DOC-CR-85-008

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

(2)

MODÉLISATION ET ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS D'AMORTISSEMENT D'UN ASTROMAST

par

(1)

BOURASSA, Paul
GIGUERE, François

MEC/85/4 29 mars 1985

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

P
91
C655
B658
1985

Sherbrooke / Québec / Canada

Queen
P
91
C655
B658
1985

Industry Canada
Library Queen
JUL 20 1998
Industrie Canada
Bibliothèque Queen

2

MODÉLISATION ET ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS D'AMORTISSEMENT D'UN ASTROMAST

par

1

BOURASSA, Paul
GIGUERE, François

MEC/85/4 29 mars 1985

COMMUNICATIONS CANADA
MAR 9 1985
LIBRARY – BIBLIOTHÈQUE

Gouvernement du Canada
Ministère de Communications

RAPPORT D'ENTREPRENEUR DU MDC MDC-CR-PSX 85-008

MINISTERE DES COMMUNICATIONS - OTTAWA - CANADA

PROGRAMME SPATIAL

TITRE: MODELISATION ET ETUDE DES PROPRIETES D'AMORTISSEMENT D'UN ASTROMAST

AUTEUR(S): Paul BOURASSA
François GIGUERE

PUBLIE PAR L'ENTREPRENEUR COMME RAPPORT N°: MEC/85/4

ENTREPRENEUR: Département de génie mécanique
Université de Sherbrooke

N° DE CONTRAT DU MINISTERE DES APPROVISIONNEMENTS ET SERVICES: Dossier 20ST.36100-4-4118
Serie OST84-00168

AUTORITE SCIENTIFIQUE DU MDC: Dr.F.R. Vigneron

CLASSIFICATION: UNCL

Ce rapport présente les vues de l'auteur(s) et sa publication ne veut pas dire que le MDC en approuve les résultats ou les conclusions. Sa distribution à l'extérieur du ministère exige des arrangements spéciaux.

DATE: 29 mars 1985

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

Page

CHAPITRE 1 : ESSAIS EXPÉRIMENTAUX SUR L'ASTROMAST DE 42 ÉTAGES..... 1.1

1.1 Introduction 1.1

1.2 Matériel et instrumentation 1.3

1.3 Essai de vibrations libres en flexion du 1° mode 1.3

1.4 Essai de vibrations libres en flexion du 2° mode 1.7

1.5 Essai de vibrations libres en torsion du 1° mode 1.7

1.6 Essai de vibrations libres en torsion du 2° mode 1.9

1.7 Essai de vibrations libres en extension du 1° et 2° mode ... 1.13

1.8 Mesures des rigidités statiques en flexion et torsion 1.16

1.9 Estimés des fréquences du 1° mode 1.18

CHAPITRE 2 : ÉTUDE DE L'ASTROMAST PAR ÉLÉMENTS FINIS 2.1

2.1 ..... 2.1

2.2 ..... 2.5

2.3 ..... 2.5

CHAPITRE 3 : ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX TEMPORELS 3.1

CHAPITRE 4 : CONSIDÉRATIONS SUR L'AMORTISSEMENT DE L'ASTROMAST 4.1

RECOMMANDATIONS 4.5

CONCLUSION 4.6

RÉFÉRENCES 4.8

REMERCIEMENTS

Nous désirons remercier entre autres nos techniciens, messieurs Gérard Bachand, Magella Tremblay, du département de génie mécanique et monsieur Laurent Thibodeau du génie civil, qui ont grandement collaboré aux montages pour réaliser les expériences sur l'Astromast. Nous avons apprécié également l'aide des étudiants gradués Jacques Côté, qui nous a secondés avec le transfert des fichiers et la programmation du PDP-11 ainsi que Jacques Brassard qui a effectué pour nous des mesures. Enfin nous remercions madame Pierrette Jutras qui a bien voulu dactylographier ce texte.

D'une autre part, nous désirons exprimer notre gratitude à l'intention du Ministère des Communications et du C.R.C., et en particulier à monsieur Frank Vigneron pour la confiance qui nous a été témoignée et pour l'occasion de collaborer à leurs études.

CHAPITRE 1

ESSAIS EXPÉRIMENTAUX SUR L'ASTROMAST DE 42 ÉTAGES

1.1 Introduction

L'objectif de l'étude décrite dans ce rapport consiste à déterminer de façon expérimentale, le comportement temporel d'une structure aérospatiale légère appelée Astromast et à perfectionner la modélisation mathématique de sa structure. Celle-ci, décrite dans quelques rapports précédents, [1] [2], consiste de 3 grands longerons espacés par de courtes traverses et entrelacés par des fibres appelées diagonales, figure 1.1, et dont l'assemblage très particulier, de matériau composite, permet le repliement très compact de toute la structure pour fin d'espace dans le volume satellisé. La structure a été l'objet en 1982 au DRTE, de mesures en régime d'excitation harmoniques dans l'air ambiant et dans un réservoir vide. Plusieurs caractéristiques fréquentielles et modales avaient alors été répertoriées. Un programme d'identification, basé sur un modèle linéaire par éléments finis et une estimation Baysienne avait été tentée [1] mais certaines fréquences et certains amortissements prévus par cette méthode n'étaient pas entièrement satisfaisants.

Par la suite, une étude expérimentale dans le domaine temporel a été effectuée sur une petite structure de 10 étages que nous a prêté le CRC [2]. Cette étude a fait ressortir le caractère non linéaire très important alors que l'on pouvait mesurer un glissement de la fréquence naturelle du 1er mode en flexion de l'ordre de 50%. La réponse non linéaire avait été attribuée

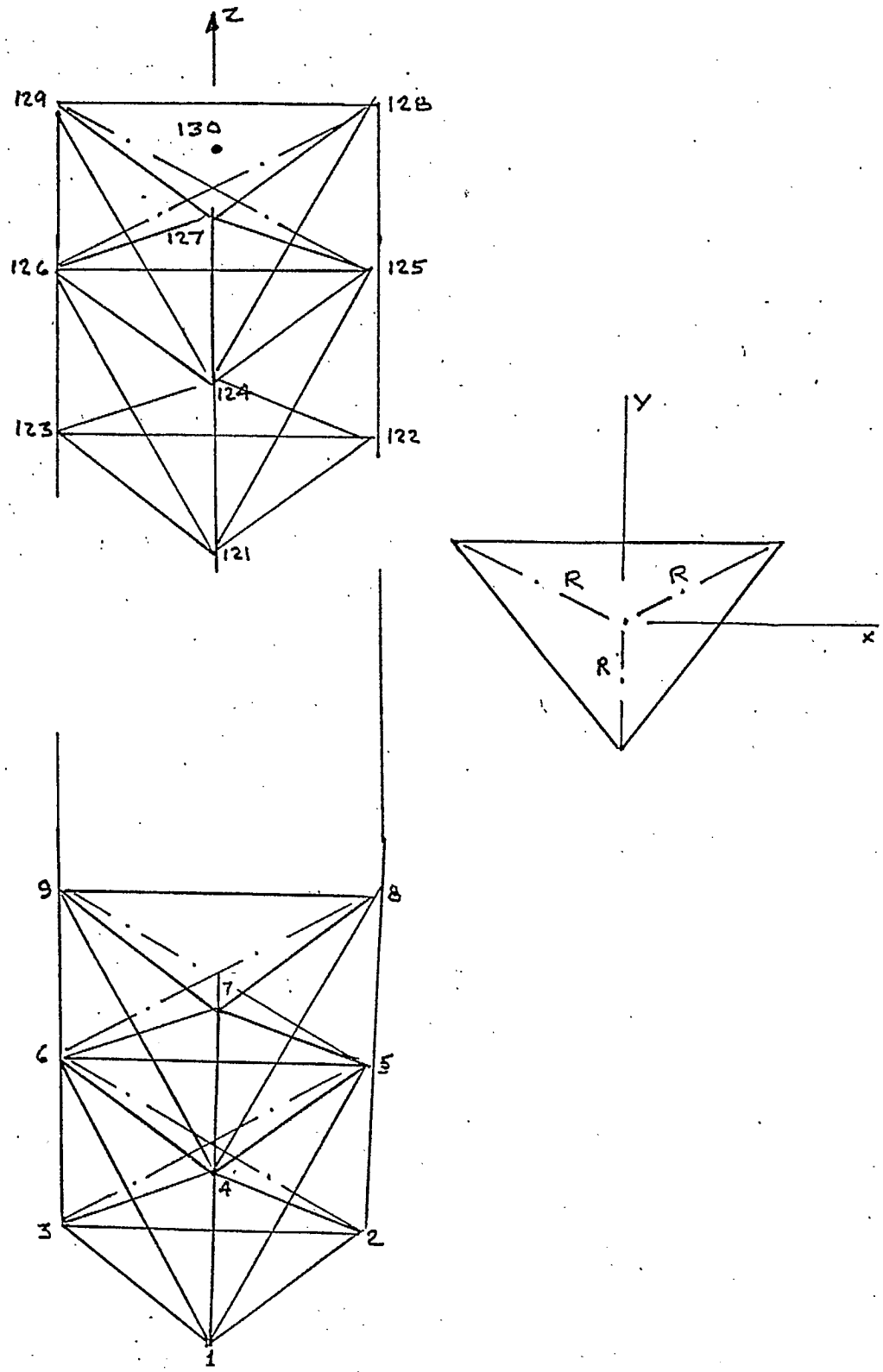


Figure 1.1: L'Astromast de 42 étages.

à un état de d'instabilité élastique des longerons. Ce rapport avait décrit de plus une technique expérimentale intéressante consistant à exciter l'Astromast dans un mode particulier et temporel de vibrations librement amorties. L'étude des spectres de fréquences sur des fenêtres temporelles permettait ensuite d'évaluer la progression du contenu énergétique. L'intérêt de cette étude s'est poursuivi cette année sur l'Astromast de 42 étages avec une procédure assez analogue. Les difficultés associées à cette présente structure sont beaucoup plus grandes. Déjà la taille imposante de cet Astromast nécessite un grand soin dans son déploiment et dans l'érection de cette structure dans un laboratoire de hauteur appropriée. De plus, les fréquences naturelles sont très basses et les marges critiques beaucoup plus faibles. Ce rapport va décrire les résultats expérimentaux obtenus sur cette structure lorsqu'elle est soumise à des créneaux de déplacement dans des modes particuliers. Le rapport va poursuivre avec l'analyse des fichiers de données, puis avec une étude par un code important d'éléments finis. Une discussion finale fera le point sur l'état de nos connaissances et proposera un ensemble d'idées à exploiter dans un proche avenir.

1.2 Matériel et instrumentation

L'Astromast dont les essais sont décrits dans ce rapport consiste de 42 étages de 0.144 m et demande donc une fois déployé, une hauteur nette de plus de 6 mètres. On a dans un premier temps cherché un endroit propice à l'abri des courants d'air, le long d'un mur ou d'une colonne existante. L'endroit final choisi est situé dans le hall de structures du génie civil, le long d'une colonne d'un portique d'essai. Des panneaux furent installés à la base pour prévenir les accidents possibles à la structure. Un échanffaudage

fut ensuite installé à proximité afin de faciliter l'installation des accéléromètres et des câbles de mise en charge pour les essais de vibrations librement amorties décrits plus loin.

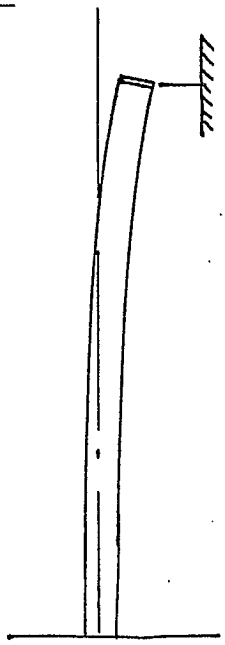
Les appareils utilisés sont les suivants:

- Accéléromètres: ENDEVCO 7265 A-HS
  Piezo résistif DC et AC
- 4 amplificateurs ECTRON Model 563K 125 Kc
- Oscilloscope acquisitions de données
  Nicolet 3091, 2 canaux
  Acquisition 1 μ sec à 200 s
  Mémoire à bulles, 5 sets de données à 4000 échantillons
- 1 source de courant, câbles de fils à piano.

Les accéléromètres sont montés par couples de deux en demi pont de Wheatstone et l'output de ce pont est amplifié par les ampli instrumentaux de grande bande passante de marque ECTRON.

1.3 Essai de vibrations libres en flexion du 1er mode.

Pour cet essai, un fil de piano est tendu horizontalement au dernier niveau de la structure. Au temps désiré, une décharge électrique fait volatiliser le fil sous tension et l'output des accéléromètres est amplifié et les données digitalisées et stockées dans les mémoires à bulles. Le signal est vérifié à chaque essai pour validation. Les accéléromètres sont disposés dans le sens du mouvement



sélectionné de façon à maximiser l'output et minimiser le bruit. Plusieurs essais ont été réalisés, certains avec l'Astromast tel que prêté par le CRC, d'autres avec une masse supplémentaire de 2.044 kg au dernier étage. Trois fichiers sont illustrés aux figures 1.2 a), b), c).

L'examen de 6 fichiers de données obtenus suite à l'acquisition des signaux dans ce mode de vibration du 1er mode, révèlent:

une fréquence de départ	au 1er cycle	1.72 Hz
	au 13è cycle	1.80 Hz
	au 32è cycle	1.94 Hz

Les fichiers révèlent aussi un décrément logarithmique important au départ qui diminue avec le temps et donc avec l'amplitude. Par exemple, au 1er cycle $\delta \cong 0.12$ et après 32 cycles, $\delta \cong 0.08$. Il se peut que l'amortissement soit finalement le résultat de plusieurs causes entre autres, l'amortissement dû au déplacement de l'air, puis celui dû à la friction dans les joints de chacun des niveaux puis enfin l'amortissement dû à la friction interne dans les éléments de matériaux composites, l'amortissement mesuré à la fin des signaux se rapprochant plus de la valeur devant être imputée à la friction interne.

La variation de la fréquence fondamentale de flexion librement amortie s'est avérée être de l'ordre de 11% sur une trentaine de cycles. Des résultats similaires ont été mesurés avec un Astromast auquel on avait ajouté une masse de quelques 2 kg au dernier étage.

