

**EDF**

**Direction des Etudes et Recherches**

**Electricité  
de France**

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION  
Département Acoustique et Mécanique Vibratoire

# Matériel électrique, transport et distribution d'énergie

MODELISATION D'UNE CAGE DE DEVELOPPANTES  
D'ALTERNATEUR

*MODEL OF A GENERATOR ENDWINDING CAGE*

**VOL 27 N° 17**

**95NR00003**

Diffusion : J.-M. Lecœuvre  
EDF-DER  
Service IPN. Département SID  
1, avenue du Général-de-Gaulle  
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1995

ISSN 1161-0581

VOL 27 N° 17



**EDF**

**Direction des Etudes et Recherches**

**Electricité  
de France**

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION  
Département Acoustique et Mécanique Vibratoire

**Gestion INIS**

Doc. enreg. le : 7/3/94  
N° TRN : FR 96 264  
Destination : I.I+D.D

Septembre 1994

LEGER A. C.  
FANTON J. P.  
DAVIES C.

**MODELISATION D'UNE CAGE DE  
DEVELOPPANTES D'ALTERNATEUR**

***MODEL OF A GENERATOR ENDWINDING CAGE***

Pages : 00013

95NR00003

Diffusion : J.-M. Lecœuvre  
EDF-DER  
Service IPN. Département SID  
1, avenue du Général-de-Gaule  
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1995

ISSN 1161-0581

## **SYNTHÈSE :**

Ce document présente des études menées sur la caractérisation vibratoire de structures mécaniques particulières dites cages de développantes de stator d'alternateur constituées par les extrémités des enroulements induits. Le problème de leur bonne tenue mécanique est essentiel car elles sont soumises à des efforts électromagnétiques importants durant les différents régimes électriques subis en exploitation. Le concepteur (GEC-Alsthom) et l'exploitant (EDF) ont procédé chacun à des calculs numériques pour caractériser une machine, sur un cas donné d'alternateur bipolaire 600 MW, calculs qu'il a paru intéressant de comparer.

Les modélisations réalisées respectivement par GEC-Alsthom et EDF font appel à des techniques et à des hypothèses différentes. GEC-Alsthom modélise les ensembles barres et cales par des plaques dont les propriétés sont déterminées par un préprocesseur. Le modèle est simplifié par utilisation des diverses symétries. Il tire aussi parti de l'expérience acquise et vise une exploitation rapide. Le calcul EDF tend à permettre ultérieurement un calcul chaîné complet, depuis les efforts électromagnétiques jusqu'à la détermination des contraintes locales. L'ensemble des éléments constitutifs de la structure est modélisé par des poutres, ce qui conduit à un modèle de dimension importante (21 000 ddl).

La validation effectuée sur les deux modèles a porté sur la comparaison entre leurs résultats ainsi que sur la comparaison avec les résultats expérimentaux. Chacun des modèles fournit des valeurs pour les premières fréquences propres et les déformées associées. Parmi celles-ci, on trouve d'une part des modes de poutre (longitudinaux), et d'autre part des modes intéressant la section, et comportant différents extrema ou lobes. Si, sur le plan du comportement effectif en service d'une machine bipolaire, seuls les modes à deux lobes sont significatifs car excités par la rotation du champ inducteur, c'est en fait l'ensemble des modes observés qui est intéressant dans une optique de recalage extérieur d'un modèle mécanique complet.

Une exploitation des modèles constitués a été effectuée sous forme d'étude paramétrique. Les éléments paramétrés ont été principalement des raideurs et les conditions aux limites. On a ainsi pu parvenir aux observations suivantes :

- les conditions aux limites ont une influence majeure sur les modes ;
- les caractéristiques des développantes sont critiques et doivent être bien connues ;
- les calages tangentiels ont une influence plus marquée que le calage entre plans ;
- l'influence des cercles de connexion se manifeste principalement en termes de masse ajoutée.

Plus généralement, les calculs paramétriques effectués par GEC-Alsthom et EDF ont montré un bon accord dans une majorité de cas.

LEGER A. C., FANTON J. P., \* DAVIES CH.

