

Usine marémotrice de La Rance : reconstruction des alternateurs

par J. Salvi

SARELEM

I ■ LE GROUPE BULBE

Quelques rappels simples

C'est un ensemble électro-mécanique qui rassemble dans une même coque, ou enceinte étanche, immergée dans un conduit hydraulique, tous les éléments nécessaires à la production d'énergie :

- alternateur avec ses auxiliaires,
- paliers permettant la rotation et le guidage axial,
- accouplements mécaniques, etc...

La forme donnée à l'enceinte, pour favoriser l'écoulement d'eau, rappelle celle d'un bulbe de plante, d'où le nom donné à ce type de groupe.

L'énergie hydraulique est captée par la turbine, placée en dehors de l'enceinte, qui entraîne en rotation l'ensemble de la partie tournante du groupe.

Cette turbine est de type Kaplan à axe horizontal et à pales orientables qui permettent d'ajuster la puissance hydraulique motrice à la demande électrique.

Le groupe bulbe est un générateur de type « basse chute » dont l'énergie hydraulique est surtout produite par le débit et peu par la hauteur. Sa fréquence de rotation est basse, de l'ordre de quelques Hz.

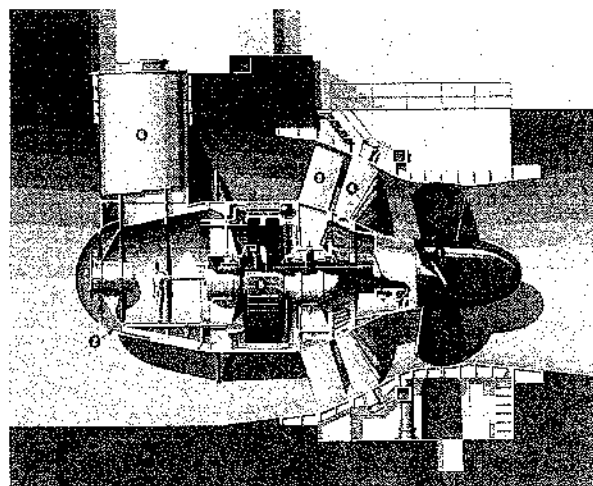
II ■ LES GROUPES BULBES DE L'USINE MARÉMOTRICE DE LA RANCE

L'usine marémotrice de la Rance comporte 24 groupes bulbes de puissance unitaire 10 MVA soit 240 MVA installés.

Ces 24 groupes constituent 6 unités d'exploitation.

L'unité d'exploitation est donc formée d'un « ensemble » de 4 groupes qui fonctionnent simultanément et disposent en commun d'un certain nombre d'organes annexes notamment pour le réglage des turbines et l'excitation des alternateurs.

Chaque unité d'exploitation, ou ensemble, débite sur l'un



Le groupe bulbe de la Rance

- ① Roue motrice : diamètre 5,35 m, vitesse 94 tr/m, 4 pales orientables.
- ② Coque liée au conduit hydraulique par 12 bras (avant-directrices).
- ③ 12 avant-directrices.
- ④ 24 directrices mobiles.
- ⑤ Alternateur.
- ⑥ Accès et sortie des câbles électriques.

des deux primaires du transformateur correspondant. Il existe donc 6 ensembles et 3 transformateurs.

Leurs principales caractéristiques :

- type bulbe à axe horizontal,
- entraînement par turbine Kaplan horizontale à 4 pales à inclinaison variable,
- diamètre de la roue : 5,35 m,
- vitesse de rotation normale de 93, 75 tr/min – survitesse maximale 260 tr/min,

• ventilation en circuit fermé, le fluide de réfrigération étant de l'air surpressé à 2 bars absolus.

Leur fonctionnement particulier :

Les groupes ont un fonctionnement spécifique à l'usine de La Rance, adapté aux problèmes de gestion de l'eau disponible lors des différentes phases de marée.

Ils sont réversibles mécaniquement afin de pouvoir tourner dans un sens ou dans l'autre selon le sens d'écoulement de l'eau.

Ils sont réversibles électriquement afin de pouvoir fonctionner soit en générateur (turbinage) soit en moteur (pompage).

Ils doivent en outre pouvoir servir d'orifice de passage d'eau avec deux sens possibles.

Le point essentiel et particulier du fonctionnement des groupes bulbes de La Rance réside donc dans la **réversibilité du sens de rotation** tant en alternateur qu'en moteur.