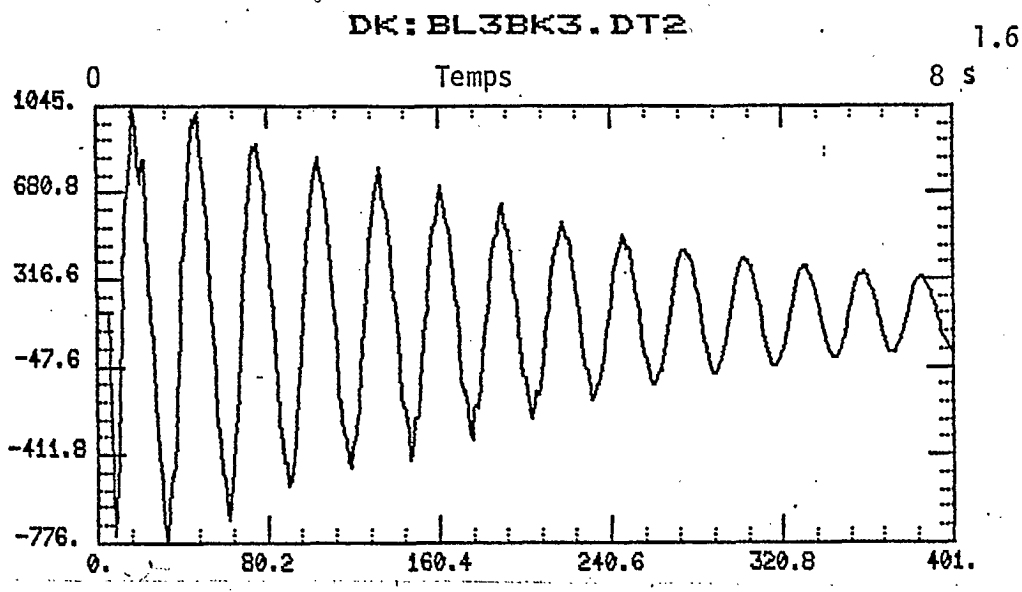


Figure 1.2 a): Flexion 1er mode

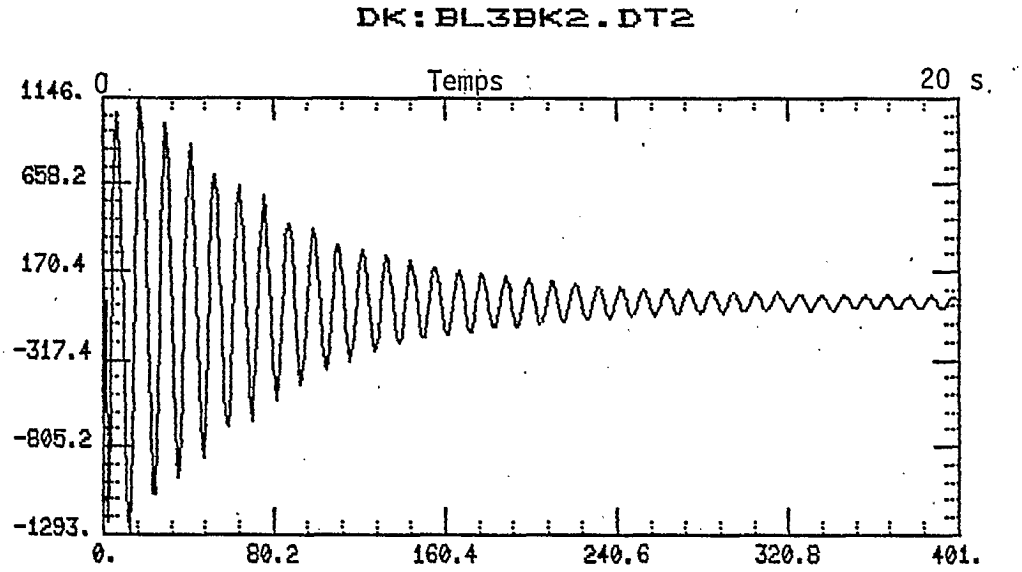


Figure 1.2 b): Flexion 1er mode

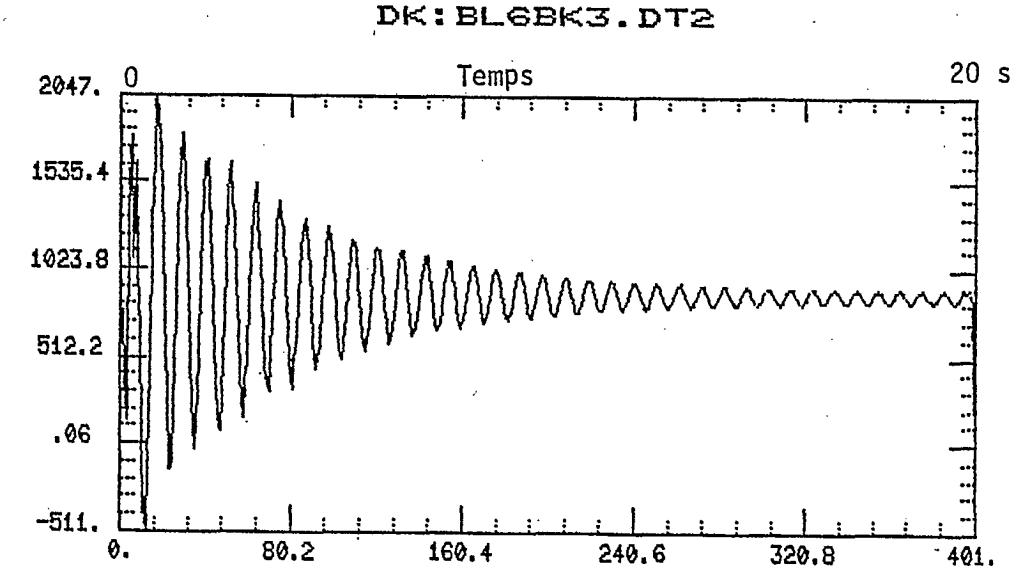


Figure 1.2 c): Flexion 1er mode: échelon de force initiale 1.75 N

1.4 Essai de vibrations libres en flexion du 2è mode

Pour réaliser cette mise en vibrations libres du 2è mode, on a d'abord fait référence à la solution des problèmes par éléments finis et relevé les déplacements du mode normal correspondant. On a ainsi appliqué des déplacements latéraux vers le centre et au sommet de l'Astromast dans les rapports similaires à ceux du 2è mode. Quelques échantillons des signaux obtenus sur une paire d'accéléromètres placés au dernier niveau sont reproduits aux figures 1.3 a) et 1.3 b). Le signal a été échantillonné pour des durées d'enregistrement de 2 secondes et 0.8 seconde (4000 échantillons) représentant donc des taux d'échantillonnage de 0.5 ms et 0.2 ms/échantillon.

L'observation détaillée temporelle révèle une fréquence du 2è mode qui débute à 10.7 Hz et évolue au 6è cycle à une valeur de 11.9 Hz environ. Par la suite, la conversion de l'énergie du second mode au premier empêche l'analyse directe de l'évolution de la fréquence de ce mode. Le passage aux mesures de FFT s'impose. Il reste que le modèle par élément fini prédit une fréquence de 13.3 Hz pour ce mode et que la divergence est encore de 11%. L'observation des modes sur une plus longue échelle aurait peut-être fait voir une meilleure concordance.

1.5 Essai de vibrations librement amorties dans le premier mode de torsion

Dans cet essai, la base de l'Astromast est toujours fixe et un dispositif mécanique comprenant un pivot et un système de fils métalliques pour appliquer un couple est installé au plateau supérieur de l'Astromast. Au moment voulu les fils sont volatilisés par le passage du courant électrique et l'Astromast se met à osciller librement dans son premier mode de torsion. Les accéléromètres sont orientés dans la direction tangentielle au cercle qui circonscrit

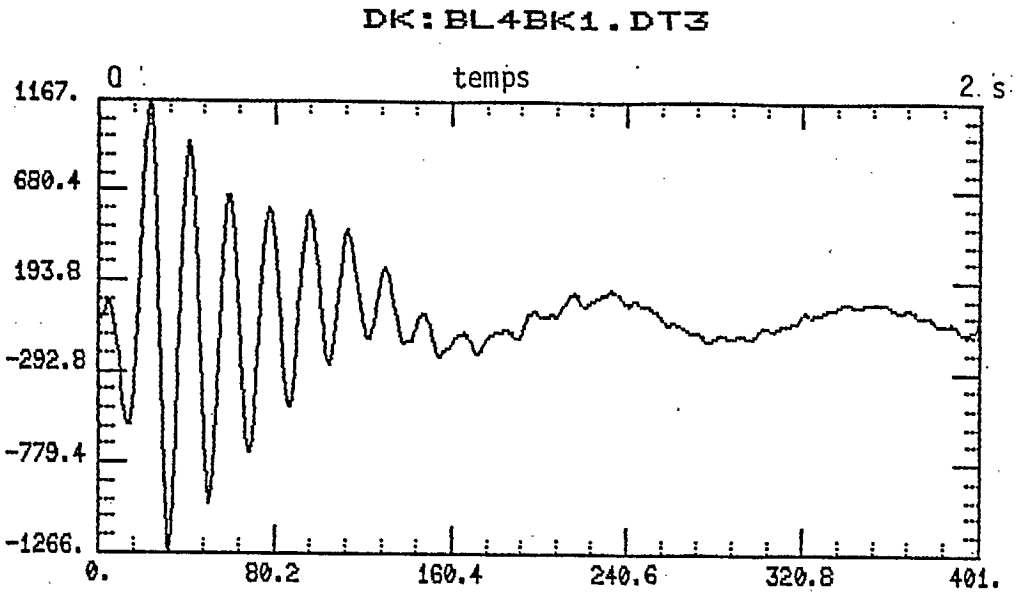


Figure 1.3 a): Flexion 2è mode

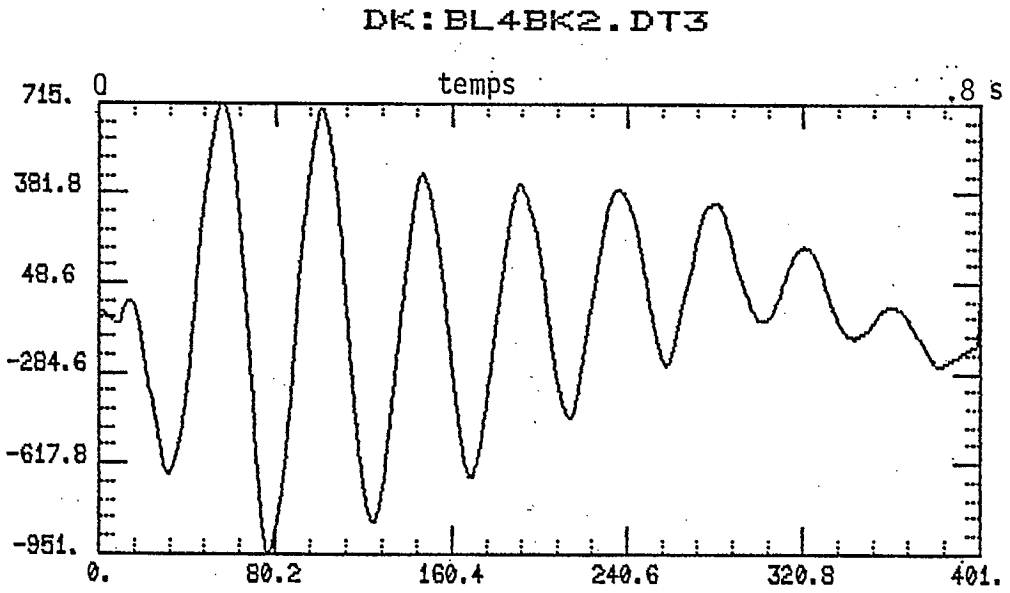


Figure 1.3 b): Flexion 2è mode (temps de 0.8 s)

la section triangulaire équilatérale de l'Astromast. La figure 1.4 représente le signal typique de tous ceux qui furent obtenus pour ce mode. Au départ, la fréquence mesurée est de 8.6 Hz. Elle augmente progressivement pour atteindre la valeur de 9.4 Hz après quelques 50 cycles, soit une augmentation de 8.5%. Ce résultat est remarquablement bon si l'on considère que la valeur prédite par le modèle des éléments finis donne 8.85 Hz et le calcul approximatif en 1.8 donne 9.09 Hz. Le décrément logarithmique pour sa part évolue d'une valeur initiale voisine de 0.086 à une valeur en fin de signal voisine de 0.076.

1.6 Essai de vibrations libres dans le cas de torsion du 2è mode

Pour réaliser une excitation dans un 2è mode, on a fait référence au 2è mode de torsion prédit par l'analyse par éléments finis. Ce mode est illustré à la figure 2.6 . On voit qu'au 19è étage, un déplacement prévu tangentiel de 1.24 et au 42è étage un déplacement opposé égal à 0.68 par rapport au plan vertical initial passant par les noeuds de ces niveaux.

Pour obtenir le bon rapport de déflexion, un couple est d'abord appliqué au 19è étage suffisant à provoquer une torsion de quelques degrés, puis les fils métalliques sont bloqués de manière à assujettir ce déplacement. Au dernier étage un couple égal à 1.28 fois le couple du 19è est appliqué afin de ramener la rotation de cet étage à la valeur prévue pour ce mode.

Lorsque la décharge électrique est appliquée, les 4 fils se volatilisent et relâchent la structure dans le mode initialement préétabli.

On a fait les tests avec les accéléromètres placés au sommet et dans un 2è temps avec les accéléromètres placés au 19è étage.

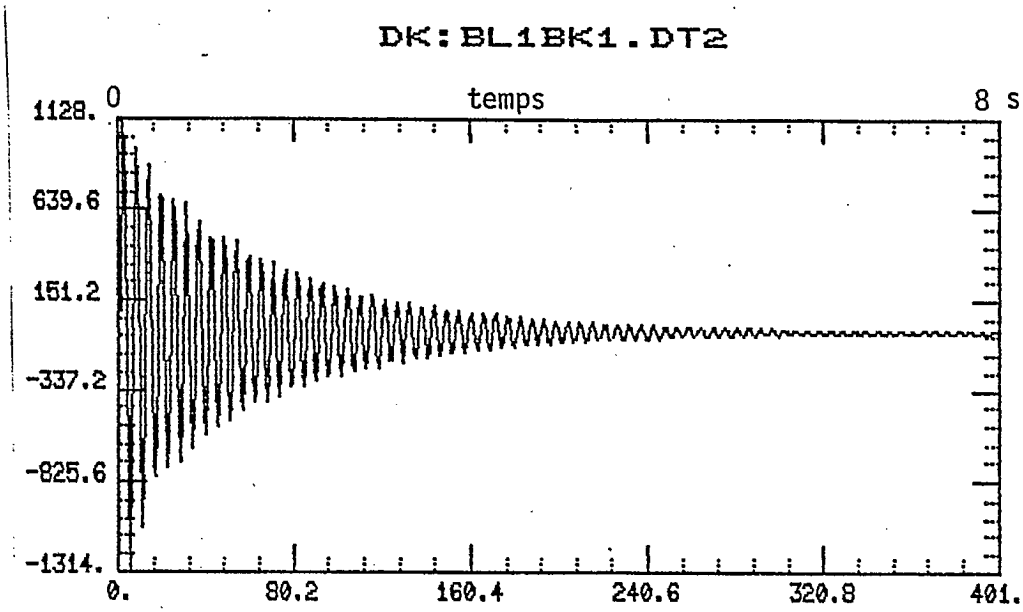
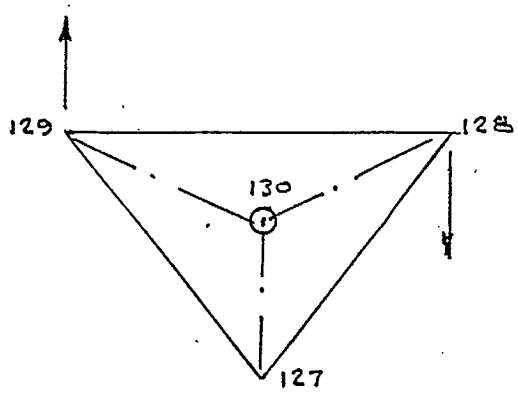


Figure 1.4: Torsion 1er mode



Dans le 1er cas, on s'aperçoit que le 2è mode de torsion n'est apparent que sur 2 à 3 cycles. Il se confond rapidement à l'intérieur du 1er mode. Au bout de 400 ms, il n'y a plus de trace visible de ce mode. Par contre, le 1er mode est présent presqu'au début et s'atténue plus lentement sur un plus grand nombre de cycles.

On a repris l'essai de vibrations librement amorties dans le 2è mode de torsion en plaçant cette fois-ci une paire d'accéléromètres. Au 19è niveau, on devrait retrouver le premier maximum d'amplitude du mode. Encore une fois on s'aperçoit que le 2è mode ne persiste que quelques 500 msec. et à peine est-il facilement identifiable que sur 4 à 5 cycles, après quoi il se retrouve presque assimilé dans le 1er mode.

Par contre, on reconnaît assez bien la 2è fréquence de résonnance ≃ 26 Hz dont la période est de 38 msec. environ. Encore une fois la concordance est assez bonne avec le modèle par éléments finis qui prédit une fréquence sans amortissement à 27.3 Hz. L'énergie relative à ce 2è mode semble avoir été absorbée dans les 6 à 8 premiers cycles, ce qui laisse présager un fort amortissement pour cette fréquence de torsion du second mode. On pourrait lui associer tentativement un décrément logarithmique de l'ordre de 0.5.

