



32-530-730-1

32-530-730

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT DE MECANIQUE

THESE DE MAGISTERE



POUR OBTENIR LE DIPLOME DE
MAGISTERE EN GENIE MECANIQUE
OPTION : **CONSTRUCTION**

Thème

**INTERFACE GRAPHIQUE POUR
L'ANALYSE DYNAMIQUE DES ROTORS**

Proposé et dirigé par :
Dr M.Maghraoui

Présentée par :
RAYANE KARIM

BLIDA, ALGERIE OCTOBRE 1996

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT DE MECANIQUE

THESE DE MAGISTERE

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE
MAGISTERE EN GENIE MECANIQUE
OPTION : **CONSTRUCTION**

PAR
Rayane Karim

Thème

**Interface Graphique pour
L'Analyse Dynamique des Rotors**

Présentée devant le jury constitué de :

| | |
|------------|--|
| Président | : - <i>Dr M.OUALI, M.C, U.S.T.B</i> |
| Rapporteur | : - <i>Dr M.MAGHRAOUI, M.C, U.S.T.B</i> |
| Examineurs | : - <i>Dr A.AIAD, C.C, U.S.T.B</i> - <i>Dr B.ATTAF, M.C, U.S.T.B</i> - <i>Dr M.MEGHATRIA, C.C, U.S.T.B</i> |

RÉSUMÉ

Le développement des logiciels a connu un essor gigantesque ces dernières années suite à l'apparition et l'évolution des micros ordinateurs de plus en plus puissant et offrant de plus en plus de ressources (rapidité, mémoire, qualités graphiques etc.).

Ainsi, le traitement de l'information est devenu une chose banale pour les experts comme pour les novices, grâce à cette nouvelle technologie. Le traitement graphique de l'information ou infographie est une des meilleures méthodes utilisées pour communiquer l'information.

Le travail ci présent consistait au départ à développer des routines graphiques. Ces routines étaient destinées au logiciel du projet de recherche "Analyse Dynamique des Rotors". Ce travail a pour objectif principal de faciliter l'analyse tout en diminuant les risques d'erreurs par l'utilisation des techniques de visualisation de l'information.

Le travail réalisé nous a conduit à l'élaboration d'une véritable application graphique interactive, comportant un pré-processeur pour la modélisation des systèmes de rotors et un post-processeur pour la visualisation des résultats de leurs analyses dynamiques.

Tirant partie de l'interface graphique de Windows, l'application développée permet de réaliser une analyse dynamique par modélisation graphique du système de rotor.

Le modèle est visualisé graphiquement avec tous ses composants. La possibilité d'édition des données du modèle permet de réaliser une vraie conception assistée par ordinateur (CAO) d'une machine tournante basée sur la visualisation des résultats des analyses sous forme de graphique (ou animation).

L'environnement graphique Windows de Microsoft rend ce logiciel très puissant en tirant profit des avantages offerts par la compatibilité.

Le logiciel développé est un véritable outil de conception et d'analyse de la dynamique des machines tournantes, l'environnement graphique Windows de Microsoft le rend très interactif et offre une plate forme pour des évolutions futures.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche intitulé « Analyse Dynamique des Rotors » agréé sous le code N° J0901/03/07/93.

à mon père , ma mère
à toute la famille

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction | 1 |
| Chapitre I Synthèse bibliographique | 5 |
| Introduction à la CAO | 6 |
| Définition de la CAO | 7 |
| Interfaces | 7 |
| Analyse Dynamique des rotors | 7 |
| Chapitre II Modélisation des Systèmes de rotors | 8 |
| 2.1 Modèle mathématique des systèmes de rotors | 9 |
| 2.1.1 Hypothèses | 9 |
| 2.1.2 Equations de mouvement | 10 |
| 2.1.3 Effet gyroscopique | 12 |
| 2.1.4 Forces de liaison (Palier/arbre) | 14 |
| 2.1.4.1 Hypothèses | 14 |
| 2.1.4.2 Coefficients dynamiques du palier | 16 |
| 2.1.4.3 Coefficients de raideur et d'amortissement | 17 |
| 2.2 Analyse dynamique | 19 |
| 2.2.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 19 |
| 2.2.2 Problème aux valeurs propres amorti | 20 |
| 2.2.3 Réponse harmonique permanente | 21 |
| 2.2.4 Analyse de stabilité | 22 |
| 2.2.4.1 Calcul des valeurs propres | 22 |
| 2.2.4.2 Energie du système | 22 |
| Chapitre III Implémentation de l'interface graphique | |
| 3.1 Pré-processeur | 24 |
| 3.1.1 Définitions | 24 |
| 3.1.2 Préparation du modèle | 24 |
| 3.1.3 Fenêtre modèle | 26 |
| 3.1.3.1 Fenêtre modèle en projection plane | 26 |
| 3.1.3.2.1 Barre d'outils | 26 |
| 3.1.3.3.2 Evénements associés | 27 |
| 3.1.3.4.3 Fonctions | 29 |
| 3.1.3.2 Fenêtre modèle en perspective | 37 |
| 3.1.3.2.1 Edition du modèle en 3D avec rendu réaliste | 37 |
| 3.1.3.2.2 Evénements associés | 41 |
| 3.1.3.2.3 Fonctions | 41 |
| 3.1.4 Fenêtre pression de palier | 44 |
| 3.1.4.1 Evénements associés | 44 |
| 3.1.4.1.1 Initialiser | 44 |
| 3.1.4.1.2 Dessiner | 44 |
| 3.1.4.2 Fonctions | 44 |
| 3.1.4.2.1 Option pression de palier | 44 |
| 3.1.4.2.2 Menu flottant | 46 |
| 3.1.4.2.3 Copie de la fenêtre en mémoire | 46 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 3.2 Processeur | 47 |
| 3.2.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 47 |
| 3.2.2 Problème aux valeurs propres amorti | 47 |
| 3.2.3 Analyse de stabilité | 47 |
| 3.2.4 Réponse harmonique permanente | 47 |
| 3.2.4.1 Amplitudes de vibration | 47 |
| 3.2.4.2 Angle de phase | 48 |
| 3.2.4.3 Orbites de vibration | 48 |
| 3.2.4.4 Déformée du rotor | 48 |
| 3.2.5 Lissage des données | 49 |
| 3.3 Post-Processeur | 49 |
| 3.3.1 Graphes de type XY | 49 |
| 3.3.1.1 Barre d'outils | 49 |
| 3.3.1.2 Modes de vibration | 50 |
| 3.3.1.3 Amplitudes de vibration | 51 |
| 3.3.1.4 Angle de phase | 51 |
| 3.3.1.5 Orbites de vibration | 52 |
| 3.3.1.6 Graphiques d'analyse de stabilité | 52 |
| 3.3.1.7 Evénements associés | 52 |
| 3.3.1.7.1 Initialiser | 52 |
| 3.3.1.7.2 Dessiner | 52 |
| 3.3.1.7.3 Effacer | 52 |
| 3.3.1.7.4 Imprimer | 52 |
| 3.3.1.8 Fonctions | 52 |
| 3.3.1.8.1 Titres du graphe | 53 |
| 3.3.1.8.2 Options du graphe | 54 |
| 3.3.1.8.3 Copie en mémoire | 54 |
| 3.3.1.8.4 Menu flottant | 54 |
| 3.3.2 Représentation de Nyquist | 54 |
| 3.3.2.1 Fonctions | 54 |
| 3.3.2.1.1 Trouver Instabilité | 55 |
| 3.3.2.1.2 Lecture Valeurs | 55 |
| 3.3.2.1.3 Couleur | 55 |
| 3.3.2.1.4 Copier | 55 |
| 3.3.2.1.5 Imprimer | 56 |
| 3.3.2.2 Barre d'outils | 57 |
| 3.3.3 Déformée du rotor | 57 |
| 3.3.3.1 Barre d'outils | 57 |
| 3.3.3.2 Ligne d'état | 58 |
| 3.3.3.3 Représentation en perspective | 58 |
| 3.3.3.4 Représentation orbitale | 59 |
| 3.3.4 Gestionnaire de projets | 61 |
| 3.3.4.1 Description du gestionnaire de projets | 61 |
| 3.3.4.1.1 Barre d'outils | 62 |
| 3.3.4.1.2 Arborescence | 62 |
| 3.3.4.1.3 Ligne d'état | 62 |
| 3.3.4.2 Utilisation du gestionnaire de projets | 63 |
| 3.3.4.2.1 Nouveau projet | 63 |
| 3.3.4.2.2 Ouvrir projet | 63 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 3.3.4.2.3 Enregistrer projet | 63 |
| 3.3.4.2.4 Fermer projet | 63 |
| 3.3.4.2.5 Ajouter fichier | 63 |
| 3.3.4.2.6 Supprimer fichier | 63 |
| | |
| Chapitre IV Applications | |
| 4.1 Application à un rotor de laboratoire | 65 |
| 4.1.1 Données du modèle | 65 |
| 4.1.2 Analyse et résultats | 66 |
| 4.1.2.1 Cas de paliers à coefficients constant | 66 |
| 4.1.2.1.1 Problème aux valeurs propres | 66 |
| 4.1.2.1.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 66 |
| 4.1.2.1.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 67 |
| 4.1.2.1.2 Réponse permanente | 67 |
| 4.1.2.2 Utilisation de paliers hydrodynamiques | 69 |
| 4.1.2.2.1 Problème aux valeurs propres | 69 |
| 4.1.2.2.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 69 |
| 4.1.2.2.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 69 |
| 4.1.2.2.2 Réponse permanente | 69 |
| 4.1.2.2.3 Analyse de stabilité | 71 |
| 4.2 Application à une pompe alimentaire centrifuge multi étagée | 74 |
| 4.2.1 Données du modèle | 75 |
| 4.2.1.1 Composants du modèle | 75 |
| 4.2.1.2 Paliers | 77 |
| 4.2.2 Modélisation | 77 |
| 4.2.3 Analyse et résultats | 79 |
| 4.2.3.1 Problème aux valeurs propres | 79 |
| 4.2.3.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 79 |
| 4.2.3.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 80 |
| 4.2.3.2 Réponse permanente | 80 |
| 4.2.3.2.1 Amplitudes de vibration | 80 |
| 4.2.3.2.2 Phase de vibration | 80 |
| 4.2.3.2.3 Orbites de vibration | 81 |
| 4.2.3.2.4 Déformée du modèle | 81 |
| 4.2.4 Simulation de l'usure des joints étanches | 83 |
| 4.2.4.1 Etude avec performances de paliers à 0% | 83 |
| 4.2.4.1.1 Problème aux valeurs propres | 83 |
| 4.2.4.1.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 83 |
| 4.2.4.1.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 83 |
| 4.2.4.1.2 Réponse permanente | 84 |
| 4.2.4.1.3 Analyse de stabilité | 85 |
| 4.2.4.2 Etude avec performances de paliers à 20% | 85 |
| 4.2.4.2.1 Problème aux valeurs propres | 85 |
| 4.2.4.2.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 85 |
| 4.2.4.2.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 86 |
| 4.2.4.2.2 Réponse permanente | 86 |
| 4.2.4.3 Etude avec performances de paliers à 50% | 88 |
| 4.2.4.3.1 Problème aux valeurs propres | 88 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 4.2.4.3.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 88 |
| 4.2.4.3.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 88 |
| 4.2.4.3.2 Réponse permanente | 88 |
| 4.2.4.3.3 Analyse de stabilité | 90 |
| 4.2.4.4 Etude avec performances de paliers à 80% | 90 |
| 4.2.4.4.1 Problème aux valeurs propres | 90 |
| 4.2.4.4.1.1 Problème aux valeurs propres non amorti | 90 |
| 4.2.4.4.1.2 Problème aux valeurs propres amorti | 90 |
| 4.2.4.4.2 Réponse permanente | 91 |
| 4.2.4.4.3 Analyse de stabilité | 92 |
| Conclusion | 94 |
| Références | |
| Annexes | |
| Annexe A : Quelques définitions | |
| Annexe B : Introduction à Windows | |
| Annexe C : Norme GKS | |
| Annexe D : Organigrammes des options d'analyse | |
| Annexe E : Contraintes de développement d'exploitation et de maintenance | |
| Annexe F : CAO état de l'art et nouvelle approche | |
| Annexe G : Elimination des parties cachées | |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Chapitre II : Modélisation mathématique des systèmes de rotors | 9 |
| Figure 2.1-1 Modèle du rotor | 10 |
| Figure 2.1-2 Système de coordonnées | 13 |
| Figure 2.1-3 Moment gyroscopique | 14 |
| Figure 2.1-4 Composante de la vitesses absolue de surfaces en mouvement relatif dans le plan xy d'un ($V_z = 0$) | 15 |
| Figure 2.1-5 Géométrie d'un palier cylindrique | 16 |
| Figure 2.1-6 Géométrie d'un palier dynamiquement chargé | |
| | |
| Chapitre III : Implémentation de l'interface graphique | 26 |
| Figure 3.1-1 Fenêtre modèle | 26 |
| Figure 3.1-2 Barre d'outils du modèle | 27 |
| Figure 3.1-3 Schématisation adoptée | 28 |
| Figure 3.1-4 Mise en page de la fenêtre modèle | 30 |
| Figure 3.1-5 Sélection du type de palier | 30 |
| Figure 3.1-6 Saisie des caractéristiques du palier pour le calcul des coefficients | 31 |
| Figure 3.1-7 Boite dialogue propriétés matériaux | 33 |
| Figure 3.1-8 Boite de dialogue insertion nouvel objet | 33 |
| Figure 3.1-9 Boite de dialogue suppression objet | 34 |
| Figure 3.1-10 Boite de dialogue duplication objet | 34 |
| Figure 3.1-11 Boite de dialogue déplacement objet | 35 |
| Figure 3.1-12 Boite de dialogue paramètres modèle | 36 |
| Figure 3.1-13 Exemple de fonction copier coller Modèle sans à mise l'échelle | 36 |
| Figure 3.1-14 Exemple de la fonction copier coller modèle avec mise à l'échelle | 38 |
| Figure 3.1-15 Représentation perspective adoptée | 38 |
| Figure 3.1-16 Cylindre et sa discrétisation | 40 |
| Figure 3.1-17 Décomposition du palier en éléments simples | 40 |
| Figure 3.1-18 Extrusion du palier suivant la direction de la projection | 40 |
| Figure 3.1-19 Décomposition du support de palier en élément simples | 41 |
| Figure 3.1-20 Extrusion du support de palier suivant la direction de la projection | 41 |
| Figure 3.1-21 Représentation du modèle en 3D par défaut | 41 |
| Figure 3.1-22 Vue Axiale | 42 |
| Figure 3.1-23 Perspective | 42 |
| Figure 3.1-24 Vue de face | 42 |
| Figure 3.1-25 Toutes les Vues | 43 |
| Figure 3.1-26 Saisie des stations pour le zoom sur représentation perspective | 43 |
| Figure 3.1-27 Zoom sur le modèle Stations (14 à 19) | 44 |
| Figure 3.1-28 Représentation de la pression en perspective | 45 |
| Figure 3.1-29 Options représentation de la pression | 45 |
| Figure 3.1-30 Représentation de la pression en lignes de niveau | 46 |
| Figure 3.1-31 Représentation orbitale de la pression | 48 |
| Figure 3.2-1 Boite de dialogue de saisie des options de lissage | 49 |
| Figure 3.3-1 Barre d'outil fenêtre graphe XY | 49 |
| Figure 3.3-2 Modes de vibrations | 50 |
| Figure 3.3-3 Tableau illustrant les fréquences naturelles et les modes associés | 50 |
| Figure 3.3-4 Amplitude de vibrations | 51 |
| Figure 3.3-5 Phase de vibration | 51 |
| Figure 3.3-6 Orbite de vibration à la station N° 4 vitesse 2800 rpm | 52 |
| Figure 3.3-7 Partie réelles de la solution complexe | 53 |
| Figure 3.3-8 Boite de dialogue titres du graphe | |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 3.3-9 Boite de dialogue options courbes | 53 |
| Figure 3.3-10 Boite de dialogue zoom sur le graphe | 54 |
| Figure 3.3-11 Ligne d'état de la fenêtre Nyquist | 55 |
| Figure 3.3-12 Sélection de la couleur pour les courbes (Nyquist) | 55 |
| Figure 3.3-13 Barre d'outils fenêtre Nyquist | 56 |
| Figure 3.3-14 Exemple de représentation de Nyquist | 56 |
| Figure 3.3-15 Exemple d'un zoom de la figure 3.3-14 | 56 |
| Figure 3.3-16 Vue des données des courbes de Nyquist | 57 |
| Figure 3.3-17 Barre d'outils déformée du rotor | 57 |
| Figure 3.3-18 Ligne d'état déformée du rotor | 57 |
| Figure 3.3-19 Représentation en perspective de la déformée du rotor | 58 |
| Figure 3.3-20 Représentation des orbites de la déformée du rotor | 58 |
| Figure 3.3-21 Gestionnaire de projet | 61 |
| Figure 3.3-22 Barre d'outils du gestionnaire de projets | 61 |
| Figure 3.3-23 Arborecence du projet | 62 |
| Figure 3.3-24 Ligne d'état du gestionnaire de projet | 62 |

Chapitre IV : Applications

| | |
|---|----|
| Figure 4.1-1 Rotor de laboratoire | 65 |
| Figure 4.1-2 Dessin avec mise à l'échelle | 65 |
| Figure 4.1-3 Modes propres de vibration | 66 |
| Figure 4.1-4 Amplitude de vibration direction x (toutes les stations) | 67 |
| Figure 4.1-5 Angle de phase de vibration direction x (toutes les stations) | 67 |
| Figure 4.1-6 Orbite de vibration à 2800 rpm (toutes les stations) | 68 |
| Figure 4.1-7 Orbite de vibration à 3000 rpm (toutes les stations) | 68 |
| Figure 4.1-8 Déformée du modèle à 2900 rpm | 68 |
| Figure 4.1-9 Modes propres de vibration | 69 |
| Figure 4.1-10 Amplitude de vibration direction x (toutes les stations) | 69 |
| Figure 4.1-11 Angle de phase de vibration direction x (toutes les stations) | 70 |
| Figure 4.1-12 Orbite de vibration à 3000 rpm | 70 |
| Figure 4.1-13 Animation de la déformée à 3834 rpm | 70 |
| Figure 4.1-14 Partie réelle de la solution complexe modes (1-6) | 71 |
| Figure 4.1-15 Diagramme de Nyquist modes (1-5) | 71 |
| Figure 4.1-16 Diagramme de Nyquist mode N°1 | 71 |
| Figure 4.1-17 Diagramme de Nyquist mode N°2 | 72 |
| Figure 4.1-18 Diagramme de Nyquist mode N°7 | 72 |
| Figure 4.1-19 Diagramme de Campbell | 72 |
| Figure 4.1-20 Zoom sur le diagramme de Campbell | 73 |
| Figure 4.2-1 Dessin d'ensemble de la pompe alimentaire multi-étagée | 74 |
| Figure 4.2-2 Schématisation de la pompe multi-étagée | 74 |
| Figure 4.2-3 Modèle discret de la pompe | 75 |
| Figure 4.2-4 Modèle avec dessin préalable | 77 |
| Figure 4.2-5 Modèle avec dessin mis à l'échelle | 78 |
| Figure 4.2-6 Zoom 3D du modèle stations 8-10 | 79 |
| Figure 4.2-7 Modes propres de vibration | 79 |
| Figure 4.2-8 Amplitude de vibration stations (1-5) | 80 |
| Figure 4.2-9 Phase de vibration stations (1-5) | 80 |
| Figure 4.2-10 Orbites de vibration stations (1-5) à 5600 rpm | 81 |
| Figure 4.2-11 Déformée du modèle à la vitesse de 2792 rpm | 81 |
| Figure 4.2-12 Déformée du modèle à la vitesse nominale 5600 rpm | 82 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 4.2.4.1-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm | 83 |
| Figure 4.2.4.1-2 Amplitude de vibration direction x (stations 1-5) | 84 |
| Figure 4.2.4.1-3 Angle de phase de vibration direction x stations (1-5) | 84 |
| Figure 4.2.4.1-4 Orbites de vibration à 5600 rpm stations (1-5) | 84 |
| Figure 4.2.4.1-5 Déformée du modèle à la vitesse de 2972 rpm (échelle =2) | 85 |
| Figure 4.2.4.1-6 Partie réelle de la solution complexe | 85 |
| Figure 4.2.4.2-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm | 86 |
| Figure 4.2.4.2-2 Amplitude de vibration direction x (stations 1-5) | 86 |
| Figure 4.2.4.2-3 Angle de phase direction x stations (1-5) | 87 |
| Figure 4.2.4.2-4 Orbite de vibration à 5600 rpm stations (1-5) | 87 |
| Figure 4.2.4.2-5 Déformée du modèle à la vitesse de 3548 rpm (échelle =20) | 87 |
| Figure 4.2.4.3-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm | 88 |
| Figure 4.2.4.3-2 Amplitude de vibration direction x (stations 1-5) | 88 |
| Figure 4.2.4.3-3 Angle de phase direction x stations (1-5) | 89 |
| Figure 4.2.4.3-4 Orbites de vibration à 5600 rpm stations (1-5) | 89 |
| Figure 4.2.4.3-5 Déformée du modèle à la vitesse de 4880 rpm (échelle =40) | 89 |
| Figure 4.2.4.3-6 Partie réelle de la solution complexe | 90 |
| Figure 4.2.4.4-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm | 90 |
| Figure 4.2.4.4-2 Amplitude de vibration direction x (stations 1-5) | 91 |
| Figure 4.2.4.4-3 Angle de phase direction x stations (1-5) | 91 |
| Figure 4.2.4.4-4 Orbites de vibration à 5600 rpm stations (1-5) | 91 |
| Figure 4.2.4.4-5 Déformée du modèle à la vitesse de 5600 rpm (échelle =40) | 92 |
| Figure 4.2.4.4-6 Partie réelle de la solution complexe | 92 |

PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES

Le repère étant ramené a un trièdre ortho-normé Oxyz direct :

| | |
|----------------|---|
| q_i | : Coordonnées généralisées |
| x_i | : Déplacement généralisé (station i) suivant axe Ox |
| y_i | : Déplacement généralisé (station i) suivant axe Oy |
| θ_i | : Rotation généralisé (autour de l'axe i) |
| [M] | : Matrice masse |
| [K] | : Matrice de rigidité |
| [C] | : Matrice amortissement |
| M_i | : Masses concentrées |
| k_{ij}^p | : Coefficient de rigidité concentré |
| c_{ij}^p | : Coefficient d'amortissement concentré |
| V | : Energie potentielle |
| T | : Energie cinétique |
| Q_i | : Composantes de forces Généralisées |
| $\{F(t)\}$ | : Forces d'excitation |
| L | : Longueur d'élément d'arbre |
| \vec{H} | : Moment angulaire d'un disque autour du centre de rotation |
| $\vec{\Omega}$ | : Vecteur vitesse de rotation |
| M G | : Moment gyroscopique |
| H | : Distance locale entre les surfaces (supposée petite) |
| P | : Pression locale. |
| U_i, V_i | : Composantes de la vitesse de chaque surface (i=1,2). |
| R | : Rayon de l'arbre |
| D | : Diamètre de l'arbre |
| S | : Nombre de Somerfeld |
| h_{min} | : Epaisseur minimale du film fluide. |
| Q | : Flux de lubrifiant |
| c | : Jeux radial |
| e | : Excentricité relative |
| N | : Vitesse de rotation |
| W | : Charge sur le palier |
| f | : Coefficient de frottement |
| \bar{q} | : Coefficient de flux de lubrifiant |
| ψ | : Angle de calage |
| φ | : Angle de phase |
| ω | : Fréquence de rotation du rotor |
| q_0 | : Amplitude de vibration |
| θ | : Angle de phase de vibration |
| E_{cyc} | : Energie par cycle pour un mouvement harmonique |
| $\{P\}$ | : Vecteur Force non conservatif |

| | |
|----------|---|
| Narbre | : Nombre d'arbre du modèle |
| Ndisc | : Nombre de disques du modèle |
| Npal | : Nombre de paliers |
| Nped | : Nombre de support de paliers |
| Nbal | : Nombre de balourd |
| Nmc | : Nombre de Masses concentrées |
| E | : Module d'élasticité (Module de Young) |
| I | : Module d'inertie de la section de l'arbre |
| I_p | : Moment d'inertie polaire |
| I_t | : Moment d'inertie transversal |
| G | : Module de rigidité en torsion |
| γ | : Coefficient de poisson |
| rho | : Densité du matériau |
| ρ | : Densité du fluide. |
| μ | : Viscosité du fluide. |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les techniques liées à l'introduction de l'informatique dans le processus de conception, simulation et de suivi industriel imposent aux entreprises une mutation très rapide.

