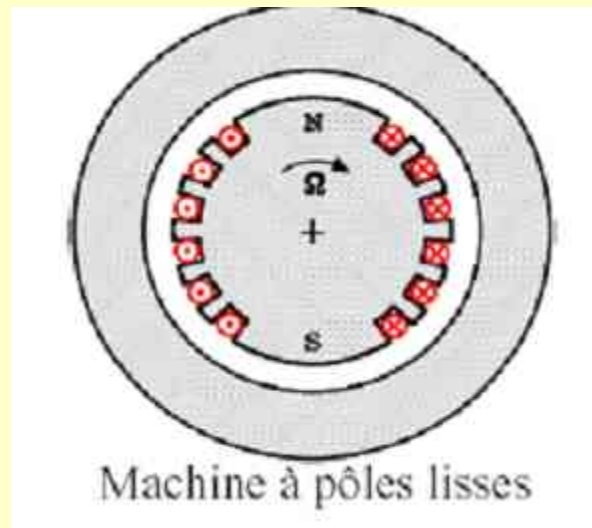
- à pôles saillants;

- à aimants.

Les rotors à pôles lisses

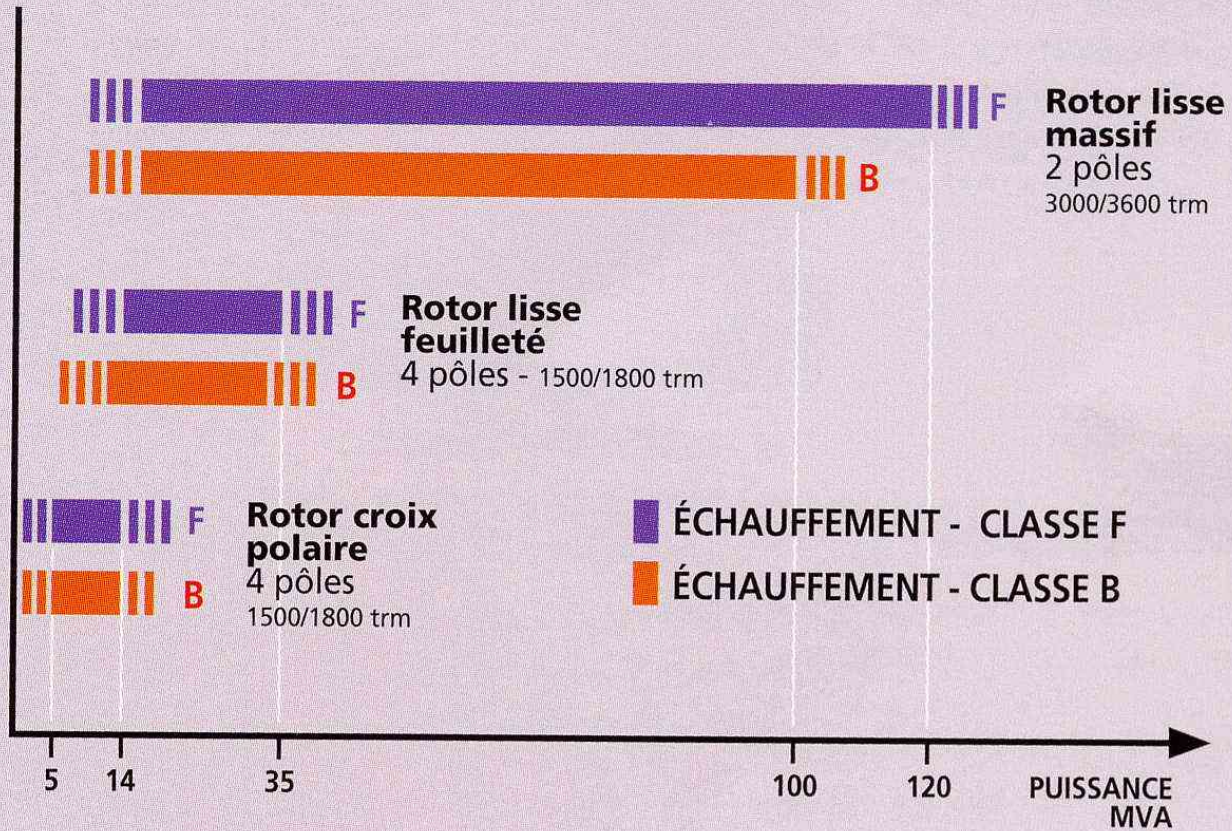
Dans ce type de machine, L'entrefer est constant. Le rotor est de faible diamètre devant sa longueur. Il est utilisé pour des vitesses élevées (3000tr/min). On les retrouve dans les turbo-alternateurs des centrales thermiques. Il faut donc peu de pôles pour obtenir du 50 Hz.

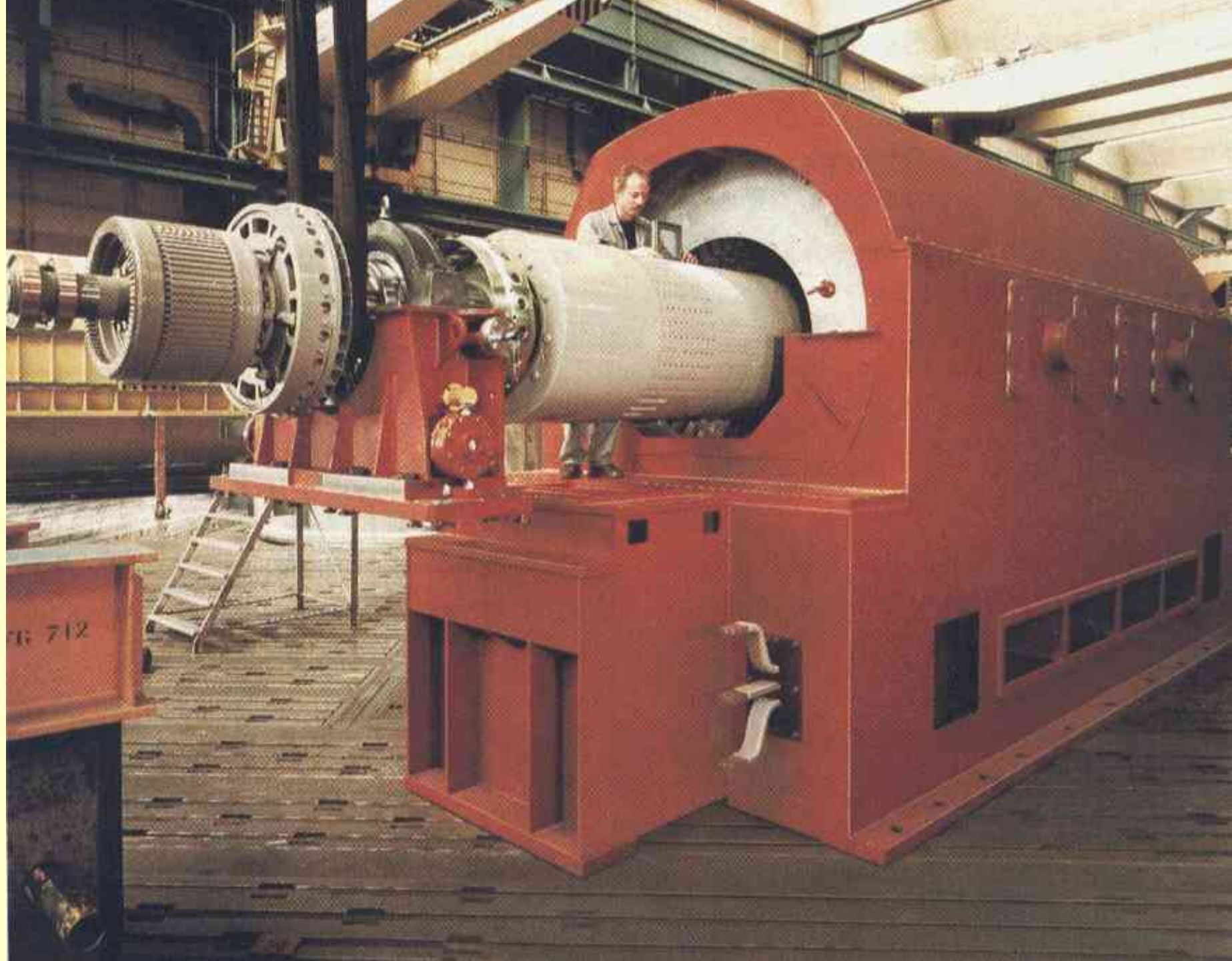
nb paires pôles p	n (tr/min)
1	3000
2	1500
rotor refroidi à l'hydrogène stator refroidi à l'eau	



