

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 122 (1996)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Calcul dynamique des appuis des groupes de l'usine de Bieudron  
**Autor:** Droz, Patrice / Altinakar, Mustafa  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-78827>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 08.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Calcul dynamique des appuis des groupes de l'usine de Bieudron

Par Patrice Droz,  
ing. civil EPFL-SIA,  
D ès sc. tech.,  
Bonnard & Gardel  
(Valais),  
rue de Condémines 3,  
1950 Sion  
et Mustafa Altinakar,  
ing. civil SIA,  
D ès sc. tech.,  
Bonnard & Gardel,  
av. de Cour 61,  
1007 Lausanne

## 1. Introduction

L'usine souterraine de Bieudron, actuellement en construction, fait partie du projet Cleuson-Dixence dont l'objectif est de doubler la puissance de l'aménagement hydro-électrique existant. Les maîtres de cet ouvrage sont les sociétés EOS Energie de l'Ouest Suisse SA et Grande Dixence SA, cette dernière ayant pour actionnaires EOS (60 %), les Forces Motrices Bernoises (13,33 %), IWB (Canton de Bâle-Ville, 13,33 %) et NOK (Forces Motrices du Nord-Est, 13,33 %).

Les trois groupes verticaux de l'usine, d'une puissance de 423 MW chacun, s'appuient sur les structures du génie civil au niveau de deux paliers de guidage:

- les appuis du palier inférieur reprennent la quasi totalité des efforts verticaux, et une partie des efforts horizontaux;
- les appuis du palier supérieur reprennent essentiellement les efforts horizontaux.

Lors de la conception de ces groupes, des hypothèses ont été formulées quant à la rigidité des appuis offerts par les structures du génie civil et à leur réponse dynamique. Au stade des études d'exécution, il convenait de vérifier ces hypothèses, et de proposer d'éventuelles modifications propres à offrir aux groupes des appuis adaptés à leur conception et aux calculs sur lesquels ils sont basés. Bien entendu, une telle étude n'a pu être entreprise qu'en collaboration avec le constructeur des machines, ABB, et celui des turbines, GCD (consortium regroupant les sociétés Sulzer-Hydro et Hydro-Vevey). Utilisant leurs propres modèles de calcul, ces deux constructeurs ont fourni les informations nécessaires à la réalisation de cette étude.

## 2. Etude des appuis du palier supérieur

L'étude des appuis du palier supérieur consiste à vérifier la rigidité de la structure du génie civil proposée au stade du projet définitif, et, le cas échéant, à modifier celle-

ci afin de garantir des déplacements compatibles avec les tolérances imposées par le constructeur des équipements électromécaniques.

### 2.1 Tolérance sur la souplesse des appuis supérieurs

Compte tenu des impératifs d'implantation souterraine et de la conception générale des machines, une architecture compacte à deux paliers de guidage a été choisie (fig. 1). Une telle disposition influence bien entendu les caractéristiques dynamiques de la machine, en particulier la première vitesse critique de l'arbre (première fréquence propre de l'arbre, celle-ci correspondant à un mode de flexion). Un des facteurs intervenant dans le calcul de cette vitesse critique est la souplesse des paliers supérieurs et inférieurs dont la valeur limite, a été fixée par le concepteur à 0,7 mm/MN pour des raisons constructives.

Les efforts provenant du palier inférieur sont repris par un ensemble mécano-soudé dont la rigidité est garantie par le constructeur. Ceux provenant du palier supérieur sont repris par une structure métallique constituée de six bras pouvant transmettre traction et compression à la structure en béton armé. Compte tenu des rigidités des différentes parties composant le palier (appui de la fondation en béton armé, structures métalliques, palier, films d'huile, etc.), la souplesse au niveau des appuis contre la structure du génie civil doit être inférieure à 0,1050 mm/MN.

### 2.2 Description de la structure

Les groupes sont placés dans des structures en béton armé indépendantes les unes des autres. Au niveau supérieur (491,95), celles-ci sont constituées d'une dalle de 25 m de long dans l'axe de la caverne et de 24,40 m dans sa largeur (fig. 2) pour une épaisseur totale de 90 cm. Cette dalle est percée de deux orifices rectangulaires (trappe d'escalier et trappe de passage des turbines Pelton) et d'un orifice

circulaire de 10,90 m de diamètre : la fosse du groupe. Les parois de cette fosse ont, au stade du projet définitif une épaisseur de 80 cm. A 1,50 m sous le niveau de la dalle supérieure, la fosse du groupe présente une ouverture rectangulaire pour permettre le passage des barres blindées.