Cette réversibilité est un paramètre très important et très influent qu'il faut nécessairement prendre en compte dans la conception des éléments du bulbe et dans la conception des liaisons mécaniques entre ces éléments, en particulier en ce qui concerne les alternateurs/moteurs des groupes.

III ■ LES ALTERNATEURS

Compte tenu de ce qui est dit précédemment, il serait logique, pour être complet, d'écrire « alternateurs/moteurs » puisque la réversibilité du transfert d'énergie existe, et ceci pour deux sens de rotation mais « alternateur » suffira pour la suite de ce résumé car dans les faits, les bulbes de La Rance fonctionnent bien plus souvent en alternateur qu'en moteur avec, pour environ les 2/3 du temps, un écoulement d'eau dans le sens Estuaire → Mer.

3.1 Description générale et quelques dimensions

Ce sont des machines synchrones, ce qui signifie que leur vitesse de rotation est en permanence égale à celle de la vitesse du champ magnétique tournant. Ils sont de type « à pôles saillants ».

La partie fixe de l'alternateur, ou stator, ou induit est constituée d'un circuit magnétique de forme torique en tôle feuilletée équipé d'un bobinage triphasé à barres. Le stator est logé dans la carcasse, celle-ci faisant partie intégrante de l'enceinte du bulbe.

Cet ensemble, composé du stator complet et de la carcasse, a une masse voisine de 35 tonnes.

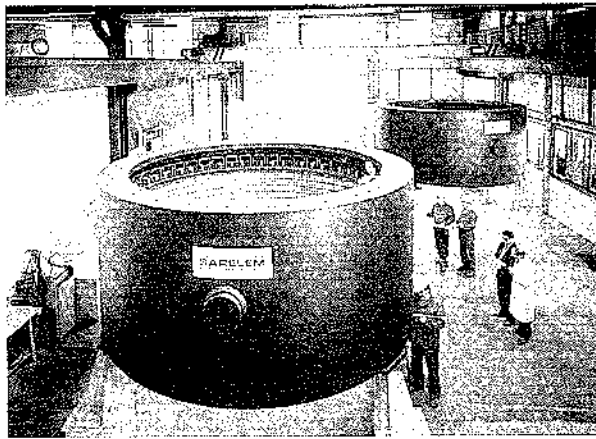
La partie tournante, ou rotor, est un inducteur comportant 64 pôles saillants dont la masse magnétique est équipée d'une bobine inductrice de 8 spires épaisses permettant le passage d'un courant continu d'excitation voisin de 1 150 A.

Les masses polaires, en tôles magnétiques feuilletées, sont fixées à la jante par 8 goujons traversant celle-ci et écrous freinés.

Cet ensemble, composé des pôles inducteurs complets et de la jante, a une masse voisine de 20 tonnes (hors croisillon de l'arbre).

Les dimensions, hors tout, des principaux éléments sont :

Circuit magnétique	
stator	: Ø extérieur = 4 230 mm – Ø alésage = 3 853 mm – Longueur axiale de l'empilage = 935 mm
Carcasse	: Ø extérieur = 4 367 mm – Longueur = 2 000 mm – Epaisseur de la virole = 70 mm environ
Rotor	: Ø extérieur = 3 844 mm – Entrefer = 4,5 mm – Longueur axiale des pôles = 935 mm
Jante	: Ø extérieur = 3 600 mm – Longueur axiale = 1 000.



3.2 Leur principe de refroidissement, évacuation des pertes

La transformation d'énergie, qu'elle soit dans le sens hydraulique → électrique (alternateur) ou dans le sens électrique → mécanique (moteur) ne se fait malheureusement pas sans générer des pertes diverses :

- dans le cuivre,
- dans le fer,
- dans l'air interne (ventilation),
- dans les paliers (frottements) etc...

Ces pertes doivent être évacuées en permanence pour assurer une stabilisation thermique dans les différents composants de l'alternateur à des températures respectant les limites imposées par le cahier des charges.

Comme pour tous les bulbes, l'alternateur des bulbes de La Rance, pour évacuer ses pertes, bénéficie de deux sources de refroidissement distinctes :

- Un circuit d'air de ventilation interne, de type axial, la pression absolue à l'intérieur de l'enceinte étant de 2 bars. Ce circuit d'air est produit par un moto-ventilateur placé dans l'enceinte dans l'axe longitudinal du bulbe dans le nez côté bassin.