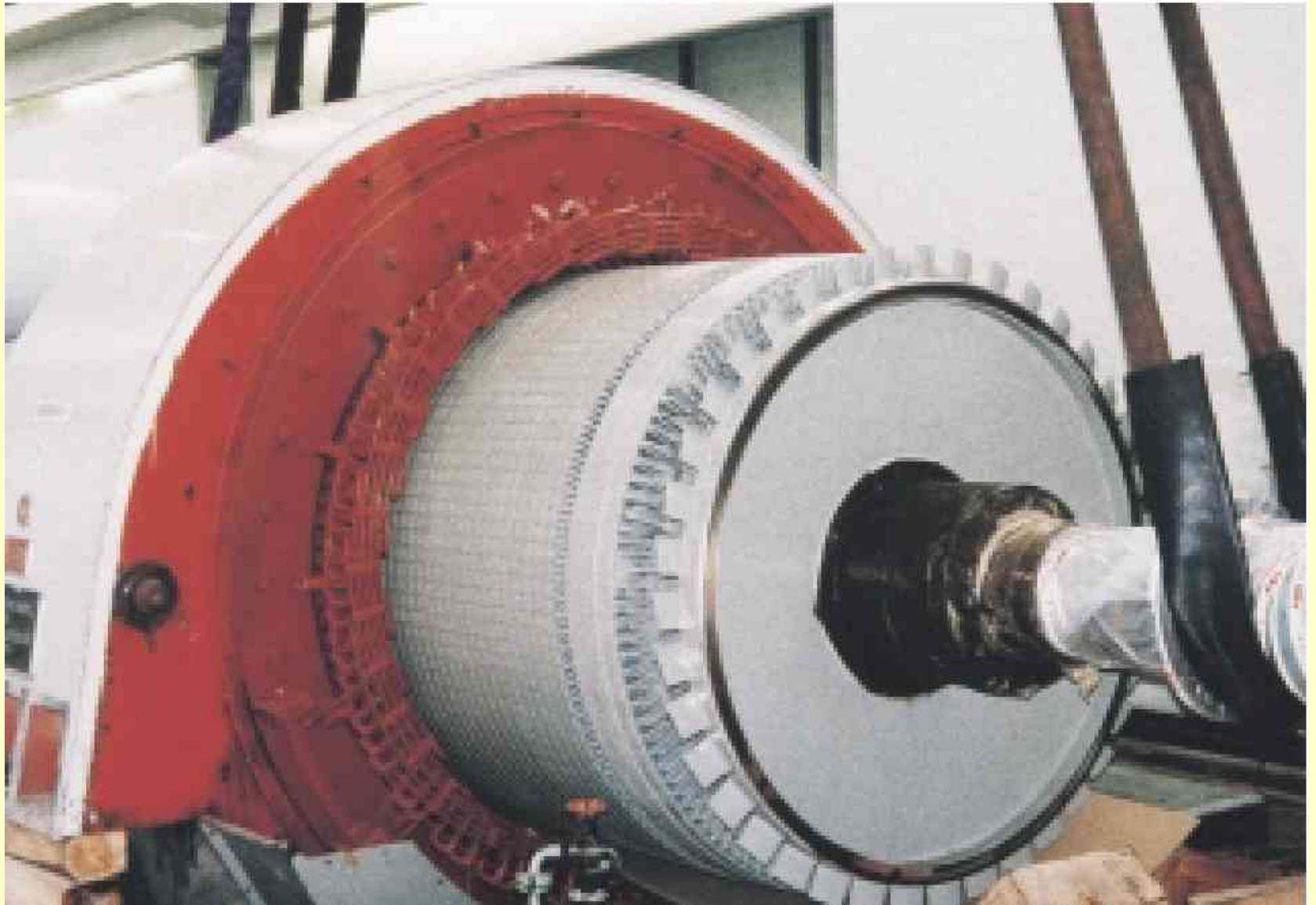
$$P = 1$$

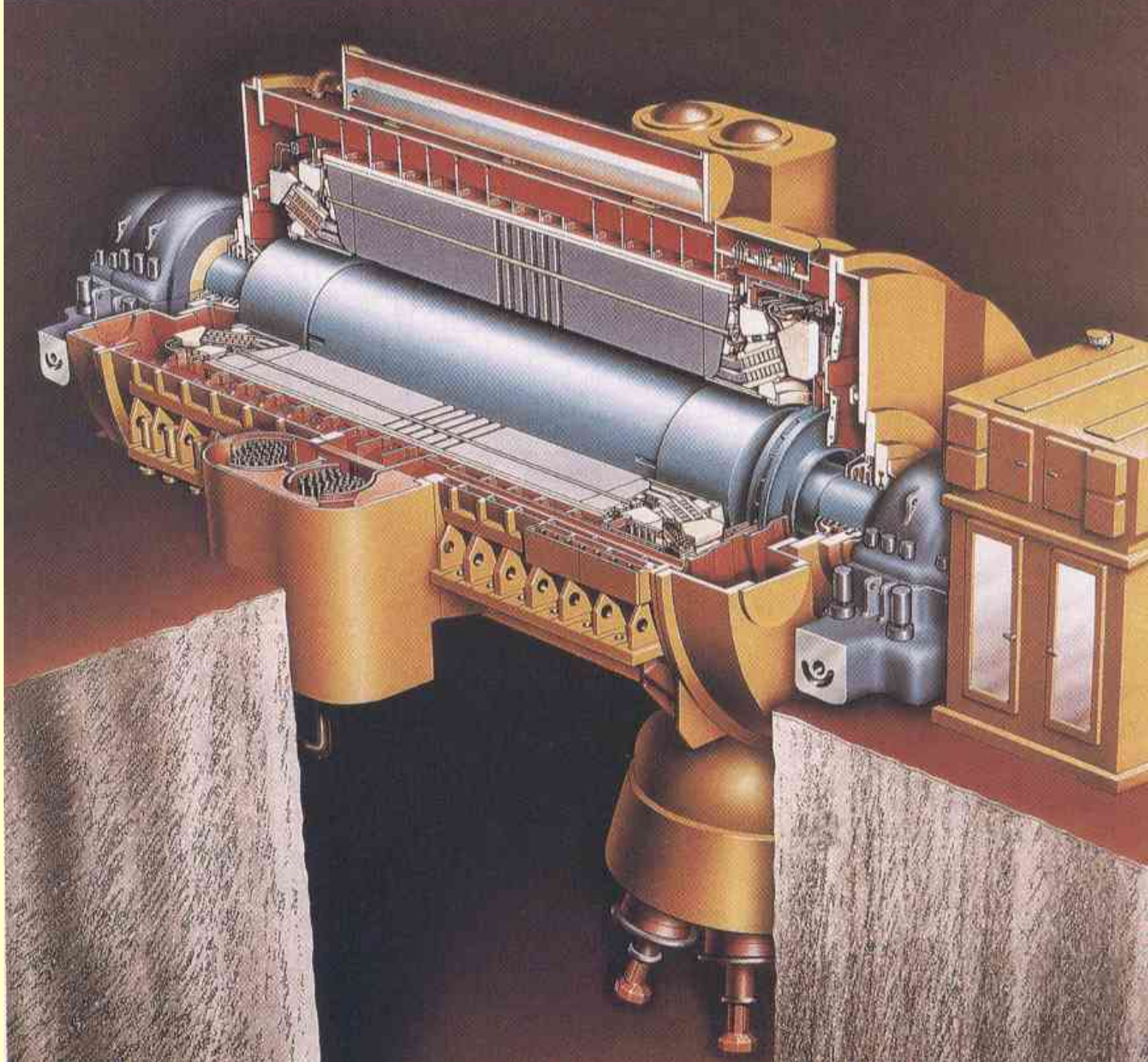
DIFFÉRENTES SOLUTIONS TECHNIQUES

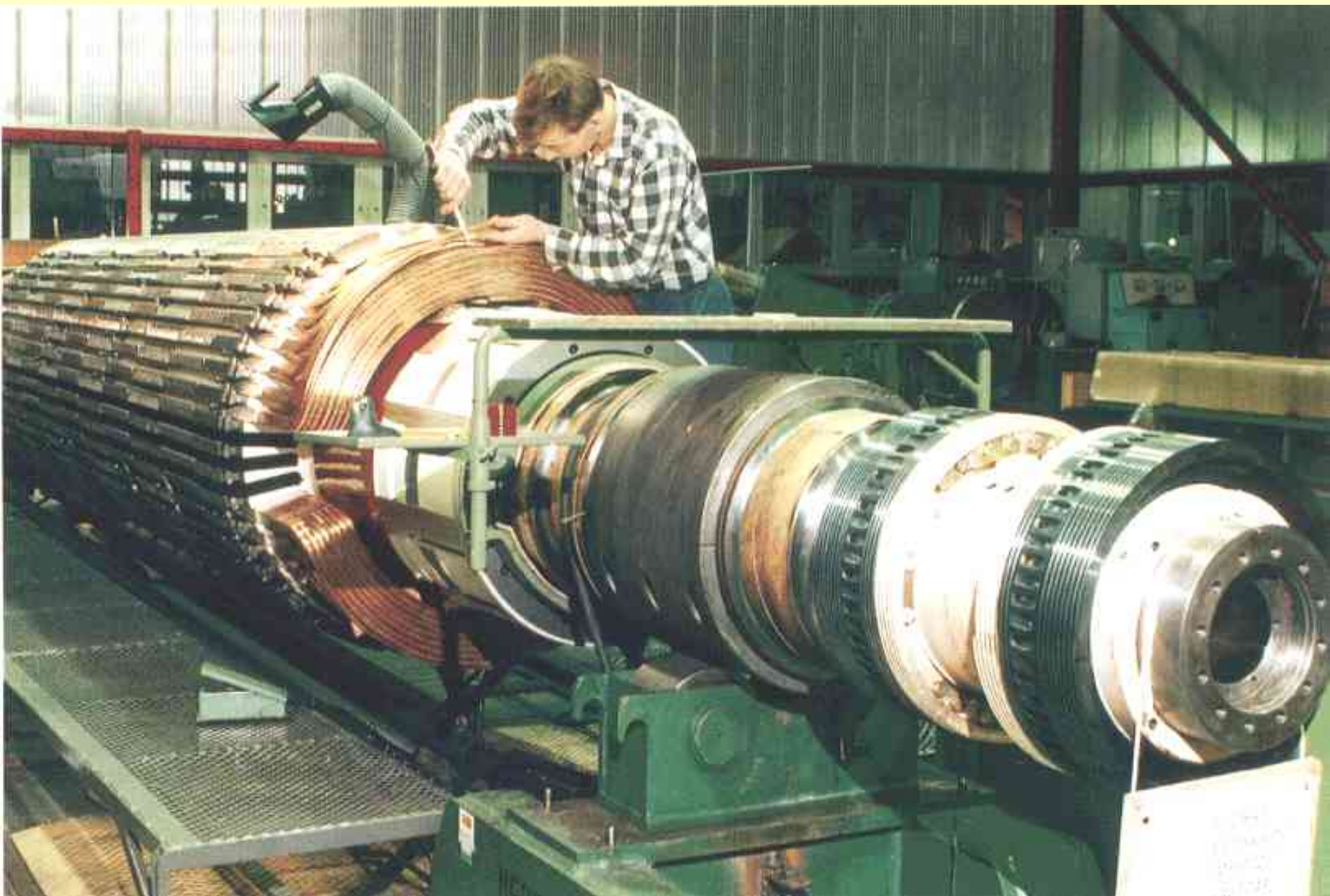


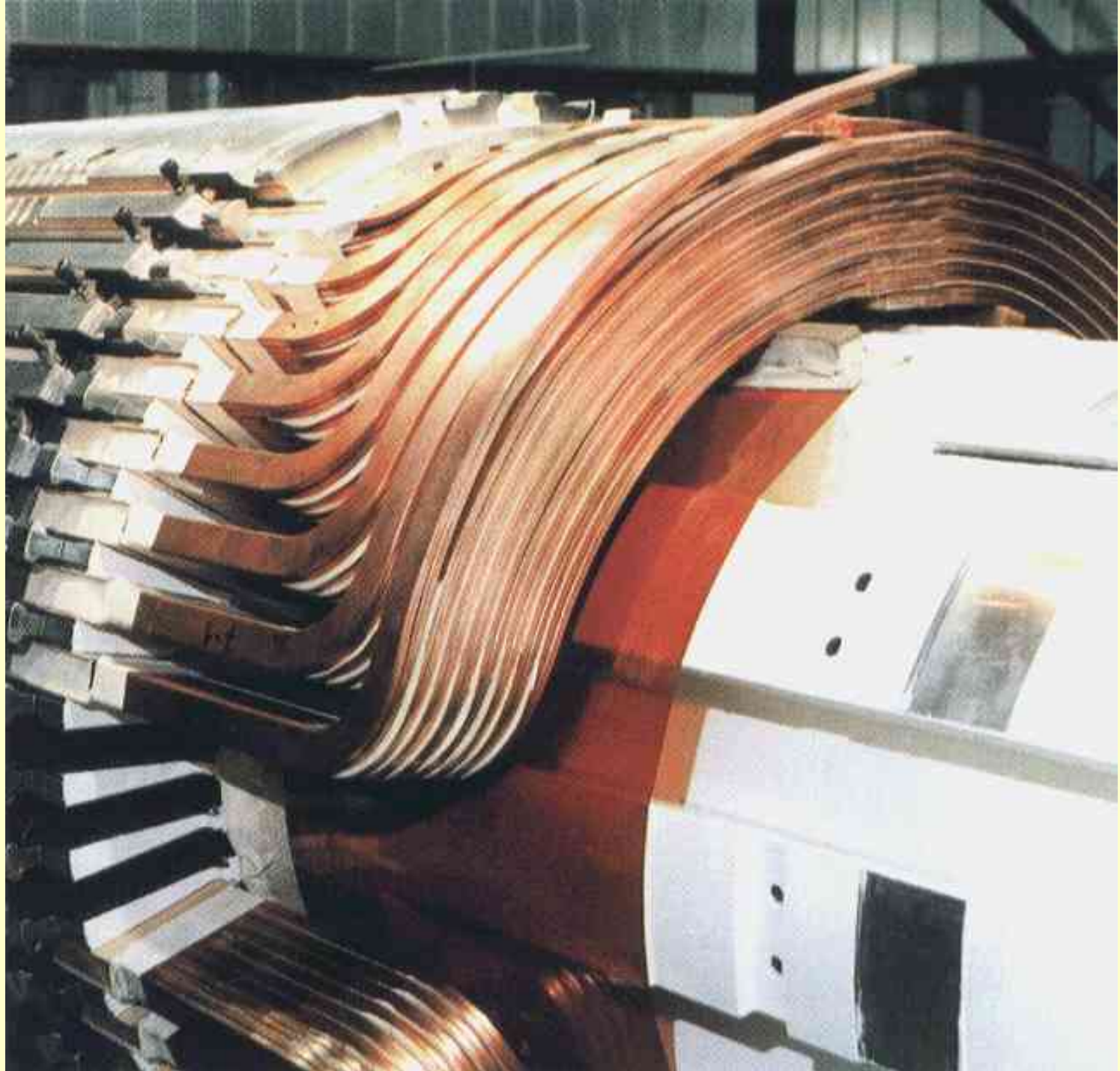


712

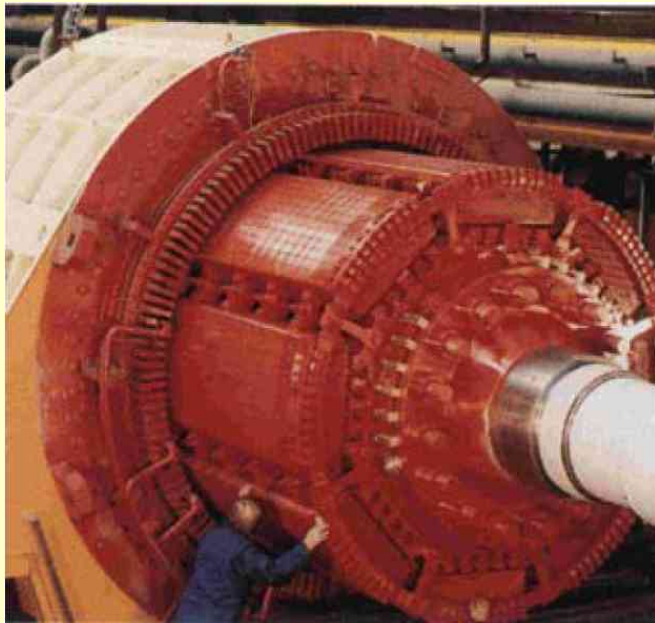








Les rotors à pôles saillants



50 MW Alstom

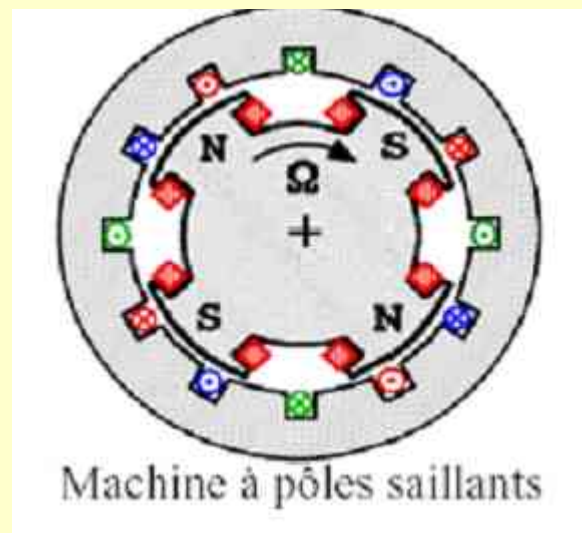


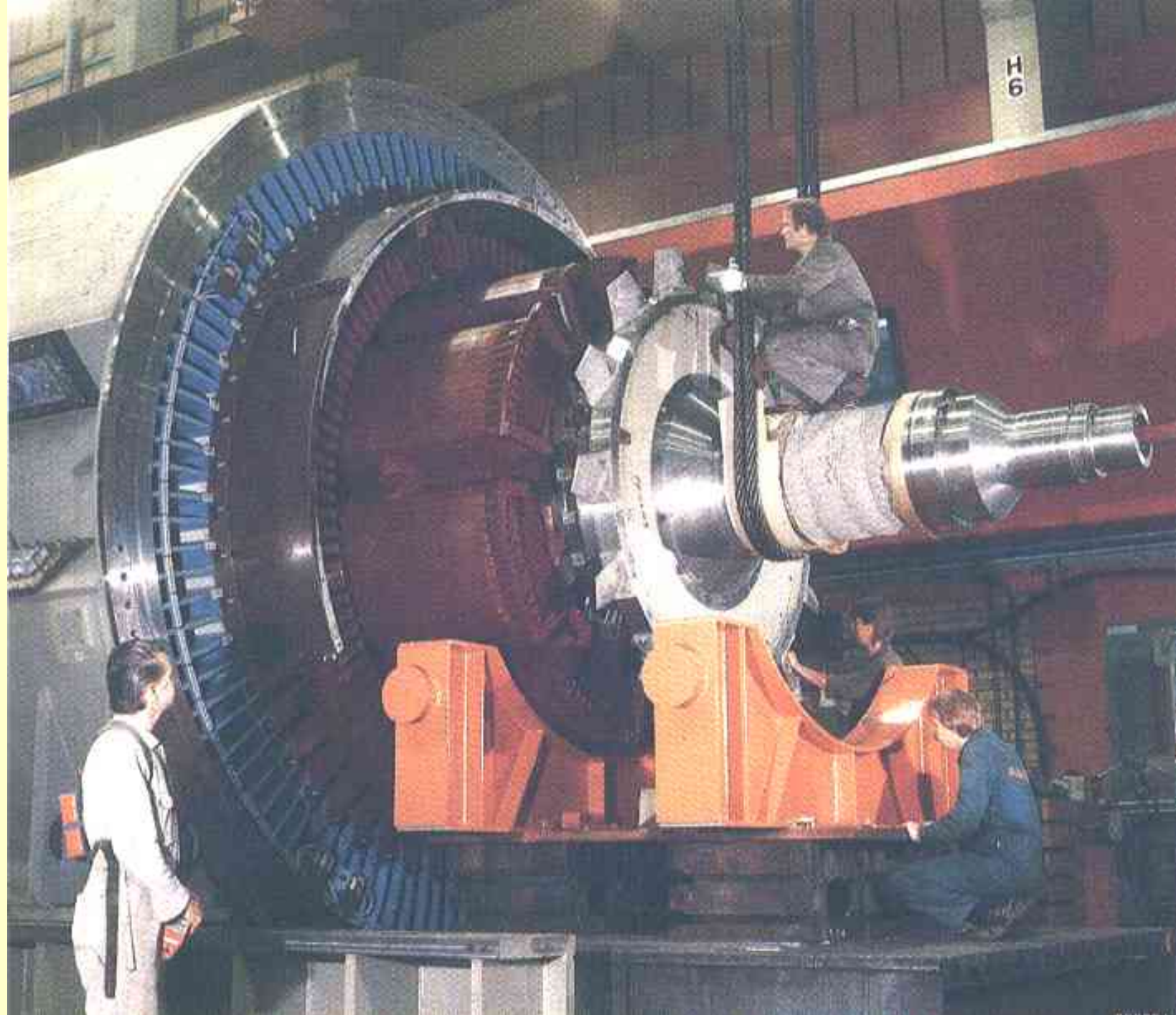
100 MW ABB

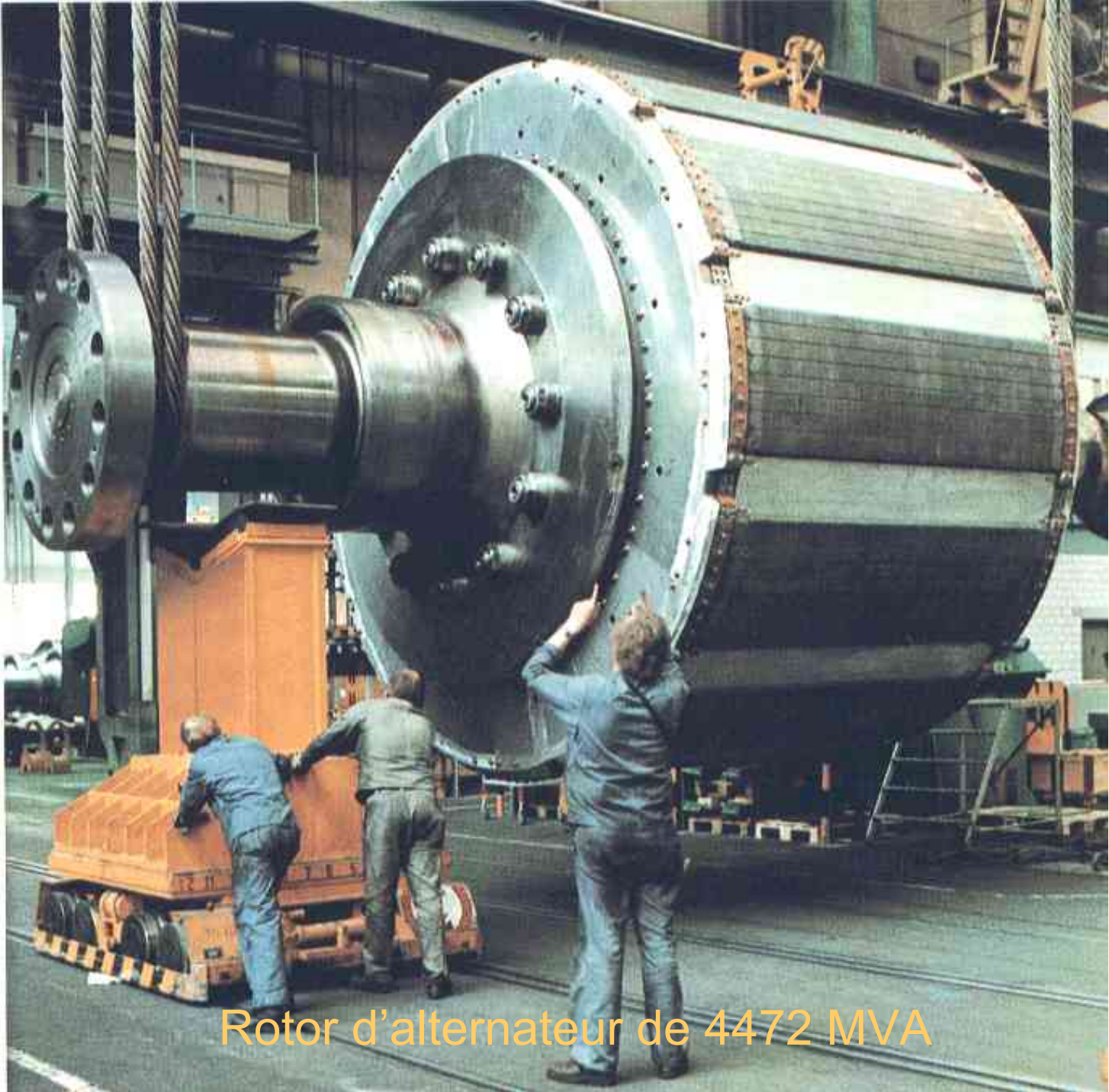
Utilisé pour les machines à faible vitesse (turbines hydrauliques).

Comporte un nombre important de pôles (60 pôles $n=100$ tr/min, pour l'usine marémotrice de la Rance).

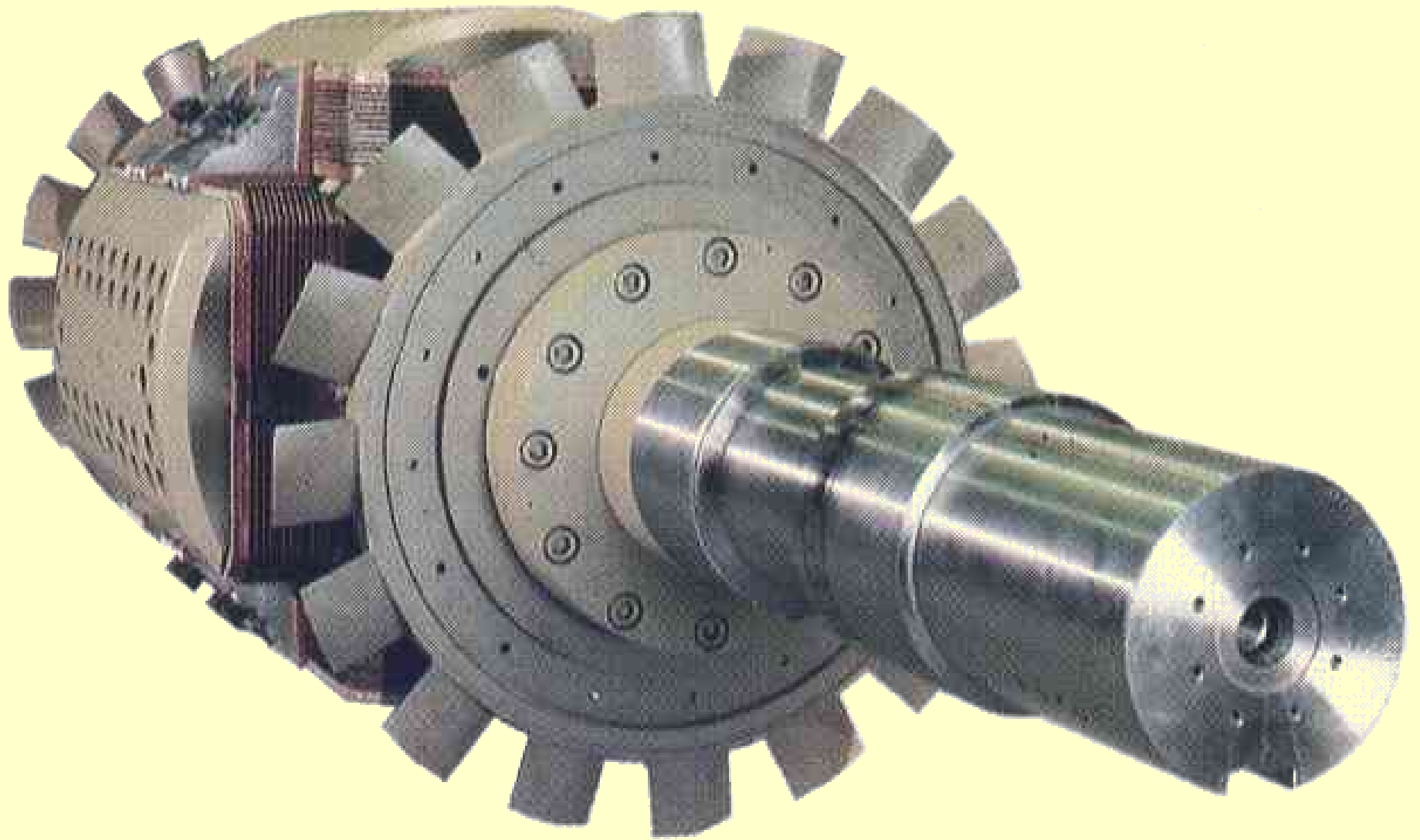
Grand diamètre du rotor devant la longueur.