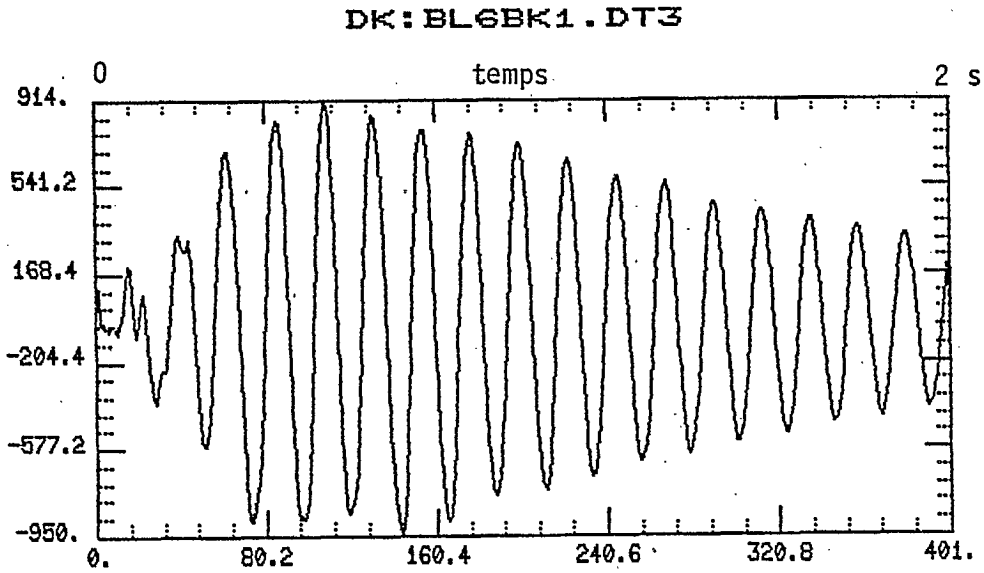


Figure 1.5 a): Torsion 2è mode: accéléromètre au niveau supérieur.

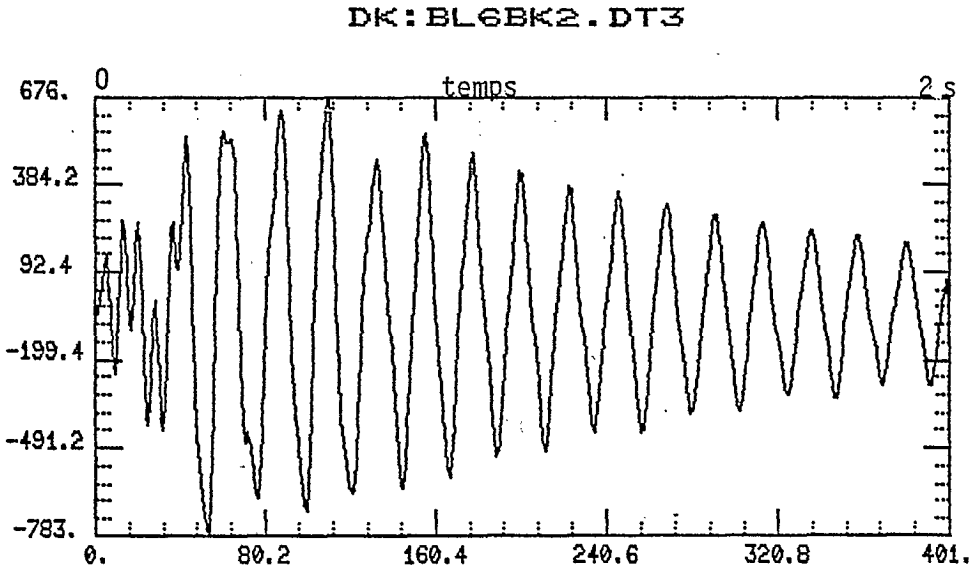
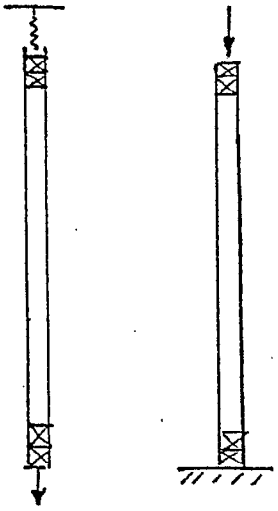


Figure 1.5 b): Torsion 2è mode: accéléromètre au 19è étage.

1.7 Essai de vibrations longitudinales librement amorties: mode libre-libre et mode fixe-libre

Dans le premier de ces deux cas, la structure est suspendue à un support élastique de très faible impédance et une impulsion longitudinale de très courte durée provoque une vibration librement amortie dans le mode libre-libre. La Figure 1.6 a) reproduit un des signaux typiques de ce mode tel qu'il a été capté. L'accéléromètre qui a fourni ce signal, a été monté dans la direction axiale. La fréquence y est très élevée, 118 Hz et représente beaucoup moins d'intérêt. Elle module une fréquence fondamentale beaucoup plus faible, de l'ordre de 2.5 Hz qui peut être associée avec la suspension élastique du montage. Cependant ce mode libre-libre fait voir un fait intéressant. C'est le faible amortissement qui y apparaît compte tenu de la fréquence élevée. Dans ce signal, le décrément logarithmique est de l'ordre de 0.04. Ce qui contraste dans ce cas, avec les autres tests, c'est l'état de traction dans lequel se retrouve l'Astromast par rapport à l'état de compression de tous les autres modes. On peut donc s'attendre à ce que la friction dans les articulations joue un rôle très important.



Un calcul approximatif de la fréquence fondamentale dans ce cas peut se faire en prenant comme rigidité longitudinale $k_\ell = 3\ AE/(L/2)$ où E est le module de rigidité des longerons, A la section et L la hauteur de l'Astromast. On prend comme masse, celle d'un plateau externe et du tiers de la masse distribuée sur la demi longueur. Avec $E = 3.9 \times 10^4\ N/mm^2$, $A = 8.77\ mm^2$, $M_s = 0.454$ kg, $M_d = (0.27\ kg \times 21) = .57$ kg

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(\frac{3AE}{L/2})/(M_s + \frac{1}{3} M_d} = 116 \text{ Hz}$$

On a donc une excellente corrélation entre ce calcul et notre mesure, de l'ordre du 1%, ce qui laisse à croire que le module d'élasticité des longerons qui prédomine dans le présent cas est bien identifié.

Dans une deuxième série d'essais, on a cherché à provoquer le mode de vibrations longitudinales de type fixe-libre. La base a donc été fixée puis un fil métallique reliant le plateau du dernier étage a été mis sous tension puis volatilisé. Le mouvement vibratoire se fait donc sur la longueur totale de l'Astromast dans ce présent cas. La figure 1.6 b) est un signal typique de cet essai. On y voit une fréquence de 77 Hz environ superposée à une oscillation de l'ordre de 18 Hz qui n'a pas été identifiée comme telle et qui ne représente pas d'intérêt ici. L'amortissement est nettement plus élevé que dans le mode précédent, ce qui tend à confirmer le rôle de la compression due à la gravité et la friction dans les articulations. Le décrément logarithmique qui est associé à ce mode peut être évalué approximativement à une valeur de l'ordre de 0.14, soit 3.5 fois plus grand que l'amortissement mesuré sur le mode libre-libre et à fréquence beaucoup plus élevée.

Prenant les mêmes paramètres que précédemment, on peut calculer une fréquence approximative pour ce mode en utilisant la formule,

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(3AE/L)/(M_s + \frac{1}{3} M_d)}$$

où $M_d = 42 \times 0.027$ kg = 1.134 kg.

On obtient ainsi f = 72 Hz, soit une valeur à 6% de la valeur moyenne mesurée. La précision n'est pas aussi excellente que dans le cas précédent et peut avoir été influencé par la présence de l'autre mode d'amplitude beaucoup plus grande probablement associée avec la flexion.

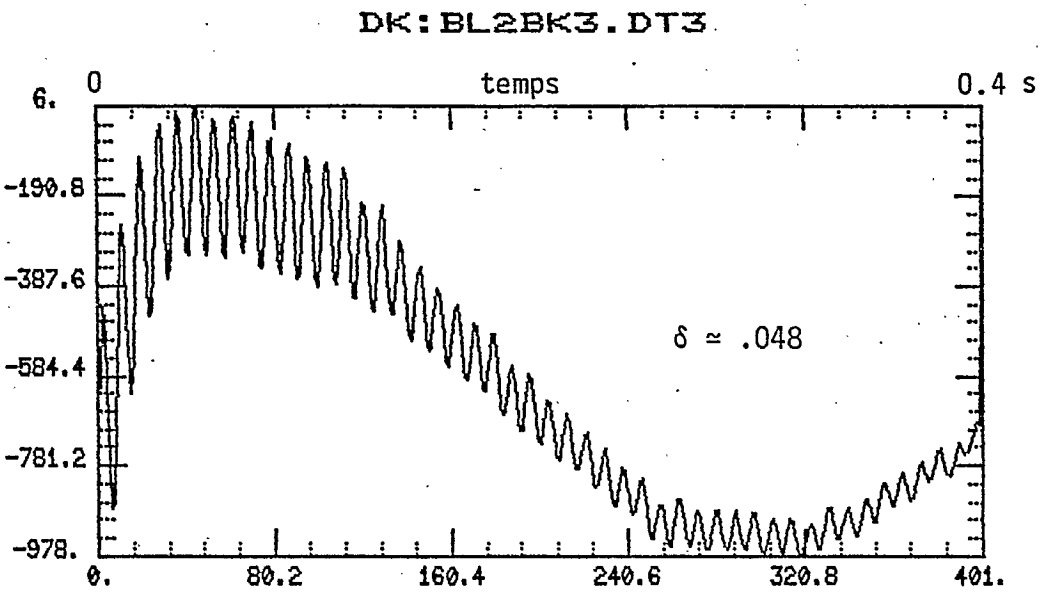


Figure 1.6 a): Mode longitudinal: libre-libre (118 Hz)

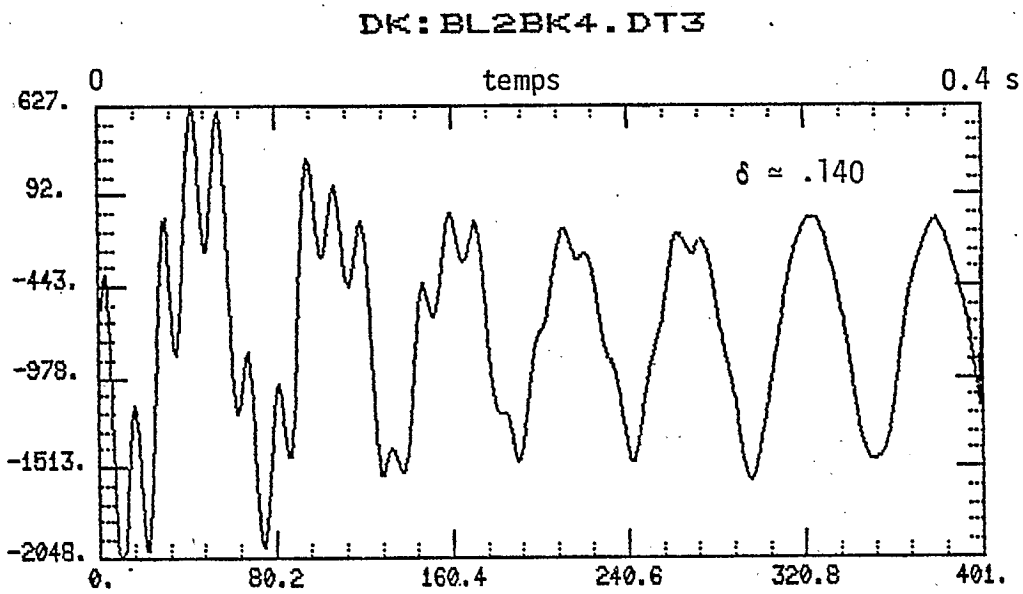


Figure 1.6 b): Mode longitudinal: fixe-libre (77 Hz)

1.8 Rigidité statique en flexion et en torsion de l'Astromast de 42 étages

Des essais statiques ont été effectués sur l'Astromast de 42 étages dans le but d'obtenir les constantes de rigidité en flexion et en torsion du comportement linéaire de cette structure et aussi pour déterminer les limites de linéarité dans ces deux modes. Au cours de ces essais la base de l'Astromast est fixe et les efforts sont appliqués latéralement au niveau du dernier étage. En ce qui concerne l'essai en torsion, un couple pur est appliqué pour éviter l'effet combiné avec flexion. Les résultats de ces essais apparaissent sur les courbes des figures 1.7 a) et 1.7 b). Nous voyons qu'en flexion, l'Astromast de 42 étages se comporte de façon linéaire sur une plage de déplacements allant de 0 à 22 mm et que la constante de rigidité linéaire de flexion dans cette plage est donnée par

$$k_f = 93.8 \text{ N/m}$$

La déflexion augmente très rapidement après 44 mm pour une charge latérale de 3.4 N. Pour le cas de la torsion, on voit à la figure 1.7 b) que le comportement est linéaire dans une plage de déplacement angulaire allant de 0 à 0.11 rad et à l'intérieur de laquelle la rigidité linéaire en torsion est donnée par

$$k_t = 25.8 \text{ Nm/rad}$$

Au-delà de cette plage, la déflexion angulaire augmente très rapidement et l'Astromast devient instable pour un couple d'une valeur de 3.3 Nm.

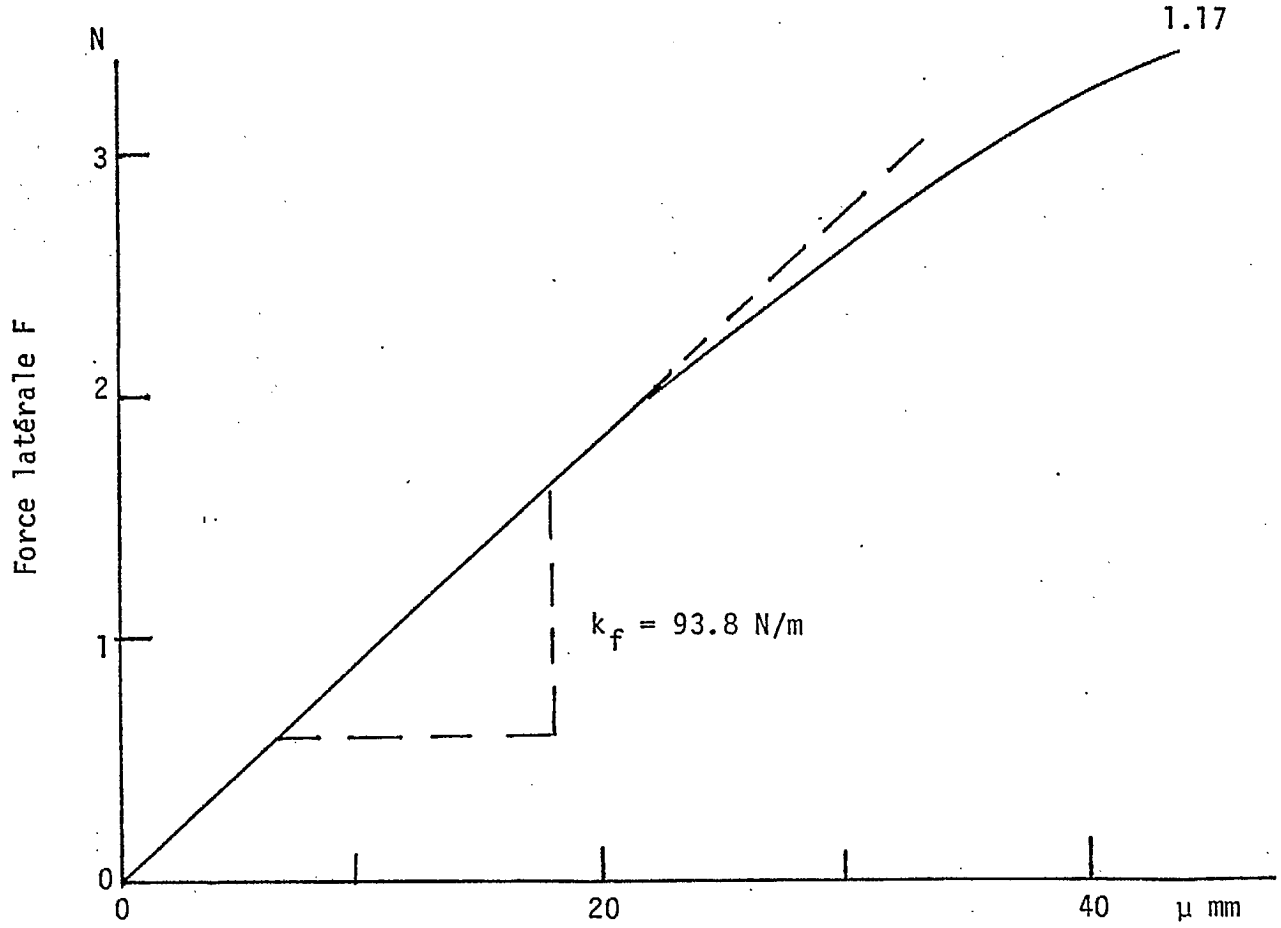


Figure 1.7 a): Rigidité statique en flexion. Astromast 42 étages.