Les bords de la dalle supérieure reposent sur des murs en béton armé de 50 cm d'épaisseur. Contre le rocher, ces murs suivent le profil d'excavation et de soutènement. Ceux situés entre deux groupes sont verticaux et séparés par un joint de dilatation.

Les murs, qui forment un cadre, et la fosse, qui constitue le noyau central, s'appuient au niveau 483,15 sur une fondation épaisse en béton armé. Une dalle intermédiaire de 70 cm d'épaisseur totale est située au niveau 486,55.

### 2.3 Modèle géométrique

Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été introduites ; on retiendra notamment que :

- chaque groupe est indépendant des autres. Ainsi le groupe 3, dont la structure donne sur la place de montage et dont le mur vertical correspond à une épaisseur de 1 m, présente une rigidité supérieure à celle du groupe 2. Il en va de même pour le groupe 1, situé au fond de l'usine. C'est donc le groupe 2 qui, offrant la configuration la plus défavorable, a été modélisé;
- pour cette étude de rigidité, compte tenu de la position de la dalle intermédiaire et de l'inclinaison des murs latéraux contre le rocher sous cette dalle, il est raisonnable de considérer que celle-ci correspond à un niveau fixe sur lequel les murs latéraux et la paroi de la fosse s'encastrent;
- l'interstice qui pourrait se créer entre le mur en béton armé et le soutènement en béton projeté conduit à négliger l'appui de ce mur contre le soutènement. En effet, le problème étudié

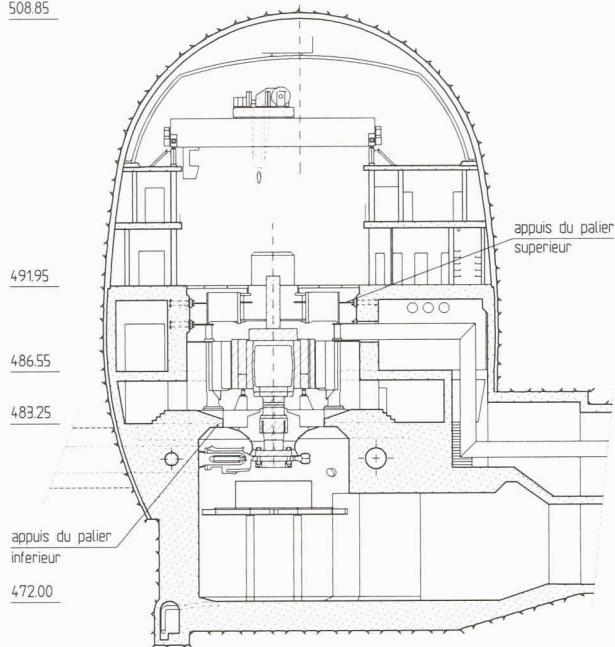


Fig. 1. - Coupe transversale de la caverne de l'usine de Bieudron, à l'axe d'un des trois groupes de 423 MW

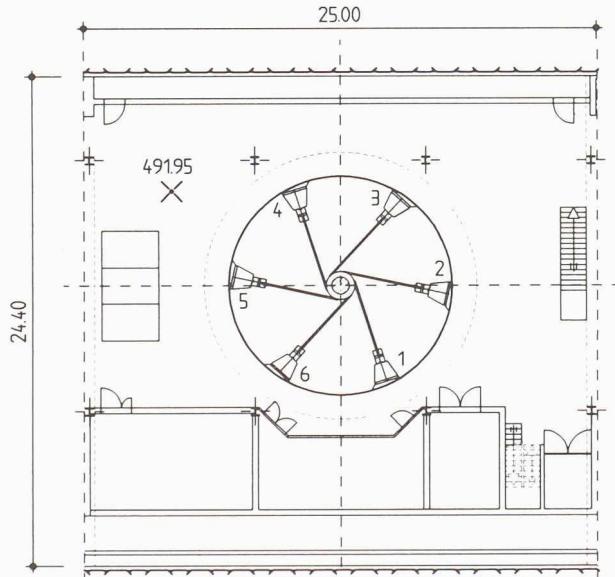


Fig. 2. - Vue en plan de la salle des machines, niveau 491,95; disposition des appuis du palier supérieur

concerne les très petits déplacements si bien qu'il est fort probable que l'appui contre le béton projeté et le rocher ne puisse être totalement mobilisé. Une telle hypothèse, du côté de la sécurité, sera vérifiée dans les calculs.

#### 2.4 Caractéristiques du béton

Les caractéristiques du béton ont été déterminées sur la base de l'étude des bétons et des granulats réalisé par le Laboratoire des Matériaux de construction de l'EPFL. Le module d'élasticité du béton à 28 jours est estimé à 25 000 N/mm<sup>2</sup>.