Rotor d'alternateur de 4472 MVA







Plages de raccordement des câbles de puissance
Connection board for power cables

Boîte à bornes
Terminal box

Stator
Stator

Ventilateur
Fan

Capot grillage de sortie d'air
Air outlet grid

Bobinage induit
Armature winding

Pôles du rotor
Rotor poles

Bobinage inducteur
Field coil

Carcasse à pattes
Foot mounted frame

Fentes d'entrée d'air
Air inlet slippers

Plaque support des presse-étoupes
Support plate for cable gland

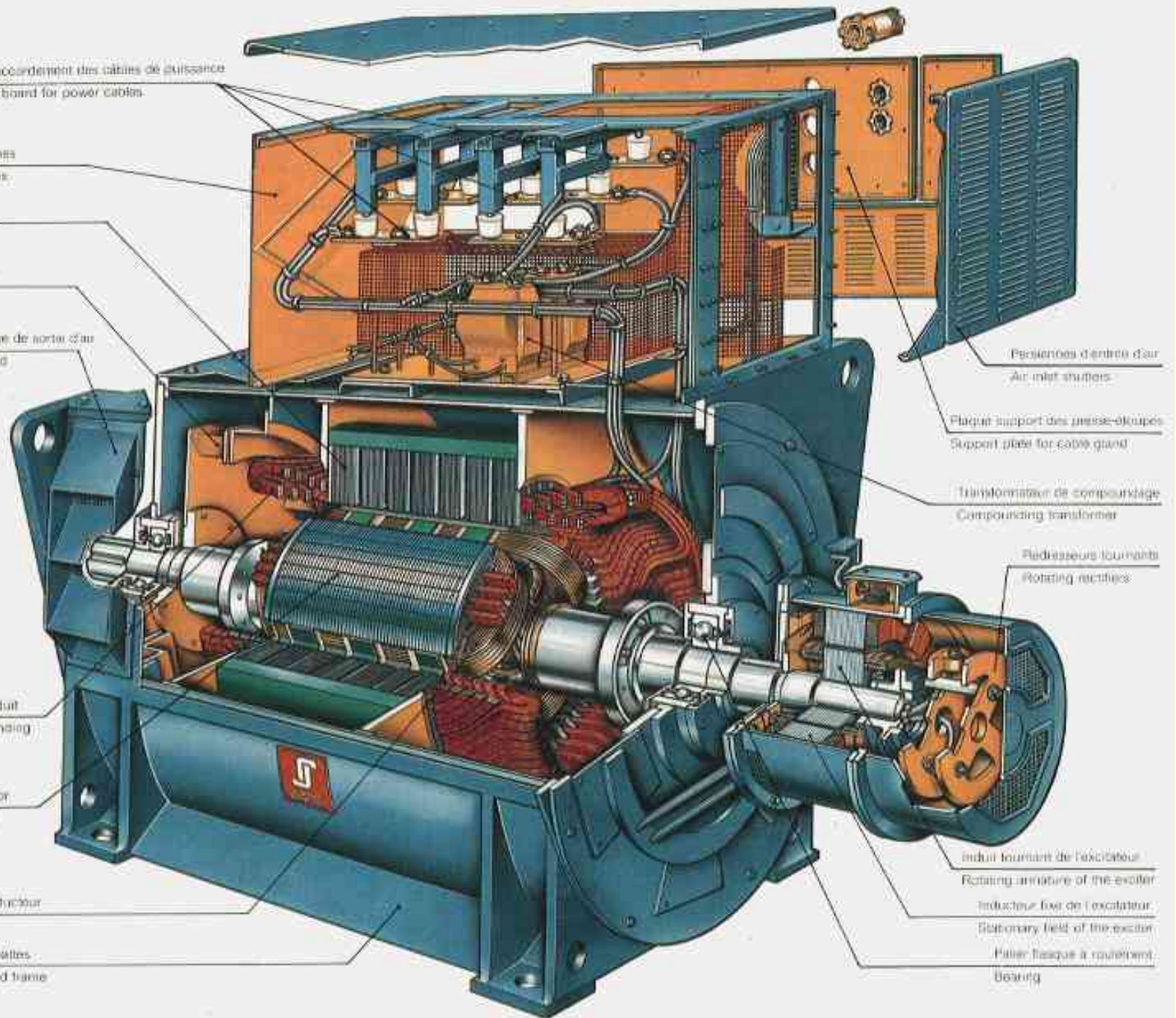
Transformateur de compensation
Compounding transformer

Redresseurs tournants
Rotating rectifiers

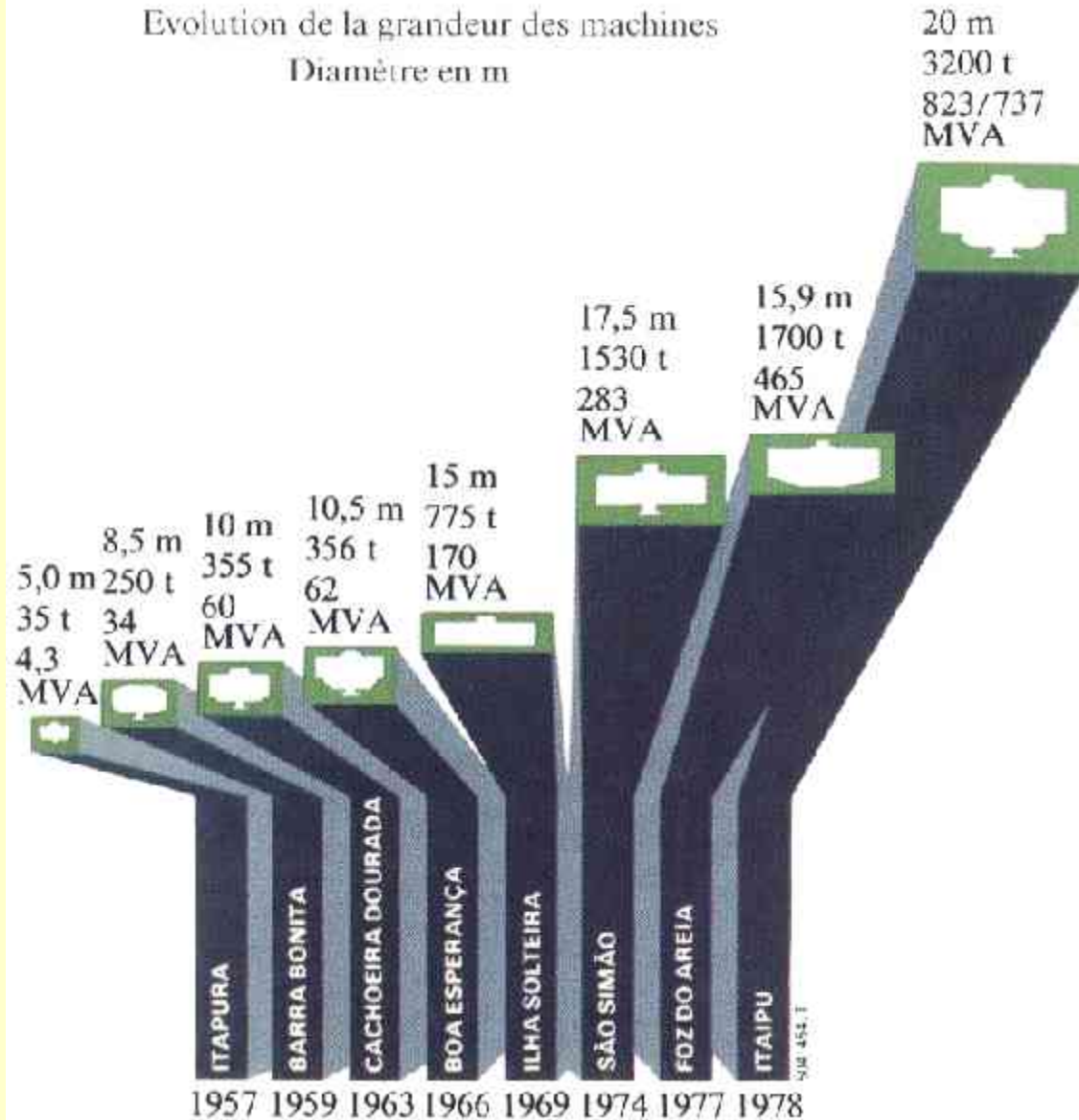
Induit tournant de l'excitateur
Rotating armature of the exciter

Inducteur fixe de l'excitateur
Stationary field of the exciter

Filtre basique à roulement
Bearing

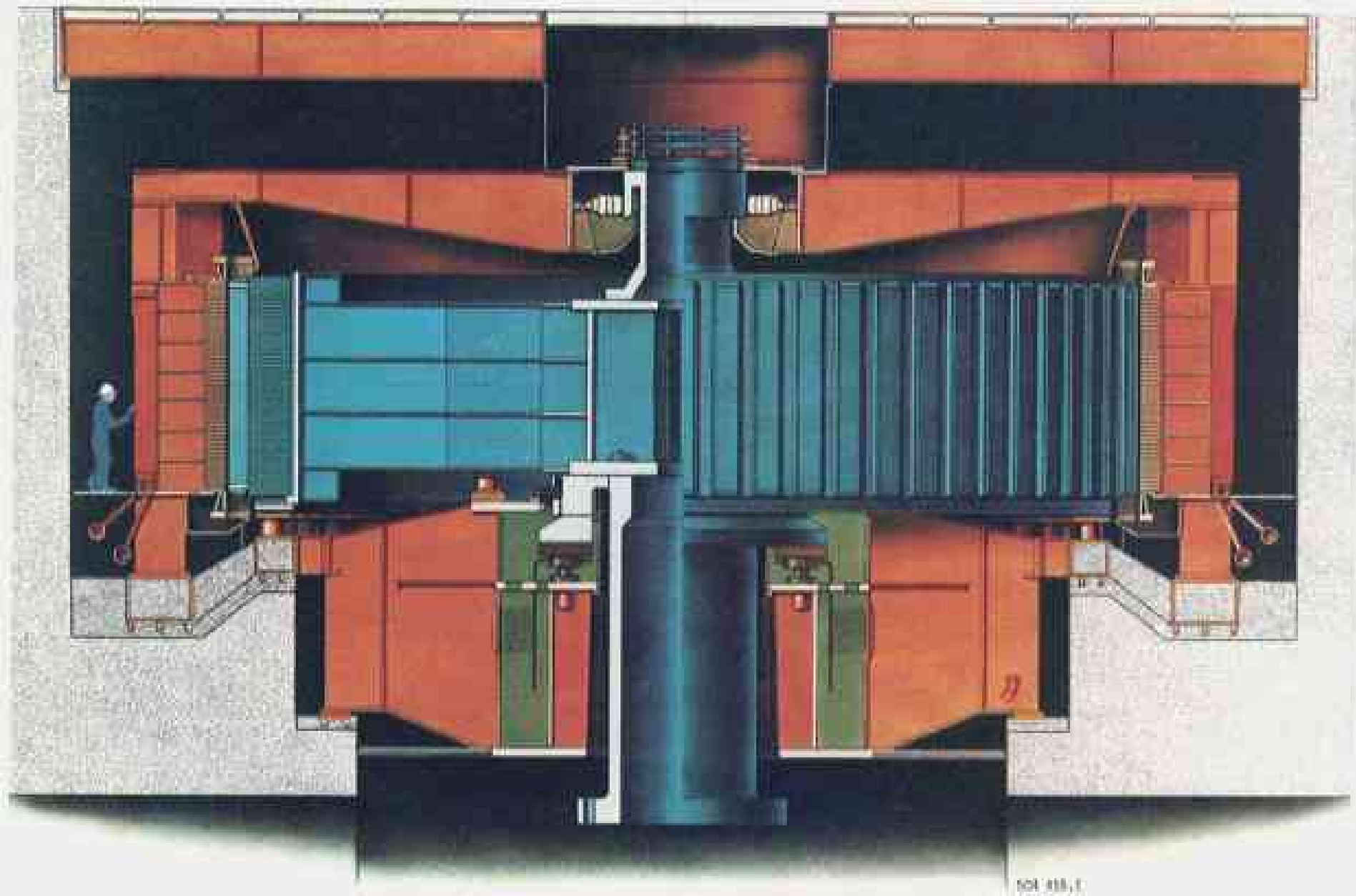


Evolution de la grandeur des machines
Diamètre en m





Centrale de São Simão, 6 alternateurs,
diamètre 17,5 m, 282 MVA

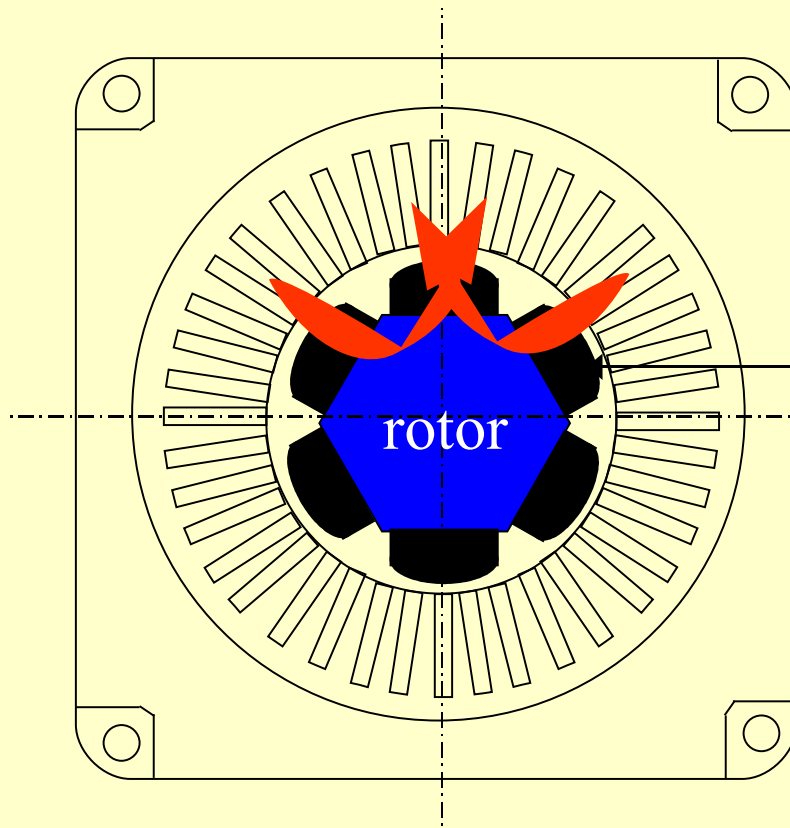


Centrale Itaipù, coupe d'un alternateur

Les rotors à aimants



Machine 6 pôles

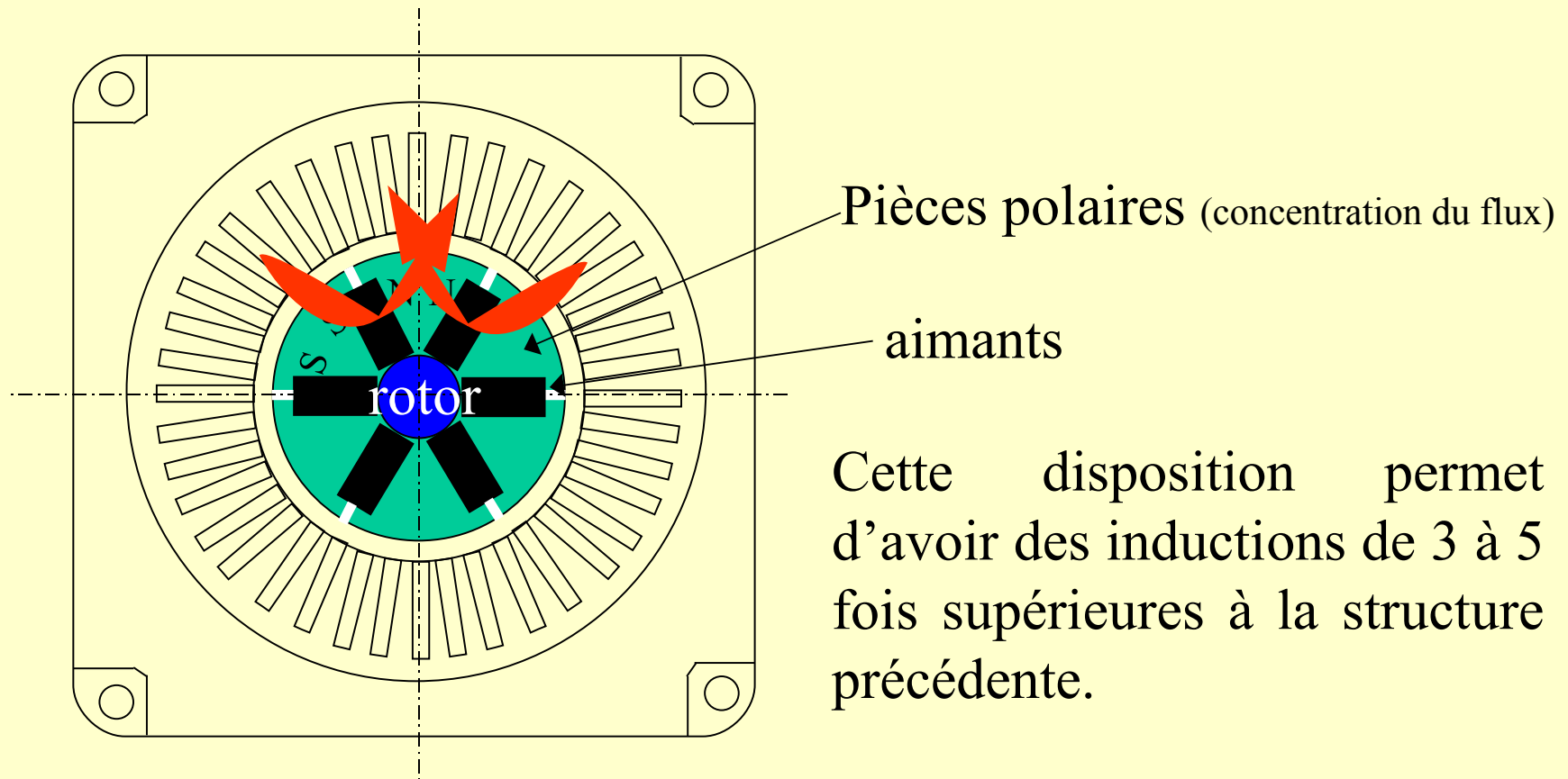


Les aimants sont disposés en tuiles.

Ils peuvent être collés, vissés ou enserrés dans une frette amagnétique

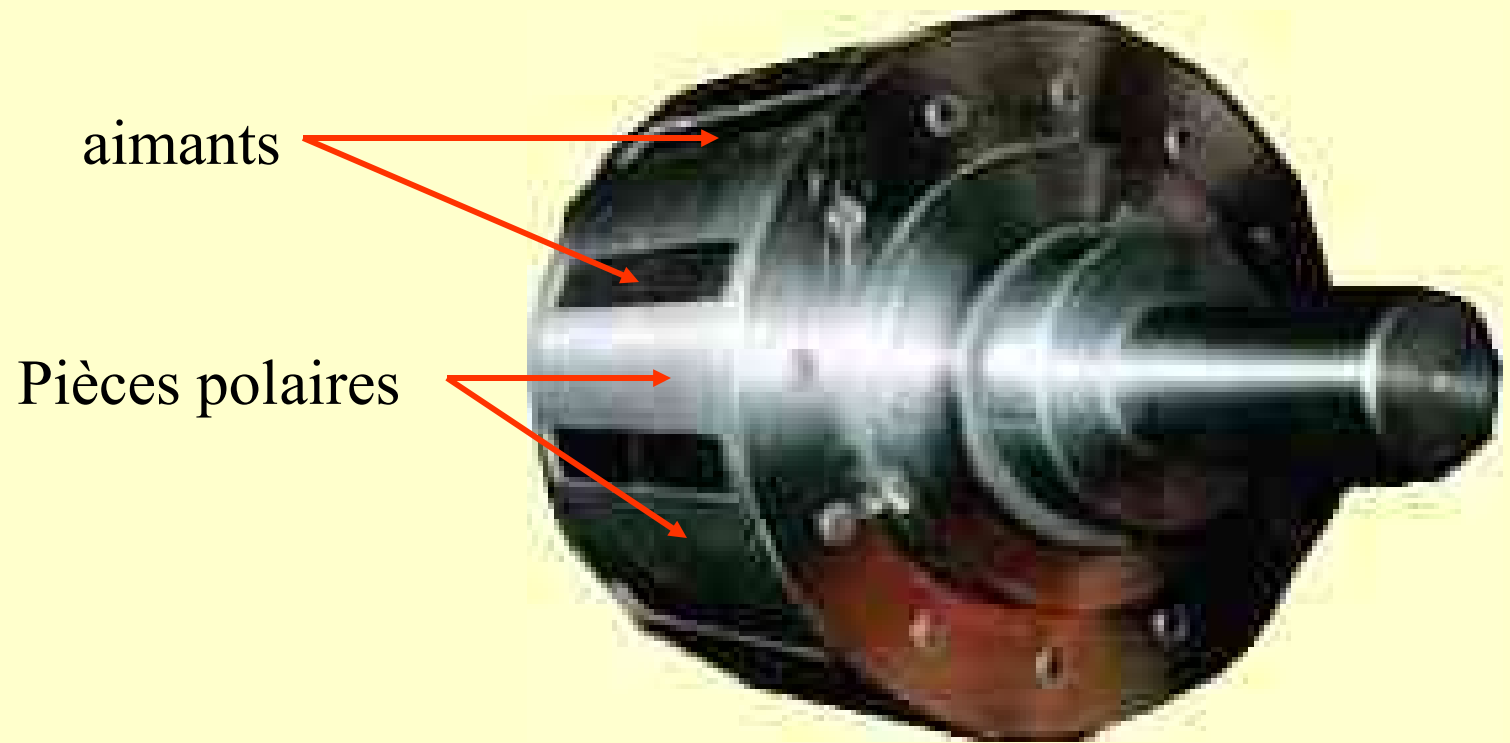
Cette solution est adoptée pour des géométries longues mais étroites . On favorise les vitesses élevées.