En effet dans l'industrie, la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) [1] a bouleversé les pratiques qui n'avaient subi depuis des décennies que des modifications de forme (moyens) plutôt que sur le fond (principes de ces moyens). Le té, l'équerre, le compas le réglet, la planche à dessin, la calculatrice et tous les outils traditionnels ont fait place à l'ordinateur.

Les techniques de CAO deviennent indispensables dès lors que les délais d'étude diminuent et que les formes des objets à concevoir deviennent complexes ou doivent être optimisées pour augmenter leurs performances et diminuer leurs coûts. Née il y a 30 ans déjà la CAO permet aujourd'hui l'utilisation de logiciels et des bases de données à différents stades d'un processus de conception [2].

Les performances du matériel informatique et principalement les stations de travail qui allient rapidité de calcul et traitement d'une multitude d'objets complexes, autorisent l'utilisation de logiciels qui ne sont plus que des outils de représentation mais aussi de conception.

La méthode de calcul par éléments finis existe déjà depuis de nombreuses années et permet l'étude du comportement des structures et des matériaux [3]. Beaucoup de développements sont en cours de réalisation dans les pays développés et restent à réaliser chez nous; pour que l'informatique devienne un outil efficace aux différentes étapes de la vie industrielle d'un produit.

La normalisation de standards d'échanges entre ordinateurs et logiciels, l'intégration des différentes applications autour d'un seul type de base de donnée, l'adaptation des fonctionnalités des logiciels aux différents corps de métiers sont les principales préoccupations des constructeurs de matériel et développeurs de logiciels pour que la modernisation des outils de conception et simulation se poursuive [4].

INTRODUCTION

Le thème de la recherche qui fait face à un des problèmes fondamentaux que rencontrent les concepteurs de machines tournantes est que ces derniers soient les plus fiables possibles, et répondent au cahier des charges sur celles ci (normes, résistance, charge, durée de vie) [4,2].

Notre objectif principal est donc de mettre au point un outil d'aide à la conception de rotors et d'analyse des machines tournantes existantes avec le souci majeur de se rapprocher le plus possible de la réalité en respectant les contraintes qualitatives et quantitatives du problème:

- Interface utilisateur ergonomique.
- Visualisation de tous les types de graphiques résultant de l'analyse.
- Modèle avec un nombre important de stations.
- Minimisation des risques d'erreurs.

La dynamique des rotors s'occupe principalement des vibrations des machines tournantes des efforts de prédiction et de contrôle des vibrations du rotor dont les limites satisfaisantes sont

INTRODUCTION

INTRODUCTION
simulation

INTRODUCTION

typiquement destinées à satisfaire les conditions de très grande vitesse et de très haute énergie des arbres des machines tournantes [5].

Pour l'analyse dynamique des rotors, la prédiction des caractéristiques suivantes est typiquement l'information à calculer : vitesse critique, réponse permanente, et seuil d'instabilité.

La recherche en dynamique des rotors a pour but principal la minimisation des vibrations dues aux sources suivantes: vitesse critique dans l'intervalle d'opération de la machine, réponses forcées telles dues au balourd, et les instabilités dues aux mécanismes auto-excités [6].

Dans l'analyse dynamique des rotors, le rotor lui même est modélisé par différentes méthodes, par exemple la méthode des éléments finis [5]. Toutes les interactions dynamiques entre la partie tournante (rotor) et la partie fixe (stator) sont considérées comme des excitations appliquées au rotor.

Dans le modèle dynamique linéaire, les forces d'interactions au niveau des paliers, des joints d'étanchéité, et des joints labyrinthe ainsi que l'effet gyroscopique sont des fonctions explicites des vecteurs déplacement, vitesse et accélération en coordonnées généralisées. Ces termes sont ainsi transposés vers le membre gauche de l'équation du mouvement [5]. Elles complètent ainsi, les matrices du système dynamique.

Pour prédire correctement le comportement vibratoire, des outils mathématiques appropriés sont utilisés pour modéliser tout le système de rotor, et des données correctes des forces dynamiques d'interaction entre le rotor et le stator sont nécessaires [5, 6, 7].

Jusqu'aux années soixante dix la méthode de la matrice de transfert était largement utilisée, mais de nos jours, la méthode des éléments finis est la technique utilisée pour la modélisation des systèmes de rotors [7].

On aborde le mémoire avant de développer le sujet par un premier chapitre sur notre synthèse bibliographique concernant les techniques actuelles de modélisation à savoir: quelques définitions importantes concernant la fonction conception, les systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) et enfin une présentation sommaire sur la mise en oeuvre de la CAO.

Dans le deuxième chapitre, nous exposerons la modélisation mathématique des systèmes de rotors.

Le troisième chapitre sera consacré au thème propre du mémoire : **L'implantation (Mise en oeuvre) d'une interface graphique pour l'analyse dynamique des rotors**. Nous présenterons le problème, le modéliserons et exposerons son implémentation.

Un quatrième chapitre est consacré à l'étude de cas de machines industrielles et on termine enfin par une conclusion en mettant en exergue les perspectives avenir du présent travail.

INTRODUCTION

Nous **concluons** dans un dernier chapitre et donnerons les perspectives de la recherche en vue de généraliser et de perfectionner le système. En annexe, nous donnerons un manuel de présentation et d'utilisation du programme **W.R.D.A.**

CHAPITRE I:
SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction à la CAO

Lorsqu'on recherche une réponse à la question qu'est ce que la CAO ?, on trouve autant de définitions que d'interlocuteurs, car en définitive l'expression CAO, née il y a environs trente ans, est l'association de l'homme et de l'ordinateur dans un processus de conception. Selon les contextes et les milieux techniques concernés, la CAO est utilisée pour désigner l'utilisation d'un ordinateur associé à un périphérique graphique pour l'obtention d'un dessin (plan d'architecte, dessin industriel); dans certains cas la plupart des opérations concernées n'intéressent que la phase de préparation des documents de fabrication, dans d'autres cas, ces opérations s'adressent essentiellement au passage d'un cahier des charges à une structure ou schémas de principe devant conduire à une réalisation physique ultérieure [1].

Le premier objectif poursuivi de la CAO est à coups sur l'accroissement de la productivité. Ce but peut être obtenu de plusieurs façons : augmenter la créativité, améliorer la qualité des produits réduire les délais de conception et de mise au point, surmonter la complexité technique, pallier au manque de certaines catégories de personnel ou améliorer la circulation et l'archivage des informations [1,2].

1.2. Définition de la CAO :

L'un de ses pionniers D.T.Ross l'a résumée en:

« La CAO est une technique dans laquelle l'homme et l'ordinateur sont rassemblés pour la solution des problèmes techniques en une équipe qui allie étroitement les meilleures qualités de chacun d'eux, de telle manière que l'équipe travaille mieux que chacun séparément. » [2]

En d'autres termes, la CAO c'est l'ensemble des outils et procédures utilisant l'informatique et permettant d'établir une synergie entre l'homme et l'ordinateur en mettant au mieux à profit leurs qualités complémentaires: D'une part, en confiant à l'ordinateur les travaux de stockage d'information et d'analyses routinières et fastidieux et automatisables comme la résolution de grands systèmes d'équations, etc., en laissant à l'homme les travaux de synthèse créatrice. Toutefois on notera que l'expression Conception Assistée par Ordinateur peut être trompeuse, car elle peut laisser croire que l'ordinateur supplante pratiquement le concepteur. L'observation immédiate permet de constater que l'ordinateur peut manier un très grand nombre de données quantitatives ou logiques, les traiter à grande vitesse, et cela sans erreur, alors que l'homme excelle dans l'appréhension qualitative des spécifications, des structures et des résultats.

1.3. Interfaces :

Le monde est plein d'interfaces. L'accélérateur, le volant le tableau de bord constituent une interface entre le chauffeur et la voiture.

Dans les années soixante-dix le centre de recherches de Xerox {*Xerox Palo Alto Research Center ou PARC*} a mis au point une interface qui remplaçait les commandes alphanumériques non intuitives par des représentations graphiques appelées icônes et représentant des objets et des tâches spécifiques [17].

Dans le même esprit de simplification Microsoft a conçu *Windows*, (cf annexe B) et en 1982 commençait la distribution de la première version. Il se voulait être une interface graphique très intuitive facilitant l'accès et l'utilisation des ressources machines et logiciel. Maintenant *Windows* en est à sa version 3.11 qui fonctionne en 16 bit et en version 95 fonctionnant en mode 32 bit; il existe aussi une version appelée NT (new technology 32 bit) pour les serveurs et les systèmes de CAO/DAO.

1.4. Analyse dynamique des rotors

Dans le passé pour l'analyse dynamique des rotors, l'analyste devait dessiner ou modéliser son système manuellement, ensuite utilisant une solution logicielle introduisait son modèle sur ordinateur, en ne manipulant que des nombre (entiers, réels) et en répondant à certaines questions du logiciel (Oui/Non) ce mode de travail est appelé mode conversationnel (utilisation de commandes alphanumériques). Une fois l'analyse faite les résultats se présentent sous forme de fichiers de valeurs, l'utilisateur devait ensuite passer par un logiciel graphique pour visualiser (*plotter*) les graphiques de la solution [5].

On admet que cette méthode aboutit au résultat désiré, mais elle est inefficace quand à la manière, le temps nécessaire à l'introduction du modèle, le risque d'erreur encouru et à la visualisation de la solution, spécialement pour un grand modèle (nombre de degrés de liberté élevé), et une analyse complexe.

Avec l'avènement des ordinateurs graphiques et d'une certaine manière, il est maintenant possible de construire un modèle et immédiatement le visualiser graphiquement pour validation, faire l'analyse et directement voir le résultat sous forme de graphiques. Si le modèle est inadéquat l'analyste peut modifier le ou les résultat de l'analyse non plaisant en modifiant les caractéristiques du modèle jusqu'à ce que les résultats désirés soient atteints.

Le travail consiste à développer des routines graphiques permettant de visualiser et d'éditer le modèle de rotors, permettant de visualiser et d'éditer le modèle de rotors, permettant à l'utilisateur de faire des modifications du modèle et de visualiser les graphiques de solutions d'analyse dynamique (zoom, comparaison, numérisation...). Le but principal de ce projet étant de faciliter l'analyse, tout en diminuant les risques d'erreurs par l'utilisation de techniques de visualisation de l'information "INFOGRAPHIE" [4].

CHAPITRE II:
MODÉLISATION DES
SYSTÈMES DE ROTORS

2.1. Modèle mathématique des systèmes de rotors:

Le modèle mathématique d'un système de rotors peut être obtenu par plusieurs méthodes. Bien que la technique des éléments finis et les logiciels existant sont très utiles pour les grands systèmes, pour l'établissement des équations qui régissent le mouvement d'un système de rotors on prend comme exemple le cas typique suivant qui présente un aspect pédagogique très attrayant. Un modèle mathématique de ce système simple sera développé en utilisant que des notions fondamentales.

Le système de la figure 2.1-1 a les caractéristiques suivantes:

- Flexion dynamique de l'arbre dans deux plans perpendiculaires.
- Deux paliers : avec des coefficients K_{ij} et C_{ij} constant (en supposant que le système est dynamiquement linéaire. Les amplitudes vibratoires sont assez petites pour supposer que les raideurs et amortissements équivalants des paliers soient constants et indépendants du mouvement).
- Trois masses concentrées séparées par des arbres flexibles.
- Un disque ayant un moments d'inertie polaire et un moment transversal.

2.1.1. Hypothèses :

- Système dynamiquement linéaire.
- Toute la masse est concentrée aux trois points indiqués.
- Les portions d'arbres reliant les points n'ont pas de masse mais peuvent être déformés en flexion.
- Le mouvement de chaque masse se passe sur un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.
- Les coefficients dynamiques des paliers sont considérées linéaires.
- Les trois masses se déplacent suivant les axes x et y et ont des déplacements angulaires.

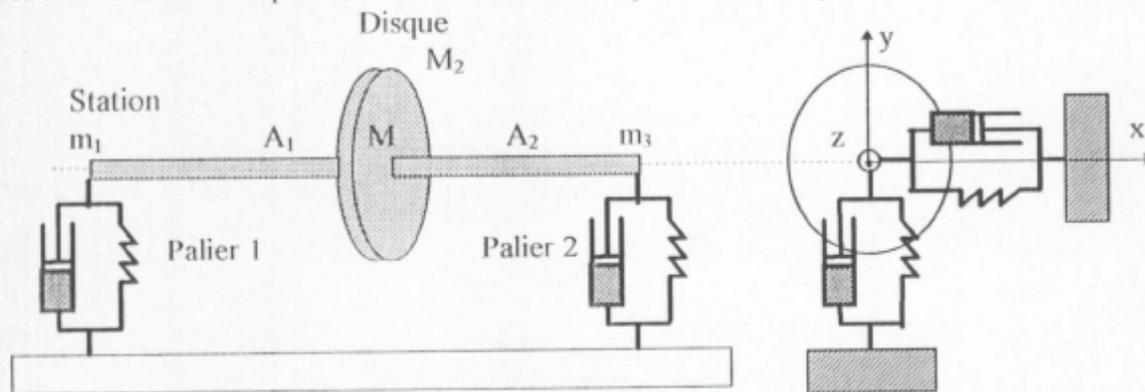


Figure 2.1-1 Modèle du rotor

A_1 : Arbre n°1 A_2 : Arbre n°2

Les coordonnées de déplacements et de rotations angulaires sont :

- x_1, y_1 , pour la masse m_1 .
- $x_2, y_2, \theta_x, \theta_y$, pour la masse m_2 .
- x_3, y_3 , pour la masse m_3 .

$$M_1 \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} \quad M_2 \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} \quad M_3 \begin{Bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{Bmatrix}$$

Le système a donc 8 degrés de liberté.

Les masses M_1 et M_3 sont connectées au système de référence par les ressorts et amortisseurs des deux paliers (k_{ij}^p et c_{ij}^p $p=1,2$).

2.1.2. Equation du mouvement :

On considérera les déformations de l'arbre dans les plans xoz et yoz pour calculer l'énergie potentielle de déformation et développer les équations de Lagrange.

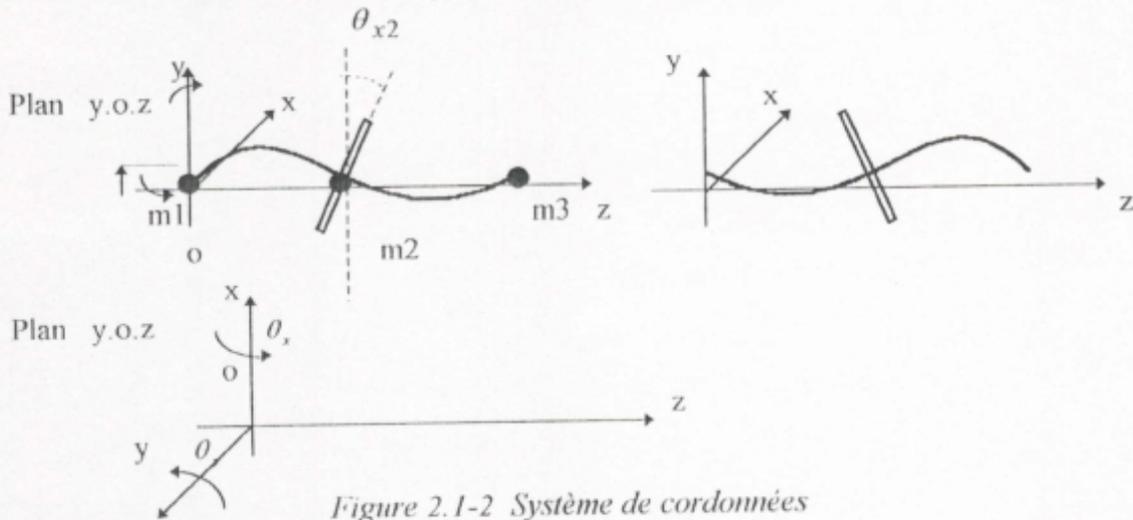


Figure 2.1-2 Système de coordonnées

Equations de Lagrange

En considérant la méthode énergétique, et en utilisant les équations de LAGRANGE.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad i=1, 2, \dots N. \quad 2.1.1$$

- q_i : coordonnées généralisées
- T : énergie cinétique
- V : énergie potentielle
- Q_i : composante de forces généralisées
- N : nombre de degrés de liberté (ddl)

Note : le membre gauche de l'équation de Lagrange est utilisé pour déterminer les matrices du système (masse, raideur, amortissement du système).

L'effet gyroscopique ainsi que les coefficient K_{ij} et C_{ij} des paliers sont pris en compte sous forme de moment et de forces dans le membre Q_i.

On a donc :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = f_i + M_{G_i} \quad 2.1.2$$

L'énergie potentielle est donnée par :

$$V = \int_0^{2L} \frac{M_{xz}^2 + M_{yz}^2}{2 \cdot EI} dz$$

$$x'' = \frac{2}{L^2} \begin{cases} x_1 - x_2 + \theta_Y L & 0 \leq z \leq L \\ x_3 - x_2 + \theta_Y L & L \leq z \leq 2L \end{cases}$$

$$y'' = \frac{2}{L^2} \begin{cases} y_1 - y_2 + \theta_X L & 0 \leq z \leq L \\ y_3 - y_2 + \theta_X L & L \leq z \leq 2L \end{cases}$$

avec $M_{xz} = EI x''$ et $M_{yz} = EI y''$

E : module d'élasticité.

I : module d'inertie de la section.

$$x'' = \frac{d^2 x}{dz^2} \quad \text{et} \quad y'' = \frac{d^2 y}{dz^2}$$

$$[K] = \frac{4EI}{L^3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -L & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -L & 0 & 0 & 2L^2 & 0 & 0 & L \\ L & 0 & 0 & 0 & 0 & 2L^2 & -L & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -L & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & L & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En incluant les forces d'interaction rotor/stator la matrice de rigidité globale devient:

$$[K] = \frac{4EI}{L^3} \begin{bmatrix} 1 + \bar{K}_{xx}^1 & \bar{K}_{xy}^1 & -1 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ \bar{K}_{yx}^1 & 1 + \bar{K}_{yy}^1 & 0 & -1 & -L & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -L & 0 & 0 & 2L^2 & 0 & 0 & L \\ L & 0 & 0 & 0 & 0 & 2L^2 & -L & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -L & 1 + \bar{K}_{xx}^2 & \bar{K}_{xy}^2 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & L & 0 & \bar{K}_{yx}^2 & 1 + \bar{K}_{yy}^2 \end{bmatrix}$$

avec $\bar{K}_{ij}^p = \frac{L^3}{4EI} k_{ij}^p$ pour le palier n° p

La matrice amortissement sans effet gyroscopique est donnée par

$$[C] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{xx}^1 & c_{xy}^1 \\ c_{yx}^1 & c_{yy}^1 \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{xx}^2 & c_{xy}^2 \\ c_{yx}^2 & c_{yy}^2 \end{bmatrix}$$

2.1.3. Effet gyroscopique:

La présence d'un moment d'inertie polaire pour la masse M₂ (du disque) donne naissance à un moment exercé par le disque sur l'arbre celui ci appelé moment gyroscopique qui peut être déterminé directement par la 2^{ème} loi de Newton pour les corps solides en rotation avec :

\vec{H} : moment angulaire du disque autour de son centre de rotation.

$$\vec{H} = \frac{d\vec{H}}{dt} \text{ Par rapport a un système de référence } (\vec{H} = M \vec{\omega}) \tag{2.1.5}$$

M : moment exercé sur le disque par l'arbre.

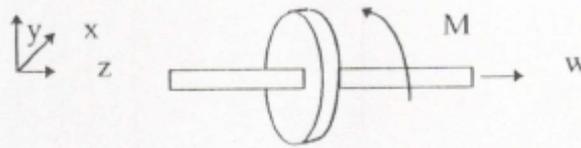


Figure 2.1-3 Moment gyroscopique

Pour avoir les paramètres d'inertie constants dans le temps, on choisit un repère (x, y, z) avec une vitesse de rotation :

$$\vec{\Omega} = \vec{i} \omega_x + \vec{j} \omega_y = \vec{i} \dot{\theta}_x + \vec{j} \dot{\theta}_y \tag{2.1.6}$$

Dans ce cas, la vitesse angulaire du disque est $\vec{\omega} = \vec{i} \dot{\theta}_x + \vec{j} \dot{\theta}_y + \vec{k} \omega$. 2.1.7

Le moment angulaire est :

$$\vec{H} = \vec{i} \dot{\theta}_x I_1 + \vec{j} \dot{\theta}_y I_2 + \vec{k} \dot{\theta}_z I_3$$

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \dot{\vec{H}} = \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{\Omega} \wedge \vec{H} \tag{2.1.8}$$

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \ddot{\theta}_x I_1 \vec{i} + \ddot{\theta}_y I_2 \vec{j} + \omega I_3 \vec{k} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{\theta}_x & \dot{\theta}_y & 0 \\ \dot{\theta}_x I_1 & \dot{\theta}_y I_2 & \omega I_3 \end{vmatrix}$$

On a $\left. \begin{matrix} I_1 = I_{xx} \\ I_2 = I_{yy} \end{matrix} \right\} I_{\text{transversal}}$

$$I_3 = I_p$$

Avec $I_1=I_t$ (axe x), $I_2=I_t$ (axe y), $I_3=I_p$ (axe z)

Note : Pour un disque mince $e/D \ll 1$

$$I_p = MR^2/2$$

$$I_t = I_p/2 = MR^2/4$$

Comme

$$I_1 = I_2 = I_t \Rightarrow \vec{k} \begin{vmatrix} \dot{\theta}_x & \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_x I_1 & \dot{\theta}_y I_2 \end{vmatrix} = 0$$

et aussi, comme $\omega = \text{constante}$, alors $\omega I_3 \vec{k} = 0$.

$$\dot{\vec{H}} = \vec{i} (\ddot{\theta}_x I_t + \dot{\theta}_y \omega I_p) + \vec{j} (\ddot{\theta}_y I_t - \omega \dot{\theta}_x I_p) \tag{2.1.9}$$

$$\vec{M} = \dot{\vec{H}} \Rightarrow \begin{cases} M_x = \dot{H}_x \\ M_y = \dot{H}_y \\ M_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_x = \ddot{\theta}_x I_t + \omega I_p \dot{\theta}_y \\ M_y = \ddot{\theta}_y I_t - \omega I_p \dot{\theta}_x \end{cases} \leftarrow \text{Effet gyroscopique}$$

Le moment gyroscopique exercé par le disque sur l'arbre est :

$$\left. \begin{aligned} M_{Gx} &= -\omega I_p \dot{\theta}_y \\ M_{Gy} &= +\omega I_p \dot{\theta}_x \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} M_{Gx} \\ M_{Gy} \end{bmatrix} = \omega I_p \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_x \end{bmatrix}$$

Ces deux équations sont ajoutées au membre droit de l'équation du mouvement

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\omega I_p \dot{\theta}_y \\ \omega I_p \dot{\theta}_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \{F(t)\} \tag{2.1.10}$$

On a donc les matrices raideur et masse qui restent inchangées, par contre la matrice amortissement change au niveau des coordonnées $\dot{\theta}_x$ et $\dot{\theta}_y$.