\* GEC-ALSTHOM

## EXECUTIVE SUMMARY :

This document presents some studies concerning the vibratory characterization of particular structures called : generator endwinding cages. These structures are mainly made up of the endings of armature windings. The question of their good mechanical behaviour is of prime importance, since they are submitted to high electromagnetic efforts during the different electrical ratings encountered during operation. The designer (GEC-Alsthom) and the user (EDF) have both undertaken numerical calculations in order to characterize a given machine, in this case a 600 MW bipolar generator ; it appeared interesting to compare such calculations.

The models realized respectively by GEC-Alsthom and EDF make use of different techniques and hypotheses. GEC-Alsthom represents the sets of rods and spacers by plates, which properties are determined by a pre-processor. The model is simplified to take into account the existing symmetries. It takes profit of previous experience and aims at a fast utilisation. The EDF model tends to allow a further comprehensive calculation, from the electromagnetic efforts to the determination of local stresses. The whole set of the constituting elements of the structure is modelled by beams, which leads to an important size for the model (21 000 degrees of freedom).

The validation performed on the two models has been focused on the comparison between respective results and also with experimental results. Each model provides values for the first eigenfrequencies and the associated modes shapes. Among these, one finds on the one hand longitudinal beam modes, and on the other hand, section modes having several extrema or lobes. If, on the aspect of the actual behaviour of a two pole machine, only the two lobe modes are significant, since excited by the rotation of the induction field, the whole set of observed modes is interesting in the scope of further model adjustment for a comprehensive model.

The models created have been utilised in the framework of a parametric study. The elements taken as parameters have been mainly stiffnesses and boundary conditions. One has thus been able to realize such observations :

- the boundary conditions have a major influence on modes ;
- the characteristics of end windings are critical and must be well known ;
- the tangential spacers have a more significant influence than the spacing between planes ;
- the influence of the connection circles appears mainly in terms of added mass.

More generally, the parametric calculations made by GEC-Alsthom and EDF have exhibited a good agreement in a majority of cases.

## SOMMAIRE

1. Introduction .....	6
2. Description de la structure.....	6
3. Choix des techniques de modélisation et hypothèses retenues.....	7
4. Validation des modèles.....	8
4.1. Comparaison des modes calculés et des modes mesurés .....	8
4.2. Recalage numérique.....	9
5. Exploitation du modèle sous forme d'étude paramétrique.....	9
6. Conclusion et perspectives.....	10
7. Références .....	10

## 1. Introduction

Certains constituants des stators des grands alternateurs de centrales électriques constituent des éléments sensibles de la conception mécanique des machines. Il s'agit notamment des parties en extrémité des enroulements, extérieures au circuit magnétique, dites : cages de développantes. Ces structures sont complexes, ne serait-ce que par leur géométrie et par la diversité des matériaux mis en jeu. Par ailleurs, elles sont soumises à des efforts électromagnétiques importants, en régime permanent et aussi en régime électrique accidentel. Leur bonne tenue dans le temps est un impératif pour la sécurité et la continuité de service en exploitation des alternateurs.

Constructeurs et utilisateurs de ces machines sont donc naturellement intéressés par une bonne connaissance du comportement vibratoire des cages de développantes. La modélisation numérique est dans cette optique une approche difficile mais intéressante de cette connaissance ; elle l'est d'autant plus si l'on veut disposer de calculs prédictifs avant fabrication. Ainsi, le constructeur GEC-Alsthom a développé un logiciel de calcul permettant de déterminer les modes propres de cette structure. Ce programme est utilisé tant pour chiffrer les effets des évolutions apportées sur une structure donnée, que pour prédimensionner les structures neuves.

A EDF, un programme d'étude pluriannuel a été mis en place sur ce sujet. Il s'agit principalement de caractériser la structure sur le plan modal, puis d'évaluer sa réponse aux différentes sollicitations envisageables, afin d'établir si possible des critères quantitatifs pour sa surveillance en marche. Dans le cadre de ce programme, un premier cas d'application a été étudié sur le plan modal.

L'objet du présent document est de présenter les méthodes mises en oeuvre dans la démarche générale par GEC-Alsthom et EDF, ainsi que les résultats respectifs obtenus pour le même cas d'application.

## 2. Description de la structure

L'enroulement stator est formé de deux plans de barres constituées d'un ensemble de conducteurs élémentaires en cuivre assemblés et transposés suivant le procédé Roebel. Ces deux plans sont nécessaires pour constituer les bobines de l'enroulement qui se referment dans les têtes de bobine.