Machine 6 pôles



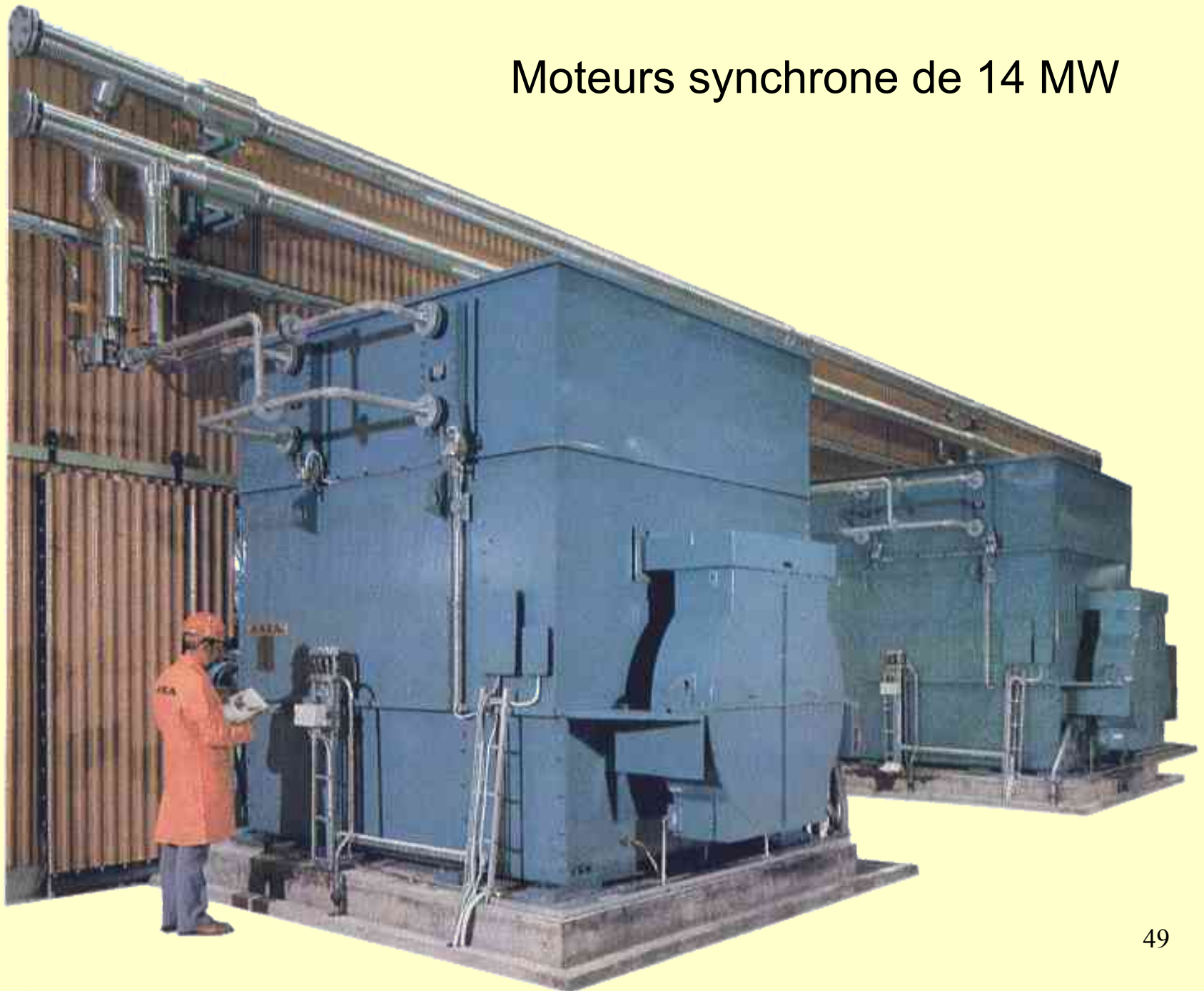
Cette disposition permet d'avoir des inductions de 3 à 5 fois supérieures à la structure précédente.

On peut plus facilement augmenter le nombre de pôles

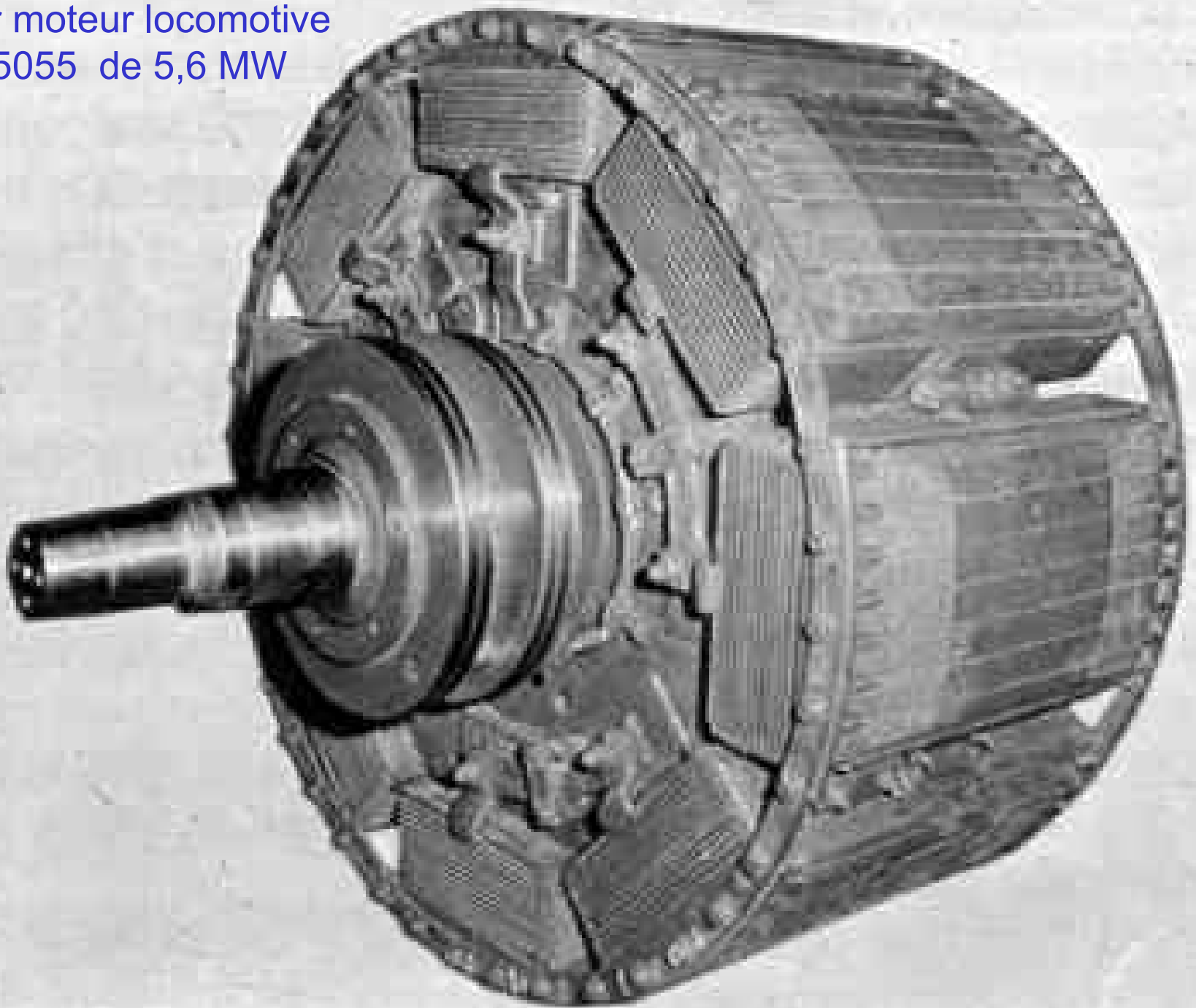


MOTEUR SYNCHRONE

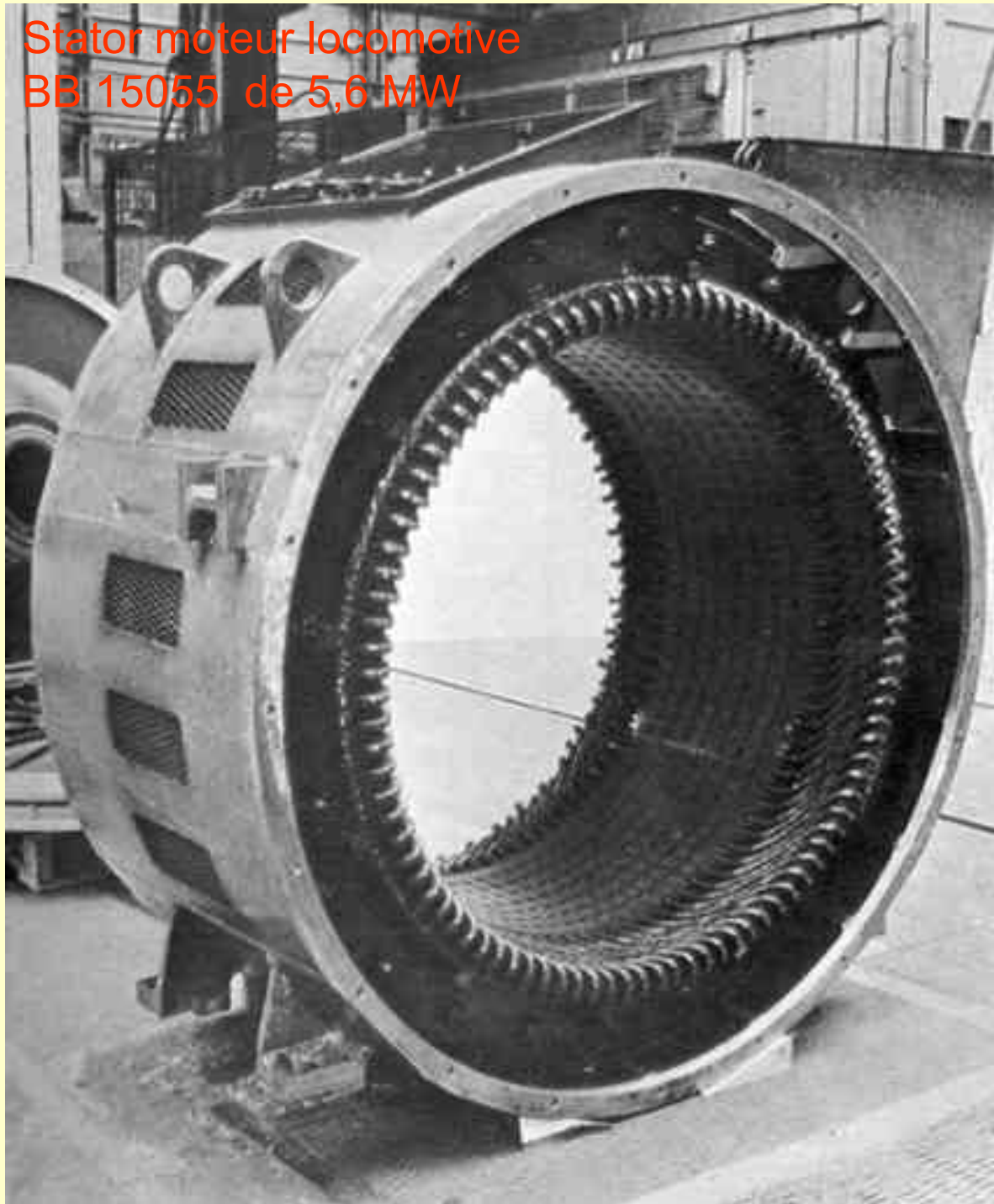
Moteurs synchrones de 14 MW



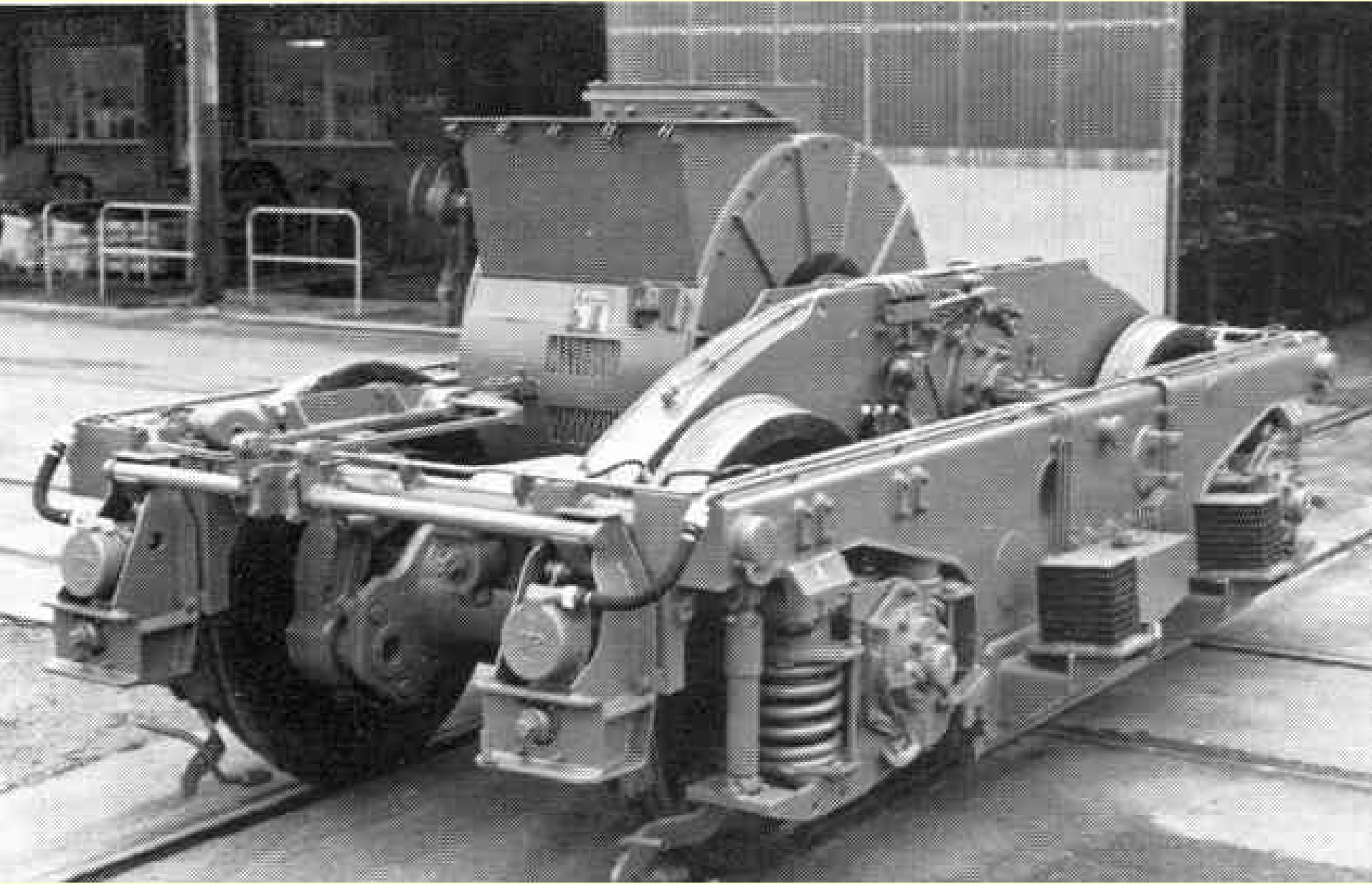
Rotor moteur locomotive
BB 15055 de 5,6 MW



Stator moteur locomotive
BB 15055 de 5,6 MW

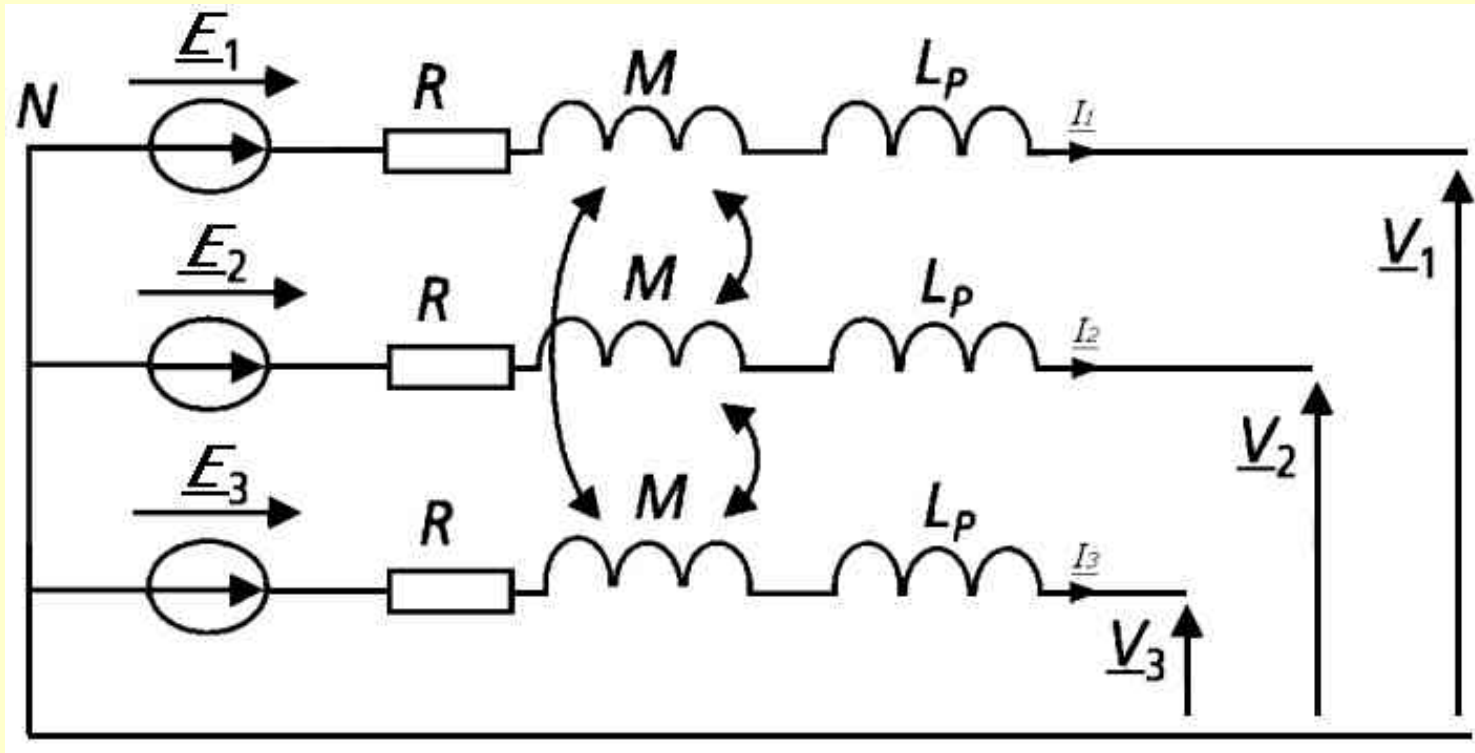


Moteur monté sur bogie Locomotive BB 15055, 5,6 MW, 6,9 tonnes



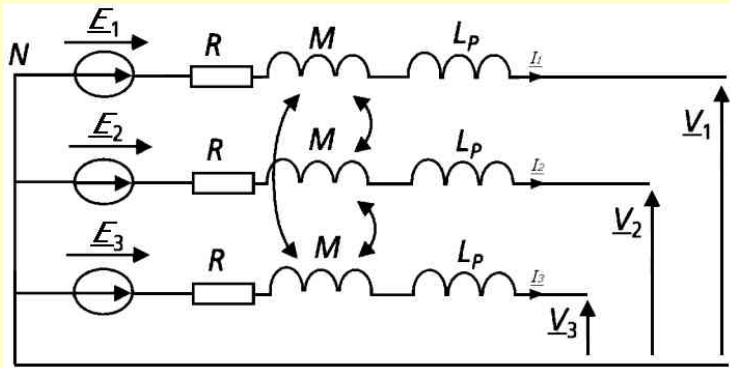
*Équations de Régime permanent
(modèle à réactance constante)
Diagramme vectoriel*

