

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERY de TIZI-OUZOU

Faculté du Génie Electrique et d'Informatique

Département d'électrotechnique



Mémoire de fin d'études

*En vue d'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique
Option : Machines électriques*

Thème

**Calcul et exploitation d'un
Turboalternateur**

Proposé et dirigé par :

M^r: BELASSEL.M.T

M^r: BOUAMARA.S

Etudié par :

M^{lle}: NAIMI OUARDA

M^{lle}: BOUAM FATMA

Promotion 2008



Remerciements

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr BELASSEL .M.T qui a accepté la charge et la direction de cette étude. Son soutien, ses orientations et conseils nous ont été d'un apport précieux, depuis la définition et structuration du sujet jusqu'à sa concrétisation, et notre Co-promoteur à la centrale thermique de RAS-DJINET, Mr BOUAMARA .S, d'avoir accepté de nous encadrer, de nous avoir suivis pendant toute la durée du travail, et tous le personnels de la centrale.

Nos remerciements vont également au président et aux membres de jury qui feront l'honneur d'évaluer notre modeste travail. Ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Que toute personne qui d'une manière ou d'une autre, nous a aidé et encouragé pour l'aboutissement de ce travail, trouve ici l'expression de notre gratitude.

Dédicace



*Il est bien trop modeste comme travail
mais c'est le fruit de tant d'effort tout au long
de ce semestre, je le dédie :*

*Tout d'abord à mes très chères parents AOMAR et BAYA, qui m'ont
beaucoup aidé financièrement et encouragée pour
que je puisse mener mes études .*

À mes grands parents.

À mes frères : AMIN, FARID, SMAIL et YOUNES.

À mes sœurs adorées : SAMIRA et AMINA.

À mes très chères : HANANE ^{hggg} et MOUMOUH.

À toute la famille BEN AMEUR.

À mon oncle BOUALEM et sa femme SAADIA.

À HAKIM, RACHID, TOUFIK, NORA, FARIDA, KARIMA.

*À tous mes amis et je les remercie tous pour leurs
Soutiens, surtout : TOUFIK, MALIKA, LILA, ROSA,
WASSILA, RIMA, SOFIA et SAMIRA.*

À mon binôme FAFOUCHE et sa famille.

À toute la promo 2007/2008.

OUARDA

NAIMI.



*Il est bien trop modeste comme travail
mais c'est le fruit de tant d'effort tout au long
de ce semestre, je le dédie :*

*Tout d'abord à mes très chères parents : REMDANE ET ZAHIA, qui m'ont
beaucoup aidé financièrement et encouragée pour
que je puisse mener mes études .*

À mes grands parents.

À mes frères : AMIROUCHE, MOUHEND et MOULOUD.

*À mes sœurs adorées : KARIMA et son mari MHENA, RACHIDA et son mari
LOUNES et RADIA.*

À mes très chères : LYSA, YACIN et ASMA.

À toute la famille ALIN .

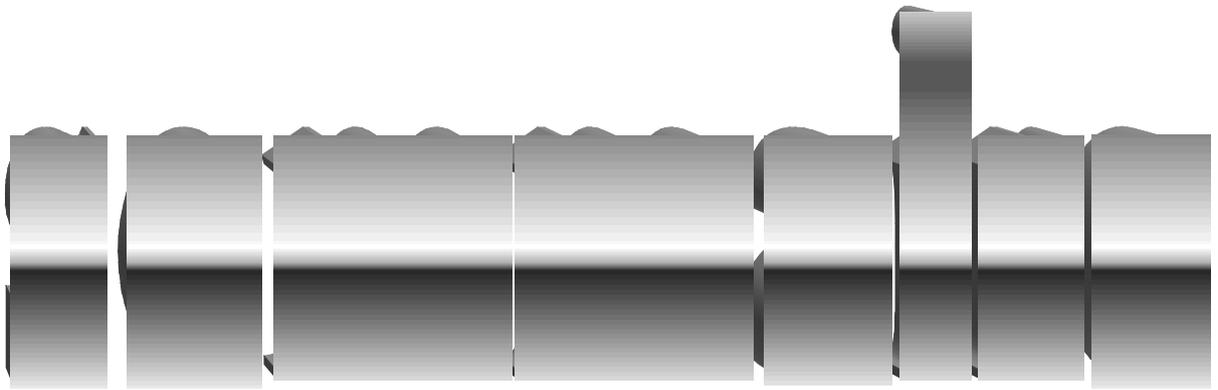
*À tous mes amis et je les remercie tous pour leurs
Soutiens surtout : AMAR, FATIHA, GHANIA,
DJAMILA.B et DJAMILA.I.*

Sans oublier toute la famille BOUAM.

À mon binôme OUARDA et sa famille.

À toute la promo 2007/2008.

**FATMA
BOUAM.**

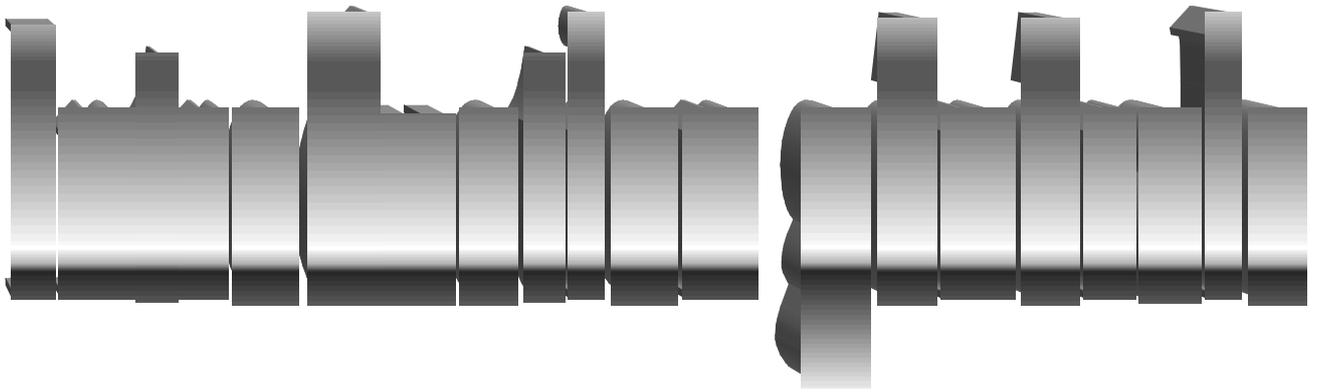


Introduction générale	1
 Partie I	
Chapitre I : Générateur de vapeur	
	2
I-1- Introduction.....	2
I-2- Production de la vapeur	2
I-3- Générateur de vapeur.....	4
I-4- Caractéristiques de la chaudière.....	4
I-5- Fonctionnement de la chaudière	4
I-6- Cycle thermodynamique	5
I-7- Circuit eau vapeur	6
I-8- Réglage du générateur.....	
Chapitre II : Poste d'eau	
II -1- Introduction.....	9
II -2- Le condenseur.....	9
II -3- Pompe d'extraction	9
II -4- Réfrigérants	10
II -5- réchauffeurs BP-HP.....	12
II -6- Pompes alimentaires	12
Chapitre III : Turbine à vapeur	
	13
III -1- Introduction.....	13
III -2- Caractéristiques.....	13
III -3- Constitution d'une turbine à vapeur	
Chapitre IV : L'alternateur	
	20
IV -1- Introduction.....	20
IV -2- Caractéristiques de l'alternateur	20
IV -3- Description et constitution de l'alternateur	29
IV -4- Principe de fonctionnement.....	29
IV -5- Refroidissement de l'alternateur.....	31
IV -6- Alimentation en gaz et étanchéité de l'arbre.....	32
IV -7- Entretien et surveillance de l'alternateur.....	35
IV -8- Limites de charges admissibles de l'alternateur	
Chapitre V : Groupe d'excitation	
V -1- Introduction.....	40
V -2- Description et constitution du groupe d'excitation	40

Partie II :

Chapitre I : Calcul électromagnétique

Cahier des charges.....	
I -1- Introduction.....	46
I -2- Calcul des dimensions principales.....	46
I -3- Dimensionnement du rotor	68
I -4- Calcul du circuit magnétique.....	80
I -5- Calcul des paramètres de la machine.....	96
I -6- Calcul des pertes et rendements.....	100
Conclusion générale	112



Introduction :

A notre époque, et sans électricité la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grande quantité. En Algérie les deux principaux modes de production sont les centrales thermiques et les centrales hydroélectriques. Les centrales thermiques à vapeur ont un rendement plus élevé du point de vue économique et technique, Elles sont construites généralement au bord de la mer à cause du déficit que connaît l'Algérie en ressources hydrauliques.

Toutefois, pour que l'eau de mer soit utilisable, il faut au préalable la traiter, et ensuite la chauffer et l'élever à une température et pression bien déterminé sous forme de vapeur pur, pour la détendre sur la turbine.

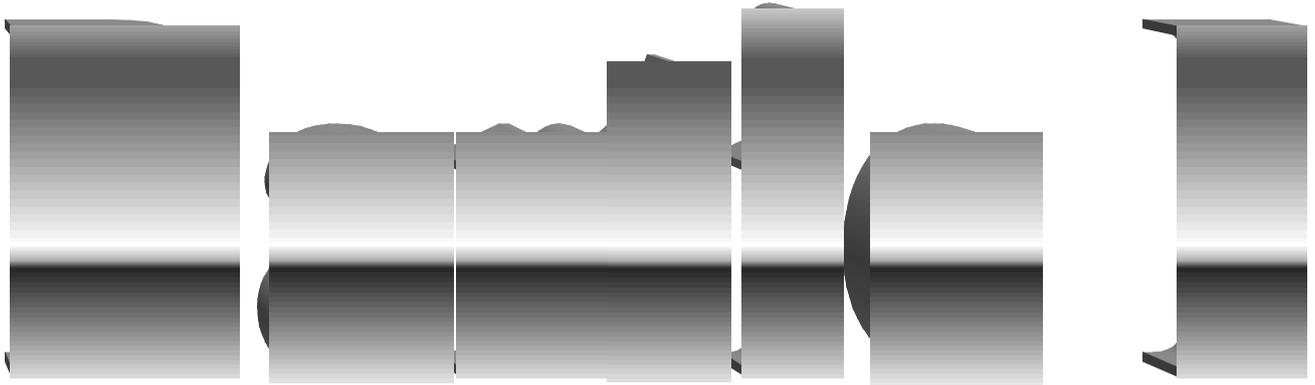
Les groupes turboalternateurs sont des machines à grande puissance, destinés à la production de l'énergie électrique nécessaire à la vie quotidienne et au développement industriel.

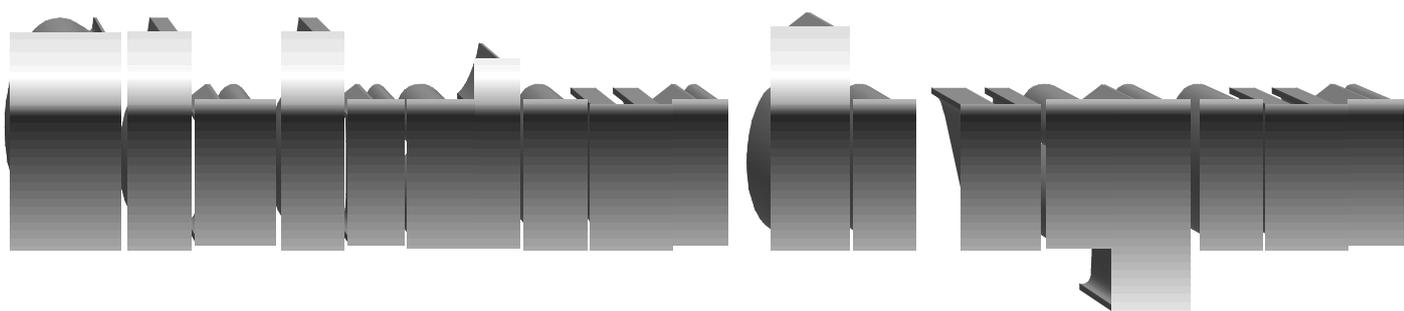
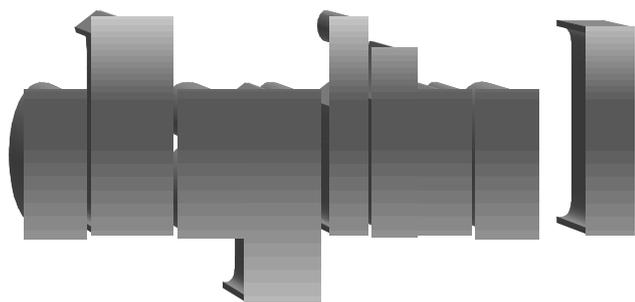
Dans le cadre de notre travail, qui a pour thème calcul et exploitation d'un alternateur synchrone bipolaire à refroidissement direct du rotor et à refroidissement indirect du stator avec de l'hydrogène entraîné par une turbine à condensation (138,2 bar, 535°C), notre but est d'arriver en collaboration avec la centrale thermique de RAS-DJINET à une description d'une tranche de production et un dimensionnement optimal et des caractéristiques de l'alternateur proche de ceux existant.

Pour illustrer ce travail, nous l'avons réparti en deux parties. La première partie est une description globale d'une tranche de production de la centrale thermique de RAS-DJINET, elle est partagée en cinq chapitre, tels que (générateur de vapeur, poste d'eau, turbine à vapeur, l'alternateur, groupe d'excitation).

La deuxième partie est constituée d'un chapitre, dont on a dimensionné la feuille stator et rotorique, le circuit magnétique, ainsi que les pertes et rendements de l'alternateur.

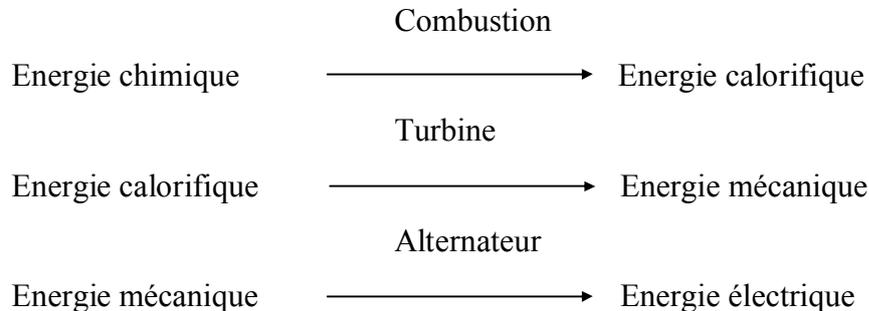
Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.





I-1- Introduction :

La production de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique n'est possible industriellement qu'en passant par les transformations suivantes :



I-2- Production de la vapeur :

La transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique se produit dans la chaudière en transformant l'eau en vapeur .La vapeur est un fluide très employé dans de nombreux domaines de l'industrie, ses utilisations couvrent principalement le transport de chaleur, de nettoyage

Les générateurs de vapeur constituent l'un des moyens permettant la production de celle-ci à partir de l'eau d'alimentation.

I-3 - Générateur de vapeur :

Un générateur de vapeur appelé aussi chaudière, a pour rôle, de transformer l'eau d'alimentation en vapeur sous certaines conditions de pression et de température et d'alimenter le groupe turboalternateur.

La chaudière se compose essentiellement de :

a- Faisceaux vaporisateurs:

Ils sont constitués de tubes d'eau (écran vaporisateur) et sont disposés côte à côte. Ces tubes écrans sont, sous forme de spirales, suspendus à la charpente de la chaudière et peuvent suivre librement toute dilatation thermique sans qu'apparaissent des contraintes inadmissibles dans les tuyaux.

L'eau se trouvant dans l'écran vaporisateur va être chauffée directement par rayonnement et par convection et va se vaporiser en partie, cette vapeur saturée sera dirigée vers le ballon chaudière.

b- Chambre de Combustion :

La chambre de combustion est la partie principale du générateur de vapeur. C'est dans cette enceinte qu'ont lieu les principaux échanges de chaleur (air-combustible) pour la préparation de la combustion. Ce mélange sera généré par les brûleurs dans la chaudière.

c- Brûleurs :

Le générateur de vapeur est équipé de huit (08) brûleurs mixtes, gaz naturel et au fuel léger (combustible liquide provenant du pétrole brut), ces brûleurs sont disposés sur quatre étages de la face avant de la chaudière.

d- ballon Chaudière :

Le ballon chaudière est un réservoir qui constitue une enceinte de mélange d'eau et de vapeur. Ses fonctions sont :

- ✓ La séparation entre la vapeur et l'eau au moyen de séparateurs dits cyclones.
- ✓ Il entretient la circulation pour que l'eau puisse revenir dans la chaudière par les tubes de retour.
- ✓ Le niveau d'eau dans le ballon reste constant pendant tout le temps de fonctionnement de la chaudière.

e- Appareils de récupération :

Ce sont des échangeurs thermiques destinés à récupérer une partie de chaleur contenue dans les gaz de combustion et ce dans le but d'augmenter le rendement de la chaudière, et par conséquent de diminuer les pertes de chaleur.

Les appareils de récupération sont :

❖ Surchauffeur et resurchauffeur :

Ce sont des faisceaux tubulaires soumis aux températures élevées et sont constituées de nappes de tubes disposés en parallèle sous formes de serpentins, montés dans le parcours de gaz de combustion.

❖ L'économiseur :

C'est une tuyauterie en forme de serpent. Il se trouve en fin de parcours des gaz de combustion. Il a comme fonction principale, la réception, le réchauffement et l'acheminement de l'eau d'alimentation vers le ballon chaudière.

❖ Réchauffeur d'air :

Le réchauffeur d'air sert à réchauffer l'air de combustion par récupération de chaleur des fumées, ce qui augmente le rendement de la chaudière. Ce réchauffage facilite et accélère le séchage.

I-4- Caractéristiques de la chaudière :

- ✓ Débit vapeur minimal : ($Q_{\min} = 130\text{t/h}$).
- ✓ Débit vapeur maximal : ($Q_{\max} = 530\text{t/h}$).
- ✓ Débit vapeur nominal : ($Q_{\text{nom}} = 523\text{t/h}$).
- ✓ Pression ballon chaudière : 160 bars.
- ✓ Pression de vapeur resurchauffée : 37 bars.
- ✓ Température de vapeur surchauffée : 540°C .

I-5- Fonctionnement de la chaudière :

La chaudière dite à circulation naturelle, fonctionne avec du gaz naturel et utilise le fuel comme combustible de secours. L'ignition s'opère dans la chambre de combustion en présence de l'air. La chaleur dégagée est transmise directement au tube écrans contenant l'eau à vaporiser. L'émulsion produite s'élève au réservoir (ballon chaudière) où la vapeur sera séparée de l'eau grâce à des cyclones.

L'alimentation des tubes écrans en eau est obtenue grâce à quatre colonnes de descentes, disposés dans la chambre morte.

I-6- Cycle thermodynamique :

Sur la figure (I-1) on décrit la température du cycle théorique de l'eau-vapeur de la centrale thermique en fonction de l'entropie (une grandeur utilisée dans la thermodynamique qui permet d'évaluer la dégradation de l'énergie du circuit eau vapeur).

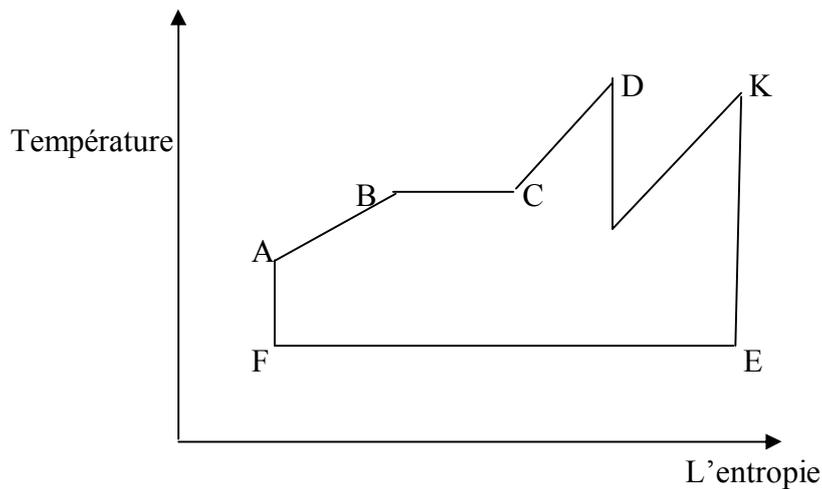


Fig. (I-1) : Cycle théorique eau –vapeur

FA : Elévation de pression de l'eau d'alimentation.

AB : Elévation de température de l'eau jusqu'à la saturation.

BC : Vaporisation à température constante.

CD : Surchauffe de la vapeur.

DI : 1^{er} détente d'entropie.

IK : Resurchauffe d'une partie de la vapeur à pression moyenne.

KE : détente entropie constante dans la turbine à basse pression.

EF : condensation à température constante.

I-7- Circuit eau vapeur :

Après son introduction dans la chaudière jusqu'à sa sortie du surchauffeur où sa température atteint 540°, l'eau passe par les étapes suivantes :

- ✓ Echauffement dans l'économiseur.
- ✓ Vaporisation dans les tubes écrans (L'eau est ramenée à l'état de vapeur saturée).
- ✓ Surchauffe de la vapeur dans le surchauffeur.

La vapeur resurchauffée se détend dans la turbine qui est constituée de trois corps: le corps haute pression (HP), le corps moyenne pression (MP) et celui de basse pression (BP).

A la sortie du surchauffeur, la vapeur vive est envoyée directement au corps HP de la turbine, la vapeur détendue est dirigée vers le resurchauffeur puis vers le corps MP et enfin au corps BP.

Dans le condenseur qui constitue une même enceinte avec le corps BP, la vapeur est condensée grâce à un vide très poussé, de l'ordre de 0.05 bars absolu. Par la suite, l'eau est pompée vers la bache alimentaire via les réchauffeurs BP grâce à une pompe d'extraction. A ce stade l'eau alimentaire, déjà préchauffée, est renvoyée vers le ballon chaudière via les réchauffeurs HP et l'économiseur par l'intermédiaire de pompes alimentaire haute pression (170bars). Ainsi l'eau reprend son cycle comme le montre la fig. (I-2)

La vapeur surchauffée produite servira à entraîner la turbine à la vitesse de rotation nominale n_n laquelle est réglée par la quantité de vapeur admise dans la turbine

La fig. (I-3) donne les valeurs de pressions et de températures aux points de garantie du circuit eau-vapeur.

I-8- Réglage du générateur de vapeur :

Les facteurs qui doivent être maintenus à des valeurs déterminées pour le bon fonctionnement du générateur de vapeur sont :

- ✓ Le niveau d'eau au réservoir.
- ✓ La pression de vapeur à l'admission de la turbine HP.
- ✓ L'excès d'air de combustion.
- ✓ La température de surchauffe et resurchauffe.
- ✓ La dépression dans la chambre de combustion.

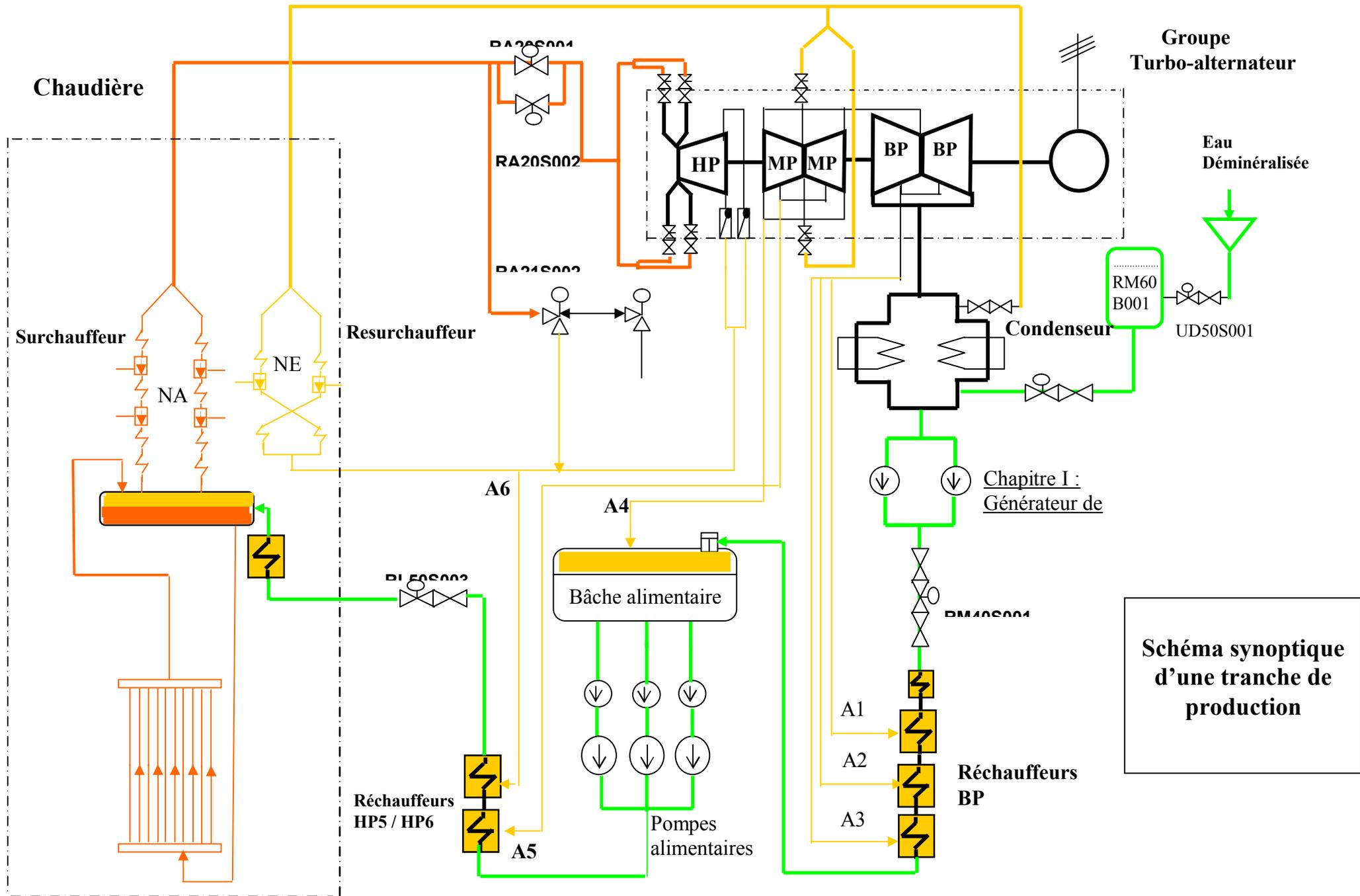


Schéma synoptique d'une tranche de production

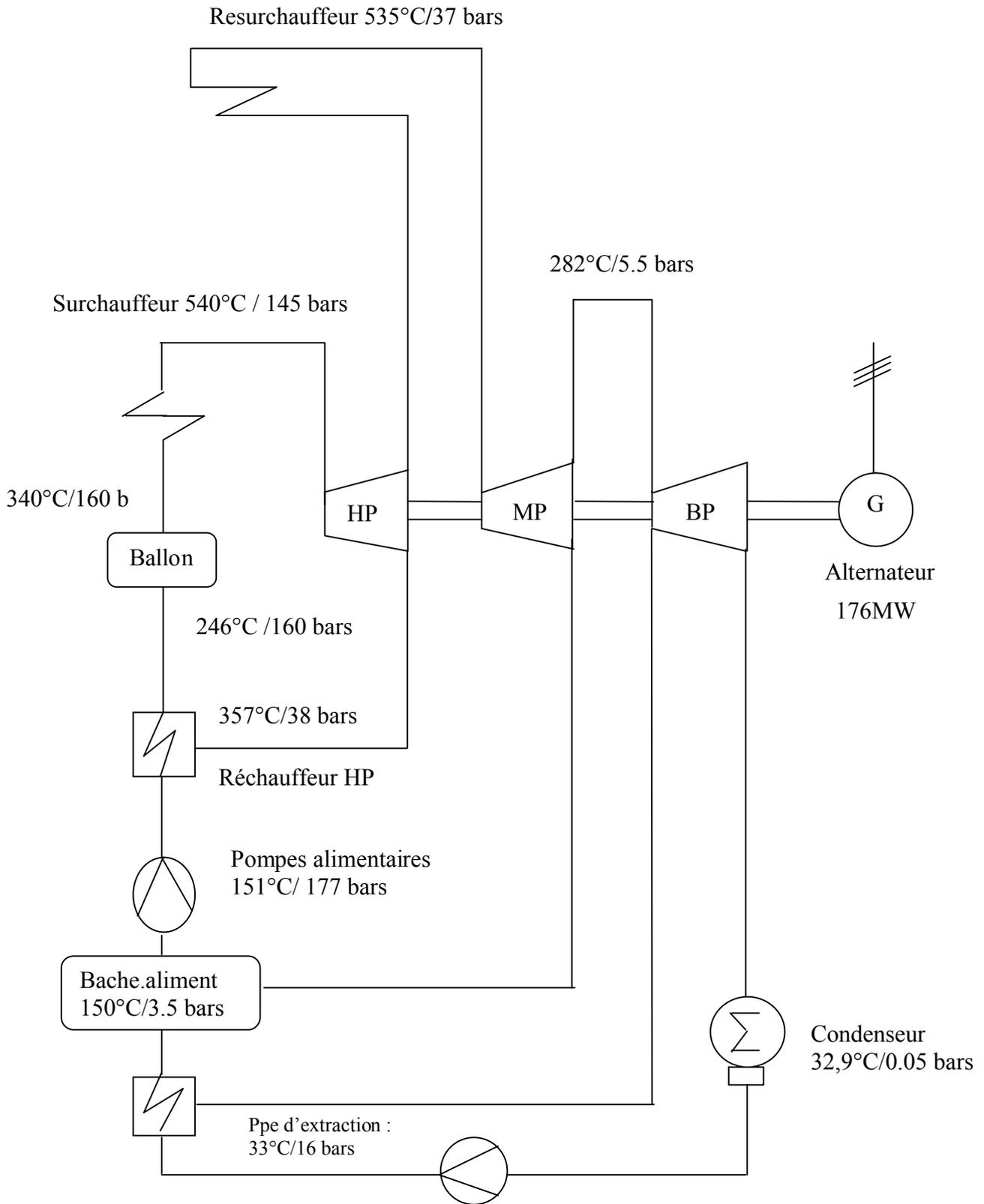
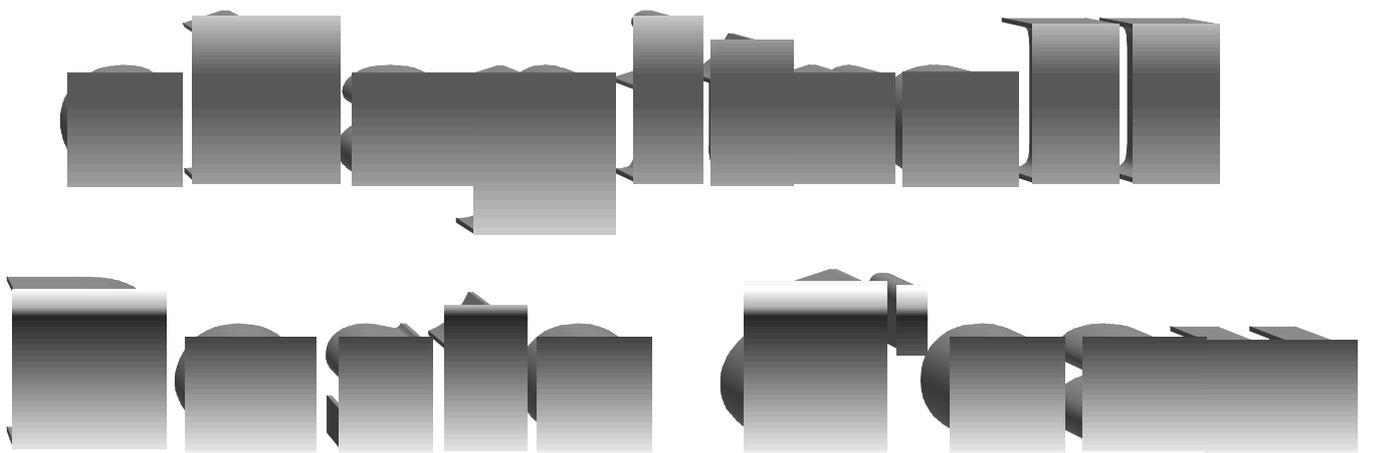


Fig. (I-3) : Circuit eau vapeur (Températures et pression)



II-1- Introduction :

Le poste d'eau, est l'ensemble des appareils qui transfère l'eau du cycle depuis le condenseur jusqu'à la chaudière et qui conditionne cette eau du point de vue de la température et de la teneur en oxygène.

II-2- Le condenseur :

Le condenseur utilisé dans la centrale de RAS-DJINET est un condenseur à échange par surface. L'eau de circulation (eau de mer) et la vapeur, sont séparées par les parois des tubes.

-Un condenseur par surface comprend essentiellement.

- ✓ Une boîte à eau.
- ✓ Une plaque tubulaire à chaque extrémité du corps du condenseur.
- ✓ Un faisceau tubulaire en titane.
- ✓ Une manchette raccordant le corps du condenseur à la bride d'échappement de la turbine.
- ✓ Un puits situé à la partie inférieure du corps du condenseur où est recueillie la vapeur condensée.

-Le condenseur a pour principales fonctions :

- ✓ Assurer la condensation de la vapeur évacuée du corps basse pression de la turbine et réintroduire le condensat dans le circuit eau-vapeur.
- ✓ Augmenter la chute d'enthalpie de la turbine en établissant une dépression atmosphérique afin d'obtenir un rendement aussi élevé que possible.
- ✓ Dégager le condensat et évacuer les incondensables.
- ✓ Le condenseur reçoit également le condensat des réchauffeurs.

II-3- Pompe d'extraction :

La pompe d'extraction aspire dans une enceinte sous vide (Puits du condenseur). Cette pompe, est de construction verticale, la profondeur de suspension est atteinte au moyen d'un puits d'épuisement.

La pompe est logée à l'intérieur du puits d'épuisement, ce type de pompe est utilisé lorsque le réservoir collecteur (puits du condenseur) se trouve à un niveau relativement bas.

La pompe d'eau d'extraction a pour rôle d'acheminer le condensat principal à la sortie du condenseur jusqu'à la bache alimentaire en passant par les réchauffeurs basse pression, les réfrigérants d'été, les réfrigérants d'hydrogène et le condenseur des buées ainsi que les éjecteurs de service.

II-4- Réfrigérants :

a- Réfrigérants d'été :

Les deux réfrigérants d'été utilisent l'eau de mer comme source froide, ce sont des échangeurs de chaleurs par surface en tubes mandrinés dans des plaques tubulaires en métal résistant à la corrosion.

Ces réfrigérants servent à refroidir l'eau d'extraction dans le cas des températures élevées dans le circuit d'eau d'extraction (généralement en été d'où le nom de réfrigérants d'été.)

$$\text{Débit eau de mer} = 2 \cdot 215 \text{ m}^3/\text{h}.$$

b- Réfrigérants d'Hydrogène :

Les réfrigérants d'hydrogène, au nombre de quatre, sont des échangeurs par surface qui refroidissent d'hydrogène par la méthode des courants croisés.

L'échange de chaleur entre l'hydrogène et l'eau de refroidissement s'effectue par l'intermédiaire des tubes à ailettes parcourus par l'eau.

Les quatre réfrigérants sont logés horizontalement dans l'enveloppe du stator, ils servent à refroidir l'hydrogène contenu dans l'alternateur.