Les têtes de bobine des enroulements de l'induit (extrémités en dehors du circuit magnétique) sont réparties sur deux troncs de cône (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> plans) de telle sorte que la distance entre deux conducteurs voisins d'un même plan reste constante. Ceci implique que les extrémités des barres aient une forme de développantes de cercles projetées sur un cône. On appelle donc ces extrémités de barres : 'développantes'.

Pour que les développantes soient à même de supporter les efforts induits lors du fonctionnement de la machine, la structure est renforcée par deux cages : extérieure et intérieure. La figure 1 indique les différents composants de la structure.

La cage extérieure comprend des supports radiaux (plaques en verre epoxy) fixés au plateau de serrage (et donc au circuit magnétique) au moyen de supports élastiques. Ceci permet aux développantes de se déplacer (sous l'influence des dilatations thermiques dans la partie droite du fer). Des anneaux de soutènement sont logés dans les supports radiaux. Les barres s'appuient sur ces anneaux par l'intermédiaire d'anneaux de feutre. Les barres sont calées entre elles dans le sens radial par d'autres anneaux de feutre au droit des anneaux de soutènement.

La cage intérieure est formée de deux anneaux de soutènement liés axialement par des liaisons rigides dites crocodiles. Anneaux et crocodiles s'appuient sur les développantes par l'intermédiaire d'un matelas conformable d'anneaux de feutre.

Les supports radiaux et crocodiles sont uniformément répartis sur la circonférence.

Entre les barres d'un même plan sont intercalés des calages tangentiels (en feutre ou verre epoxy) qui donnent un effet de voûte à la structure.

### **3. Choix des techniques de modélisation et hypothèses retenues**

L'objectif de la modélisation, pour le constructeur GEC-Alsthom, est la détermination des modes propres de la structure en vue de dimensionner les différents composants. Pour ce faire, la structure est modélisée en éléments finis et le calcul réalisé à l'aide du logiciel SAP 5. La symétrie de révolution de la structure autorise la modélisation d'une demi-structure. Pour faciliter l'utilisation du calcul, un préprocesseur a été développé pour créer directement le maillage à partir des données géométriques et mécaniques, lancer le calcul et sortir les résultats. L'originalité du programme réside dans la modélisation des systèmes barres - cales par des plaques, aussi bien dans le sens radial que tangential simulant les propriétés du système réel. Ces propriétés sont déterminées par le préprocesseur. Les autres composants (à part les supports radiaux modélisés en plaques), tels que les anneaux de soutènement, sont modélisés par des éléments poutre.

Des conditions limites correspondant aux symétries sont imposées aux sections de coupe, et les barres sont bloquées au niveau de la sortie du fer. Les supports radiaux ne sont pas bloqués au niveau du circuit magnétique, mais peuvent l'être au moyen d'éléments 'ressorts' modélisant les supports élastiques.

Ce système de modélisation permet de simplifier le maillage (un modèle est constitué de 1000 noeuds environ) et rend le processus de calcul plus rapide d'utilisation.

La modélisation effectuée par EDF vise à permettre dans son stade final un calcul par chaînage, depuis la détermination des efforts électromagnétiques, en fonction des régimes, jusqu'à la réponse vibratoire de la structure, voire la détermination de contraintes mécaniques

locales. Le calcul déjà effectué a été partiel puisqu'il a simplement porté sur une analyse modale numérique. Le maillage est réalisé avec le mailleur IDEAS. On fait appel, pour le calcul, de la manière la plus réaliste possible, aux différentes possibilités du code d'éléments finis d'EDF, qui est le code ASTER.

On a choisi de modéliser les développantes par des éléments de poutres (figure 2). La modélisation avec des éléments de poutres des plans de développantes permet de maîtriser davantage de paramètres que la modélisation par des coques. De plus, elle facilite l'obtention des réponses vibratoires au niveau de chaque développante. En revanche, elle part de l'hypothèse simplificatrice qui consiste à considérer les développantes, et surtout les calages tangentiels, comme des structures filaires.

Les anneaux de soutènement, les crocodiles et les cercles de connexion sont représentés également par des éléments de poutre. Enfin les supports radiaux et les calages entre les deux plans de développantes sont modélisés par des éléments de coque. Le modèle obtenu comprend environ 4000 mailles et 3500 noeuds, soit un total de 21000 ddls. En ce qui concerne les conditions aux limites, les barres sont bloquées en sortie de fer et des ressorts modélisent la liaison entre le support radial et le circuit magnétique par les supports élastiques.