SCHEMA EQUIVALENT DE L'INDUIT



L_p : inductance propre et M : inductance mutuelle

Machine non saturée. E_x est une fonction linéaire du courant continu I_r qui alimente le bobinage rotorique et de la vitesse Ω .



$$\underline{E}_1 = R \cdot \underline{I}_1 + jL_p \omega \underline{I}_1 + jM \omega \underline{I}_2 + jM \omega \underline{I}_3 + \underline{V}_1$$

$$\underline{E}_2 = R \cdot \underline{I}_2 + jL_p \omega \underline{I}_2 + jM \omega \underline{I}_1 + jM \omega \underline{I}_3 + \underline{V}_2$$

$$\underline{E}_3 = R \cdot \underline{I}_3 + jL_p \omega \underline{I}_3 + jM \omega \underline{I}_2 + jM \omega \underline{I}_1 + \underline{V}_3$$

Si le récepteur est équilibré ou sans neutre $\Leftrightarrow \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$

$$\underline{E}_1 = R \cdot \underline{I}_1 + jL_p \omega \underline{I}_1 + jM \omega (\underline{I}_2 + \underline{I}_3) + \underline{V}_1$$

$$\underline{E}_1 = [R + j(L_p - M)\omega] \underline{I}_1 + \underline{V}_1$$

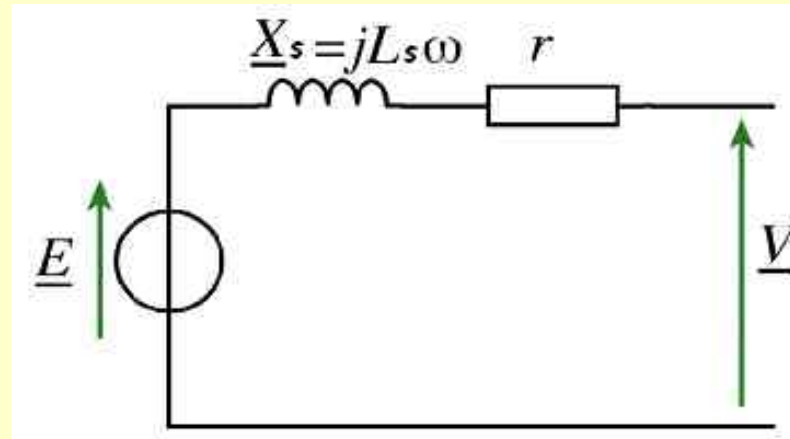
Équation générale pour une phase

$$\underline{E} = (R + jL_s \omega) \underline{I} + \underline{V} = (R + jX_s) \underline{I} + \underline{V}$$

Avec L_s : inductance synchrone et $X_s = L_s \omega$: réactance synchrone

Nota : R est en général petit devant X_s .

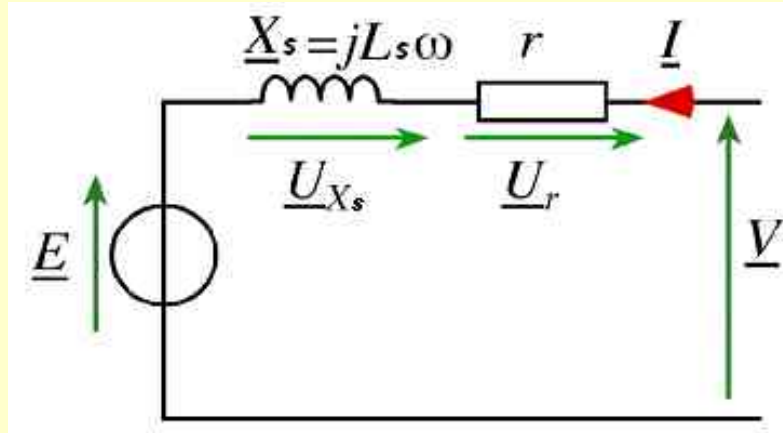
SCHEMA MONOPHASE EQUIVALENT DE BEHN-ESCHENBURG



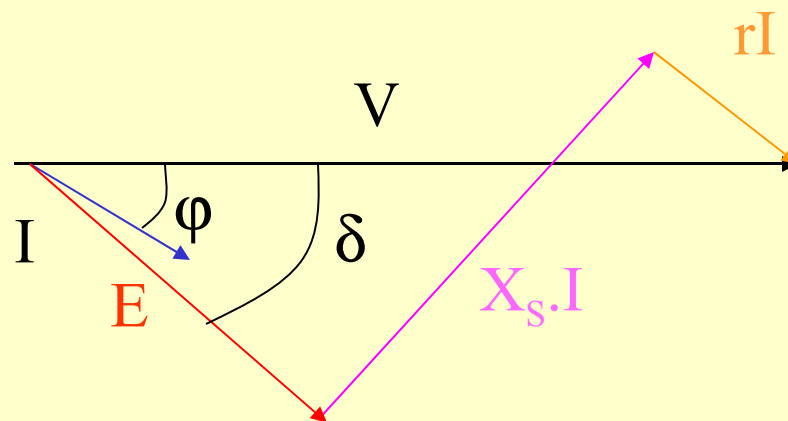
$X_s = L_s\omega$: réactance synchrone d'une phase

r : résistance du bobinage d'une phase

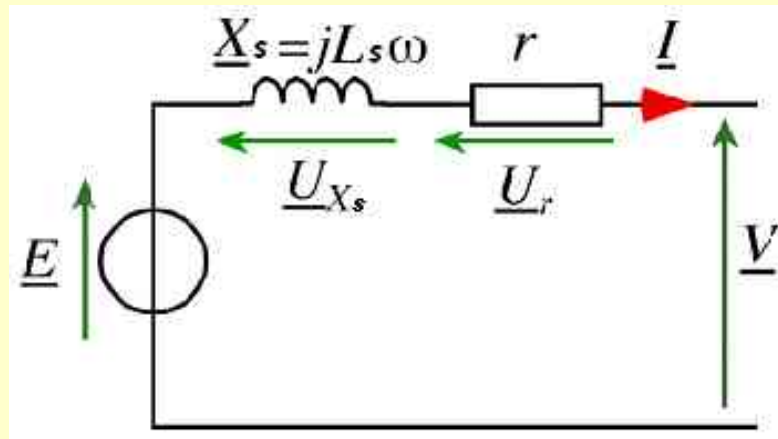
Convention moteur



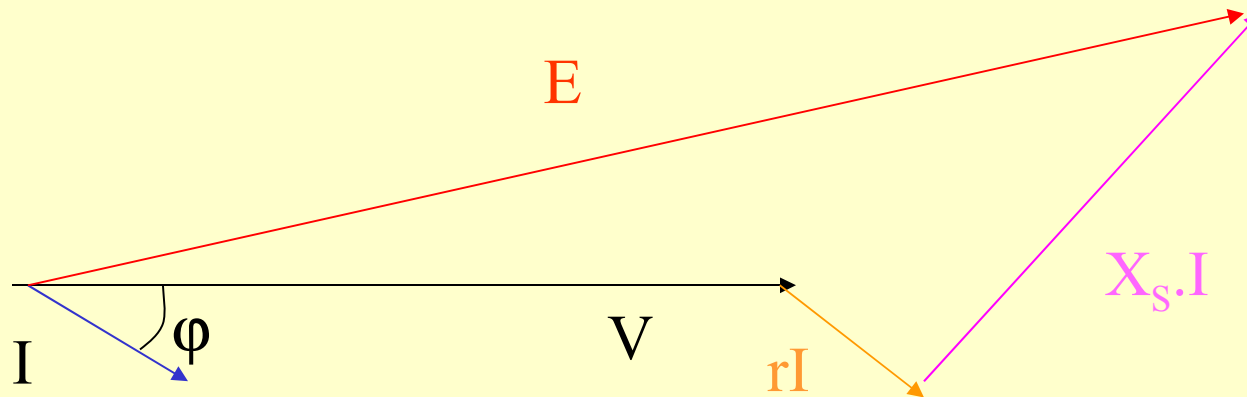
$$\underline{E} = \underline{V} - r\underline{I} - j\underline{X}_s \cdot \underline{I}$$



Convention générateur



$$\underline{E} = \underline{V} + r\underline{I} + jX_s \underline{I}$$



Les MS étant historiquement des alternateurs \Rightarrow convention en général utilisée

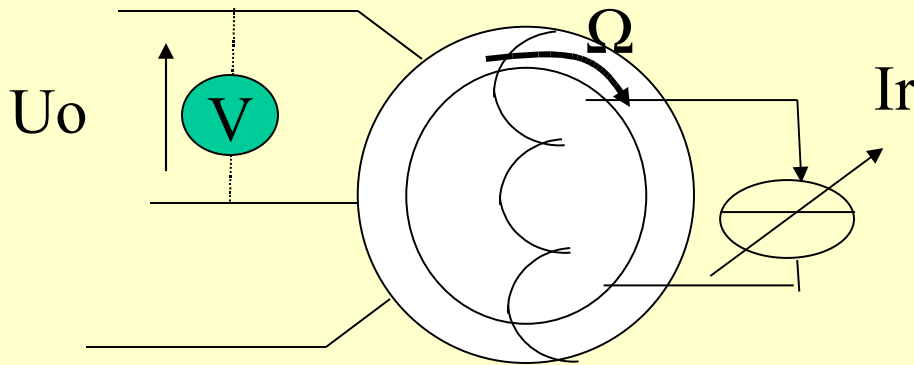
Identification des paramètres du modèle

Que valent $E = f(Ir, \Omega)$, $X_s = L_s \omega$, r ?

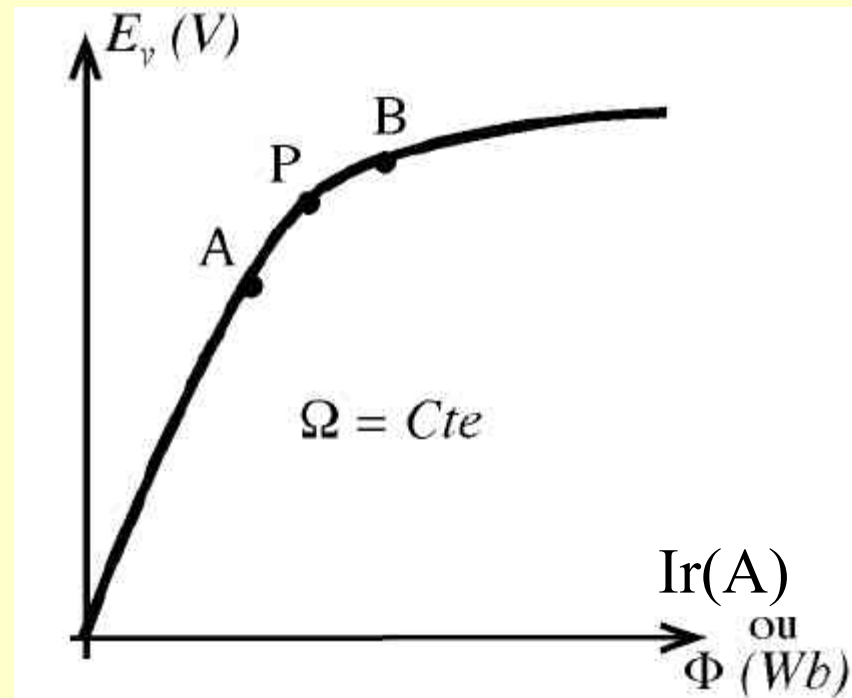
=> essais d'identifications

Essai à vide

L'alternateur est entraîné à la vitesse nominale constante Ω (pulsation des tensions $\omega = p\Omega$). On relève $E_v = f(I_r)$, I_r : courant d'excitation au rotor.

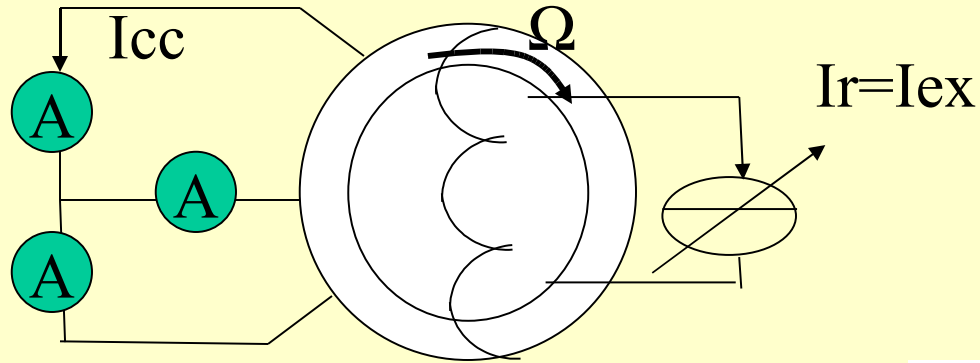


Machine couplée en étoile



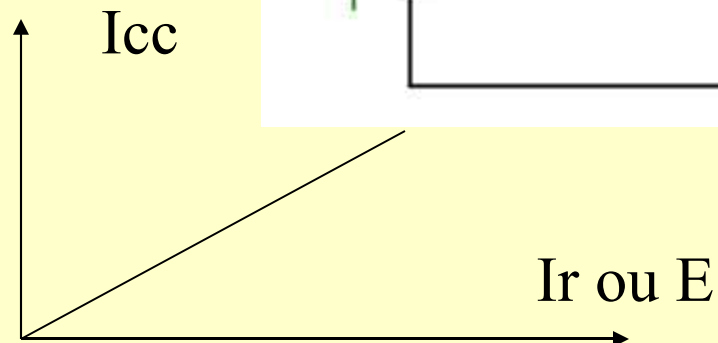
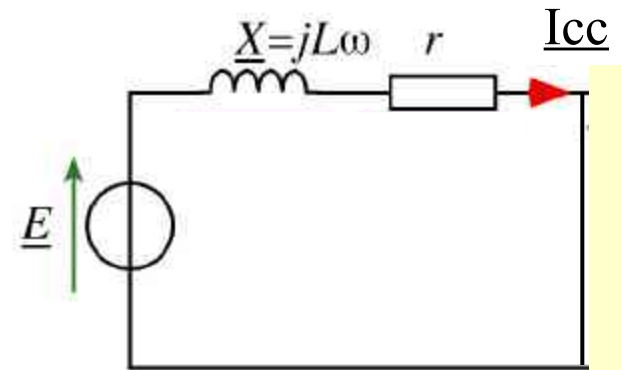
Essai en court-circuit

II) Essai en court-circuit : on entraîne la machine stator en CC
à sa vitesse nominale



$I_r \ll I_{r_{nom}}$: zone
linéaire

On règle I_r pour
que $I_{cc} < I_n$

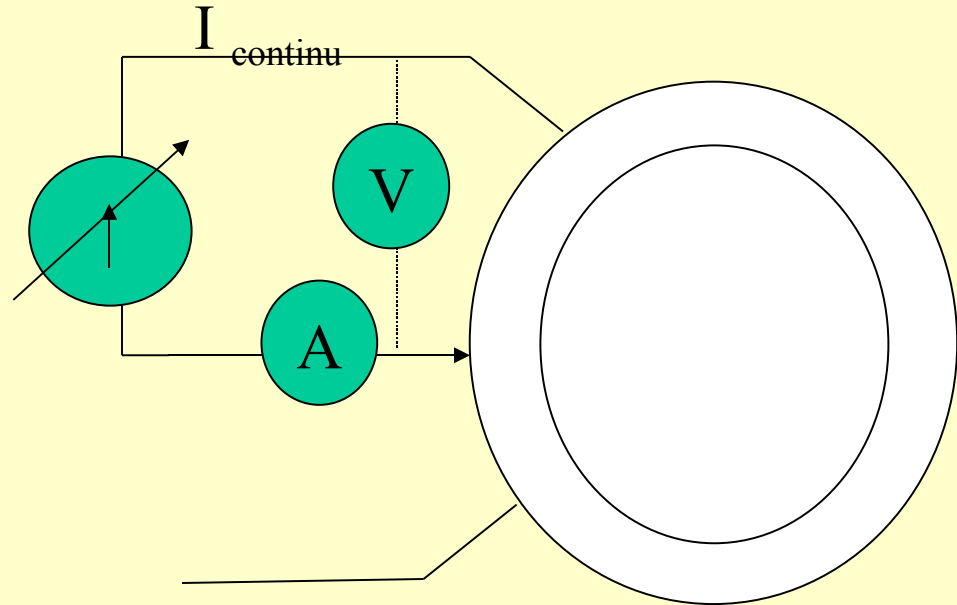


Mesure de r

Machine à l'arrêt

Source de tension
continue réglable

$$I_{\text{continu}} < I_{\text{nominal}}$$

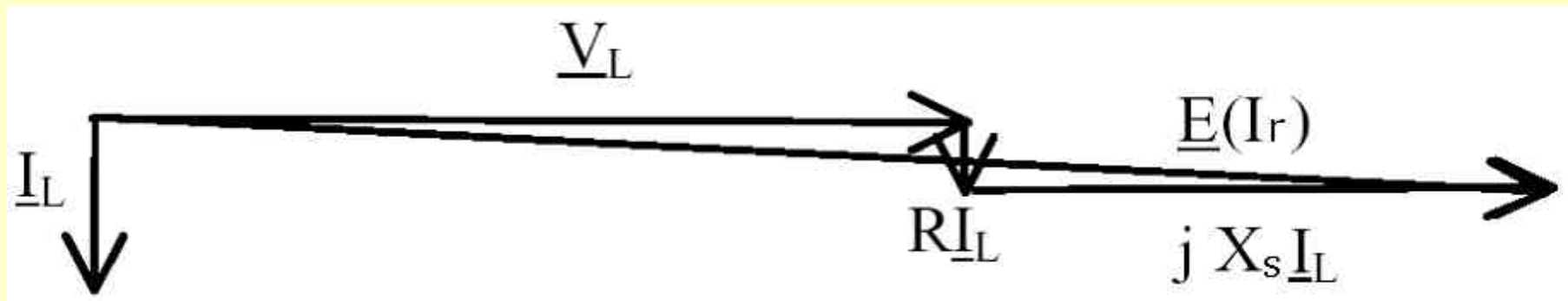
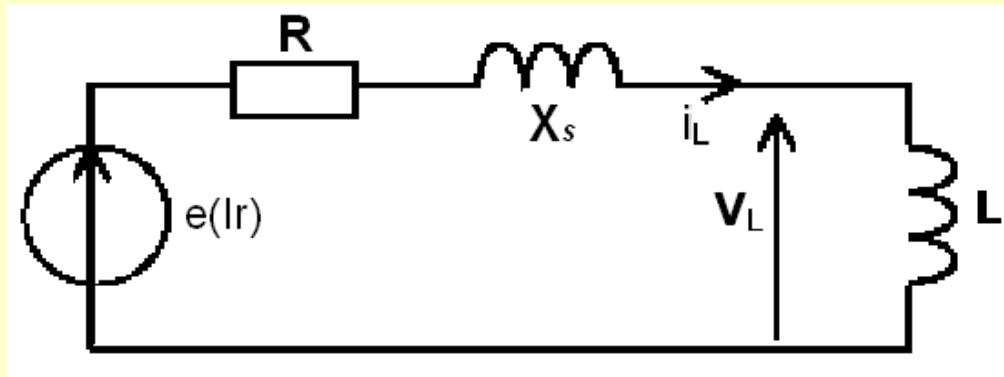


Machine couplée en étoile

A l'issue des 3 essais on peut identifier **$E=f(Ir, \Omega)$, $X_s=L_s \omega$, r**

Autre essai d'identification de X : Essai en "dévatté"

C'est une méthode alternative de l'essai en court-circuit. On fait débiter la machine sur une charge triphasée équilibrée inductive pure. La puissance fournie est nulle.