Afin de tenir compte du caractère dynamique des forces transitaires pour lesquelles les déformations sont étudiées, on admet un module d'élasticité légèrement plus élevé:  $E = 28\,000 \text{ N/mm}^2$ . Les plaques d'appui qui permettent l'introduction des forces provenant des bras métalliques, et dont la souplesse a déjà été considérée dans le calcul de tolérance exposé plus haut, sont considérées comme parfaitement rigides.

#### 2.5 Modèle numérique

Les éléments utilisés pour modéliser la structure en béton sont des éléments isoparamétriques linéaires tridimensionnels. Ils représentent correctement les champs de déformation et de contrainte susceptibles de se développer au voisinage des appuis, pour autant que le maillage soit suffisamment fin.

Par contre, afin de reproduire au mieux les effets de flexion dans les murs du cylindre et du pourtour, ainsi que dans la dalle supérieure, il est nécessaire de prévoir quatre éléments dans l'épaisseur des structures modélisées, ce qui entraîne une multiplication du nombre d'éléments (fig. 3).

Cette solution est néanmoins préférable à celle qui consiste à considérer des éléments de coque

épaisse pour lesquels les nœuds sont placés sur le plan médian de la structure à modéliser. Le nombre de degrés de liberté nécessaires (six par nœud) est proche de celui du modèle constitué d'éléments linéaires tridimensionnels, et les zones des appuis, où les déformations et les contraintes sont concentrées, sont moins finement représentées.

#### 2.6 Résultats

Pour chaque appui particulier, l'application d'une force radiale de 1MN provoque les déplacements indiqués dans le tableau 1.

Les déplacements de tous les appuis sont supérieurs à la limite fixée précédemment. L'appui qui présente le plus grand déplacement, soit 0,1370 mm/MN, est celui dans le prolongement duquel se situe la trappe d'introduction de la roue Pelton du groupe adjacent. La rigidité de la structure est donc moindre dans cette direction.

L'examen des maillages déformés sous l'effet de la force radiale s'appliquant sur chacun des appuis montre que la déformation est très locale. Il est donc nécessaire de modifier la géométrie de la structure afin d'augmenter la rigidité de celle-ci en accroissant l'épaisseur du mur du cylindre des fosses. Par ailleurs, ce calcul a été repris

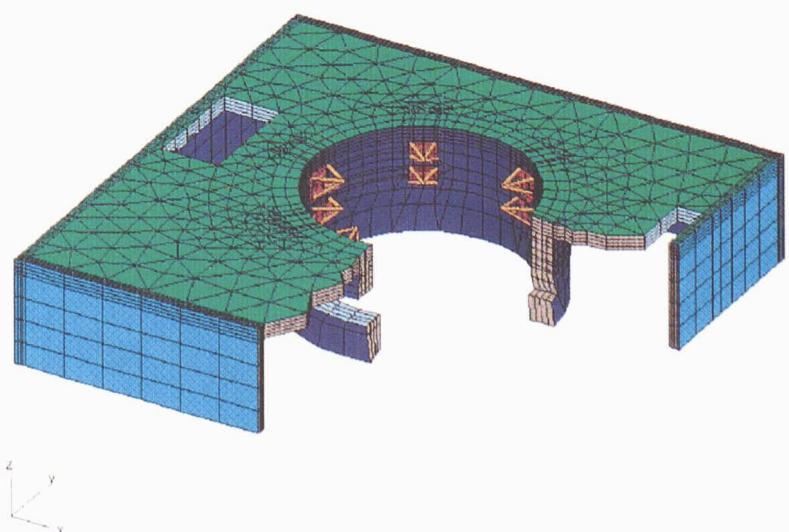


Fig. 3. - Modélisation par éléments finis de la structure du génie civil pour le calcul de la rigidité des appuis du palier supérieur

Tableau 1 - Déplacements sous application d'une force radiale de 1 MN

| Déplacement | Appui 1 | Appui 2 | Appui 3 | Appui 4 | Appui 5 | Appui 6 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| [mm/MN]     | 0,1228  | 0,1273  | 0,1242  | 0,1176  | 0,1370  | 0,1241  |

Tableau 2 - Déplacements pour une épaisseur de mur de 1,2 m

| Déplacement | Appui 1 | Appui 2 | Appui 3 | Appui 4 | Appui 5 | Appui 6 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| [mm/MN]     | 0,0889  | 0,0954  | 0,0917  | 0,0880  | 0,1021  | 0,0897  |

en considérant une liaison parfaitement rigide entre les bords de la dalle en contact avec le béton projeté du soutènement et ce dernier. La très faible différence des déplacements obtenus au niveau des appuis prouve le peu d'influence de cette condition de bord.