Matrice amortissement (Forces de liaisons et effet gyroscopique) : Les forces de liaison sont dues a la suspension du système : système de lubrification, effet palier , ou paliers hydrodynamiques.

La matrice C devient :

$$[C] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} c^1_{xx} & c^1_{xy} \\ c^1_{yx} & c^1_{yy} \end{bmatrix} & & \\ & \begin{bmatrix} 0 & \omega I_p \\ -\omega I_p & 0 \end{bmatrix} & \\ & & \begin{bmatrix} c^2_{xx} & c^2_{xy} \\ c^2_{yx} & c^2_{xx} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

2.1.4. Forces de liaisons (Palier /arbre)

Dans cette étude on ne s'intéresse qu'au cas du palier hydrodynamique et ceci à titre indicatif seulement, pour plus de détail se référer à [28,29].

Les paliers hydrodynamiques utilisent la propriété de viscosité des fluides pour supporter les structures (en rotation), atténuer les efforts de frottement entre les parties en mouvement et enfin libérer la chaleur qui en résulte. Le film de fluide sépare totalement les surfaces en présence. La formation et le maintien de ce dernier provoque la formation d'une pression qui équilibre la charge appliquée entre les deux surfaces du mécanisme. Le mouvement d'un fluide entre deux surfaces en mouvement relatif est régi par l'équation de Reynolds [15].

2.1.4.1. Hypothèses:

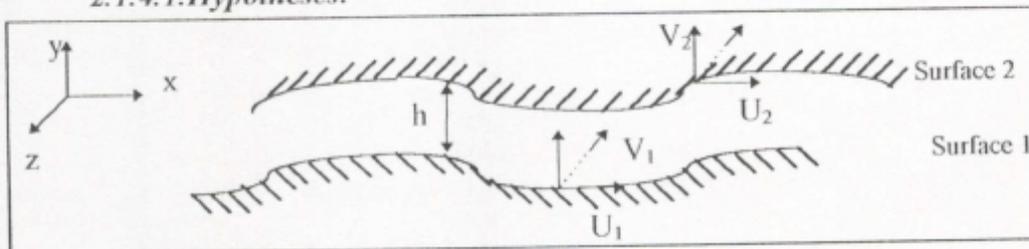


Figure 2.1-4 Composante de la vitesses absolue de 2 surfaces en mouvement relatif dans le plan xy ($V_z=0$)

Pour les équations de la figure précédente, ignorant l'accélération l'équation de Reynolds s'écrit sous la forme [16] :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6(U_1 - U_2) \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12\rho(V_1 - V_2) \quad 2.1.11$$

avec

- ρ : densité du fluide.
- μ : viscosité du fluide.
- h : distance locale entre les surfaces (supposée petite)
- P : pression locale.
- U_i, V_i : composantes de la vitesse de chaque surface ($i=1,2$).

Considérant :

- Fluide incompressible ($\rho = \text{Constante}$)
- Palier Fixe ($U_2 = V_2 = 0$)
($U_1 = U$ et $V_1 = V$)

L'équation devient alors :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U\mu \frac{\partial h}{\partial x} + 12\mu V \quad 2.1.12$$

Pour un palier cylindrique cette expression est écrite en coordonnées polaires.

$x = R\theta$

avec $R = \text{Rayon de l'arbre} = D/2$ et $\theta = \text{Cordonnées rectangulaire locale}$

ce qui donne
$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U\mu R \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12\mu R^2 V \quad 2.1.13$$

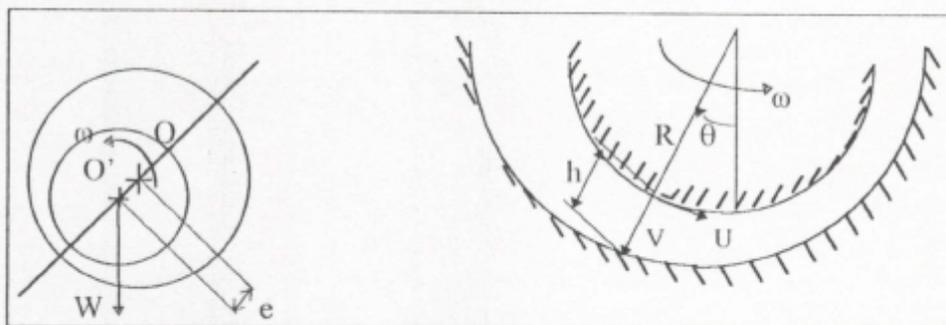


Figure 2.1-5 Géométrie d'un palier cylindrique

D'après la figure 2.1.5, la tolérance radiale est fonction de la position angulaire et peut être écrite

comme : $h = c(1 + \epsilon \cos \theta)$

avec : $\epsilon = e/c$ rapport de palier

Note : $h = c + e \cos \theta$ quand $e=0$ ($O=O'$) $\Rightarrow h = c = R_p - R$ où R_p : rayon du coussinet

Il est nécessaire d'obtenir une solution permanente à cette équation en fonction des conditions d'opération spécifiées avant de résoudre le problème dynamique.

Pour une charge statique (permanente) du palier, l'équation de Reynolds devient : ($V=0$)

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U\mu R \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad 2.1.14$$

Cette équation est simple, mais sa solution est compliquée pour les conditions aux limites dans la direction radiale.

Les paramètres caractérisant les performances d'un palier (statique) sont :

| | |
|----------------------------|--|
| Nombre de Sommerfeld | $S = \frac{\mu NLD}{W} \left(\frac{R}{c}\right)^2$ |
| Épaisseur minimale du film | $h_{min} = c(1 - \epsilon)$ |
| Rapport | L/D |
| Flux du lubrifiant | $Q = \frac{\pi}{2} \bar{q} NLDc$ |
| Force de friction | $F = fW$ |

- avec :
- L : Longueur du palier
 - D : Diamètre de L'arbre = 2R
 - c : Jeux radial
 - e : excentricité relative
 - N : Vitesse de rotation
 - W : Charge
 - μ : Viscosité
 - f : Coefficient de frottement
 - \bar{q} : coefficient de flux.

2.1.4.2. Coefficients dynamiques du palier:

L'équation de Reynolds en fonction du temps est:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U\mu R \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12\mu R^2 V \tag{2.1.15}$$

Pour résoudre cette équation, il est nécessaire d'avoir pour U et V des expressions dans des conditions dynamiques.

Considérant un arbre chargé tournant comme le montre la figure 2.1-6, si le palier est fixe, le centre de l'arbre aura des vitesses instantanées radiales et tangentielles, à partir d'une ligne verticale, $\Psi=0$, ces vitesses sont :

$$V_r = c \frac{d\epsilon}{dt} \quad \text{et} \quad V_t = e \frac{d(\psi + \phi)}{dt} \tag{2.1.16}$$

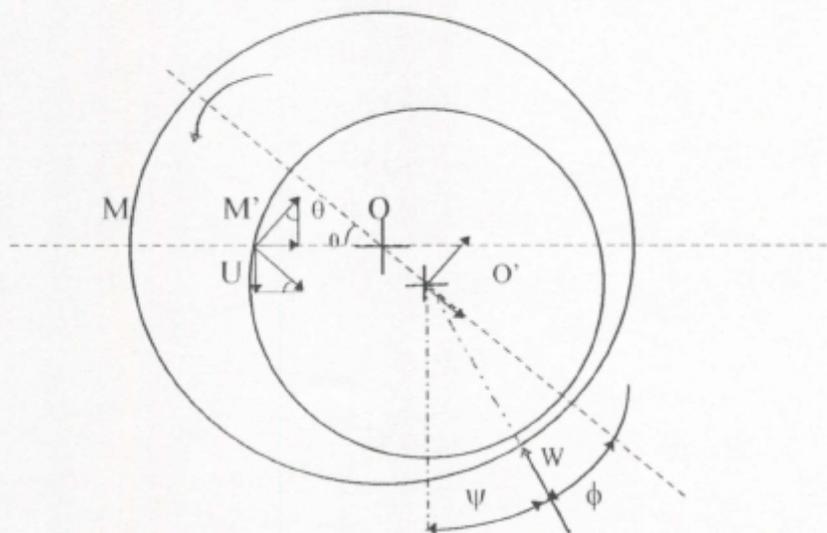


Figure 2.1-6 Géométrie d'un palier dynamiquement chargé

En un point M sur la surface du palier, distant de θ à partir de la ligne OO', on aura des vitesses tangentielles et normales relativement à M', ces vitesses sont composées de la vitesses du centre de l'arbre V_r et V_t plus la vitesse de la surface de l'arbre par rapport à son centre.

Ces composantes sont :

$$U = R\omega + c \frac{d\varepsilon}{dt} \sin\theta - c\varepsilon \frac{d(\psi + \phi)}{dt} \cos\theta$$

$$V_r = c \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{et} \quad V_t = c\varepsilon \frac{d(\psi + \phi)}{dt}$$

avec $e = c\varepsilon$

si $c/R \ll 2$ (toujours vrais) et $e/R \ll 2\cos(\theta)$ (souvent)

alors on peut écrire :

$$V = c \frac{d\varepsilon}{dt} \cos\theta - c\varepsilon \frac{d(\psi + \phi)}{dt} \sin\theta$$

Ainsi on obtient :

$$2c\varepsilon \frac{d(\psi + \phi)}{dt} \sin\theta = -2 \frac{d(\psi + \phi)}{dt} \frac{dh}{d\theta} = -2\dot{\alpha} \frac{dh}{d\theta}$$

Ou encore

$$12\mu R^2 V = 12\mu R^2 [c\dot{\varepsilon} \cos\theta - \dot{\alpha}(-c\varepsilon \sin\theta)]$$

$$= 6\mu R(2cR\dot{\varepsilon} \cos\theta + 2cR\dot{\alpha} \sin\theta)$$

L'expression totale qui donne la distribution de pression est alors :

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[(1 + \varepsilon \cos\theta)^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right] + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 + \varepsilon \cos\theta)^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right]$$

$$= 6\mu \left[\frac{R}{c} \right]^2 (-\varepsilon(\omega - 2\dot{\alpha}) \sin\theta + 2\dot{\varepsilon} \cos\theta)$$
2.1.17

Cette expression est valide uniquement quand le film est continu.

2.1.4.3. Coefficients de raideur et d'amortissement:

L'étape suivante est l'intégration de l'équation de Reynolds en tenant compte des conditions aux limites. Ceci donne la distribution de pression dans le palier. Une autre intégration dans les directions radiales et tangentielles donnera alors les forces dynamiques du palier.

Cette force s'exprime par :

$$F_\alpha = \mu N \left(1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right) \left(\frac{R}{c} \right)^2 DL \int_0^L \int_0^\pi \rho \cos(\theta + \alpha) dx d\theta$$

$$= \lambda \omega \left(1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right) f_\alpha \left\{ \frac{L}{D}, \varepsilon, \alpha, \frac{\dot{\varepsilon} / \omega}{(1 - 2\dot{\alpha} / \omega)} \right\} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{\omega \mu RL}{\pi} \left[\frac{R}{c} \right]^2$$
2.1.18

où α est l'angle entre la verticale et la charge W

F_α est une fonction non linéaire en déplacement (ε, α) et en vitesse $(\dot{\varepsilon}, \dot{\alpha})$. D'habitude cette force est linéarisée par rapport au déplacement et à la vitesse.

Une expansion en série de Taylor donne :

$$dF_\alpha = \lambda\omega \left(1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right) \left[\frac{\partial f_\alpha}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial f_\alpha}{\varepsilon \partial \alpha} \varepsilon d\alpha + \frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right)} d\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right) + \frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right)} d\left(\frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right) - \frac{2\partial f_\alpha \varepsilon d\dot{\alpha}}{\varepsilon\omega \left(1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right)} \right] \quad 2.1.19$$

On peut écrire :

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right)} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\varepsilon}/\omega}{1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega}} \right)} \frac{\partial \left(\frac{\dot{\varepsilon}/\omega}{1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega}} \right)}{\partial \left(\frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right)} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\varepsilon}/\omega}{1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega}} \right)} \frac{2 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right)}{\left(1 - 2 \frac{\dot{\alpha}}{\omega} \right)^2}$$

On impose $\dot{\varepsilon} = \dot{\alpha} = 0$

$$\text{ce qui donne : } dF_\alpha = \lambda\omega \left[\frac{\partial f_\alpha}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial f_\alpha}{\varepsilon \partial \alpha} \varepsilon d\alpha + \frac{\partial f_\alpha}{\varepsilon d \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right)} d\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right) - \frac{2f_\alpha}{\varepsilon\omega} \varepsilon d\dot{\alpha} \right] \quad 2.1.20$$

Transformons cette expression en coordonnées cartésiennes en utilisant les relations :

$$x = c\varepsilon \cos \alpha \quad \text{et} \quad y = c\varepsilon \sin \alpha$$

$$d\varepsilon = \frac{1}{c} [\cos \alpha dx + \sin \alpha dy] \Rightarrow \varepsilon d\alpha = \frac{1}{c} [-\sin \alpha dx + \cos \alpha dy]$$

Comme le point $(c\varepsilon, \alpha)$ représente la position d'équilibre statique, dx et dy représentent les déplacements dynamiques pour lesquelles les vitesses sont $d\dot{x}$ et $d\dot{y}$.

Ainsi on obtient l'expression :

$$dF_\alpha = \frac{1}{c} \lambda\omega \left[\left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial \varepsilon} \cos \alpha - \frac{\partial f_\alpha}{\varepsilon d\alpha} \sin \alpha \right) dx + \left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right)} \cos \alpha + \frac{2f_\alpha}{\varepsilon} \sin \alpha \right) \frac{d\dot{x}}{\omega} + \left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial \varepsilon} \sin \alpha + \frac{\partial f_\alpha}{\varepsilon \partial \alpha} \cos \alpha \right) dy + \left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\omega} \right)} \sin \alpha - \frac{2f_\alpha}{\varepsilon} \cos \alpha \right) \frac{d\dot{y}}{\omega} \right] \quad 2.1.21$$

$$\text{ou,} \quad \begin{aligned} dF_x &= -K_{xx} dx - C_{xx} d\dot{x} - K_{xy} dy - C_{xy} d\dot{y} \\ dF_y &= -K_{yx} dx - C_{yx} d\dot{x} - K_{yy} dy - C_{yy} d\dot{y} \end{aligned}$$

Ces coefficients soit calculés numériquement [15] par la méthode des éléments finis ou différences finis, ou déterminés expérimentalement [16]. Des abaques pour différents types de paliers sont donnés dans la littérature [16].

$$K_{xx} = -\frac{\partial f_x}{\partial x}, K_{xy} = -\frac{\partial f_x}{\partial y}, K_{yx} = -\frac{\partial f_y}{\partial x}, K_{yy} = -\frac{\partial f_y}{\partial y} \quad 2.1.22$$

$$C_{xx} = -\frac{\partial f_x}{\partial \dot{x}}, C_{xy} = -\frac{\partial f_x}{\partial \dot{y}}, C_{yx} = -\frac{\partial f_y}{\partial \dot{x}}, C_{yy} = -\frac{\partial f_y}{\partial \dot{y}} \quad 2.1.23$$

Sous forme matricielle
$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} \quad 2.1.24$$

Ces forces sont transposées au membre gauche de l'équation de mouvement et sont ajoutés au matrices du système au niveau (matrices) des paliers.

2.2. Analyse dynamique

2.2.1. Problème aux valeurs propres non amorti:

Dans cette section on se penchera sur les algorithmes de résolution du problème aux valeurs propres non amortis obtenu par discrétisation et formulation éléments finis [14]. Le problème prend la forme:

$$(K - \lambda M)q = 0 \quad 2.2.1$$

Où K est la matrice raideur symétrique semi-définie positive, M est la matrice masse définie positive, rappelons aussi que dans le cas des systèmes de rotors les deux matrices présentent un profile de bande.

On considérera que les dimensions de K et M sont Neq x Neq. Il existe Neq valeurs propres et les vecteurs propres correspondants satisfaisant à 2.2.1; sont tel que :

$$(K - \lambda_i M)q_i = 0 \quad 2.2.2$$

où $i=1, 2, \dots, Neq$ représente le numéro de mode ;
avec

$$0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_{Neq} \quad 2.2.3$$

et aussi

$$q_k^T M q_l = \delta_{kl} \quad \text{Orthogonalité de M} \quad 2.2.4$$

$$q_k^T K q_l = \delta_{kl} \quad \text{Orthogonalité de K} \quad 2.2.5$$

ou δ_{kl} représente le symbole de kroneker on à
$$\begin{cases} \delta_{kl} = 0 & \text{si } k \neq l \\ \delta_{kl} = 1 & \text{si } k = l \end{cases}$$

Les vecteurs propres $\{q_i\}_{i=1..Neq}$ constituent une base de R_{Neq} . Si en plus K est définie positive, comme dans la plupart des cas donc 2.2.3 peut être ramenée a

$$\lambda_1 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_{Neq} \quad 2.2.6$$

En pratique, on est intéressé surtout par les premiers modes. Par exemple, les premiers modes sont les plus important dans l'analyse de stabilité des structures, et participent à plus de 90% de la réponse dynamique [13].

Par conséquent et pour ces raisons on est intéressé dans le cas d'algorithmes numériques économiques par l'extraction de $\{\lambda_i, \omega_i\}$, $1 \leq i \leq N_{modes}$, ou $N_{modes} \ll Neq$ est le nombre de valeurs propres désirés. En pratique Neq est très grand, et la résolution du problème aux valeurs propres, même pour quelques valeurs propres, peut s'avérer très coûteuse.

Un bon nombre de méthodes de calcul utilisées pour la résolution d'un problème aux valeurs propres généralisé de grande dimension [3], font appel à des systèmes réduits de la forme

$$(K^* - \lambda^* M^*) \psi^* = 0 \quad 2.2.7$$

où K^* et M^* sont des matrices petites (dimension), pleines et symétriques (Condensation).

Des algorithmes tel que la méthode de Jacobi généralisée [14], peuvent résoudre directement le problème 2.2.7, un tel système doit d'abord être transformé vers la forme standard

$$(K^* - \lambda^* I) \psi^* = 0 \quad 2.2.8$$

où $K^* = U^{-T} K^* U^{-1}$ 2.2.9

$$\bar{\psi}^* = \bar{U} \psi^* \quad 2.2.10$$

et U étant La matrice triangulaire supérieure de la décomposition de Cholesky de M^* dite facteur de Cholesky, i.e.,

$$M^* = \bar{U}^T \bar{U} \quad 2.2.11$$

Le facteur de Cholesky peut être écrit en fonction du facteur de Crout comme suit :

$$U = D^{1/2} U \quad \text{ou} \quad M^* = U^T D U$$

U est une matrice triangulaire supérieure avec éléments de diagonale égaux à l'unité $U_{ii}=1$ et D est une matrice diagonale positive $D_{ii}>0$ $D_{ij}=0$ $i \neq j$ [14].

Notons que les valeurs propres de la forme standard (2.2.8), sont identiques à ceux de la forme généralisée (2.2.7). Cependant, les vecteurs propres doivent être transformés comme indiqué par l'équation 2.2.10.

2.2.2. Problème au valeurs propres amorti :

Pour des vibrations libres avec amortissement, l'équation du mouvement du système s'écrit

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = 0 \quad 2.2.9$$

Avec un changement de variable adéquat ce système à N équations du second ordre est transformé en un système à $2 \times N$ équations comme suit :

en multipliant à gauche l'équation précédente par $[M]^{-1}$ on a :

$$[M]^{-1}[M]\{\ddot{q}\} = -[M]^{-1}[C]\{\dot{q}\} - [M]^{-1}[K]\{q\} \quad 2.2.10$$

où

$$\{\ddot{q}\} = [M]^{-1}[C]\{\dot{q}\} - [M]^{-1}[K]\{q\} \quad 2.2.11$$

$$\{\dot{q}\} = [I]\{\dot{q}\} + [0]\{q\} \quad 2.2.12$$

en utilisant la transformation $\{z\} = [\dot{q}, q]^T$ ce système devient :

$$\{\dot{z}\} = [A]\{z\} \quad \text{où} \quad [A] = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \quad 2.2.13$$

en supposant une solution de la forme

$$\{z\} = [\phi] e^{\lambda t} \text{ où } \{z\} = \lambda [I] [\phi] e^{\lambda t}, \text{ où } \{z\} = \lambda [I] \{z\}$$

en substituant dans (2.2.13) on trouve

$$\lambda [I] \{z\} = [A] \{z\} \text{ finalement } ([A] - \lambda [I]) \{z\} = \{0\} \quad 2.2.14$$

Ceci constitue le problème aux valeurs propres général avec des valeurs propres amorties

$\lambda_i = \alpha_i \pm i\beta_i$ et la matrice des vecteurs propres $[\phi]$ qui est une matrice complexe de dimension $2N \times 2N$

où :

α_i = partie réelle de la $i^{\text{ème}}$ valeur propre (amortissement)

β_i = partie imaginaire de la $i^{\text{ème}}$ valeur propre (harmonique)

2.2.3. Réponse harmonique permanente:

Les équations du mouvement du système forcé amorti sont données par:

$$[M] \{\ddot{q}\} + [C] \{\dot{q}\} + [K] \{q\} = \{F(t)\} \quad 2.2.15$$

$$\text{où } \{F(t)\} = \{F_0 e^{i(\omega t + \varphi)}\}$$

F_0 = l'amplitude de la force ([lbf], [N]), pour les coordonnées X ou Y

l'amplitude du moment ([lbf-in], [N-m]), pour les coordonnées θ_x ou θ_y .

φ = Angle de phase [deg]

ω = fréquence de rotation du rotor [rad/sec]

En supposant une solution de la forme:

$$\{q\} = \{q_0 e^{i(\omega t + \theta)}\} \text{ avec } \{\dot{q}\} = i\omega \{q_0 e^{i(\omega t + \theta)}\} \text{ et } \{\ddot{q}\} = -\omega^2 \{q_0 e^{i(\omega t + \theta)}\}$$

Substituons dans l'équation du mouvement et divisons par $e^{i\omega t}$, l'équation devient:

$$[-\omega^2 [M] + [K] + i\omega [C]] \{q_0 e^{i\theta}\} = \{F_0 e^{i\theta}\} \quad 2.2.16$$

$$\text{ou, } [z] \{q_0 e^{i\theta}\} = \{F_0 e^{i\theta}\}$$

$$\text{avec } [z] = [-\omega^2 [M] + [K] + i\omega [C]] \quad 2.2.17$$

en prémultipliant par $[z]^{-1}$

$$\text{cela nous donne : } \{q_0 e^{i\theta}\} = [z]^{-1} \{F_0 e^{i\theta}\} \quad 2.2.18$$

$$\text{où } q_0 \equiv \text{Amplitude de vibration} = \sqrt{(\text{Re}(q_0))^2 + (\text{Im}(q_0))^2} \quad 2.2.19$$

$$\text{et } \theta \equiv \text{Angle de phase de vibration} = \tan^{-1}(\text{Im}(q_0)/\text{Re}(q_0)) \quad 2.2.20$$

2.2.4. Analyse de stabilité :

Dans ce qui suit, l'analyse numérique de stabilité du système arbre-palier est faite en utilisant le calcul des valeurs propres complexes et aussi à travers l'évaluation de l'énergie du système[23].