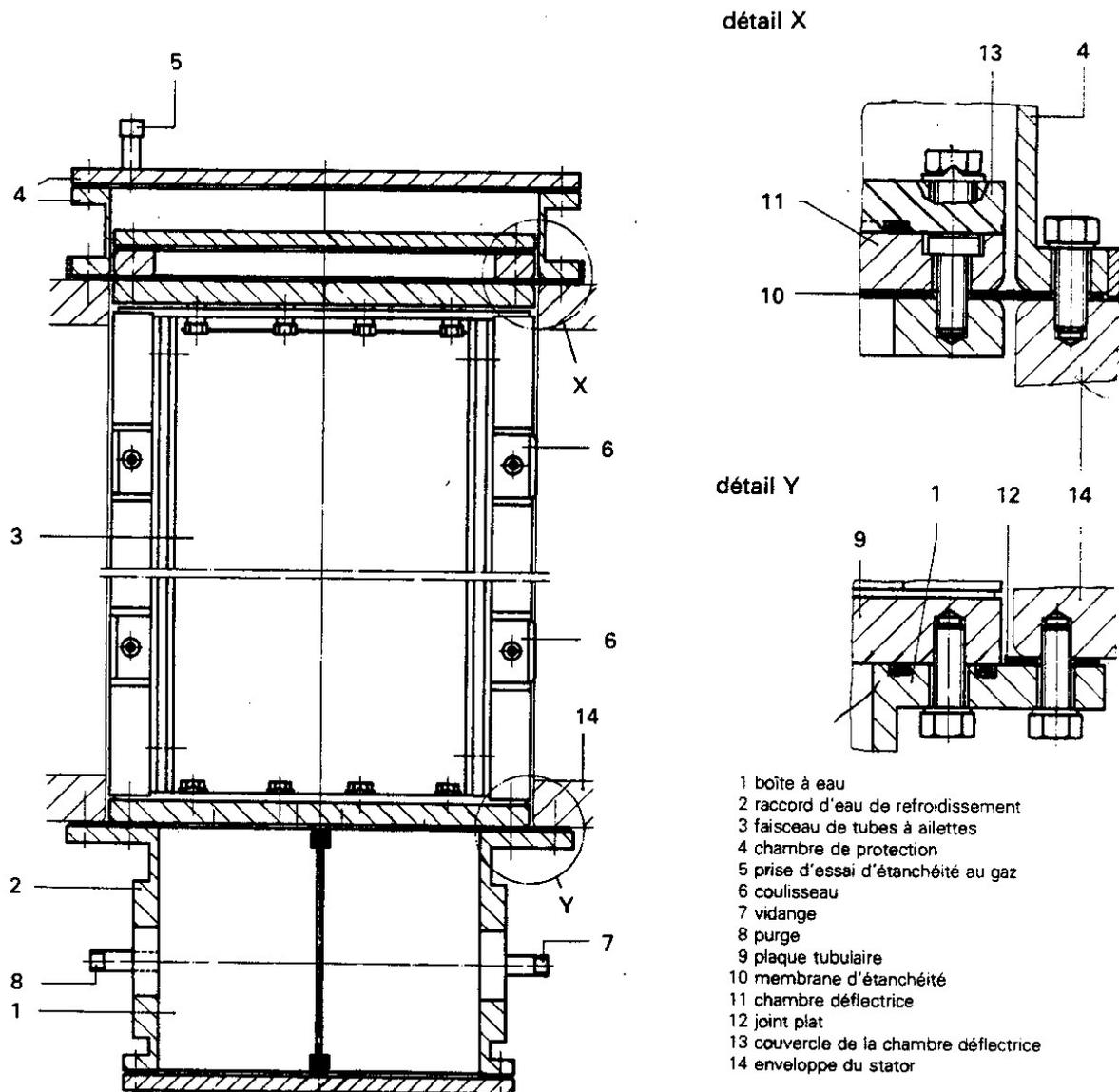


Fig. (II-1) : Réfrigérant d'hydrogène.

c-Le condenseur des buées :

Le condensat principal du circuit d'eau d'extraction est utilisé comme fluide réfrigérant pour refroidir les buées issues de la vapeur de fuite du circuit vapeur de barrage. Le mélange buées-air, pénètre dans l'espace de vapeur du condenseur des buées, ces dernières se condensent à la surface des tubes du condenseur.

La chaleur de vaporisation qui se dégage lors de la condensation est transmise au fluide réfrigérant qui circule dans les tubes du condenseur. Le condensat qui se forme est évacué au condenseur de la turbine.

II-5- Réchauffeurs BP –HP :

Le condensat principal pénètre dans la boîte à eau, passe à travers le faisceau tubulaire où a lieu le réchauffage et quitte le réchauffeur par l'autre moitié de la boîte à eau.

La vapeur soutirée atteint l'espace vapeur du réchauffeur en passant par la conduite du soutirage et les tubulaires d'entrée de vapeur. Dans cet espace la chaleur produite lors de la condensation est cédée au condensat principal (coté tubes).

Le condensat auxiliaire du réchauffeur BP3 s'écoule jusqu' au réchauffeur basse pression (BP2), la totalité du condensat auxiliaire s'écoule jusqu'au réchauffeur basse pression (BP1).

Tout le condensat auxiliaire s'accumule dans le pot de condensation et s'écoule jusqu'au réfrigérant des purges. Le rôle des trois réchauffeurs basse pression est de réchauffer le condensat lors de son transfert du condenseur vers la bêche alimentaire où il est réchauffé et dégazé par la vapeur de soutirage du corps moyenne pression de la turbine.

Les deux réchauffeurs haute pression ont pour rôle, le réchauffage d'eau d'alimentation qui vient des pompes alimentaires .Le fluide chaud utilisé est de la vapeur provenant des soutirages des corps moyenne et haute pression de la turbine.

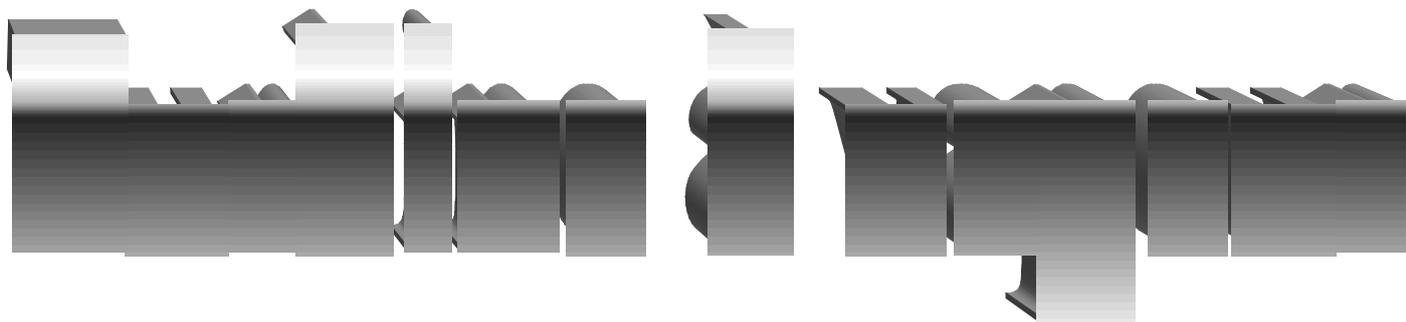
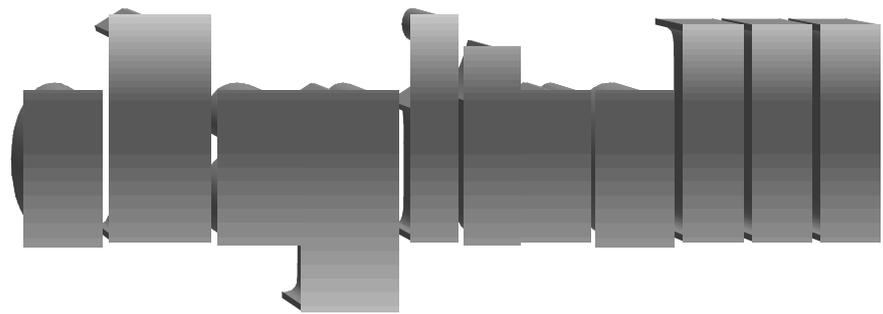
II-6- Pompes alimentaires :

Trois pompes alimentaires par tranche de production sont utilisées, chacune de ces pompes assure 50% du débit maximal nécessaire. L'eau alimentaire est prise de la bêche alimentaire et afflue par déclivité à la pompe nourricière qui augmente la pression de l'eau jusqu'à 11 bars.

Chaque pompe est équipée de deux filtres, l'un à l'aspiration de la pompe nourricière, l'autre installé entre la pompe nourricière et la pompe principale.

Pour atteindre une vitesse plus élevée de la pompe d'alimentation, un multiplicateur est installé sur l'arbre de la pompe, le multiplicateur est monté à coté du moteur.

La pompe alimentaire sert à refouler l'eau d'alimentation de la bêche alimentaire vers la chaudière en passant à travers les réchauffeurs haute pression et l'économiseur.



III-1- Introduction :

La vapeur provenant de la chaudière a été produite à haute température et à haute pression pour se détendre sur la turbine, qui assure la transformation de l'énergie thermique de cette vapeur en énergie mécanique, qui sert à entraîner l'arbre de l'alternateur.

La turbine comporte un certain nombre d'étages dont chacun d'eux comprend une roue fixe (distributeur) et une roue mobile. Ces roues sont munies d'ailettes ou aubes laissant entre elles un intervalle pour le passage de la vapeur.

Le jet de la vapeur sortant du distributeur est dévié sur la roue, d'où la création d'un couple moteur entraînant la roue en rotation.

III-2- Caractéristiques :

- ✓ Longueur : 16,125 m
- ✓ Largeur : 13 m.
- ✓ Poids : 500.10^3 Kg.
- ✓ Pression : 138,2 bars
- ✓ Puissance : 176 MW.
- ✓ Température vapeur : 535°C.
- ✓ Vitesse de rotation nominale : 3000Trs /mn.

III-3- Constitution d'une turbine à vapeur :

La turbine, est de type à condensation et à une resurchauffe, elle est à une seule ligne d'arbre composée de trois corps HP, MP et BP séparés.

Les rotors de la turbine et de l'alternateur sont accouplés rigidement par des brides d'accouplements.

La turbine comporte six soutirages de vapeur alimentant les réchauffeurs BP et HP.

a- Corps haute pression (HP) :

Le corps haute pression est représenté sur les Figures (III-1) et (III-2).

❖ **Constitution et fonctionnement :**

Il est à simple flux, et il utilise de la vapeur à haute pression, il est équipé d'un étage de réglage qui est à action. Quatre ensembles combinés, vannes d'arrêt et soupapes régulatrices.

La vapeur conduite à la turbine par l'intermédiaire des tuyauteries, parvient aux soupapes régulatrices après avoir traversé les vannes d'arrêt. A partir de ces soupapes, la vapeur s'écoule dans l'enveloppe.

Des clapets anti-retour, sont montés sur les tuyauteries de resurchauffes entre le corps HP et le resurchauffeur, pour empêcher le reflux chaud du resurchauffeur vers le corps HP.

L'enveloppe externe est une construction en tonneau sans plan de joint axial, et l'enveloppe interne à un plan de joint axial, cette dernière est montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques.

❖ **Caractéristiques du corps HP :**

- ✓ Débit vapeur : 532 T/H.
- ✓ Pression vapeur : 138 bars.
- ✓ Température vapeur : 538°C.
- ✓ Poids : 4910 Kg.

❖ **Aubes mobiles et aubes fixes :**

Les aubages du corps HP se composent de plusieurs étages en tambour. Hormis l'étage de réglage, tous les étages sont du type à réaction avec un degré de réaction de 50%.

Les aubes mobiles, sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et un tenon. Les aubes fixes sont réalisées de la même manière.

❖ **Paliers :**

Il existe deux paliers, le palier d'extrémité porteur à deux coins d'huile est monté en tête de la machine, il supporte le rotor et le corps HP. Le palier arrière ou palier radial et de butée est monté entre les corps HP et MP, il sert à supporter les enveloppes et les rotors des corps HP et MP et d'encaisser l'effort axial s'exerçant sur le rotor.

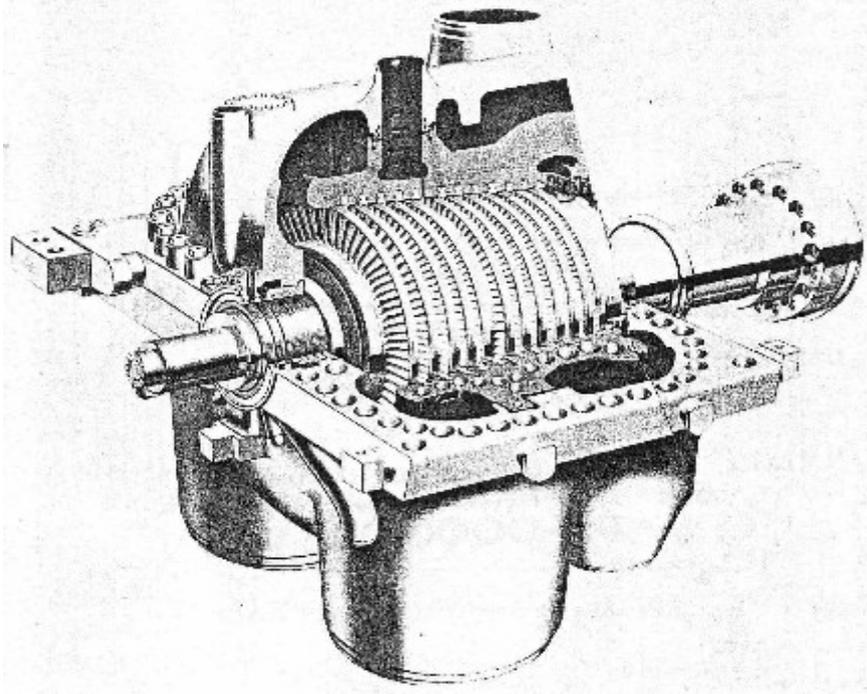
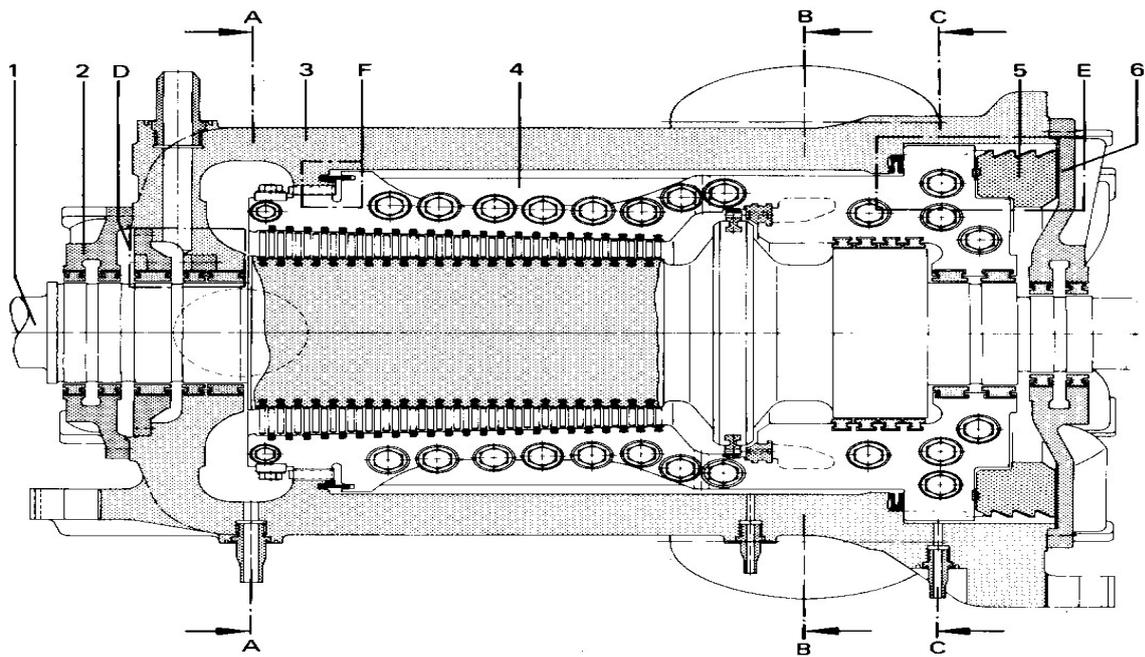


Fig. (III-1) : Corps Haute pression.



- 1-rotor.
- 2-pièce d'extrémité de boîte étanche.
- 3-enveloppe en tonneau (enveloppe externe).
- 4-enveloppe interne.
- 5-bague filetés.
- 6-couvercle.

Fig. (III-2) : Corps HP (coupe longitudinale).

b- Corps moyenne pression (MP) :

Le corps moyenne pression est représenté sur les Figures (III-3) et (III-4).

❖ Description et fonctionnement :

Il est à double flux, et comporte deux vannes d'interception et de deux soupapes modératrices. La vapeur resurchauffée véhiculée par les tuyauteries parvient aux soupapes modératrices, après avoir traversé les vannes d'intersections. L'enveloppe externe possède un plan de joint horizontal, elle porte l'enveloppe interne, montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques. Les aubes directrices sont logées dans celle-ci (l'enveloppe interne).

La vapeur resurchauffée pénètre au milieu de l'enveloppe interne par le bas et par le haut. Sa présence limite les caractéristiques élevées de la vapeur à la zone d'admission de cette enveloppe, alors que le joint horizontal de l'enveloppe externe n'est exposé qu'à la faible pression et à la température réduite de la vapeur à la sortie de l'enveloppe interne.

❖ Caractéristiques du corps MP :

- ✓ Pression d'admission : 35,9 bars.
- ✓ Température d'admission : 535°C.
- ✓ Débit vapeur : 467,9 T/h.
- ✓ Nombre d'étages à réaction : 2×19.

❖ Aubes mobiles et aubes fixes :

Tous les étages du corps MP sont des étages à réaction, dont le degré de réaction est de 50%, une partie de ces étages se trouve dans le flux de vapeur côté HP tandis que l'autre partie, elle se trouve dans le flux de vapeur côté basse pression (BP).

Les aubes mobiles du corps MP sont fixées et réalisées de la même manière que celles du corps HP.

❖ Palier :

Le palier arrière du corps MP est disposé entre les corps MP et BP. Il sert à supporter l'enveloppe du corps MP et les rotors des corps MP et BP.

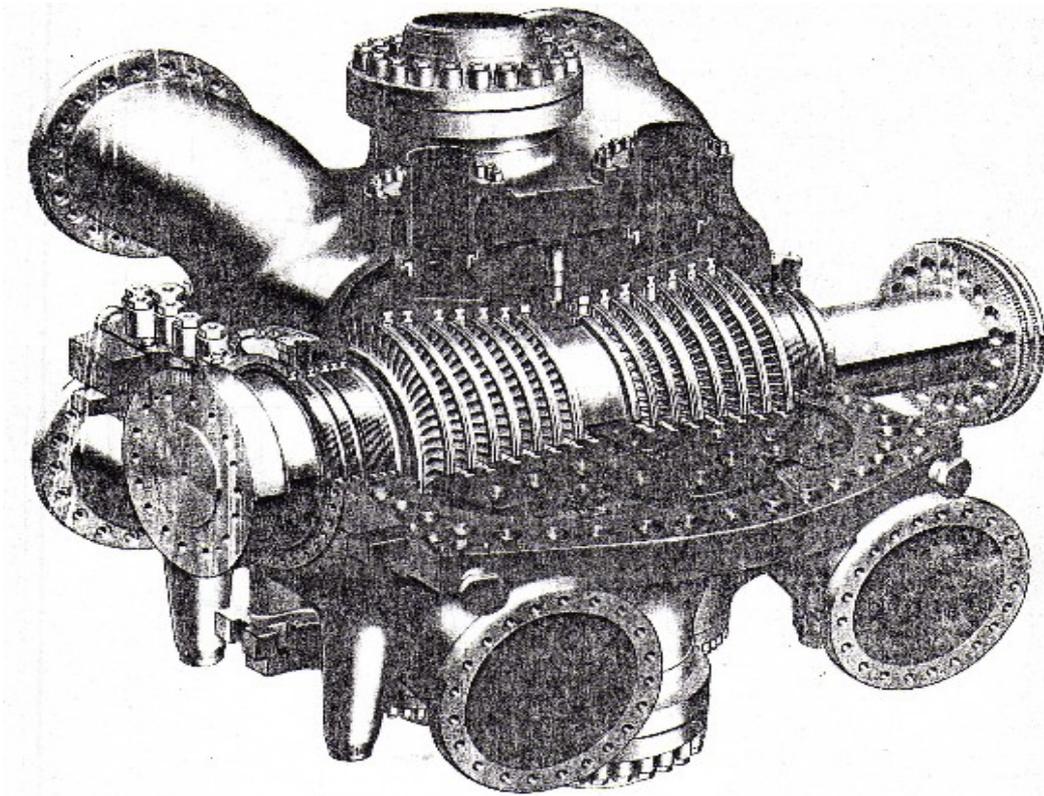
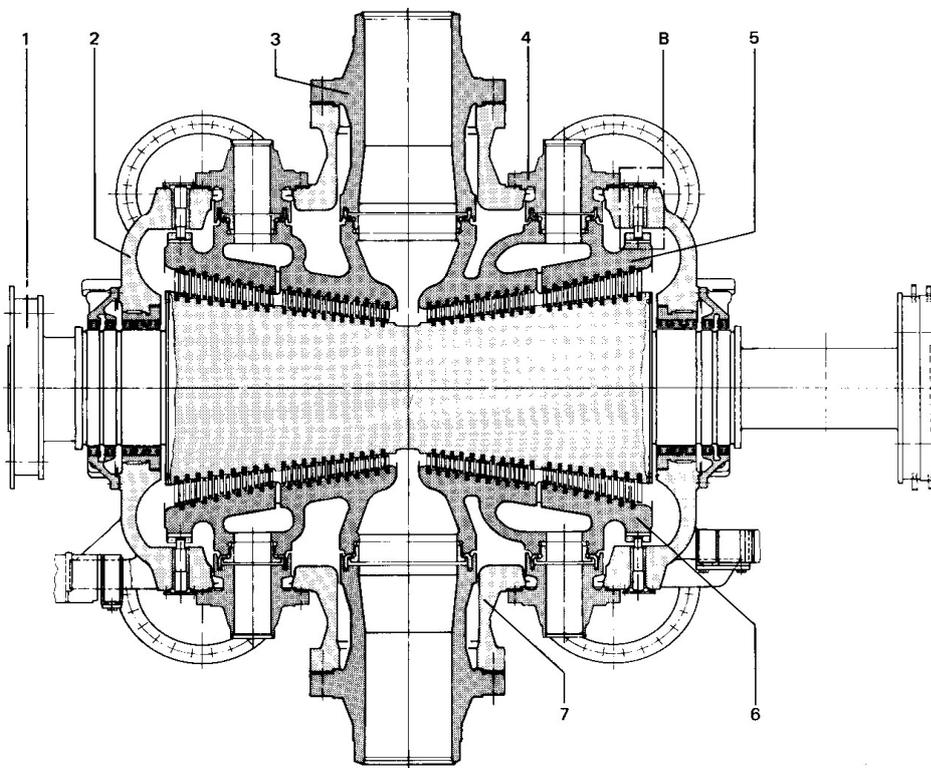


Fig. (III-3) : Corps Moyenne pression.



- 1-Rotor.
- 2-Demi-corps supérieur de l'enveloppe externe.
- 3-Pipe d'admission.
- 4-Pipe de soutirage.
- 5-Demi-corps supérieur de l'enveloppe interne.
- 6-Demi-corps inférieur de l'enveloppe interne.
- 7-Demi-corps inférieur de l'enveloppe externe.

Fig. (III-4) : Corps MP (coupe longitudinale).

c- Corps basse pression (BP) :

Le corps basse pression est représenté sur les Figures (III-5) et (III-6).

❖ Description et fonctionnement :

Il est à double flux, il s'agit d'une construction mécano soudée comprenant une carcasse et une double enveloppe. Ces trois enveloppes rigides à plan de joint horizontal. L'enveloppe interne qui porte les premiers étages des directrices est suspendue dans l'enveloppe intermédiaire de façon à pouvoir se dilater librement.

L'enveloppe intermédiaire de l'enveloppe externe repose en quatre points sur des longerons latéraux. Elle porte deux couronnes qui reçoivent les derniers étages de directrices.

❖ Caractéristiques du corps BP :

- ✓ Pression d'admission : 5,5 bars.
- ✓ Température d'admission vapeur : 282°C.
- ✓ Débit vapeur : 406 T/h.
- ✓ Nombre d'étages : 2×8.

❖ Aubages :

Les étages du corps BP sont des étages à réaction avec un degré de réaction de 50%. Ils sont montés à l'intérieur du corps interne et forment ainsi la partie intérieure des aubages BP.

Toutes les aubes mobiles sont pourvues de bords aiguisés dans la masse, ils ont un pied en tête de marteau.

❖ Palier :

Le palier arrière est disposé entre le corps BP et l'alternateur. Il sert à supporter le rotor du corps BP.

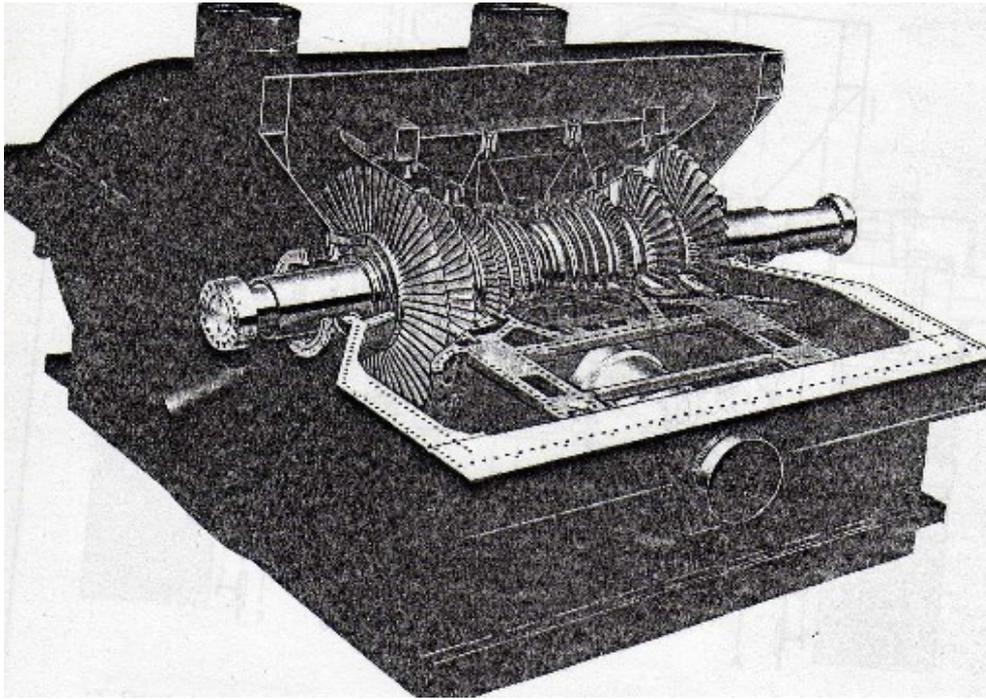
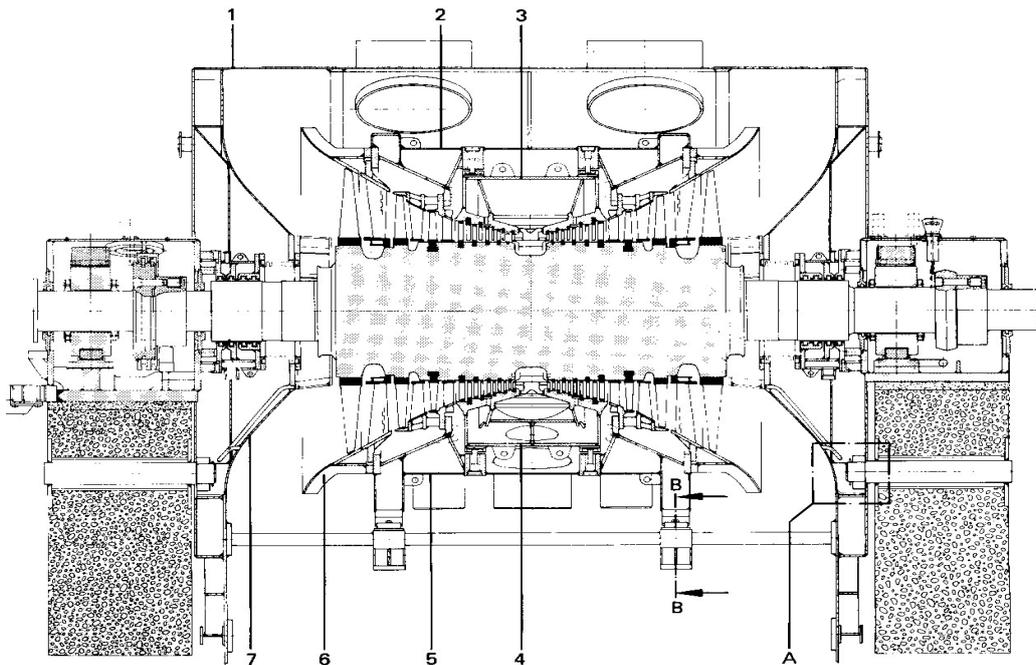
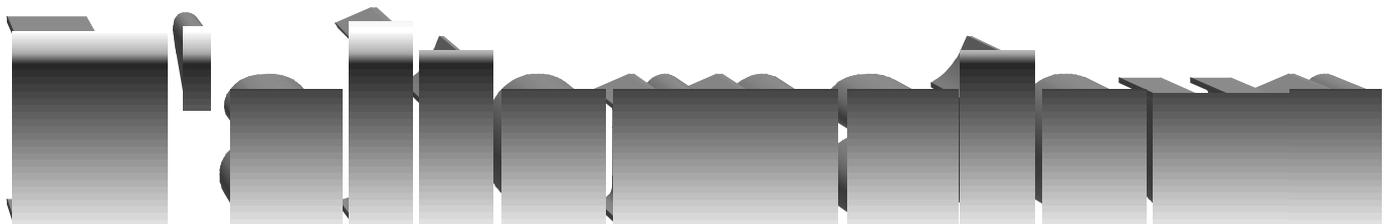


Fig. (III-5) : Corps Basse pression.



- 1-Demi-corps supérieur de la carcasse.
- 2-Demi-corps supérieur du corps externe de l'enveloppe double.
- 3-Demi-corps supérieur du corps interne de l'enveloppe double.
- 4-Demi-corps inférieur du corps interne de l'enveloppe double.
- 5-Demi-corps inférieur du corps externe de l'enveloppe double.
- 6-Diffuseur.
- 7-Demi-corps inférieur de la carcasse.

Fig. (III-6) : Corps BP (coupe longitudinale).



IV-1- Introduction :

L'alternateur de la centrale de RAS-Djinet, est une machine synchrone triphasée.

C'est un alternateur bipolaire à refroidissement direct du rotor et à refroidissement indirect de l'enroulement du stator avec de l'hydrogène.

IV-2- Caractéristiques de l'alternateur :

Grandeurs nominales et puissances de l'alternateur :

- ✓ Puissance apparente : 220 MVA
- ✓ Puissance active : 176 MW
- ✓ Intensité : 8.195 KA
- ✓ Tension : 15.5 KV \pm 10 %
- ✓ Vitesse de rotation : 3000 Tr/min
- ✓ Fréquence : 50 Hz
- ✓ Facteur de puissance ($\cos\phi$) : 0.8
- ✓ Couplage des phases : Y
- ✓ Pression d'hydrogène effective : 3 bars
- ✓ Courant d'excitation nominal requis pour la puissance nominal : 2450 A

IV-3- Description et constitution de l'alternateur :

Nous pouvons voir une coupe longitudinale et transversale de l'alternateur. Fig. (IV-1).

a- Stator :

Pour des raisons de fabrication, de montage et de transport, le stator se compose des principales parties suivantes :

❖ Enveloppe du stator :

L'enveloppe portant le circuit magnétique et l'enroulement est l'unité de transport la plus lourde de tout l'alternateur. Elle doit être rigide pour pouvoir supporter les parties actives ainsi que les forces et les moments apparaissant en service et résister à une pression relative d'environ dix bars sur les alternateurs refroidis par l'hydrogène. L'enveloppe du stator est une construction soudée qui se compose d'une partie cylindrique, de deux brides et de nervures radiales et axiales. Voir fig. (IV-2).

Certaines parties de l'enveloppe situées au niveau des connexions de l'enroulement du stator sont réalisées en acier amagnétique pour éviter les pertes par courant de Foucault, les autres parties sont principalement fabriquées en acier. La disposition et le dimensionnement des nervures sont essentiellement déterminés par le guidage du gaz de refroidissement.

Compte tenu de la rigidité de l'enveloppe du stator, le poids du stator et les efforts dus aux courts-circuits sont transmis au massif support par les pieds du stator et les boulons d'encrage.

L'enveloppe du stator est fermée côté turbine et côté excitatrice par des flasques résistant à la pression. Les flasques contiennent les paliers de l'alternateur et étanchéités d'arbre, ainsi que les tuyauteries d'alimentation et de récupération de l'huile de graissage.

Les paliers sont des supports qui tiennent l'arbre du rotor à l'aide de coussinets montés dans le demi-flasque inférieur, et isolés électriquement afin d'empêcher la circulation des courants d'arbre à travers les flasques.

❖ **Circuit magnétique :**

Le circuit magnétique étant traversé par un champ tournant. Afin de réduire les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dans cette partie active de l'alternateur, il faut que le circuit magnétique soit constitué d'un empilage de tôle mince, chaque couche de l'empilage est constituée de plusieurs segments.

Les tôles magnétiques ont une épaisseur de 5mm au silicium à haute résistivité et isolées par du vernis. Le paquet de tôle est maintenu serré au moyen de tiges d'assemblage et plaques de serrage, puis fixé à l'enveloppe du stator.

La chaleur dégagée par le circuit magnétique est évacuée par des canaux axiaux qui résultent de la division axiale de l'empilage en plusieurs paquets de tôle. l'hydrogène s'écoule par des larges fentes entre les paquets de tôles séparés par des entretoises. Voir fig. (IV-3).

❖ **Enroulement du stator :**

▪ **Constitution et isolation des barres :**

Chaque barre est composée d'un grand nombre de conducteurs élémentaires isolés, ces conducteurs élémentaires sont tressés avec une torsion de 360° dans la partie située dans le fer, cette disposition permet d'annuler les inégalités de tension induite entre le haut et le bas de l'encoche, ainsi il n'y a pas ou très peu de courants de compensation qui circulent à

l'intérieur des barres. Le courant statorique parcourant la barre se répartit, donc, presque uniformément sur l'ensemble de la section de la barre, ce qui se traduit par une diminution des pertes supplémentaires dépendant du courant.

Pour l'isolation de l'enroulement, on a utilisé une matière appartenant à la classe F, qui résiste à une tension supérieure à la tension nominale et supporte une température de 155°C.