Pour une épaisseur de 1,20 m des murs du cylindre de la fosse du groupe, toutes choses restant égales par ailleurs, on obtient les résultats reproduits dans le tableau 2.

Les déplacements spécifiques de chacun des appuis sont inférieurs à la valeur limite. Ces résultats, ainsi que ceux obtenus par des calculs intermédiaires, montrent l'importance relative de la rigidité du cylindre des fosses et celle du reste de la structure. On peut calculer qu'au niveau des appuis, 70 % de la rigidité provient du cylindre des fosses, et 30 % de la dalle et des murs latéraux. Cette constatation confirme :

- la faible importance relative des éventuels appuis contre le rocher;
- le bien fondé de l'augmentation de la rigidité du cylindre des fosses par l'accroissement de son épaisseur à 1,20 m, plutôt que du renforcement de la dalle et des murs latéraux.

### 3. Calcul dynamique

La seconde phase de l'étude, consacrée au calcul des fréquences propres et à l'analyse harmonique du système, vise à répondre aux questions suivantes :

- le fonctionnement des groupes peut-il provoquer des phénomènes de résonance, en régime normal ou lors d'incidents ?
- quelle est l'ampleur des phénomènes vibratoires autour des

premières fréquences propres de l'ensemble ?

Alors que la vitesse de rotation de l'arbre, en fonctionnement normal est de 428 t/min (7,1 Hz), la zone souhaitable de la première vitesse critique du groupe est d'environ 600 t/min (10 Hz); elle se situe entre la vitesse de délestage, après déclenchement du groupe (500 t/min ou 8,3 Hz), et la vitesse d'emballlement (800 t/min ou 13,3 Hz). Selon les informations du constructeur, en cas d'emballlement, le passage par la vitesse critique se fait rapidement. En revanche, lors du ralentissement, ce passage dure plus longtemps et il convient d'éviter toute résonance. L'étude porte tout d'abord sur le calcul des premières fréquences propres des structures d'appui du génie civil (GC) d'une part, et de l'équipement électromécanique (EM) seul d'autre part. Ensuite, le modèle de l'équipement EM est combiné avec celui des structures d'appui GC pour calculer les fréquences propres de l'ensemble EM + GC. Enfin, l'analyse de la réponse harmonique dans la gamme de fréquences concernée est effectuée afin de calculer les déplacements maximaux des appuis en fonction de la fréquence d'une force tournante appliquée au centre de l'arbre, au niveau du palier supérieur.

#### 3.1 Description de l'équipement électromécanique

L'équipement électromécanique est représenté à la fig. 1. Totalisant 531 t, le poids de l'ensemble de la

partie tournante est transmis, par l'intermédiaire du palier supérieur, à une structure métallique s'appuyant au niveau 484,08 et supportant également le stator. Ce dernier ne s'appuyant toutefois pas sur la structure d'appui supérieure, il ne figure pas dans le modèle considéré ci-après.

Le guidage latéral de la partie tournante est assuré par les paliers supérieur et inférieur, dont chacun présente une souplesse totale donnée pour laquelle deux valeurs sont envisagées :

- 0,7 mm/MN, soit la valeur retenue pour l'étude des appuis du palier supérieur;
- 0,615 mm/MN, soit la valeur apparemment réalisable.

Rappelons que la souplesse au niveau du palier correspond à la somme des déplacements spécifiques dus au film d'huile, aux bras et aux supports du palier, aux appuis et à la structure du génie civil.

#### 3.2 Modèles géométriques et numériques

##### a) Structure du génie civil

Afin de représenter les éventuels modes de flexion de la dalle intermédiaire, le modèle géométrique de la structure est étendu : la base des murs latéraux et celle du cylindre de la fosse sont admises comme étant encastrées au niveau 483,15.

La structure en béton armé est modélisée au moyen d'éléments de « coque spatiale » (fig. 4).

##### b) Equipements

###### électromécaniques

La partie tournante (arbre, rotor, et turbine) est représentée par une masse ponctuelle de 531 t placée sur une poutre flexible. La longueur de la poutre cylindrique est de 7,80 m, soit la distance entre les paliers supérieur et inférieur. La poutre modélisée a les caractéristiques de « l'arbre Laval » qui pré-

Tableau 3 - Valeurs propres des fréquences selon Givens

| Souplesse des paliers | 0,7 mm/MN  | 0,615 mm/MN |
|-----------------------|------------|-------------|
| Première fréquence    | 9,573 Hz   | 9,990 Hz    |
| Deuxième fréquence    | (16,34 Hz) | (17,05 Hz)  |