2.2.4.1. Calcul des valeurs propres:

Du fait de la rotation du système, on résout le problème aux valeurs propres amorti, pour différentes valeurs de la vitesse de rotation, la partie réelle de la valeur propre peut être tracée en fonction de la vitesse de rotation. Quand la courbe passe l'axe des vitesses, la vitesse de rotation correspondante est appelée la vitesse du seuil d'instabilité on a donc $\Omega_{th} = \omega \Big|_{\alpha=0}$.

L'évaluation numérique de Ω_{th} est possible en utilisant l'une des méthodes classiques de recherche du zéro d'une fonction à une variable, e.g, la bisection (dichotomies).

2.2.4.2. Energie du système:

La plupart des systèmes rotor - paliers présentent une asymétrie au niveau de leurs matrices raideur et amortissement due à l'influence de la direction de rotation sur le système [6]. Il ne faut pas oublier aussi l'influence « de l'amortissement » due au moment gyroscopique inhérent au systèmes rotatifs. Ces asymétries peuvent être décomposées en deux parties l'une symétrique et l'autre antisymétrique comme suit :

$$[C] = [C]^s + [C]^{as} \quad \text{et} \quad [K] = [K]^s + [K]^{as}$$

où

$$\begin{aligned} [C]^s &= ([C] + [C]^T) / 2 \\ [C]^{as} &= ([C] - [C]^T) / 2 \\ [K]^s &= ([K] + [K]^T) / 2 \\ [K]^{as} &= ([K] - [K]^T) / 2 \end{aligned}$$

Les matrices $[K]^s$ et $[C]^{as}$ correspondent aux forces conservatrices tandis que Les matrices $[K]^{as}$ et $[C]^s$ correspondent au forces non conservatrices ayant une énergie pouvant stabiliser ou déstabiliser le système tout dépend du fait que leur énergie s'ajoute ou se retranche de celle du système. Le vecteur force non conservatif est évalué comme suit:

$$\{P\} = [C]^s \left\{ \dot{x} \right\} - [K]^{as} \{x\} \tag{2.2.21}$$

L'énergie impartie à la rotation par cycle pour un mouvement harmonique est:

$$E_{cyc} = \oint \{P\} \{dx\} \tag{2.2.22}$$

où

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} x \sin(\omega t + \theta_x) \\ y \sin(\omega t + \theta_y) \end{Bmatrix}, \quad \left\{ \dot{X} \right\} = \omega \begin{Bmatrix} x \cos(\omega t + \theta_x) \\ y \cos(\omega t + \theta_y) \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \{dX\} = \begin{Bmatrix} dx \\ dy \end{Bmatrix}$$

en substituant dans l'équation de l'énergie on trouve :

$$E_{cyc} = -\tau \left\{ \omega \left[C_{xx}^{ss} X^2 + 2C_{xy}^s XY \cos(\theta_x - \theta_y) + C_{yy}^{ss} Y^2 \right] - 2K_{xx}^{as} XY \sin(\theta_x - \theta_y) \right\} \tag{2.2.23}$$

Où x et y sont les coordonnées autour de l'orbite de vibration au niveau de chaque palier ou effet palier.

Quand la vitesse ω du rotor augmente l'énergie par cycle passe d'une valeur négative à une autre positive et le système devient instable; Quand $E_{cyc}=0$, la vitesse ω correspond à la vitesse critique d'instabilité ($\omega = \Omega_{th}$) et le mode qui devient instable est dit mode de vibration auto - excité.

CHAPITRE III:
IMPLÉMENTATION DE
L'INTERFACE GRAPHIQUE

3.1. Pré-processeur :

3.1.1. Définitions:

Arbre: Portion cylindrique du rotor caractérisé par l'importance de la longueur par rapport au diamètre ($L > D$).

Disque: Portion cylindrique du rotor caractérisé par l'importance du diamètre par rapport à son épaisseur ($D > e$).

Station: Représente un point de jonction entre deux entités du modèle, sur lequel on considère les quatre (4) degrés de libertés (x, y, θ_x, θ_y), il appartient à l'axe neutre du modèle réel et peut correspondre à une discontinuité géométrique ou à la présence d'une nouvelle entité (palier, disque...) sur le modèle réel.

Palier : Toutes les machines tournantes sont supportées par un ou plusieurs paliers qui jouent un rôle vital pour le système tournant, sous l'action des charges statiques et dynamiques. On considérera comme palier tout organe se situant à l'interface de jonction entre la partie mobile et la partie fixe du système (roulements, paliers lisses...), ou exerçant des efforts sur la partie mobile « effet palier ».

Stator : Représente l'élément fixe du modèle, il sert de support aux organes en rotations.

Effet Palier: On peut aussi considérer un disque à aubes sur une turbine et développant des efforts sur la partie fixe de la turbine (interaction fluide-structure) comme un palier; on parle d'effet palier.

Masse concentrée: Représente tout objet sur le modèle réel (organes de fixation, clavette...) qui ne tombe pas dans l'une des catégories précédentes et dont on ne peut négliger la masse.

Balourd : Correspond au produit masse par l'excentricité d'un élément du rotor ($m.e$), il peut s'agir d'un organe du modèle situé excentré par rapport à l'axe de rotation et dont le produit masse par l'excentricité ne peut être négligé.

3.1.2. Préparation du modèle:

La modélisation d'un système de rotor se fait par la préparation du dessin du modèle avec toutes les propriétés nécessaires : Géométrie, matériaux, charges aux paliers

la détermination du nombre et de la position des stations se fait selon l'utilisateur et suivant des contraintes :

- Géométrie : exemple d'une portion d'arbre à diamètre important et non négligeable donc station obligatoire ...
- De précision de calculs (plus le nombre de stations est important plus on s'approche du modèle continue : résultats plus précis ; mais temps de calcul important et dimension du problème trop grande).

Exemple :

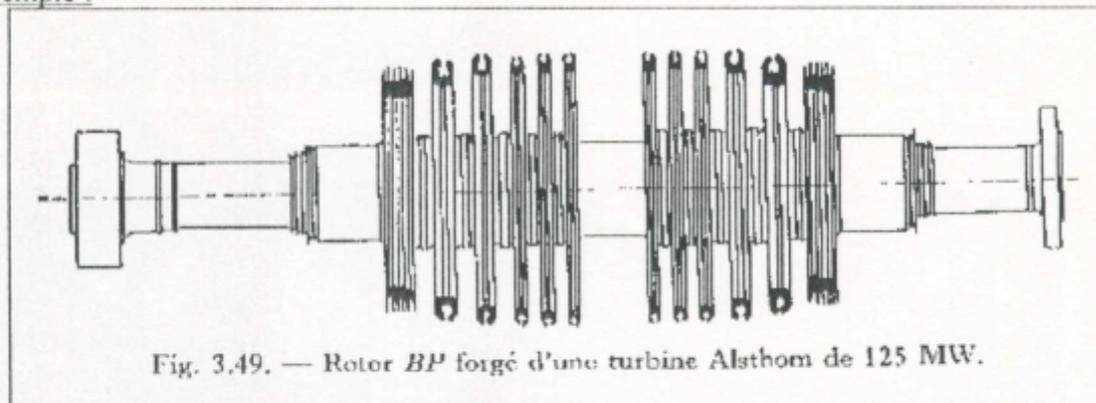


Fig. 3.49. — Rotor BP forgé d'une turbine Alsthom de 125 MW.

Rotor basse pression d'une turbine Alsthom de 125 Mw

Modèle

Le rotor précédant peut être modélisé suivant le schémas suivant



Schémas du modèle du rotor

Données :

Nombre de stations : 18

Nombre d'arbres : 17

Nombre de disques: 12

Nombre de paliers: 2 aux stations 1 et 18

Données des arbres : pour chaque arbre : diamètre extérieur, diamètre intérieur, longueur, masse, matériaux.

Données des disques: pour chaque disque : station, diamètre extérieur, diamètre intérieur, épaisseur, masse, matériaux, moment polaire, moment quadratique.

Données des paliers: pour chaque palier: station, masses, coefficients de raideur, coefficients d'amortissement (les coefficients dynamiques sont soit calculés soit tirés à partir d'abaques).

Données des forces d'excitation: pour chaque force: station, module de la force et la direction d'excitation.

Le rôle du pré-processeur est de faciliter l'introduction du modèle géométrique en premier lieu et des propriétés physiques du ou des matériaux utilisés ainsi que la considération des forces d'interaction Rotor/Palier, et éventuellement l'introduction des excitations. Le Pré-processeur est donc responsable de la mise en oeuvre du modèle, il permet de visualiser le modèle graphiquement et d'en éditer les données des objets constitutifs; il permet aussi la visualisation en projection plane ou en perspective avec rendu réaliste(formes réelles).

Il permet en outre la visualisation graphique de la pression au niveau des paliers; visualisation en perspective ou en lignes de niveaux; ainsi que la variation des coefficients dynamiques en fonction de la vitesse de rotation.

3.1.3. Fenêtre Modèle :

Le modèle peut être représenté en projection plane (avec mise à l'échelle ou non) et en perspective:

3.1.3.1. Fenêtre modèle en projection plane :

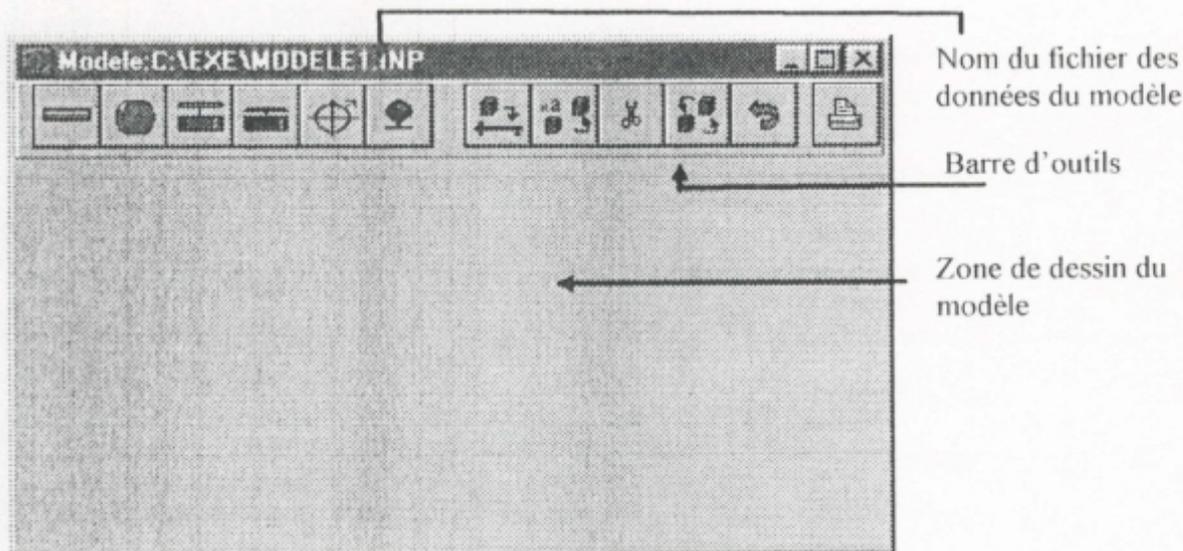


Figure 3.1-1 fenêtre modèle.

3.1.3.1.1. Barre d'outils:

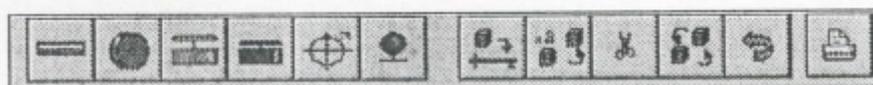


Figure 3.1-2 Barre d'outils du modèle.

- La barre d'outil du document modèle permet et dans l'ordre des boutons de :
- Insérer un nouvel objet arbre à la fin du modèle et à droite
 - Insérer un nouvel objet disque à la fin du modèle et à droite
 - Insérer un nouvel objet palier à la fin du modèle et à droite
 - Insérer un nouvel objet palier à la fin du modèle et à droite
 - Insérer un nouvel objet support de palier à la fin du modèle et à droite
 - Insérer un nouvel objet balourd à la fin du modèle et à droite
 - Insérer un nouvel objet masse concentrée à la fin du modèle et à droite
 - Insérez un nouvel objet à une station donnée
 - Faire une copie d'un objet existant sur une autre station
 - Supprimer un objet se trouvant à une station donnée
 - Déplacer un objet d'une station à une autre
 - Annuler l'insertion du dernier objet à droite du modèle
 - Imprimer le dessin du modèle

3.1.3.1.2. Evénements associés :

3.1.3.1.2.1. Nouveau modèle:

Permet d'initialiser un nouveau modèle.

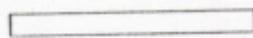
3.1.3.1.2.2. Initialiser :

On lit a partir d'un fichier dont le nom est choisit par la sélection de l'utilisateur dans une boîte de dialogue de saisie de fichier, le format étant celui de RDA [25], l'extension par défaut des document modèle adoptée étant '.INP', on Initialise la fenêtre modèle, on arrange les objets dans la liste et enfin on dessine le modèle.

3.1.3.1.2.3. Dessiner :

Pour chaque type d'objet du modèle on adopte la représentation suivante

Arbre



Disque



Palier



support de palier



Balourd



Masse concentrée



Figure 3.1-3 Schématisation adoptée.

N.B : On différencie la représentation du palier de celle du support de palier par des hauteurs différentes (moitié inférieure). L'épaisseur du trait est plus grande et les hachures sont d'un autre type avec une couleur bleu pour le support de palier.

On donne :

- Narbre : nombre d'arbre du modèle
- Ndisc : nombre de disques du modèle
- Npal : nombre de paliers
- Nped : nombre de support de paliers
- Nbal : nombre de balourd
- Nmc : nombre de Masses concentrées

Il y a lieu de distinguer deux types de représentations :

Représentation sans mise à l'échelle:

Cette représentation permet d'afficher les objets avec des dimensions préalables sans tenir compte des dimensions réelles des objets, elle s'avère très utile dans la mesure ou elle permet la saisie des objets très rapidement sans s'attarder sur la saisie des données de chaque objet, une fois les objets saisis, l'utilisateur peut éventuellement revenir à la saisie des données spécifiques à chaque objet.

Calcul des dimensions préalables :

Il se fait en fonction du nombre en cours de chaque objet du modèle et de dimension de la fenêtre du modèle.

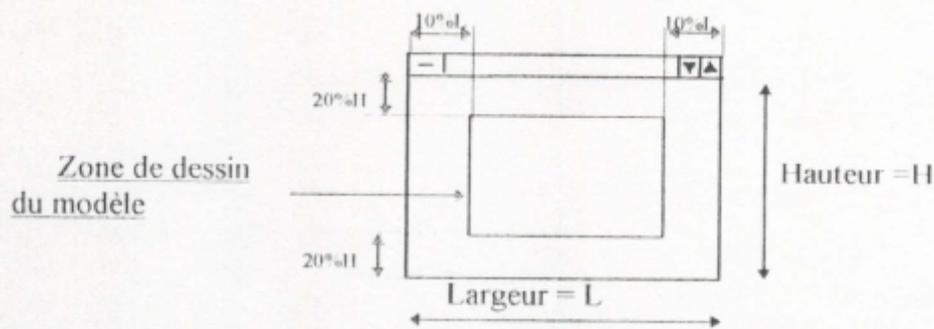


Figure 3.1-4 Mise en page de la fenêtre Modèle.

On fixe une zone de la fenêtre pour le dessin du modèle qui correspond à un rectangle (ou carré) se situant au milieu de la fenêtre du modèle comme indiqué sur la figure précédente, les contraintes de dimension de cette zone ne sont pas arbitraires mais répondent à un soucis de clarté du dessin; on les a fixés après quelques essais.

On notera cette zone par Client sa hauteur par Client H et sa largeur par Client L.

on a donc Client.H=60*H/100

Client.L=80*L/100

on pose $nt = 7 * n_{arbre}$ $nt = T$ si $n_{arbre} = 0$

La dimension du disque se calcule en fonction de celle de l'arbre avec :

Épaisseur du disque = 7 * épaisseur Arbre

Arbre: hauteur H=Client.H/8

Largeur L=Client.L*7/nt

Disque: hauteur H=Client.H

Largeur L=Client.L/nt

Palier: hauteur =(Disque.H-Arbre.H)/3

Largeur =Client.L*3/nt

Support de Palier: hauteur =Palier.H

Largeur =Palier.L

Masse concentrée: hauteur =Palier.H

Largeur =Palier.L/2

Balourd: hauteur = Disque.H/6

Largeur = Client.L*2/nt

Représentation avec mise à l'échelle:

Dans ce mode de dessin les données géométriques des objets du modèle sont prises en

compte; on détermine la longueur totale du modèle $L_m = \sum_{i=0}^{n_{arbre}} Arbre.L_i + \sum_{i=0}^{n_{disque}} Disque.L_i$

et la hauteur du modèle $H_m = \text{Max}(Arbre.H_i, Disque.H_j)_{i=1, n_{arbre}; j=1, n_{disque}}$ à partir de ces deux valeurs on calcule l'échelle sur la direction x et la direction y, il ne restera plus qu'à multiplier les dimension de chaque objet par cette échelle.

Dessin des objets:

Après la détermination des dimensions de chaque type d'objet on passe à la détermination de la position (x, y) de tous les objets du modèle.

En notant obj la position dans la liste des objets de l'objet dont on veut calculer la position sur la zone client et Posx.obj, Posy.obj sa position dans la zone client on a :

Position suivant x:

$Posx.obj=0$

de $i=1, obj$

si un arbre se trouve à l'index i dans la liste

$Posx.obj=Posx.obj+Arbre.L_i$

si un disque se trouve à l'index i dans la liste

$Posx.obj = Posx.obj +Disque.L_i$

Position suivant y:

Arbre : $Posy.obj=Client.H/2-Arbre.H/2$

Disque : $Posy.obj=0$

Palier : $Posy.obj=Client.H/2+Arbre.H/2+5$

Support de palier : $Posy.obj= Client.H/2+Arbre.H/2+Palier.H+5$

Masse Concentrée : $Posy.obj=Client.H/2-Arbre.H/2-5$

Balourd: $Posy.obj= Balourd.H$

En résumé:

- on détermine les dimensions de la fenêtre du modèle,
- on détermine les dimensions de la zone client de dessin du modèle,
- on calcule les dimensions de chaque type d'objet,
- on calcule la position de chaque objet,
- et enfin on dessine le modèle sur la fenêtre en parcourant la liste des objets du modèle.

3.1.3.1.2.4.Effacer :

Efface le contenu de la fenêtre du modèle.

3.1.3.1.2.5.Imprimer :

Calcule les dimensions de feuille d'imprimante en cour et lance l'impression du modèle.

3.1.3.1.3.Fonctions

3.1.3.1.3.1.Données des objets:

Selon le type d'objet sélectionné, on affiche une boîte de dialogue pour la saisie ou la consultation des données de tous les objets ayant le même type; cf. manuel d'utilisation pour les boîtes de dialogues de saisie des données pour chaque type d'objet.

De nouvelles propriétés ont été ajoutés aux données de palier qui sont : le type de palier correspondant à un entier donnant un type parmi six types les plus utilisés dans l'industrie et des données pour l'étude tribologique du palier.

Type de palier :

Présente une liste de différents types de paliers couramment utilisés dans l'industrie.

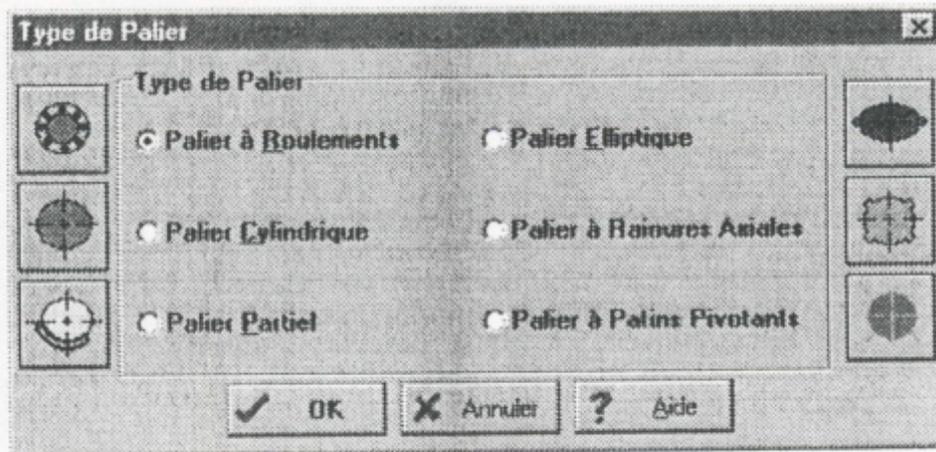


Figure 3.1-5 Sélection du type palier.

La sélection du type de palier se fait en appuyant sur le bouton type de la boite de dialogue des données du palier .

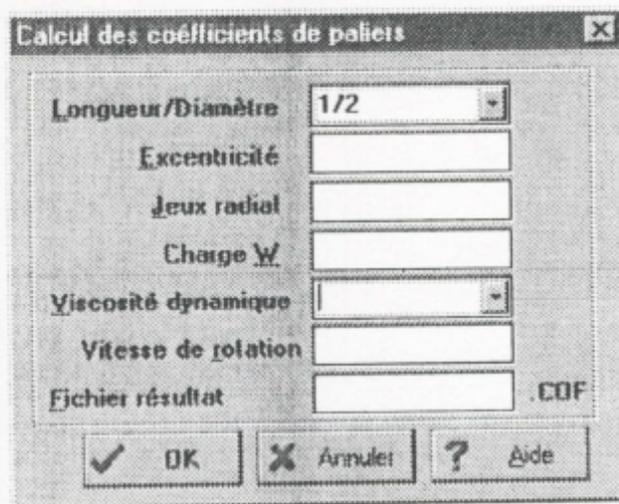


Figure 3.1-6 Saisie des caractéristiques du palier pour le calcul des coefficients.

Cette fenêtre nous permet d'introduire les données géométriques du palier, du lubrifiant et ses propriétés ainsi que toutes les données nécessaires aux autres modules du logiciel qui permettent le calcul des propriétés statiques et dynamiques du palier.

3.1.3.1.3.2. Matériaux:

Affiche une boite de dialogue pour la saisie des propriétés des matériaux des arbres : Module de Young E, module de torsion G, coefficient de poisson γ (nu) et densité (rho). Une petite bibliothèque a été élaborée contenant sept matériaux parmi les plus utilisés.