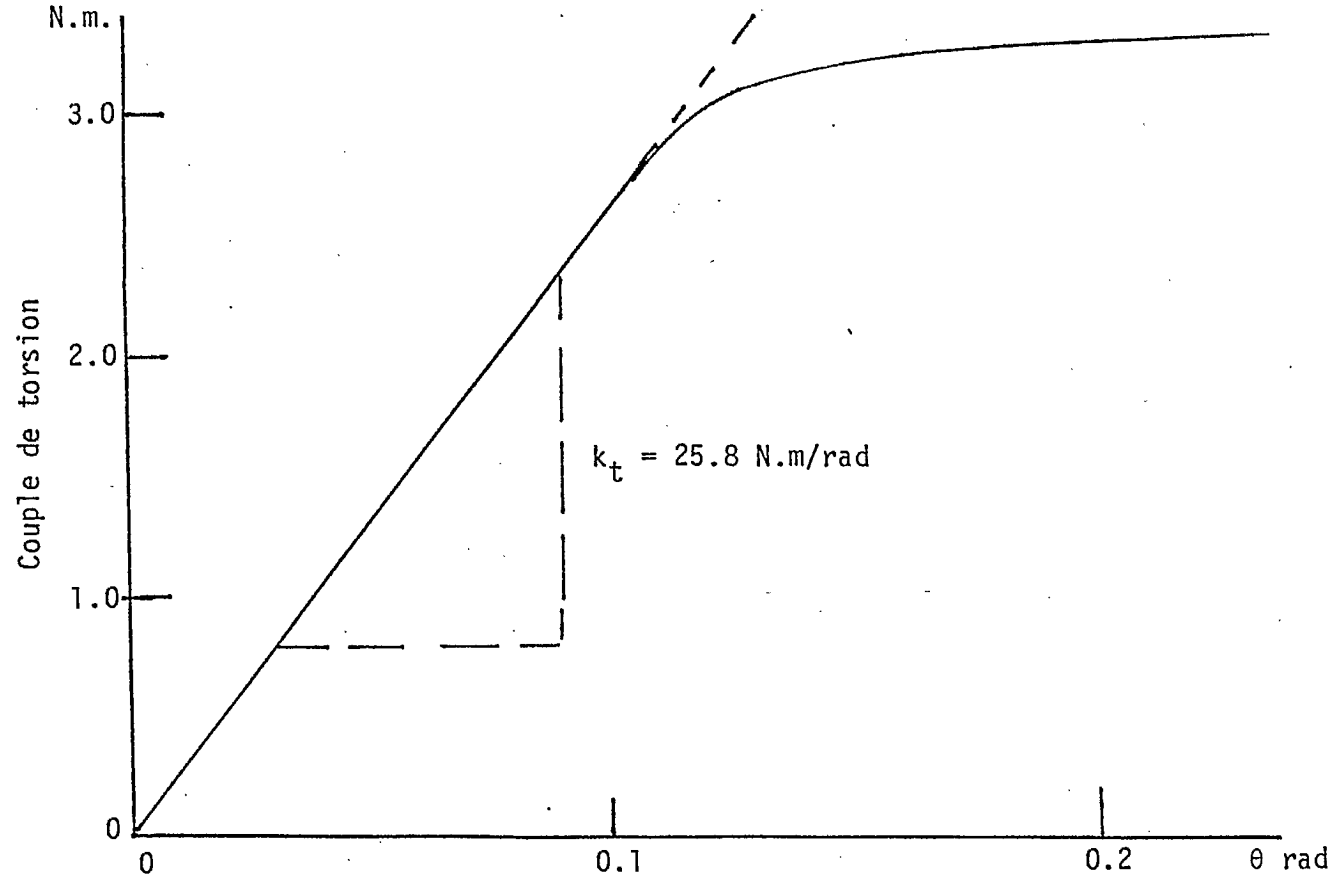


Figure 1.7 b): Rigidité statique en torsion. Astromast 42 étages.

1.9 Calculs approximatifs des fréquences de 1er mode en flexion et en torsion

a) Flexion

Si l'on se représente l'Astromast sous la forme d'une poutre continue dont la masse est m_d = 1.134 kg et d'un plateau au dernier étage dont la masse est M_s = 0.454 kg, on obtient pour le mode de vibration fixe-libre, avec k_f = 93.8 N/m,

$$f_{f\ APP.} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k_f/(\frac{m_d}{3} + M_f)} \simeq 1.7 \text{ Hz}$$

La fréquence mesurée dans ce mode, à faible amortissement, était de 1.94 Hz. En particulier on a pu vérifier expérimentalement avec une masse additionnelle au dernier étage égale à 2.044 kg une fréquence de 1er mode en flexion à 0.93 Hz, à 2% de la fréquence approximative calculée avec la formule ci-dessus.

b) Torsion

On peut calculer une fréquence approximative en 1er mode de torsion en utilisant la constante de rigidité k_t = 25.8 Nm/rad, et en évaluant le moment d'inertie équivalent J_d pour la masse distribuée et J_s pour le plateau supérieur. Ainsi $J_s = M_s R^2/2 = 2.966 \times 10^{-3}$ kg m² et J_d = 14.81×10^{-3} kg m². Le calcul approximatif basé sur un modèle de poutre continue en torsion et d'une masse au sommet donne

$$f_{t\ APP} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{kt/(\frac{1}{3} J_d + J_s)} = 9.09 \text{ Hz}$$

ce qui se compare très bien avec les fréquences de 9.4 Hz mesurées à faible amortissement en figure 1.4.

Lorsque l'on ajoute une masse supplémentaire de 2.04 kg, on peut calculer une fréquence approximative de 5.55 Hz qui se compare à une fréquence mesurée en torsion de 5.2 Hz à faible amortissement.

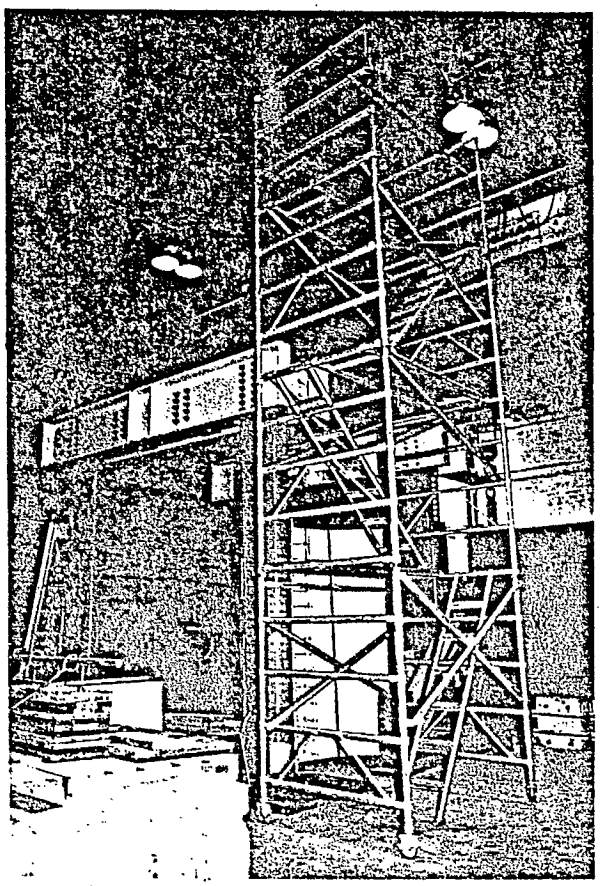


Figure 1.8: Laboratoire de structures.
Astromast et échaffaudage.

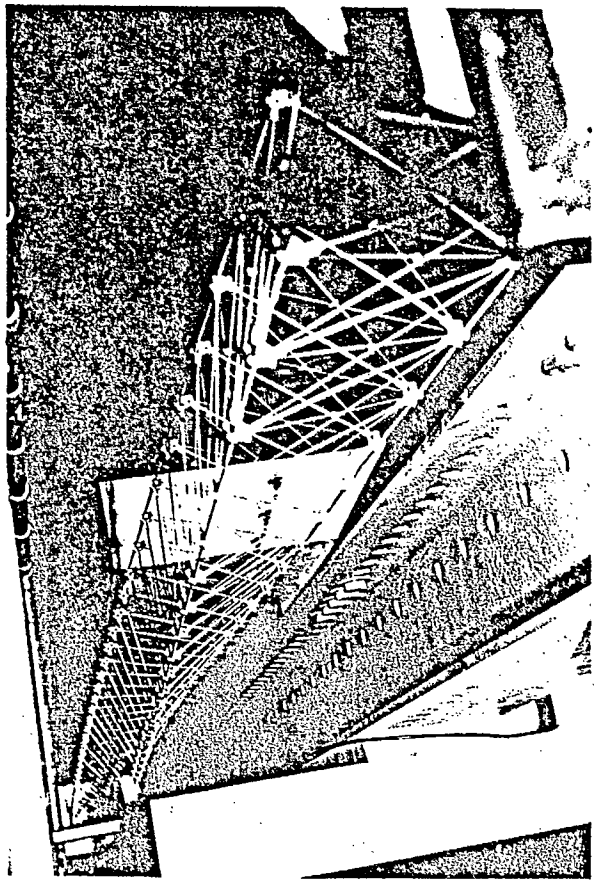


Figure 1.9: Structure torsadée de l'Astromast.

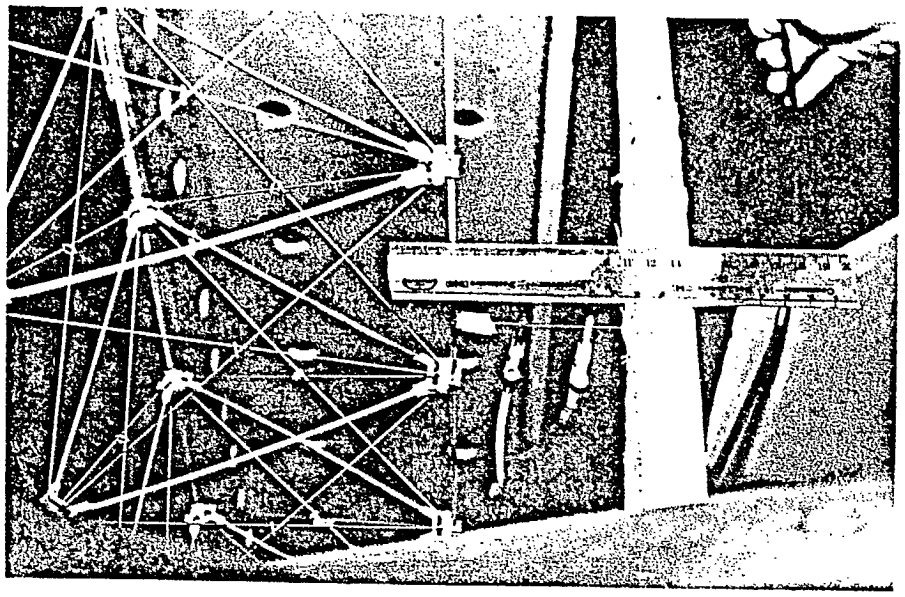


Figure 1.10: Flexion 2è mode; ajustement de la déflexion dans la partie centrale.

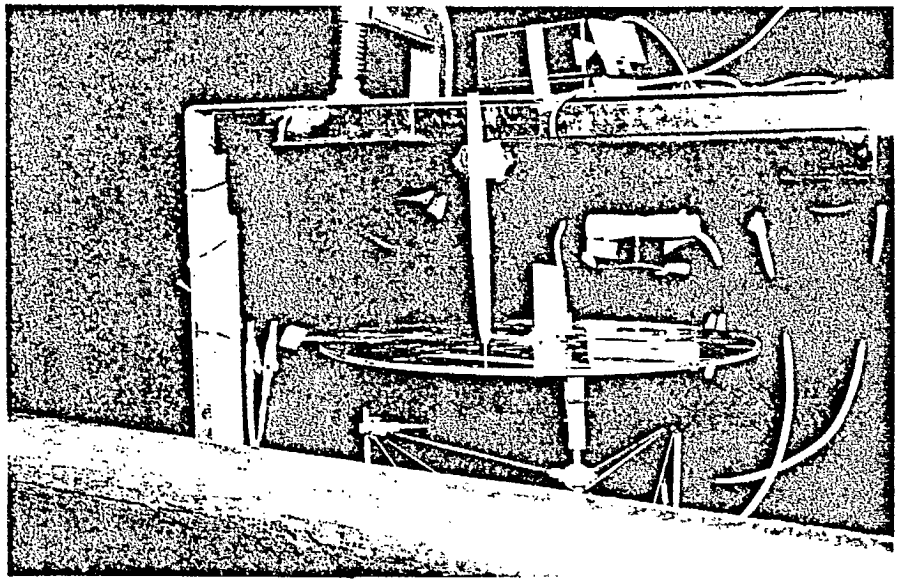


Figure 1.11: Flexion 2è mode; ajustement de la déflexion à l'étage supérieur.

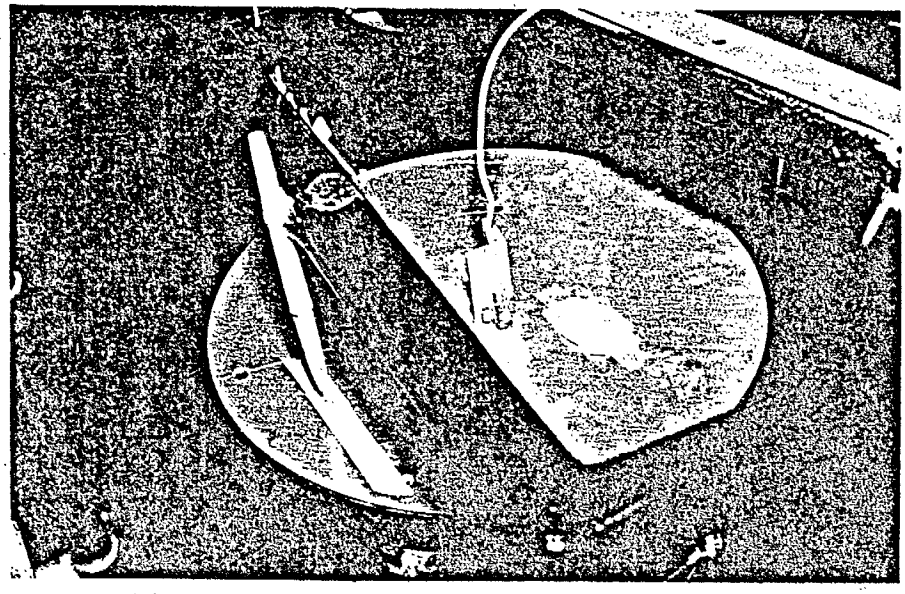


Figure 1.12: Vue de l'accéléromètre actif pour la mesure dans le mode de flexion.