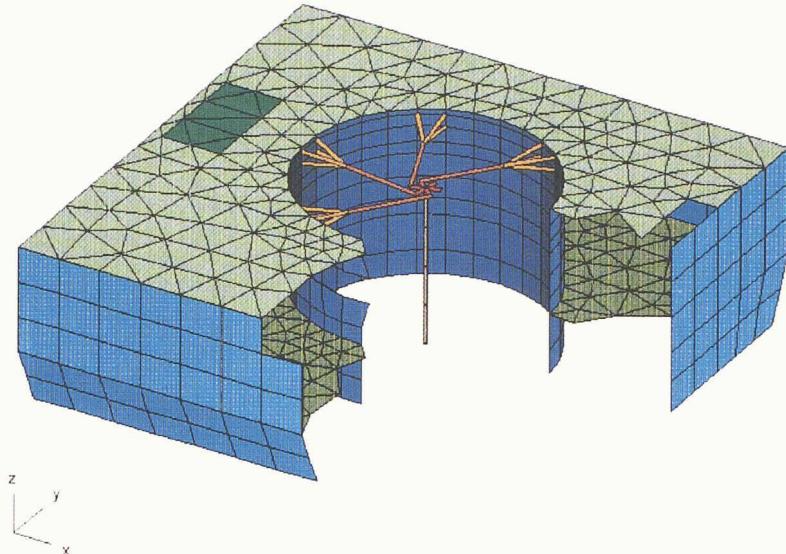


Fig. 4. - Modélisation par éléments finis de la structure du génie civil pour les calculs dynamiques

sente la même première fréquence propre de flexion que la partie tournante réelle (en considérant des appuis rigides) :

$$f_{Laval} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/M} = 16,72 \text{ Hz}$$

d'où le diamètre fictif de l'arbre de 1,540 m (données fournies par les constructeurs).

Les efforts provenant des paliers sont transmis à la structure du génie civil par des éléments barres dont la section est déterminée en fonction de la souplesse totale considérée au niveau du palier. Enfin, la partie tournante étant suspendue au niveau du palier supérieur, la poutre qui la modélise est également fixée verticalement à cet endroit.

Le modèle comporte au total 1260 éléments, coques spatiales, poutres et barres confondues. Le nombre total de noeuds est de 900, avec six degrés de liberté à chaque noeud. On a ainsi affaire à un problème dynamique dont le modèle numérique est relativement important.

### 3.3 Calculs des fréquences propres

#### a) Calcul de la première fréquence propre des structures du génie civil

Le nombre de degrés de liberté du modèle de la structure GC seule est élevé; il convient de recourir à la méthode des «sous-espaces» de Lanczos pour déterminer les fréquences propres et leurs modes. Cette méthode est bien adaptée aux grands systèmes dont on cherche les premières fréquences propres.

Les premiers modes obtenus, pour des fréquences de l'ordre de 19 à 20 Hz, sont des modes de vibration locaux des dalles et des murs. Les premières fréquences dont les modes font intervenir l'ensemble de la structure apparaissent à 24 Hz (leurs coefficients de participation modale sont nettement supérieurs à ceux des modes précédents). On observe deux modes «parents», l'un montrant un déplacement d'ensemble dans l'axe de l'usine et l'autre perpendiculairement.

Les fréquences propres de la structure GC sont relativement élevées en raison de sa rigidité importante.

#### b) Calcul de la première fréquence propre de l'équipement électromécanique

Le calcul de la première fréquence propre de l'équipement EM seul est effectué en considérant deux valeurs de souplesse au niveau des paliers, soit 0,7 mm/MN pour le premier cas et 0,615 mm/MN pour le second.

Le modèle EM seul comportant peu de degrés de liberté, la mé-

thode d'extraction des valeurs propres de Givens a pu être appliquée, livrant les résultats reproduits dans le tableau 3.

Les valeurs de la première fréquence propre sont en accord avec les résultats obtenus par les constructeurs des machines. Le mode propre de vibration qui est associé à la fréquence fondamentale est un mode de flexion.

La deuxième fréquence est également mentionnée à titre d'information (valeur indiquée entre parenthèses). Le modèle numérique utilisé ne permet pas de prendre en compte le moment gyroscopique de la partie tournante de la machine; or le deuxième mode propre est un mode de basculement de l'ensemble EM. Le moment gyroscopique «augmente» la rigidité structurelle, si bien que la valeur de la deuxième fréquence propre est fortement influencée par la rotation. Tenant compte de cet effet, la deuxième fréquence propre atteint une valeur de l'ordre de 23 Hz (communication GCD).