Exemple : La boite de dialogue matériaux suivante affiche les caractéristiques des matériaux des arbres; comme illustré, pour le modèle en cours on a :

Description du matériaux = Acier au carbone \ alliage
 Module de Young E = 2.95E+05 psi Module de rigidité en torsion G = 1.15E+05 psi
 Coefficient de poisson γ = 0.3 Densité rho = 0.28 lb/in³

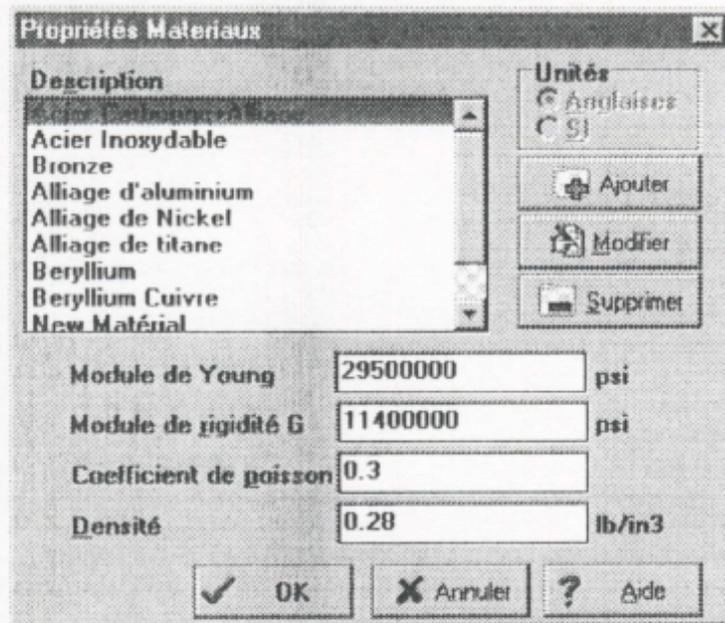


Figure 3.1-7 Boite de dialogue Propriétés matériaux.

L'utilisateur peut ajouter un nouveau matériaux, modifier un matériaux déjà existant ou en supprimer un de la liste. (L'enregistrement se fait automatiquement sur le fichier «MATERIAL.DAT » après validation)

3.1.3.1.3.3.Sauvegarde

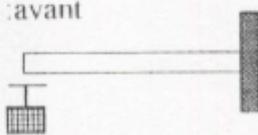
Sauvegarde le modèle en cours dans un fichier au format de RDA [25]. cf. Manuel d'utilisation.

3.1.3.1.3.4.Ajout objet de type ...

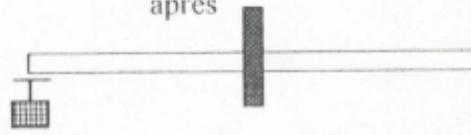
Ajout d'un arbre:

Le nouvel arbre prend le numéro Nstat-1, on incrément Narbre de 1, on incrément Nstat de 1, on insert un arbre préalable à la fin de la liste des objets du modèle et enfin on dessine le modèle.

Exemple :avant



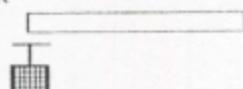
après



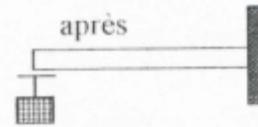
Ajout d'un disque:

le nouveau disque prend le numéro Ndisc + 1, on incrément Ndisc de 1, on insert un disque préalable à la fin de la liste des objets du modèle, et enfin on dessine le modèle.

Exemple: avant



après



Ajout d'un Palier:

On vérifie si le dernier objet n'est pas un palier ou un support de palier, le nouveau palier prend le numéro $N_{pal} + 1$, on incrémente N_{pal} de 1, on insère un palier préalable à la fin de la liste des objets du modèle et enfin on dessine le modèle.

Exemple:



Ajout d'un Support de palier:

On vérifie qu'à la dernière station se trouve un palier, et qu'un support de palier n'y est pas déjà associé, on donne au nouveau support de palier le numéro $N_{ped} + 1$, on incrémente N_{ped} de 1, on insère un support de palier préalable à la fin de la liste des objets du modèle, et enfin on dessine le modèle.

Exemple:



Ajout d'un Balourd:

On donne le numéro $N_{bal} + 1$ au nouveau balourd, on incrémente N_{bal} de 1, on insère un balourd préalable à la fin de la liste des objets du modèle et enfin on dessine le modèle.

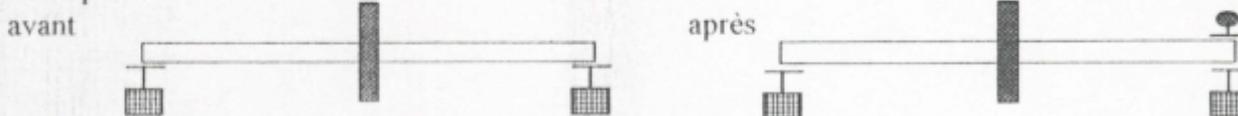
Exemple:



Ajout d'une Masse concentrée:

On vérifie si le dernier objet n'est pas une masse concentrée, on donne le numéro $N_{mc} + 1$ à la nouvelle masse concentrée, on incrémente N_{mc} de 1 on insère une masse concentrée préalable à la fin de la liste des objets du modèle et enfin on dessine le modèle.

Exemple:



3.1.3.1.3.5.Insertion:

Sert à insérer un objet à une station donnée, après la sélection du type d'objet à insérer et de la station destination dans un boite de dialogue (figure suivante), on insère le nouvel objet à la station destination sélectionnée, on incrémente de 1 les numéros des objets de même type qui se situent à droite de la station d'insertion, et enfin on dessine le modèle.

N.B. :

- Dans le cas d'insertion d'un support de palier on ne retrouvera dans la liste destination que les station contenant un palier (les supports de paliers sont toujours associés aux paliers).

- Les objets suivant ne sont pas autorisés à être en double sur une même station : Paliers, supports de palier et masses concentrées. Ceci est pris en compte par l'éditeur de modèles.

Exemple : La boîte d'insertion suivante montre d'après la sélection que l'on veut insérer un nouvel objet de *type Arbre* à la *station 2*.

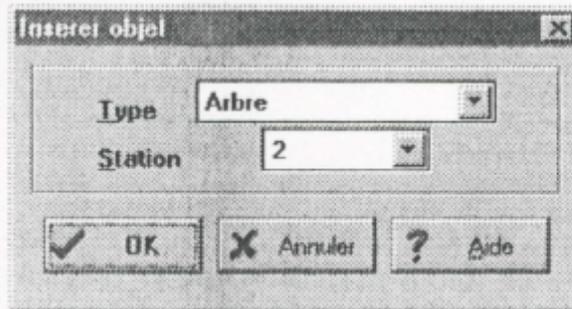


Figure 3.1-8 Boîte de dialogue insertion nouvel objet.



3.1.3.1.3.6. Supprimer un objet:

Sert à supprimer un objet d'une station déterminée, après la sélection du type d'objet à supprimer et de la station destination dans une boîte de dialogue (figure suivante), on supprime l'objet de la station sélectionnée, on décrémente de 1 les numéros des objets de même type qui se situent à droite de la station de suppression, et enfin on dessine le modèle.

Exemple: La boîte de suppression suivante montre d'après la sélection que l'on veut faire supprimer un objet de *type Masse concentrée* qui se trouve à la *station 5*.

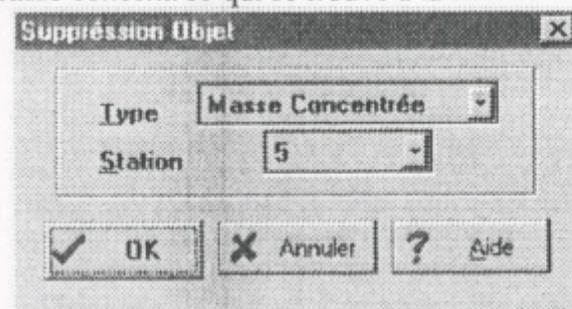


Figure 3.1-9 Boîte de dialogue suppression objet.



3.1.3.1.3.7. Annuler dernier objet:

Supprime le dernier objet du modèle de la liste des objets du modèle et dessine le modèle.

3.1.3.1.3.8. Dupliquer un objet:

Faire une copie d'un objet du modèle vers une autre station, après la sélection du type d'objet à dupliquer, sa station initiale et la station destination dans une boîte de dialogue (figure suivante), on insert à la position destination en décalant les objets qui viennent après; comme dans le cas de l'insertion et enfin on dessine le modèle.
 Exemple: La boîte de duplication suivante montre d'après la sélection que l'on veut faire une copie de l'objet de *type Disque* qui se trouve à la *station 4* et l'insérer à la *station 3*.

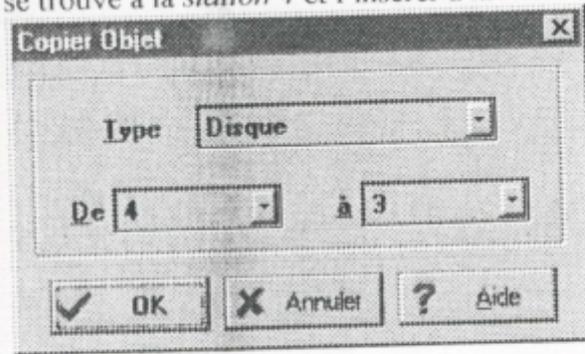


Figure 3.1-10 Boîte de dialogue duplication objet.



3.1.3.1.3.9. Déplacer:

Déplacer un objet d'une station à une autre, après la sélection du type d'objet à déplacer, sa station initiale et la station destination dans une boîte de dialogue (figure suivante), on supprime l'objet de la liste et on insert un autre ayant les mêmes données à la station destination en décalant les objets qui viennent après comme dans le cas de l'insertion et enfin on dessine le modèle.
 Exemple :La boîte de déplacement suivante montre d'après la sélection que l'on veut déplacer un objet de *type palier* de la *station 5* vers la *station 1*.

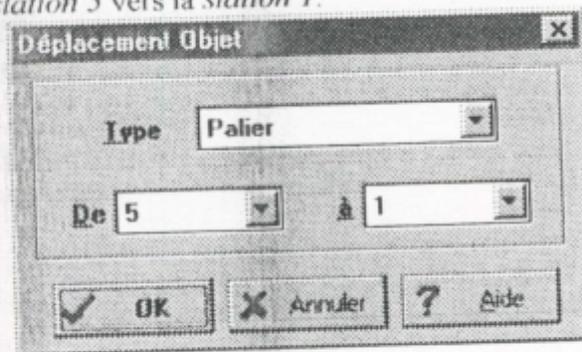


Figure 3.1-11 Boîte de dialogue déplacement objet.



N.B. : Dans le cas du déplacement d'un palier associé à un support de palier il sera demandé de confirmer le déplacement du palier avec son support.

3.1.3.1.3.10. Paramètres:

Affiche dans une boîte de dialogue les paramètres modèle en cours à savoir :

Titre du modèle

Type d'unité utilisé (anglaise ou SI)

Nombres des : Arbres (nstat-1), Disques, Paliers, Supports de paliers, Balourd, Masses concentrées ; (zéro sinon).

Exemple : La boîte Paramètre suivante affiche les paramètres suivants d'un modèle :

Titre « Test modèle avec paliers à coefficients constants »

Type d'unité : anglaise

Nombre d'arbre = 3, nombre de disque = 2, nombre de palier = 2, nombre de support de palier = 0, nombre de balourd = 1, nombre de masse concentrée = 0,

Longueur du modèle = 21.74 in.

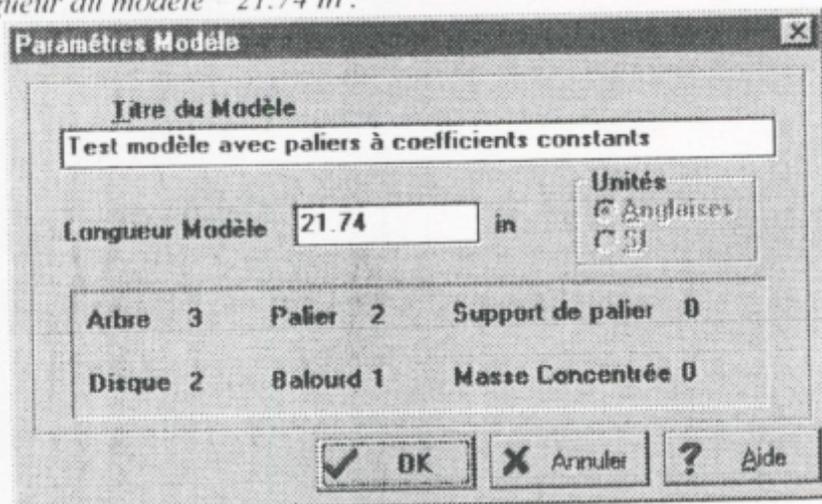


Figure 3.1-12 Boîte de dialogue paramètres modèle.

3.1.3.1.3.11. Arranger les objets dans la liste :

Pour chaque objet on détermine en fonction du type d'objet et de son numéro la position qu'il doit occuper dans la liste des objets du modèle, s'il n'y se trouve pas déjà on l'insère à cette position et décalant les objet qui se trouvent à droite de cette position.

3.1.3.1.3.12. Menu flottant:

C'est un menu qui surgit sur la fenêtre à la position du click du bouton droit de la souris il contient quelques options du menu modèle les plus courantes. Il peut aussi être activé par les touches « ALT+F10 ».

3.1.3.1.3.13. Copier le modèle en mémoire

Permet de copier le dessin du modèle en mémoire pour le coller dans une autre application Windows (traitement de texte ou autre). L'exemple suivant a été importé par la méthode copier coller vers le traitement de texte WINWORD de Microsoft.

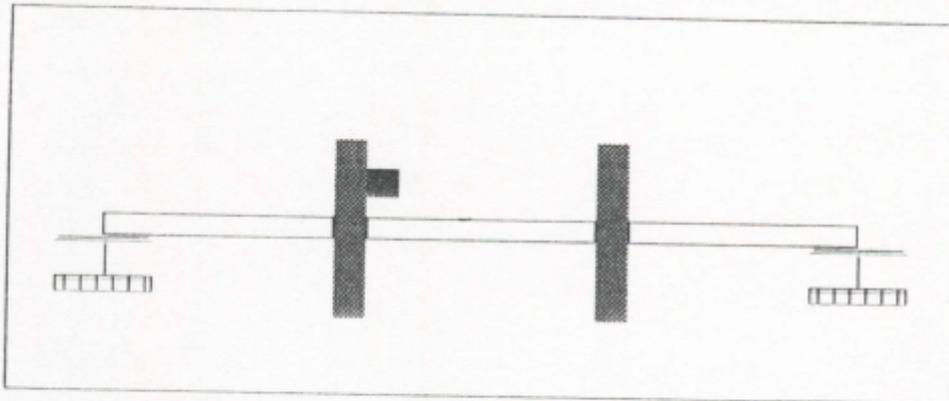


Figure 3.1-13 Exemple de la fonction copier coller Modèle sans mise à l'échelle.

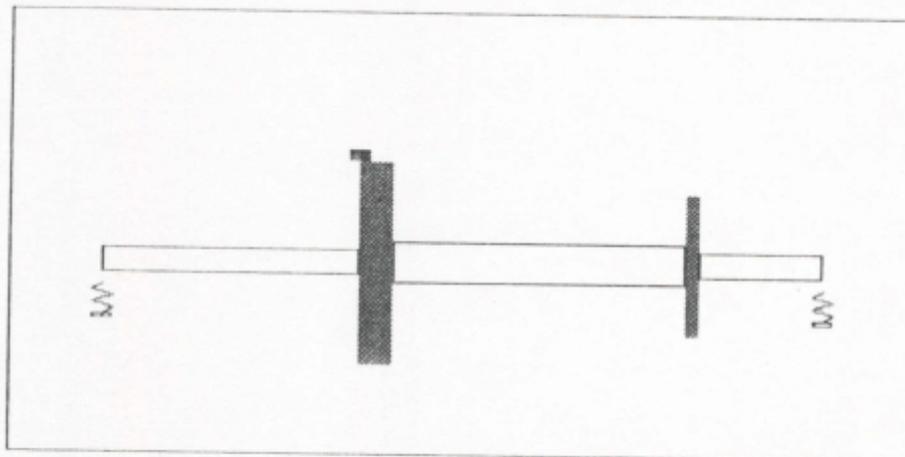


Figure 3.1-14 Exemple de la fonction copier coller Modèle avec mise à l'échelle.

Dimensions:

| Arbre N° | Longueur(in) | Diamètre extérieur(in) |
|-----------|---------------|------------------------|
| 1 | 8.29 | 1 |
| 2 | 9.45 | 1.5 |
| 3 | 4 | 1 |
| Disque N° | Epaisseur(in) | Diamètre extérieur(in) |
| 1 | 1.08 | 7.5 |
| 2 | 0.4 | 5.25 |

3.1.3.2. Fenêtre Modèle en Perspective

La fenêtre de la visualisation du modèle en perspective permet de faire une représentation en trois dimension du modèle en cours; ceci à l'aide d'une projection en perspective cavalière avec rendu réaliste des différents objets du modèle. Pour lancer cette représentation il faut qu'il y ait un modèle déjà chargé, et qu'il soit actif et non vide.

3.1.3.2.1. Edition du modèle en 3D avec rendu réaliste :

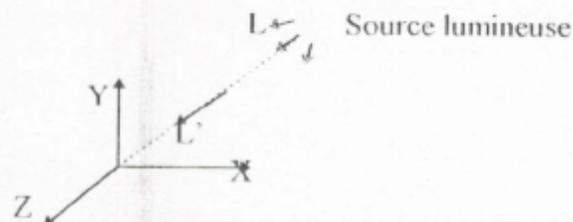
On se propose de réaliser un module de visualisation de modèle en trois dimensions, l'intérêt que revêt cette partie n'est pas simplement esthétique mais beaucoup plus technique; dans la mesure où on voudrait voir notre modèle d'une façon aussi proche de la réalité que possible ; cela nous permettra comme on le verra par la suite de vérifier d'une manière plus concise la position des différentes entités composant le modèle (par exemple : la disposition des balourds autour des disques, chose qui n'est pas évidente dans une projection plane). Enfin cela peut ouvrir de nouvelles perspectives quand à l'extension du Pré-processeur : on cite par exemple la visualisation d'aubes de turbines disposées autour d'un disque .

3.1.3.2.1.1. Problème posé :

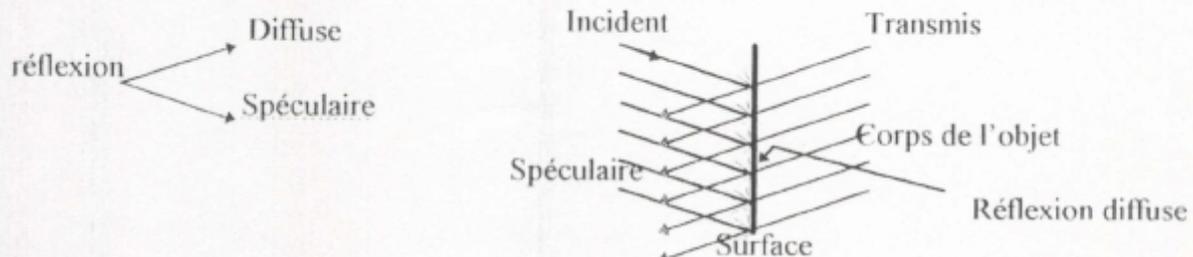
Réalisation d'une perspective cavalière du modèle en respectant la disposition des différentes entités composant ce dernier et obtention du rendu réaliste en utilisant le modèle d'illumination de PHONG [2].

3.1.3.2.1.2. Modèle d'illumination :

On considérera une source lumineuse ponctuelle placée à l'infini suivant la direction de l'axe LL' qui se trouve sur le plan ZOY



L'énoncé de la méthode est très simple il stipule que les rayons lumineux provenant d'une source lumineuse change de direction au contact des surfaces selon les lois de réfraction, lors d'un changement de milieu. Une partie de l'énergie d'un rayon lumineux est absorbée lors du changement de direction, si la lumière incidente est blanche la partie absorbée, pour chaque composante spectrale détermine la couleur de l'objet .L'autre partie de son énergie est soit transmise soit réfléchi.



L'intensité relative à la réflexion spéculaire : L'intensité lumineuse réfléchie varie en fonction de l'angle téta formé entre les rayons incidents L et la normale à la surface selon une distribution en cosinus (Lois de Lambert) [2]. L'intensité peut se calculer par un produit scalaire $L = K(L.N)$ si $||L|| = ||N|| = 1$

3.1.3.2.1.3. Implémentation :

On a choisi d'utiliser la représentation cavalière pour sa simplicité d'implémentation ; en effet cela revient à faire une extrusion de la vue de face suivant la direction de la première bissectrice.

| Objet | Vue de face | Perspective |
|-------------------|---|---|
| Arbre |  |  |
| Disque |  |  |
| Palier |  |  |
| Support de palier |  |  |
| Balourd |  |  |
| Masse concentrée |  |  |

Figure 3.1-15 Représentation perspective adoptée.

Dans un premier temps on prend des valeurs préalables constantes des longueurs d'arbres et épaisseurs de disques . On prend aussi épaisseur de palier = épaisseur de support de palier = Cste et le diamètre du balourd = diamètre masse concentrée = Cste
 N.B. on pourra par la suite fixer le diamètre des masses concentrées en fonction de la masse correspondante; ceci pour vérifier visuellement et comparativement les masses concentrées entre elles (Ceci reste valide pour les balourds).

3.1.3.2.1.4. Rendu réaliste:

La méthode utilisée ci après est basée sur le modèle de la réflexion spéculaire (PHONG).

3.1.3.2.1.4.1. Cylindre

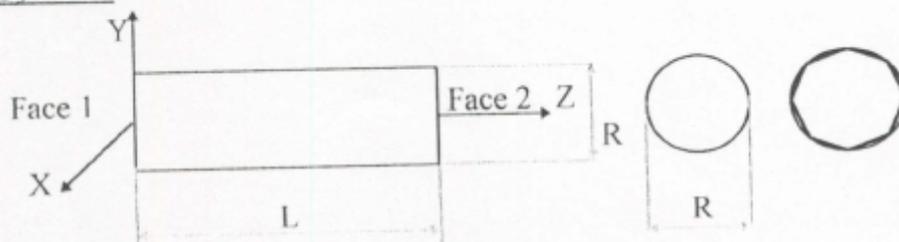


Figure 3.1-16 Cylindre et sa discrétisation.

Pour la représentation des cylindres on va adopter un maillage de point autour du cercle formant la base du cylindre. Tous les systèmes graphiques (écrans, traceurs, imprimantes) utilisent ce type de procédé pour représenter des cercles ou des courbes. Le nombre de points générés étant en général proportionnel à la dimension de la figure à représenter. Dans notre cas on a pris un nombre de points constant $n=20$ (car il nous a donné un affichage assez confortable et satisfaisant).

Pour parcourir tous le cercle on a $\theta = 0..360^\circ$ ($0..2\pi$).