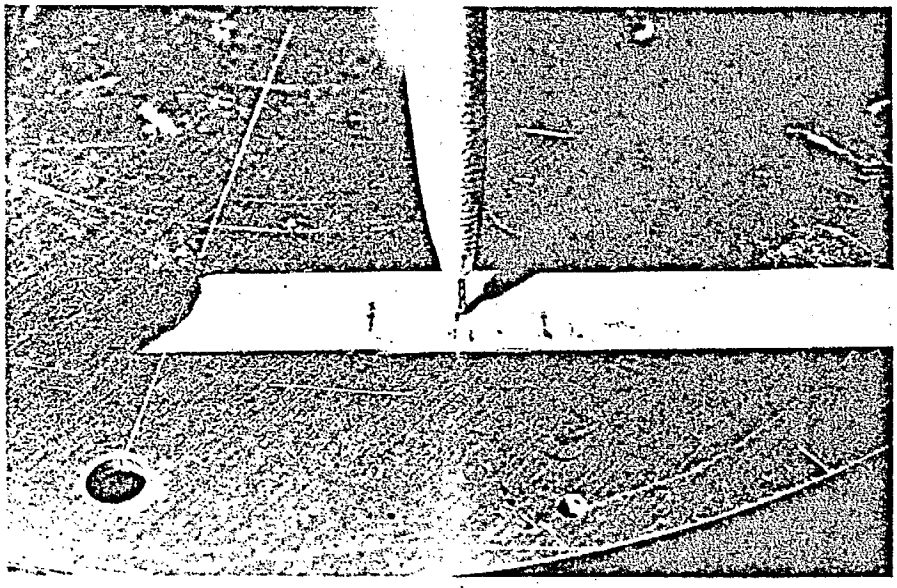


Figure 1.13: Vue de la déflexion imposée au sommet pour le 2è mode de flexion
1 cm à l'étage supérieur, 0.72 cm dans la partie centrale (22è étage).

CHAPITRE 2

ÉTUDE DE L'ASTROMAST PAR ÉLÉMENTS FINIS

2.1 On a effectué quelques modélisations de l'Astromast de 42 étages illustré à la figure 1.1 et un code très performant d'éléments finis a été utilisé pour évaluer les premiers modes en flexion, torsion et extension de cette structure. La structure de l'Astromast a cependant été représentée comme une structure étagée non torsadée. Cette étude précédente avait en effet fait conclure que cette modélisation n'entraînait pas de différences perceptibles dans les premiers modes pour un comportement linéaire de la structure. Cette étude préliminaire, effectuée sur une structure de 10 étages, avait également montré que la modélisation pouvait avantageusement être faite avec l'aide d'éléments de type barre et que les traverses ne jouaient pas de rôle significatif en autant que la rigidité de la structure était concernée. Les traverses ont comme but utilitaire de maintenir la structure en état stable de déformation. Elles jouent probablement un autre rôle dans l'amortissement des vibrations au niveau des articulations. Ainsi donc, les longerons, diagonales et les traverses sont modélisés par des éléments barres pour cette étude. On a de plus spécifié une densité exacte à chacun des éléments et des masses localisées pour les articulations à chacun des noeuds. Bien sûr que cela n'était pas nécessaire. On aurait pu redistribuer les masses nodales localisées sur les éléments barres. Cependant ces valeurs étaient déjà bien connues avec précision par des mesures en laboratoire de petits spécimens de longerons traverses, diagonales et des articulations. De plus, le code n'exige pas que ces valeurs

soient inscrites à chaque noeud car on peut utiliser un paramètre automatique d'itération. On en a aussi profité pour ajouter aux derniers noeuds les masses des 3 derniers poteaux qui relient le plateau au sommet de l'Astromast. La masse de ce plateau au sommet nous a été donné comme étant approximativement 1 lb (0.454 kg), ce qui correspond assez bien à la réalité lorsque l'on fait l'addition de toutes les masses. Dans la première modélisation "SATEL 42.1", présentée dans ce chapitre, la masse du plateau supérieur est reportés également sur les trois noeuds supérieurs. Nous allons voir que si cette modélisation se justifie pour les modes de flexion ou d'extension, elle n'est pas du tout justifiable pour les modes de torsion. Les paramètres utilisés pour les éléments des diagonales, longerons et traverses correspondent aux valeurs mesurées en laboratoire en 1982-83 et remises dans le rapport de l'équipe de cette année-là, réf. [1]. Les valeurs des modules d'élasticité, sections, densité, longueur sont données au tableau de la figure 2.1 Les principales caractéristiques de la modélisation de Satel 42.1 sont citées au tableau de la figure 2.2. La structure est fixée à la base et est libre sur toute sa longueur. Les résultats sont donnés au tableau de la figure 2.3.

No.	f	Mode
1	1.808	flexion
2	1.808	flexion
3	7.713	torsion
4	13.25	flexion
5	13.25	flexion
6	25.34	torsion
7	35.5	flexion
8	35.5	flexion
9	45.2	torsion
10	63.3	flexion

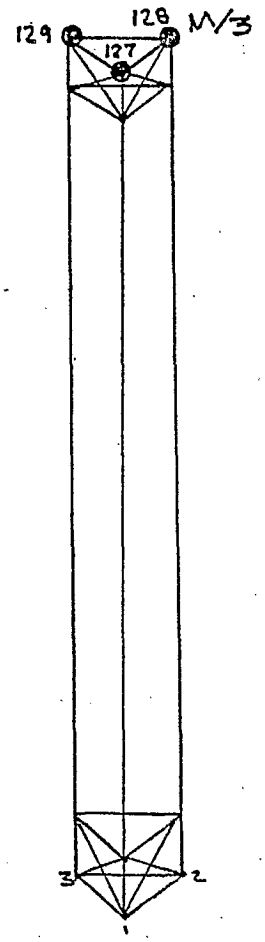


Figure 2.3: Résultats de Satel 42.1: Eléments barres.
Masses localisées au sommet.

2.2 Le fait que la masse du plateau supérieur ait été répartie aux trois noeuds explique une certaine divergence entre ces résultats de première modélisation et nos résultats expérimentaux sur les modes de torsion. En effet, le moment d'inertie d'un plateau circulaire de masse M et de rayon R autour de l'axe de la structure est donné par $J = M R^2/2$ tandis que le moment d'inertie associé à trois masses M/3 localisées aux noeuds de la section triangulaire supérieure est donné par $J_{APP.} = 3[\frac{M}{3} R^2] = M R^2$. On pourrait bien sûr compenser en appliquant m/6 aux trois noeuds supérieurs pour obtenir le même moment d'inertie. Cependant les valeurs propres en flexion seraient toutes fausses. Avec m/6 appliqué aux trois noeuds supérieurs, on trouve pour les 3 premiers modes de torsion $f_1 = 8.85$ Hz, $f_2 = 27.2$ Hz, $f_3 = 46.9$ Hz. On verrait tout de suite à la modélisation, que ces résultats sont tout à fait corrects pour la torsion. Nous ne conserverons pas toutefois cette approche.

2.3 Une modélisation subséquente de l'Astromast a été accomplie en remplaçant le plateau supérieur de 0.454 kg par trois éléments barres de section et densité uniforme reliant les sommets de la section équilatérale supérieure au centroide de la section. Ainsi un noeud supplémentaire, un 130°, a été créé à cette fin. La densité a été choisie de telle sorte que la masse des 3 éléments barres soit égale à celle du plateau de l'Astromast. La masse distribuée étant donc équivalente en fonction du rayon r à partir du centroide à celle du plateau, il s'ensuit que nous modélisons rigoureusement la même masse totale au sommet et le même moment d'inertie par rapport à l'axe longitudinal de l'Astromast. Cependant avec des éléments barres il s'ensuit une instabilité à ce 130° noeud dans la direction axiale. On aurait pu y remédier en introduisant des éléments poutres au lieu des éléments barres. On a trouvé plus expéditif d'introduire 3 diagonales supplémentaires de masse nulle entre le centroide du 130° noeud et les 3 noeuds du 41° étage.

	f(Hz)	Mode
1.	1.808	Flexion 1° mode
2.	1.808	Flexion 1° mode
3.	8.856	Torsion 1° mode
4.	13.28	Flexion 2° mode
5.	13.28	Flexion 2° mode
6.	27.29	Torsion 2° mode
7.	35.73	Flexion 3° mode
8.	35.73	Flexion 3° mode
9.	46.87	Torsion 3° mode
10.	63.88	Flexion 4° mode
11.	63.88	Flexion 4° mode
12.	67.16	Torsion 4° mode
13.	73.30	Extension 1° mode
14.	87.76	Torsion 5° mode
15.	94.81	Flexion 5° mode

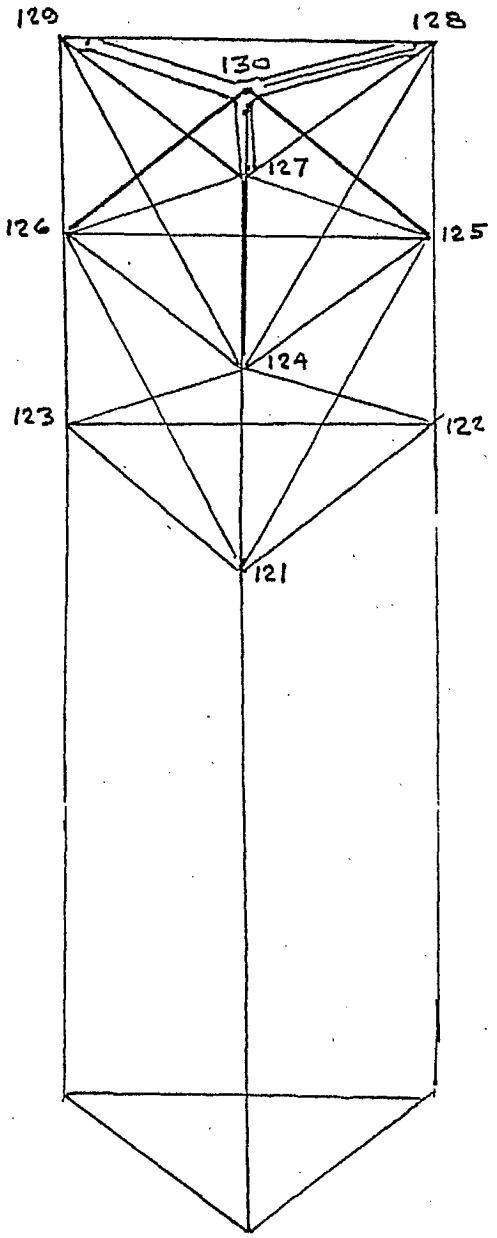


Fig. 2.4: Résultats de Satel 42.2. Eléments barres: masse distribuée au sommet.

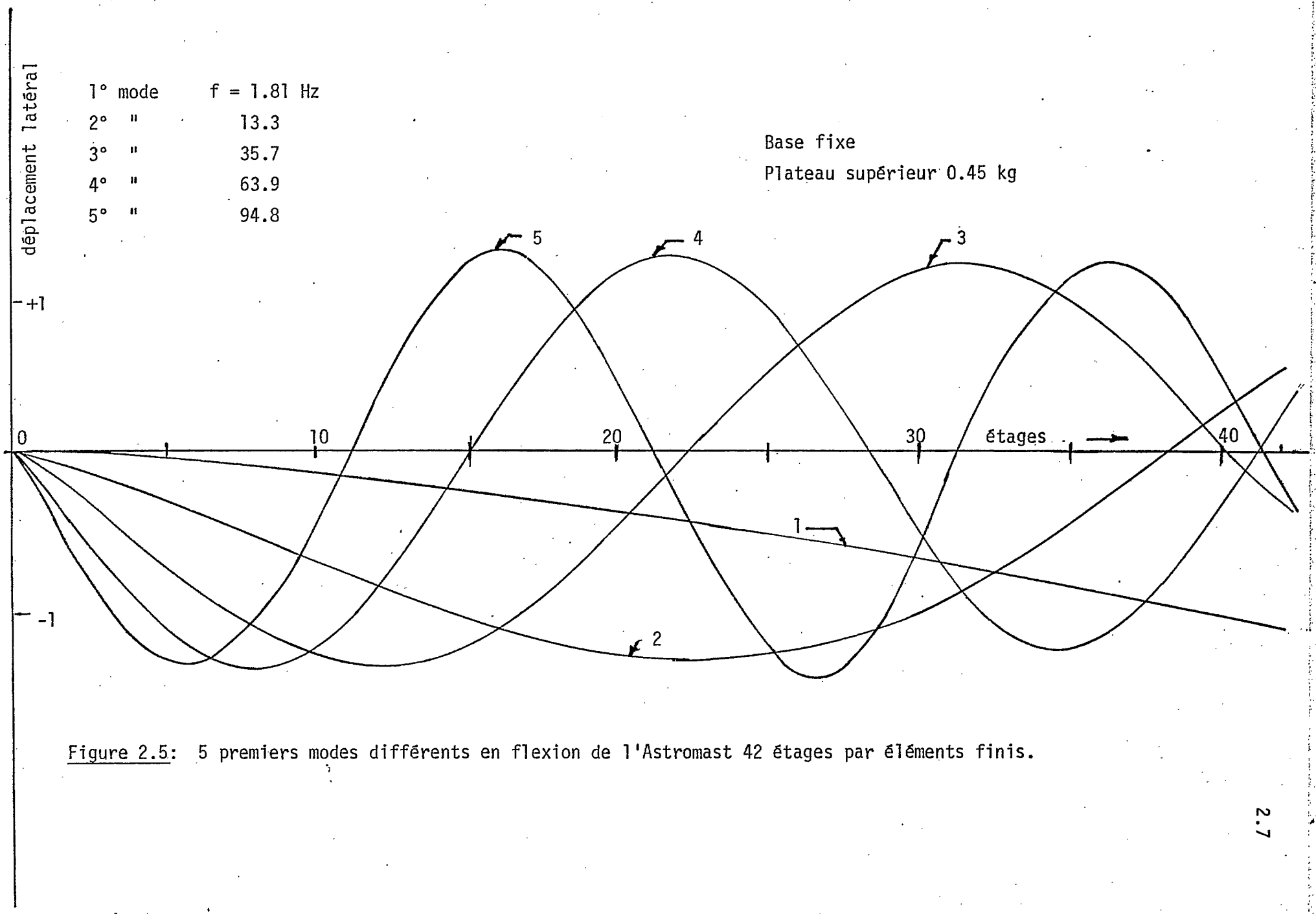


Figure 2.5: 5 premiers modes différents en flexion de l'Astromast 42 étages par éléments finis.