L'air frais est propulsé dans le croisillon du rotor, vers le nez côté mer (côté hélice) d'où il est renvoyé vers le moto-ventilateur. Dans ce circuit de retour le débit d'air total se partage en trois débits différents :

- un débit pour le stator passant dans des canaux axiaux situés dans les dents du circuit magnétique,
- un débit dans l'entrefer pour le refroidissement de l'alésage stator et de la surface des pôles inducteurs,
- un débit entre les pôles inducteurs pour refroidir le reste du rotor.

L'air chaud est refroidi par échange thermique dans un échangeur placé sur la paroi du bulbe côté bassin.

- L'eau qui transite dans la conduite forcée du bulbe et qui évacue des pertes par convection forcée dans l'eau à la surface extérieure de la carcasse.

Les caractéristiques nominales sont les suivantes :

Tension aux bornes (UN)	: 3,5 kV
Courant stator nominal (IN)	: 1 650 A
Facteur de puissance (Cos φ N)	: 0,99
Nombre de pôles – Vitesse rotation (VN)	: 64-93, 75 tr/min
Courant rotor au nominal (JN)	: 1 150 A
– en Alternateur	
Puissance apparente nominale aux bornes (SN)	: 10 MVA
Puissance active nominale fournie (PN)	: 9,9 MW
Puissance réactive nominale fournie (QN)	: 1,4 Mvar
– en Moteur	
Puissance mécanique fournie (P'N)	: 10 MW

IV ■ LES ALTERNATEURS EN EXPLOITATION

1966

La réalisation des alternateurs est effectuée par trois constructeurs électromécaniciens :

- Alsthom qui réalise 12 alternateurs, soit la moitié du parc installé.
- Jeumont et SW qui font 6 alternateurs chacun.

1966-1967

Le premier groupe est couplé sur le réseau en août 1966, la mise en service du dernier groupe a lieu en décembre 1967.

1976

Le premier stator doit être reconstruit pour raison principale liée à la détérioration de son circuit magnétique statorique : rupture de clavettes d'empilage, desserrage longitudinal, etc...

1976 à 1982

Tous les stators sont reconstruits pour des raisons liées directement à la détérioration des circuits magnétiques :

- Alsthom reconstruit le premier stator, celui du B5, en 1976.
- LK reconstruit 17 stators entre 1977 et 1982.
- Repelec reconstruit 6 stators entre 1977 et 1984.

1995

Malgré d'importantes améliorations de conceptions et de réalisations apportées lors de la première reconstruction au niveau du circuit magnétique statorique (fixation à la carcasse et serrage longitudinal), les exploitants décident de faire reconstruire à nouveau certains stators.

1995-1996

La Société SARELEM, filiale du groupe Framatome est retenue par E.D.F. pour reconstruire 7 stators et construire 2 stators neufs tous interchangeable. La reconstruction du B5 et celle du premier rechange seront achevées fin 1996.

V ■ LA RÉNOVATION EN COURS DES ALTERNATEURS DE LA RANCE

Les problèmes de fiabilité survenus après la construction initiale et après la première reconstruction des stators, ont pour origine principale le circuit magnétique.

Le mode de fonctionnement particulier et contraignant des groupes de La Rance un facteur prédominant dans le processus d'usure relativement rapide du circuit magnétique et il convient, avec les autres paramètres, de le prendre en considération dans une nouvelle conception et réalisation.

Dans un plan de coupe perpendiculaire à l'axe longitudinal du groupe, on trouve un composant dont le rôle est essentiel dans le circuit magnétique : le secteur élémentaire de tôle magnétique, pièce de base de l'empilage.

Ce secteur est un morceau de tôle en segment angulaire délimité à l'extérieur par un contour globalement cylindrique dans lequel figurent les formes en trapèze destinées à recevoir le clavetage liant le secteur à la carcasse. Son contour intérieur est également cylindrique et correspond au diamètre de l'alsage. Ce contour comporte les encoches destinées à recevoir les barres du bobinage.

Les efforts exercés sur ce secteur dans le plan de coupe :

a) Les groupes de La Rance sont réversibles, ils peuvent tourner dans un sens ou dans l'autre en alternateur et en moteur. Le couple électromagnétique induit des efforts tangentiels sur le diamètre extérieur du secteur. Ces efforts sont repris par le clavetage du secteur sur la carcasse.

Pour éviter des déplacements angulaires du secteur par rapport au clavetage, il faut, compte tenu de la réversibilité des efforts, que le clavetage de fixation soit insensible au sens de rotation, donc au sens des efforts. Cette insensibilité aux efforts alternés doit être obtenue par une conception du clavetage telle que le secteur soit bloqué angulairement en un point de fixation sans jeu.