#### c) Calcul des premières fréquences de l'ensemble EM+GC

Après avoir combiné les deux modèles (EM et GC), le comportement de l'ensemble sous charges statiques est vérifié, entre autres en comparant les déplacements avec ceux obtenus lors de l'étude de rigidité, le calcul des fréquences propres étant ensuite effectué par la méthode des sous-espaces de Lanczos. les résultats obtenus sont reproduits dans le tableau 4.

Tableau 4 - Premières fréquences de l'ensemble EM + GC

| Fréquences | Souplesse des paliers |             |
|------------|-----------------------|-------------|
|            | 0,7 mm/MN             | 0,615 mm/MN |
| 1          | 9,569 Hz              | 9,983 Hz    |
| 2          | 9,572 Hz              | 9,987 Hz    |
| 3          | (16,281 Hz)           | (16,970 Hz) |
| 4          | (16,284 Hz)           | (16,972 Hz) |
| 5          | 19,900 Hz             | 19,123 Hz   |
| 6          | 19,984 Hz             | 19,903 Hz   |

Tableau 5 - Déplacements maximaux au droit des appuis

| Souplesse des paliers | 0,7 mm/MN  | 0,615 mm/MN |
|-----------------------|------------|-------------|
| Déplacements max.     | 0,30 mm/MN | 0,32 mm/MN  |

Tableau 6 - Valeurs maximales des déplacements au niveau des appuis

| Déplacement max.<br>au niveau appuis [mm]   | Intensité<br>[MN] (*) | Fréquence [Hz] | Souplesse palier<br>0,7 mm/MN | Souplesse palier<br>0,615 mm/MN |
|---|-----------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Régime normal                               | 0,110                 | 7,14 (*)       | 0,01                          | 0,01                            |
| Double mise à terre<br>vitesse délestage    | 0,647                 | 8,33 (*)       | 0,07                          | 0,06                            |
| Balourd normal et<br>vitesse critique       | 0,053                 | 9,57<br>9,98   | 0,02                          | 0,02                            |
| Balourd anormal (**) et<br>vitesse critique | 0,201                 | 9,57<br>9,98   | 0,060                         | 0,064                           |

(\*): valeurs communiquées par ABB

(\*\*): 70 kg à 2 m

Un exemple de déformée modale est donné à la figure 5. Les résultats et l'étude de celles-ci appellent les commentaires suivants :

- comme pour la structure GC, on obtient, pour chacune des plages de fréquences, deux fréquences propres très voisines, l'une correspondant à une déformation dans le plan longitudinal de la caverne et l'autre dans le plan transversal. L'existence de fréquences « parenthèses » est due à la légère dissymétrie de la structure GC ;
- dans chacun des cas, les deux premiers groupes de fréquences présentent des valeurs très proches de celles calculées avec le modèle de l'équipement EM seul. Cela prouve qu'il y a découplage dynamique entre les parties EM et GC ;
- comme pour le calcul des fréquences de l'équipement EM seul, le deuxième groupe de fréquences (valeurs indiquées entre parenthèses), correspond à un basculement de la partie tournante. L'effet gyroscopique est alors déterminant : ces fréquences calculées en tenant compte de l'effet de la rotation de la partie tournante atteignent des valeurs proches de 23 Hz (communication GCD) ;
- dans chacun des cas, les fréquences 5 et 6 sont celles qui correspondent aux modes fondamentaux de vibration de la structure GC seule, soit environ 20 Hz. Ces fréquences apparaissent bien au-delà des premières fréquences propres de l'équipement EM.

En conclusion, ces calculs mettent en évidence qu'il n'a pas d'influence

ence dynamique réciproque entre l'équipement EM et la structure GC. Les deux systèmes sont dé-couplés et l'on vérifie que leurs fréquences fondamentales sont très éloignées l'une de l'autre. De plus, la fréquence fondamentale de la structure GC est située au-delà de la plage de fréquence d'excitation de la machine tournante. Ainsi, en régime normal ou lors d'incidents, le fonctionnement des groupes ne devrait pas engendrer de phénomènes de résonance de la structure d'appui.

### 3.4 Analyse harmonique

Lorsque le groupe est en service, ou en cas d'incident, la structure peut être soumise à des sollicitations périodiques de diverses fréquences. Or le calcul des fréquences propres abordé dans le chapitre précédent ne donne pas d'informations sur l'amplitude des déplacements aux divers endroits de la structure, en particulier au droit des appuis. C'est l'analyse harmonique qui permet de calculer ces paramètres et d'en déduire les facteurs d'amplification dynamique correspondant aux fréquences des sollicitations rencontrées, celles-ci allant de la marche normale à l'emballage. L'analyse harmonique consiste à rechercher une solution particulière des équations différentielles qui reflètent l'état permanent d'un système soumis à une sollicitation sinusoïdale, loin des conditions initiales. La solution permanente est aussi sinusoïdale, de même fréquence que celle de l'excitation, sans déphasage si l'amortissement est nul. Dans le cas présent, les calculs ont été faits pour une force unitaire

tournante appliquée au centre de l'arbre au niveau du palier supérieur.