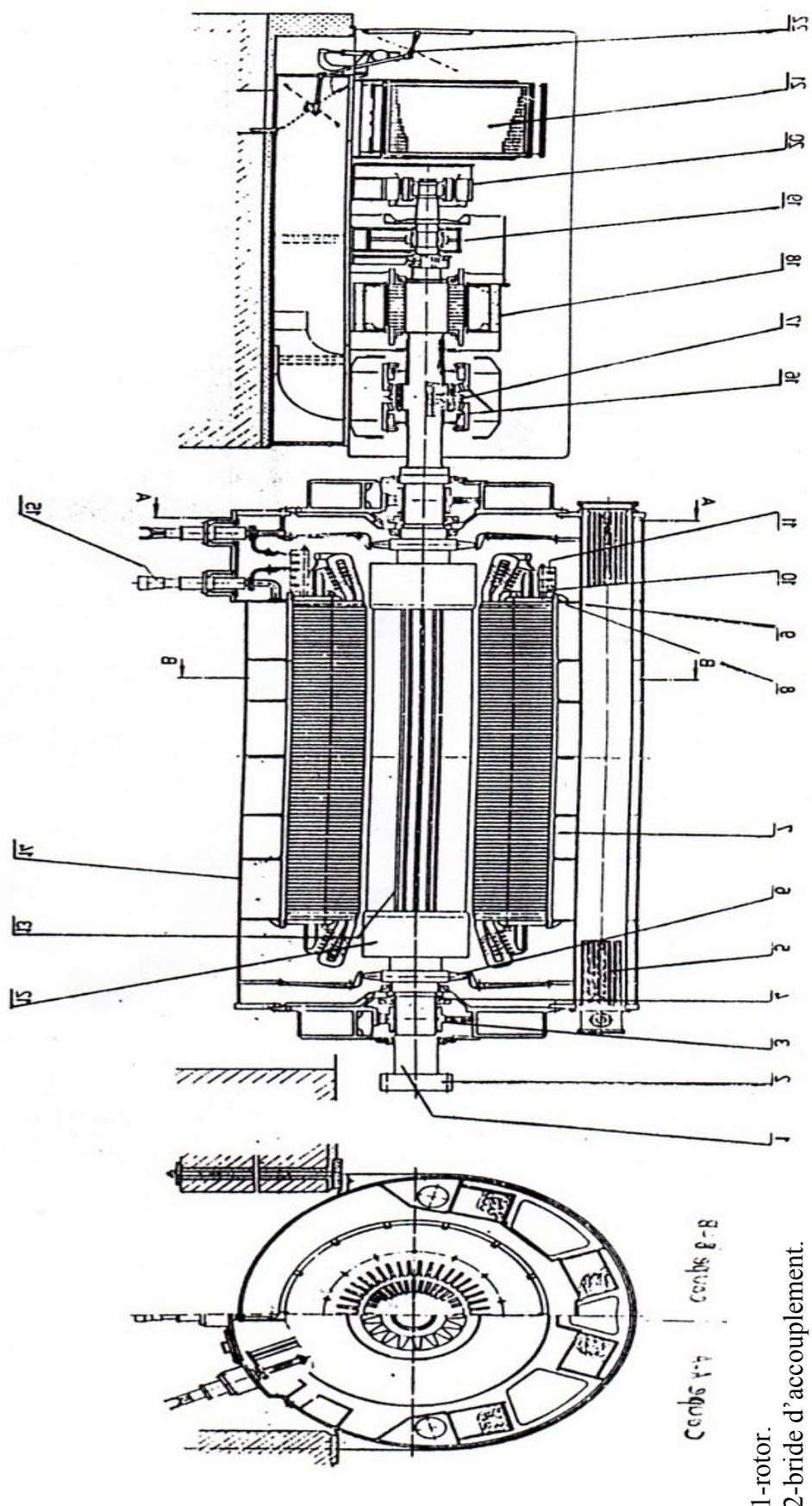
Les barres sont enrubannées sur toute leur longueur au moyen d'un ruban micacé appliqué en plusieurs couches à demi recouvrement. Le ruban micacé se compose d'un support mince et résistant à la déchirure et de clivures de mica encollées au support au moyen de liant utilisé en petite quantité. le nombre de couches est, par conséquent, l'épaisseur de la couche constituée dépendant de la tension de la machine .Ce traitement donne des isolations à haute tension pratiquement exemptes de vides, aux propriétés électriques, mécaniques et thermiques remarquables, et parfaitement résistantes à l'huile.

Entre deux barres, on met une cale en stratifiée verre résine, afin de les isoler entre elles pendant le fonctionnement .les barres sont soumises à des forces électromagnétiques importantes qui peuvent prendre des valeurs élevées au cours de certains phénomènes transitoires, et par la suite provoquer la destruction des enroulements ou l'apparition des vibrations inadmissibles, pour cela ; il est nécessaire de bien fixer l'enroulement dans l'encoche

- **Liaison électrique entre barres et connections :**

- **Liaison électrique entre barres :**

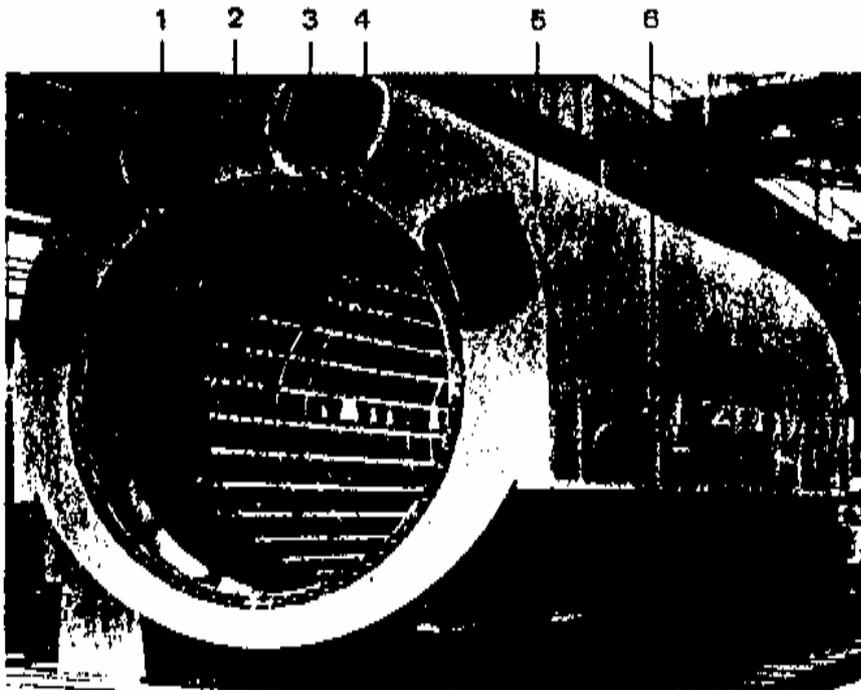
La liaison électrique entre barres d'alésage et de fond d'encoche s'effectue par brasage. Un conducteur élémentaire de chaque barre d'alésage est brasé à un conducteur élémentaire de la barre de fond d'encoche correspondant, de façon qu'il n'ait aucun contact avec les autres conducteurs élémentaires.



- 1-rotor.
- 2-bride d'accouplement.
- 3-palier.
- 4-joint d'arbre.
- 5-réfrigérant d'hydrogène.
- 6-ventilateur du rotor.
- 7-empilage du stator.
- 8-doigts de serrage.
- 9-plaque de serrage.
- 10-enroulement du stator.

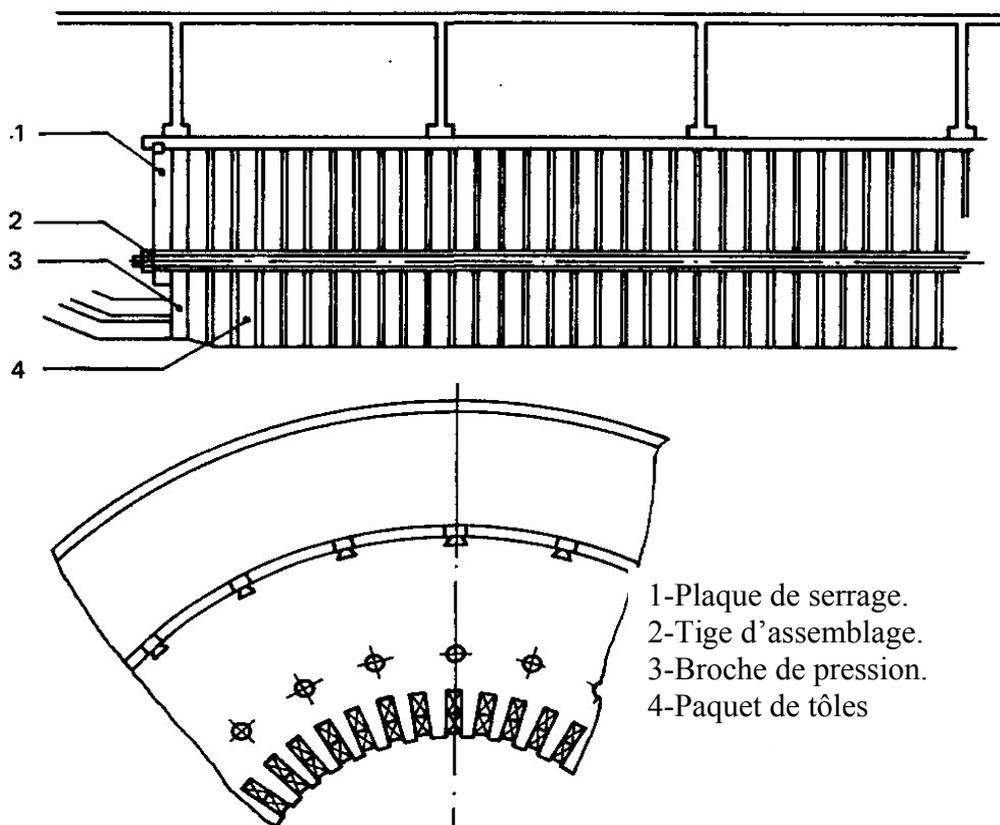
- 11-bague de couplage.
- 12-frette du rotor.
- 13-cale amortisseur.
- 14-car casse.
- 15borne.
- 16-roue à diodes.
- 17-conduite de courant continu.
- 18-excitatrice principale.
- 19-palier.
- 20-excitatrice pilote.
- 21-réfrigérant.
- 22-commande de réglage du ventilateur.

Fig. (IV-1) : Coupe transversale et longitudinale de l'alternateur.



- 1- réfrigérant.
- 2-Bride de fixation du flasque de palier.
- 3-Bronche en queue-d'aronde.
- 4-Nervure.
- 5-Viole.
- 6-Pied du stator.

Fig. (IV-2) : Enveloppe du stator.



- 1-Plaqué de serrage.
- 2-Tige d'assemblage.
- 3-Broche de pression.
- 4-Paquet de tôles

Fig. (IV-3) : Fixation de paquet de tôles à l'enveloppe du stator.

- **Connexions :**

Les connexions sont constituées par des conducteurs plats en cuivre, dont la section est dimensionnée de façon à permettre le passage de l'intensité maximale de l'alternateur. Les barres de l'enroulement du stator sont réalisées aux connexions par des pièces intermédiaires.

Les connexions sont isolées au moyen du ruban en tissu de verre induit du polyester et du vernis. Voir fig. (IV-4).

b- Rotor:

Le rotor se compose principalement des parties suivantes :

- ❖ **Arbre du rotor :**

L'arbre du rotor est forgé à partir d'un lingot coulé sous vide. Les caractéristiques mécaniques élevées nécessaires pour résister à la force centrifuge et aux efforts dus aux courts circuits, imposent l'utilisation d'un acier traité de haute qualité.

L'arbre du rotor se compose d'une partie active pourvue sur environ $2/3$ de sa circonférence d'encoches longitudinales et de deux fusées. Les pas des encoches sont choisis de façon à former deux pôles massifs opposés. Les extrémités libres des deux fusées sont usinées en formes de brides et constituent les plateaux d'accouplement qui servent à relier le rotor de l'alternateur à la turbine et à l'excitatrice.

Les différences d'encoche sur le pourtour du rotor engendrent des moments d'inertie inégaux dans les axes principaux du rotor qui provoqueraient à leur tour des efforts de flexion alternés correspondant au double de la fréquence de rotation si aucune mesure n'était prise. Afin d'éviter ces efforts, des saignées transversales sont pratiquées dans la masse polaire pour compenser la flèche dans l'axe polaire et dans l'axe neutre.

- ❖ **Enroulement du rotor :**

L'enroulement inducteur se compose de plusieurs bobines logées dans les encoches longitudinales dans la partie active du rotor. Les bobines montées en série, sont enroulées de façon à constituer deux pôles. Chaque conducteur est cintré pour former une demi spire lesquelles sont logées dans les encoches du rotor, puis assemblées pour former les spires inductrices. Les têtes de bobines sont calées entre elles au moyen de pièces isolantes de façon à éviter tout déplacement inadmissible des bobines.

Le matériau conducteur utilisé est du cuivre contenant environ 0.1 % d'argent, conserve ses bonnes caractéristique mécaniques même en présence de températures relativement élevées, ce qui évite les déformations des bobines sous l'effet des sollicitations thermiques. L'isolation du rotor est presque entièrement constituée en stratifié verre résine.

Les clavettes sont constituées d'un alliage de cuivre, de nickel et de silicium qui présentent de remarquables caractéristiques mécaniques et une bonne conductibilité électrique. Etant donné que les clavettes jouent aussi le rôle de barres d'enroulement amortisseur, elles se prolongent jusqu'à sous la portée de calage des frettes qui servent d'anneaux de court circuit pour les courants amortisseurs.

❖ **Frettes du rotor :**

Les frettes soustraient les têtes de bobines à l'action de la force centrifuge. Elles sont montées à chaud sur l'extrémité de la partie active du rotor.

La bague d'extrémité calée dans la frette, assure la rigidité de la frette et une protection axiale des têtes de bobines. Un jonc d'arrêt empêche le déplacement axial des frettes. La surface des frettes en contact avec l'arbre est argentée de manière à garantir une faible résistance de passage des courant de l'amortisseur .Les frettes sont en métal amagnétique pour réduire les pertes supplémentaires, elles doivent leur grande résistance à un écrouissage à froid.

❖ **Connexion du courant d'excitation :**

La connexion du courant d'excitation assure la liaison électrique entre l'enroulement du rotor et l'excitatrice .La pièce de raccordement est constituée par un conducteur rectangulaire en cuivre .Une extrémité de la pièce de raccordement est brasée à l'enroulement du rotor et l'autre extrémité est vissée à la prise de courant.

❖ **Ventilateur du rotor :**

Le gaz de refroidissement de l'alternateur est mis en circulation par deux ventilateurs axiaux disposés sur les deux fusées de l'arbre du rotor, ils sont usinés dans la masse du rotor. La pression engendrée par les deux ventilateurs vient de s'ajouter à la propre hauteur de refoulement du rotor pour intensifier le refroidissement de l'enroulement du rotor.

c- Paliers de l'alternateur :

L'arbre du rotor est logé dans les paliers lisses à graissage par circulation d'huile sous pression. Les paliers sont montés dans des flasques.

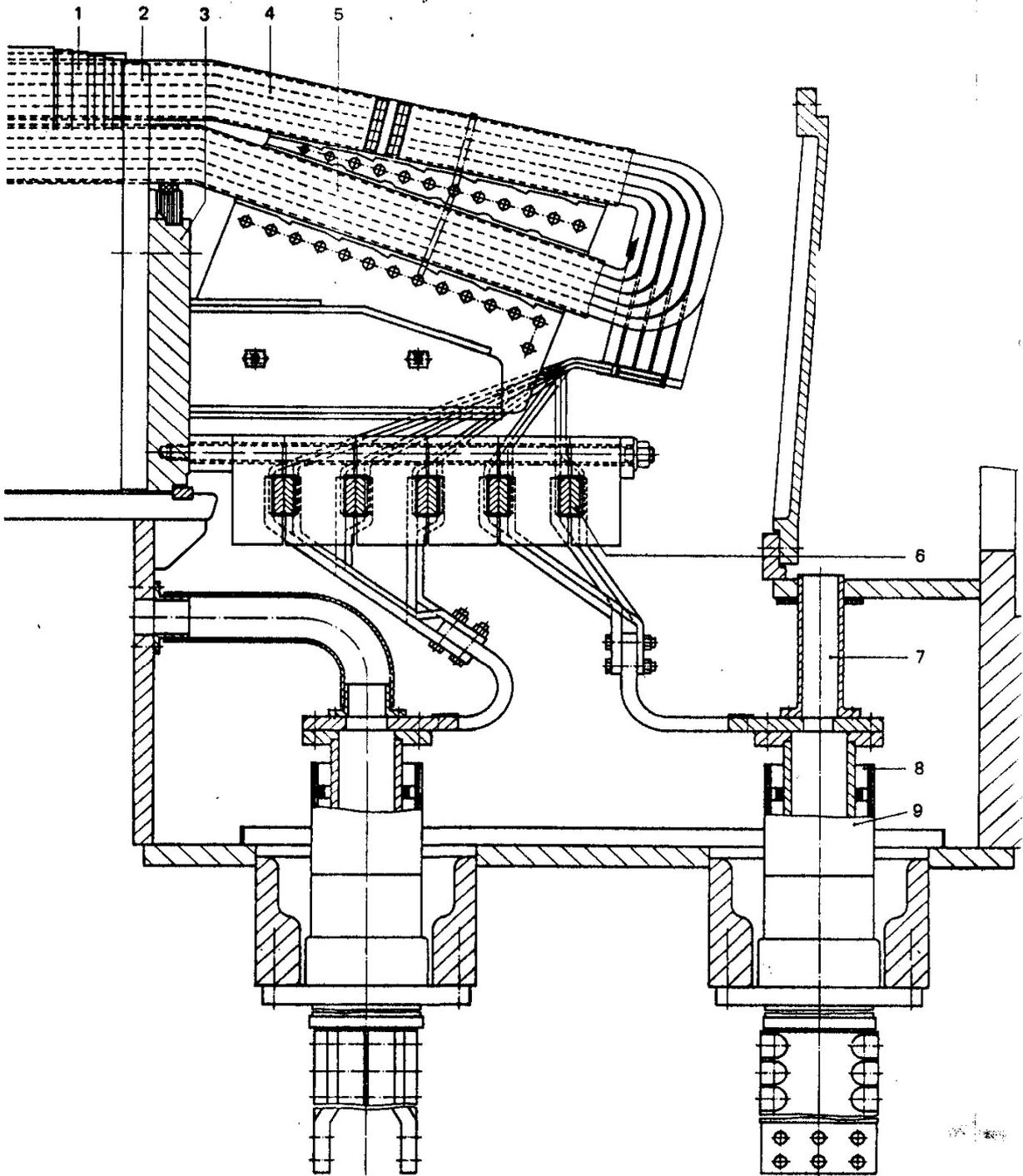
Afin de diminuer le frottement du palier lors du démarrage du groupe, tous les coussinets sont pourvus d'un dispositif hydraulique de soulèvement de l'arbre. Les paliers sont isolés électriquement de l'enveloppe du stator et du massif support du groupe, afin d'éviter le passage des courants d'arbre, ce qui isole par la même occasion le palier de la terre. Deux thermocouples contrôlent la température de chaque palier.

d- Etanchéité de l'arbre :

L'arbre du rotor traverse l'enveloppe de l'alternateur à chacune de ses extrémités sans laisser échapper le gaz grâce au système d'étanchéité. Le système d'étanchéité empêche le passage d'hydrogène entre l'arbre du rotor et l'enveloppe du stator, un film d'huile est maintenu constamment entre l'arbre et l'anneau d'étanchéité.

La pression d'huile d'étanchéité est maintenue constamment supérieure à la pression d'hydrogène (environ 1.2 bar) grâce à une soupape différentielle commandée par la pression H₂.

L'étanchéité de l'arbre reçoit les deux flux d'huile sous pression (l'huile d'étanchéité et l'huile d'équilibrage) à travers la bride de fixation de la boîte étanche au flasque du palier.



- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1-paquet de tôles. | 6-connexion. |
| 2-broche de pression. | 7-sortie du gaz. |
| 3-plaque de serrage. | 8-entrée du gaz. |
| 4-barre d'alésage. | 9-borne. |
| 5-barra de fond d'encoche. | |

Fig. (IV-4): connexion d'une phase.

IV-4- Principe de fonctionnement :

L'alternateur produit des courants alternatifs dont la fréquence est donnée par la formule suivante : $f = p.n$

f : Fréquence de rotation.

p : Nombre de paire de pôles.

n : Vitesse de rotation.

L'inducteur est constitué par un électroaimant et l'induit se compose de trois bobines décalées de 120° . L'interaction entre les deux pôles de l'induit et l'inducteur, produit le couple électromagnétique qui freine le rotor permettant ainsi, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le courant d'excitation du rotor est un courant continu produit dans les alternateurs modernes par un ensemble : excitatrice principale « inversée », redresseurs tournants et une excitatrice pilote à aimants permanents.

VI-5- Refroidissement de l'alternateur :

L'alternateur est le siège de diverses pertes importantes dont on distingue les pertes joules, les pertes par courant de Foucault, les pertes par hystérésis et les pertes par frottement de l'arbre du rotor dans les paliers. Cela nous impose la mise en œuvre d'un refroidissement efficace pour limiter l'échauffement qui, sans cela, serait détruit.

L'hydrogène est employé comme gaz de refroidissement, circulant en circuit fermé à l'intérieur de l'alternateur dans lequel sont montés quatre réfrigérants.

L'emploi de l'hydrogène facilite les échanges thermiques du fait de son coefficient de conductibilité thermique qui est de 14,5 fois environ supérieur à celle de l'air et de sa chaleur massique importante. Son poids spécifique étant plus faible (7,5 fois à celui de l'air) alors les pertes dues aux frottements du fluide avec le rotor sont fortement diminuées. Par sa propreté, l'hydrogène conserve le revêtement et le vernissage de l'alternateur, de plus, l'absence de l'oxygène, d'humidité et de la poussière à l'intérieur de la machine améliore la tenue diélectrique des isolants.

Le refroidissement du stator est indirect (la chaleur échangée à travers des isolants et les tôles magnétiques) tandis que, celui du rotor est direct, c'est-à-dire que l'hydrogène circule à

l'intérieur des conducteurs et par conséquent la chaleur est cédée directement au gaz à l'endroit où elle se dégage.

L'hydrogène est refoulé par deux ventilateurs axiaux montés aux deux extrémités de l'arbre du rotor .Ces ventilateurs aspirent l'hydrogène des réfrigérants,le flux d'hydrogène se divise en trois parties au refoulement de chaque ventilateur comme le montre le schéma de circulation du gaz de refroidissement dans l'alternateur .Fig. (IV-6).

a- Première partie du flux :

L'hydrogène froid passe sous les frettes et se dirige vers la chambre des têtes de bobines du rotor pour refroidir directement l'enroulement du rotor .L'hydrogène froid pénètre dans des canaux de refroidissement fermés qui sont dimensionnés de façon que la température de tous les conducteurs soit sensiblement identique. L'hydrogène chaud sort du rotor et se dirige vers l'entrefer de la machine.

b- Deuxième partie du flux :

La deuxième partie du flux d'hydrogène passe au dessus des têtes de bobines du stator. L'hydrogène se dirige vers l'entrefer par les fentes de refroidissement pratiquées dans l'empilage de tôles et absorbe au passage la chaleur de l'empilage de tôles et de l'enroulement du stator.

c- Troisième partie du flux :

La troisième partie du flux pénètre dans l'entrefer de la machine après être passée au dessus des frettes du rotor, puis revient par les fentes de refroidissement de l'empilage des tôles.

Sur son trajet, l'hydrogène refroidit principalement les frettes du rotor, les extrémités de la table du rotor et les extrémités du circuit magnétique.

Les trois parties du flux d'hydrogène se rejoignent dans l'entrefer et ressortent radialement au niveau des chambres d'hydrogène chaud. L'hydrogène chaud passe ensuite dans les réfrigérants ou il est refroidi avant d'être recyclé par les ventilateurs.

Comme les quatre réfrigérants d'hydrogène sont alimentés séparément en eau, il est possible de continuer à faire fonctionner l'alternateur à deux tiers de sa puissance nominale en cas de perte d'un réfrigérant.

IV-6- Alimentation en gaz et Etanchéité de l'arbre :

a- Alimentation en gaz :

L'alimentation en gaz regroupe tous les équipements nécessaires pour remplir et vidanger l'alternateur avec du CO_2 , de l'hydrogène ou de l'air, et pour faire fonctionner l'alternateur dans l'hydrogène.

-Alimentation en hydrogène H_2 : l'hydrogène est utilisé pour évacuer les pertes de chaleur de l'alternateur parce que sa conductibilité thermique est 8 fois plus grande que celle de l'air .Il est maintenu dans la machine à une pression supérieure à la pression atmosphérique pour accroître l'efficacité du refroidissement.

-Alimentation en gaz carbonique CO_2 : Etant donné que l'hydrogène et l'air forment un mélange facilement explosif, l'alternateur doit être rempli avec un gaz inerte (CO_2) avant de procéder à son remplissage ou à sa vidange .Toutefois, il faut introduire dans l'alternateur une quantité de gaz carbonique suffisante, pour exclure toute possibilité de mélange explosif.

-Alimentation en air comprimé : Lors des révisions ou travaux, de l'air comprimé est insufflé dans l'alternateur pour chasser le CO_2 l'air comprimé doit être propre et sec.

b- Alimentation en huile d'étanchéité :

Les extrémités de l'arbre du rotor d'un alternateur refroidies par l'hydrogène, doivent traverser l'enveloppe du stator sous pression de façon étanche au gaz .Les étanchéités d'arbre doivent empêcher la sortie d'hydrogène et l'entrée d'air, lesquelles sont obtenues par un système à anneau d'étanchéité monté avec un faible jeu sur l'arbre et alimenté en huile sous pression.

La pression d'huile est supérieure à la pression de l'hydrogène au niveau du joint (elle est supérieure de 0,7 à 1 bar au dessus de la pression de l'hydrogène à l'intérieur de l'alternateur), l'hydrogène ne peut s'échapper de l'enveloppe. Cette huile est fournie par un circuit spécial.

Une pompe aspire l'huile dans le réservoir principal à travers les filtres et les réfrigérants. L'huile alimentant l'étanchéité s'écoule par le jeu entre l'arbre et les anneaux d'étanchéité côté air et hydrogène, en se divisant en deux flux identiques :

-Le flux d'huile chargé d'air retourne directement au réservoir principal en franchissant un robinet de réglage à flotteur.

-Le flux chargé d'hydrogène est recueilli dans le collecteur de détente puis dirigé vers le réservoir tampon dont le niveau est maintenu constant .L'excès est dirigé dans le réservoir de stockage ensuite dans le réservoir d'huile de la turbine.

IV-7- Entretien et surveillance de l'alternateur :

a- Introduction :

L'alternateur et ses systèmes d'alimentation doivent faire l'objet d'un entretien et d'une surveillance constante, afin de garantir la sécurité d'exploitation et le parfait état de fonctionnement de l'ensemble de l'installation.

b- Spécification des gaz :

La première des choses à vérifier constamment dans l'alternateur, est la concentration de l'hydrogène qui doit être au moins 99,7% dans l'enveloppe pour éviter tout risque d'explosion.

❖ Air :

L'air comprimé ne doit contenir ni matières corrosives ni gaz dangereux inflammables ou toxiques, il doit être quasiment exempt de poussière.

Pression relative de 6 à 9 bars.

❖ Gaz carbonique CO_2 :

Le gaz carbonique doit être pur au moins à 99,7% en volume. Il doit présenter les caractéristiques suivantes :

-Pression entre 1 à 2,5 bars.

-Température entre 20 à 30°C.

❖ **Hydrogène H_2 :**

L'hydrogène doit être pur au moins à 99,7% en volume, et disponible sous une pression relative de 8 à 10 bars.

c- Les appareils de mesure et de contrôle :

La sécurité de fonctionnement d'un alternateur dépend principalement de la fiabilité de ses équipements auxiliaires, de la qualité des éléments composant ses équipements et de caractère rationnel des contrôles, donc, les appareils de mesure et de contrôle disposés dans un emplacement réservé à cet effet, sont nécessaires pour le contrôle de :

❖ **La température :**

Les températures sont mesurées dans l'alternateur au moyen de thermomètres à résistance et de thermocouples.

Les thermomètres à résistance, sont placés directement dans les encoches du stator aux endroits susceptibles d'être soumis aux températures les plus élevées pour mesurer leurs températures.

La température de flux du gaz froid et du gaz chaud est mesurée en amont et en aval des réfrigérants d'hydrogène au moyen des thermomètres à résistance et les seuils de température sont contrôlés par des régulateurs de températures à tige. Des thermomètres à résistance séparés mesurent la température effective qui sert au réglage de la température de l'hydrogène.

La température des paliers de l'alternateur et celle du palier du groupe d'excitation sont mesurées au moyen de thermocouples.

❖ **Présence de liquide dans l'alternateur :**

Les entrées de liquide (eau de refroidissement des réfrigérant d'hydrogène ou huile d'étanchéité) dans l'alternateur sont contrôlées par des détecteurs de niveau.

❖ Vibrations :

Pour pouvoir apprécier sûrement l'état de marche du rotor, il est recommandé de mesurer et d'enregistrer les vibrations au moyen de capteurs de vibrations montés sur le support du palier. Il est possible de monter ces capteurs sur les flasques des paliers.

d- Préparatifs de démarrage :

Avant le démarrage de l'alternateur, il faut vérifier que l'on dispose de quantités suffisantes de gaz carbonique (CO_2) et de l'hydrogène (H_2).

❖ Quantité de CO_2 :

Il faut tenir à disposition une quantité de CO_2 suffisante pour deux remplissages complets afin que l'hydrogène puisse être balayé immédiatement en cas d'accident. Le volume de CO_2 nécessaire pour un remplissage correspond à peu près à deux fois le volume de l'alternateur, cette quantité de CO_2 suffit pour atteindre une concentration d'environ 90 à 95% de CO_2 dans l'air.

❖ Quantité de H_2 :

Il faut un volume d'hydrogène sensiblement égal à 2,5 fois le volume de l'alternateur pour atteindre une concentration d'au moins 98% dans la machine.

Pour atteindre une pression relative de trois bars et une concentration de 98%, le volume de l'hydrogène doit être égal à 5,5 fois le volume de l'alternateur.

❖ Marche en virage :

La marche en virage est une rotation du rotor sans excitation à une vitesse allant de 150 à 200 tr/min. Avant de mettre l'alternateur en virage, il faut mettre en service le dispositif hydraulique de soulèvement de l'arbre et l'alimentation en huile des paliers. Après la mise en virage, il faut vérifier si l'arbre tourne normalement.

❖ **Montée en vitesse :**

Pendant la montée en vitesse de l'alternateur jusqu'à sa vitesse nominale, la température de l'huile amenée aux paliers ne doit pas être inférieure à 35 °C sans toutefois dépasser 45°C.

La température de l'huile amenée aux étanchéités d'arbre doit être maintenue au-dessous de 40°C.

IV-8- Limites de charges admissibles de l'alternateur :

a- Limite de charge :

Le diagramme de puissance représenté sur la figure (IV-8) indique la charge admissible de l'alternateur en fonctionnement nominal et en fonction de la pression et du facteur de puissance.

-La courbe I : représente la limite d'échauffement de l'enroulement du rotor.

-La courbe II : représente la limite d'échauffement de l'enroulement du stator.

-La courbe III : représente la limite d'échauffement des zones d'extrémités.

-La courbe IV : représente la limite de stabilité statique.

Il est possible de choisir une charge quelconque dans les limites définies par la courbe de charge, mais en tenant compte de la pression de l'hydrogène dans la machine.

b- Vitesse de variation de charges admissibles :

La vitesse de variation de charge admissible dépend de la nature de l'isolation des bobinages. L'alternateur est doté d'une isolation supportant des augmentations ou des réductions de charges brusques.

c- Déséquilibre de courant :

On entend par déséquilibre de courant le rapport entre le courant inverse et le courant nominal. Il ne faut jamais dépasser en service le déséquilibre de courant permanent admissible.

d- Limitation de puissance :

En service, il se peut que les conditions de fonctionnement deviennent telles qu'elles imposent une marche de l'alternateur à puissance réduite sous peine d'endommager la machine, il convient alors de respecter les limitations suivantes :

En cas de défaillance d'un réfrigérant, l'alternateur ne doit pas fonctionner à plus de 67% de sa puissance nominale.

Si la pression de l'hydrogène dans la machine tombe en dessous de la pression nominale, l'alternateur ne doit plus être utilisé qu'à la puissance correspondant à la courbe limite immédiatement inférieure dès que la baisse de pression atteint 0,4 bars.

Si la perte de gaz est telle que la pression tombe à 0,2 bars au dessous de la courbe limite inférieure, il faut arrêter l'alternateur.

e- Arrêt de l'alternateur :

Lors de l'arrêt de l'alternateur et à une vitesse de 540 tr/mn, un dispositif hydraulique de soulèvement est mis en service afin d'éviter les déséquilibres thermiques et la déformation de l'arbre. Le vireur est mis en service de façon automatique à la vitesse de 150 tr/mn entraînant l'arbre à la vitesse de virage.

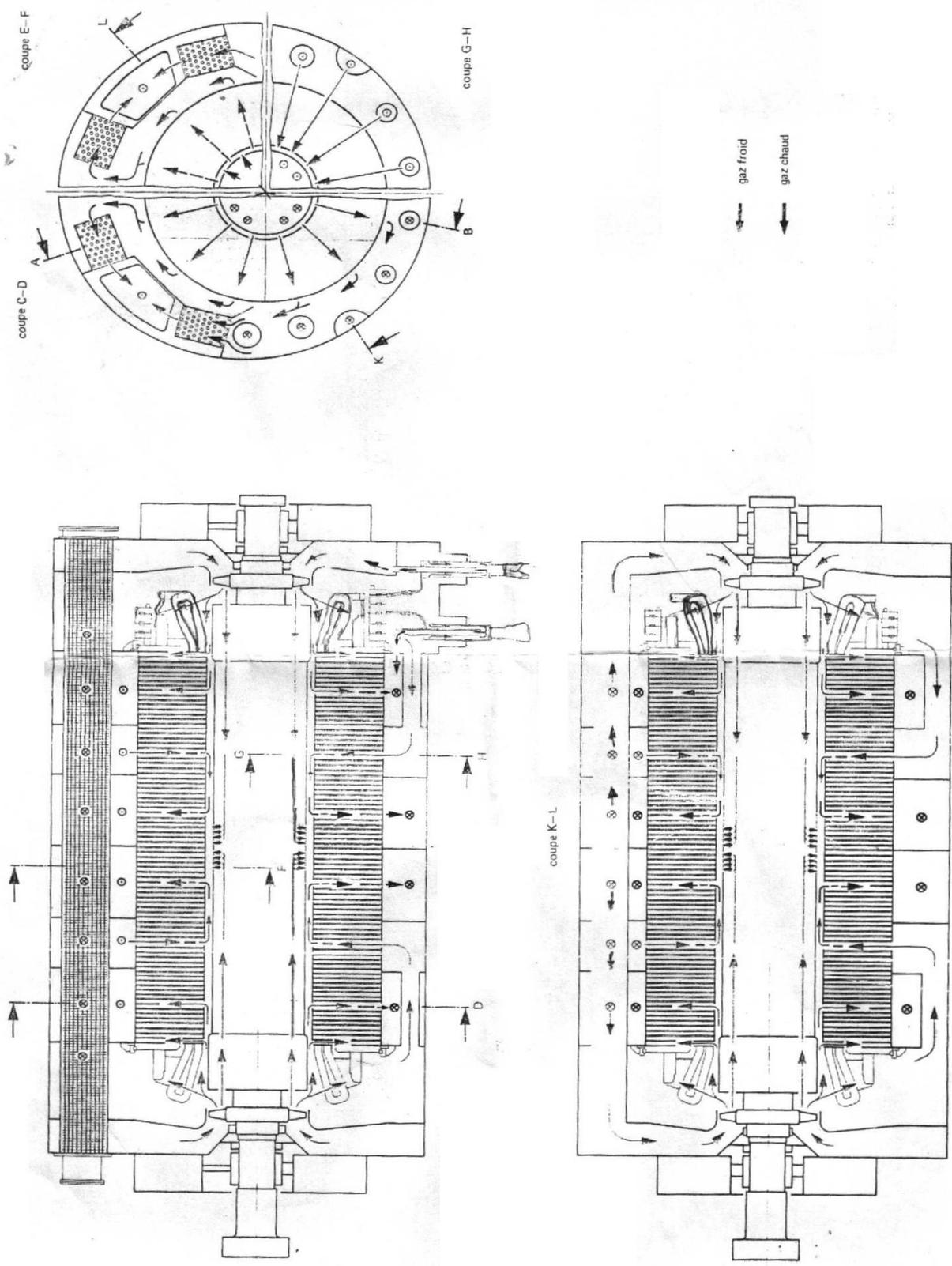
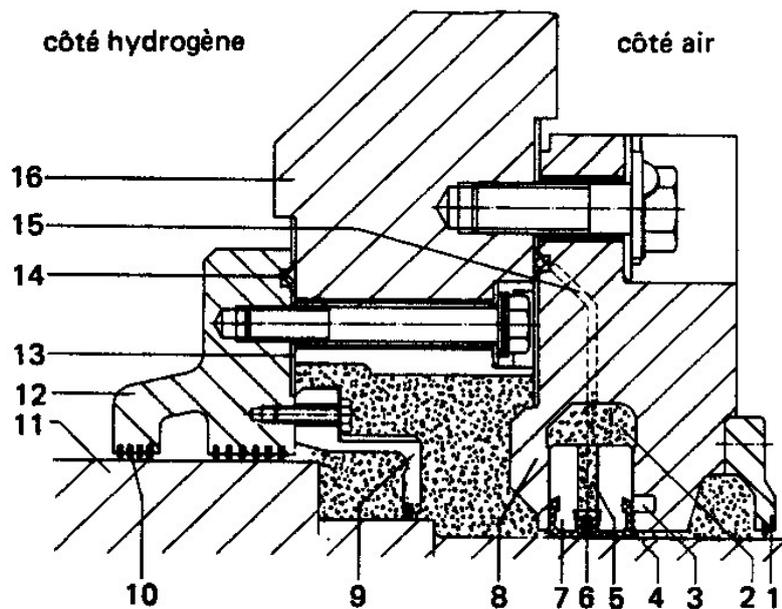
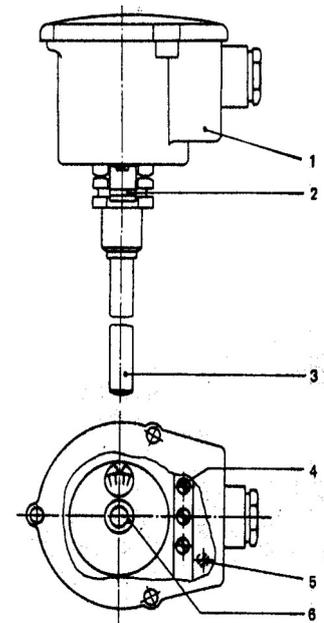


Fig. (IV-6) : Schéma de circulation du Gaz de refroidissement (hydrogène) dans l'alternateur.