La structure présente une répétitivité cyclique autour de son axe. On envisage donc, afin de réduire le temps de calcul de la réponse aux efforts, de modéliser la structure par sous-structuration ; dans ce cas, seul un secteur est modélisé ; une base modale calculée sur ce seul secteur est utilisée pour restituer la base modale de la structure complète par superposition modale.

L'une des principales difficultés rencontrées dans la modélisation consiste en l'affectation de conditions aux limites correctes. Il s'agit des conditions de liaison au circuit magnétique supposé fixe. Une autre difficulté réside dans la bonne connaissance du comportement des matériaux, surtout de certains calages et dans la représentation de ces calages.

## **4. Validation des modèles**

### **4.1. Comparaison des modes calculés et des modes mesurés**

Le calcul des premiers modes de la structure fournit les fréquences propres et les déformées correspondantes. Les déformées sont des modes de poutre (basculement de l'ensemble de la structure) et des modes de coque de révolution configurant deux, trois, quatre... extréma de vibration, dits "lobes". Parmi ces modes, une sélection est à opérer ; en effet, dans le cas de machines bipolaires, seuls les modes à deux lobes sont effectivement sollicités en service. Dans le cas de machines quadripolaires, il s'agit des modes à quatre lobes. La figure 3 est une visualisation de modes mesurés pour une machine typique.



Fort d'une expérience acquise au cours des années, le constructeur a comparé les modes propres calculés et mesurés pour de nombreuses machines de différents types. La comparaison des résultats est faite surtout pour les modes globaux excitables, les autres modes étant considérés d'importance secondaire et n'ayant pas d'influence néfaste sur le comportement de la machine. L'agrandissement continu de la banque de données (mesures et calculs) permet d'améliorer constamment les hypothèses prises par le préprocesseur et donc les précisions de calcul.

EDF utilise tous les modes calculés pour recalibrer le modèle avec les modes identifiés expérimentalement sur la structure réelle par analyse modale. On présente dans le tableau 1 les écarts en fréquence obtenus entre les modes calculés et les modes mesurés dans le cas d'application considéré. Il est constaté que les modes calculés correspondent dans leur ordre d'apparition aux modes mesurés. Les différences de valeurs sont faibles pour les premiers modes mais deviennent plus importantes pour les modes les plus élevés. Les différences entre GEC-Alsthom et EDF proviennent des méthodes de validation utilisées et du résultat final recherché. Le constructeur est plus précis sur les modes excitables (dans ce cas les modes à 2 lobes) mais moins sur les autres modes que l'EDF.

La comparaison des déformées réelles/calculées a porté pour le moment sur l'identification du mode : on s'est attaché à reconnaître les modes à deux, trois... lobes, sans contrôler la cohérence exacte des déformées obtenues. Pour une comparaison plus fine, la mise en oeuvre de la méthode matricielle MAC (Modal Assurance Criterion) permettra de chiffrer la cohérence obtenue entre calcul et essais. La matrice du MAC est composée des produits scalaires normalisés entre chaque vecteur modal mesuré et chaque vecteur modal calculé. Un MAC proche de 1 indique une bonne coïncidence entre les deux modes comparés.

#### **4.2. Recalage numérique**

Pour améliorer la qualité du modèle, un outil numérique de recalage basé sur une méthode énergétique, MADMACS, sera utilisé. Ce programme identifie, par optimisation aux moindres carrés, les coefficients correcteurs à affecter aux paramètres structuraux (masse volumique, module d'Young...). L'usage d'un tel outil est cependant délicat, en particulier sur un modèle ayant une telle diversité de paramètres. Il faut donc veiller à ce que toute modification du modèle reste physiquement cohérente.

#### **5. Exploitation du modèle sous forme d'étude paramétrique**

Une première étude paramétrique a été réalisée sur le modèle. On a fait varier des paramètres de raideur, ainsi que la représentation des conditions aux limites. Cette étude met en évidence la sensibilité de certains facteurs physiques, ainsi que les éléments critiques de la structure vis-

à-vis de l'optimisation éventuelle du comportement vibratoire. On présente dans le Tableau 2 certains résultats caractéristiques. Il ressort de cette étude les points suivants :

- les conditions aux limites ont un rôle très important sur les modes
- les caractéristiques des développantes doivent être connues précisément
- les calages tangentiels influent davantage sur le comportement modal de la structure que les calages entre plans. Ce point est utilisé par le constructeur pour améliorer la conception des machines.
- l'ajout des cercles de connexion apporte globalement davantage de masse que de raideur et a donc tendance à diminuer les fréquences propres.
- la masse des boîtes à eau (extrémités des développantes) a une influence importante sur les premiers modes. En effet, même si la masse de ces pièces est faible, une petite imprécision provoque des variations importantes dans les résultats.