METHODES A UTILISER

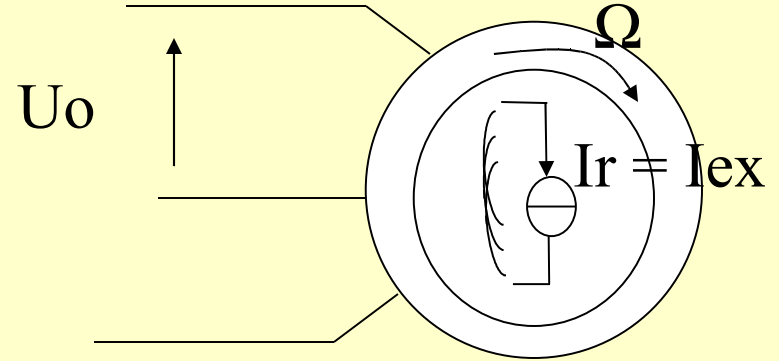
Dans le cas de la saturation \Leftrightarrow diagramme de Potier.

Pour les machines à pôles saillants \Leftrightarrow diagramme de Blondel.

En régime transitoire \Leftrightarrow équations de Park.

Force électromotrice

Qu'est ce que la FEM : E ?

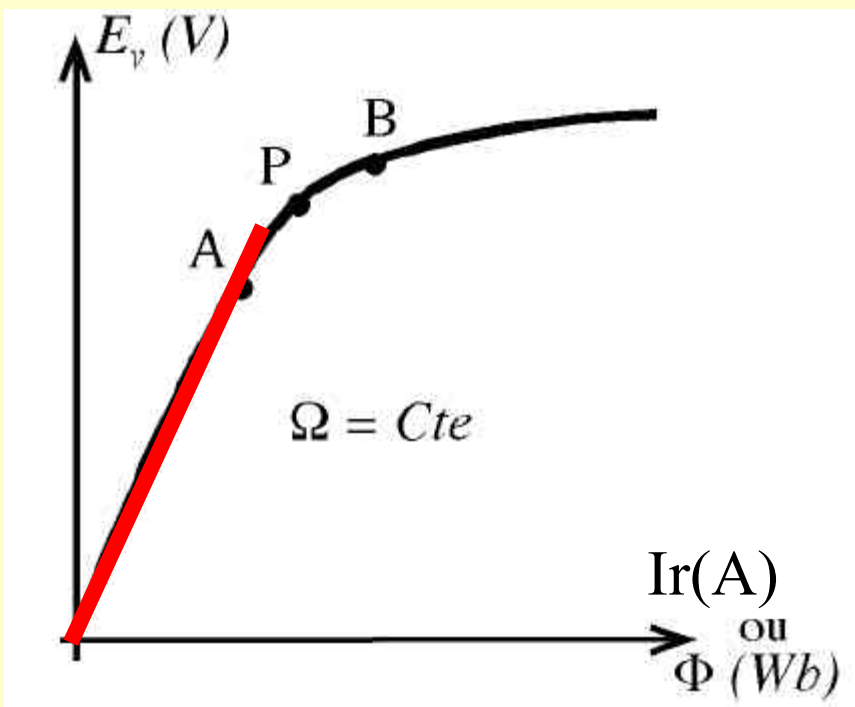


E est la tension à vide de la machine lorsque le rotor est alimenté par un courant continu $I_r = I_{ex}$ et est entraînée à Ω

$$E = U_o / \sqrt{3} \quad (\text{Couplage étoile})$$

-E est proportionnel à Ω

-E est proportionnel à I_r tant que la machine n'est pas saturée



Nous avons vu, avec la machine à courant continu, que la tension induite pour un conducteur, dans une encoche, est égale à :

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

N en tr/s, $\omega = 2\pi N$ et ϕ : flux max sous un pôle

Avec p paires de pôles, c'est comme si la machine tournait à pN et si on a n conducteurs par encoche, e devient :

$$e = \frac{d\phi}{dt} \cdot n \cdot p$$

$$\omega = 2\pi pN$$

Avec m = nombre d'encoches/pôles et par phase

La somme vectorielle des tensions par phase est :

$$E = \frac{d\phi}{dt} \cdot n \cdot p \cdot m$$

avec

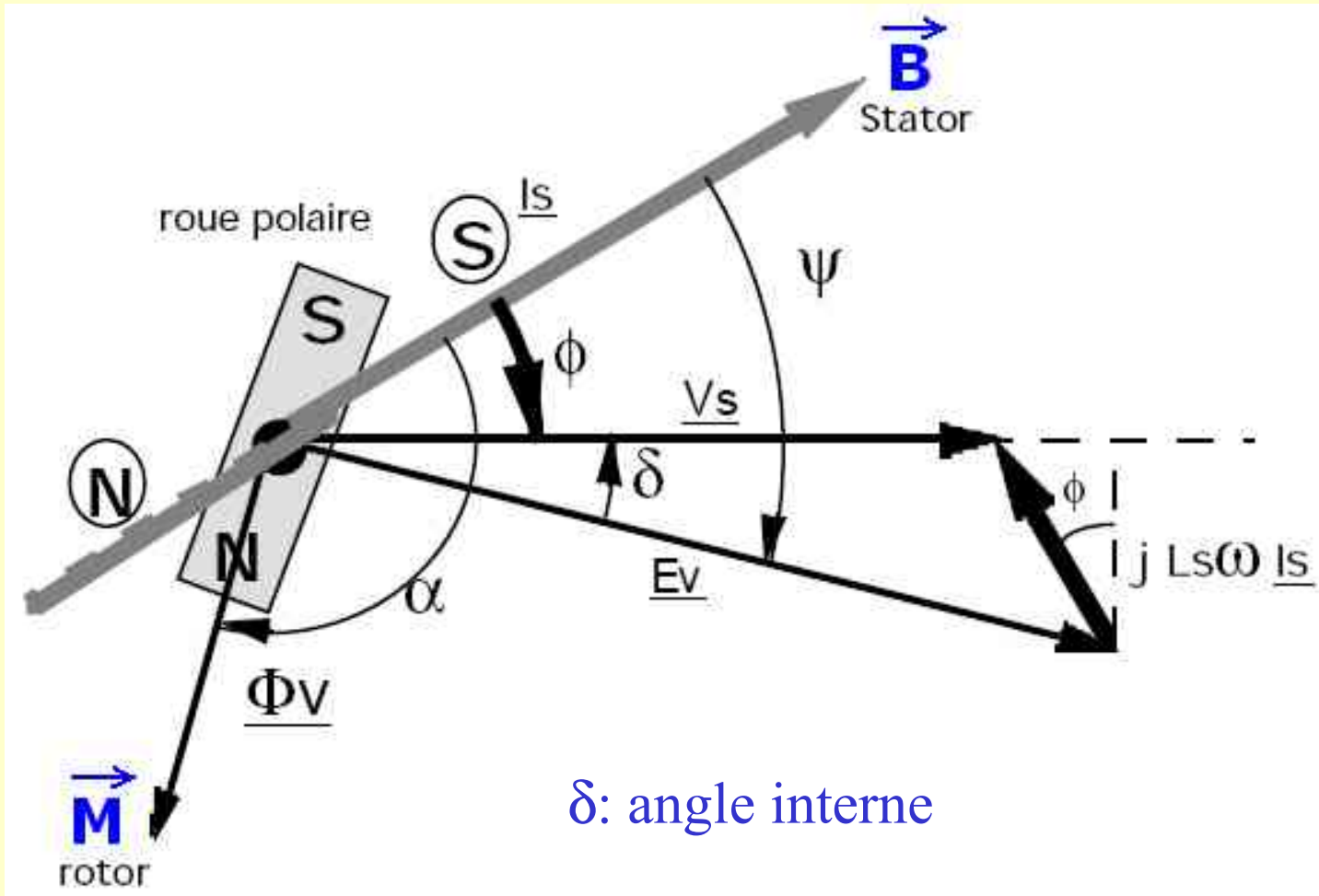
$$E = \frac{d\phi}{dt} \cdot n \cdot p \cdot m$$

en triphasé

Si la tension n'est pas sinusoïdale on applique un coefficient k_F

Couple

Angle interne δ , induction magnétique B et moment magnétique M



$$\vec{C} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$



Le couple est maximum pour $\alpha = 90^\circ$

M dépend du courant d'excitation = $k_v \cdot \phi_v = k_i \cdot I_r$

La somme vectorielle des inductions magnétiques résultantes des trois bobinages statoriques donne $B = 3/2 \cdot k_s \cdot I_s$

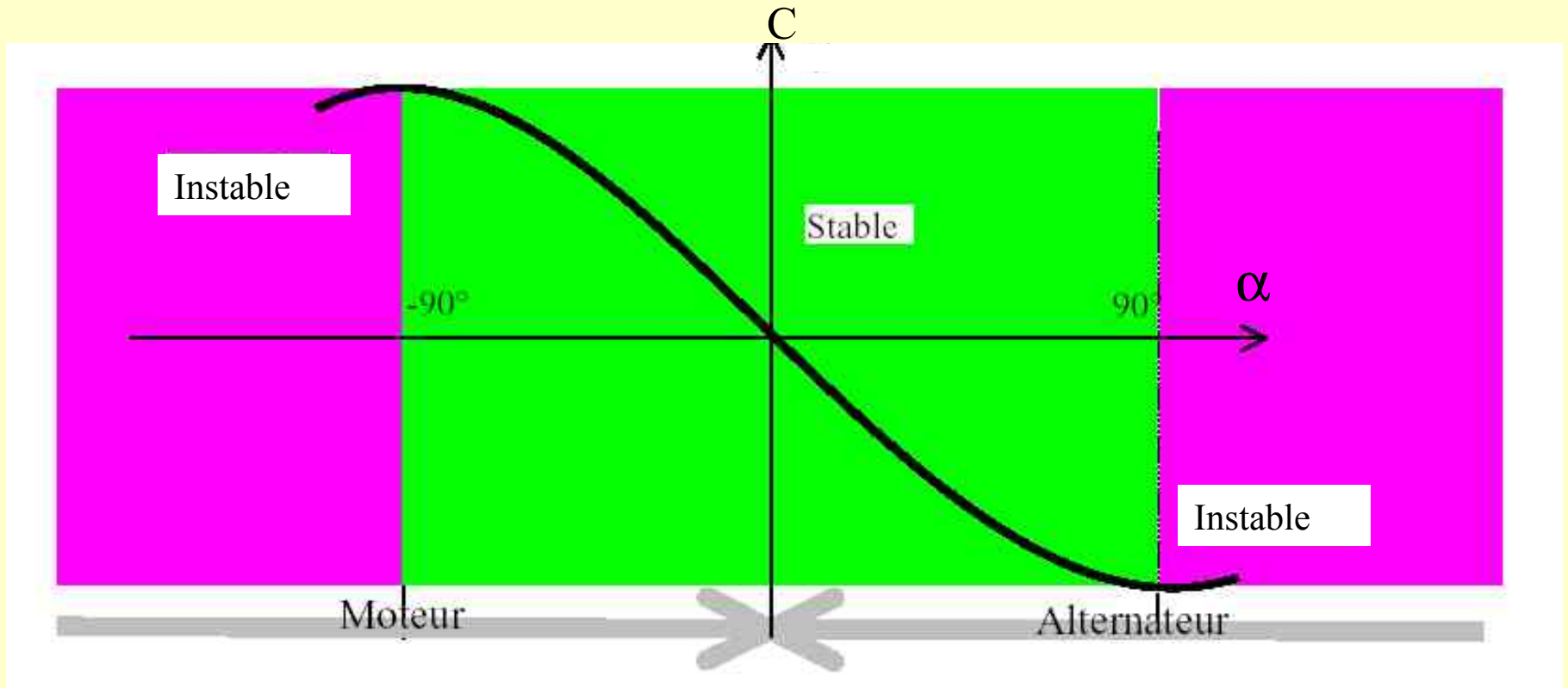
Avec k_s : coefficient d'un bobinage = $n / (\mathfrak{R} \cdot S)$



En moteur \vec{M} est en retard sur \vec{B} .

En générateur \vec{M} est en avance sur \vec{B} .

Points de fonctionnement – Fonctionnement à excitation constante



- Si on demande trop de puissance à la machine, elle décroche, car le couple moteur diminue alors que le couple résistant augmente.
- En pratique pour éviter cela, on installe un dispositif de régulation qui assure la stabilité en augmentant I_r (et E) sur une surcharge brutale.

Fonctionnement sur un réseau triphasé

Introduction

-Machine synchrones utilisées en alternateurs

=> Majeure partie de la Production de l'Énergie électrique sur les réseaux alternatifs triphasés.

-Moteurs ou compensateurs synchrones pour des applications industrielles (Forte puissance).

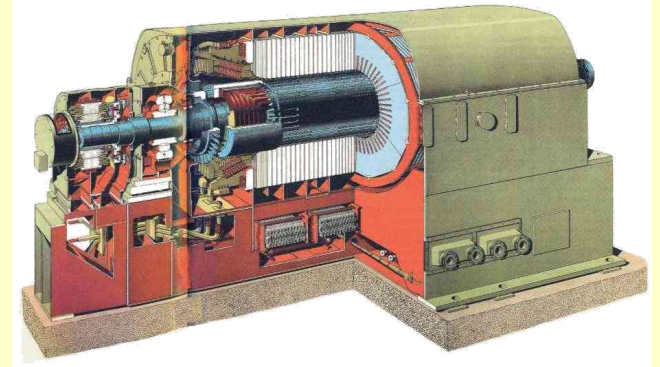
Procédure de démarrage

Si on branche directement la machine à l'arrêt à un réseau triphasé

=> L'inertie de la machine fait qu'elle n'a pas le temps de « suivre » le champ tournant stator et d'atteindre Ω_s . On a donc $(\sin \alpha)_{\text{moyen}} = 0$.

D'autre part $E = 0 \Rightarrow$ Courants très importants.

Il faut accrocher la machine au réseau => Procédure d'accrochage

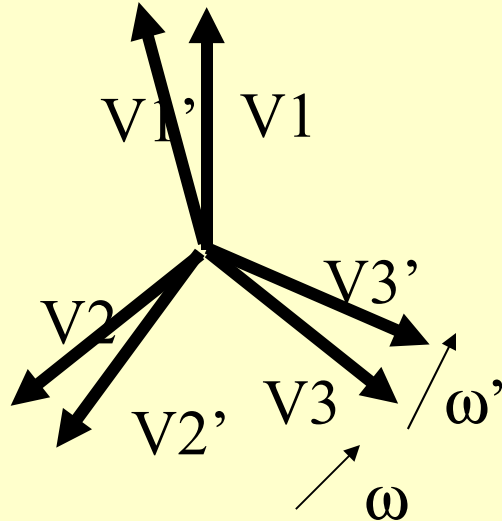
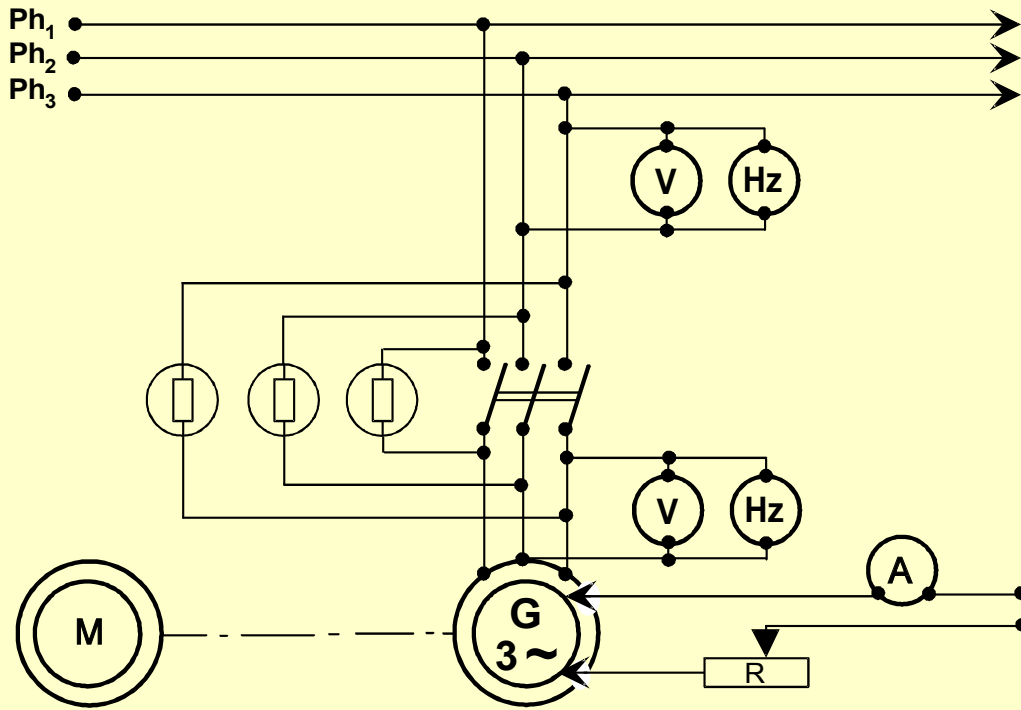


Procédure d'accrochage

Il faut :

- Exciter la machine
- L'entraîner
 - Turbine, Machine thermique
 - Moteur auxiliaire
 - Excitatrice utilisée en moteur
 - Démarrage en asynchrone (utilisation des amortisseurs ou de l'enroulement d'excitation en court-circuit)
- Etablir les égalités
 - $f = f_{\text{réseau}}$ (en agissant sur la vitesse)
 - $U = U_{\text{réseau}}$ (en agissant sur l'excitation)
 - Succession des phases (système direct ou inverse)

Procédure d'accrochage



Méthode :

- Entraîner la machine à $N \approx N_s$
- L'exciter de manière à avoir $V_1' = V_1$
- Observer les lampes
 - Les feux « tournent » : il faut inverser 2 phases
 - Les feux battent : la succession des phases est bonne.