- 1-garniture à labyrinthe (côté air).
- 2-chambre de l'anneau d'étanchéité.
- 3-rainure annulaire de l'huile d'équilibrage.
- 4-garniture de métal antifriction.
- 5-orifice d'écoulement de l'huile d'étanchéité.
- 6-rainure annulaire de l'huile d'étanchéité.
- 7-anneau d'étanchéité.
- 8-boite étanche.
- 9-garniture à labyrinthe (côté hydrogène).
- 10-lamelle d'étanchéité.
- 11-arbre de l'alternateur.
- 12-garniture à labyrinthe intérieure.
- 13-isolation.
- 14-joint d'étanchéité.
- 15-rainure de l'huile d'étanchéité.
- 16-flasque de fixation de la boîte étanche.

Fig. (IV-5) : Etanchéité d'arbre.



- 1-tête de commutation.
- 2-cran d'arrêt à ressort.
- 3-tube de protection.
- 4-borne de raccordement.
- 5-prise de terre.
- 6-disque de réglage avec indication de la température.

Fig. (IV-7) : Régulateur de température à tige.

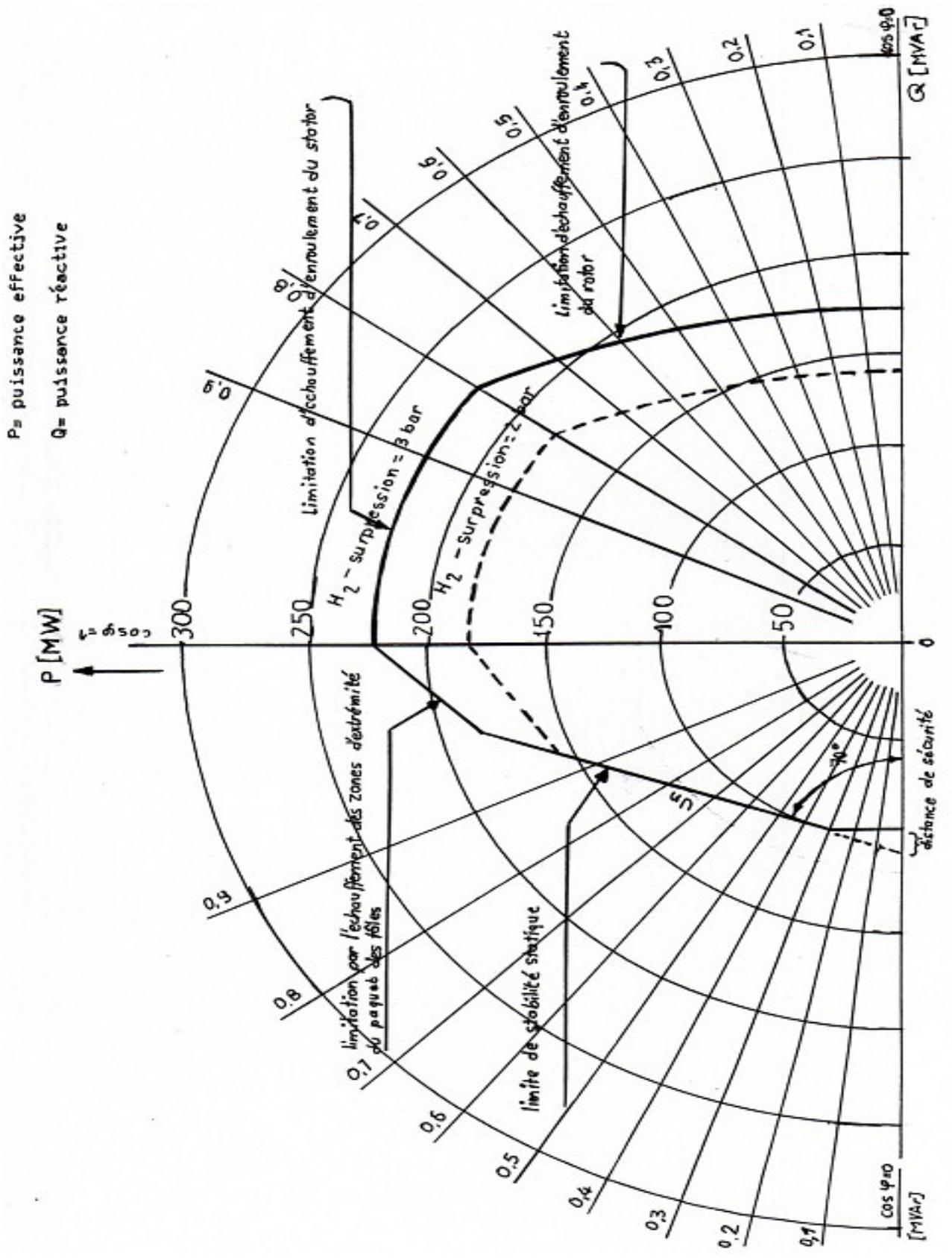
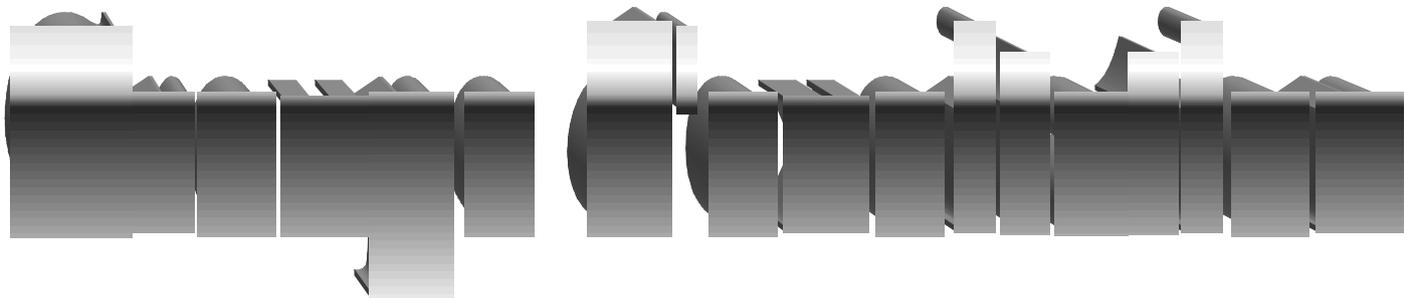
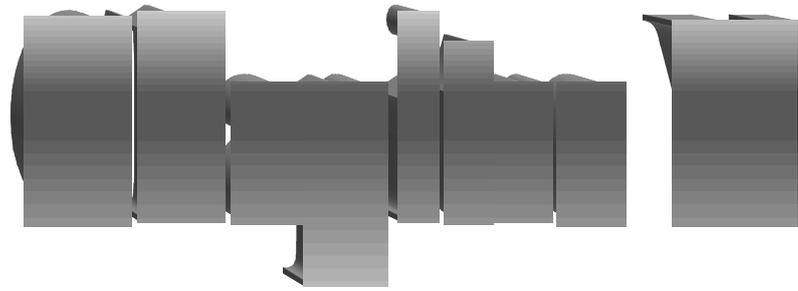


Fig. (IV-8) : Diagramme de puissance.



V-1- Introduction :

Dans les turboalternateurs modernes, on excite l'inducteur par un accouplement mécanique du rotor à l'induit d'une excitatrice principale, qui est placée au rotor de celle-ci, afin d'éviter les contacts glissants balais bague. Le courant continu fourni par l'excitatrice principale a été redressé par un pont triphasé à diodes, celle-ci est excitée à son tour par une excitatrice pilote à aimant permanent.

V-2- Description et constitution du groupe d'excitation :

V-2-1- Description :

L'excitatrice pilote triphasée est un alternateur à pôles internes à aimants permanents tournants, le courant triphasé produit dans le stator excite le champ de l'excitatrice principale à pôles extérieurs par l'intermédiaire d'un ensemble régulateur redresseur fixe. Le courant triphasé induit dans le rotor de l'excitatrice principale est transformé en courant continu dans un pont de diodes tournantes puis envoyé à l'inducteur de l'alternateur par l'intermédiaire de la connexion logée dans l'arbre du rotor.

Les roues à diodes, le rotor de l'excitatrice principale et la roue polaire de l'excitatrice pilote sont montés en série sur un arbre accouplé rigidement au rotor de l'alternateur et logé dans un palier placé entre l'excitatrice principale et l'excitatrice pilote.

La ligne d'arbre formée par le rotor de l'alternateur et le rotor du groupe d'excitation comprend 3 paliers. L'accouplement mécanique des deux extrémités d'arbre réalise simultanément la fonction des connexions à courant continu logée dans l'alésage central de l'arbre grâce au système multi contact, composé de broches et de douilles.

Nous pouvons voir sur la figure (V-1), une coupe de groupe d'excitation.

V-2-2- Constitution :

Le groupe d'excitation à redresseurs tournants comprend les principaux éléments suivants :

❖ Excitatrice pilote triphasée :

L'excitatrice pilote triphasée est un alternateur à 16 pôles internes. L'enveloppe contient le paquet de tôles et l'enroulement triphasé, le rotor est constitué par la roue et les pôles saillants, chaque pôle se compose d'aimants permanents revêtus du métal amagnétique.

Les caractéristiques techniques de l'excitatrice pilote sont données comme suit :

- ✓ Couplage des phases : Y.
- ✓ Puissance apparente : 15 KVA.
- ✓ Tension nominale débitée : $220\text{ V} \pm 10\%$.

- ✓ Courant nominal débité : 41 A.
- ✓ Facteur de puissance : $\cos\varphi=1$.
- ✓ Fréquence des courants : $f = 400\text{ Hz}$.
- ✓ Type de fixation : IM5410.
- ✓ Degrés de protection : IP44.

❖ Excitatrice principale triphasée :

L'excitatrice principale est un alternateur à six (06) pôles externes. L'enveloppe abrite les pôles de l'enroulement inducteur et l'enroulement amortisseur. L'enroulement inducteur est placé sur les pôles magnétiques feuilletés. L'enroulement amortisseur est constitué par des barres logées à la surface de l'épanouissement polaire.

Une bobine de flux (mesure du champ transversal) est montée entre deux pôles pour mesurer le courant d'excitation par induction.

Les caractéristiques techniques de l'excitatrice principale sont données comme suit :

- ✓ Puissance active : 588 KW.
- ✓ Tension nominale : 240 V.
- ✓ Courant nominal débité : 2450 A.
- ✓ Fréquence des courants débités : $f = 50\text{ Hz}$.
- ✓ Type de fixation : IM7017.
- ✓ Degrés de protection : IP44.

❖ **Roues à diodes :**

Les principaux éléments de la roue à diode sont des diodes au silicium qui constituent un pont triphasé. Derrière chaque diode, un fusible est monté et sert à éliminer la voie de défaillance, afin d'éviter les brèves pointes de tension de commutation, les roues sont équipées de circuit RC.

Les roues transmettent le courant continu à l'arbre par l'intermédiaire de prises radiales. Figure (V-2-1) et figure (V-2-2).

❖ **Refroidissement du groupe d'excitation :**

Le groupe d'excitation est refroidi par air en circuit fermé, l'air chaud est refroidi à son tour dans deux réfrigérants disposés en partie haute à l'extrémité du groupe d'excitation. L'ensemble du groupe d'excitation est protégé par un capot qui sert en même temps à guider l'air de refroidissement.

Les roues à diodes sont entourées d'une enveloppe et s'autoventilent grâce à un guidage approprié de l'air, un ventilateur destiné à refroidir l'excitatrice principale est monté sur l'arbre de groupe.

L'excitatrice pilote se trouve sur le trajet de l'air de refroidissement mis en circulation par le ventilateur, comme elle n'a besoin que d'une petite quantité d'air de refroidissement, aucune communication spéciale n'est prévue entre cette excitatrice et la zone d'air chaud.

Un système de refroidissement de secours est prévu pour ne pas interrompre le fonctionnement du groupe d'excitation en cas de défaillance des réfrigérants. Figure (V- 3).

❖ **Mesure, contrôle et surveillance du groupe :**

Dans le but de bien protéger le système d'excitation et de bien l'exploiter, des mesures des paramètres sont prises sur le système. Les principaux dispositifs de contrôle et de mesure du groupe sont les suivants :

▪ **Contrôle de température :**

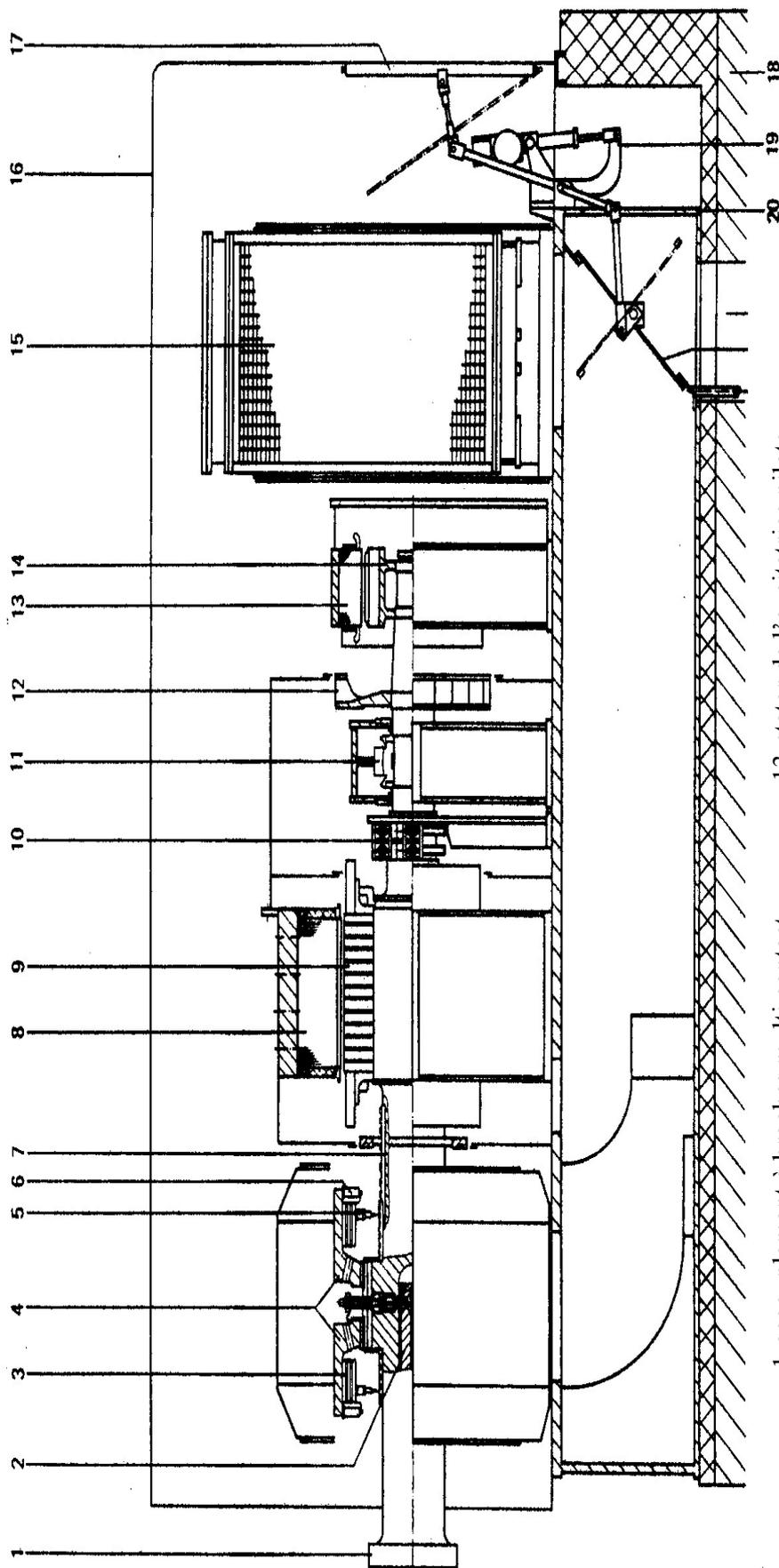
Le contrôle porte sur la température de l'air froid en aval du réfrigérant et sur la température de l'air chaud des roues à diode et de l'excitatrice principale.

- **Contrôle des fusibles :**

La surveillance des roues à diodes en exploitation consiste à vérifier les indicateurs de fusion des fusibles au moyen d'un stroboscope monté sur le capot de la roue.

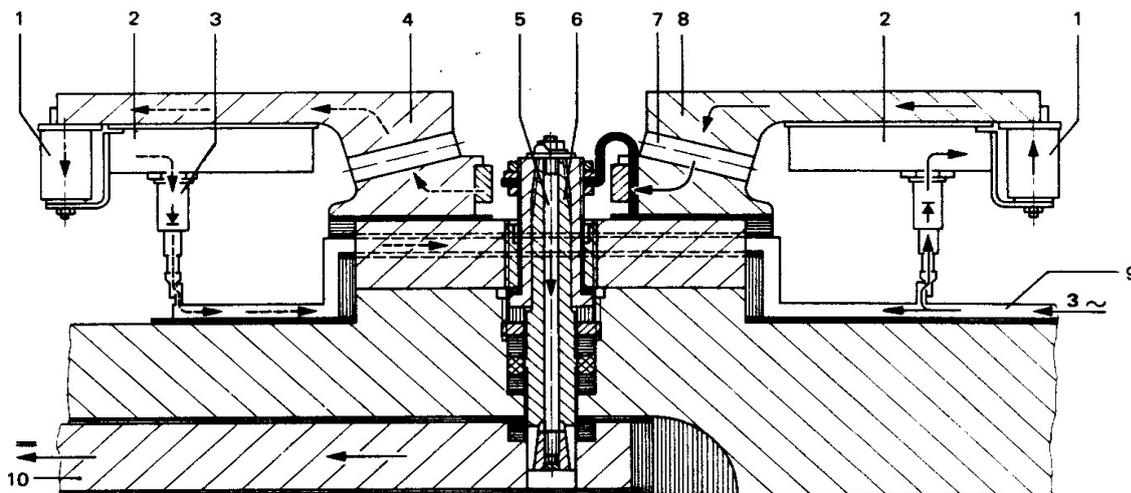
- **Mesure de courant d'excitation :**

Il est mesuré indirectement au moyen d'une bobine montée entre deux pôles de l'excitatrice principale.



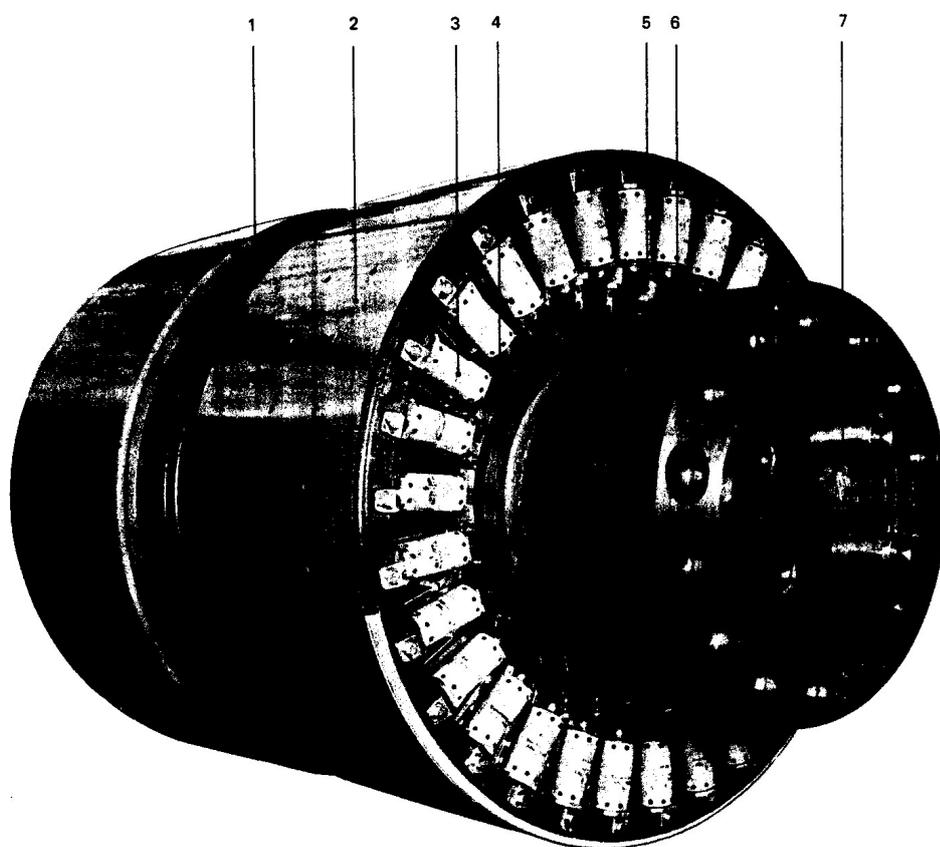
- | | |
|---|---|
| 1-accouplement à broches multi contact. | 13-stator de l'excitatrice pilote. |
| 2-connexion de courant continu. | 14-rotor de l'excitatrice pilote. |
| 3-radiateur. | 15-réfrigérant. |
| 4-roue à diode. | 16-capot de groupe d'excitation. |
| 5-diode. | 17-entrée d'air de la ventilation de secours. |
| 6-fusible. | 18-table de groupe. |
| 7-connexion triphasée. | 19-actionneur. |
| 8-stator de l'excitatrice principale. | 20-bâti du groupe d'excitation. |
| 9-rotor de l'excitatrice principale. | 21-sortie d'air de la ventilation de secours. |
| 10-détection de masse rotor. | 22-clapet de la ventilation de secours. |
| 11-palier. | 23-sortie d'air de fuite. |
| 12-ventilateur radial. | |

Fig. (V-1) : Coupe de groupe d'excitation.



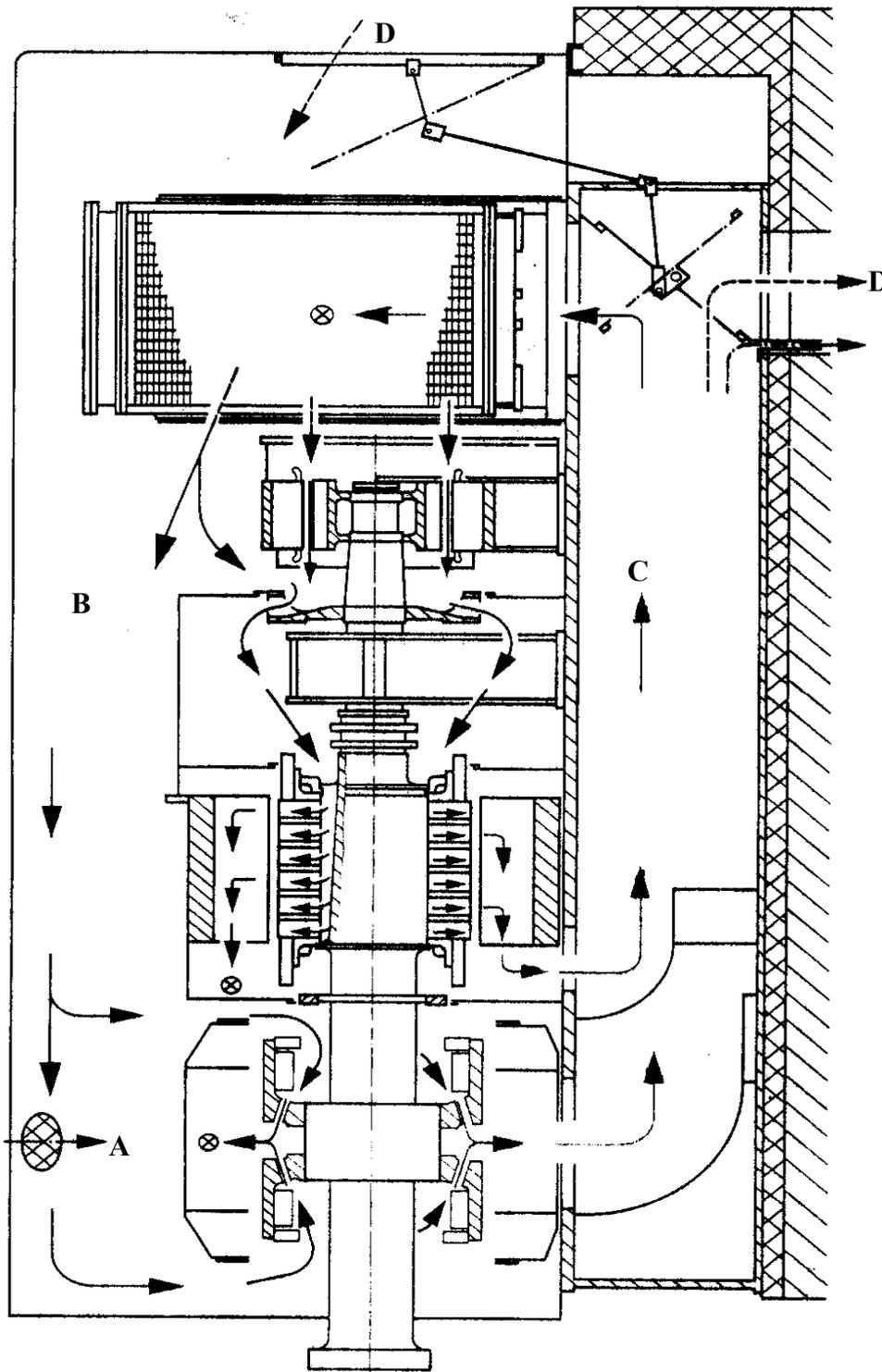
- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1-fusible. | 7-sortie d'air chaud. |
| 2-radiateur. | 8-roue à diode (polarité positive). |
| 3-diode. | 9-connexion triphasée. |
| 4-roue à diode (polarité négative). | 10-connexion à courant continu. |
| 5-balon de tension. | 11-circuit RC. |
| 6-prise de courant. | |

Fig. (V-2-1) : Roue à diode.



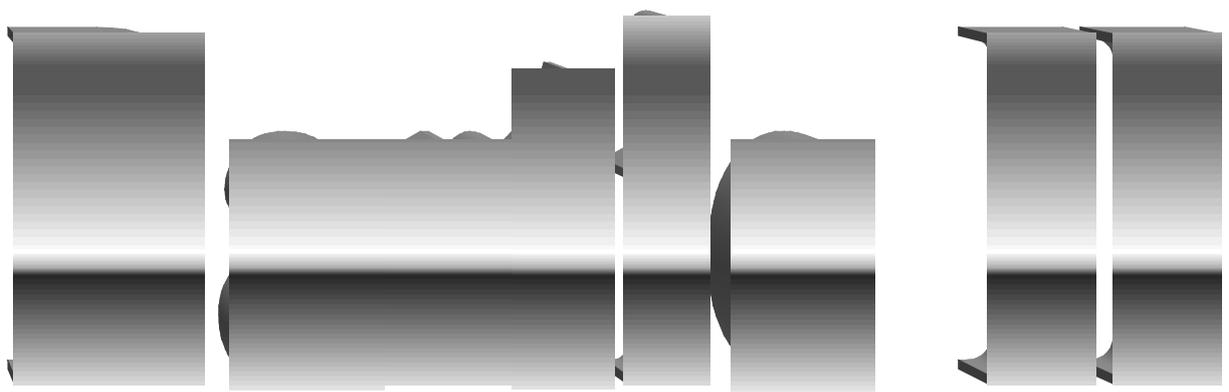
- | |
|-------------------------------------|
| 1-sortie d'air chaud. |
| 2-roue à diode. |
| 3-fusible. |
| 4-connexion triphasée. |
| 5-diode. |
| 6-plateau d'accouplement. |
| 7-système de couplage mutlicontact. |

Fig. (V-2-2) : Roue à diode et accouplement.



- C** Air froid.
- B** Air chaud.
- D** Ventilation de secours.
- A** Air de fuite et renouvellement d'air.

Fig. (V-3) : Schéma de refroidissement du groupe d'excitation.



CAHIER DES CHARGES

Pour le cahier des charges, nous avons pris les caractéristiques de l'alternateur de la centrale thermique de Ras-Djenat comme référence.

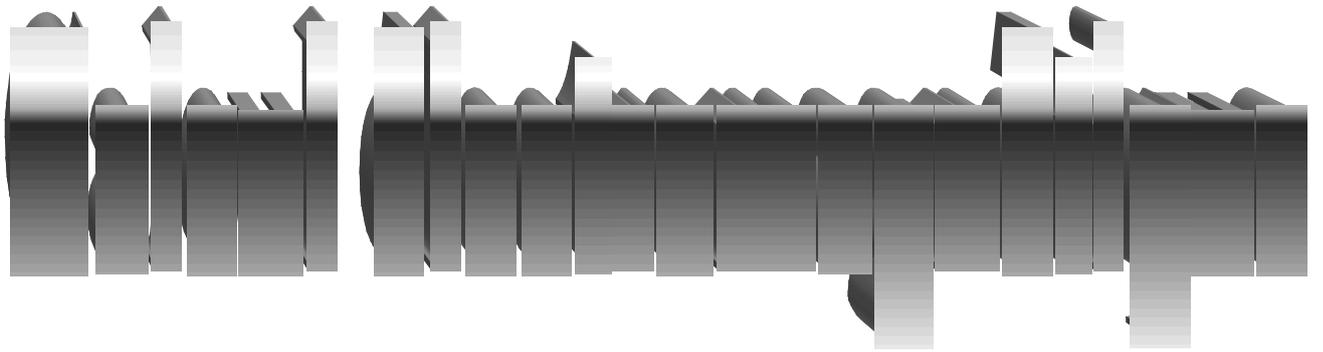
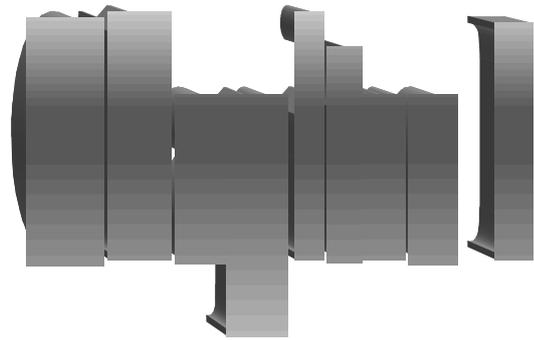
Alternateur

Nombre de phase	3.
Puissance nominale	176 MW.
Tension nominale de ligne	15.5 KV \pm 10%.
Facteur de puissance	$\cos \varphi_n = 0.8$.
Nombre de paires de pôles	$p = 1$.
Fréquence des courants statiques	$f_n = 50$ Hz.
Classe d'isolation	F.
Degré de protection	IP44.

Système de refroidissement par hydrogène avec une pression effective de 3 bars.

- ✓ Refroidissement indirect pour le stator.
- ✓ Refroidissement direct pour le rotor.

Connexion des phases statoriques	Y.
Type de fixation	IM1106.
Capacité de surcharge statique	$W_{en} \geq 1,7$.



I-1-Introduction :

En étudiant le projet de l'alternateur dont la puissance et la vitesse de rotation sont données, on cherche à choisir ces dimensions de telles sorte qu'elles occupent un espace aussi réduit que possible et que sa masse et son coût de fabrication soient minimaux .Or les pertes d'énergies relatives augmentent quand les dimensions de la machine diminuent.

Aussi considère-t-on comme optimales les dimensions et la construction de la machine pour lesquelles son coût global représente la somme du coût de fabrication et d'entretien .Compte tenu des pertes d'énergie (minimales), on suppose aussi que les matériaux et les dimensions des parties actives et constructives sont choisis de telles sorte que les intensités du champ électrique dans les isolants, les contraintes mécaniques et les températures se situent dans les limites admissibles.

I-2-Calcul des dimensions principales:

La construction d'une machine synchrone et particulièrement par son stator, diffère beaucoup selon la puissance, pour les alternateurs ayant un diamètre extérieur du stator supérieur à un mètre, chaque couche de l'alternateur magnétique (tôle) est constituée de plusieurs plaques appelées segments qui sont ensuite assemblées pour constituer une tôle magnétique circulaire.

I-2-1-Puissance apparente nominale :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n} [MVA] \quad (1)$$

P_n : puissance nominale, [MW].

$\cos (\varphi_n)$: Facteur de puissance.

I-2-2- Diamètre intérieur du stator :

Le diamètre intérieur du stator D_1 peut être déterminé par la figure (I-1).

$D_1=1220$ mm.

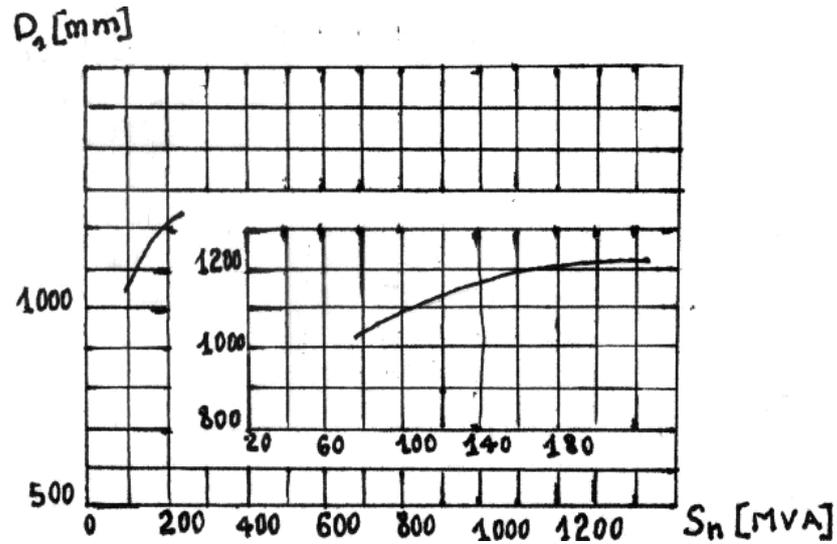


Fig. (I-1) : le diamètre intérieur du stator en fonction de la puissance apparente nominale.