Le pas angulaire $\theta_p = 2\pi/n = 18^\circ$

Calcul des points intermédiaires

Face 1

$$\theta_0 = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \quad P_0 = \begin{cases} 0 \\ -R \\ 0 \end{cases} \quad 3.1.3.1$$

$$\theta_1 = \left(\frac{-\pi}{2}\right) + \theta_p \quad P_1 = \begin{cases} R \cos\left(\frac{-\pi}{2} + \theta_p\right) \\ R \sin\left(\frac{-\pi}{2} + \theta_p\right) \\ 0 \end{cases} \quad 3.1.3.2$$

$$\theta_2 = \left(\frac{-\pi}{2}\right) + 2\theta_p \quad P_2 = \begin{cases} R \cos\left(\frac{-\pi}{2} + 2\theta_p\right) \\ R \sin\left(\frac{-\pi}{2} + 2\theta_p\right) \\ 0 \end{cases} \quad 3.1.3.3$$

$$\theta_0 = \left(\frac{-\pi}{2}\right) + 0 \cdot \frac{2\pi}{n} \quad , \quad \theta_1 = \left(\frac{-\pi}{2}\right) + 1 \cdot \frac{2\pi}{n} \quad , \quad \theta_2 = \left(\frac{-\pi}{2}\right) + 2 \cdot \frac{2\pi}{n}$$

$$\text{donc } \theta_i = \left(\frac{-\pi}{2}\right) + i \cdot \frac{2\pi}{n} = \pi \left(\frac{4i - n}{2n}\right) \quad 3.1.3.4$$

$$\text{D'où } P_i = \begin{cases} R \cos\left(\frac{4i - n}{2n}\right) \\ R \sin\left(\frac{4i - n}{2n}\right) \\ 0 \end{cases} \quad 3.1.3.5$$

Face 2 : Pour la Face 2 on retrouve les mêmes points sauf qu'au niveau de la direction Z la coordonnée $P_i.Z$ devient égale à L (Longueur du disque au lieu de 0)

$$P_i = \begin{cases} R \cos\left(\frac{4i - n}{2n}\right) \\ R \sin\left(\frac{4i - n}{2n}\right) \\ L \end{cases} \quad 3.1.3.6$$

3.1.3.2.1.4.2. Sphère

Considérons une sphère de centre O et de rayon r . Tout point de la sphère a pour coordonnées

$$x = r \cos(v) \cos(u)$$

$$y = r \cos(v) \sin(u)$$

$$z = r \sin(v)$$

u et v étant respectivement la longitude et la latitude du point. Il suffit de faire varier u de 0 à 2π (ou de $-\pi$ à π) et v de $-\pi/2$ à $+\pi/2$ pour décrire toute la sphère. Si nous choisissons v entre $-\pi$ et π , tout point de la sphère serait obtenu plusieurs fois. On établit ensuite un programme permettant de tracer méridiens et parallèles d'une sphère sur laquelle on a effectué une rotation d'angle α (dépendant de la direction de la source lumineuse) autour de son axes vertical. On suppose que la source lumineuse est placée au dessus (verticalement) de la sphère, on détermine les éléments de surfaces et leurs couleurs ensuite on fait subir à la sphère deux rotations suivant les deux axes principaux.

3.1.3.2.1.4.3. Objets plus Complexes

A partir des entités simples décrites précédemment on peut envisager la construction d'objet plus complexes qui nous serviront à la représentation du modèle; ces objets seront construits à partir des ces éléments simples à partir d'opérations booléennes qui sont : réunion, addition, ou exclusif, ou inclusif et aussi d'opération élémentaire telles que la représentation par balayage *{Sweep representation}*.

3.1.3.2.1.4.3.1. Palier

Pour le palier on le décompose en un demi cylindre et deux quart de cylindre et on utilise des opérations booléennes sur ces décompositions pour arriver à la construction du palier.

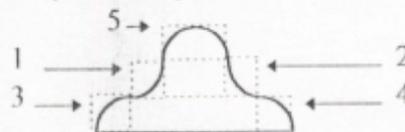


Figure 3.1-17 Décomposition du palier en éléments simples.

Une fois décomposés les différents éléments constitutifs peuvent être assimilés à quatre quarts d'arbres (1, 2, 3, 4) et une moitié d'arbre (5), ne reste ensuite qu'à faire une extrusion suivant la direction de la projection.

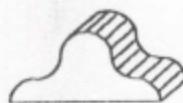


Figure 3.1-18 Extrusion du palier suivant la direction de la projection.

3.1.3.2.1.4.3.2. Support de palier

Le même raisonnement que pour le palier; on décompose le support en un demi cylindre et deux quart de cylindre et on utilise des opération booléennes sur ces décomposition pour arriver à la construction du support de palier.

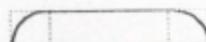


Figure 3.1-19 Décomposition du support de palier en éléments simples.

Une fois décomposé les différents éléments constitutifs sont traité comme des portions d'arbres.

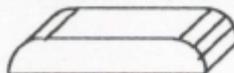


Figure 3.1-20 Extrusion du support de palier suivant la direction de la projection.

3.1.3.2.2. Evénements associés

3.1.3.2.2.1. Initialiser :

Comme cité précédemment pour initialiser la représentation du modèle en perspective il faut qu'il y ait déjà un modèle et qu'il soit non vide. L'initialisation permet de créer une nouvelle fenêtre ayant pour tâche la représentation du modèle en perspective cavalière.

Représentation du modèle :

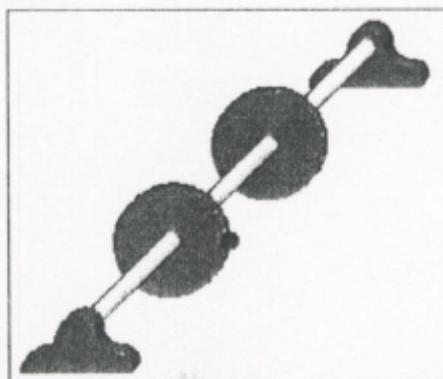


Figure 3.1-21 Représentation du modèle en 3D par défaut

3.1.3.2.2.2. Actualiser le dessin :

la fenêtre de représentation du modèle en perspective peut être affichée en même temps que celle de l'éditeur du modèle; Si une modification survient sur le modèle à partir de l'éditeur par les commandes d'ajout, insertion, suppression, modification de données etc.. l'éditeur de modèle envoi un message à la fenêtre de représentation en 3D pour que celle ci réactualise le dessin du modèle.

3.1.3.2.3. Fonctions

3.1.3.2.3.1. Options de représentation

A la fenêtre représentation du modèle en perspective est associé un menu flottant qui peut être appelé par le raccourci clavier ALT+F10 ou avec le click du bouton gauche de la souris sur cette fenêtre. Sur ce menu on retrouve les différents modes de représentation qui sont:



Figure 3.1-22 Vue Axiale

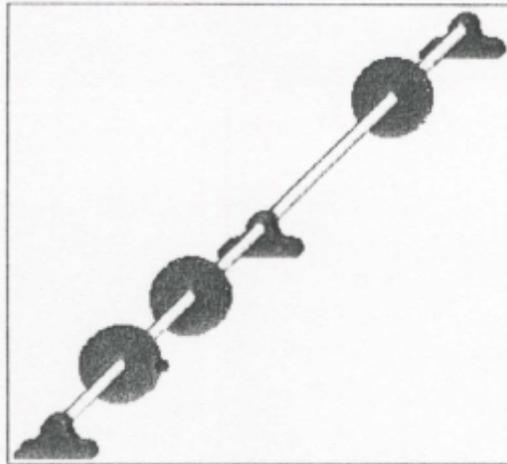


Figure 3.1-23 Perspective



Figure 3.1-24 Vue de Face

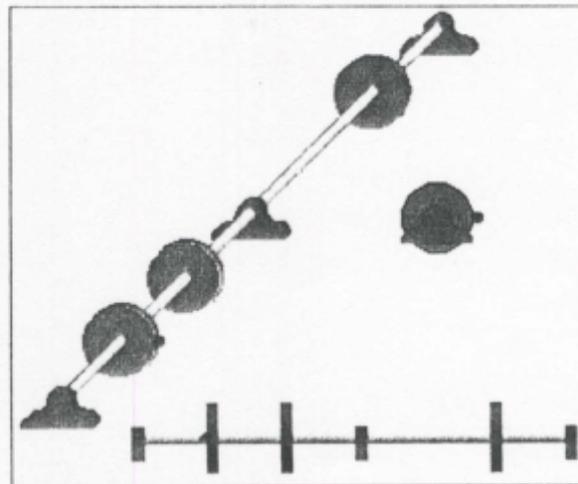
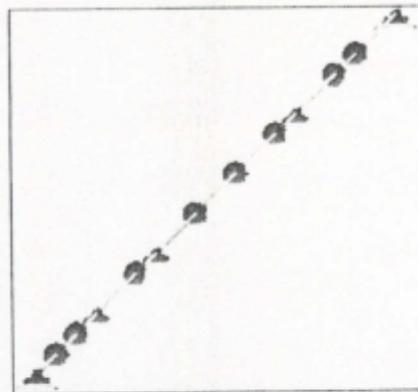


Figure 3.1-25 Toutes les vues

Ou n'importe quelle autre combinaison de ces vues.

3.1.3.2.3.2. Zoom

Si le modèle est grand en faisant la représentation perspective on aurait des objets très petits; étant donné que cette représentation dessine tous les objets du modèle :



Pour pouvoir représenter seulement une partie du modèle et avoir ainsi un détail entre deux stations il faut utiliser la commande zoom du menu flottant qui donne la boîte de dialogue suivante :

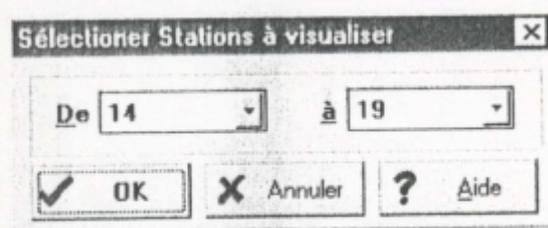


Figure 3.1-26 Saisie des station pour le zoom sur représentation perspective.

Exemple : pour le modèle précédent si on saisie les stations de : 14 à : 19 ; cela veut dire que l'on souhaite représenter les objets du modèle qui se situent entre les stations 14 et 19. Le résultat serait :

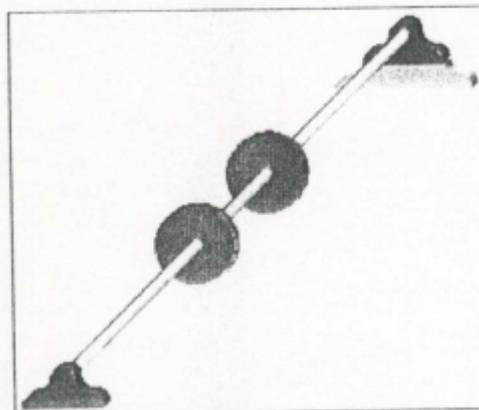


Figure 3.1-27 Zoom sur le modèle Stations (de 14 à 19).

N.B. : Pour savoir quelles stations sont représentées sur la fenêtre il suffit de lire le titre de la fenêtre :

- Cas représentation de tout le modèle titre = *Edition Modèle 3D*
- Cas zoom titre = *Edition Modèle 3D stations: i-j*
ou (i station début et j station finale a inclure sur la représentation)

Pour revenir sur la représentation complète du modèle sélectionner Zoom et valider sur OK en laissant les champs de : et à : vides.

3.1.4.Fenêtre Pression du Palier

3.1.4.1.Evénements associés

3.1.4.1.1.Initialiser :

Lecture du fichier de pression de palier, initialise la fenêtre de pression de palier

3.1.4.1.2.Dessiner :

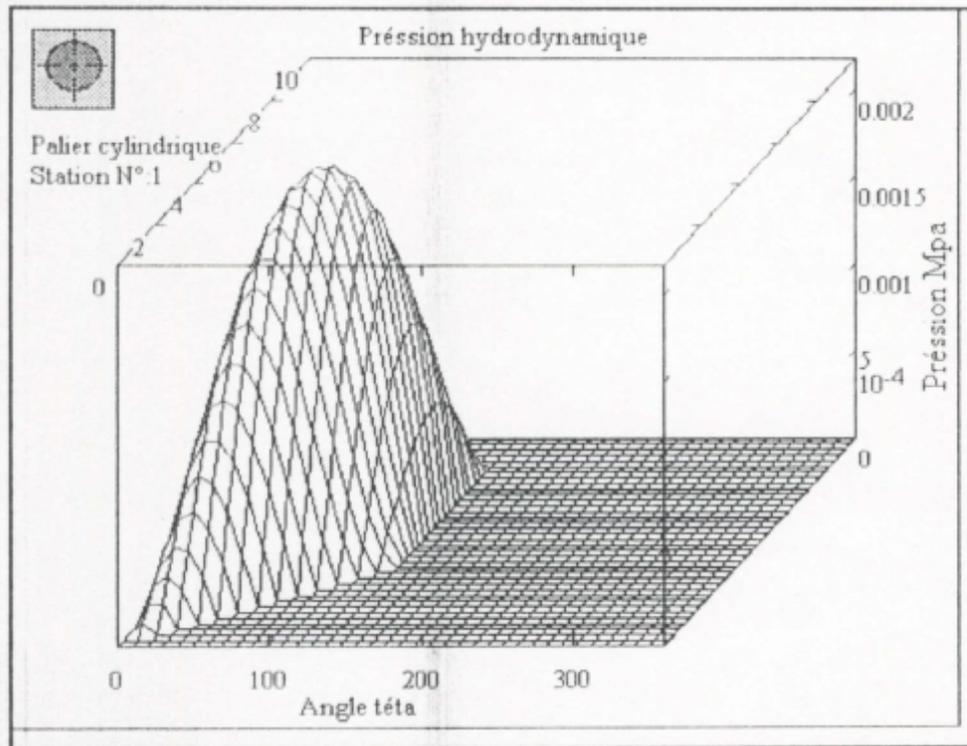


Figure 3.1-28 Représentation de la pression en perspective.

3.1.4.2.Fonctions

3.1.4.2.1.Option pression de palier :

Affiche une boîte de dialogue pour la sélection :

- du titre du graphe
- des légendes des axes
- du mode de représentation :
 - 3D : pour afficher une perspective
 - Lignes de niveau : pour afficher les lignes de niveau de la pression
 - Mixte : pour afficher les deux
 - Polaire : pour afficher un représentation polaire de la pression
- sélection du maillage de la grille.

Exemple : La boîte de dialogue correspond aux options de la fenêtre pression de palier pour la fenêtre pression en cours, les options sont :

dimension de la grille : 50

type de représentation : perspective 3D

titre : Pression hydrodynamique palier N°2

légende axe X: Angle téta légende axe Y: Position axiale légende axe Z: Pression Mpa

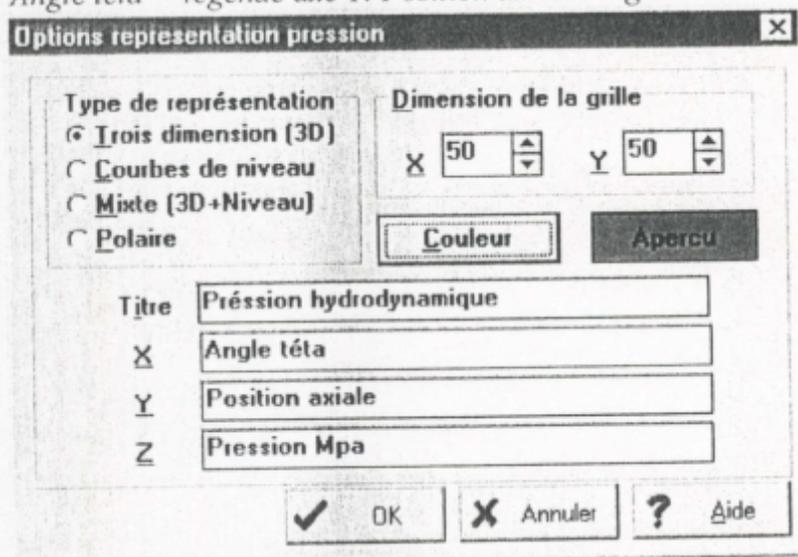


Figure 3.1-29 Options de représentation de la pression

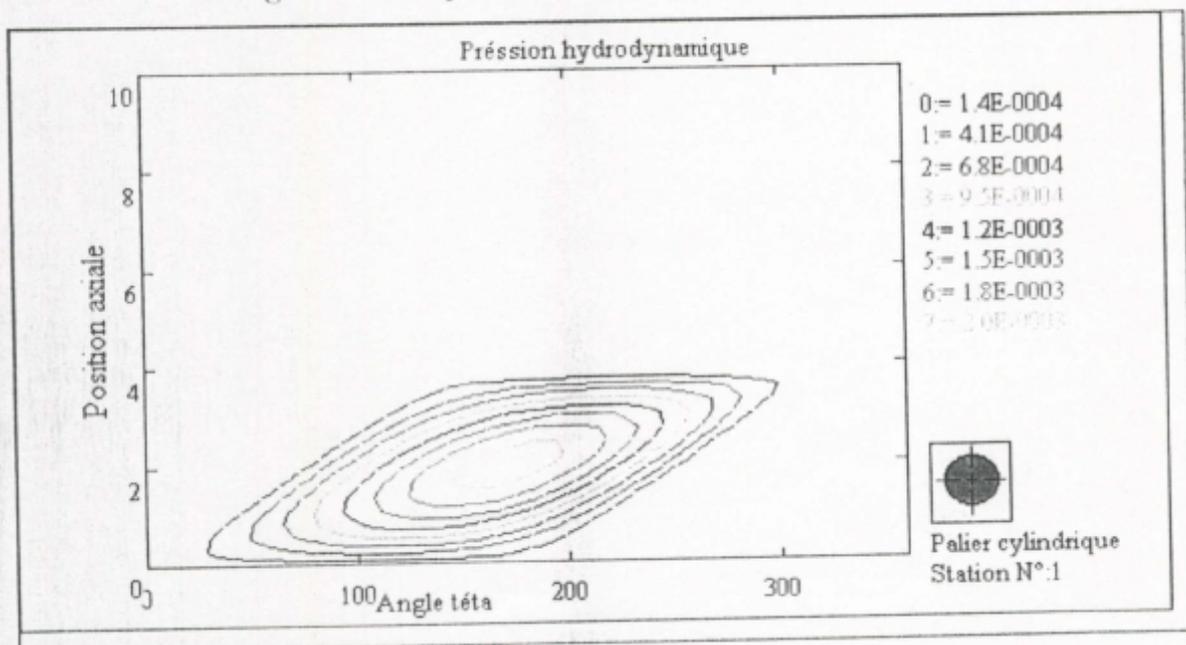


Figure 3.1-30 Représentation de la pression en lignes de niveau.

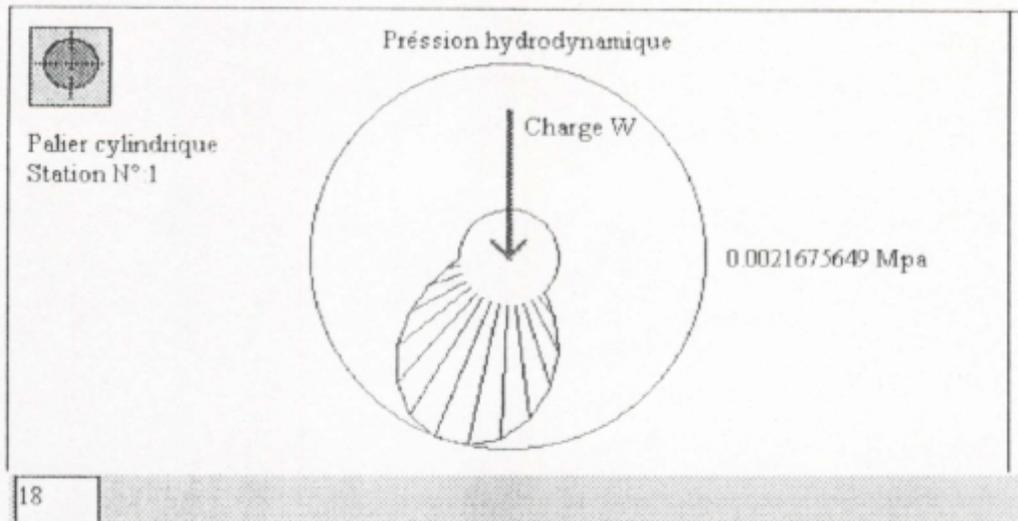


Figure 3.1-31 Représentation orbitale de la pression.

3.1.4.2.2. Menu flottant :

C'est un menu qui surgit sur la fenêtre à la position du click du bouton droit de la souris il contient les mêmes options du menu pression palier modèle, il peut aussi être activé par les touches « ALT+F10 ».

3.1.4.2.3. Copie de la fenêtre en mémoire :

Permet de copier le contenu de la fenêtre de la pression du palier en mémoire pour le copier dans une autre application Windows (traitement de texte ou autre).

3.2. Processeur :

3.2.1. Problème aux valeurs propres non amorti

Après l'analyse du problème aux valeurs propres non amorti, qui consiste à résoudre l'équation $\det(K-\lambda M)=0$, Sera crée un document graphe XY de type modes de vibrations (voir gestionnaire de projets). Dans ce graphe on retrouve les différents modes de vibration ainsi que la valeur de la fréquence propre pour chaque mode de vibration.

3.2.2. Problème aux valeurs propres amorti

Permet de lancer l'analyse du problème aux valeurs propres amorti qui consiste à résoudre l'équation du mouvement suivante: $[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = 0$ à partir de cette analyse est crée un document texte contenant les valeurs propres complexes.

3.2.3. Analyse de stabilité

L'analyse de stabilité dans le cas d'un modèle ayant des paliers (ou effet palier) avec coefficients dépendant de la vitesse de rotation, permet de visualiser l'évolution des parties réelles et imaginaires de la valeur propre.

La partie réelle peut être visualisée dans le document de type stabilité (extension du fichier STB).

La partie imaginaire peut être visualisée dans le document de type diagramme de Campbell (extension du fichier FRQ).

Un autre diagramme peut être généré à partir de cette analyse qui est le diagramme de Nyquist qui représente l'évolution des parties imaginaire et réelle de la valeur propre pour différentes vitesses dans le plan complexe (extension du fichier NQS).

3.2.4. Réponse harmonique permanente:

L'analyse pour la réponse permanente permet de visualiser selon l'analyse :

Amplitudes : l'amplitude de vibration d'une ou plusieurs stations du rotor suivant une direction donné en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Phases : l'angle de phase de vibration d'une ou plusieurs stations du rotor suivant une direction donné en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Orbites : l'orbite de vibration d'une ou plusieurs stations du rotor à une vitesse donné.

Déformée du rotor : le résultat de toutes les stations du rotor déformé en fonction de la vitesse de rotation du rotor .

3.2.4.1. Amplitudes de vibration

Pour cette option d'analyse on reporte sur le fichier résultat d'analyse l'amplitude de vibration des stations et des directions sélectionnées (X, Y).

3.2.4.2. Angle de phase

Pour cette option d'analyse on reporte sur le fichier résultat d'analyse l'angle de phase de vibration des stations et des directions sélectionnées (θ_x ou θ_y).

3.2.4.3. Orbites de vibration

Pour cette option d'analyse on résout l'équation N fois (N étant le nombre de points que l'on veut obtenir) de façon à obtenir une série de point (x, y) décrivant la position de la station du modèle autour de l'axe de rotation, ces points reliés entre eux forment l'orbite de vibration de la station. On reporte sur le fichier résultat d'analyse les couples (X, Y) représentant l'amplitude de vibration des stations sélectionnées (θ_x ou θ_y).

3.2.4.4. Déformée du rotor

Pour cette option d'analyse on résout l'équation d'une vitesse de départ V_d à une autre d'arrivée (finale) V_f avec un certain pas P. On obtient donc pour chaque itération une solution {q} contenant l'amplitude et l'angle de phase de vibration qui seront utilisés pour la visualisation de la déformée du rotor.