-On couple à l'extinction des lampes

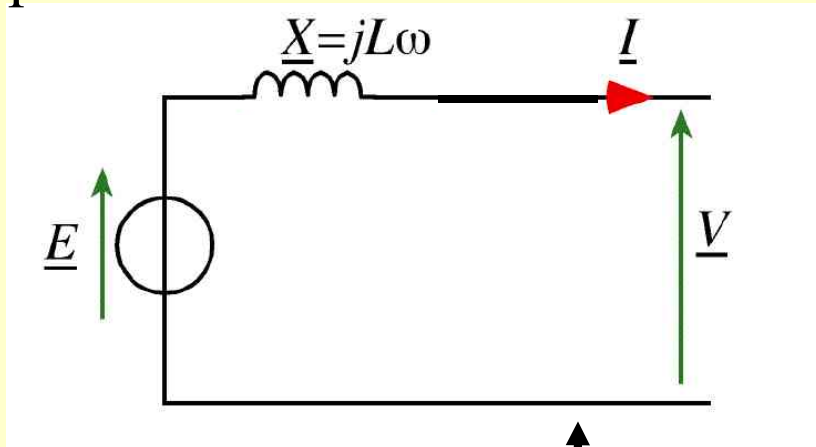
Dans la pratique industrielle moderne c'est un automate qui gère le processus

Sur les bateaux c'est encore bien souvent manuel

Diagramme simplifié des puissances en générateur

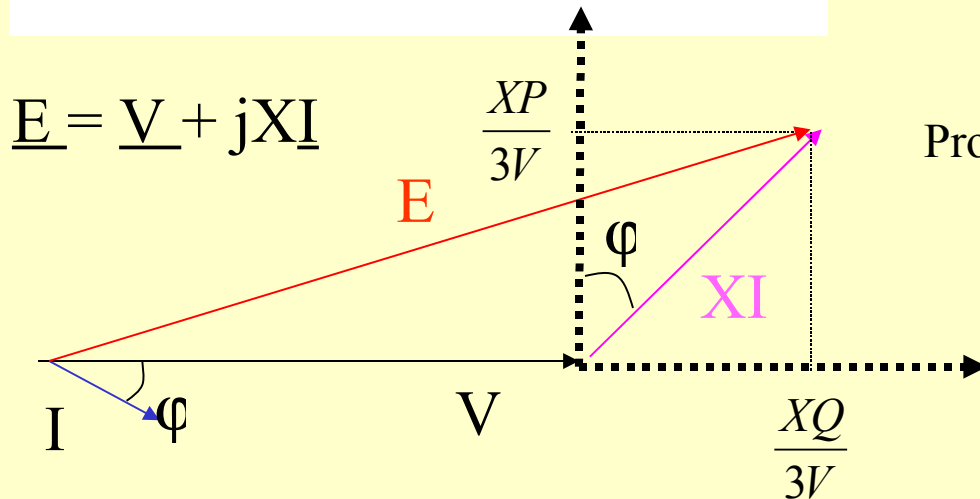
Machine sur le réseau : $V = \text{cste}$ et $f = \text{cste}$ ($\Omega = \text{cste}$)

Convention générateur :
puissances fournies au réseau



Si on néglige rI devant XI
(hypothèse réaliste)

Projection sur ox :



Projection sur oy :

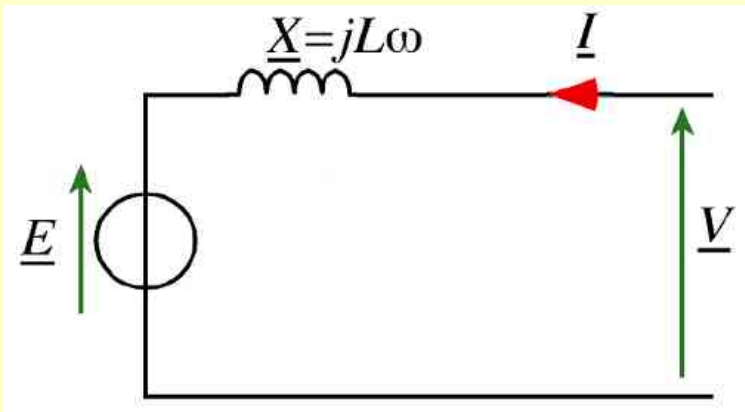
Alternateur "surexcitée" qui fournit de la
puissance réactive à la charge inductive.

Diagramme simplifié des puissances en moteur

Machine sur le réseau : $V=cste$ et $f=cste$ ($\Omega=cste$)

Convention moteur :

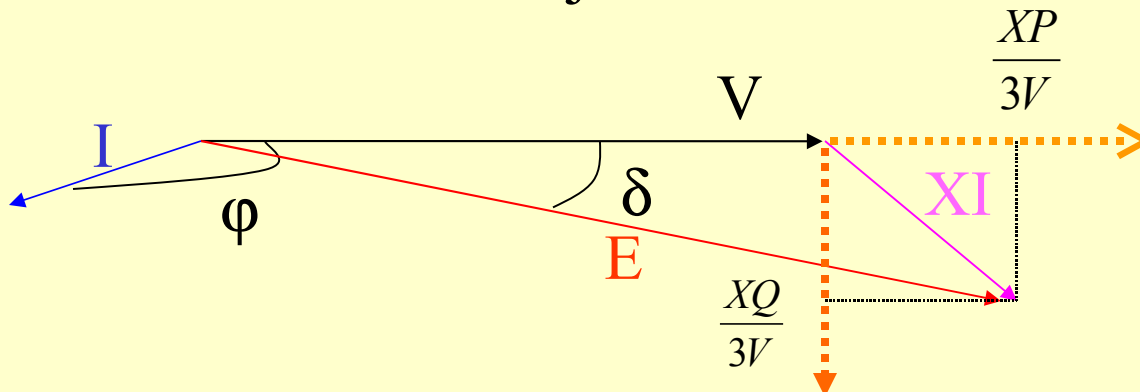
puissances consommées par la machine sur le réseau



$$\underline{E} = \underline{V} - jXI$$

Projection sur -ox :

Projection sur -oy :

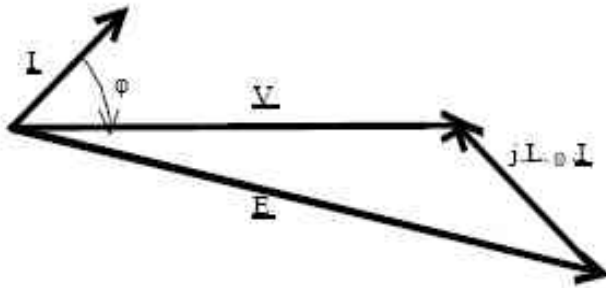


Moteur "surexcité" qui fournit de la puissance réactive au réseau. \Rightarrow Compensateur synchrone

Fonctionnement 4 quadrants, r négligée.

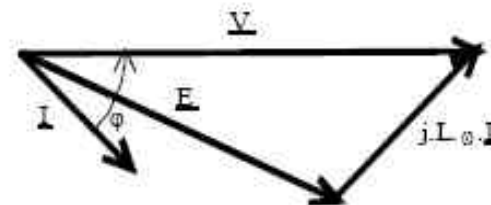
Alternateur "sous excité"

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



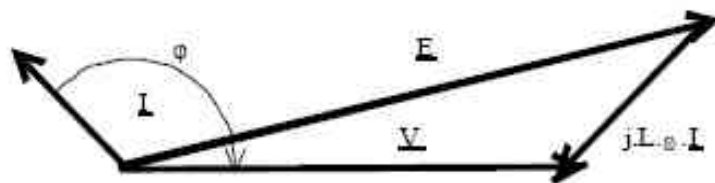
Alternateur "surexcité"

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



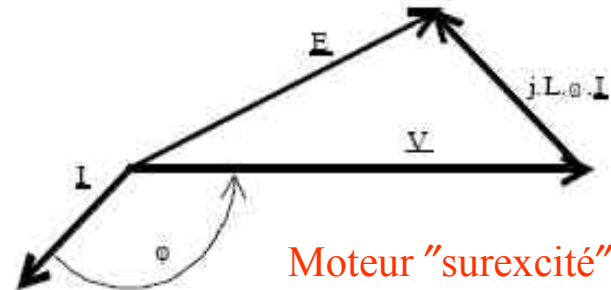
Q: Puissance réactive

P: Puissance active



Moteur "sous excité"

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



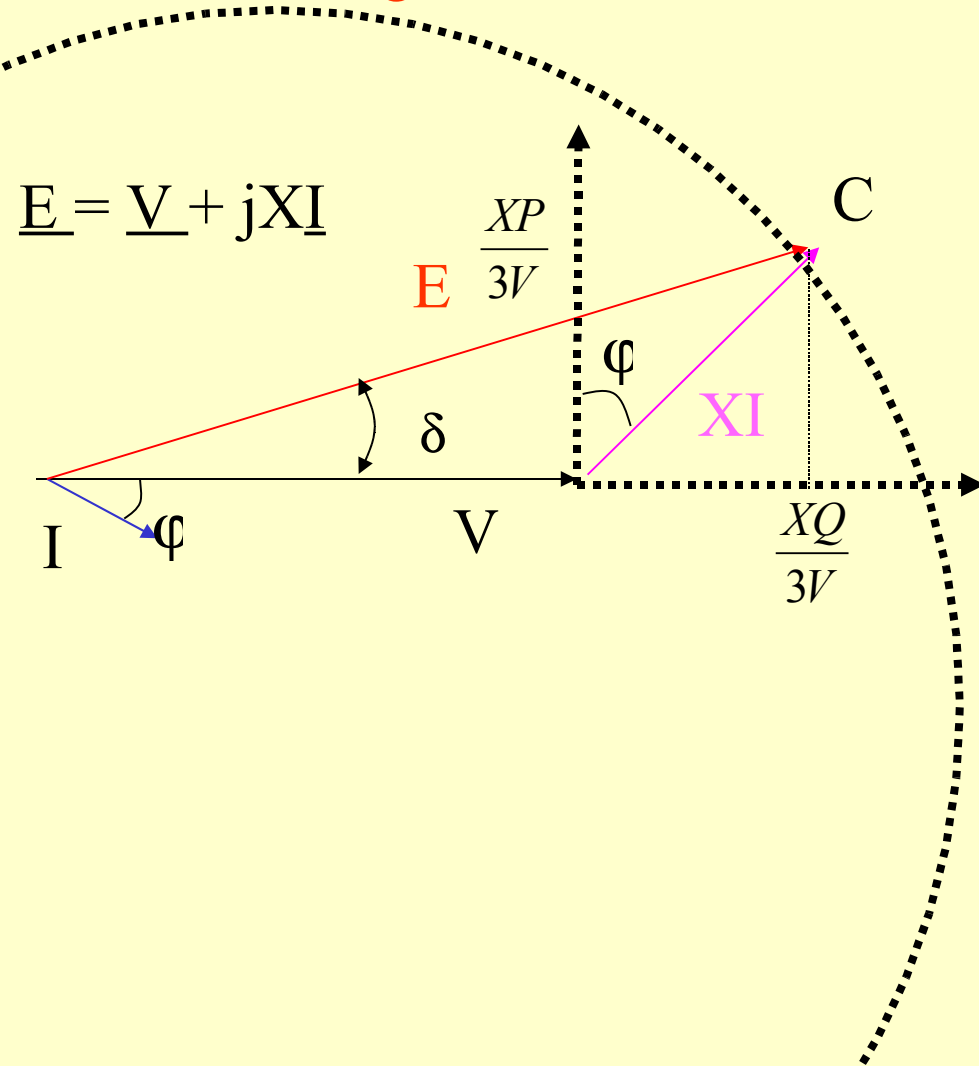
Moteur "surexcité"

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

Détermination de la puissance et du couple

Machine sur le réseau : $V=cste$ et $f=cste$ ($\Omega=cste$), $E=cste$

Convention générateur

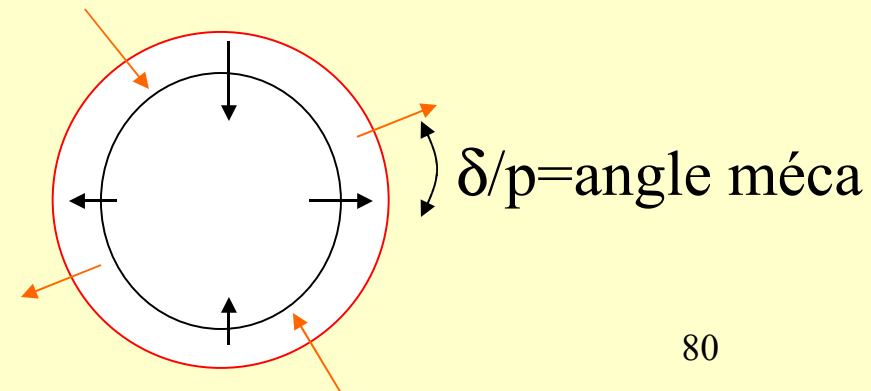


- On a plusieurs points de fonctionnement possibles qui dépendent de la charge mécanique (charge ou entraînement).

- P (ou $C_{résistant}$) est proportionnel à $\sin\delta$.

- δ est en fait l'angle électrique entre le champ rotorique et le champ statorique.

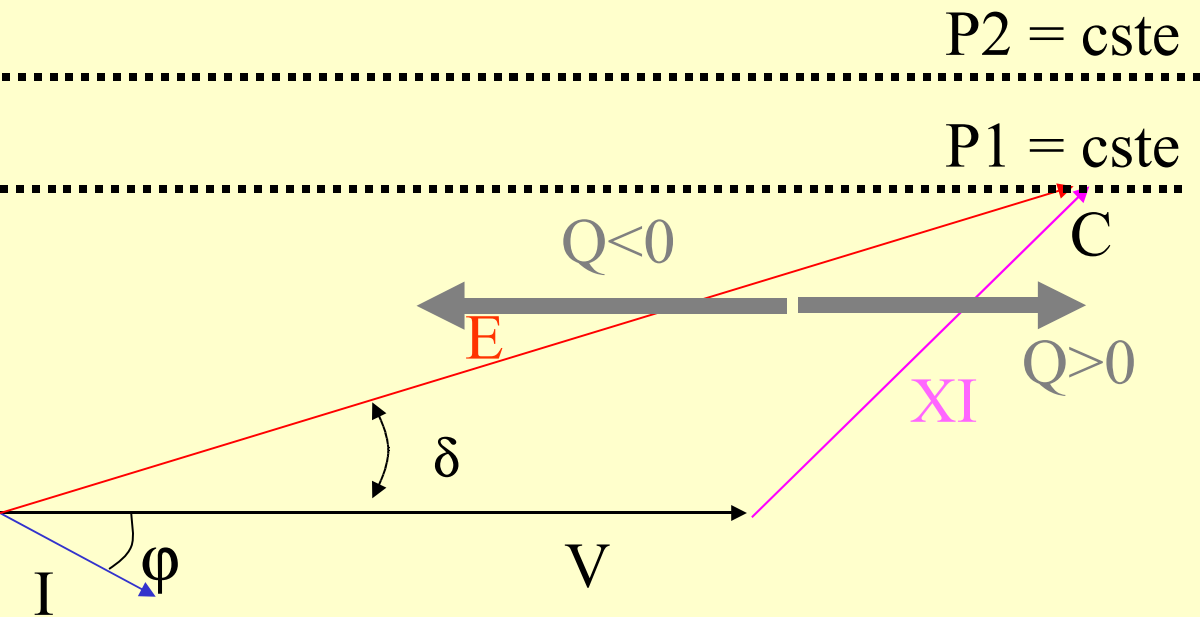
- $\|\delta\|$ ne peut dépasser 90°



Fonctionnement à puissance constante en générateur

(P absorbée est constante, V = cste, f = cste)

$$\underline{E} = \underline{V} + jX\underline{I}$$



Le point C se déplace sur une horizontale quand I_r varie.

- Q varie

- XI varie

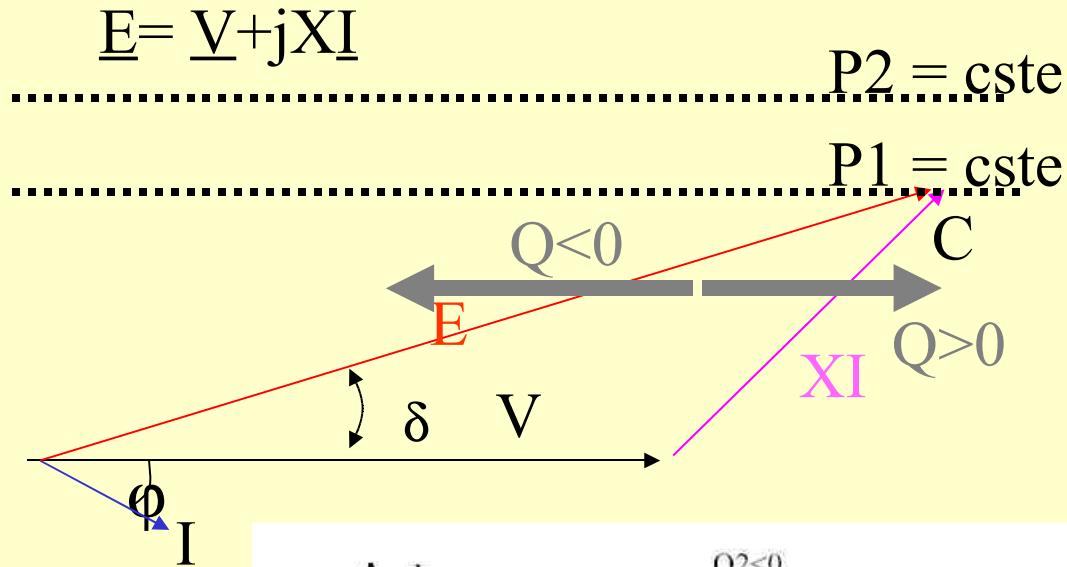
- Contrôle de l'échange de puissance réactive et du niveau de I

-Exemples :

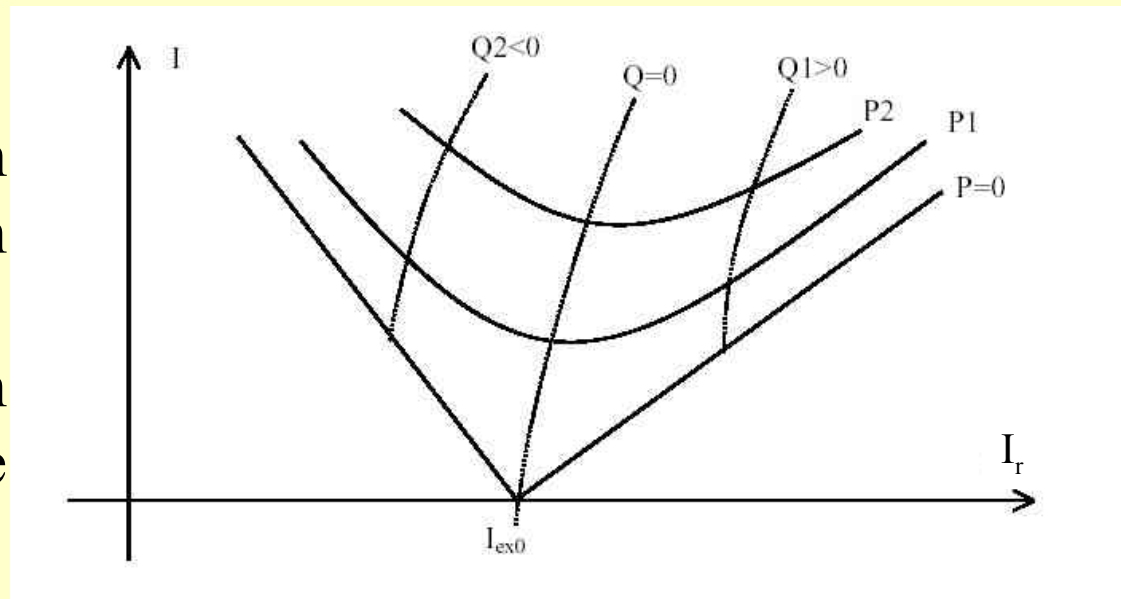
-compensateur synchrone,

-stratégie à $\cos \varphi$ unitaire
=> minimisation des Pertes Joules.