Toute structure réelle présente une certaine capacité de dissipation d'énergie (amortissement). Plutôt que d'imposer un amortissement global (par exemple 3 % de l'amortissement critique) qui s'appliquerait sur l'ensemble EM + GC, il semble plus réaliste de considérer un amortissement ponctuel au niveau des deux paliers de l'arbre. La valeur retenue, soit  $2,10^6$  Ns/m, tient compte de l'amortissement engendré au niveau de chaque appui par l'équipement EM d'une part et la structure GC d'autre part.

Les résultats de l'analyse harmonique, apparaissent sous forme graphique (exemple de la fig. 6). Ces graphiques montrent l'amplitude maximale des déplacements selon l'une ou l'autre des composantes, en fonction de la fréquence de la force tournante excitatrice. Les fréquences comprises entre 2,5 et 14 Hz sont balayées avec un pas de 0,5 Hz, pas que l'on réduit autour des fréquences propres identifiées précédemment. La vitesse d'emballage étant de 800 t/min, soit 13,3 Hz, l'analyse harmonique au-delà de cette fréquence n'est pas nécessaire; de plus, il conviendrait de tenir compte de l'effet gyroscopique à l'approche des fréquences propres d'ordre supérieur à 1.

Pour les six appuis et jusqu'à la première fréquence propre, on observe une lente augmentation des déplacements maximaux à partir des valeurs correspondant à un chargement statique des appuis. Un pic apparaît à la première fré-

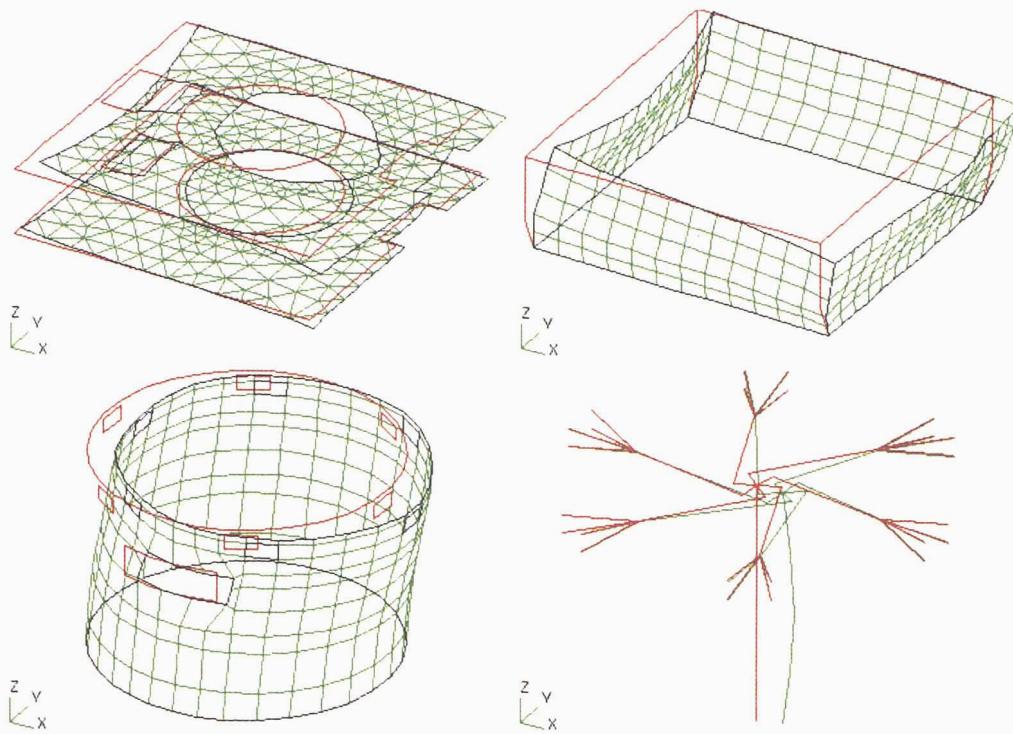


Fig. 5. - Déformée modale correspondant à la première fréquence propre de l'ensemble constitué par l'équipement électromécanique et la structure d'appui du génie civil (vues éclatées des différents composants)