Seront reporté sur le fichier résultat d'analyse :

Le nom du fichier modèle et son titre, le nombre de stations, la longueur du modèle, la longueur de chaque tronçon du modèle (longueur des arbres), le nombre total d'itération $(= (V_f - V_d)/P)$ et pour chaque itération la vitesse de résolution ω , la solution $\{q\}^T = \{X, Y, \theta_x, \theta_y\}$.

3.2.5. Lissage des données

Cette analyse permet de faire un lissage d'un fichier de données, en sélectionnant le fichier de données et le nombre de colonnes à lisser.

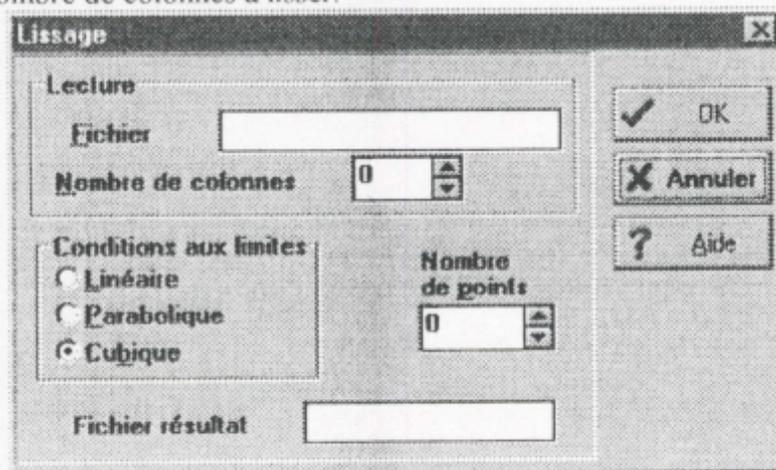


Figure 3.2-1 Boite de dialogue de saisie des options de lissage.

Donner par la suite les conditions aux limites de l'interpolation cubique spline à respecter, le nom du fichier résultat et le nombre de points à générer, cliquer sur le bouton OK pour lancer le lissage.

3.3.Post-processeur :

3.3.1.Graphes de type XY:

On désigne par les graphes xy les graphes ayant pour entrées les deux variables x et y, il s'agit dans notre cas des graphes d'amplitudes de vibration de phases et d'orbites.

3.3.1.1.Barre d'outils

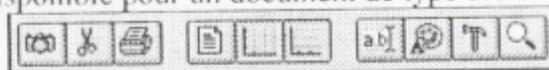


Figure 3.3-1 Barre d'outil fenêtre graphe XY

La barre d'outil du document graphe XY permet et dans l'ordre des boutons de

- copier le dessin du document dans le presse papier
- copier les valeurs des courbes dans le presse papier
- imprimer le dessin du document
- faire une représentation des courbes en utilisant un lissage
- masquer ou rendre visibles les légendes
- masquer ou rendre visible le quadrillage vertical
- masquer ou rendre visible le quadrillage horizontal
- afficher boîte de dialogue des titres du graphe
- changer les fontes et couleurs des titres
- voir les options du graphe

N.B.: le lissage n'est pas disponible pour un document de type orbites



Pour illustration on utilisera les résultats d'analyse d'un modèle de rotor simple (cf. 4.1)

3.3.1.2.Modes de vibration

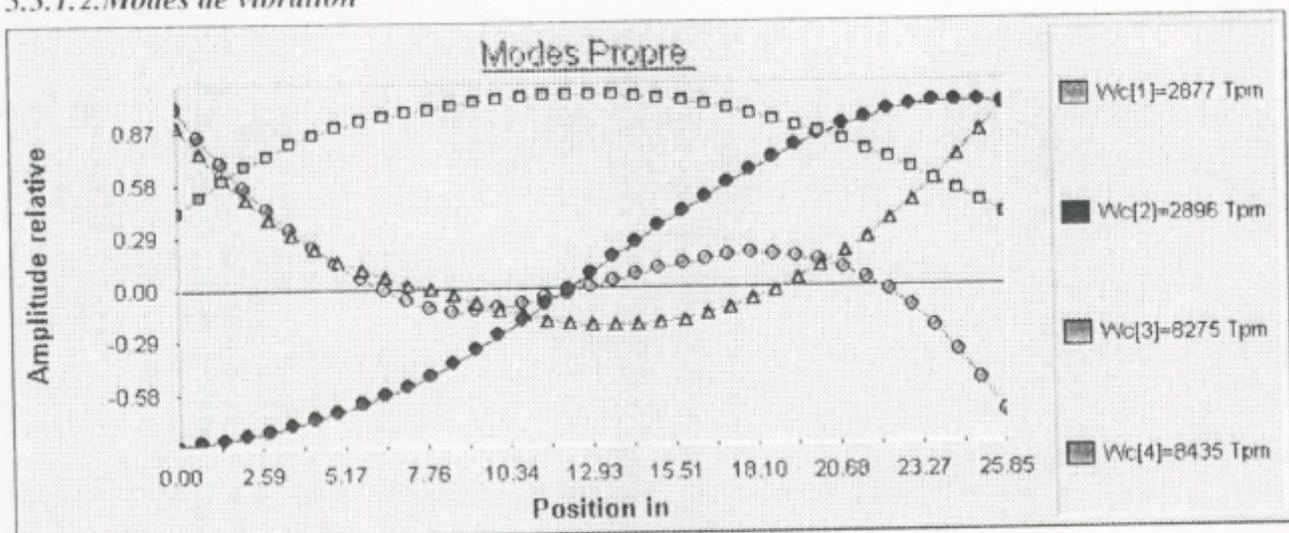


Figure 3.3-2 Modes de vibrations.

| Valeurs Graphe | | | | | |
|----------------|------------|------------|------------|-------------|--|
| N° | Position | Wc[1]=2877 | Wc[2]=2896 | Wc[3]=8275 | |
| 1 | 0 | 0.4192466 | 0.4397532 | -0.8560539 | |
| 2 | 0.71805556 | 0.51658787 | 0.5354561 | -0.8427014 | |
| 3 | 1.4361111 | 0.60300881 | 0.62020968 | -0.82534255 | |
| 4 | 2.1541667 | 0.67913769 | 0.69464309 | -0.80396257 | |
| 5 | 2.8722222 | 0.7456028 | 0.75938552 | -0.77854667 | |
| 6 | 3.5902778 | 0.8030324 | 0.81506614 | -0.74908009 | |
| 7 | 4.3083333 | 0.85205479 | 0.86231413 | -0.71554806 | |
| 8 | 5.0263889 | 0.89329823 | 0.90175867 | -0.67793578 | |
| 9 | 5.7444444 | 0.927391 | 0.93402891 | -0.63622849 | |

Figure 3.3-3 Tableau illustrant les fréquences naturelles et les modes associés.

3.3.1.3. Amplitudes de vibration

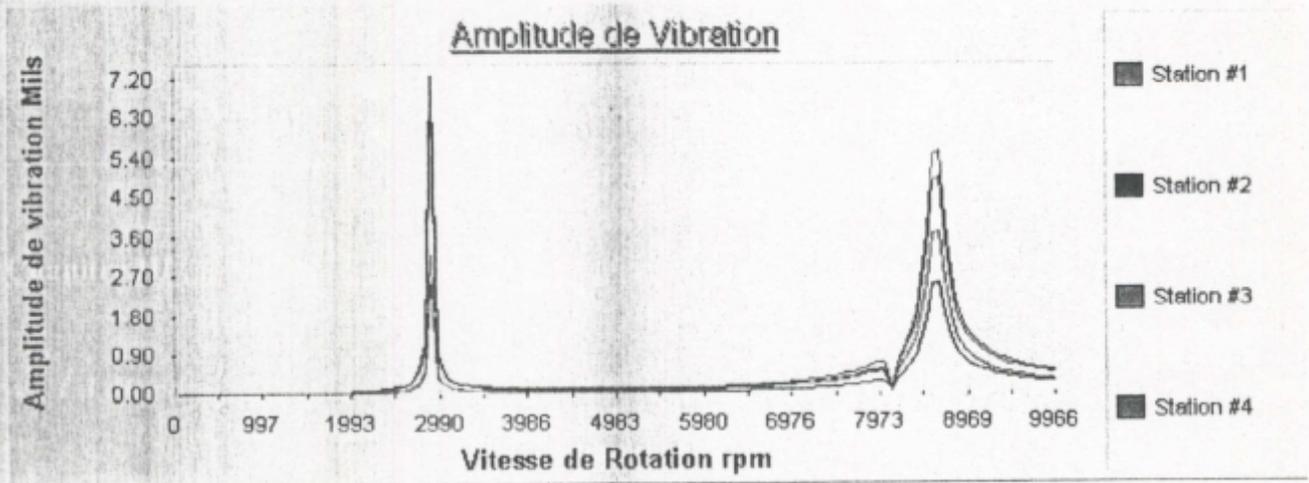


Figure 3.3-4 Amplitude de vibrations.

3.3.1.4. Angle de phase

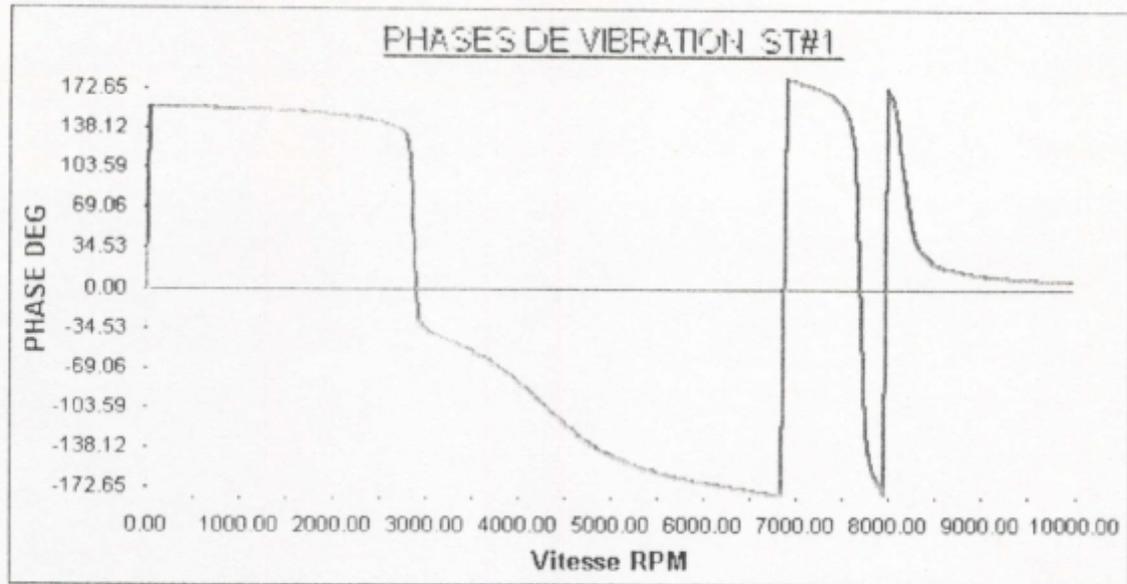


Figure 3.3-5 Phase de vibrations.

3.3.1.5. Orbites de vibration

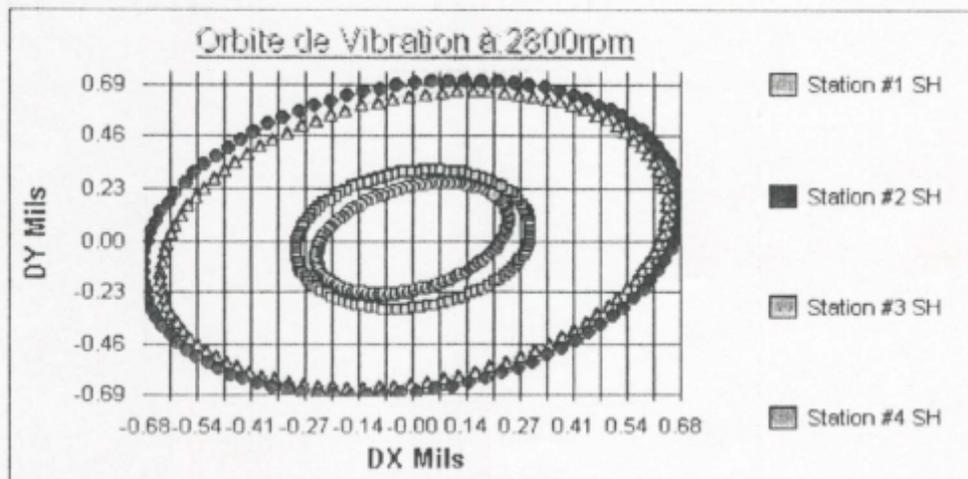


Figure 3.3-6 Orbite de vibration à la station N°4 vitesse 2800 rpm.

3.3.1.6. Graphiques d'analyse de stabilité

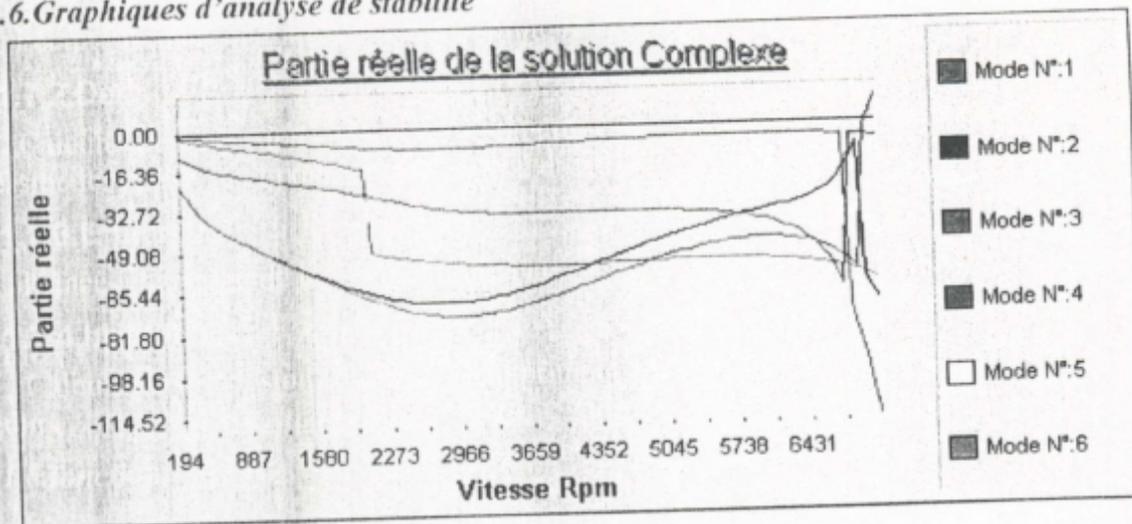


Figure 3.3-7 Partie réelle de la solution complexe.

3.3.1.7. Événements associé

3.3.1.7.1. Initialiser :

Lecture fichier du graphe et initialisation de la fenêtre du graphe.

3.3.1.7.2. Dessiner :

Calcule les dimensions de la fenêtre du graphe, calcule les échelles relatives aux axes x et y, dessine les axes x, y et pour chaque courbe dessine le graphe correspondant.

3.3.1.7.3. Effacer :

Efface le contenu de la fenêtre du graphe.

3.3.1.7.4. Imprimer :

Calcule les dimensions de feuille d'imprimante en cours et lance l'impression du graphique en cours

3.3.1.8. fonctions

3.3.1.8.1. Titres du graphe

Affiche dans une boîte de dialogue les titres du graphe en cours :

Titre du graphe

Titres des axes x, y

Exemple : La boîte de dialogue suivante donne les options d'un graphe qui sont :

Titre : Amplitude de vibrations

Légende x : Vitesse de rotation rpm

Légende y : Amplitude (Mils)

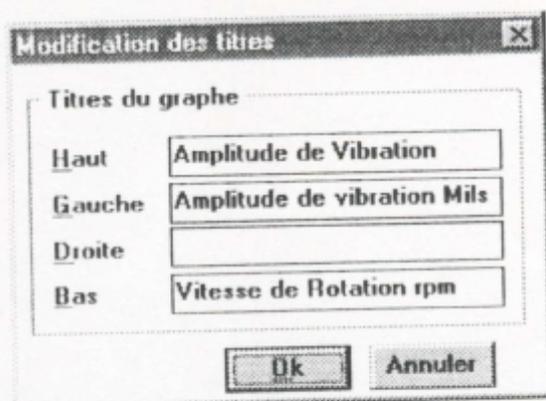


Figure 3.3-8 Boite de dialogue titres des graphes.

3.3.1.8.2.Options du graphe

Affiche dans une boite de dialogue les options du graphe en cours :

Pour le graphe :

Nombre de colonnes à lire : correspond au nombre de colonnes à considérer à partie du fichier d'analyse

Décimales : donne le nombre de décimales a afficher suivant x et y.

Marques : spécifie de marquer les points e la courbe ou non .

Pour les courbes :

Courbe N° : le numéro de courbe en cours.

Nombre de points: donne le nombre de points de la courbe en cours

Couleur : change la couleur du tracé d'une courbe donnée sur le graphique.

Valeurs : donne les valeurs maximales et minimales suivant x et y de la courbe

Exemple :

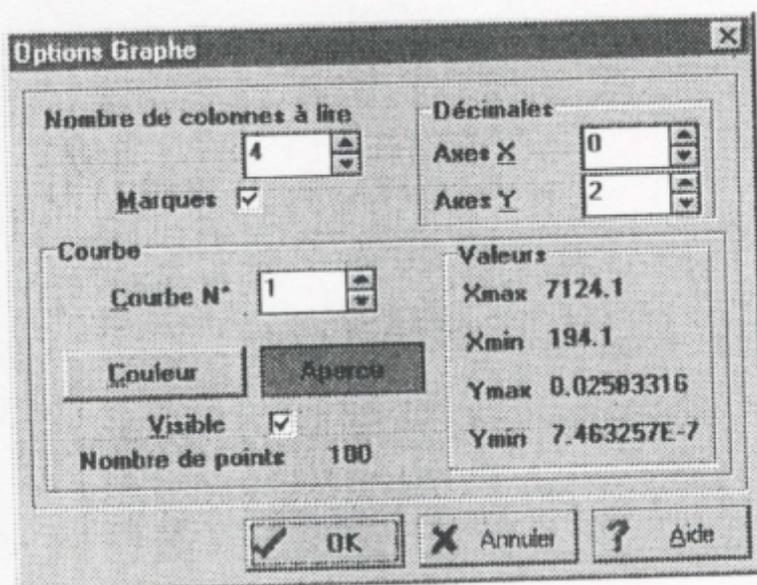


Figure 3.3-9 Boite de dialogue options courbes.

Zoom: Permet de visualiser une partie du graphe pour cela il faut saisir les valeurs de l'axe x; valeur xmin et xmax (pour enlever l'effet du zoom il faut que la case zoom ne soit pas cochée).

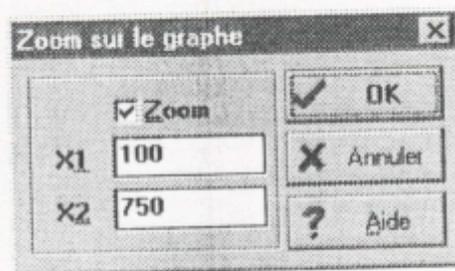


Figure 3.3-10 Boite de dialogue zoom sur le graphe.

3.3.1.8.3. Copie en mémoire

Permet de copier le dessin du graphe en cours en mémoire pour le coller dans une autre application Windows (traitement de texte ou autre).

3.3.1.8.4. Menu flottant

C'est un menu qui surgit sur la fenêtre à la position du click du bouton droit de la souris il contient toutes options du menu graphe, il peut être activé aussi par les touches «ALT+F10»

3.3.2. Représentation de Nyquist

La fenêtre de représentation du diagramme de Nyquist permet de représenter le résultat de l'analyse de stabilité dans le plan complexe. A partir des valeurs réelles et complexe issues de l'analyse du problème aux valeurs propres et pour différentes vitesses d'analyse on trace le diagramme de Nyquist.

3.3.2.1. fonctions

3.3.2.1.1. Trouver instabilité :

Permet de trouver la vitesse d'instabilité si elle existe, et affiche le résultat de la recherche sous forme d'une boite de dialogue qui donne les renseignements illustrés dans l'exemple suivants.

Mode N° 1

Entre points de courbe: 341 et 342

Vitesse d'Instabilité Trouvée entre

Vitesse : 6994.09 et 7014.09

Partie réelle :-0.7823792 et 1.086914

Une Interpolation Linéaire donne :

Vitesse d'instabilité de : 7002.4609 tpm

Mode N° donne le numéro de la courbe ou à été trouvé l'instabilité
 Entre points de courbe : donne les deux point entre lesquels la partie réelle change de signe
 Vitesses : donne les deux vitesses correspondantes à ces deux point
 Partie réelle : donne la valeur de la partie réelle correspondantes à ces deux point
 Vitesse d'instabilité : fait une interpolation linéaire entre ces deux point et calcule la vitesse correspondante à une partie réelle nulle.

3.3.2.1.2. Lecture valeurs :

Bascule la fenêtre de Nyquist en mode lecture des valeurs et affiche de nouveaux bouton dans la barre de menus

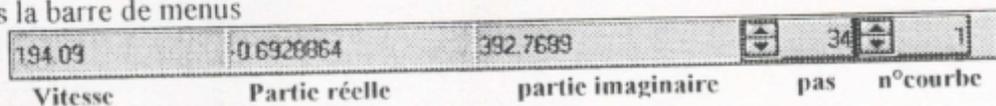


Figure 3.3-11 Ligne d'état de la fenêtre Nyquist

- Vitesse** : Donne la vitesse correspondante au point en cours
- Partie réelle** : Donne la partie réelle du point en cours (devient rouge si la valeur est positive)
- Partie imaginaire**: Donne la partie imaginaire du point en cours (rad/sec)
- Pas** : Permet de faire varier le pas de parcours des points
- N° de courbe** : Sélectionner le n° de courbe dont on veut lire les valeurs
- Début** : Positionne le curseur en début de courbe
- Précédant** : Positionne le curseur au point précédant
- Suivant** : Positionne le curseur au point suivant
- Fin** : Positionne le curseur en fin de courbe

3.3.2.1.3. Couleur :

Affiche une fenêtre pour la sélection de la couleur des courbes

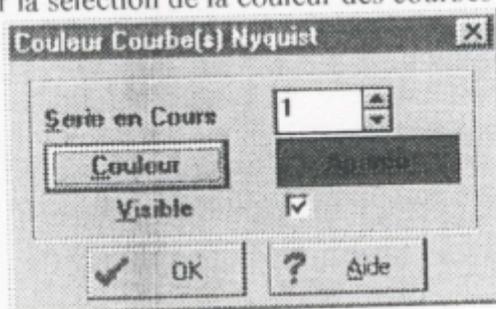


Figure 3.3-12 Sélection de la couleur pour les courbes (Nyquist)

- Série en cours** : Donne le numéro de la courbe en cours
- Bouton Couleur** : Permet de sélectionner la couleur de la courbe
- Aperçu** : Donne un aperçu de la couleur de la courbe
- Visible** : affiche la courbe en cours ou la rend invisible

3.3.2.1.4. Copier :

Copie le contenu de la fenêtre de représentation de Nyquist en mémoire.

3.3.2.1.5. Imprimer :

Imprime le contenu de la fenêtre de représentation de Nyquist.