I-2-3- Diamètre extérieur du rotor :

D'après les conditions de rigidité mécanique, le diamètre extérieur du rotor tournant à la vitesse de 3000tr/mn, pour les turboalternateurs de grandes puissances, ne peut dépasser 1.2m jusqu'à 1.25 m. Le diamètre extérieur du rotor D_2 est déterminé par la fig. (I-2), $D_2=1090$ mm.

Les diamètres extérieurs du rotor normalisés sont : [930, 1000, 1075, 1125, 1200, 1250] (mm).

Nous choisissons la valeur du diamètre extérieur du rotor,
 $D_2=1075$ mm

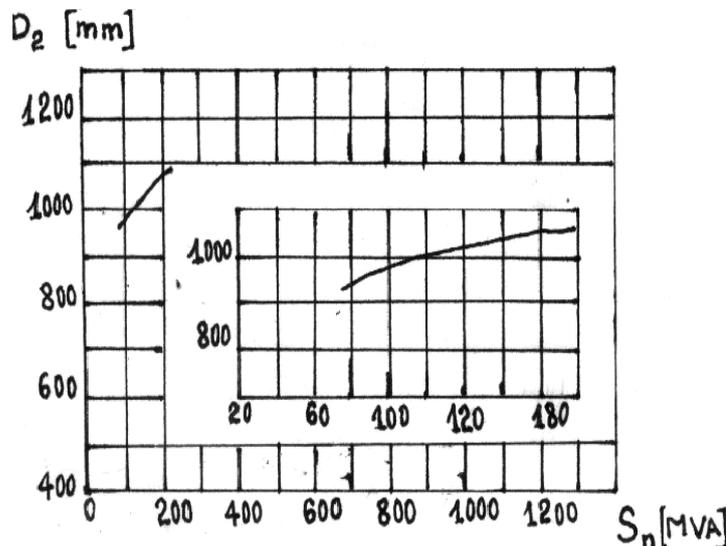


Fig. (I-2) : le diamètre extérieur du rotor en fonction de la puissance apparente pour $P=1$.

I-2-4- Constante de la machine :

La constante C_A lie les dimensions principales de la machine (longueur active de l'induit, et son diamètre intérieur). Elle est déterminée à partir de la Fig. (I-3) :

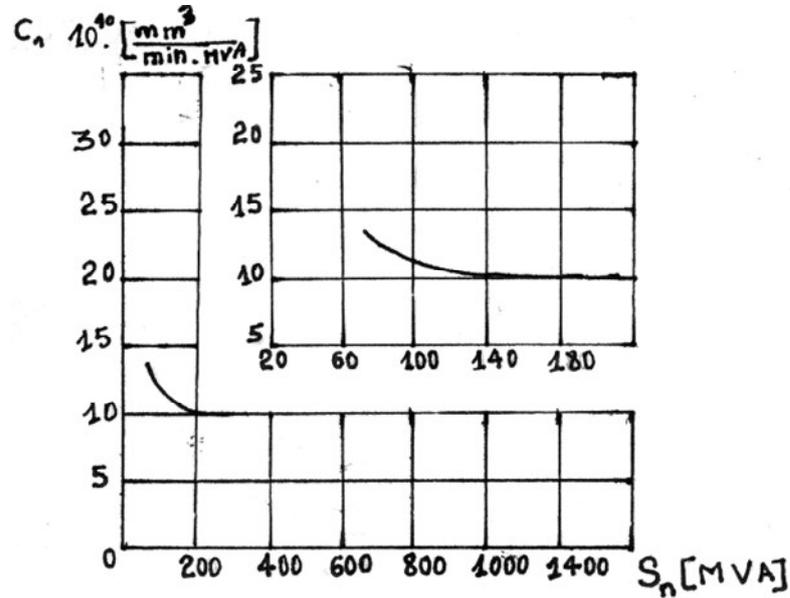


Fig. (I-3) : la constante C_A en fonction de la puissance apparente nominale pour $P=1$.

$$C_A = 10^{11} \text{ mm}^3 / \text{min MVA}.$$

I-2-5- Longueur active préliminaire du stator :

D'après la relation de la constante de la machine, on peut calculer la longueur active préliminaire de l'induit l_1 par la formule suivante :

$$l_1 = \frac{C_A \cdot S_n}{D_1^2 \cdot N_n} [mm]. \quad (2)$$

Avec : N_n — Vitesse de rotation en Tr/m

I-2-6- Charge linéaire préliminaire des courants statoriques :

La charge linéaire A_1 a une influence directe sur les pertes frontales et les pertes supplémentaires dans la zone active de la machine et par conséquent sur son rendement

Sa valeur préliminaire est déterminée à partir de la figure (I-4)

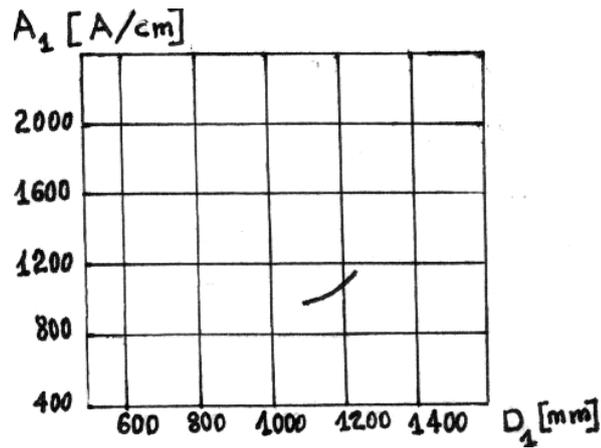


Fig. (I-4) : la charge linéaire en fonction de D_1 pour $P=1$.

$A_1=1180$ A/cm.

I-2-7- Induction dans l'entrefer :

L'induction magnétique dans l'entrefer est un paramètre essentiel dans la construction des machines électriques tournantes, car elle caractérise la magnétisation de la machine, elle est limitée par les propriétés magnétiques des matériaux actifs utilisés.

L'induction dans l'entrefer B_δ en tesla peut être déterminée par la fig. (I-5) comme suit :

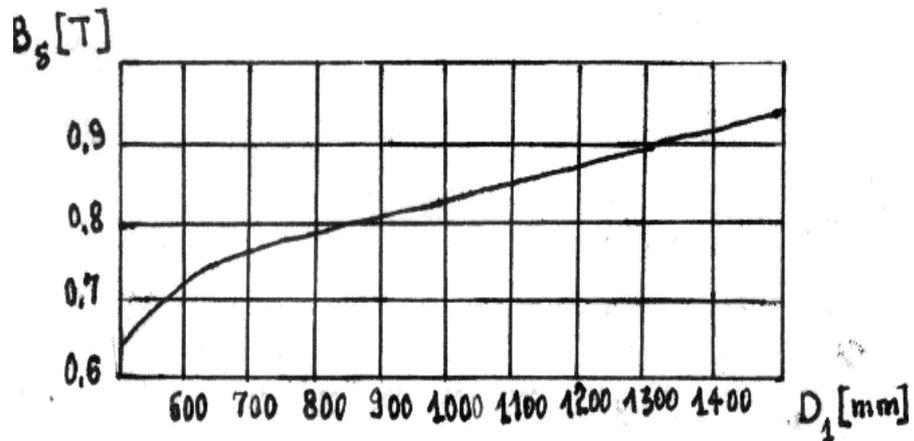


Fig. (I-5) : l'induction dans l'entrefer en fonction de D_1 et $P=1$.

$B_\delta=0.87$ T.

I-2-8- Nombre de paires de pôles :

Actuellement, presque tous les turboalternateurs sont bipolaires, car l'accroissement de la vitesse de rotation, l'utilisation des turbines à vapeur est beaucoup plus économique.

Le nombre de paires de pôles pour les machines synchrones est donné par la formule suivante :

$$P = \frac{f_n \cdot 60}{N_n} \quad (3)$$

f_n : vitesse de rotation nominale.

I-2-9- Pas polaire :

C'est la distance entre deux axes de pôles voisins distincts, il est donné par la formule suivante :

$$\tau_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot P} [mm] \quad (4)$$

I-2-10- Rapport de court-circuit :

Le rapport de court-circuit (r_{cc}) caractérise surtout l'influence de la réaction d'induit sur le système de la machine, plus il est faible, plus la réaction est forte. C'est le quotient du courant d'excitation donnant à vide la tension nominale, par le courant d'excitation donnant en court-circuit le courant nominal.

Le rapport de court-circuit r_{cc} est déterminé à partir de la fig. (I-6) :

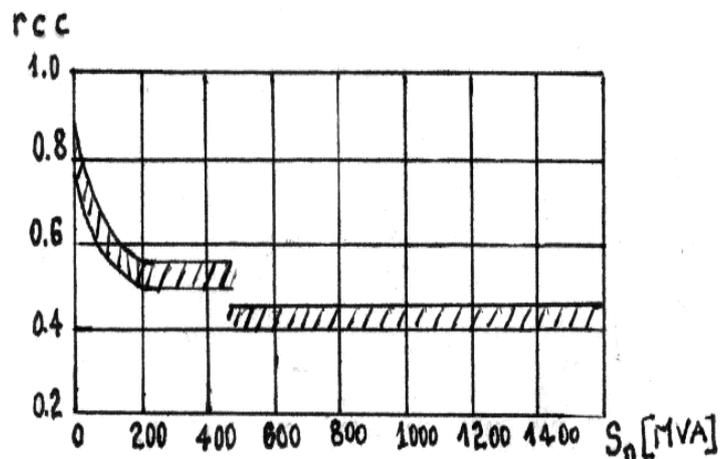


Fig. (I-6) : le r_{cc} en fonction de la puissance apparente nominale.

$r_{cc}=0.5$.

I-2-11- Détermination de l'entrefer :

Le choix de l'entrefer est déterminant, car un faible entrefer peut accentuer l'effet de la réaction d'induit et un grand entrefer augmente le nombre d'ampères-tours consommés par celui-ci.

La valeur de l'entrefer est donnée par la formule ci-dessous:

$$\delta = 1.12 \cdot (r_{cc}) \cdot \frac{A_1 \cdot \tau_1^{1.5}}{B_\delta} \cdot 10^{-6} [mm]. \quad (5)$$

Le choix de la valeur normalisée du diamètre extérieur du rotor et la valeur d'entrefer calculé, nous amène à recalculer le diamètre intérieur du stator et le pas polaire par la suite :

$$D_1 = D_2 + 2 \cdot \delta [mm] \quad (6)$$

I-2-12 Coefficients de longueur :

Par nécessité de calcul, on est amené à définir deux coefficients de longueur λ_1 et λ_2 qui représente le rapport de la longueur active du stator l_1 et du rotor l_2 par le diamètre intérieur du stator D_1 et le diamètre extérieur du rotor D_2 respectivement.

Les deux coefficients λ_1 et λ_2 sont déterminés d'après la figure (I-7) et doivent avoir une valeur de faon que les masses de l'enroulement du stator G_{M1} et du rotor G_{M2} soient

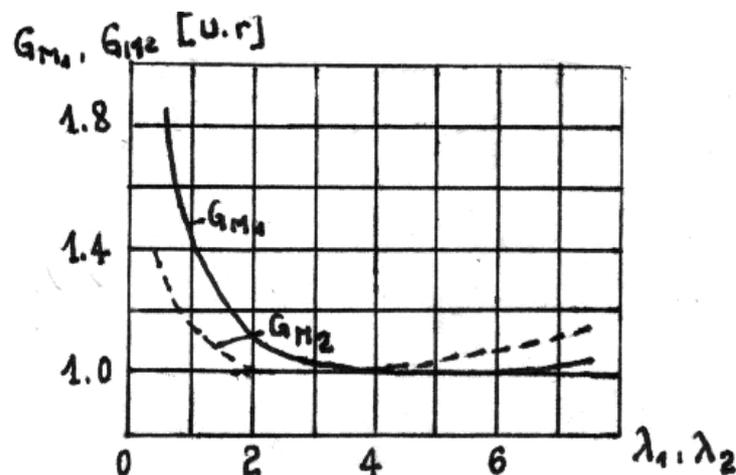


Fig. (I-7) : la masse des enroulements du stator (G_{M1}) et du rotor (G_{M2}) en unité relative en fonction de λ_1 et λ_2 .

minimales.

Sachant que : $l_1 \approx l_2$. On a :

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{D_1} \text{ et } \lambda_2 = \frac{l_2}{D_2}$$

$$\lambda_1 = 4.039 ; \lambda_2 = 4.557$$

D'après les valeurs de λ_1 et λ_2 , nous pouvons constater de la figure (I-7) que la masse des enroulements du stator et du rotor sont minimales.

I-2-13-vitesses critiques préliminaires :

Les deux vitesses critiques peuvent être déterminées à partir de la figure (I-8) :

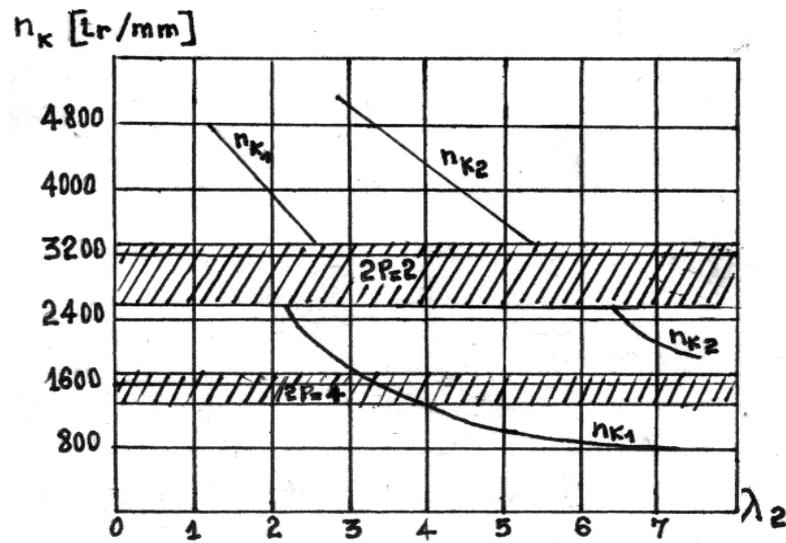


Fig. (I-8) : les vitesses critiques du rotor en fonction du coefficient λ_2 .

$$N_{K1} = 1130 \text{ tr/mn.}$$

$$N_{K2} = 3850 \text{ tr/mn.}$$

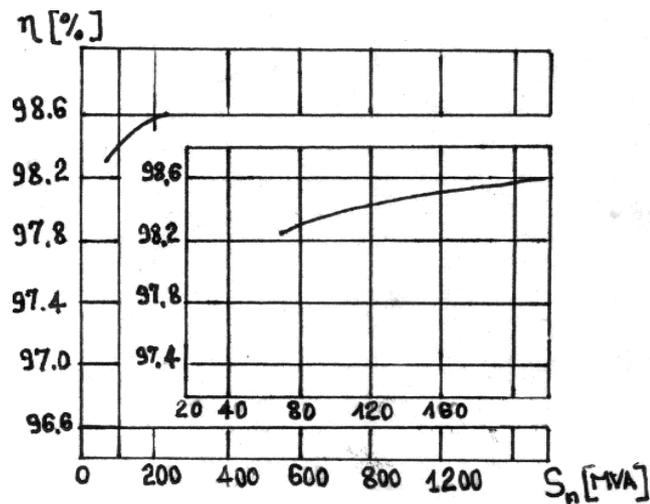


Fig. (I-9) : le rendement en fonction de la puissance apparente nominale.

I-2-14-Rendement de l'alternateur :

Le rendement est déterminé par la figure (I-9) : $\eta_n=98.6\%$.

I-2-15-Moment de giration :

Le moment de giration du rotor détermine l'inertie du rotor, c'est un paramètre important dans le calcul de la rigidité de l'arbre dans les régimes de court-circuit et le calcul des mouvements transitoire du rotor.

Il est donné par la formule suivante:

$$GD^2 = \frac{1}{2} \cdot G \cdot \left(\frac{D_2}{1000} \right)^2 [t \cdot m^2] \quad (7)$$

Avec :

γ_c : la masse volumique du rotor.

G : la masse du rotor.

$$G = \frac{\pi}{4} \cdot \gamma_c \cdot \left(\frac{l_2}{1000} \right) \cdot \left(\frac{D_2}{1000} \right)^2 [t]$$

I-2-16-Masse générale du turboalternateur :

Pour avoir la masse totale du turboalternateur à partir de la figure (I-10), on doit d'abord calculer le volume actif de la machine, qui est donné par la relation suivante :

$$V_A = \left(\frac{D_1}{1000} \right)^2 \cdot \frac{l_1}{1000} [m^3] \quad (8)$$

$$V_A = 7.292 m^3.$$

La masse générale du turboalternateur peut être déterminée à partir de la figure (I-10) :

$$G_A = 2.82 \text{ t.}$$

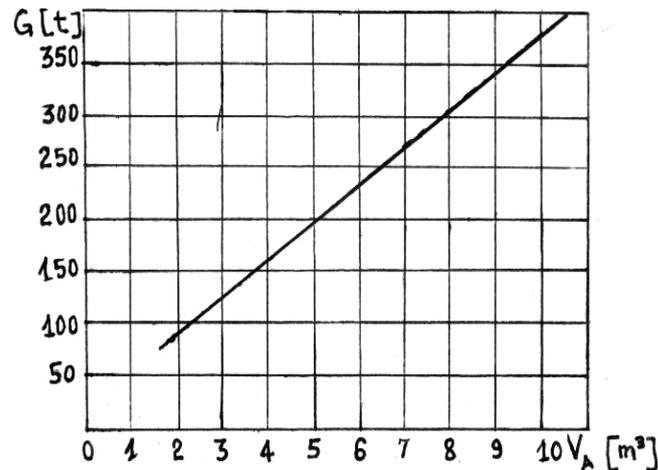


Fig. (I-10) : masse totale du turboalternateur en fonction du volume actif.

I-2-17-Courant nominal d'une phase de l'enroulement du stator :

L'enroulement statorique du turboalternateur est connecté en étoile, d'où la formule de calcul du courant nominal dans une phase est donnée par la formule suivante:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U_n} [A] \quad (9)$$

U_n : La tension nominale en V.

I-2-18-Courant total dans l'encoche statorique :

Dans la plus part des cas, l'enroulement statorique des turboalternateurs est un enroulement imbriqué à deux voies parallèles ($a_1=2$).

Compte tenu de la répartition inégale du courant dans l'encoche, et afin de réduire les pertes thermiques et la résistance effective des conducteurs d'une phase de l'induit on a recours, dans les grandes machines, à des conducteurs élémentaires transposés horizontalement et verticalement suivant l'encoche de façon à constituer des barres, ces

dernières constituent les couches de l'enroulement du stator. Et dans notre cas on a un enroulement imbriqué à deux couches.

On notera $S_{en1}=2$: le nombre de barres dans une encoche du stator. Le courant total dans l'encoche est donné par la formule (10).

$$a_1 = 2. \quad S_{en1} = 2.$$

$$I_{en1} = \frac{I_n S_{en}}{a_1} [A]. \quad (10)$$

I-2-19-Pas dentaire préliminaire du stator :

Le pas dentaire est la distance entre les axes de deux encoches voisines qui est donné par la formule suivante :

$$t_1 = \frac{I_{en1}}{A_1} \cdot 10 [mm]. \quad (11)$$

I-2-20-Nombre d'encoches préliminaires du stator :

Le nombre d'encoche est donné par la relation (12).

$$Z_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{t_1}. \quad (12)$$

Z_1	24	30	36	42	48	54	60	66	72
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tableau (I-1) : Le nombre d'encoches normalisé.

D'après le tableau (I-1), nous choisissons Z_1 , afin d'avoir le rapport de raccourcissement $\beta=0.83$.

$$\tau = \frac{Z_1}{2 \cdot P} \quad y = 25 \quad \beta = \frac{y}{\tau}$$

I-2-21-Nombre d'encoches par pôle et par phase :

Il est donné par la relation suivante :

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot P \cdot m} \quad (13)$$

m : le nombre de phases.

I-2-22-Pas dentaire définitif du stator :

Il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} [mm] \quad (14)$$

On remarque que la valeur calculée se trouve dans les limites admissibles. Pour les turboalternateurs refroidis par hydrogène $t_1 = [40-70]$ mm.

I-2-23-La charge linéaire définitive :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$A_1 = \frac{I_{en1}}{t_1} \cdot 10 \quad (15)$$

I-2-24-Coefficient de raccourcissement :

Il est donné par la relation suivante :

$$K_r = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right) \quad (16)$$

I-2-25-Coefficient de distribution :

Il est donné par la relation suivante :

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} \quad (17)$$

I-2-26-Coefficient d'enroulement :

Il est donné par la relation suivante :

$$K_{enl} = K_d \cdot K \quad (18)$$

I-2-27-Nombre de spires en série dans une phase :

Il est donné par la relation suivante :

$$W_1 = \frac{S_{enl} \cdot Z_1}{2 \cdot m \cdot a_1} \quad (19)$$

I-2-28-Réalisation d'un enroulement imbriqué à deux couches :

Pour le réaliser, on commence par la couche supérieure, puis on déduit la couche inférieure de la première avec un décalage de cinq encoches à cause du raccourcissement.

Calculons d'abord les paramètres de l'enroulement :

Pas de la section :

$$y = \frac{Z_1}{2 \cdot P} - \varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{10}{2}$$

Angle électrique entre deux encoches voisines :

$$\gamma_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot P}{Z_1} \quad \gamma_1 = 6^\circ C$$

Pour avoir un enroulement symétrique, il faut faire un décalage de 120° entre deux phases consécutives, ce qui correspond à 20 encoches. Notons les faisceaux aller des trois phases respectivement : A, B, C et les faisceaux retour X, Y, Z.

On aura le schéma de l'enroulement suivant la figure (I-11), et son exécution est représentée sur la figure (I-12).

I-2-29-La largeur préliminaire de l'encoche du stator :

La largeur idéale de l'encoche du stator est donnée suivant la relation ci-dessous :

$$b_{enl} = 0.5t_1 \text{ [mm].}$$

Dans le calcul on prend : $b_{en1} = (0.3 \div 0.45) t_1$.

Pour avoir un bon dimensionnement, on prend de préférable :

$$b_{en1} = 0.45t[mm] \quad (20)$$

Tableau (I-2) : l'épaisseur totale de l'isolation de l'encoche suivant sa largeur et la tension nominale.

L'épaisseur totale de l'isolation de l'encoche suivant sa largeur est pris ($2b_{i1}$) pour une tension 15.75 KV qui est la plus proche de la tension nominale, d'où : $2b_{i1}=11.4$ mm.

I-2-30-Largeur du conducteur élémentaire :

Les barres de l'enroulement du stator sont constituées de conducteurs élémentaires de section rectangulaire, placés deux par deux horizontalement. Voire figure (I-13). Soit n_1 le nombre de conducteurs élémentaires placés horizontalement, qu'on prend : $n_1=2$.

La largeur préliminaire du conducteur élémentaire est donnée par la formule suivante :

$$b_{M1} = \frac{b_{en1} - 2 \cdot b_{il}}{n_1} - \Delta_i [mm]. \quad (21)$$

Δ_i : est l'épaisseur de l'isolation entre deux conducteurs

élémentaires.

U_n [KV]	13.8	15.75	20	24
$2 b_{i1}$ [mm]	10.4	11.4	13.4	15.4

La valeur définitive de la largeur du

conducteur élémentaire est prise sur le tableau (I-3), celle-ci doit être proche de la valeur calculée.

I-2-31-Largeur définitive de l'encoche du stator :

Nous pouvons calculer la largeur définitive de l'encoche du stator par la relation suivante :

$$b_{en1} = n_1 \cdot (b_{M1} + \Delta_i) + 2 \cdot b_{il} [mm]. \quad (22)$$

I-2-32-densité préliminaire du courant statorique :

A partir de la figure (I-14), on obtient la densité du courant du stator $J_1=4.4 \text{ A/mm}^2$, mais pour des raisons d'échauffement de l'enroulement du stator, nous avons réduit la densité du $J_1=3.15 \text{ A/mm}^2$.

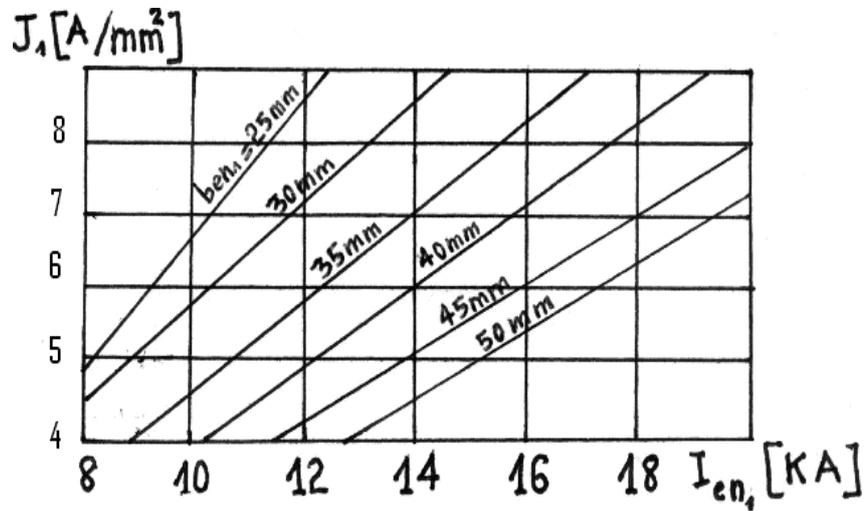


Fig. (I-14) : la densité du courant statorique en fonction du courant total dans l'encoche.



fig (I-11) de schéma de l'enroulement du stator.

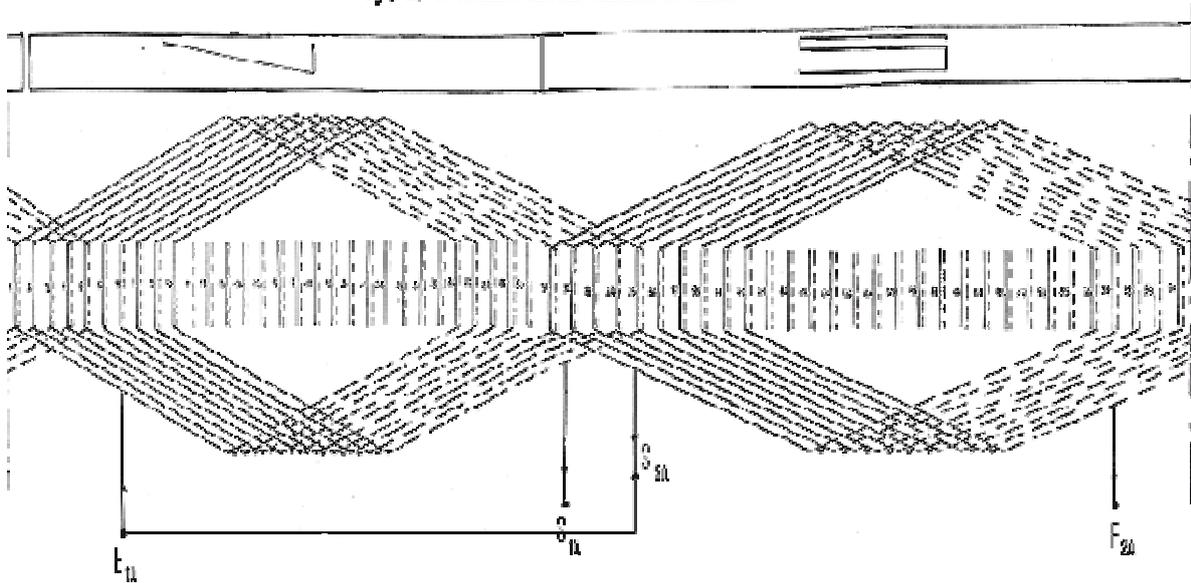
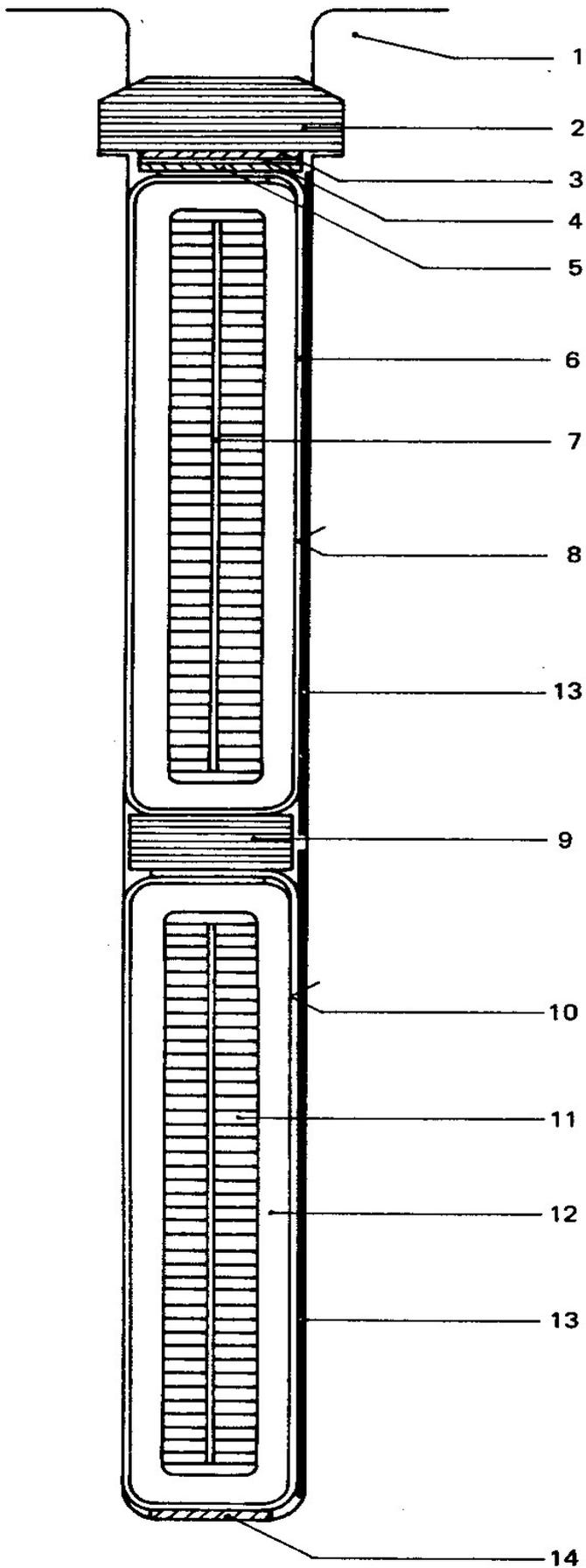


fig (I-12): l'exécution du schéma de l'enroulement du stator pour une phase (phase A)



- 1-paquet de tôles.
- 2-cale de fermeture.
- 3-bande de glissement.
- 4-ressort.
- 5-cale sous ressort.
- 6-gaine de protection semi-conductrice.
- 7-isolation.
- 8-barre d'alésage.
- 9-cale intermédiaire.
- 10-barre de fond d'encoche.
- 11-conducteur élémentaire.
- 12-isolation.
- 13-calage latéral semi-conducteur.
- 14-metelas de fond d'encoches.

Fig. (I-13) : encoche de stator.

I-2-33-Surface de la section du cuivre d'une barre :

Nous pouvons la calculer par la relation suivante :

$$q_{a1} = \frac{I_n}{a_1 \cdot j} [mm^2]. \quad (23).$$

Du tableau (I-3), on choisira la valeur de la hauteur de la section du conducteur élémentaire a_{M1} la plus petite possible, afin de diminuer les pertes supplémentaires dans le cuivre (pertes par effet de peau). Nous prendrons alors $a_{M1} = 1.4$ mm, nous aurons donc comme surface normalisée du conducteur élémentaire du tableau (I-3) : $q_{M1} = 12.39$ mm².

Nous pouvons alors calculer le nombre de conducteurs élémentaires dans une barre, qui doit être un nombre entier et pair.

$$m_e = \frac{q_{a1}}{q_{M1}} \quad (24)$$

La surface définitive de la section du cuivre d'une barre que nous pouvons calculer par la formule suivante :

$$q_{a1} = m_e \cdot q_{M1} [mm^2]. \quad (25)$$

I-2-34-Densité définitive du courant de l'induit :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$j_1 = \frac{I_n}{2 \cdot q_{a1}} \quad (26)$$

I-2-35-Hauteur de l'encoche du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_1 = (a_{M1} + \Delta_i) \cdot \frac{m_e \cdot S_{enl}}{n_1} + 2 \cdot h_{TR} + h_i + h_{K1} [mm]. \quad (27)$$

h_{TR} : Hauteur due à la transposition des conducteurs élémentaires de la barre.

h_i : Epaisseur de l'isolation de l'encoche suivant la hauteur de l'encoche, on l'obtient à partir du tableau (I-4). Pour la tension la plus proche de la tension nominale (15.75 KV), $h_i = 31.5$ mm.

U_n [kv]	13.8	15.75	20	24
h_i [mm]	29.5	31.5	37.5	41.5

Tableau (I-4) : l'épaisseur totale de l'isolation de l'encoche suivant la hauteur de l'encoche et la tension nominale.

h_{K1} : hauteur de clavette de l'encoche du stator qu'on prend généralement :

$h_{K1} = 25$ mm.

Avec :

$$h_{TR} = a_{M1} + \Delta_i [mm].$$

Pour avoir un bon dimensionnement de l'encoche, il y a deux conditions à respecter pour la hauteur h_1 .

1-le rapport entre la hauteur de l'encoche et le diamètre intérieur du stator, doit être :

$$h_1/D_1 = (0.16 \div 0.21).$$

2-le rapport entre la hauteur d'encoche et sa largeur doit être :

$$h_1/b_{en1} = (7 \div 8).$$

$$\frac{h_1}{D_1} = 0.194 \qquad \frac{h_1}{b_{en1}} = 7.89$$

On constate que les deux conditions sont vérifiées.

I-2-36-Flux magnétique d'excitation nominale à vide :

Il est donné par la relation suivante :

$$\Phi_0 = \frac{U_n}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot f_n \cdot W_1 \cdot K_{en1}} [wb]. \quad (28)$$

I-2-37-Longueur active définitive du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$l_1 = \frac{\Phi_0 \cdot P \cdot 10}{\beta_\delta \cdot (D_2 + \delta)} - 2 \cdot \delta [mm]. \quad (29)$$

I-2-38-Nombre de canaux de ventilation dans le de tôles statiriques :

On peut calculer le nombre de canaux par la formule suivante :

$$n_K = \frac{l_1}{b_p + b_K} - 1 \quad (30)$$

b_p : la longueur axiale des paquets de toles, elle est entre 50 et 75 mm.

b_K : la largeur axiale des canaux de ventilation qui est comprise entre 5 et 10 mm.

Pour des raisons d'échauffement nous prenons $b_p=70$ mm et $b_K=5$ mm.

n_K doit être un nombre entier.

La longueur de stator sans canaux de ventilation est donnée par la formule suivante :

$$l_a = l_1 - n_K \cdot b_K [mm]. \quad (31)$$

La longueur du stator, sans canaux de ventilation et sans compter l'isolation, est donnée par la relation (32). Dans les turboalternateurs modernes, on utilise des tôles magnétiques de 0.5 mm d'épaisseur qui ont un coefficient de remplissage $K_e=0.93$.

$$l_e = K_e \cdot l_a [mm] \quad (32)$$

I-2-39-Surface du dos de stator :

La surface de dos de stator peut être obtenue par la relation suivante :

$$Q_{a1} = \frac{\Phi_0}{2 \cdot B_{A1}} [m^2]. \quad (33)$$

Les différentes parties du circuit magnétique.	inductions	Plage d'induction [Tesla]	
		Fonctionnement à vide	Fonctionnement en charge
Dent du rotor	$B_{Z0,2}$	1.7÷2.0	1.9÷2.2
Dos du rotor	B_{a2}	1.4÷1.6	1.5÷1.8
Dents du stator	$B_{Z1/3}$	1.3÷1.6	1.5÷1.7
Dos du stator	B_{a1}	1.4÷1.5	1.6÷1.7

Tableau (I-5) : Les inductions dans les différentes parties du circuit magnétique de l'alternateur.