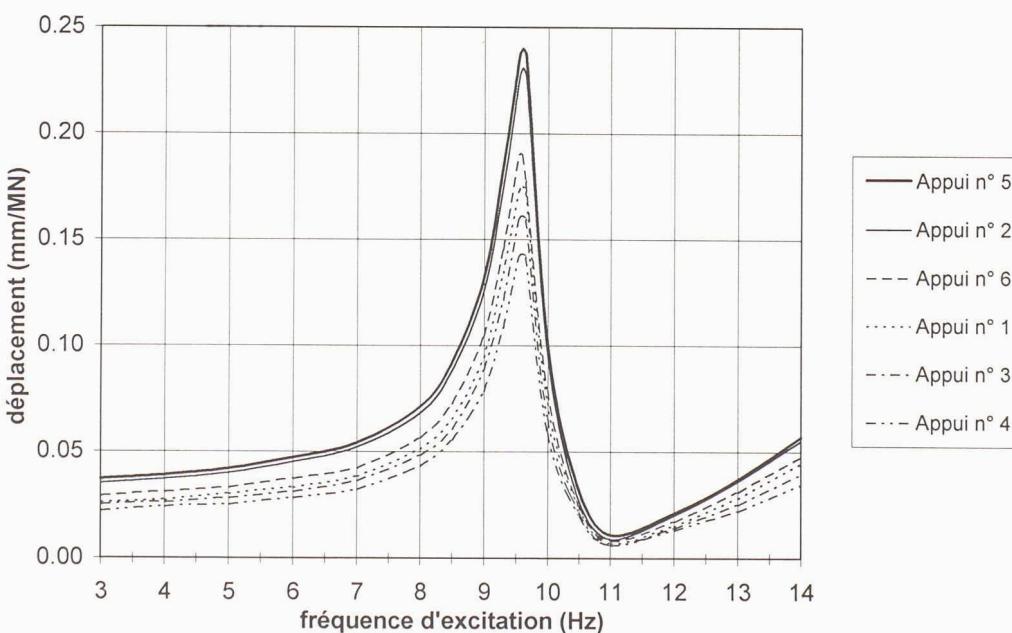


Fig. 6. - Analyse harmonique des déplacements des appuis 1 à 6 dans l'axe de l'usine (souplesse des paliers: 0,7 mm/MN)

quence propre. L'amplitude des déplacements reste cependant finie car le système est amorti. Puis, on constate une forte diminution des déplacements maximaux, si bien que le facteur d'amplification dynamique devient inférieur à 1. Les déplacements augmentent ensuite lentement pour les fréquences supérieures.

Lorsque la fréquence de la force excitatrice de 1 MN est égale à la première fréquence propre du système, les déplacements maximaux

au droit des appuis atteignent les valeurs indiquées dans le tableau 5.

On constate ainsi qu'un palier plus rigide engendre une réponse dynamique (déplacement maximal) plus grande au droit des appuis. Cela s'explique par le fait qu'en changeant la rigidité de l'ensemble, on modifie les fréquences propres et donc le taux d'amortissement. Ces valeurs sont toutefois très proches l'une de l'autre.

Selon que le groupe fonctionne à 17

son régime nominal, ou que l'on a affaire à un incident, la force tourante excitatrice n'a ni la même fréquence, ni la même intensité. Le tableau 6 donne les valeurs maximales des déplacements au niveau des appuis, en régime normal et lors d'incidents.

Outre les remarques déjà formulées plus haut, on observe qu'une modification de la souplesse du palier ne se fait sentir qu'à proximité de la première fréquence propre. Enfin, pour les cas de charge considérés, les valeurs de déplacement obtenues au droit des appuis restent faibles.

#### 4. Conclusions

L'étude des appuis des groupes de l'usine de Bièudron a conduit dans un premier temps à modifier l'épaisseur des parois des fosses des groupes afin d'assurer une rigidité suffisante des structures d'appui, celle-ci ayant une influence directe sur la vitesse critique de flexion de l'arbre.

Le calcul des fréquences propres a permis de s'assurer du découplage dynamique des structures d'appuis du génie civil et de l'équipement électromécanique. En particulier, le fait que les fréquences fondamentales de la structure du génie civil sont situées au-delà de la gamme de fréquence d'excitation permet d'exclure tout risque de résonance. De plus, les déplacements obtenus au droit des appuis par l'analyse harmonique restent faibles.

La présente étude est le résultat d'une étroite collaboration entre les différents intervenants. Coordonnés par la direction du projet Cleuson-Dixence, des échanges fructueux entre le constructeur des machines, ABB, celui des turbines, GCD (Sulzer-Hydro et Hydro-Vevey), et le mandataire pour le génie civil, CVI-BG (Communauté Vaudoise d'Ingénieurs - Bonnard & Gardel) ont permis de la mener à bien.