Fonctionnement à puissance constante en générateur

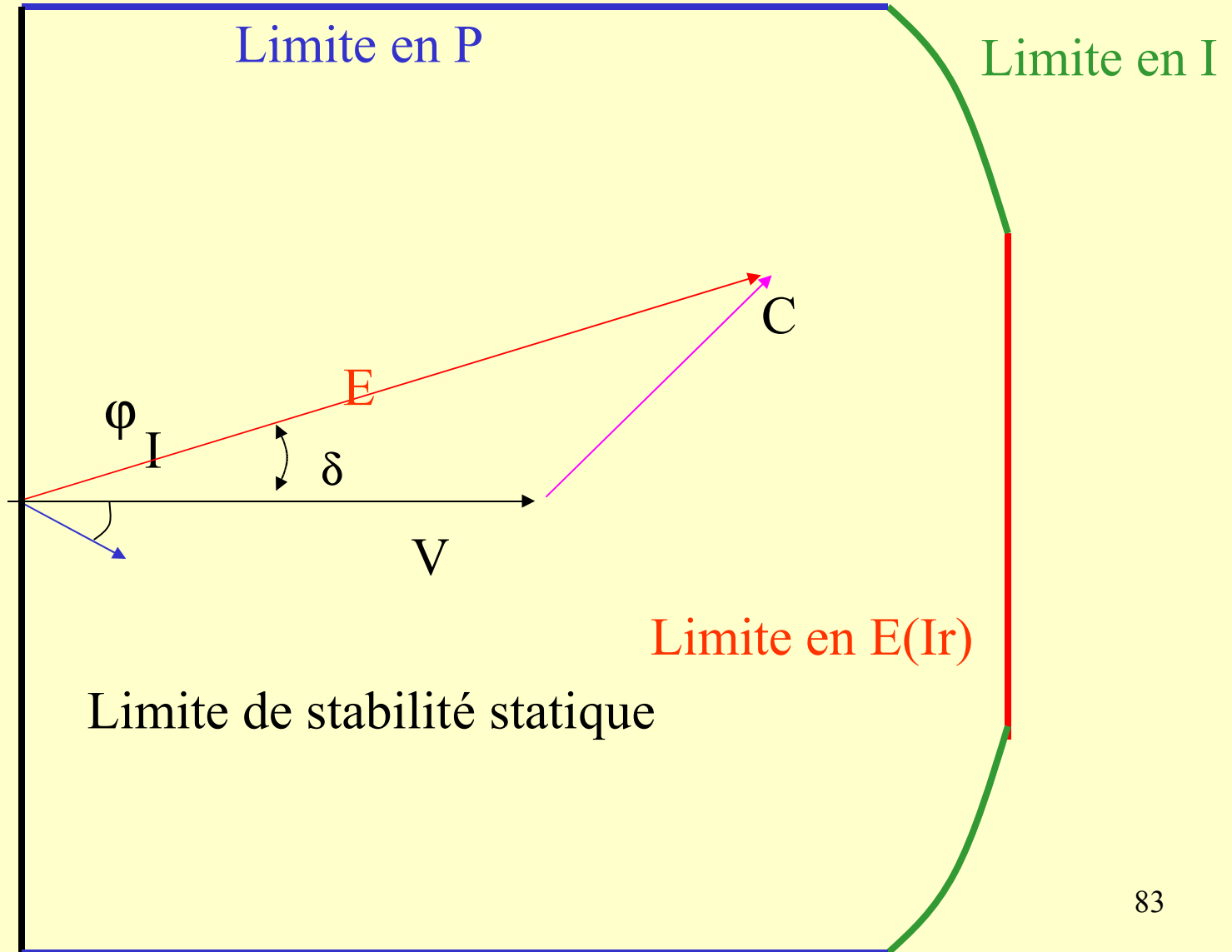


I passe par un minimum pour I en phase avec V
 \Rightarrow Courbes en « V » ou courbes de Mordey



Limites de fonctionnement

$$\underline{E} = \underline{V} + jX\underline{I}$$



Pertes et rendement

Pertes de la machine synchrone

Pertes Joule stator $p_{JS} = 3 R_S \cdot I_S^2$ avec $R_S =$ résistance par phase

Pertes Joule d'excitation rotor $p_{Jr} = R_r \cdot I_r^2 = U_r \cdot I_r$

Pertes fer p_{fer} : Hystérésis, Courants de Foucault (surtout au stator). On les suppose constantes égales à leur valeur à vide pour une f.é.m égale à la tension nominale.

Pertes mécaniques p_m : frottements, roulements, ventilation.

Constantes à vitesse constante.

Les pertes supplémentaires p_s : Variation de flux entre fonctionnement à vide et en charge. Variation des pertes par courant de Foucault entre à vide et en charge.



Rendement de la machine synchrone

Puissance électrique : $P_e = 3 V_S I_S \cos \varphi$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Alternateur

Moteur (auto excitation)

Excitation séparée

Pour les machines de fortes puissance $\eta \approx 99\%$

Couple de la machine synchrone

Couple des pertes

Couple mécanique T_m

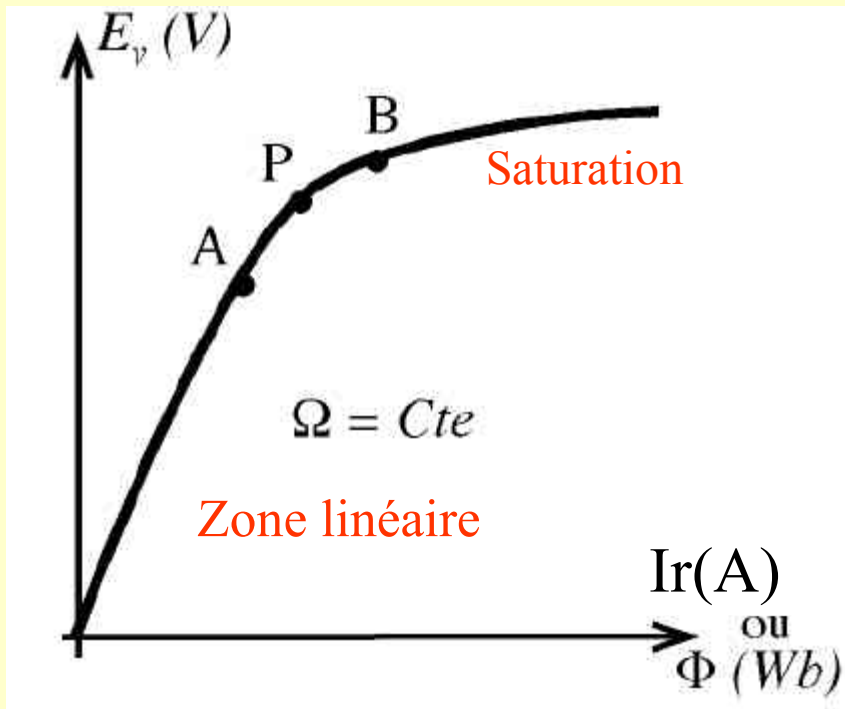
Alternateur

Moteur

$T_e =$ couple utile

$T_m =$ couple utile

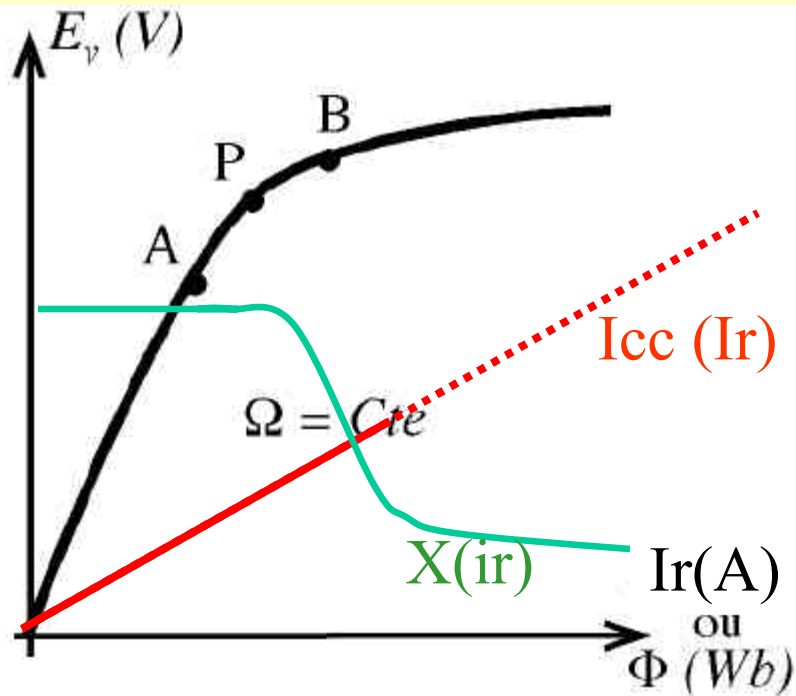
Saturation



Lorsque le circuit magnétique est saturé, il n'y a plus de relation linéaire entre les flux et les courants

Méthode de Behn-Eshenbourg :

on suppose que la saturation n'est liée qu'à l'excitation I_r



$$X(ir) = E_v(I_r) / I_{cc}(I_r)$$

Méthode très simple et très utilisée, bien que peu précise.

Autres méthodes plus complexes

-Potier : Saturation, précise, pôles lisses

-Blondel : saturation et pôles saillants

Méthodes d'excitation

But

- alimenter l'enroulement rotorique en continu
- Régler I_r

Excitation par excitatrice :

- Machine à courant continu sur le même arbre Fournit I_r
- Système de Balais+bagues=>fragilité

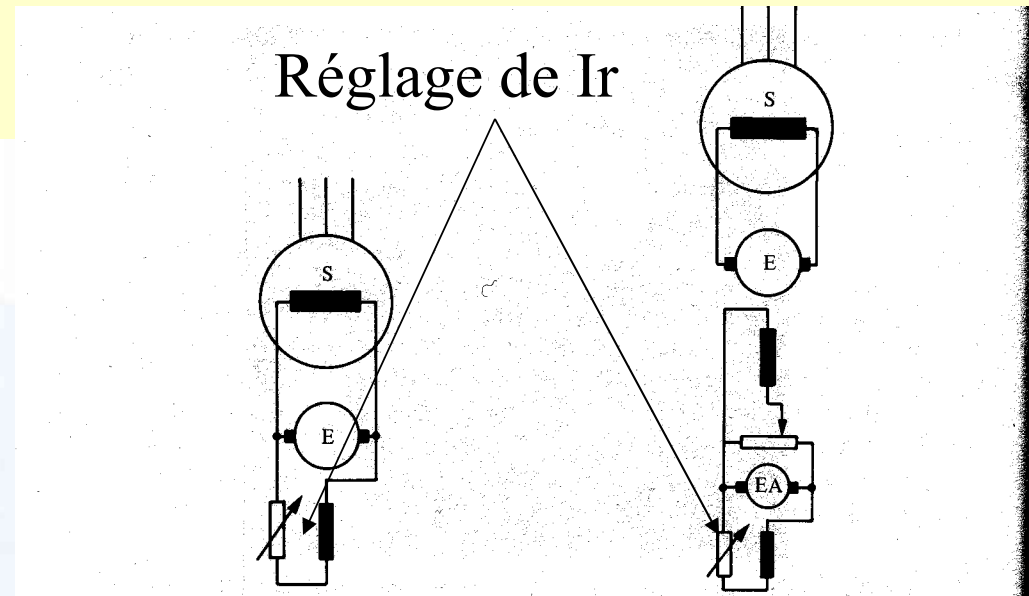
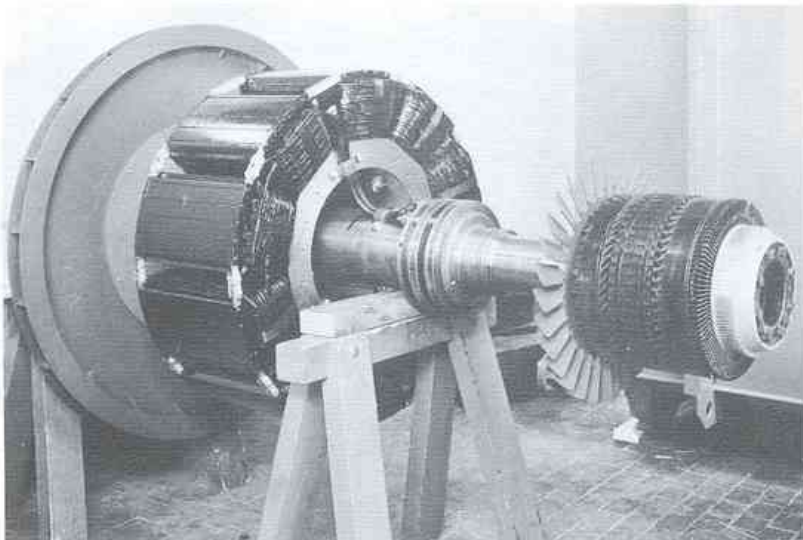
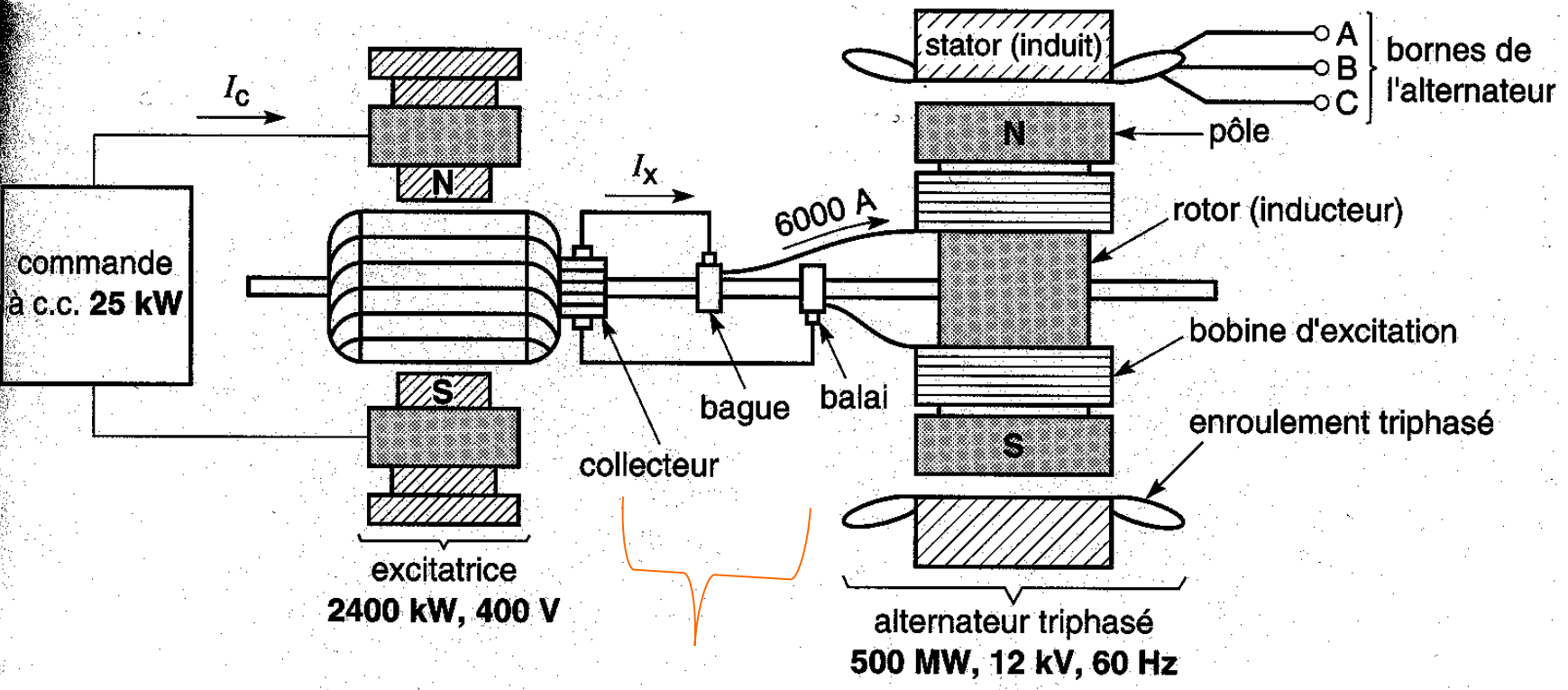


Fig. 7.177 Excitation d'une machine synchrone au moyen d'une excitatrice auto-excitée (E).

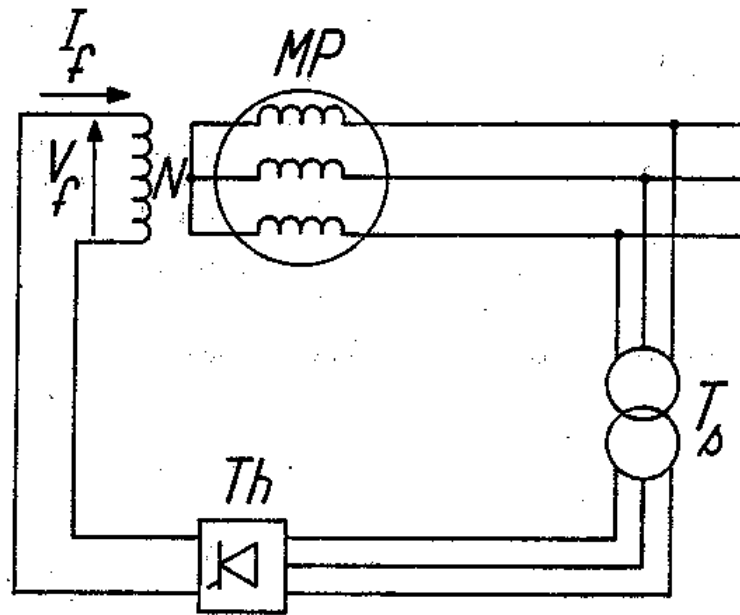
Fig. 7.178 Excitation d'une machine synchrone au moyen d'excitatrices principale (E) et auxiliaire (EA).



Problèmes

Excitation par auto alimentation :

- I_r fourni par soutirage
- Redresseur commandé pour régler I_r
- Balais + bagues => fragilité

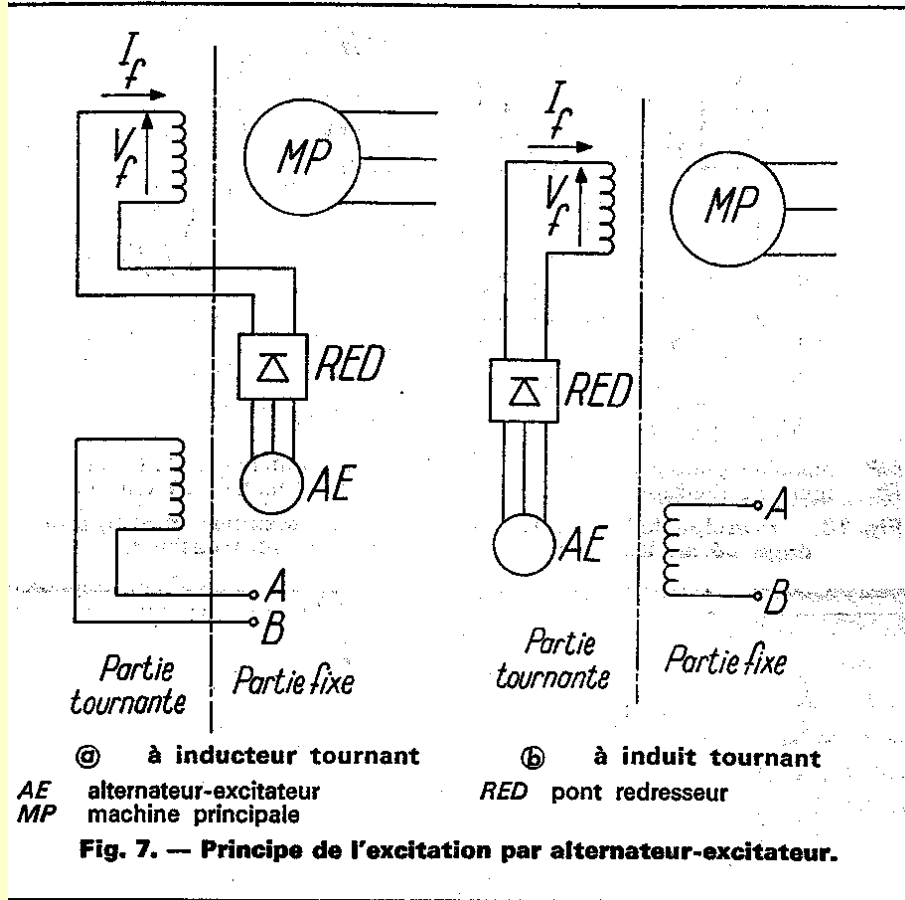


MP machine principale
Th pont de thyristors

T_s transformateur de soutirage

Fig. 8. — Principe de l'excitation par autoalimentation à dérivation pure.

Excitation par alternateur exciteur



(A) Diodes fixes

- Balais + bagues

(B) Diodes tournantes

- Pas de balais + bagues
- Maintenance facilitée
- Moins de risque de pannes

FIN