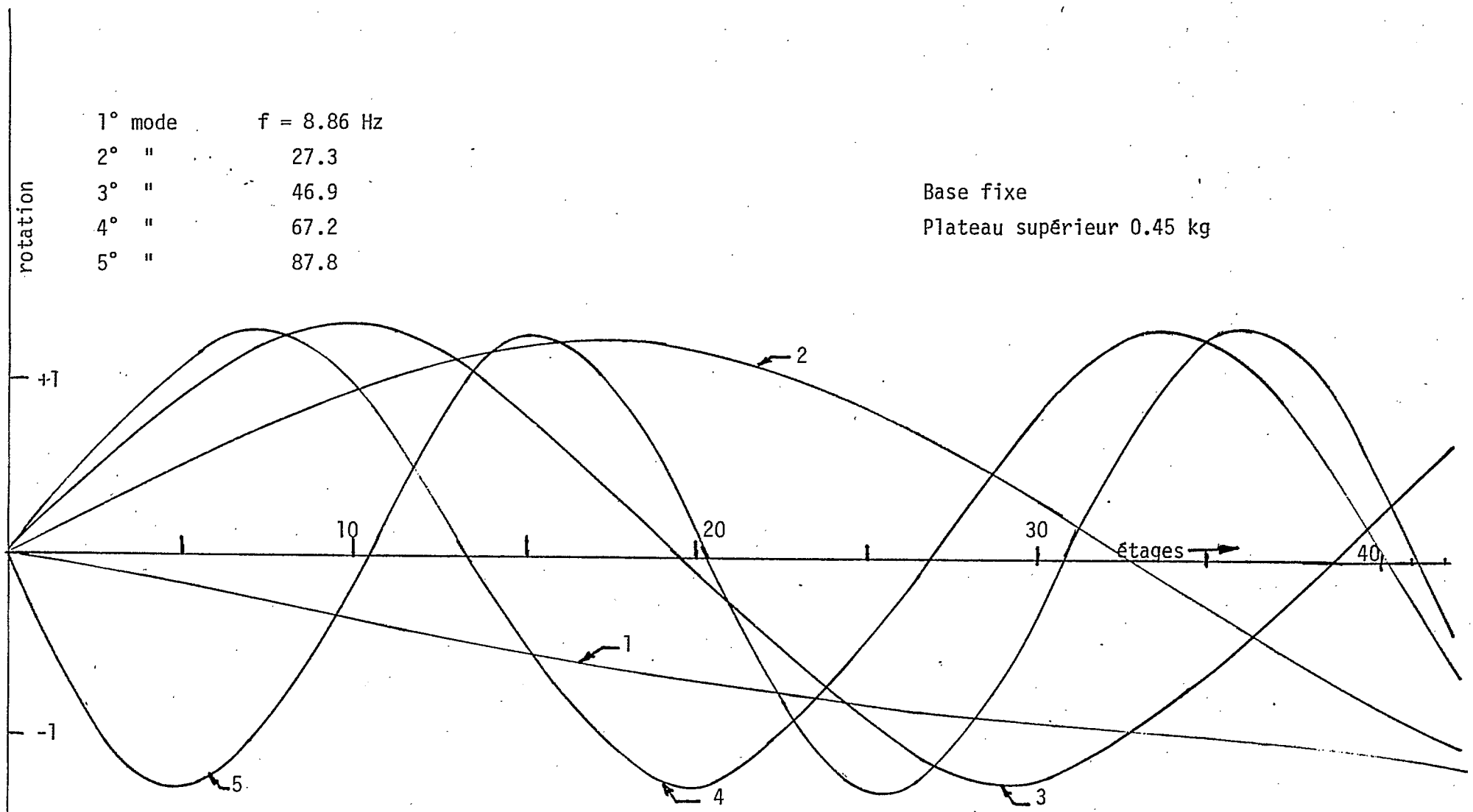


Figure 2.6: 5 premiers modes en torsion de l'Astromast de 42 étages par éléments finis.

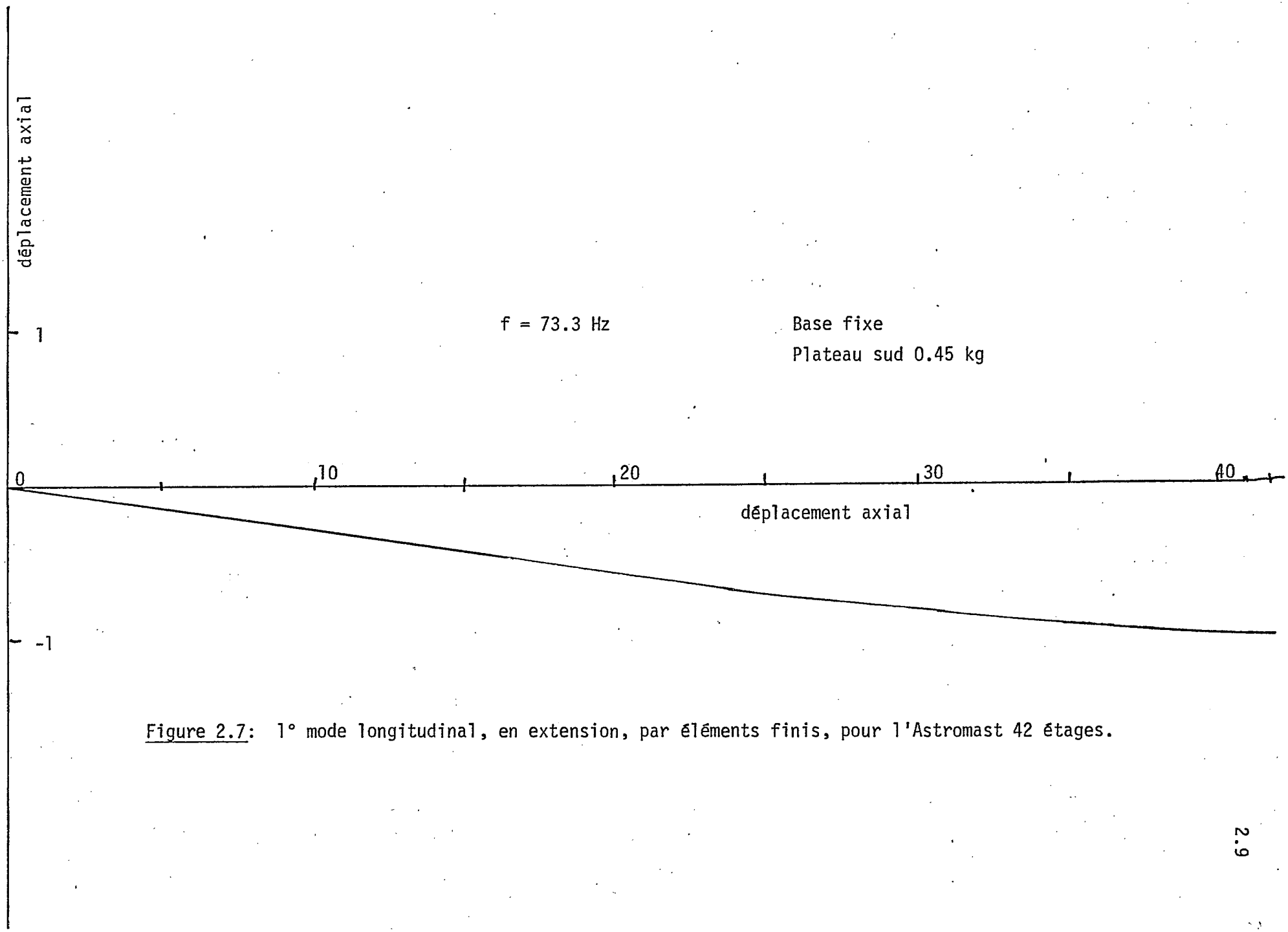


Figure 2.7: 1° mode longitudinal, en extension, par éléments finis, pour l'Astromast 42 étages.

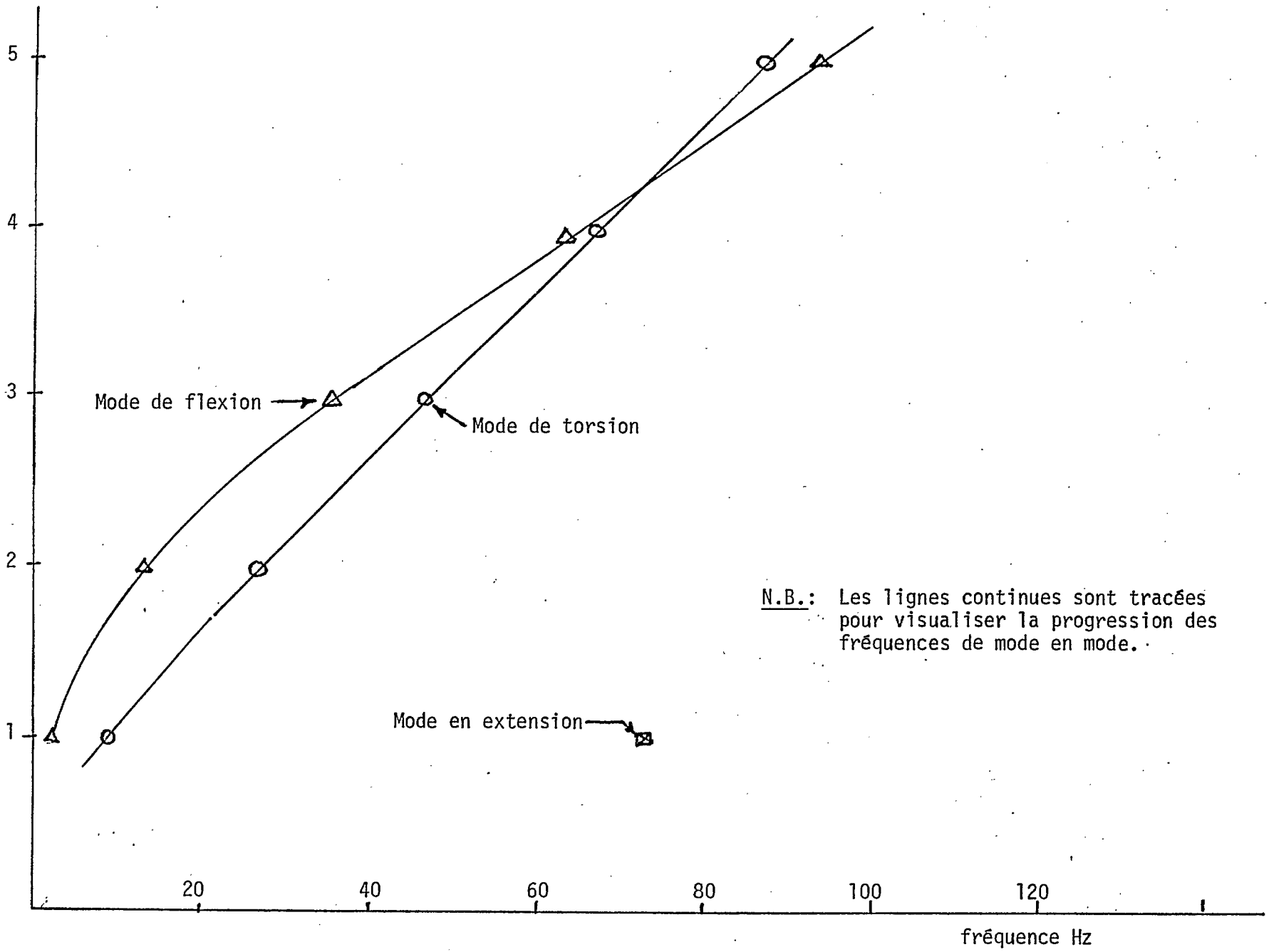


Figure 2.8: Représentation des valeurs propres par genre et par mode de l'Astromast de 42 étages (éléments finis)

Le tableau de la figure 2.4 nous donne les 15 premières valeurs propres et les modes correspondants. On y retrouve 5 modes en flexion, 5 modes en torsion et un premier mode longitudinal ou en extension. Ces modes ont été bien identifiés et leur représentation apparaît aux figures 2.5, 2.6 et 2.7. Enfin, la figure 2.8 donne un aperçu de la distribution des modes et de leur fréquence associés. On voit comment on pourrait facilement extrapoler linéairement à partir du 3° mode pour retrouver les modes successifs si le besoin s'en faisait ressentir. Enfin, le tableau de la figure 2.9 nous donne un aperçu des concordances obtenues entre les résultats observés sur les fichiers de données expérimentales des vibrations modales librement amorties, les résultats des éléments finis pour Satel 42.2 et aussi par les calculs approximatifs en premiers modes basés sur les constantes de rigidité en flexion et en extension. On pourrait bien entendu modifier légèrement ici et là un module, une densité, une masse pour améliorer tant soit peu une concordance. Nous croyons cependant en rester là pour le moment avec les meilleures valeurs expérimentales de module, de densité et de modélisation quitte à utiliser les légères divergences encore présentes afin de mieux comprendre le comportement réel de l'Astromast.

On observe donc une très bonne concordance entre les fréquences expérimentales et les fréquences du modèle d'éléments finis et même les fréquences calculées sur la base des rigidités expérimentales statiques, en ce qui concerne les modes de torsion et les modes en extension. On a de bons résultats sur le 1° mode de flexion et une divergence très faible. Les comparaisons de cette nature doivent cependant s'appliquer aux valeurs mesurées à très faible amortissement car les modes propres des éléments finis sont calculés ici sur la base d'un amortissement nul. C'est pourquoi nous avons

donné à la figure 2.9 les valeurs des fréquences mesurées au coeur de l'évolution des signaux. On note en effet au cours du temps et donc au cours des cycles, un glissement de la fréquence. Celui-ci avait été observé en 1984 sur un Astromast à 10 étages, réf.2. Le glissement des fréquences peut être dû aux effets non linéaires de la rigidité, comme on peut le constater aux figures 1.7 a) et 1.7 b). La variation des fréquences peut aussi être due à une variation du facteur amortissement. C'est bien connu pour le cas de l'amortissement visqueux. Mais il peut aussi dépendre d'un autre type d'amortissement, celui-là dû à la friction dans les articulations. La différence que l'on note entre les fréquences naturelles de 13.3 Hz au 2° mode et la fréquence mesurée de 11.9 Hz peut fort bien être due au fait qu'on a pu l'observer que sur les 6 premiers cycles où l'amortissement est encore considérable. L'excellente concordance observée sur le 2° mode en extension viendrait aussi du fait que l'amortissement y était très faible.

	Flexion 1° mode		Flexion 2° mode		Torsion 1° mode		Torsion 2° mode		Ext. 1° mode		Ext. 2° mode	
	f	δ	f	δ						δ		δ
1	11.72 Hz	0.12	10.7		8.6	0.086	26					
6			11.9					.5				
13	1.80			.25			28		77	.15	118	.04
32	1.94	0.08										
50					9.4	0.076						
El. finis Satel 42.2	1.80		13.3		8.85		27.3		73.3			
Val. app.	1.7				9.09						115	

δ_{vide} 11 Hz = .0165
26 Hz .0225
p. 4-3

Figure 2.9: Tableau comparatif des fréquences des vibrations modales librement amorties avec celles prédites par le modèle d'éléments finis Satel 42.2 et les calculs approximatifs.

CHAPITRE 3

ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX TEMPORELS

Nous avons procédé à l'analyse spectrale détaillée de 3 fichiers de données. Il s'agit des fichers BL4BK2.DT3 du 2° mode en flexion, du fichier BL6BK2.DT3 du 2° mode en torsion et du fichier BL2BK4.DT3 du mode fixe-libre en extension. Les fichiers du 1° mode sont assez explicites comme tel. Par contre, les fichiers des signaux obtenus pour les excitations en 2° mode contiennent souvent une énergie importante en 1° mode et même en mode supérieur compte tenu des imperfections dans la mise en vibrations librement amorties du système et du comportement non linéaire de ce dernier. Nous avons reproduit aux figures 3.2 à 3.4 les spectres de densité de puissance (P.S.P.) des signaux cités plus haut. Ces spectres ont été obtenus à l'aide de sous-programmes de transformées de Fourier rapide FFT suivant la méthode décrite dans notre rapport précédent, réf. [2]. Nous avons en particulier cette année fait ces transformées sur des fenêtres successives de 1024 échantillons décalées de 512 en 512 signaux, tels que montrés à la figure 3.1, de telle sorte à mettre en relief la variation globale et la variation spectrale de l'énergie.

Les spectres de puissance du signal BL4BK2.DT3 pour le 2° mode en flexion apparaissent à la figure 3.2. Nous voyons l'énergie principale concentrée autour précisément de la fréquence du second mode. Etant donné le cours intervalle de temps du signal échantillonné, la résolution en fréquence est faible et le 1° mode n'apparaît pas. Il est vrai que le fichier fait voir un signal presque pur du 2° mode. On a repris le spectre cette fois en prenant une base de temps beaucoup plus grande sur 2560 échantillons et on a obtenu une

résolution au 2 Hz. Le spectre du même signal apparaît ainsi à la figure 3.3. On voit à ce moment-là une énergie concentrée sur le 1° mode que ne faisait pas apercevoir la figure précédente.