Sans cette disposition, à chaque changement du sens de rotation, le secteur risquerait de se déplacer angulairement de la valeur du jeu, ce qui finirait par le mater au droit du clavetage, puis il prendrait davantage de jeu par fatigue cumulée etc... jusqu'à se dégrader inexorablement. Le secteur doit donc être calé, sans jeu, angulairement en un point de fixation.

Simultanément, le secteur est soumis à des contraintes thermiques dues à la température. Il doit pouvoir assurer une dilatation angulaire, donc posséder des jeux de montage fonctionnels dans le sens angulaire.

b) Le secteur de tôle magnétique est soumis également aux efforts d'attraction magnétique qui naissent au niveau de l'entrefer par création de pôles magnétiques de signes contraires (Nord-Sud) qui s'attirent. Cet effort radial doit être repris par le clavetage extérieur entre le secteur et la carcasse.

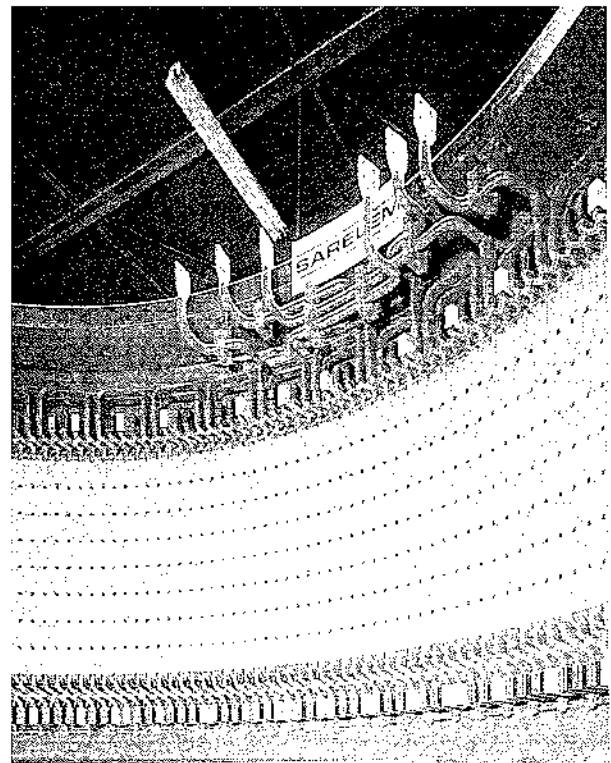
Cet effort est pulsatoire avec une fréquence égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre de pôles.

La fréquence de rotation F_r étant égale à F/p = fréquence du réseau (50 Hz) et p le nombre de paires de pôles inducteurs, la fréquence pulsatoire a donc pour valeur :

$$F_p = F_r \times 2p = 2F \text{ soit } 100 \text{ Hz}$$

L'axe principal du groupe étant horizontal il convient d'ajouter l'effort dû au poids des tôles magnétiques avec le bobinage ramené au clavetage.

c) Dans un plan de coupe longitudinal, le circuit magnétique feuilleté est composé de secteurs empilés coupés dans leur épaisseur. Le nombre de secteurs empilés est proportionnel à la longueur du circuit magnétique.



Sur cet axe longitudinal, le circuit magnétique doit être maintenu serré en permanence, quel que soit le type de fonctionnement, en régime stabilisé ou en régime transitoire (phase d'arrêt ou phase de démarrage).

Le serrage longitudinal permanent doit être assuré par un système suffisamment souple et possédant une bonne élasticité de façon à ce que la dilatation thermique longitudinale du circuit magnétique soit possible en fonctionnement et que celui-ci puisse reprendre sa longueur initiale lors d'un retour à l'état froid après arrêt du groupe.

On dit communément que le circuit magnétique doit être « libre de respirer » sans se desserrer dans le temps.

d) Le circuit magnétique composé de secteurs empilés est soumis axialement aux efforts de dilatation et aux efforts magnétiques. Ces contraintes induisent dans le temps un phénomène de tassement des tôles qui conduit obligatoirement à un desserrage relatif longitudinal de l'empilage.

Il faut donc concevoir à l'origine, un système permettant le resserrage axial éventuel du circuit magnétique en période d'exploitation. La place disponible n'étant pas importante dans un bulbe, il est nécessaire que le système de resserrage puisse permettre physiquement une accessibilité suffisante à l'opération.