B_{a1} : l'induction dans le dos de stator, dont on peut avoir la valeur préliminaire en fonctionnement à vide. Du tableau (I-5), on prend la valeur de $B_{a1}=1.4$ T.

I-2-40-La hauteur du dos du stator :

Elle est donnée par la formule

$$h_{a1} = \frac{Q_{a1} \cdot 10^6}{l_e} [mm]. \quad (34)$$

Pour le résultat obtenu de h_{a1} , la double amplitude des vibrations radiales du noyau statorique A_m dépasse la limite admissible. ($A_m = [30 \div 50]$ micromètre), ce qui risque de provoquer la fissuration des tôles magnétiques du stator. Afin d'éviter ce problème, on augmente h_{a1} à 460 mm.

I-2-41-Diamètre extérieur du stator :

Il est donné par la relation suivante :

$$D_a = D_1 + 2 \cdot (h_1 + h_{a1}) [mm]. \quad (35)$$

I-2-42-Longueur frontale d'une spire d'un seul côté de l'enroulement du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$l_{S1} = 2.5 \cdot \frac{D_1}{P} [mm]. \quad (36)$$

I-2-43-Longueur totale d'une spire de l'enroulement du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_{W1} = 2 \cdot (l_1 + l_{S1}) [mm]. \quad (37)$$

I-2-44-Résistance de l'enroulement du stator d'une phase à 15°C :

On a pris, comme température ambiante de calcul des résistances, la température $\theta_0=15^\circ\text{C}$.

Le calcul de la résistance de l'enroulement du stator d'une phase est donné par la formule suivante :

$$r_1 = \frac{W_1 \cdot l_{W1}}{\gamma_e \cdot q_a \cdot a1} \cdot 10^3 [\Omega]. \quad (38)$$

γ_e : la conductivité électrique du cuivre à la température θ_e : $\gamma_e = 57 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$.

I-2-45-Résistance de l'enroulement du stator d'une phase à 75°C :

Pour calculer la résistance de l'enroulement du stator à différentes températures, on multiplie la résistance de l'enroulement à 15°C par le coefficient K_t :

$$K_t = \frac{235 + \theta}{235 + \theta_0}$$

$$r_1' = K_t' \cdot r_1 [\Omega]. \quad (39)$$

La résistance de l'enroulement du stator d'une phase à la température $\theta=75^\circ\text{C}$ est donnée par la relation suivante :

I-2-46-Résistance de l'enroulement du stator d'une phase à 100°C :

Elle est donnée par la relation suivante :

On a pour :

$$r_1'' = K_t'' \cdot r_1 [\Omega]. \quad (40)$$

I-2-47-Masse des parties actives du stator :

Les masses du dos, des dents et de l'enroulement du stator sont nécessaires pour le calcul des pertes.

a- Masse du cuivre de l'enroulement du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$G_{M1} = 3 \cdot q_{a1} \cdot l_{W1} \cdot W_1 \cdot \gamma_{M1} \cdot a_{M1} [Kg]. \quad (41)$$

γ_{M1} : est la masse volumique du cuivre. $\gamma_{M1} = 8.9 \cdot 10^{-6} Kg/mm^2$.

b- Masse du dos du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$G_{a1} = S_a \cdot l_e \cdot \gamma_a \cdot 10^{-3} [Kg]. \quad (42)$$

γ_a : est la masse volumique de l'acier des tôles magnétiques du stator. $\gamma_a = 7.6 \cdot 10^3 \text{ Kg/mm}^3$.

S_a : est la surface du dos du stator.

$$S_a = \pi \cdot D_{a0} \cdot h_{a1} \cdot 10^{-6} [m^2].$$

D_{a0} : est le diamètre du noyau statorique.

$$D_{a0} = D_a - h_{a1} [mm].$$

c- Masse des dents du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$G_{Z1} = S_{Z1} \cdot l_e \cdot \gamma_a \cdot 10^{-3} [Kg] \quad (43)$$

S_{Z1} : est la surface des dents du stator.

$$S_{Z1} = [\pi \cdot (D_1 + h_1) \cdot h_1 - \Sigma q_{en1}] \cdot 10^{-6} [m^2]$$

Σq_{en1} : est la surface des encoches du stator.

$$\Sigma q_{en1} = Z_1 \cdot b_{en1} \cdot h_1 [mm^2]$$

I-2-48-Fréquence propre des vibrations du noyau statorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$f_c = \frac{m_d \cdot (m_d^2 - 1)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m_d^2 + 1}} \cdot \frac{4 \cdot h_{a1}}{(D_{a0})^2} \cdot \sqrt{\frac{E_c}{12 \cdot \gamma_a \cdot \eta \cdot e}} [MHz] \quad (44)$$

E_c : Le module de Young. $E_c = 13 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

m_d : Le nombre de périodes de déformations sur la périphérie du rotor. $m_d = 2 \cdot P$

η : Rapport de la masse du dos, des dents et de l'enroulement du stator par la masse du dos

$$\text{statorique. } \eta = \frac{G_{a1} + G_{Z1} + G_{M1}}{G_{a1}}$$

e : Le coefficient caractérisant la rigidité de flexion du noyau statorique.

$$e = 1 + m_d^2 \cdot \left(\frac{h_{a1}}{D_{a0}} \right)^2$$

On remarque que la valeur obtenue de f_c est conforme à la condition suivante : $f_c \geq 150$ Hz.

I-2-49-Coefficient dynamique :

Le coefficient dynamique k_d caractérise l'approche de la fréquence de l'effet perturbatoire, correspondant à la double fréquence de rotation ($2f_n$), à la fréquence propre de vibration du noyau statorique (f_c).

Le coefficient dynamique est donné par la relation suivante :

$$K_d = \frac{1}{1 - \left(\frac{2 \cdot f_n}{f_c} \right)^2} \quad (45)$$

I-2-50-Double amplitude des vibrations radiales du noyau statorique :

La double amplitude des vibrations radiales du noyau statorique est donnée par la relation suivante :

$$A_m = \frac{1}{(m_d^2 - 1)^2} \cdot \left(\frac{D_{a0}}{2} \right)^4 \cdot \frac{P_M}{E_c J_a} \cdot K_d \cdot 10^3 [\mu m] \quad (46)$$

Avec :

P_M : la force d'attraction magnétique par unité de longueur par rapport au cercle du dos du stator.

$$P_M = \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot l_1 \cdot \frac{D_1}{D_{a0}}$$

J_a : Le moment d'inertie de la surface radiale du dos du stator par rapport à l'axe de la machine.

$$J_a = \frac{l_e \cdot h_{a1}^3}{12}$$

En remplaçant J_a et P_M dans la formule (46), on aura :

$$A_m = \frac{300}{(m_d - 1)^2} \cdot \frac{B_\delta^2}{E_c} \cdot \left(\frac{D_{a0}}{h_{a1}} \right)^3 \cdot \frac{l_1 \cdot D_1}{l_e} \cdot K_d [\mu m]$$

Nous constatons que la valeur obtenue de A_m est conforme à la condition qui stipule que A_m doit être comprise entre 30 et 50 μm .

Après avoir calculé toutes les dimensions géométriques du stator, nous avons schématisé un segment de tôles magnétiques, sur la figure (I-15), qui constitue la feuille statorique. Sur la partie extérieure du segment, des découpures sont pratiquées en forme de queue d'aronde, afin de fixer les segments sur la partie constructive de la machine. Les dimensions circonférentielles de segment et la disposition des découpures sont choisies de façon que, chaque couche contienne un nombre entier de segment et que les segments de la couche suivante soient décalés par rapport au segment de la couche précédente de un demi de la dimension circonférentielles du segment.

I-3-Dimensionnement du rotor :

Dans les machines synchrones bipolaires de grandes puissances fonctionnant à la vitesse de 3000 tr/mn, on utilise des rotors à pôle lisse, car ceux à pôle saillant ne convient pas pour telles machines à cause des difficultés que présente la fixation des enroulements d'excitation. Pour assurer une solidité mécanique qui supporte les forces centrifuges, on les construit en acier hautement résistant. De plus le rotor est percé d'un trou central qui est rempli ensuite avec une matière magnétique pour éliminer les contraintes mécaniques dangereuses.

I-3-1-Tension préliminaire des dents du rotor :

On obtient la tension des dents du rotor de la figure (I-16) :

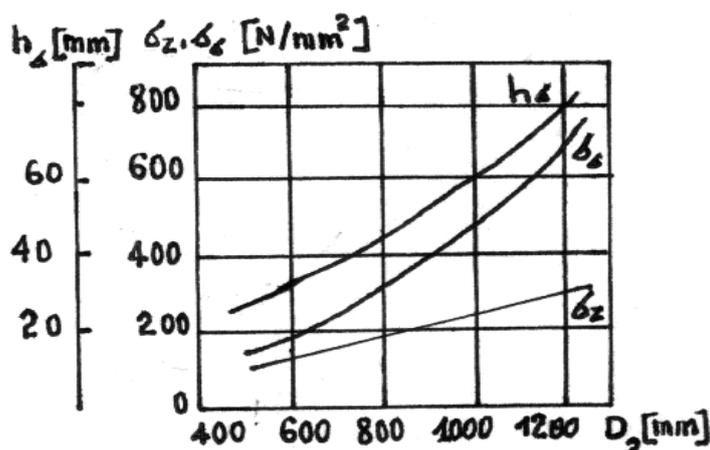


Fig. (I-16) : Les tensions des dents (σ_z) et de la bague de freinage (σ_σ), ainsi que l'épaisseur radiale de la bague de freinage h_s en fonction du diamètre extérieur du rotor.

$$\sigma_z = 260 \text{ N/mm}^2.$$

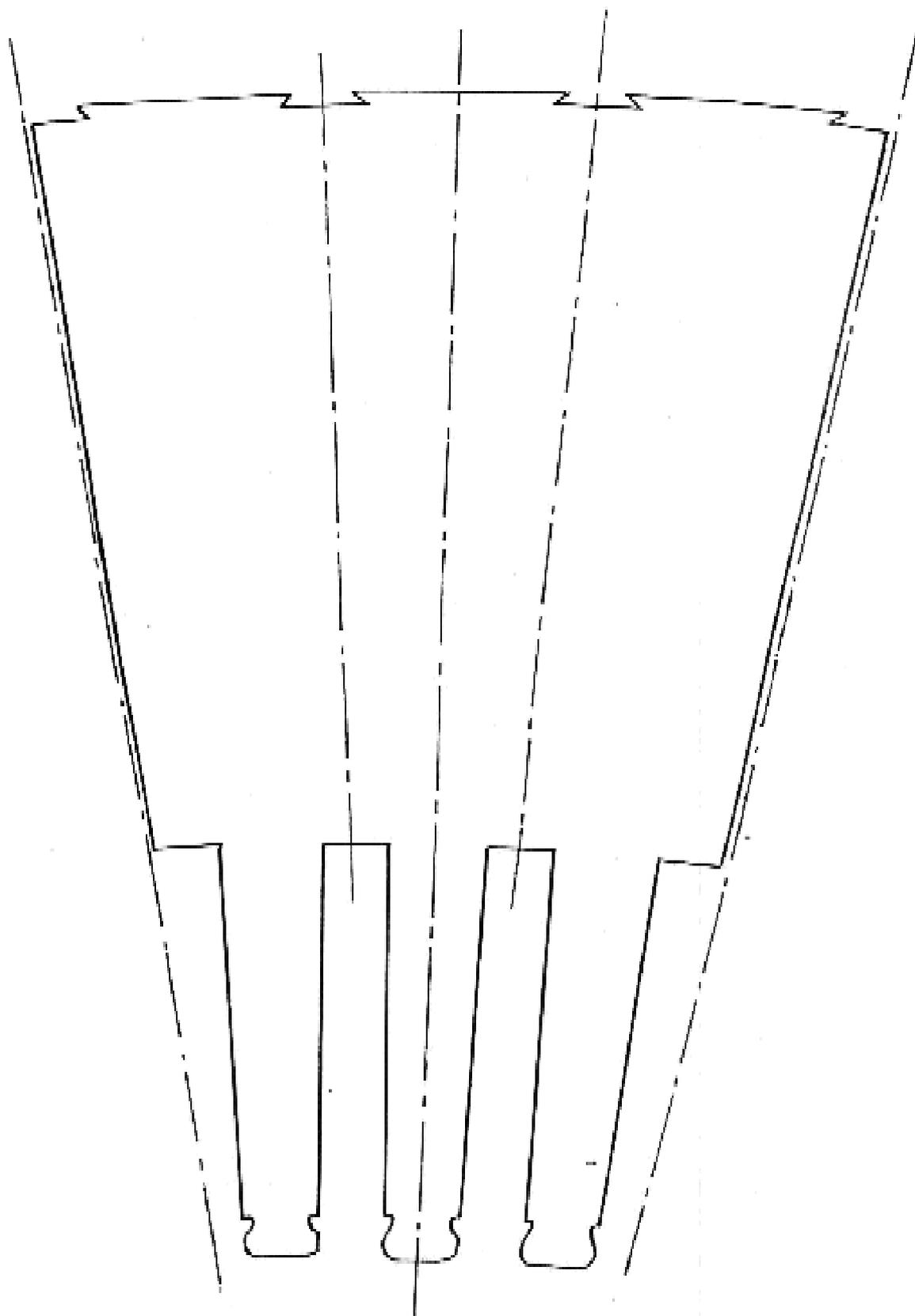


Fig. (I-15) : Segment de tôle magnétique du stator

I-3-2-Hauteur préliminaire de l'encoche du rotor :

A partir de la figure (I-17) et en fonction de la tension des dents σ_z , nous pouvons déterminer la hauteur de l'encoche de rotor : $h_2=159$ mm.

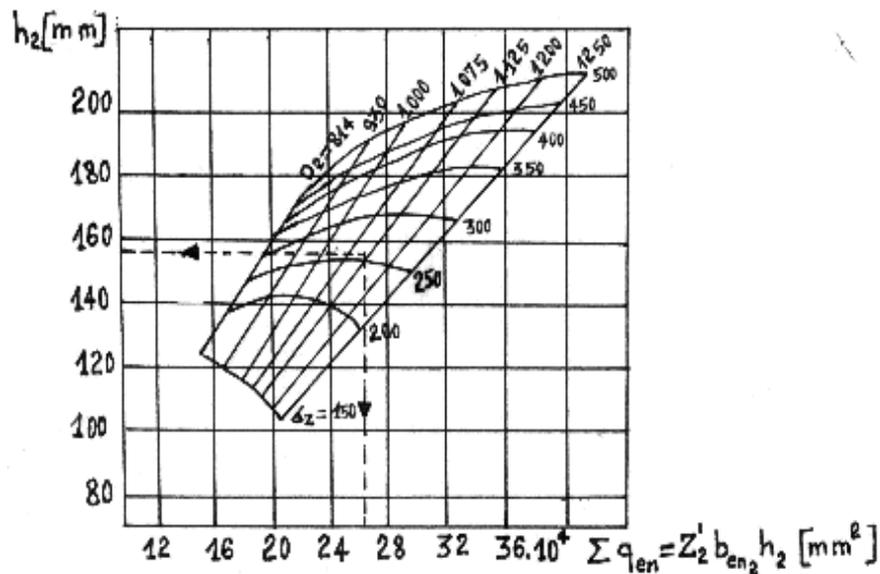


Fig. (I-17) : La hauteur de l'encoche du rotor et la surface des intervalles d'encoche Σq_{en} en fonction de D_2 et σ_z .

I-3-3-Largeur de l'encoche de rotor :

Du tableau (I-6) nous pouvons avoir la largeur b_{M2} et la hauteur a_{M2} de la section des conducteurs élémentaires. Ces conducteurs présentent des canaux pour la circulation du gaz de refroidissement.

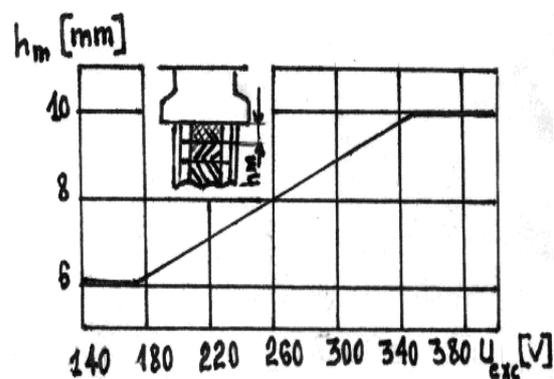


Fig. (I-18) : La hauteur de la cale sous la clavette du rotor en fonction de la tension d'excitation.

Toutes les dimensions des différentes isolations de l'enroulement du rotor sont énumérées dans le tableau (I-7) et la figure (I-18).

Dimensions du conducteur $b_{M2} \times a_{M2}$ [mm] \times [mm].	La surface normalisée de la section q'_{B2} [mm²].
19.5×3.53	67.97
21.5×3.2	68.00
21.5×5.7	120.57
22.5×3.3	73.34
28×7	134.6
28×7	190.60
35×7.9	271.00

Tableau (I-6) : La hauteur et la largeur de la section des conducteurs élémentaires du rotor et leurs sections transversales normalisées.

Isolation selon la fig. (I-20).	Isolation de l'enroulement et de l'encoche du rotor.	Isolations suivant la largeur de l'encoche.	Isolations suivant la hauteur de l'encoche.
1	Isolation entre spires	–	1
2	Gaine	2	–
3	Cale de fond d'encoche	–	0.5
4	Cale au-dessous de la clavette	–	Voir fig. (I-17)
5	Entrefer de placement	0.5	–

Tableau (I-7) : Les différentes isolations de l'enroulement du rotor et leurs dimensions en millimètres.

En prenant la largeur du conducteur élémentaire du tableau (I-6) : $b_{M2}=28$ mm, et l'épaisseur totale de l'isolation $2b_{i2}$ suivant la largeur de l'encoche fixée par le tableau (I-7), telle que :

$2b_{i2}=2 \times 2 + 0.5 = 4.5$ mm, alors la largeur de l'encoche du rotor sera donnée par la relation suivante :

$$b_{en2} = b_{M2} + 2 \cdot b_{i2} [mm] \quad (47)$$

I-3-4-Détermination du nombre total d'intervalles d'encoche :

Dans les turboalternateurs modernes, à pole lisse, on fraise les 2/3 de la périphérie du rotor d'encoche radiales, et environ 1/3 de l'intervalle polaire reste libre d'encoche et forme ainsi les grandes dents, par les quelles passent la plus grande partie du flux magnétique.

C'est d'après cette forme de construction qu'est apparu le nombre d'intervalles d'encoches Z_2' .

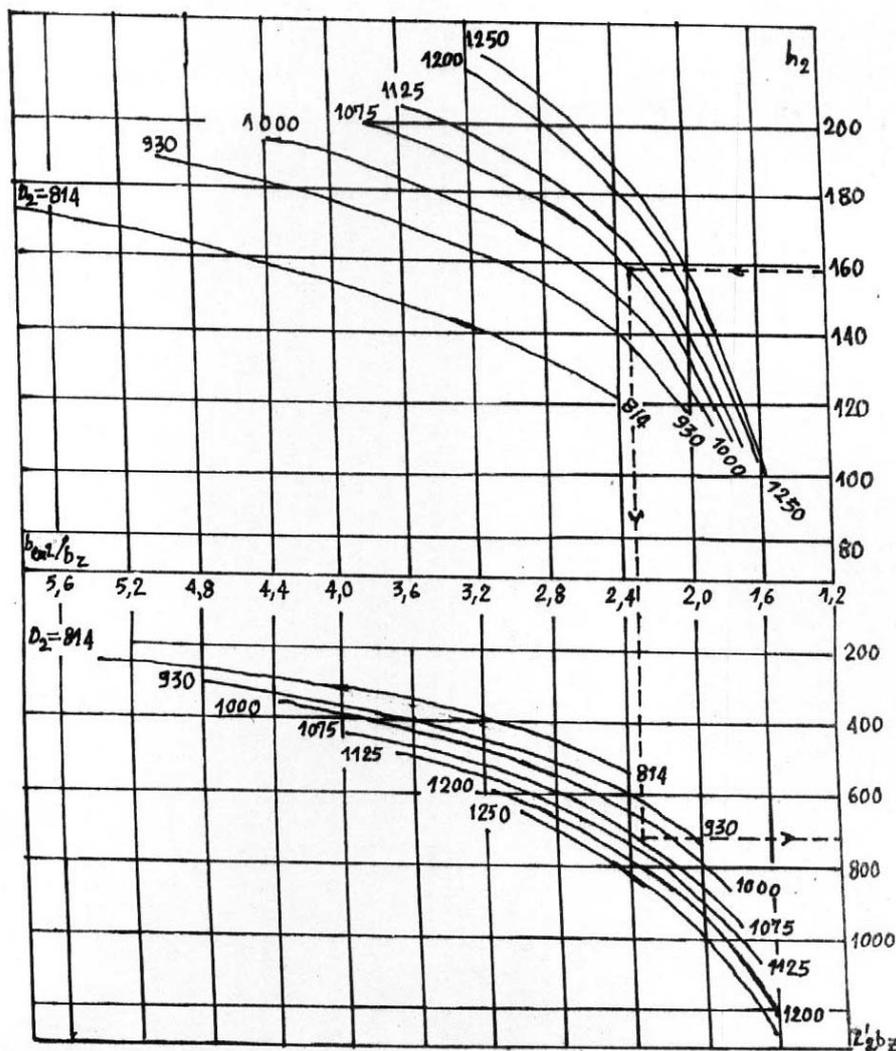


Fig. (I-19) : Nomogramme donnant le rapport b_{en2}/b_z et le produit $Z_2' \cdot b_z$ en fonction de la hauteur de l'encoche h_2 et du diamètre extérieur du rotor D_2 , pour un refroidissement direct du rotor avec de l'hydrogène d'un alternateur bipolaire.

De la figure (I-19), nous obtenons le rapport de largeur de l'encoche du rotor b_{en2} par la largeur de la dent au niveau de sa base b_z , de même que le produit du nombre total d'intervalles d'encoches Z_2' par la largeur b_z . [2]

$$D'où : b_{en2}/b_z = 2.32 \quad \text{et} \quad Z_2' \times b_z = 720 \text{ mm.}$$

On peut obtenir la largeur préliminaire b_z par la formule suivante :

$$b_z = \frac{b_{en2}}{\frac{b_{en2}}{b_z}} \quad (48)$$

En remplaçant la valeur de b_z dans le produit $Z_2' \times b_z = 720 \text{ mm}$, nous aurons :
 $Z_2' \approx 51.43$.

Du tableau (I-8), nous prenons la valeur Z_2' normalisée proche de celle calculée.

Z_2'	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
--------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tableau (I-8) : Les valeurs normalisées de Z_2' .

Pour une bonne distribution du champ nous choisissons : $Z_{2,1} = 48$.

I-3-5-Détermination du nombre d'encoches comportant l'enroulement du rotor :

Le rapport du nombre d'encoche comportant l'enroulement rotorique par le nombre total d'intervalle d'encoche $\gamma = Z_2/Z_2'$ est généralement compris entre 0.667 et 0.75, mais pratiquement, il est recommandé de prendre $\gamma = 0.667$.

Le nombre d'encoche comportant l'enroulement rotorique est donné par la relation :

$$Z_2 = \gamma Z_2' \quad (49)$$

$Z_2 = 32$ encoche.

Du tableau (I-9), nous choisissons la valeur de Z_2 normalisée proche de celle calculée.

Z_2	12	16	20	24	28	32	36	40	44
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tableau (I-9) : Les valeurs normalisées de Z_2

On a alors : $Z_2 = 32$.

D'où la valeur définitive $\gamma = 32/48 = 0.667$.

I-3-6-Coefficient d'enroulement du rotor :

L'enroulement du rotor est un enroulement concentrique à pas total, avec une paire de pôle

($p = 1$) et une voie parallèle ($a_2 = 1$).

Le coefficient d'enroulement du rotor est analogue au coefficient de distribution de l'enroulement du stator, il est donné par la relation suivante :

$$K_{en2} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \gamma}{Z_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}\right)} \quad (50)$$

I-3-7-La force magnétomotrice de réaction d'induit :

On considérant que la courbe de la force magnétomotrice de réaction d'induit a une forme rectangulaire par pôle, on peut la calculer par la formule suivante :

$$F_a = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{4} \cdot \frac{I_n \cdot W_1 \cdot K_{en1}}{P} [A] \quad (51)$$

I-3-8-Force magnétomotrice de court-circuit du stator ramenée à l'enroulement du rotor :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_K = (1.05 \div 1.15) \cdot F_a \cdot \frac{1}{K_{en1}} [A] \quad (52)$$

I-3-9- Force magnétomotrice du rotor :

La force magnétomotrice du rotor crée un champ d'excitation dans l'entrefer et compense la réaction magnétique d'induit, elle est donnée par la relation suivante :

$$F_2 = \sqrt{1.2 \cdot r_{cc} (r_{cc} + 2 \cdot \sin(\Phi_n))} \cdot F_k [A] \quad (53)$$

I-3-10-Densité préliminaire du courant de l'enroulement d'excitation :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$J_2 = \frac{4 \cdot P \cdot F_2}{K_r \cdot \Sigma q_{en} \cdot \gamma} [A/mm^2] \quad (54)$$

K_r : est le coefficient de remplissage de l'encoche du rotor, pour des encoches rectangulaire.

$$K_r = 0.43.$$

Σq_{en} : est la surface des intervalles d'encoches du rotor, on détermine sa valeur de la fig. (I-17)

$$\Sigma q_{en} = 26.4 \cdot 10^4 mm^2$$

I-3-11-Hauteur de la section des conducteurs élémentaires de l'enroulement d'excitation :

De tableau (I-6) : nous pouvons avoir la hauteur de la section du conducteur élémentaire de l'enroulement d'excitation. $a_{M2} = 7$ mm.

Nous aurons par conséquent sa surface normalisée : $q'_{B2} = 190.6$ mm².

I-3-12-Hauteur préliminaire de l'enroulement dans l'encoche rotorique :

Elle est donnée par la formule suivante

$$h = h_2 - (h_{K2} + h_m) [mm] \quad (55)$$

h_{K2} : la hauteur de la clavette de l'encoche rotorique, généralement $h_{K2} = 34$ mm.

h_m : l'épaisseur de la garniture sous clavette, elle est donnée par la fig. (I-18), en prenant la tension d'excitation de l'alternateur de la central 'RAS DJINET' $U_M = 240$ V, comme valeur préliminaire pour réduire l'épaisseur : $h_m = 7.5$ mm.

I-3-13-Nombre de spires dans une bobine :

Il est donné par la relation suivante :

$$S_{en2} = \frac{h}{2 \cdot a_{M2} + h_{21}} \quad (56)$$

h_{21} : est l'épaisseur de l'isolation entre spires suivant la hauteur de l'encoche, elle est donnée par le tableau (I-7) : $h_{21} = 1$ mm.

Le nombre de spires dans une bobine doit être un nombre entier.

I-3-14-Nombre de spires dans un pôle :

Il est donné par la relation suivante :

$$W_2 = \frac{S_{en2} \cdot Z_2}{4 \cdot P \cdot a_2} \quad (57)$$

I-3-15-Calcul de la hauteur de l'encoche rotorique :

La hauteur de l'encoche rotorique est donnée par la formule suivante :

$$h_2 = 2 \cdot a_{M2} \cdot S_{en2} + (S_{en2} - 1) \cdot h_{21} + h_{23} + h_{K2} + h_{rr} [mm] \quad (58)$$

h_{23} : l'épaisseur de la cale de fond d'encoche suivant la hauteur, elle est donnée par le tableau (I-10) : $h_{23} = 0.5$ mm.

Elément de l'encoche	Dimension en, mm	
	Suivant la hauteur de l'encoche	Suivant la largeur de l'encoche
Conducteurs élémentaires	$7 \times 16 = 112$	28
La somme de l'isolation entre spires	$7 \times 1 = 7$	—
La gaine de l'enroulement	—	$2 \times 2 = 4$
Cale de fond d'encoche	0.5	—
Cale au dessous de la clavette	7.5	—
Entrefer de placement	—	0.5
Clavette	34	—
Résultats	$h_2 = 161$ mm	$b_{en2} = 32$ mm

Tableau (I-10) : les différents éléments de l'encoche du rotor.

I-3-16-Courant préliminaire nominal d'excitation du rotor :

Il est donné par la relation suivante :

$$i_n = \frac{F_2}{W_2} [A] \quad (59)$$

I-3-17-Surface préliminaire du dos du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$Q_{a2} = \frac{1.15 \cdot \Phi_0}{B_{a2}} [m^2] \quad (60)$$

B_{a2} : est l'induction préliminaire du dos du rotor en fonctionnement à vide qu'on obtient du tableau (I-5), $B_{a2} = 1.57$ T.

I-3-18-Longueur active du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_2 = \frac{Q_{a2} \cdot 10^6}{D_2 - 2 \cdot h_2} [mm] \quad (61)$$

La longueur active du rotor doit vérifier la condition suivante : ($l_1 \leq l_2 \leq l_1 + 150$ mm).

I-3-19-La longueur frontale d'un seul côté d'une spire :

Elle est donnée par la relation expérimentale suivante :

$$l_{s2} = \frac{1.35 \cdot D_2}{P} [mm] \quad (62)$$

I-3-20-Longueur totale d'une spire de l'enroulement d'excitation :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_{W2} = 2 \cdot (l_{s2} + l_2) [mm] \quad (63)$$

I-3-21-Surface effective du cuivre de la section d'une spire de l'enroulement rotorique :

Elle représente la surface de la section de la spire, sans compter la surface des canaux de refroidissement qui se trouvent dans l'enroulement rotorique, elle est donnée par la relation suivante :

$$q_{a2} = q_{B2} \cdot \left(1 - \frac{q_{K2}}{q_{B2}} \right) [mm^2] \quad (64)$$

$q_{B2} = 2q'_{B2} = 2 \times 190.6$: est la surface de la section d'une spire avec canaux de refroidissement.

q_{K2} : est la surface des canaux de refroidissement.

Il est recommandé de prendre le rapport $q_{K2} / q_{B2} = (0.15 \div 0.30)$, nous prenons

$$q_{K2} / q_{B2} = 0.19.$$

I-3-22-Masse de l'enroulement du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$G_{M2} = 2 \cdot P \cdot q_{a2} \cdot l_{W2} \cdot W_2 \cdot \gamma_{M1} [Kg] \quad (65)$$

I-3-23-Résistance du cuivre de l'enroulement rotorique d'une phase à 15°C :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$r_2 = \frac{2 \cdot P \cdot W_2 \cdot l_{W2} \cdot 10^3}{\gamma_e \cdot q_{a2} \cdot a_2} [\Omega] \quad (66)$$

I-3-24-Résistance du cuivre de l'enroulement rotorique d'une phase à 75°C :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$r_2' = r_2 \cdot K_t' [\Omega] \quad (67)$$

I-3-25-Résistance du cuivre de l'enroulement rotorique d'une phase à 100°C :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$r_2'' = r_2 \cdot K_t'' [\Omega] \quad (68)$$

I-3-26-Tension préliminaire d'excitation nominale :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{exn} = r_2'' \cdot i_n [V] \quad (69)$$

Pour s'assurer du bon dimensionnement des encoches rotorique on a deux rapports à mettre en conformité avec les recommandations ci-après :

$$B_2 = \frac{h_2}{D_2} \quad B_2 = 0.15$$
$$B_2 = (0.15 \div 0.2)$$

$$S_0 = \frac{\Sigma q_{en}}{\pi \frac{D_2^2}{4}} \quad S_0 = 0.291$$

$$S_0 = (0.24 \div 0.32)$$

Donc les deux rapports sont dans les recommandations fixées. On remplace les deux rapports B_2 et S_0 dans la figure (I-20), pour avoir le rapport $\sigma_z p^2 / D_2^2$, d'où nous pouvons en

déduire la valeur correspondante de la tension σ_z , qui doit être proche de celle prise de la figure (I-16).

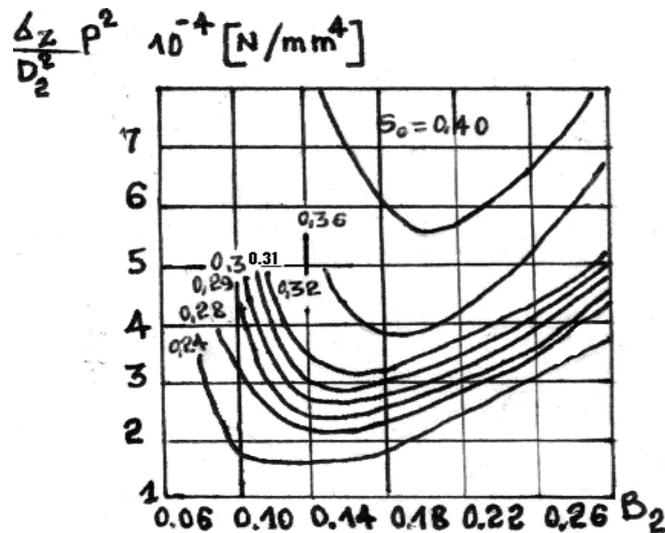


Fig. (I-20) : $\sigma_z p^2 / D_2^2$ en fonction de S_0 et β_2 pour une vitesse d'essai $n_p = 3600$ tr/mn.

$$\sigma_z p^2 / D_2^2 = 2.25 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^4.$$

On remplace la valeur de D_2 et de P dans ce rapport, on aura $\sigma_z = 260.016 \text{ N/mm}^4$.

I-3-27-Réalisation de l'enroulement rotorique :

Pour l'enroulement rotorique on utilise généralement un enroulement concentrique à une seule couche, parcouru par un courant continu, qui est le courant d'excitation.

Avant de commencer la réalisation, il faut au préalable calculer les paramètres de l'enroulement, telle que Z_2 est le nombre d'encoches comportant l'enroulement, et m_2 est le nombre de phase du rotor.

$$Z_2 = 32, 2.p = 2, m_2 = 1.$$

Le pas polaire :

$$\tau_2 = \frac{Z_2}{2 \cdot P}$$

Puisque nous avons un rotor à pôle lisse, constitué de deux grandes dents, alors on doit enrouler d'une manière à avoir sur l'une le pôle nord et sur l'autre le pôle sud. Ce qui nous ramènons à exécuter sur chaque pôle un enroulement avec 8 pas d'enroulement qui sont :

$$Y_{21} = 15; Y_{22} = 13; Y_{23} = 11; Y_{24} = 9; Y_{25} = 7; Y_{26} = 5; Y_{27} = 3; Y_{28} = 1$$

Le schéma de cet enroulement est donné sur la figure (I-21).

I-4-Calcul du circuit magnétique :

L'objet du calcul du circuit magnétique consiste à déterminer le courant d'excitation et le degré de saturation en fonctionnement nominal à vide. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique $F = \oint H \cdot dl$ qui représente dans notre cas la somme $\sum H_x \cdot L_x$.

L_x : représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

H_x : l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans ce tronçon.

Le circuit magnétique de la machine est constitué de cinq parties distinctes qui sont :

- ✓ L'entrefer.
- ✓ Le dos du stator.
- ✓ Le dos du rotor.
- ✓ Les dents du stator.
- ✓ Les dents du rotor.