Le PSD du 2° mode en torsion apparaît à la figure 3.5. Nous retrouvons sur ces spectres des énergies concentrées sur les trois premiers modes, c'est-à-dire autour de 9 Hz, 27 Hz et même 47 Hz en ce qui concerne la première fenêtre surtout. Le signal temporel initial était assez riche en harmoniques dans les premiers 400 ms. Par la suite, l'énergie est surtout concentrée dans le 1° mode. Enfin, la figure 3.6 nous donne la variation du spectre de puissance du signal obtenu pour le mode en extension. Ce signal particulier a été obtenu à l'aide d'un léger impact longitudinal qui, ne pouvant pas être parfaitement centré, a dû voir son énergie convertie en d'autres modes de flexion et torsion possiblement. Nous notons donc l'énergie importante évaluée autour de 77 Hz, soit la fréquence propre de ce mode fixe-libre et nous ne donnerons pas d'interprétation spéciale à l'énergie mesurée à 20 Hz qui ne correspond pas à un mode particulier connu.

Au tableau de la figure 3.7, nous avons rapporté les intégrales des spectres de puissance de ces trois cas précités et nous en profitons pour évaluer le taux d'absorption de l'énergie qui peut être relié à l'amortissement. Nous limiterons notre analyse à constater que l'amortissement actuel ou la perte d'énergie relative est de beaucoup supérieure à ce que donnent les mesures d'amortissement établies au chapitre 4 pour les composites de l'Astromast.

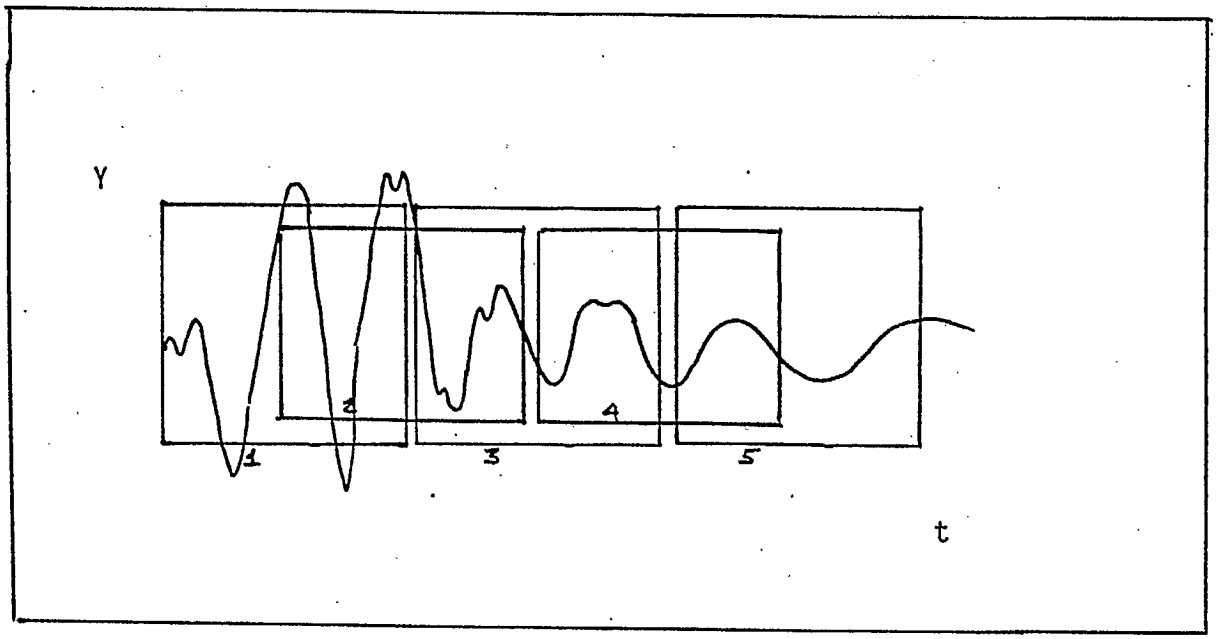


Figure 3.1: Fenêtres spectrales.

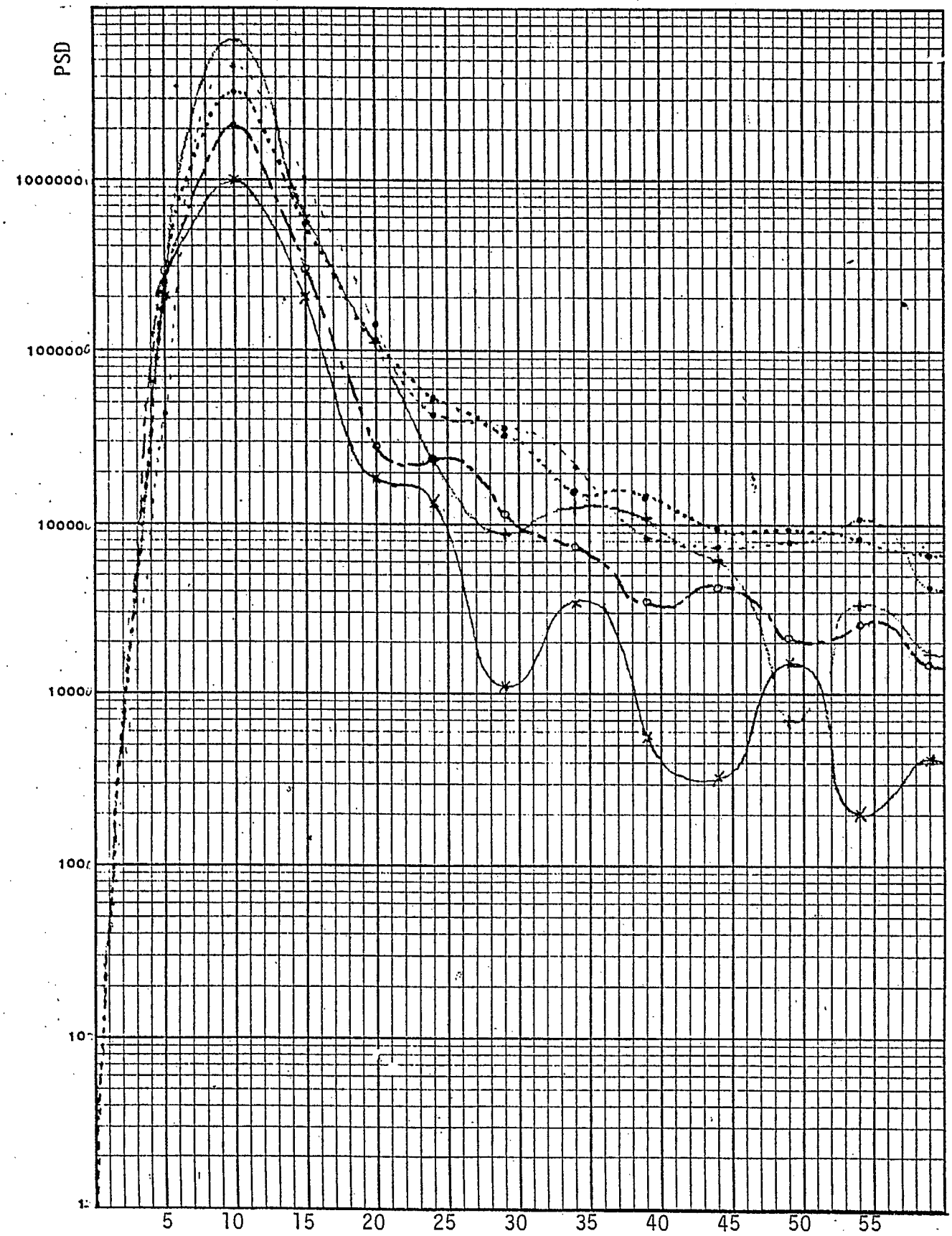


Figure 3.2: PSD du 2° mode en flexion BL4BK2.DT3

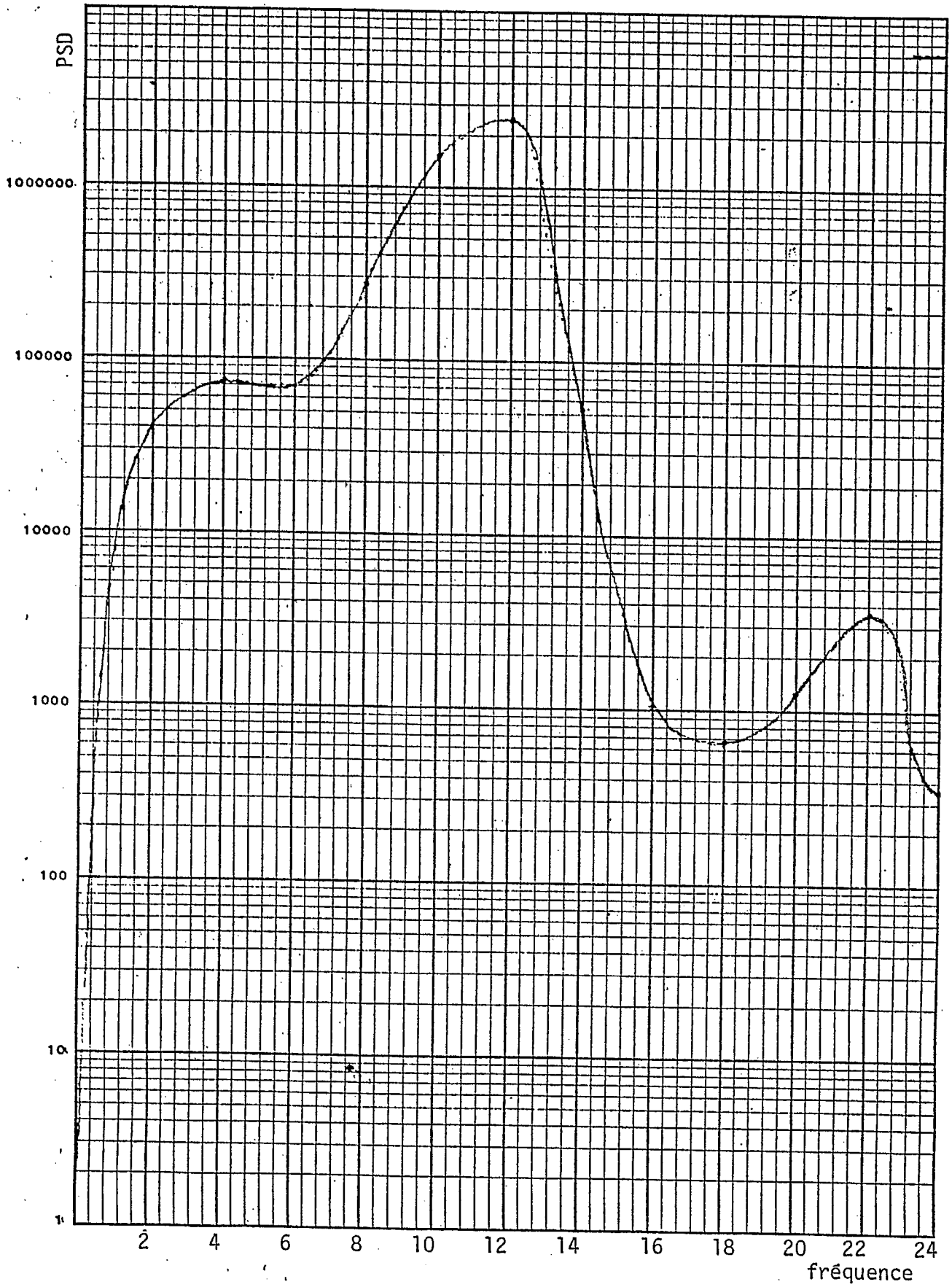


Figure 3.3: PSD du 2° mode en flexion (2560 échantillons)