Il était donc fondamental que la nouvelle reconstruction des stators soit basée sur une étude technique de conception approfondie et détaillée prenant en compte ces paramètres importants dus aux contraintes de fonctionnement spécifique et contraignant des bulbes de La Rance, ceci principalement pour la partie relative au circuit magnétique et compte tenu des problèmes rencontrés après les constructions précédentes.

Cette nouvelle étude a d'ailleurs débuté par une analyse des conceptions précédentes, retenant ce qui était bon et fiable en l'améliorant par nombre de détails techniques et technologiques.

5.1 Renouveau du circuit magnétique

Pour sa conception générale et ses détails, il s'inspire d'une conception existante dite « à tiges de serrages traversantes ».

Le secteur magnétique élémentaire est en tôle magnétique de faible épaisseur (0,5 mm) laminée à froid dont les caractéristiques sont à cycle d'hystérésis étroit avec un niveau de pertes fer (par hystérésis et courants de Foucault) très bas : 1,1 W/kg à 1 Tesla et 50 Hz.

Ce secteur élémentaire est découpé par matricage en une seule opération à partir d'une bande de tôle en rouleau préalablement isolée sur ses deux faces par un vernis phénolique de classe H. Après matricage, le contour du secteur n'est pas ébavuré afin d'éviter de détériorer l'isolation.

La hauteur de la bavure a une valeur maximum imposée de 2/100° de mm, son contrôle est effectué chez le découpeur.

Le profil extérieur du secteur comporte dans sa partie centrale une découpe en forme de queue d'aronde mâle qui prendra place entre deux clavettes de section trapézoïdale (trapèze rectangle) dites « en marteau », fixées à la carcasse par des vis à tête six pans creux à haute résistance mécanique.

Le profil intérieur du secteur (côté alésage) comporte 8 rainures ou encoches destinées à recevoir les barres du bobinage après empilage.

Lors de l'opération d'empilage, les secteurs sont placés dos à dos, ou à retournement, afin de les placer bavure contre bavure. L'isolation du feuilletage de l'empilage est donc obtenue entre chaque lit élémentaire constitué de deux tôles dos à dos.

À l'empilage, les lits de tôles élémentaires sont décalés de la valeur d'un demi-secteur, soit au demi-recouvrement. Cet enchevêtrement d'un demi-pas de secteur permet d'obtenir une bonne rigidité mécanique du tore magnétique.

Radialement, chaque secteur est donc tenu en son axe médian par deux clavettes trapézoïdales (trapèze rectangle) réglées avant montage pour avoir un serrage important sur la clavette mâle centrale du secteur.

Le circuit magnétique du stator comporte 240 encoches ; il faut donc 30 secteurs de 8 encoches pour effectuer un tour d'empilage. Ce tour nécessite 2 clavettes par secteur, soit au total 60 clavettes par tour.

L'empilage étant au demi-recouvrement, il faut donc au total 2 fois 60 clavettes, soit 120 clavettes pour l'ensemble de l'empilage. Chaque paire de clavettes tenant un secteur est donc espacée régulièrement angulairement de 3°.

Le réglage des clavettes dans l'espace doit donc être parfait (tolérance dans chaque dimension maximum admise 1/10° de mm) afin d'obtenir un tore magnétique possédant des jeux fonctionnels internes égaux et réguliers de l'ordre de 3/10° de mm. Ces jeux autoriseront les mouvements normaux du circuit magnétique soumis aux efforts liés aux contraintes de fonctionnement : mécaniques, magnétiques et thermiques.

54 000 secteurs élémentaires seront empilés dans la carcasse pour constituer le circuit magnétique.

Outre le contour extérieur avec clavettes et le contour intérieur avec denture, chaque secteur comporte des découpes supplémentaires :

- 4 trous dans la couronne pour passage des tiges de serrage axial (tiges traversantes),
- 16 trous en forme de boutonnière (2 par dents) pour permettre le passage de l'air de ventilation.

5.1.1 Dispositif de serrage axial du circuit magnétique

Il est du type à tiges traversantes, l'effort de serrage étant réparti sur les faces du tore par des plaques de serrage, ou pavés. Chaque tige de serrage est placée dans un tube en matériau isolant afin d'éviter des courants de circulation et des pertes supplémentaires dans les tiges dues au passage du champ magnétique tournant.

Outre les tiges, l'ensemble du système de serrage est isolé électriquement du circuit magnétique, par un système de rondelles isolantes placées entre les écrous de serrage.