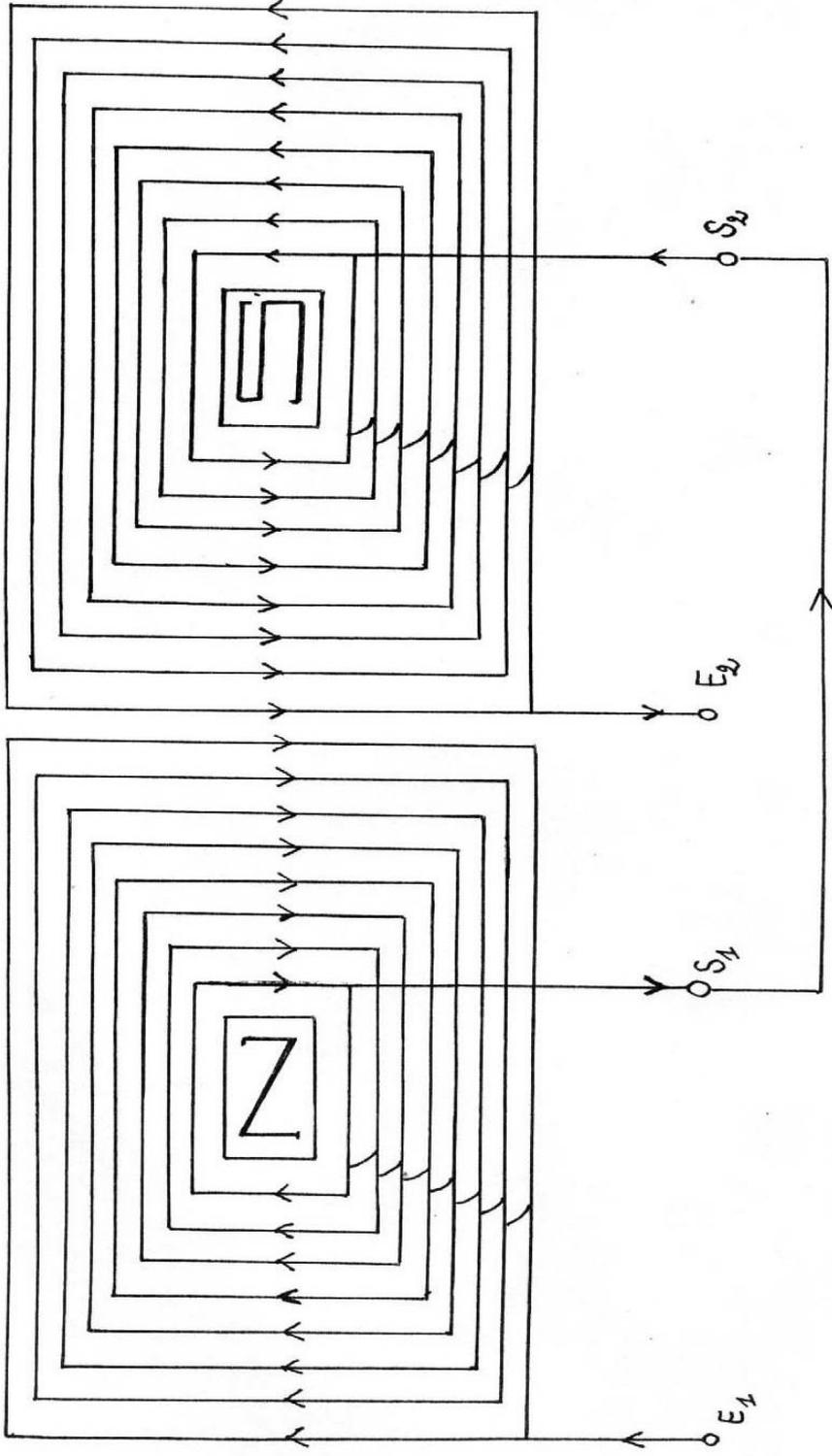


Fig (I-21) : Schéma de l'enroulement d'excitation.

I-4-1-Section de l'entrefer :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$Q_{\delta} = \frac{D_2 + \delta}{P} \cdot (l_1 + 2 \cdot \delta) \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (70)$$

I-4-2-Section des dents du stator :

Elle est donnée par la relation suivante:

$$Q_{Z13} = \frac{6}{\pi} \cdot q \cdot b_{Z13} \cdot l_e \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (71)$$

b_{Z13} : la largeur de la dent du stator correspondant à une distance de $1/3 h_1$, à partir de la base de la dent :

$$b_{Z13} = \frac{\pi \cdot D_{Z13}}{Z_1} - b_{en1} [mm]$$

D_{Z13} : le diamètre intérieur du stator correspondant à une distance de $1/3 h_1$, à partir de la base des dents :

$$D_{Z13} = D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_1 [mm]$$

I-4-3-Section de dos du stator :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$Q_{a1} = h_{a1} \cdot l_e \cdot 10^{-6} [mm] \quad (72)$$

I-4-4-Induction magnétique dans l'entrefer :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_0}{Q_{\delta}} \quad (73)$$

I-4-5-Induction magnétique dans les dents du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{Z13} = \frac{\Phi_0}{Q_{Z13}} \quad (74)$$

Pour le cas de forte induction dans les dents du stator dépassant 1,8 Tesla, il faut tenir compte de la partie du flux qui se divise. Pour cela, on prendra la valeur du champ magnétique dans les dents du stator (H_{Z1}) correspondant à l'induction B_{Z13} de la fig. (I-22) en introduisant à cet effet, le coefficient de dérivation du champ K_{13} qui est donné par la relation suivante :

$$K_{13} = \frac{(b_{en1} + b_{Z13}) \cdot l_1}{b_{Z13} \cdot l_1} - 1$$

I-4-6-Induction magnétique dans le dos du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{a1} = \frac{\Phi_0}{2 \cdot Q_{a1}} \quad (75)$$

Comme l'induction dans le dos du stator a une distribution non uniforme dans le sens de la courbe de ce dernier, on a recours à une rectification de l'induction B_{a1} , en la multipliant par le coefficient de rectification de l'induction dans le dos du stator K' :

$$K' = \frac{18 - 10 \cdot \gamma}{18 - 9 \cdot \gamma}$$

Alors l'induction dans le dos du stator sera donnée par la relation ci-dessous :

$$B_{a1}' = K' \cdot B_{a1} [T] \quad (76)$$

I-4-7-Section des dents du rotor correspondant à une distance de 0.2 h_2 à partir de la base des dents :

La section de calcul des dents du rotor est la somme de la section de calcul des grandes dents et celles des petites dents, d'où elle est donnée par la relation suivante :

$$Q_{Z0.2} = Q_{Zg0.2} + Q_{Zp0.2} [m^2] \quad (77)$$

La section de calcul des grandes dents se trouvant dans la zone de forte induction est utilisée en totalité pour la circulation du flux, elle est donnée par la relation suivante :

$$Q_{Zg0.2} = \frac{(1-\gamma) \cdot \pi \cdot D_{Z0.2} \cdot l_2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot P} [m^2] \quad (78)$$

La section totale des petites dents réparties dans la zone de faible induction est peu utilisée pour la circulation du flux, pour cela la section totale des petites dents appelées section de calcul de ces dents est définie par la formule suivante

$$Q_{Zp0.2} = \frac{Z_2}{2 \cdot P} \cdot l_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{Z0.2}}{Z_2} \cdot \gamma - b_{en2} \right) \cdot (0.715 \cdot \gamma) \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (79)$$

$D_{Z0.2}$: le diamètre du rotor correspondant à une distance de $0.2 h_2$ de la base des dents, il est donné par la formule suivante :

$$D_{Z0.2} = D_2 - 1.6 \cdot h_2 [mm] \quad (80)$$

I-4-8-Section des dents du rotor correspondant à une distance de $0.7 h_2$ à partir de la base des dents :

Avec le même raisonnement que précédemment, on calcule la section des dents du rotor correspondant à une distance de $0.7 h_2$ à partir de la base des dents qui est donné par la formule suivante :

$$Q_{Z0.7} = Q_{Zg0.7} + Q_{Zp0.7} [m^2] \quad (81)$$

$$Q_{Zg0.7} = \frac{(1-\gamma) \cdot \pi \cdot D_{Z0.7}}{2 \cdot P} \cdot l_2 \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (82)$$

$$Q_{Zp0.7} = \frac{Z_2}{2 \cdot P} \cdot l_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{Z0.7}}{Z_2} \cdot \gamma - b_{en2} \right) \cdot (0.715 \cdot \gamma) \cdot 10^{-6} [m^2]$$

$$D_{Z0.7} = D_2 - 0.6 \cdot h_2 [mm] \quad (83)$$

$$(84)$$

I-4-9-Section du dos du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$Q_{a2} = (D_2 - 2 \cdot h_2 - D_0) \cdot l_2 \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (85)$$

D_0 est le diamètre du trou central, qui représente un canal cylindrique dans le rotor, lorsqu'en le remplissant avec un matériau magnétique, la valeur de D_0 dans la formule précédente sera égale à zéro.

I-4-10-Force magnétomotrice de l'entrefer :

En calculant la force magnétomotrice de l'entrefer F_δ , on doit tenir compte de l'influence de l'irrégularité de l'entrefer sur l'induction, qui est caractérisé par le coefficient d'entrefer K_c . Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta \cdot K_c \cdot 10^{-3} \quad (86)$$

Le coefficient de l'entrefer K_c est donné par la formule suivante :

$$K_c = K_{c1} + K_{c2} - 1 + K_{CK} - 1 + K_{cr} - 1$$

K_{c1} : le coefficient qui tient compte de l'influence des encoches du stator :

$$K_{c1} = 1 + \frac{b_{en1}^2}{t_1 \cdot (5 \cdot \delta + b_{en1}) - b_{en1}^2}$$

t_2 : le pas dentaire du rotor :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} [mm]$$

K_{c2} : le coefficient qui tient compte de l'influence des encoches du rotor :

$$K_{c2} = 1 + \frac{b_{en2}^2}{t_2 \cdot (5 \cdot \delta + b_{en2}) - b_{en2}^2} \cdot \frac{\gamma}{2}$$

K_{ck} : le coefficient qui tient compte de l'influence des canaux de refroidissement des paquets de tôles statorique, il est exprimé par la relation suivante :

$$K_{CK} = 1 + \frac{b_K^2}{(b_p + b_K) \cdot (5 \cdot \delta + b_K) - b_K^2}$$

K_{cr} : le coefficient qui tient compte de l'influence des canulures sur le corps du rotor.

Les canulures représentent un système de canaux sur la surface en forme d'anneaux sur la surface du rotor, elles ont pour but de diminuer les pertes supplémentaires sur la surface du rotor et d'augmenter la surface de refroidissement, telle que t_r est le pas des canulures et b_r la largeur des canulures. On prend généralement :

$$b_r = 6 mm$$

$$t_r = 12 mm$$

$$K_{cr} = 1 + \frac{b_r^2}{t_r \cdot (5 \cdot \delta + b_r) - b_r^2}$$

Remarque : la disposition des segments des tôles magnétique laminées à froid de marque 3413 est de telle sorte, que les lignes du champ magnétique sont perpendiculaires au sens du laminage dans les dents statoriques et dans le même sens dans le dos statorique.

I-4-11-Force magnétomotrice des dents du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_1 \cdot 10^{-1} [A] \quad (87)$$

H_{Z1} : est le champ magnétique dans les dents du stator, qui est déterminé à partir du tableau (I-11).

$$H_{Z1} = 30.5 A / cm$$

I-4-12-Force magnétomotrice du dos du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{a1} = H_{a1} \cdot L_{a1} \cdot 10^{-1} [A] \quad (88)$$

H_{a1} : est le champ magnétique dans le dos statorique, qu'on peut déterminer d'après le tableau (I-12).

$$H_{a1} = 2.43 A / cm$$

L_{a1} : est la longueur moyenne des lignes de champ dans le dos du stator :

$$L_{a1} = \pi \cdot D_{a0} \cdot \frac{\gamma}{4 \cdot P} [mm]$$

I-4-13-Force magnétomotrice du stator et de l'entrefer :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F' = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{a1} [A] \quad (89)$$

I-4-14-Inductance de dispersion de l'enroulement d'excitation :

Elle dépend des rapports des dimensions en hauteur et en largeur de l'encoche du rotor, elle donnée par la relation suivante :

$$\lambda_s = \mu_0 \cdot \frac{4 \cdot P \cdot 2 \cdot l_2 \cdot 10^{-3}}{Z_2} \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot b_{en2}} + \frac{h_{K2} + h_m}{b_{en2}} \right) [H] \quad (90)$$

I-4-15-Flux magnétique de dispersion du rotor :

Il est donné par la relation suivante :

$$\Phi_s = \lambda_s \cdot F' [Wb] \quad (91)$$

I-4-16-Flux magnétique total du rotor par pôle :

Il est exprimé par la relation suivante :

$$\Phi_2 = \Phi_0 + \Phi_s [Wb] \quad (92)$$

I-4-17-Induction dans les dents du rotor correspondant à une distance 0.2 h₂ à partir de la base des dents :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{Z0.2} = \frac{\Phi_2}{Q_{Z0.2}} [T] \quad (93)$$

I-4-18-Induction dans les dents du rotor correspondant à une distance de $0.7 h_2$ à partir de la base des dents :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$B_{Z0.7} = \frac{\Phi_2}{Q_{Z0.7}} [T] \quad (94)$$

Note : Dans le cas de forte induction de $B_{Z0.2}$, et $B_{Z0.7}$ dépassant 1.8 T, il faut tenir compte de l'inégale répartition du flux déplacé des dents vers les encoches, dans ce cas nous prendrons les valeurs des champs magnétiques $H_{Z0.2}$, et $H_{Z0.7}$ correspondant respectivement aux inductions $B_{Z0.2}$ et $B_{Z0.7}$ de la figure (I-23), en introduisant à cet effet le coefficient $K_{0.2}$ pour l'induction $B_{Z0.2}$ et $K_{0.7}$ pour l'induction $B_{Z0.7}$. Ces coefficients sont donnés par les relations suivantes :

$$b_{Z0.2} = \frac{\pi \cdot D_{Z0.2}}{Z_2} - b_{en2} [mm] , \quad b_{Z0.7} = \frac{\pi \cdot D_{Z0.7}}{Z_2^4} - b_{en2} [mm]$$

$$K_{0.2} = \frac{b_{en2}}{b_{Z0.2}} , \quad K_{0.7} = \frac{b_{en2}}{b_{Z0.7}}$$

I-4-19-Induction du dos rotorique :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$B_{a2} = \frac{\Phi_2}{Q_{a2}} [T] \quad (95)$$

I-4-20-Force magnétomotrice des dents du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{Z2} = \frac{h_2}{2} \cdot (H_{Z0.2} + H_{Z0.7}) \cdot 10^{-1} [A] \quad (96)$$

Les valeurs des champs $H_{Z0.2}$ et $H_{Z0.7}$ sont relevées du tableau (I-13).

$$H_{Z0.2} = 142 A/cm , \quad H_{Z0.7} = 25 A/cm$$

I-4-21-Force magnétomotrice du dos du rotor :

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$F_{a2} = H_{a2} \cdot L_{a2} \cdot 10^{-1} [A] \quad (97)$$

La valeur du champ magnétique H_{a2} dans le dos du rotor, est relevée du tableau (I-13).

$$H_{a2} = 25 \text{ A/cm}$$

L_{a2} : la longueur moyenne des lignes du champ dans le dos rotorique :

$$L_{a2} = \frac{D_2 - 2 \cdot h_2}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot P}\right) [mm] \quad (98)$$

I-4-22-Force magnétomotrice d'excitation à vide :

La force magnétomotrice d'excitation à vide F_0 est la somme des forces magnétomotrices dans le stator et l'entrefer F' d'une part, et dans les dents et le dos du rotor F_{z2} , F_{a2} d'autre part, elles s'expriment par la formule suivante :

$$F_0 = F' + F_{z2} + F_{a2} \quad (99)$$

I-4-23-Courant d'excitation nominale à vide :

Il est obtenu par la formule suivante :

$$i_0 = \frac{F_0}{W_2} [A] \quad (100)$$

I-4-24-La partie du courant magnétique dans l'entrefer :

Elle est calculée par la relation suivante :

$$i_\delta = \frac{F_\delta}{W_2} [A] \quad (101)$$

I-4-25-Coefficient de saturation de la machine :

Le coefficient de saturation k_μ des turboalternateurs pour une tension nominale à vide est fixé par la condition suivante : $k_\mu = (1.05 \div 1.25)$. On le calcul avec la formule suivante :

$$K_{\mu} = \frac{i_0}{i_{\delta}} \quad (102)$$

I-4-26-La constante de la machine :

Elle est déduite de la formule suivante :

$$C_A = \frac{D_1^2 \cdot l_1 \cdot N_n}{S_n} [mm^3 / mm \cdot MVA] \quad (103)$$

I-4-27-Détermination de la caractéristique de magnétisation à vide de la machine :

Pour pouvoir déterminer la caractéristique de magnétisation à vide de la machine $U=f(i_0)$, il suffit de faire le calcul pour différentes valeurs de la tension nominale relative : $U/U_n=0,7-1,0-1,1-1,2-1,3-1,4$. L'application numérique est donnée au tableau suivant :

Note : i_0 [u.r] est le courant d'excitation en unité relative par rapport au courant d'excitation nominal à vide.

U/U_n	0,7	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
ϕ_0 [Wb]	3,056	4,366	4,803	5,239	5,606	6,112
B_{a1} [T]	0,843	1,204	1,324	1,444	1,546	1,685
B_{Z13} [T]	1,044	1,492	1,641	1,79	1,915	2,088
B_δ [T]	0,609	0,87	0,957	1,044	1,117	1,218
H_{Z1} [A/cm]	2,84	38	85,5	157	376	835,6
H_{a1} [A/cm]	1,38	2,43	2,83	3,44	4,38	7,32
F_δ [A]	$3,272 \times 10^4$	$4,674 \times 10^4$	$5,142 \times 10^4$	$5,609 \times 10^4$	$6,002 \times 10^4$	$6,544 \times 10^4$
F_{Z1} [A]	67,223	899,46	$2,024 \times 10^3$	$3,716 \times 10^3$	$8,9 \times 10^3$	$1,978 \times 10^3$
F_{a1} [A]	154,328	271,751	316,483	384,701	489,822	818,607
F' [A]	$3,294 \times 10^4$	$4,791 \times 10^4$	$5,376 \times 10^4$	$6,019 \times 10^4$	$6,94 \times 10^4$	$8,604 \times 10^4$
ϕ_s [Wb]	0,136	0,198	0,222	0,249	0,287	0,355
ϕ_2 [Wb]	3,193	4,564	5,025	5,488	5,893	6,467
$B_{Z0,2}$ [T]	1,278	1,828	2,012	2,198	2,36	2,59
$B_{Z0,7}$ [T]	0,998	1,427	1,571	1,716	1,842	2,022
B_{a2} [T]	0,998	1,427	1,571	1,716	1,842	2,022
$H_{Z0,2}$ [A/cm]	16,68	142	395	985	1550	2280
$H_{Z0,7}$ [A/cm]	13,41	25	44,6	83,5	183	460
H_{a2} [A/cm]	13,41	25	44,6	83,5	196	1040
F_{Z2} [A]	242,676	$1,347 \times 10^3$	$3,545 \times 10^3$	$8,617 \times 10^3$	$1,398 \times 10^4$	$2,21 \times 10^4$
F_{a2} [A]	504,484	940,5	$1,67 \times 10^3$	$3,141 \times 10^3$	$7,374 \times 10^3$	$3,912 \times 10^4$
F_0 [A]	$3,369 \times 10^4$	$5,02 \times 10^4$	$5,898 \times 10^4$	$7,195 \times 10^4$	$9,075 \times 10^4$	$1,473 \times 10^5$
I_0 [A]	526,362	784,379	921,613	$1,124 \times 10^3$	$14,18 \times 10^3$	$2,301 \times 10^3$
I_0 [u.r]	0,671	1	1,175	1,433	1,808	2,934

Tableau de calcul de la caractéristique à vide de la machine.

I-4-28-Réactance de fuite de l'enroulement d'induit :

La réactance de fuite d'induit comprend :

a- Réactance de dispersion d'encoche :

Elle est due à la dispersion du champ magnétique dans les encoches elles mêmes, et entre les dents voisines. On peut la calculer par la formule suivante :

$$x_{en} = 0.407 \cdot \left(\frac{W_1}{10} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_n}{U_n} \right) \cdot \frac{l_1}{Z_1} \cdot 2 \cdot \frac{3 \cdot B + 1}{4} \cdot \frac{h_{11} + 3 \cdot h_{31}}{3 \cdot b_{en1}} \cdot 10^{-4} [\%] \quad (104)$$

Avec :

$$h_{31} = h_{K1} + h_3 + h_{ic} [mm]$$

$$h_{11} = h_1 - (h_{31} + h_5 + h_{ic}) [mm]$$

h_3 : est l'épaisseur de la cale au dessous de la clavette, $h_3 = 1$ mm.

h_{ic} : est l'épaisseur d'une barre suivant la hauteur d'un seule coté, $h_{ic} = 6$ mm.

h_5 : est l'épaisseur de la cale de fond d'encoche, $h_5 = 1$ mm.

Les dimensions h_{31} , h_{11} , h_3 , h_{ic} et h_5 sont représentées sur la figure (I-24).

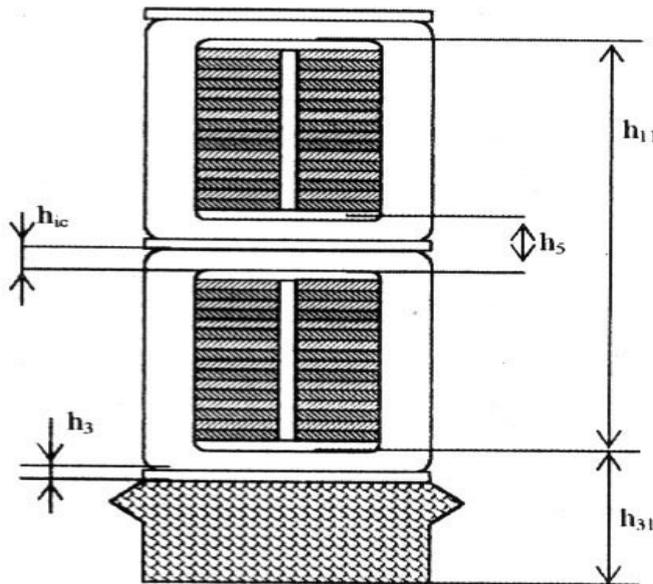


Fig (I-24)

b- Réactance de dispersion des têtes de bobines :

Elle est due aux champs magnétiques de dispersion dans les parties frontales de l'enroulement du stator. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$x_S = 0.407 \cdot \left(\frac{W_1}{10} \right)^2 \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{D_1}{P^2} \cdot K_{en1}^2 \cdot 10^{-4} [\%] \quad (105)$$

c- Réactance différentielle :

Elle est due aux harmoniques supérieurs du champ magnétique. Dans les machines synchrones à grande puissance, cette réactance peut être négligée ($X_f = 0$).

D'où la réactance de fuite de l'enroulement d'induit est donnée par la relation suivante :

$$x_1 = x_{en} + x_S + x_f [\%] \quad (106)$$

Note : toutes les réactances sont calculées en pourcentage, et l'impédance nominale adoptée comme unité, est donnée par la relation suivante :

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} [\Omega]$$

I-4-29-Réactance de potier :

Elle est légèrement supérieure à la réactance inductive du stator, et peut s'exprimer par la formule expérimentale suivante :

$$x_p = x_1 + 2.5 [\%] \quad (107)$$

I-4-30-Courant de la force magnétomotrice de réaction magnétique d'induit :

Il est donné par la relation suivante :

$$i_a = \frac{F_a}{W_2 \cdot K_{en2}} [A] \quad (108)$$

I-4-31-La détermination du courant d'excitation nominale à vide :

Pour déterminer le courant d'excitation nominale à vide, il convient de se servir de la caractéristique de magnétisation à vide de la machine pour les turboalternateurs qui ont un rotor à pôle lisse, on utilise le diagramme de potier qui donne des résultats assez satisfaisants.

En construisant ce diagramme, on prendra sur l'axe des ordonnées OY (axe des imaginaires) dans le sens positif, le vecteur de la tension nominale en unité relative.

$\vec{U}_n=1$ on trace ensuite le vecteur du courant nominal qui est aussi en unité relative, $I_n=1$ en retard par rapport à \vec{U}_n d'un angle φ_n . En ajoutant le vecteur de tension $-j \cdot (x_p/100) \cdot I_n$ au vecteur \vec{U}_n , on obtient le vecteur de la force électromotrice résultante \vec{E}_δ , qui est proportionnelle au flux de l'entrefer Φ_δ , traçant un arc de cercle de centre 0 de rayon E_δ et qui coupe OY au point e. Ensuite, on projette le point sur la courbe de magnétisation suivant l'axe des abscisses OX (axe des réels) au point a, qui est à son tour projeté sur OY suivant l'axe OY au point m, la distance om représente le courant d'excitation i_E , correspondant à la force magnétomotrice E_δ selon l'échelle donnée sur la figure (I-25). Du point 0 on trace le vecteur \vec{i}_E , qui est perpendiculaire à \vec{E}_δ et a comme module la valeur du courant i_E . De l'extrémité de ce dernier on trace le vecteur du courant de la force magnétomotrice de réaction d'induit \vec{i}_a qui est parallèle au vecteur I_n , et a comme module la valeur du courant i_a .

La somme des vecteurs \vec{i}_E et \vec{i}_a , nous donne le vecteur du courant d'excitation nominale \vec{i}_n , pour connaître sa valeur numérique, on trace un arc de cercle de centre 0, et de rayon i_n , et qui coupe OX au point f, telle que, la distance of représente la valeur du courant i_n .

I-4-32-Densité du courant nominal :

Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$j_2 = \frac{i_n}{q_{a2}} [A/mm^2] \quad (109)$$

I-4-33- Tension d'excitation nominale :

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$U_{exn} = i_n \cdot r_2'' [V] \quad (110)$$

Note : Selon la valeur de la tension d'excitation calculée définitivement par la formule précédente, il faut retrouver l'épaisseur de la garniture h_m de la figure (I-18) et par la suite la nouvelle hauteur de l'encoche du rotor h_2 .

D'où : $h_m = 7.8 \text{ mm}$, $h_2 = 161.3 \text{ mm}$.

I-4-34-Courant d'excitation donnant le courant nominal de court-circuit :

Il peut être exprimé par la formule suivante :

$$i_K = i_a + i_\delta \cdot \frac{x_p}{100} [A] \quad (111)$$

I-4-35-Calcul du rapport de court-circuit :

Il s'exprime par la relation suivante :

$$r_{cc} = \frac{i_0}{i_K} \quad (112)$$

I-4-36-Capacité de surcharge statique de la machine :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$W_{en} = \frac{i_n}{i_K \cdot \cos(\Phi_n)}$$

I-4-37-Détermination de la variation de la tension à l'aide du diagramme de tension (diagramme de potier) :

Dans les machines modernes à grande puissance, la variation de la tension (ΔU), ne doit pas dépasser 50%.

De la figure (I-25), on peut obtenir la valeur de ΔU en menant une droite parallèle à OY à partir du point f et qui coupe la courbe de magnétisation au point d, et en traçant une autre parallèle à OX, de l'extrémité du vecteur \vec{U}_n et qui coupe la droite (fd) au point L.

Alors la valeur de la variation de tension ΔU , sera donnée par la formule suivante :

$$\Delta U = \frac{\overline{Ld}}{\overline{Lf}} \cdot 100 [\%]$$

I-4-38-Caractéristique de réglage :

Lors du calcul initial de la machine, on détermine la valeur requise du courant d'excitation (i_{ex}) à différents régimes de fonctionnement, c'est-à-dire de déterminer le courant i_{ex} en fonction du coefficient de charge ($I/I_n=1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4$).

Pour connaître le courant d'excitation pour chaque valeur du coefficient de charge, nous procédons de la même manière que pour la détermination du courant d'excitation nominale, et ceci tout en maintenant la tension nominale constante, on recalcule la tension $[(x_p/100) I_n]$, ainsi que le courant i_a pour les différentes valeurs, du coefficient de charge comme c'est sur la figure (I-25). De cette figure on obtient le tableau (I-15), dans lequel on exprime le courant d'excitation en fonction du coefficient de charge $i_{ex}=f(I/I_n)$.

La courbe de la caractéristique de réglage de l'alternateur est donnée sur la figure (I-26).

I/I _n	Unités relatives	0	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4
i_{ex}	Ampères	860	1180	1560	1960	2380	2800

Tableau (I-15)

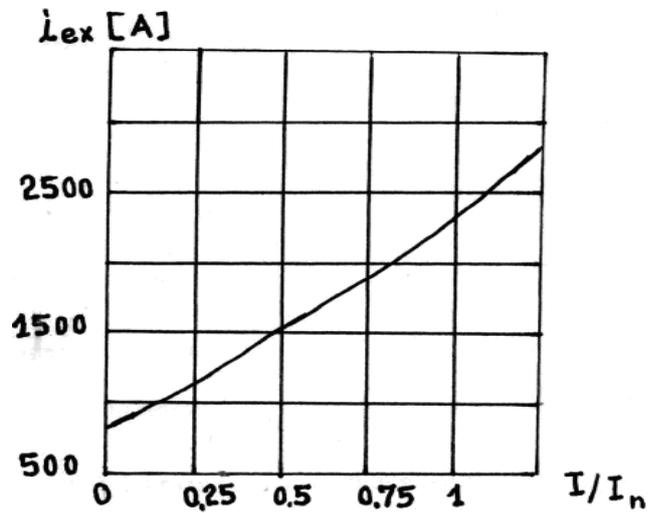


Fig. (I-26) : Courbe de la caractéristique de réglage.

I-5-Calcul des paramètres de la machine :

I-5-1-Réactance inductive longitudinale de réaction d'induit :

Elle s'exprime comme suit :

$$x_{ad} = \frac{ia}{i_{\delta}} \cdot 100 [\%] \quad (114)$$

I-5-2-Réactance inductive synchrone longitudinale :

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$x_d = x_1 + x_{ad} [\%] \quad (115)$$

I-5-3-Réactance inductive de dispersion de l'enroulement d'excitation :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{ex} = x_{ad} \cdot (\sigma_x - 1) [\%] \quad (116)$$

Avec :

σ_x : est un coefficient de dispersion qui prend en considération la réduction de x_{ex} à l'enroulement statorique.

$$\sigma_x = 1 + \frac{\mu_0 \cdot i_\delta \cdot S_{en2} \cdot 2 \cdot l_2}{3 \cdot b_{en2}} \cdot \lambda_f$$

λ_f : est le coefficient de conductibilité magnétique du flux d'excitation.

$$\lambda_f = \frac{h_2 + 2 \cdot (h_{K2} + h_m)}{3 \cdot b_{en2}}$$

I-5-4-Réactance inductive synchrone longitudinale transitoire :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$x_d' = x_1 + \frac{x_{ad} \cdot x_{ex}}{x_{ad} + x_{ex}} [\%] \quad (117)$$

I-5-5-Réactance inductive synchrone longitudinale subtransitoire :

Elle est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$x_d'' = x_1 + 2.5 [\%] \quad (118)$$

I-5-6-Réaction inductive synchrone transversale subtransitoire :

Elle peut s'exprimer par la relation suivante :

$$x_q'' = 1.5 \cdot x_d'' [\%] \quad (119)$$

I-5-7-Réactance inverse :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_2 = \sqrt{x_d'' \cdot x_q''} [\%]$$

(120)

I-5-8-Réactance homopolaire :

Elle est donnée par la formule semi empirique suivante :

$$x_0 = 0.407 \cdot \left(\frac{W_1}{10}\right)^2 \cdot \frac{I_n}{U_n} \cdot \frac{l_1}{Z_1} \cdot \frac{2}{b_{enl}} \cdot \left[(3B-2) \cdot h_{31} + (9B-5) \cdot \frac{h_{11}}{12} - (9B-8) \cdot \frac{h_{2S}}{12} \right] \cdot 10^{-4} + 2 \cdot x_{ad} \cdot \left(B - \frac{2}{3}\right) \cdot \frac{K_{en2}}{K_{en1}^2} \cdot \left[\left(\frac{2}{Z_1}\right)^2 + 0.037 + 0.39 \cdot \left(B - \frac{2}{3}\right) - \left(B - \frac{2}{3}\right)^2 \right] [\%] \quad (121)$$

Avec :

$$h_{2S} = 2h_{ic} + h_7 [mm], \quad h_{2S} : \text{est représenté sur la fig (I-24).}$$

h_7 : l'épaisseur de la cale entre deux barres

I-5-9-Constante du temps du courant d'excitation en essai de court-circuit :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$T_{0B} = \frac{2 \cdot P \cdot W_2 \cdot K_{en2} \cdot \sigma_x \cdot \Phi_0}{i \cdot \delta \cdot r_2'} [S] \quad (122)$$

La cellule d'amortissement qui est sous forme de corp massif du rotor et de l'enroulement amortisseur, augmente la constante de temps T_{0B} , qui est exprimée par la relation suivante :

$$T_0 = \frac{T_{0B}}{0.75} [S] \quad (123)$$

I-5-10-Constante de temps transitoire du courant d'induit en court-circuit triphasé brusque du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$T_d' = T_0 \cdot \frac{x_d'}{x_d} [S] \quad (124)$$

I-5-11-Constante de temps subtransitoire du courant induit :

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$T_d'' = (0.02 \div 0.03) \cdot T_d' [S] \quad (125)$$

I-5-12-Constante de temps d'extinction de la composante apériodique du courant induit :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$T_a = \frac{x_2 \cdot U_n \cdot 10}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot r_1' \cdot I_n \cdot \sqrt{3}} [S] \quad (126)$$

I-5-13-Composante direct du courant de court-circuit triphasé permanent de l'induit :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_d = \frac{1.05}{x_d} \cdot 100 [ur] \quad (127)$$

1.05 : représente l'accroissement de la tension nominale, quand on passe de régime à vide en régime de court-circuit.

Note : les composants du courant de court-circuit biphasé, triphasé et monophasé permanent de l'induit sont en unité relative par rapport au courant induit nominale.

I-5-14-Composante directe transitoire du courant de court-circuit triphasé de l'induit :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$I_d' = \frac{1.05}{x_d'} \cdot 100 [ur] \quad (128)$$

I-5-15-Composante directe subtransitoire du courant de court-circuit triphasé de l'induit :

$$I_d'' = \frac{1.05}{x_d''} \cdot 100 [ur] \quad (129)$$

I-5-16-Composante inverse subtransitoire du courant de court-circuit triphasé de l'induit :

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$I_2'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05}{x_d'' + x_2} \cdot 100 [ur] \quad (130)$$

I-5-17- Composante homopolaire subtransitoire du courant de court-circuit monophasé de l'induit :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$I_0'' = \frac{3 \cdot 1.05}{x_d'' + x_2 + x_0} \cdot 100 [u.r] \quad (131)$$

I-6-Calcul des pertes et rendements :

Pour toute machine électrique, une fraction de l'énergie reçue sera dissipée dans la machine sous forme de pertes d'énergie thermique, qui seront appelées, pertes.

Toutes les pertes qui se produisent dans une machine synchrone peuvent être divisées en pertes principales et pertes supplémentaires. Les pertes principales sont celles qui sont dues

aux principaux phénomènes électromagnétiques et mécaniques, qui se manifestent lors du fonctionnement de la machine, par contre les pertes supplémentaires sont celles qui sont dues aux phénomènes électromagnétiques secondaires.

I.6.1– Les pertes fer:

Pour le calcul des pertes magnétiques dans diverses parties des armatures magnétiques on part des pertes globales, c'est-à-dire les pertes par hystérésis plus les pertes par courant de Foucault, qui sont ramenées aux kilogrammes de tôles d'acier à la fréquence de 50Hz pour une induction de 1 Tesla, ces derniers sont appelées pertes spécifiques notées q_0 en [w/kg] pour chaque marque d'acier, pour l'acier de marque 3413, $q_0=0.8$ w/kg.

a– Pertes magnétiques dans le dos du stator:

Elles sont calculées par la formule suivante:

$$Q_{ca} = k_{S_1} \cdot q_0 \cdot B_{a_1}^2 \cdot G_{a_1} \cdot 10^{-3} [KW] \quad (132)$$

Tel que:

k_{S_1} : Le coefficient total de majoration des pertes en tenant compte de l'imperfection de la technologie, il est pris pour le dos du stator $k_{S_1}=1,3$.

b– Pertes magnétiques dans les dents du stator:

Elles sont données par la relation suivante:

$$Q_{cz} = k_{S_2} \cdot q_0 \cdot 1,6 B_{Z_{13}}^2 \cdot G_{Z_1} \cdot 10^{-3} [KW] \quad (133)$$

La valeur 1,6 dans la formule précédente, prend en considération les pertes dans les dents qui augmentent lorsque les lignes de champs sont perpendiculaires au sens de laminage de l'acier.