Les études sur l'influence des paramètres effectuées en parallèle par les deux sociétés sont en accord dans la plupart des cas, à l'exception de l'étude sur la rigidité des barres où il s'avère que le modèle d'EDF est beaucoup plus sensible que celui de GEC-Alsthom. Les retours d'expérience ont permis au constructeur de vérifier l'influence d'un certain nombre de ces paramètres (cercles de connexion, calages radiaux et tangentiels).

## 6. Conclusion et perspectives

Deux modélisations d'une cage de développante d'alternateur, basées sur des principes différents, ont été présentées dans cet article. Des calculs de modes propres ont été effectués sur ces deux modèles ainsi que des études paramétriques, permettant une première comparaison. Une comparaison plus fine des deux modèles est envisagée afin de permettre une amélioration des modélisations utilisées. Par ailleurs, une étude analogue sur des machines de puissances différentes devrait être également riche d'enseignements. Le modèle validé pour chaque machine sera ensuite exploité pour des calculs de réponse aux efforts électromagnétiques et éventuellement pour une optimisation du comportement vibratoire.

## 7. Références

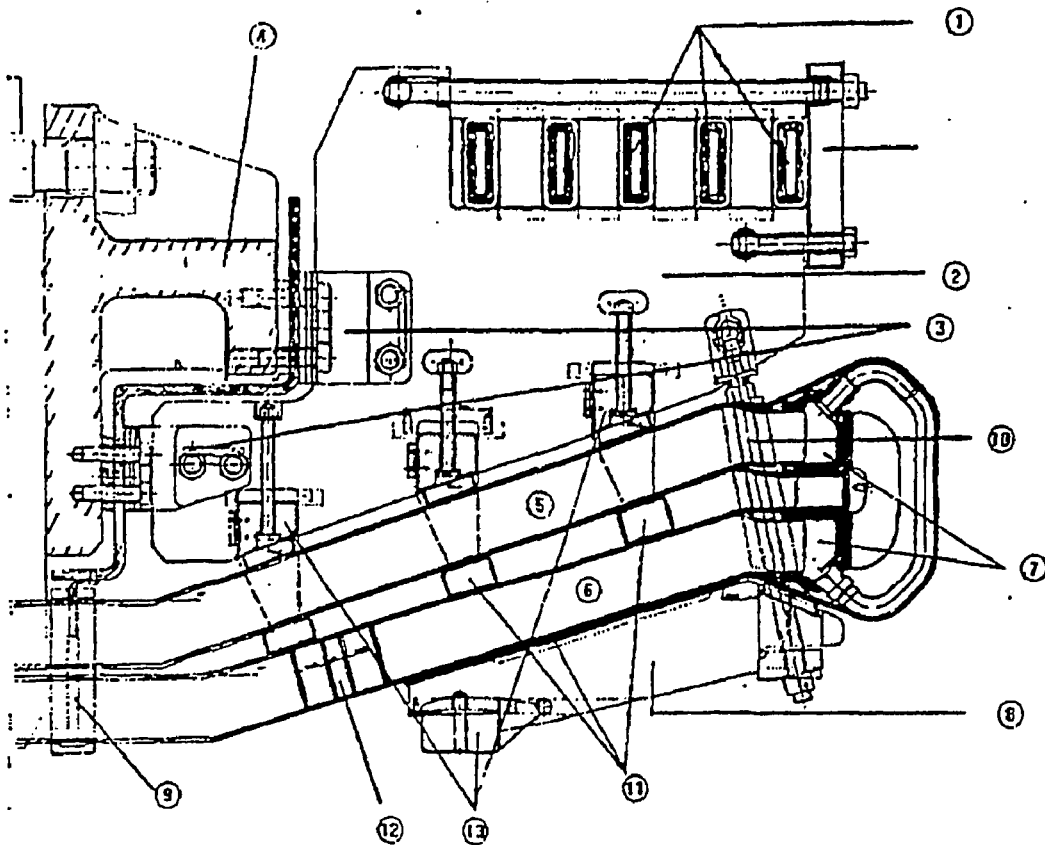
- [1] SZYLOWICZ N. *"Etude bibliographique du comportement vibratoire des extrémités d'alternateur"* Rapport interne EDF-DER n° HM11/93.0222
- [2] POTTER S., THOMAS G.D. *"Calculating vibrations and stresses of large electrical machine stator endwindings for both steady load and transient conditions"* IEEE Electrical Machines Design and Applications, 1982
- [3] GOUYET H. *"Rapport d'expertise sur les méthodologies de caractérisation modale des cages de développantes"* Rapport interne EDF-DER n° HP64/93211