Chaque secteur magnétique comporte 4 tiges de serrage soit au total $4 \times 30 = 120$ tiges de serrage, pour l'ensemble du tore, avec un dispositif isolant pour chaque tige.

Un dispositif particulier et original, prévu pour chaque tige, permet de reporter, côté mer (côté opposé aux connexions du bobinage) le point d'appui sur les pavés de serrage à l'extérieur du bobinage afin de faciliter l'accessibilité pour resserrage éventuel en cours d'exploitation, l'outillage nécessaire à cette opération étant fourni avec le stator.

5.1.2 Les tiges de serrage axiales du circuit magnétique

Elles sont réalisées dans un acier nickel-chrome, à haute résistance mécanique, étiré à froid $Re \geq 700$ MPa. Chaque extrémité comporte un filetage à pas fin réalisé par molétagage afin d'éviter de couper les fibres du métal.

Ce filetage formé et non usiné est conique extérieurement (pente 6%) afin de faire travailler tous les filets en prise sur l'écrou de la même façon contrairement à un filetage cylindrique dont la probabilité est de faire travailler davantage les premiers filets en prise que les derniers.

5.1.3 Les pavés de serrage

Ils sont réalisés dans un alliage d'aluminium (PORTAL) à caractéristiques mécaniques comparables à celles d'un acier

E 36. Le pavé est obtenu par usinage dans la masse en CN. Chaque pavé comporte 4 encoches ; il faut donc 60 pavés par côté de tore, soit 120 pavés pour l'ensemble du circuit magnétique.

5.1.4 Montage du circuit magnétique - Aspect technique et technologique

Les opérations de réglage et de fixation des clavettes, de réglages au démarrage du circuit magnétique, de montage du circuit magnétique avec passages intermédiaires maintenus jusqu'à la fin de l'opération nécessitent un nombre de détails technologiques importants spécifiques aux reconstruc-teurs qui font l'objet principal de l'exposé.

Tous ces détails ne peuvent être repris dans un résumé. Il en est de même pour les opérations de serrage final par tension des tiges de serrage, à l'aide d'un système actif par vérins creux, après l'essai de magnétisation.

5.1.5 Le comportement de l'empilage pendant les phases de fonctionnement

Les contraintes essentielles qui agissent sur le circuit magnétique sont importantes pendant les phases transitoires : au démarrage et à l'arrêt du groupe.

Elles influent, par fatigue cumulée, sur la tenue dans le temps du circuit magnétique. Certains phénomènes ne sont pas totalement compensés par l'aspect conception. Il en est ainsi du phénomène de tassement axial relatif du circuit magnétique dû aux contraintes magnétiques et thermiques agissant pendant le fonctionnement. Pour cela, SARELEM a imaginé un système de resserrage original accessible permettant de reprendre le resserrage des circuits magnétiques en exploitation.

5.2 Le nouveau bobinage

Conçu pour les 240 encoches du circuit magnétique, le bobinage est du type « ondulé à barres ». Son couplage est réalisé en triphasé - étoile - série.

Il est à deux faisceaux ou barres par encoche soit 480 barres pour l'ensemble du bobinage monté.

Chaque barre est composée de brins de cuivre électrolytique de section rectangulaire formés et tressés entre eux pour assurer une compensation de champ transversal d'encoche selon procédé Roebel.

L'isolation des barres est réalisée avec un ruban micacé posé par enrubannage continu sur machine automatique. Le mur isolant de masse obtenu est ensuite imprégné en cuve sous vide poussé avec une résine Epoxy de classe électrothermique F.

La polymérisation de la résine est réalisée en étuve pilotée selon un cycle de température contrôlé, les barres étant montées dans un outillage de conformation rigide.

En finition, avant essais diélectriques, la partie droite des barres est recouverte d'un vernis conducteur permettant d'obtenir une électrode de masse de bonne qualité destinée à éviter le phénomène de décharges partielles dans les encoches.

Un vernis semi-conducteur autorise l'écoulement des charges électriques, naissant dans les développantes, vers l'électrode de masse.

Le calage radial d'encoches est réalisé par un procédé spécial avec calage souple appelé « Ripple Spring » agissant comme un ressort précontraint.

La précontrainte est obtenue par un écrasement de 80 % du ressort à l'aide de deux demi-cales biaisées.

Ce système de précontrainte sur les barres dans l'encoche, permet d'éviter le desserrage du calage dû au tassement dans le temps des éléments composant les barres qui sont soumises aux efforts électro-dynamiques créés par le champ transversal d'encoches.