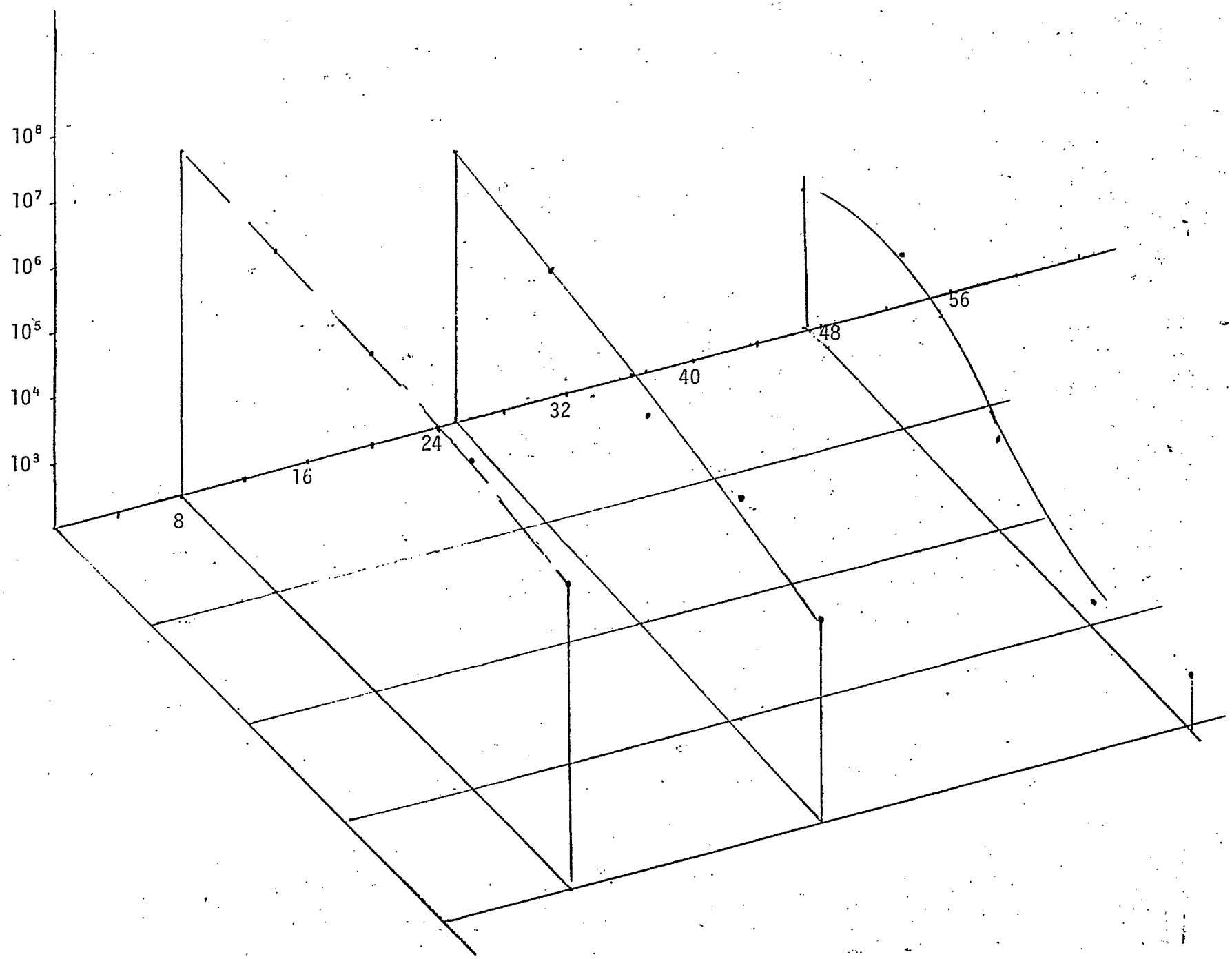


Figure 3.5: PSD du 2° mode en torsion: fichier BL6BK2.DT3

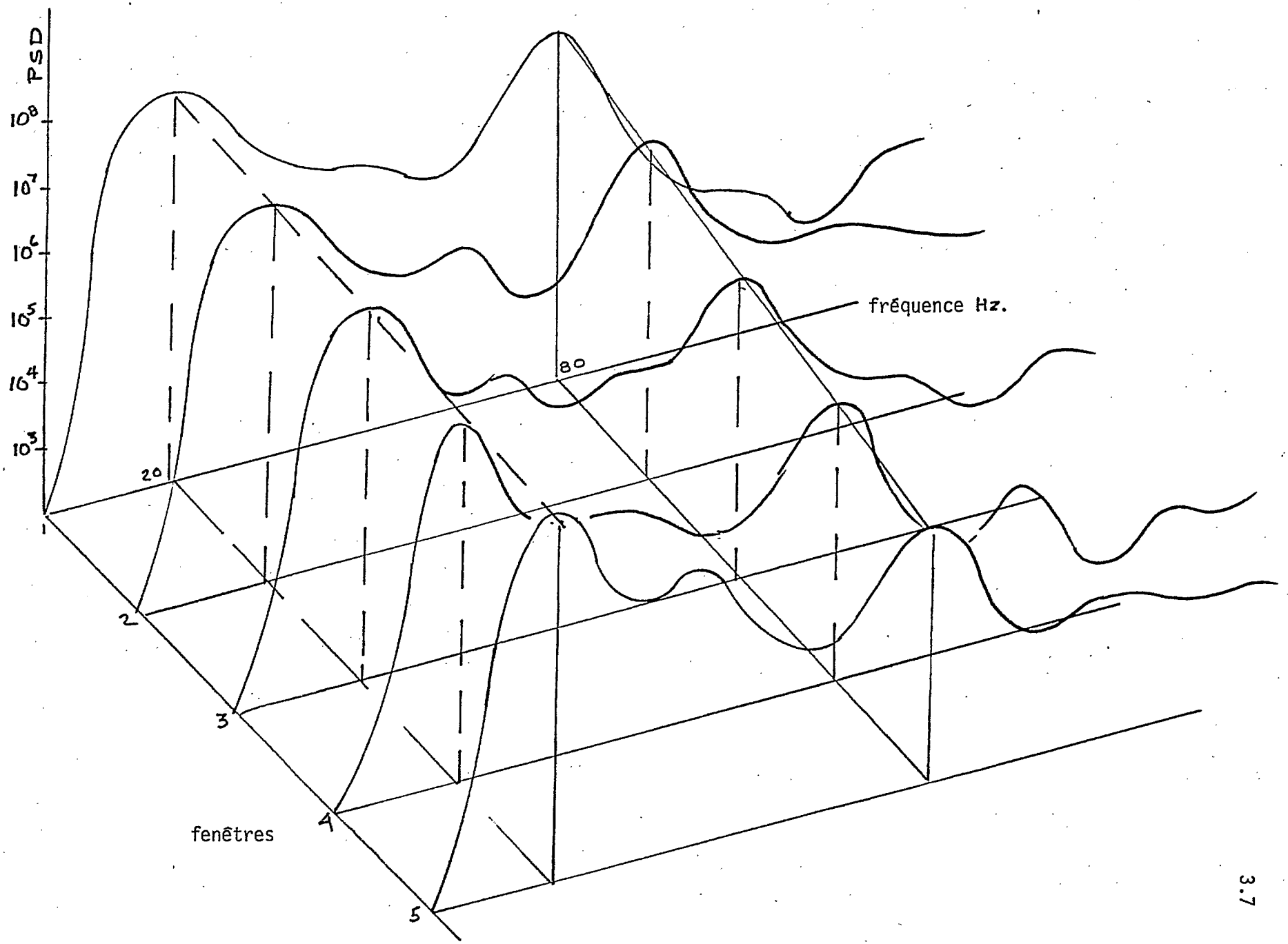


Figure 3.6: PSD du mode en extension fixe-libre: fichier BL2BK4.DT3

Cas	i	Energie spectrale U_i	Perte relative $\frac{U_{i+1} - U_i}{U_i}$	S.D.C. ψ	
	1	294.2			
	2	369.4	-		$\frac{NB^*}{f}$
Flexion	3	221.6	.392	.327	12 Hz 2° mode
	4	136.0	.386	.322	ΔU (1.2 cycle)
	5	74.9	.450	.375	
	1	75.3			
	2	95.8			
	3	68.3	.287	.125	
Torsion	4	45.5	.334	.145	f 9 Hz
	5	29.5	.352	.153	ΔU (2.3 cycle)
	1	150.3			
	2	107.8	.283	.308	
Extension	3	68.8	.362	.393	f 18 Hz
	4	51.9	.246	.267	ΔU (.92 cycle)
	5	55.5	-		

* Données pour convertir $(U_{i+1} - U_i/U_i)$ en perte d'énergie par cycle.
f fréquence dominante du signal.

Figure 3.7: Amortissement de l'Astromast (SDC).

CHAPITRE 4

CONSIDÉRATIONS SUR L'AMORTISSEMENT DE L'ASTROMAST

Les nombreuses expériences que nous avons menées sur l'Astromast de 42 étages nous ont permis de constater des amortissements assez variables d'un mode à l'autre et d'un type de mode à l'autre. L'amortissement semblait au début être surtout dépendant de la fréquence, alors que les modes de flexion et de torsion du 1° mode avaient un amortissement faible, ceux du 2° mode étaient très élevés. Nous avons aussi pensé pendant un temps que l'amortissement dû uniquement à l'air pouvait être significatif. Nous avons donc décidé de faire les essais comparatifs suivants dans l'air et sous vide d'un élément de composite du longeron de quelque 70 mm de long en vibrations de flexion du 1° mode. Une machine à vide commerciale de notre laboratoire de métallurgie a été utilisée à cette fin. Elle possède une cloche à verre d'un diamètre d'environ 35 cm. Un support spécial a été construit pour supporter le longeron et une masse a été collée à son extrémité libre pour obtenir un 1° mode en flexion à une fréquence assez basse (11 Hz).

Une jauge miniature a été collée au centre de la portée du composite afin d'obtenir un signal output proportionnel à la déformation. Un électro-aimant a aussi été installé sous la cloche à vide pour maintenir une déflexion statique initiale jusqu'au moment du déclenchement des vibrations librement amorties. Un boulon spécial a été usiné pour acheminer les câbles de la partie sous vide à l'extérieur. Les signaux ont enfin été échantillonnés à l'aide de l'oscilloscope digital mentionné plus tôt. Nous avons retenu 4 essais, dont deux sont sous vide (1 mm Hz) et deux sont à pression atmosphérique sous

la cloche à vide cependant, ce qui évite les effets de courant d'air. Une série a été faite à une fréquence de 11.7 Hz et l'autre à 26 Hz environ. Dans ce dernier cas, la masse avait été réduite considérablement pour arriver à cette fréquence toujours du 1° mode en flexion. Les signaux ne sont pas reproduits ici. Ils ont une allure exponentielle typique décroissante dès le 1° cycle. Nous avons mesuré la décroissance logarithmique sur des groupes de 10, 20, 40 cycles pour vérifier s'il y avait des variations au cours du temps. Nous n'avons trouvé que peu de variations. Elles pouvaient entre autres être attribuées à l'amplitude ou encore à une légère modulation entre des modes transversal et latéral de même fréquence. La fréquence des signaux s'est avérée constante au cours de quelques 200 cycles d'observation. Les résultats des mesures pour cet élément composite du longeron sont illustrés à la figure 3.1 et 3.2. Les valeurs des décréments logarithmiques ainsi mesurées sont valables à ± 5%. Pour les essais à la 1° fréquence de 11 Hz, le décrément logarithmique dans l'air est de 12% plus élevé que dans le vide. Pour l'essai à 26 Hz, il y a peu de différence. Encore ne faudrait-il pas imputer ces différences au composite lui-même. La masse en bout du longeron est sûrement l'élément qui fait la différence la plus importante, ne serait-ce que par la surface qu'elle offre à la résistance de l'air. Ainsi pour le 2° set d'essai à 26 Hz, la masse avait 4 fois moins de surface qu'au 1° set d'essai et cela explique pourquoi on a que peu de différence entre les essais à vide et à pression atmosphérique. Nous retiendrons donc de cet essai que celui de la mesure du décrément logarithmique dans le vide aux deux fréquences citées.

La figure 4.2 nous montre ces résultats et la dépendance du décrément sur la fréquence. Ainsi nous pourrons prendre pour les conditions de vide (1 mm Hz)

$$\delta_{(11\ Hz)} = 0.0165$$

$$\delta_{(26\ Hz)} = 0.0225$$

Ces valeurs sont à ± 30% d'une valeur centrale et indiquent donc à coup sûr, compte tenu de la précision avec lesquelles les essais furent faits une dépendance de l'amortissement du composite sur la fréquence.

Notons tout de suite que ce taux d'amortissement est très nettement inférieur à tout amortissement mesuré dans les 1° et 2° modes par des facteurs de l'ordre de 4 et plus, ce qui laisse croire que d'autres mécanismes d'absorption d'énergie, la friction dans les articulations entre autres, a joué un rôle prépondérant.

Nous pouvons aussi évaluer le SDC (Specific Damping Capacity) dénoté ψ ou encore le facteur de perte η (loss factor) à l'aide des formules suivantes, réf. [3]:

$$\psi = 2\delta \qquad \text{où } \psi = \Delta U/U$$

$$\eta = \delta/\pi = \psi/2\pi$$

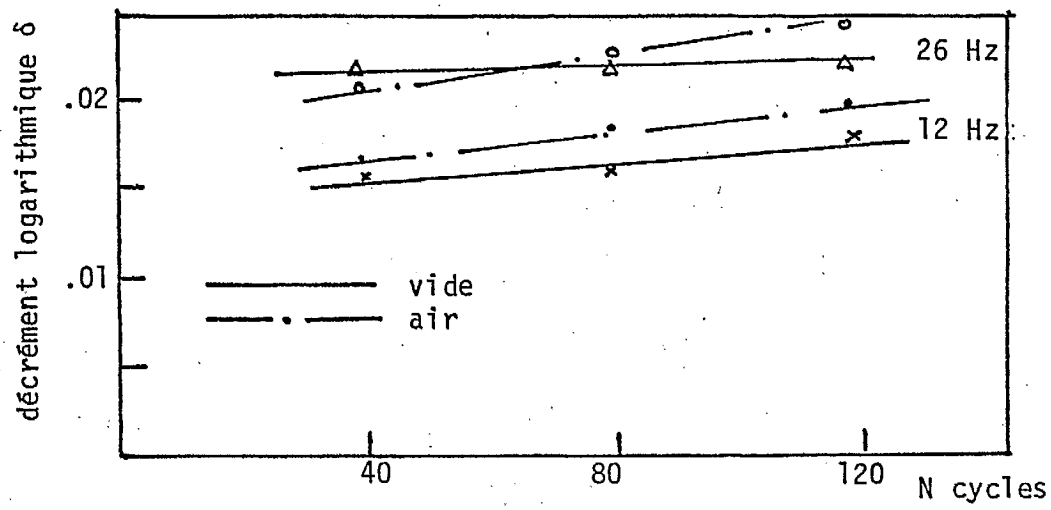


Figure 4.1: Décrément logarithmique d'un élément de longeron dans l'air et dans le vide (1 mm Hz) en fonction du temps ou du nombre de cycles.

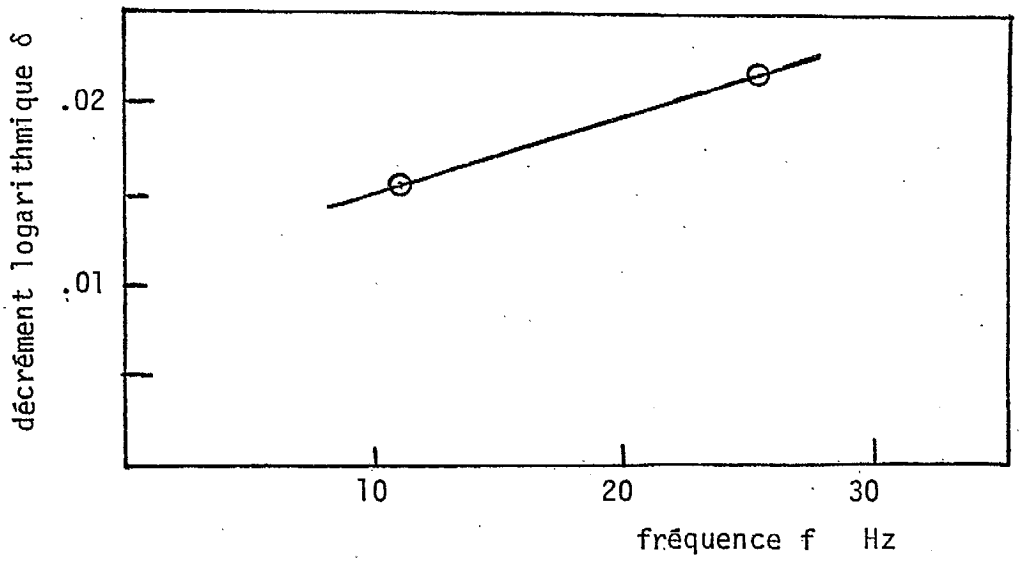


Figure 4.2: Décrément logarithmique d'un échantillon de longeron dans le vide (1 mm Hz) en fonction de la fréquence.

Recommandations

1. Modélisation par éléments finis et simulation

Nous croyons qu'il serait très indiqué, vu le succès actuel obtenu avec le présent modèle, de poursuivre la modélisation de l'Astromast en introduisant de l'amortissement structural et de l'amortissement par friction dans les articulations. De plus on pourrait utiliser les possibilités très nombreuses du code d'élément fini non linéaire pour évaluer le rôle des éléments en mode de flambage et d'effectuer des simulations de vibrations temporelles dans des conditions qui s'apparentent aux conditions spatiales.

2. Nous suggérons aussi des essais expérimentaux supplémentaires sur la présente structure de l'Astromast. Pour ces essais, la structure serait suspendue horizontalement à des éléments élastiques de très faible raideur. Il serait alors possible d'étudier le comportement temporel de la structure dans des conditions probablement plus similaires aux conditions spatiales, avec des amortissements plus faibles que ceux qui ont prévalu dans la présente étude.

CONCLUSION

Nous pouvons résumer ici en guise de conclusion les principales constatations de cette étude:

1. Les essais dans le domaine temporel de vibrations modales librement amorties d'un Astromast de 42 étages ont fourni une banque de signaux d'où l'on a pu extraire en plus des fréquences propres du système, des valeurs d'amortissement et des comportements spéciaux qui apportent un nouvel éclairage aux caractéristiques du système. En particulier, ces études ont montré que l'énergie se retrouvait surtout dans les 1° modes de flexion et de torsion alors que l'amortissement dans les seconds modes était élevé. Cependant on a noté un amortissement faible à haute fréquence pour le mode en extension libre-libre, ce qui laisse à supposer que les articulations jouent un rôle prépondérant dans l'amortissement des autres modes.

2. Un modèle d'éléments finis composé d'éléments barres dont les propriétés physiques et géométriques avaient été mesurées initialement sur des specimens a fourni une quinzaine de modes et fréquences propres correspondant aux valeurs mesurées au cours des essais. Une distribution continue de masse au dernier niveau s'est avérée nécessaire et a permis d'obtenir une très bonne corrélation pour les modes de flexion, de torsion et d'extension de la structure.

3. Les valeurs des amortissements pour la structure, constatées sur les signaux temporels sont beaucoup plus élevées que l'amortissement mesuré dans l'air ou dans le vide pour un spécimen de composite du longeron. Il est assuré pratiquement que dans les conditions d'essais de l'Astromast, l'amortissement qui provient du mouvement des articulations joue un rôle prépondérant.

Il n'est pas du tout assuré que cet amortissement soit aussi important dans l'espace. Le décrément logarithmique δ qui mesure l'amortissement du composite s'est avéré fortement dépendant de la fréquence.