Le coefficient total de majoration des pertes k_{S_2} pour des raisons technologiques, est plus élevée pour la dent que pour le dos du stator, nous prenons alors $k_{S_2} = 1,5$.

c– Pertes magnétiques supplémentaires à vide:

Elles s'expriment par la relation suivante:

$$Q_{d_0} = \frac{(30 \div 40)}{P^{1,5}} \cdot B_{\delta}^2 \cdot \left(\frac{D_{11}}{1000} \right)^3 \cdot \frac{l_1}{1000} [KW] \quad (134)$$

d– Somme des pertes magnétiques à vide:

Elle est donnée par la formule suivante :

$$Q_c = Q_{ca} + Q_{cz} + Q_d [KW] \quad (135)$$

I-6-2– Pertes électriques:

Elles sont essentiellement dues au passage du courant dans les conducteurs de l'enroulement pour les réduire, il suffit d'avoir une conductibilité aussi grande que possible.

a– Pertes électriques principales dans l'enroulement statorique:

Elles sont exprimées par la relation suivante:

$$Q_M = 3 I_{n_1}^2 \cdot r_{11} \cdot 10^{-3} [KW] \quad (136)$$

b– Pertes électriques supplémentaires dans l'enroulement statorique:

Elles sont données par la relation suivante :

$$Q_{M\Phi} = (k_{\Phi} - 1) \cdot Q_M [KW] \quad (137)$$

Avec:

k_{Φ} est le coefficient de majoration de la résistance de l'enroulement statorique dû à l'effet pelliculaire, appelé aussi coefficient de Field, il est donné par la relation suivante:

$$k_{\Phi} = 1 + \frac{4}{45} \xi^4 + \frac{(S_{en_1} \cdot m_1)^2 - 1}{9} \xi^4 \quad (138)$$

Tel que:

m_1 est le nombre de conducteurs élémentaires dans une barre suivant la hauteur de l'encoche,
 $m_1 = 52$.

ξ est la hauteur réduite du conducteur élémentaire, elle est donnée par la formule ci-dessous:

$$\xi = \frac{a_{M_1}}{\Delta} \quad (139)$$

Avec:

Δ : La profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique dans le conducteur, elle est exprimée par la relation suivante:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2 b_{en_1}}{n_1 \cdot b_{M_1} \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_e \cdot 10^{-6}}} \quad (140)$$

ω : La pulsation des courants induits tel que $\omega = 2\pi \cdot f_n$.

c– Pertes supplémentaires dans la zone active de la machine:

Les flux de dispersion du stator sont la cause principale de la naissance des pertes supplémentaires dans la zone active de la machine, elles sont données par la formule suivante:

$$Q_{KZ} = \frac{25 \div 30}{P^2} \cdot \left(\frac{A_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{11}}{1000} \right)^3 \cdot \frac{l_1}{1000} [KW] \quad (141)$$

d– Pertes supplémentaires dans les deux extrémités de la partie active du stator:

Le champ de dispersion des parties frontales de l'enroulement statorique crée des pertes supplémentaires dans les deux extrémités de la partie active du stator.

Elles sont données par la relation suivante:

$$Q_{K.K} = \frac{50}{P} \cdot \left(\frac{A_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{11}}{1000} \right)^2 [KW] \quad (142)$$

e– Somme des pertes dans le cuivre de l'enroulement statorique:

Elle s'exprime par la formule suivante :

$$Q_{K\Sigma} = Q_M + Q_{M\Phi} + Q_{K.K} + Q_{KZ} [KW] \quad (143)$$

f- Pertes dans l'enroulement du rotor:

Elles sont données par la relation suivante:

$$Q_B = r_{21} \cdot i_n^2 \cdot 10^{-3} [KW] \quad (144)$$

En prenant compte du rendement de l'excitatrice dans le calcul des pertes de l'enroulement du rotor, ces pertes seront calculées par la formule suivante:

$$Q_{B\eta} = \frac{Q_B}{\eta_B} [KW] \quad (145)$$

Avec:

η_B est le rendement de l'excitatrice principale qui varie généralement de 0,85 à 0,95, on prend dans les calculs $\eta_B = 0,93$.

I-6-3- Pertes mécaniques:

Elles sont le résultat des pertes par frottements dans les paliers du rotor, les pertes par frottement du rotor lors de sa rotation dans l'hydrogène, et les pertes par ventilations.

a- Pertes par frottements dans les paliers:

Elles croissent avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la masse du rotor. Elles peuvent être calculées par la formule suivante:

$$Q_{m_1} = 255 \sqrt{\frac{G_{rot} \cdot l_a}{2 \cdot d_\mu \cdot 10^3}} \cdot d_\mu^2 \cdot \left(\frac{n_n}{3000}\right)^{1,5} \cdot 10^{-6} [KW] \quad (146)$$

Tel que:

G_{rot} est la masse du rotor, elle peut être exprimée par la relation suivante:

$$G_{rot} = (1,3 \div 1,5) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot l_2 \cdot \gamma_c$$

d_μ et l_μ sont respectivement le diamètre et la longueur de la surface d'appuis des paliers du rotor, nous pouvons les calculer par les relations suivantes:

$$d_\mu \cdot l_\mu = \frac{G_{rot} \cdot g}{2P_\mu} [mm] \quad (147)$$

$$l_\mu = (0,8 \div 1,2) \cdot d_\mu [mm] \quad (148)$$

Avec:

g est la gravitation terrestre, elle est fixée $g = 9,81$ N/kg.

p_μ est la pression des paliers sur l'axe du rotor, considérée généralement $p_\mu = (1,2 \div 1,6)$ N/mm².

On choisi $p_\mu = 1,27$ N/mm² et $l_\mu = 0,93 d_\mu$, et on les remplace dans la formule précédente, nous obtiendrons le diamètre de la surface d'appuis des paliers comme suit:

$$d_\mu = \sqrt{\frac{G_{rot} \cdot g}{2 \times 1,27 \times 0,93}} [mm] \quad (149)$$

b– Pertes par frottements du rotor lors de sa rotation dans l'hydrogène:

Elles sont proportionnelles à la viscosité et à la densité de l'hydrogène, c'est-à-dire que l'augmentation ou la diminution de ces pertes est liée directement à ces grandeurs. Lors de la rotation dans l'hydrogène, ces pertes diminuent de 10 fois que dans l'air.

On peut les calculer par la formule suivante:

$$Q_{2H} = Q_2 \cdot \frac{H}{10} [KW] \quad (150)$$

Avec:

Q_2 sont les pertes par frottements dans l'air, elles sont données par la relation suivante :

$$Q_2 = \frac{57,3}{P^2} \cdot \left(\frac{D_2}{1000} \right)^4 \cdot \frac{l_2 + 250}{1000} [KW] \quad (151)$$

H est la pression de l'hydrogène dans l'alternateur, qui est fixée à 3 bars.

c– Pertes par ventilations:

Elles représentent la puissance consommée par les deux ventilateurs axiaux, elles sont proportionnelles au débit du gaz de refroidissement L et à la pression h_{BH} développée par le ventilateur, et inversement proportionnelles au rendement des ventilateurs η_{BH} .

On peut les calculer par la relation suivante:

$$Q_H = \frac{L h_{BH}}{\eta_{BH}} \cdot 10^{-3} [KW] \quad (152)$$

Le rendement des ventilateurs axiaux est donné généralement $\eta_{BH}=0,5$.

La pression h_{BH} est exprimée par la relation suivante:

$$h_{BH} = (5000 \div 7000) \cdot \frac{H}{10} [N/m^2] \quad (153)$$

Le débit du gaz de refroidissement LL est donné par la relation suivante:

$$LL = \frac{Q}{C \cdot (\theta - \theta_{BH})} [m^3 / S] \quad (154)$$

Avec:

Q : La somme des pertes fer, pertes électriques et les pertes par frottements lors de la rotation du rotor dans l'hydrogène, elle peut être calculée par la formule suivante :

$$Q = Q_c + Q_{K\Sigma} + Q_{B\eta} + Q_{2H} [KW] \quad (155)$$

θ La température de l'hydrogène à l'entrée de l'alternateur, qu'on prend généralement

$\theta = (15 \div 20)^\circ c$.

θ_{BH} est la température sur les ailettes du ventilateur, qu'on prend généralement $\theta_{BH} = (2 \div 7)^\circ c$.

C est la chaleur spécifique volumique de l'hydrogène qui est fixée par $C = 1,1 \text{ KJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, pour une pression de 1 bar, et comme on a $H= 3$ bars alors $C = 1,1 \times 3 \text{ KJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

I-6-4– Somme des pertes mécaniques:

Il est exprimé par la relation suivante:

$$Q_{m\Sigma} = Q_m + Q_{2H} + Q_H [KW] \quad (156)$$

I-6-5– Rendement nominal de l'alternateur:

Il est exprimé par la formule suivante:

$$\eta_n = \left(1 - \frac{Q_\Sigma}{P_n \cdot 10^3 + Q_\Sigma} \right) \cdot 100 [\%] \quad (157)$$

Avec:

Q_Σ est la somme des pertes dans l'alternateur laquelle est donnée par la relation suivante:

$$Q_\Sigma = Q_c + Q_{k\Sigma} + Q_{m\Sigma} + Q_{B\eta} [KW] \quad (158)$$

I-6-6- La variation du rendement en fonction de la charge :

En faisant varier le courant d'induit pour différentes valeurs du coefficient de charge ($I/I_n=1/2, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4$), nous obtenues les rendements appropriés. Ceux-ci nous entraîne a recalculer les différentes pertes, pour les différentes valeurs du courant induit. En ce qui concerne les pertes mécaniques et les pertes magnétiques elles resteront constantes par contre les pertes électriques dans le stator changent selon la variation du courant induit, et celles dans le rotor changent selon la variation du courant d'excitation que nous pouvons obtenir du tableau (I-15).

Dans le tableau (I-16), on illustre l'application numérique qui nous donne la variation du rendement et les différentes pertes en fonction du coefficient de charge. Sur la figure (I-27), on a la courbe du rendement en fonction du coefficient de charge $\eta=f(I/I_n)$.

I/I_n	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4
Q_c [KW]	411,637	411,637	411,637	411,637	411,637
$Q_{m\Sigma}$ [KW]	884,734	884,734	884,734	885,734	885,734
$Q_{K\Sigma}$ [KW]	47,672	190,69	429,052	762,694	$1,192 \times 10^3$
$Q_{B\eta}$ [KW]	154,212	207,637	468,467	672,988	852,506
Q_Σ [KW]	$1,962 \times 10^3$	$2,116 \times 10^3$	$2,373 \times 10^3$	$2,733 \times 10^3$	$3,196 \times 10^3$
P_n [KW]	44000	88000	132000	176000	220000
η_η [%]	97,567	98,212	98,40	98,471	98,391

Tableau (I-16) : Applications et valeurs numériques de calcul du rendement en fonction du coefficient de charge.

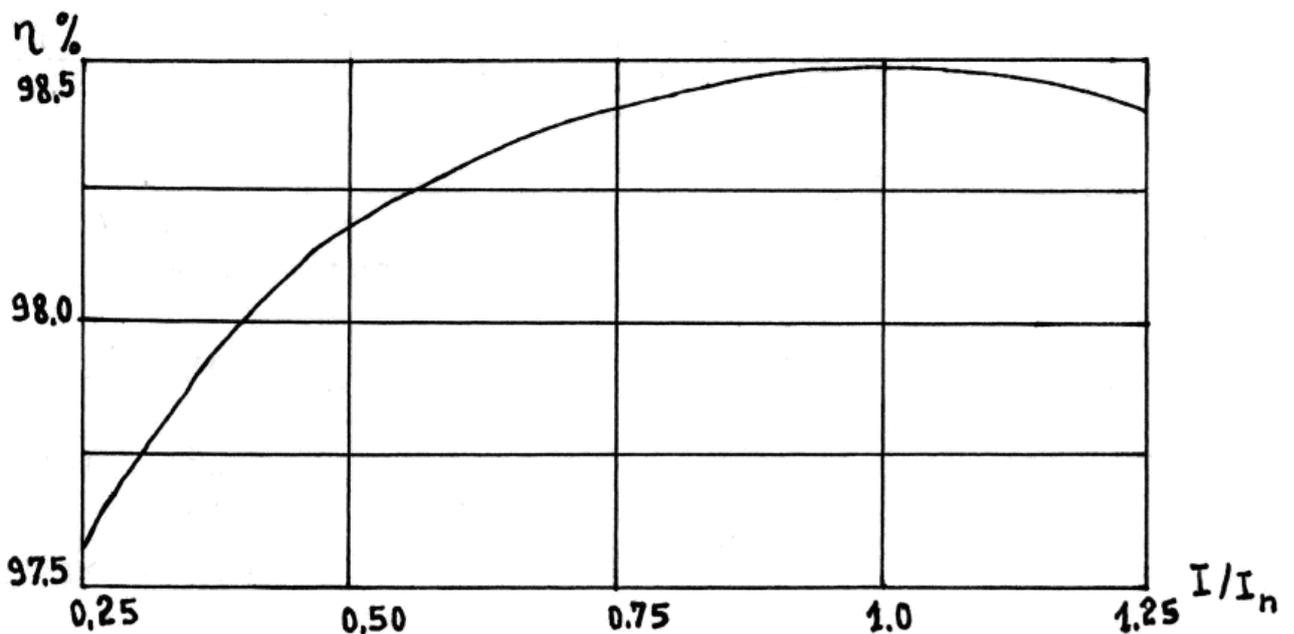


Fig. (I-27) : Courbe de variation de rendement en fonction du coefficient de charge.

Paramètres	Formules	Résultats	Paramètres	Formules	Résultats
------------	----------	-----------	------------	----------	-----------

Q_{δ} [m ²]	70	5,18	B_{a2} [T]	95	1,427
Q_{Z13} [m ²]	71	2,927	F_{Z2} [A]	96	$1,347 \times 10^3$
Q_{a1} [m ²]	72	1,712	F_{a2} [A]	97	940,5
B_{δ} [T]	73	0,87	F_{μ} [A]	99	$5,02 \times 10^4$
Paramètres calculés	74	Paramètres existants	0,87 Ecart 1,492%	Paramètres calculés	Paramètres existants
B_{a1} [T]	75	1,204	i_{δ} [A]	101	730,339
$Q_{Z0,2}$ [m ²]	77	2,498	K_{μ}	102	1,074
$Q_{Z0,7}$ [m ²]	81	3,198	X_{en} [%]	104	8,769
Q_{a2} [m ²]	85	3,198	X_S [%]	105	7,336
F_{δ} [A]	86	$4,674 \times 10^4$	X_1 [%]	106	16,105
F_{Z1} [A]	87	899,46	X_P [%]	107	18,605
F_{a1} [A]	88	271,751	i_a [A]	108	$1,514 \times 10^3$
F [A]	89	$4,791 \times 10^4$	J_2 [A/mm ²]	109	7,99
λ_S [H]	90	$4,131 \times 10^{-6}$	U_{exn} [V]	110	274,16
ϕ_S [Wb]	91	0,198	i_K [A]	111	$1,65 \times 10^3$
ϕ_2 [Wb]	92	4,564	W_{en}	113	1,869
$B_{Z0,2}$ [T]	93	1,828	r_{cc}	112	0,475
$B_{Z0,7}$ [T]	94	1,427	ΔU	-	40

Résultats des calculs :

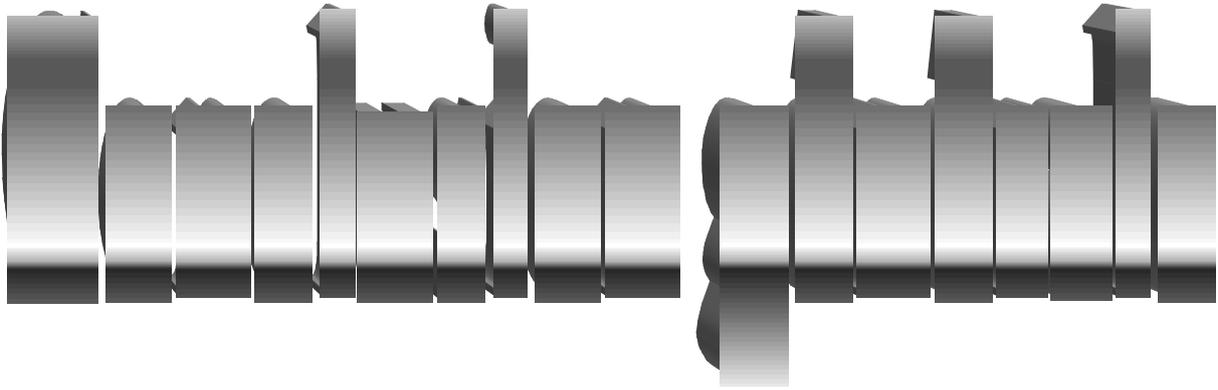
Tableau des valeurs numériques de calcul du circuit magnétique.

Paramètres	Formules	Résultats	Paramètres	Formules	Résultats
Q_M [KW]	136	247,813	l_{μ} [mm]	148	390,236
K_{ϕ}	138	1,21	Q_m [KW]	146	638,472
ξ	139	0,115	Q_2 [KW]	151	344,384
$Q_{M\phi}$ [KW]	137	52,139	Q_{2H} [KW]	150	103,315
Q_{K2} [KW]	141	340,271	h_{BH} [N/mm ²]	153	$1,8 \times 10^3$
Q_{KK} [KW]	142	122,471	Q [KW]	155	$1,847 \times 10^3$
$Q_{K\Sigma}$ [KW]	143	762,694	Q_H [KW]	152	143,947
Q_B [KW]	144	625,879	$Q_{m\Sigma}$ [kw]	156	885,734
$Q_{B\eta}$ [KW]	145	672,988	Q_{Σ} [KW]	158	$2,733 \times 10^3$
d_{μ} [mm]	149	419,609	η_{η} [%]	157	98,471

Tableau des valeurs numériques des formules de calcul des pertes.

Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la centrale de RAS-DJINET :

$D_a=2595 \text{ mm}$	$D_a=2650 \text{ mm}$	2,1	$X_1=16,105 \%$	$X_1=16,1 \%$	3,1
$D_1=1201 \text{ mm}$	$D_1=1130 \text{ mm}$	6,3	$X_p=18,605 \%$	$X_p=25,1 \%$	25,9
$l_1=4283 \text{ mm}$	$l_1=4200 \text{ mm}$	2	$X_d=223,37 \%$	$X_d=212 \%$	5,4
$h_1=236,7 \text{ mm}$	$h_1=230 \text{ mm}$	2,9	$X'_d=24,678 \%$	$X'_d=26,1 \%$	5,4
$Z_1=60 \text{ encoche}$	$Z_1=60 \text{ encoche}$	0	$X''_d=18,605 \%$	$X''_d=20 \%$	7
$b_{en1}=30 \text{ mm}$	$b_{en1}=25 \text{ mm}$	20	$X''_q=27,907 \%$	$X''_q=22,2 \%$	25,7
$\delta=63,179 \text{ mm}$	$\delta=60 \text{ mm}$	5,3	$X_2=22,786 \%$	$X_2=21,6 \%$	5,2
$b_{M1}=8,153 \text{ mm}$	$b_{M1}=7,1 \text{ mm}$	14,8	$X_0=10,97 \%$	$X_0=11 \%$	0,27
$a_{M1}=1,4 \text{ mm}$	$a_{M1}=1,9 \text{ mm}$	26,3	$T_0=8,567\text{S}$	$T_0=7,48 \text{ S}$	15,3
$i_n=2467 \text{ A}$	$i_n=2450 \text{ A}$	0,69	$T'_d=0,94 \text{ S}$	$T'_d=0,95 \text{ S}$	1,1
$U_{exn}=250,267 \text{ V}$	$U_{exn}=240 \text{ V}$	4,3	$T_a=0,644 \text{ S}$	$T_a=0,71 \text{ S}$	9,3
$r_1=0,001\Omega$	$r_1=0,0013 \Omega$	23,1	$T''_d=0,028 \text{ S}$	$T''_d=0,03 \text{ S}$	6,7



Conclusion :

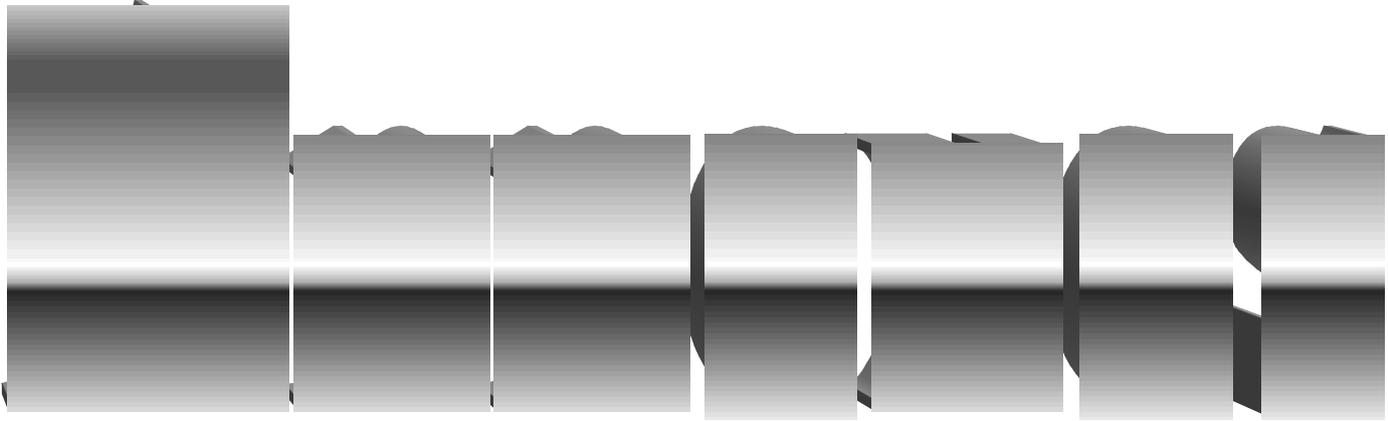
La construction des machines électriques est un domaine très vaste et confidentielle, elle nécessite une étude profonde de dimensionnement et des caractéristiques, des recherches intenses, ainsi que des moyens.

Dans notre travail on a exploité une tranche de production et calculé un alternateur de la centrale thermique de RAS-DJINET. La méthode de calcul ainsi que le programme informatique nous en était d'un apport important dans notre réalisation.

Nous pouvons dire que nous sommes parvenus à des résultats assez satisfaisants dès lors que ceux-ci sont compris dans les marges fixées par les constructeurs :

- Les dimensions des encoches statoriques et rotoriques.
- Le courant d'excitation nominal.
- La tension d'excitation nominale.
- La variation de la chute de tension.
- La double amplitude des vibrations radiales du noyau statorique.
- Les deux vitesses critiques.

La conception de la machine électrique est un domaine immense, en souhaitant que d'autres promotions en tirent un large profit et puisse permettre de faire l'objet de multiples améliorations.



a_{M_1} \ b_{M_1}	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,12	2,24
	$q_{M_1} [mm^2]$								
4,75	6,435	–	7,385	–	8,188	–	9,137	–	10,28
5,0	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	10,84
5,6	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	12,18
6,0	8,185	–	9,385	–	10,44	–	11,64	–	13,08
6,3	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,7
6,7	9,165	–	10,51	–	11,70	–	13,04	–	14,65
7,1	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54
7,5	10,29	–	11,79	–	13,14	–	14,64	–	16,44
8,0	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,56
8,5	11,69	–	13,39	–	14,94	–	16,64	–	18,68
9,0	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,80
9,5	13,09	–	14,99	–	16,74	–	18,64	–	20,92
10	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04
10,6	14,63	–	16,75	–	18,72	–	20,84	–	23,38

Tableau (I-3) : Largeur b_{M_1} et hauteur a_{M_1} des valeurs normalisées des conducteurs élémentaires pleins en [mm] et leur surfaces respectives (q_{M_1}).

B[T]	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H[A/cm]</i>									
0,5	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16	1,18
0,6	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38
0,7	1,40	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67
0,8	1,70	1,74	1,78	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98	2,02	2,06
0,9	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55
0,10	2,60	2,66	2,72	2,78	2,84	2,91	2,98	3,05	3,13	3,21
1,1	3,30	3,40	3,50	3,61	3,73	3,86	4,00	4,15	4,31	4,49
1,2	4,70	4,93	5,18	5,45	5,64	5,95	6,28	6,63	7,00	7,39
1,3	7,80	8,25	8,80	9,45	10,2	11,0	11,9	13,0	14,3	15,6
1,4	17,0	18,7	20,7	23,0	25,5	29,0	30,5	33,0	35,5	38,0
1,5	40,0	42,7	45,6	48,5	51,5	54,5	57,6	60,7	63,8	66,9
1,6	70	73,5	77,5	81,5	85,5	90,0	94,5	99,0	103,5	108

Tableau (I-11) : Tableau de magnétisation de l'acier magnétique laminé à froid de marque 3413 du stator (le sens de laminage est perpendiculaire au sens des lignes du champ).

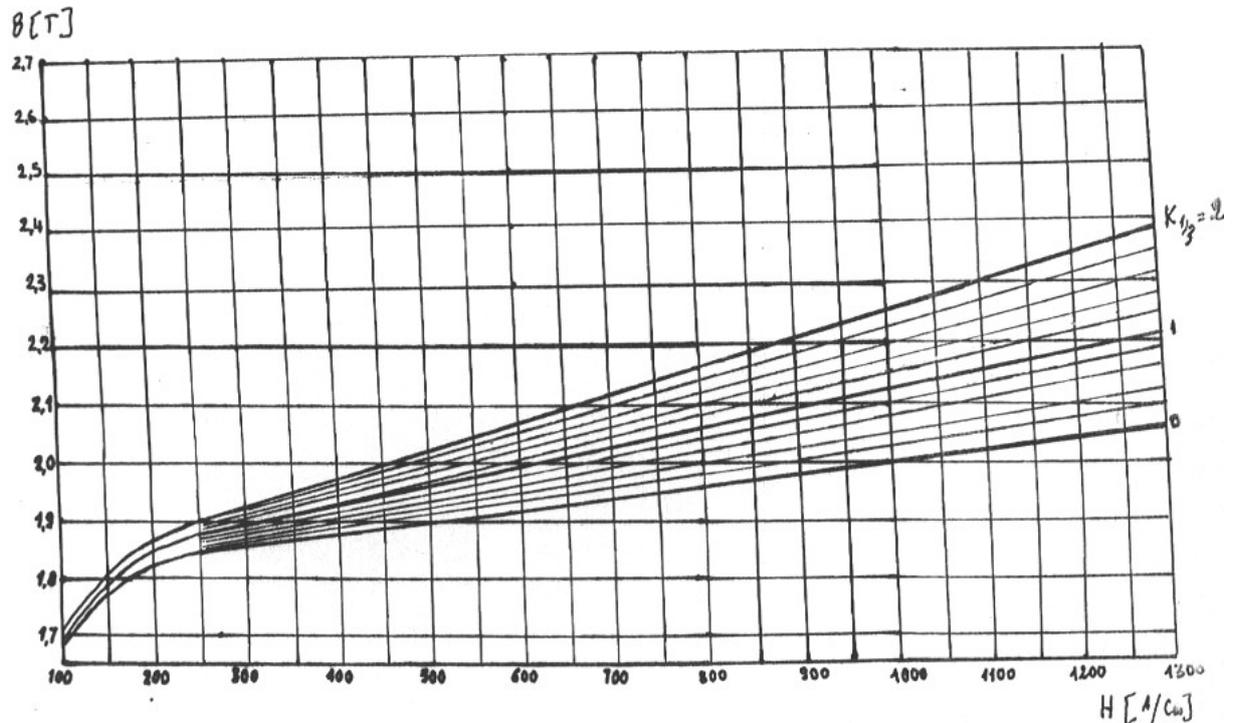


Fig (I-22) : L'intensité du champ magnétique pour les inductions supérieur à 1,8 Tesla en fonction du coefficient $K_{1/3}$.

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H[A/cm]</i>									
0,6	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99
0,7	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,8	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4	1,42	1,44	1,46	1,49
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67	1,70	1,73	1,76	1,79
1,0	1,82	1,85	1,88	1,92	1,95	1,98	2,01	2,04	2,07	2,1
1,1	2,13	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28	2,31	2,34	2,37	2,4
1,2	2,43	2,46	2,49	2,52	2,55	2,58	2,61	2,64	2,67	2,71
1,3	2,75	2,79	2,83	2,87	2,91	2,95	3,0	3,05	3,1	3,15
1,4	3,20	3,26	3,32	3,38	3,44	3,50	3,58	3,66	3,74	3,82
1,5	3,90	4,02	4,14	4,26	4,38	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,6	5,2	5,44	5,66	5,88	6,1	6,32	6,65	6,98	7,32	7,66
1,7	8,0	8,4	8,9	9,4	9,9	10,4	11,32	12,24	13,16	14,08
1,8	15,0	15,92	17,0	19,22	21,44	23,66	25,88	28,2	30,8	34,5
1,9	38,25	42,0	46,0	52,0	58	70	82,0	94	109	134
2,0	160	200	250	300	-	-	-	-	-	-

Tableau (I-12) : Tableau de magnétisation de l'acier magnétique laminé à froid de marque 3413 du stator (le sens de laminage est le même que les sens des lignes du champ).

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H[A/cm]</i>									
0,5	9,0	9,09	9,18	9,27	9,36	9,45	9,54	9,63	9,72	9,81
0,6	9,9	9,99	10,08	10,17	10,26	10,35	10,44	10,53	10,62	10,71
0,7	10,8	10,89	10,98	11,07	11,16	11,25	11,34	11,43	11,52	11,61
0,8	11,7	11,79	11,88	11,97	12,06	12,15	12,24	12,33	12,42	12,51
0,9	12,6	12,69	12,78	12,87	12,96	13,05	13,14	13,23	13,32	13,41
1,0	13,5	13,59	13,68	13,77	13,87	13,95	14,04	14,13	14,22	14,31
1,1	14,4	14,49	14,58	14,67	14,76	14,85	14,94	15,03	15,12	15,21
1,2	15,3	15,48	15,66	15,84	16,02	16,20	16,44	16,68	16,92	17,16
1,3	17,4	17,96	18,52	19,08	19,64	20,20	20,76	21,30	21,88	22,44
1,4	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,3	32,60
1,5	34	35,4	36,8	38,2	39,6	41,0	42,8	44,6	46,4	48,20
1,6	50	53	56	59	62	65	68	71,0	74,0	77,00
1,7	80	83	86	90	94	99	104	109	114	120
1,8	128	135	142	150	160	170	180	200	220	240

Tableau (I-13) : Tableau de magnétisation de l'acier magnétique du rotor.

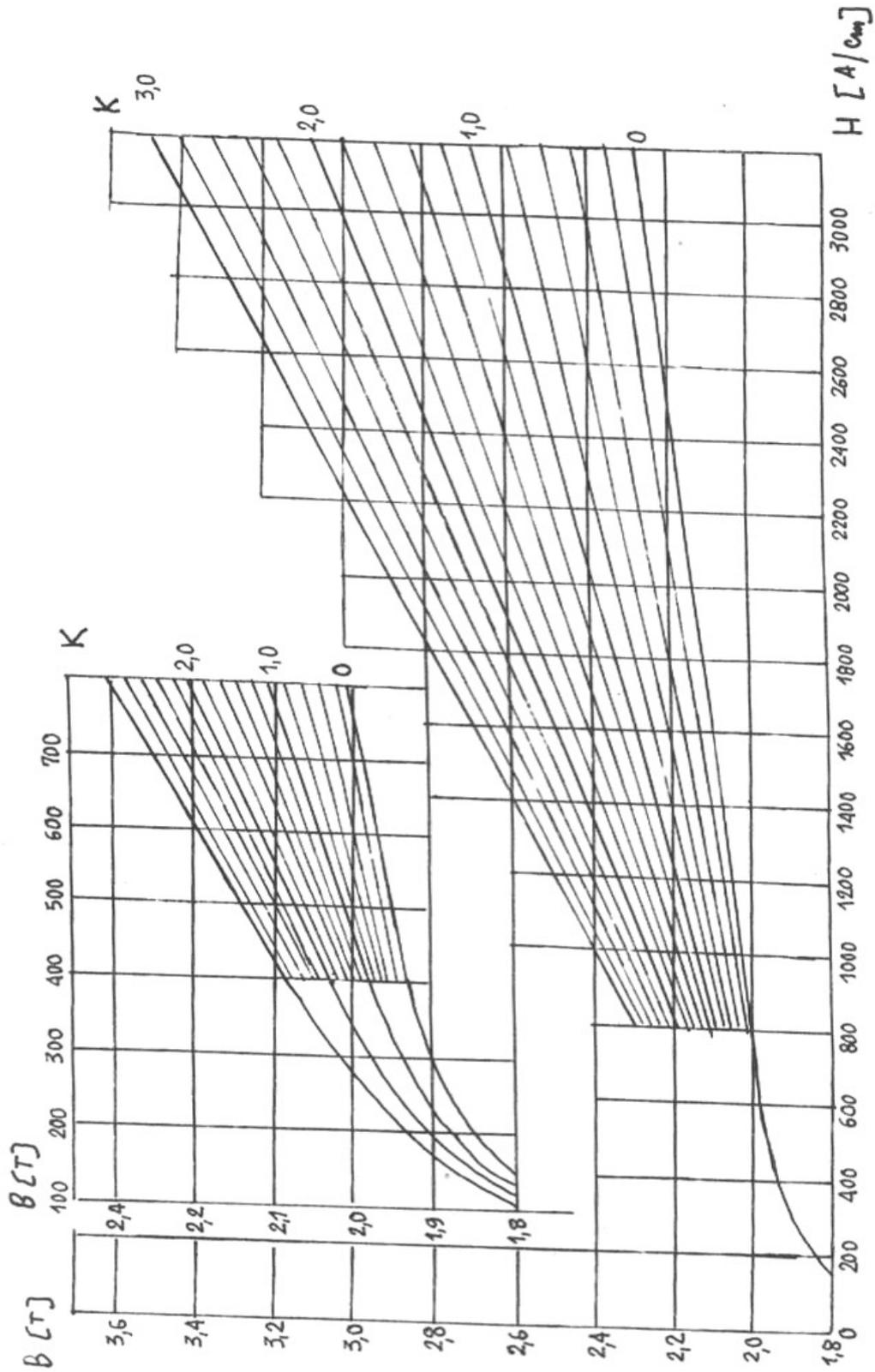


Fig (I-23) : L'induction du champ magnétique de l'acier du rotor pour les inductions supérieures à 1,8 T en fonction des coefficients $K_{0,2}$, $K_{0,7}$ et K_{a2} .

Bibliographie

- [1].A.IVANOV – SMOLENSKY
Machines électriques.
Ed. Mir Moscou 1983.

- [2]. M.FRANCIS MILSANT.
Machines électriques tome III.
Ed. Berti.

- [3]. G. M.KHOTORITSKY.
Elaboration de projet de turboalternateurs.
Ed. Energie atomique LENINGRAD.

- [4]. LOUNIS .M – BADHBOUDA.M.
Construction et exploitation d'un groupe turboalternateur de RAS-DJNET.
Mémoire d'ingénieur. Boumerdès 2002.

- [5].G.M.KHOTORETKI. – M.I.TOKOV – E.B.TOLVENSKAYA
Projection des turboalternateurs.
Ed.Energoatomerzdat.
Leningrad 1987

- [6].Cours de M.T.BELASSEL
Construction des machines [432]

- [7]. Archives de la centrale thermique de RAS-DJNET.