**Tableau 1 :** Ecarts en fréquence entre modes calculés et mesurés  
Differences in frequency between calculated and measured vibrational modes

MODES	F <sub>modèle</sub> - F <sub>mesure</sub> (Hz)	
	<i>Alsthom</i>	<i>EDF</i>
Basculement	-1	-4
2 lobes	0	0
3 lobes	+24	+12
2 lobes intérieur	+9	+19
4 lobes	+34	+11

**Tableau 2 :** Etude paramétrique : évolution des fréquences propres calculées (%)  
Parametric study : relative change in calculated natural frequencies (%)

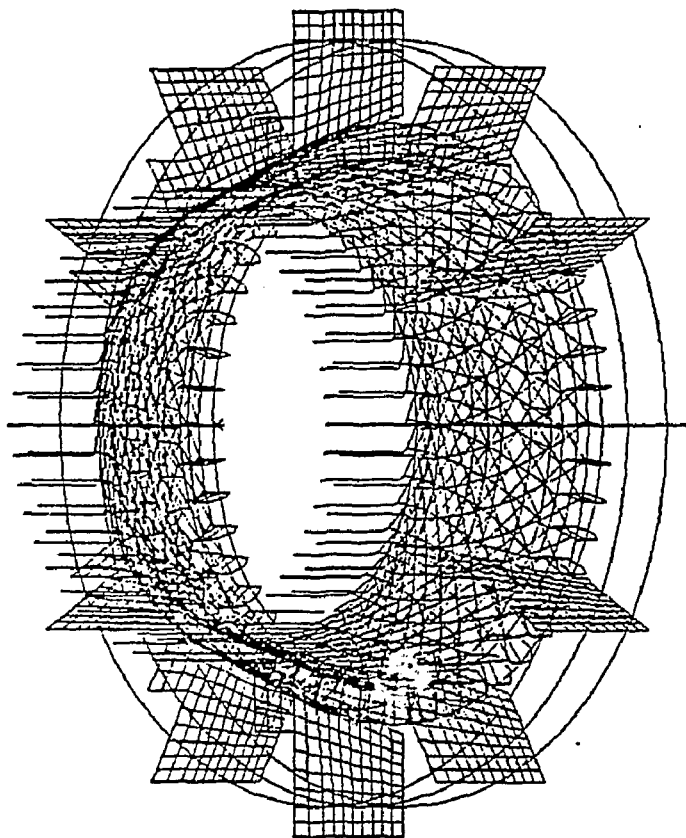
	basculement		2 lobes		3 lobes		4 lobes	
	EDF	Alsth.	EDF	Alsth.	EDF	Alsth.	EDF	Alsth.
E (développantes) * 10	+92	+55	+91	+36	+94	+26	+101	+8
E (cales entre plans) * 10	+4	+2	+8	+5	+7	+6	+11	+6
E (cales tangentielles) * 10	+17	+20	+23	+14	+26	+13	+30	+8
Raideur (liaison au circuit au niveau des plaques) * 20	+35		+21		+4		+2	
Masse des boîtes à eau *3		-12		-15		-13		-5
Ajout des cercles de connexion	-7	-4	-5	-2	-7	-6	-8	-10



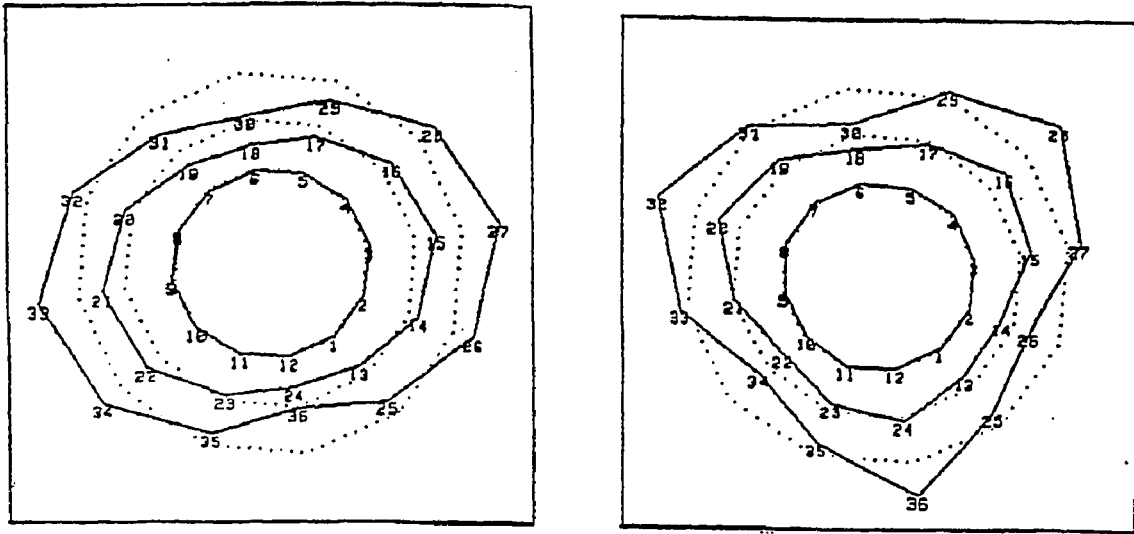
**Figure 1 : Soutènement des développantes d'enroulement stator des turboalternateurs**  
 1.Cercles de connexion, 2.Support radial, 3.Support élastique (dilatatable), 4.Plateau de serrage,  
 5.Barre fond d'encoche, 6.Barre d'entrefer, 7.Boîte à eau, 8.Support d'entrefer 'Crocodiles',  
 9.Calage triconique de sortie de fer, 10.Calage triconique des chignons, 11.Calage(anneau de  
 feutre), 12.Calage tangentiel (vue de coupe), 13.Anneau de soutènement

**Generator stator endwinding structure**

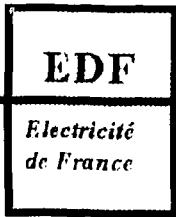
1.Parallel rings, 2.Radial brace, 3.Flex plate, 4.Clamping plate, 5.Bar far from bore, 6.Bar near  
 bore, 7.Water box, 8.Support beams, 9.Tapered wedging at the core end, 10.Tapered wedging  
 at the winding heads, 11.Radial packing, 12.Tangential packing, 13.Support ring



**Figure 2 :** Maillage numérique de la cage de développantes  
Numerical mesh of endwinding cage



**Figure 3 :** Modes de vibration des développantes mesurés : mode à "deux lobes" et à "trois lobes"  
**Endwinding vibrational modes : 2-lobe modes and 3-lobe modes**



*Direction des Etudes  
et Recherches*

*Service Information  
Prospective et Normalisation*

CLAMART Le 17/01/96

*Département Systèmes d'information  
et de documentation*

*Groupe Exploitation  
de la Documentation Automatisée*

1. avenue du Gal de Gaulle  
92141 CLAMART Cedex  
tel : 47 65 56 33

CEA  
MIST/SBDS/SPRI  
CENTRE DE SACLAY  
  
91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

à l'attention de :

## MEMOIRE TECHNIQUE ELECTRONIQUE

\*\*\*\*\*  
Cette feuille est détachable grâce à la microperforation sur le coté droit.  
\*\*\*\*\*

Référence de la demande : **F558888**  
Origine : **CATALOGUE DES NOTES DER**

Votre commande :

Numéro du document : **95NR00003**

**Titre : MODELISATION D'UNE CAGE DE DEVELOPPANTES D'ALTERNATEUR**

**Auteurs : LEGER A. C./FANTON J. P./DAVIES C.**

**Source : COLL. NOTES INTERNES DER. MATERIEL ELECTRIQUE, TRANSPORT ET DIST**  
**Serial :**

**Référence du document : SANS**

**Nombre de pages: 0001**

**Nombre d'exemplaires : 001**

**Support : P**