3.3.2.2. Barre d'outils



Figure 3.3-13 Barre d'outil fenêtre Nyquist

La barre d'outil du document représentation de Nyquist permet et dans l'ordre des boutons de:

- lire les valeurs des courbes
- voir les données des courbes dans une autre fenêtre; chaque courbe est représentée par trois colonnes valeur vitesse, partie réelle et partie imaginaire.
- copier le dessin du document dans le presse papier
- faire un zoom en avant (x 2)
- faire un zoom en arrière (/2)
- imprimer le dessin du document
- changer les couleurs des courbes
- les quatre derniers boutons servent à la lecture des valeurs des courbe

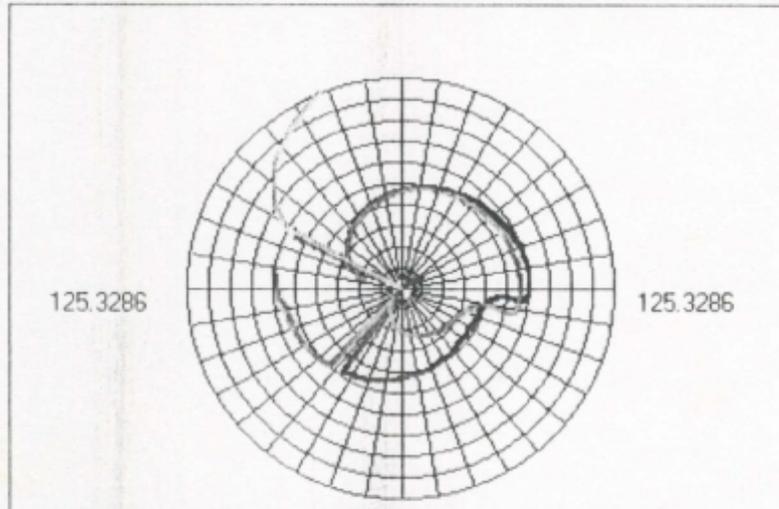


Figure 3.3-14 Exemple de représentation de Nyquist

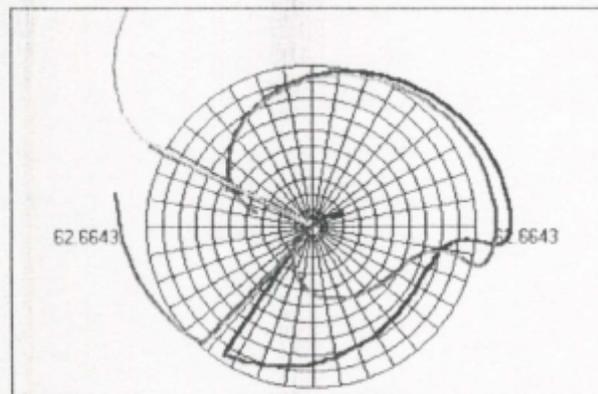


Figure 3.3-15 Exemple d'un zoom de la figure 3.3-14.

| N° | Vitesse | Réelle(1) | Imaginaire(1) | Réelle(2) | Imagin. |
|----|---------|-----------|---------------|-----------|---------|
| 20 | 954.09 | -47.07249 | 54.75825 | -47.03703 | 55.410 |
| 21 | 994.09 | -47.92697 | 56.96821 | -47.87173 | 57.678 |
| 22 | 1034.09 | -48.76733 | 59.21839 | -48.69696 | 59.982 |
| 23 | 1074.09 | -49.59807 | 61.50349 | -49.49676 | 62.329 |
| 24 | 1114.09 | -50.41844 | 63.82927 | -50.2885 | 64.709 |
| 25 | 1154.09 | -51.23209 | 66.17947 | -51.07049 | 67.125 |
| 26 | 1194.09 | -52.03111 | 68.56335 | -51.83481 | 69.585 |

Figure 3.3-16 vue des données des courbes de Nyquist.

3.3.3. Déformée du Rotor :

3.3.3.1. Barre d'outils:

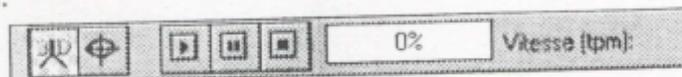


Figure 3.3-17 Barre d'outils de la fenêtre déformée du rotor

La barre d'outil du document déformée du rotor permet et dans l'ordre des boutons de:

- Basculer en représentation perspective
- Basculer en représentation orbitale
- Ces deux premiers boutons sont exclusifs; un seul des deux peut être enfoncé à la fois
- Lancer l'animation de la déformée
- Interrompre l'animation sans l'arrêter
- Arrêtez l'animation
- Jauge de progression de la vitesse de rotation du modèle
- Champ de la valeur de la vitesse en cours
- Imprimer le dessin du document

3.3.3.2. Ligne d'état

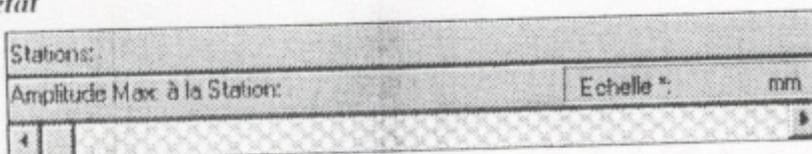


Figure 3.3-18 Ligne d'état de la fenêtre déformée du rotor

La ligne d'état est composée de trois parties :

- Stations sélectionnées: visible seulement en représentation orbitale; affiche les stations sélectionnées pour l'animation avec leurs couleurs respectives.
- Amplitude maximale, station et échelle : affiche l'échelle de la représentation et pour la vitesse en cours affiche l'amplitude maximale de vibration ainsi que sa localisation (station)
- Barre de défilement qui peut servir pour parcourir toute la plage d'animation (entre vitesse initiale et vitesse finale).

3.3.3.3.Représentation en perspective:

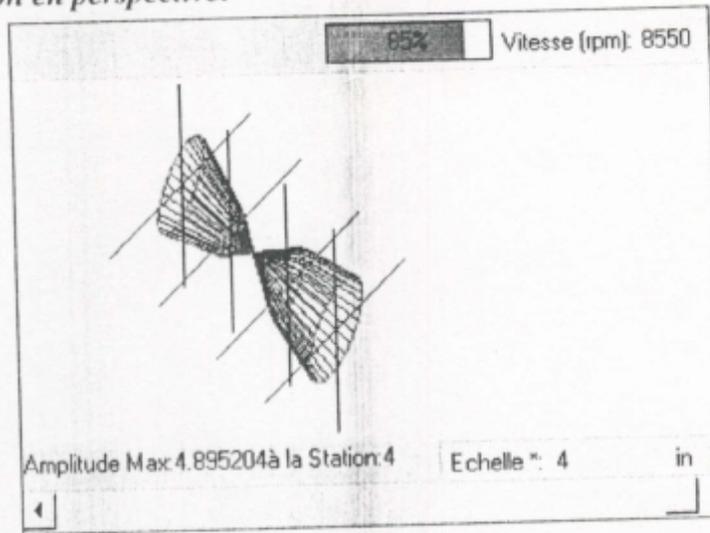


Figure 3.3-19 Représentation en perspective de la déformée du rotor

3.3.3.4.Représentation orbitale:

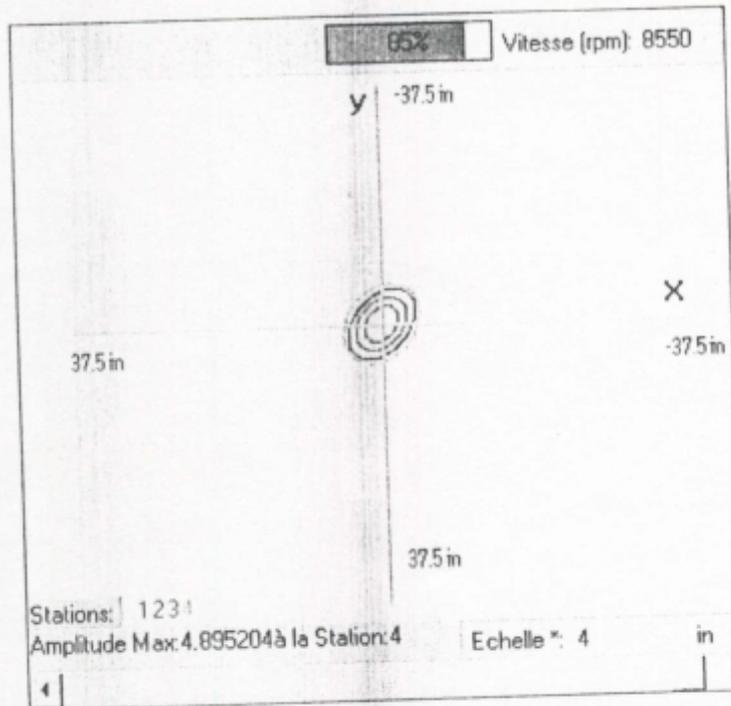


Figure 3.3-20 Représentation des orbites de la déformée du rotor

3.3.4. Gestionnaire de projets

Toujours dans l'esprit de minimiser les risques d'erreurs, on a doté le logiciel d'un puissant gestionnaire de projet qui n'est autre qu'un gestionnaire de documents multiples; en effet lorsqu'on fait une analyse sur un modèle de rotors les résultats issus de cette dernière sont de différents types: Modes de vibrations, phases, amplitudes, orbites, déformée, sous forme texte etc.. Cette variété de document à consulter nous a incités à concevoir un « classeur » en quelques sorte qui puisse gérer cette situation.

Ce gestionnaire permettrait donc de classer les différents documents issus d'une campagne d'analyse et de les sauvegarder par la suite.

Il est évident qu'un projet ne contiendra **qu'un seul modèle à la fois** et plusieurs documents provenant d'analyses sur ce **même modèle**.

Inventaire et description des Documents:



Modèle du rotor: Etabli par le pré-processeur, il contient toute la définition du modèle des éléments constitutifs (arbres, disques, paliers, balourds et supports de palier) leurs données et positions.
Extension du document « INP ».



Coefficients de paliers: Dans le cas ou les paliers possédants des caractéristiques de raideur et d'amortissement variables en fonction de la vitesse de rotation, il est possible de générer un graphique de ces caractéristiques via le pré-processeur.
Extension du document « COF ».



Pression au niveau de paliers: Ce type de document est prévu pour représenter l'évolution de la pression au niveau d'un des paliers du modèle.
Extension du document « PRS ».



Modes propres: issu de l'analyse du problème aux valeurs propres non amorti.
Extension du document « MOD ».



Amplitudes de Vibration: issu de l'analyse réponse permanente.
Extension du document « AMP ».



Phases de Vibration: issu de l'analyse réponse permanente.
Extension du document « PHS ».



Orbites de Vibration: issu de l'analyse réponse permanente.
Extension du document « ORB ».



Partie réelle de la valeur propre complexe: issu de l'analyse de stabilité.

Extension du document « STB ».



Diagramme de Campbell: issu de l'analyse de stabilité, il permet aussi de déterminer les vitesses critiques.

Extension du document « FRQ ».



Diagramme de Nyquist: issu de l'analyse de stabilité, c'est une combinaison de la partie réelle et la partie imaginaire et la solution de l'analyse dans le plan complexe.

Extension du document « NQS ».



Déformé du rotor: issu de l'analyse réponse permanente.

Extension du document « ANM ».



Fichiers texte: issu de la recherche d'instabilité ou du problème aux valeurs propres amortis.

Extension du document « TXT ».

L'on dénombre donc douze (12) type de documents différents qu'il faut gérer; on peut hiérarchiser ces différents types de documents suivant différents points de vue; le plus logique est celui de l'analyse du modèle:

Modèle:

Document modèle

Palier

Documents coefficient de palier

Documents pression de palier.

Analyse :

Problème aux valeurs propres:

Documents modes de vibration

Documents texte du problème aux valeurs propres non amorti

Réponse permanente:

Documents amplitudes

Documents phases

Documents orbites

Documents animation

Analyse de Stabilité:

Documents partie réelle de la valeur propre complexe

Documents Diagramme de Campbell

Documents Diagramme de Nyquist

Documents texte de la recherche d'instabilité

Cette hiérarchie sera donc adoptée au niveau du gestionnaire de projet.

3.3.4.1. Description du gestionnaire de projet:

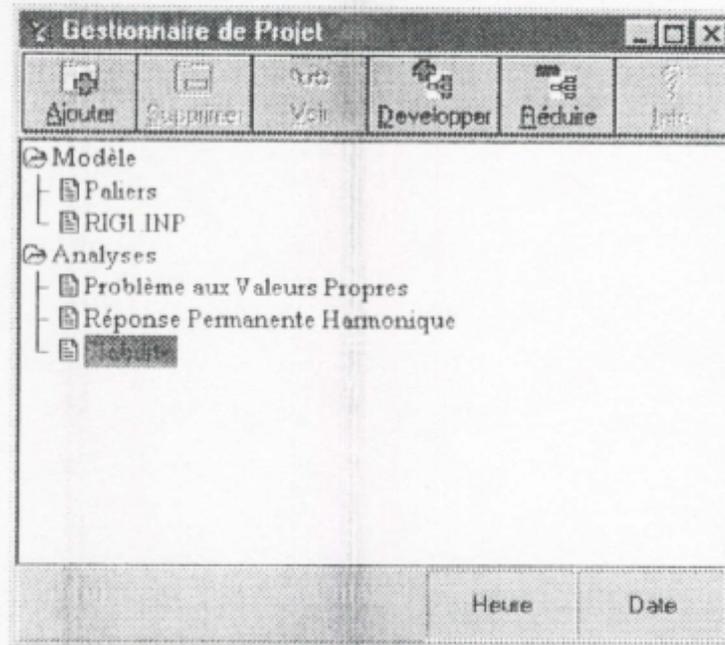


Figure 3.3-21 Gestionnaire de projet.

Le gestionnaire de projet se présente sous la forme d'une fenêtre constituée en trois sections:

- Barre d'outils
- Arborescence des documents
- Ligne d'état

3.3.4.1.1. Barre d'outils:

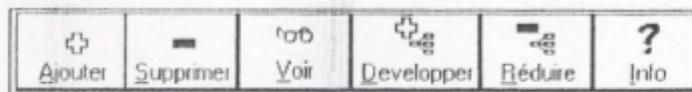


Figure 3.3-22 Barre d'outils du gestionnaire de projets.

La barre d'outils sert à gérer les documents du projet en cours d'analyse; elle permet d'ajouter un nouveau document au projet de supprimer un document de lancer la visualisation de n'importe quel type de document qui se trouve dans la liste de projet et de voir les options d'analyse qui ont généré le document si elles existent.

L'état des boutons supprimer, voir et information est sensible au document sélectionné dans l'arborescence du projet.

3.3.4.1.2.Arborescence

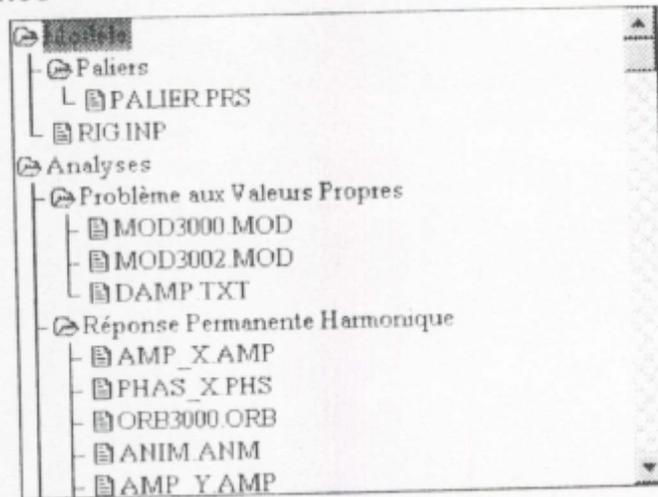


Figure 3.3-23 Arborescence du projet.

L'arborescence affiche la liste de tous les documents appartenant au projet en cours en respectant la hiérarchie citée précédemment. Pour déployer ou fermer une section il suffit d'y double-cliquer. Pour visualiser un document on doit double-cliquer sur son nom ou le sélectionner et appuyer sur le bouton voir de la barre de menu, ou appuyer sur entrée.

3.3.4.1.3.Ligne d'état:

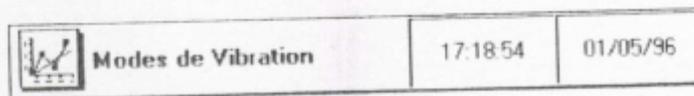


Figure 3.3-24 Ligne d'état du gestionnaire de projet

La ligne d'état renseigne sur le type de document sélectionné, l'heure et la date de sa création ou de sa dernière modification. L'heure et la date de création du document graphe ou texte sont utiles à comparer avec celles du modèle; si date (et, ou), heure du modèle est plus récente que celle du document graphe ou texte il faudrait peut être refaire l'analyse pour ces derniers sinon les résultats peuvent être erronés.

3.3.4.2.Utilisation du gestionnaire de projets:

Initialement, un projet WRDA par défaut est composé :

- D'un fichier projet :
Le fichier projet est enregistré avec l'extension .WRDA. Il ne peut y avoir qu'un fichier .WRDA par projet.
- D'un fichier modèle :
Enregistrés avec une extension .INP, ce sont des fichiers au format texte qui contiennent les données du modèle et la disposition des entités constituant le modèle. Il ne peut y avoir qu'un seul fichier modèle .INP par projet à la fois.

- D'un (ou plusieurs) fichier contenant les résultats des analyses :
Les fichiers unité sont enregistrés avec des extensions différentes selon le type d'analyse effectuée; à mesure que vous développez votre projet, vous ajoutez des fiches graphiques résultant de l'analyse et leurs fichiers de données associés. Vous pouvez ajouter également :
- Des fichiers qui n'ont pas été créés avec WRDA, tel des fichiers provenant d'autres environnement de calcul . Pour inclure ces fichiers à un projet WRDA, vous utilisez les commandes ajouter au projet du menu fichier en indiquant à WRDA le type de fichier que vous incluez.

Le gestionnaire de projet est accessible si l'utilisateur charge un projet déjà existant avec la commande ouvrir projet ou crée un nouveau projet avec la commande Nouveau projet du menu principal.

3.3.4.2.1.Nouveau projet:

Pour Créer un nouveau projet il faut sélectionner la commande fichier - nouveau projet toutes les fenêtres enfants du bureau sont fermées (si elles existent), un nouveau projet est crée avec un nom par défaut qui est PROJET1.RDA ne comportant qu'un seul document modèle vide; ayant pour nom MODEL1.INP, ce même document est ramené en premier plan pour commencer à saisir le modèle.

3.3.4.2.2.Ouvrir projet

Charge un fichier projet existant, ferme d'abord toutes les fenêtres et le projet en cours (si un projet est déjà chargé) et demande de sauvegarder si nécessaire.

3.3.4.2.3.Enregistrer projet

Enregistre la liste des documents constituant le projet sur le fichier portant le nom du projet.

3.3.4.2.4.Fermer projet

Ferme toutes les fenêtres et vide la liste du projet.

3.3.4.2.5.Ajouter fichier

Ajoute un document d'analyse ou document texte à la liste du projet et l'insère dans la section correspondante (suivant son type) .

3.3.4.2.6.Supprimer fichier

Supprime un document de la liste du projet.

N.B : Ne supprime pas le fichier de l'unité de sauvegarde

CHAPITRE IV:
APPLICATIONS

4.1. Application à un rotor de laboratoire

La première application qu'on aborde dans cette section concerne un exemple de banc d'essai de rotor simple.

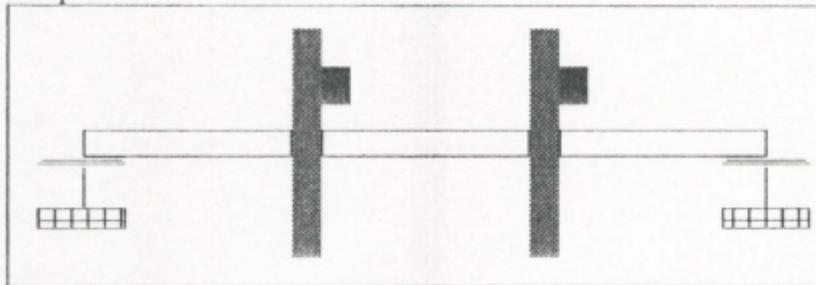


Figure 4.1-1 Rotor de laboratoire

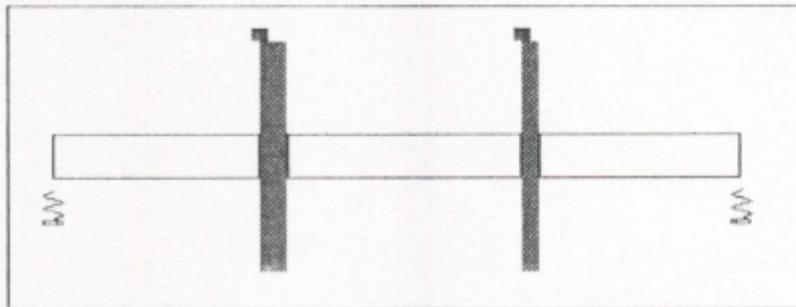


Figure 4.1-2 Dessin avec mise à l'échelle

Il se présente sous la forme de deux arbres d'acier pleins et de deux disque creux, le tout reposant sur deux paliers à roulements. des capteur sont placés au niveau de différents points pour mesurer les vibrations à différentes vitesses de fonctionnement.

Le rotor a une longueur de 25.85 in (65.66 cm) et pèse 33.61 lbf (15.25 Kgf).

Note: 1 lbf = 0.4536 Kgf

1 Kgf = 9.81 N

4.1.1. Données du modèle

Les données relatives à la géométrie sont données par le tableau suivant. La numérotation des stations commence au coté gauche du modèle .

4.1.1.1. Arbres

| N° d'arbre | Longueur (in) | Diamètre Extérieur (in) | Diamètre Intérieur (in) |
|------------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 8.29 | 1 | 0 |
| 2 | 9.45 | 1 | 0 |
| 3 | 8.11 | 1 | 0 |

4.1.1.2. Disques

| N° du disque | Station | Épaisseur (in) | Diamètre Extérieur (in) | Diamètre Intérieur (in) |
|--------------|---------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 1.08 | 5.25 | 1 |
| 2 | 3 | 0.72 | 5.25 | 1 |

4.1.1.3. Paliers

Deux études sont envisagées la première en considérant les coefficients de paliers constant dont les valeurs sont données dans le tableau suivant

| N° du palier | Station | Kxx (lb/in) | Kxy (lb/in) | Kyx (lb/in) | Kyy (lb/in) | Cxx (lb s/in) | Cyx (lb s/in) | Cxy (lb s/in) | Cyy (lb s/in) |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 2 | 4.390E+03 | 8.720E+01 | 8.720E+01 | 4.390E+03 | 1.400E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.400E-01 |
| 2 | 3 | 4.700E+03 | -2.930E+02 | -2.930E+02 | 4.700E+03 | 1.400E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.400E-01 |

Dans la seconde étude on considérera deux paliers hydrodynamiques ayant les mêmes coefficients dynamiques variables et sont donnés comme suit

| Vitesse | Kxx (lb/in) | Kxy (lb/in) | Kyx (lb/in) | Kyy (lb/in) | Cxx (lb s/in) | Cyx (lb s/in) | Cxy (lb s/in) | Cyy (lb s/in) |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 194.100 | 3.410E+04 | 2.150E+04 | 1.710E+03 | 8.130E+03 | 2.080E+03 | 4.700E+02 | 4.700E+02 | 2.820E+02 |
| 359.180 | 2.340E+04 | 1.920E+04 | -2.190E+02 | 8.020E+03 | 1.010E+03 | 2.470E+02 | 2.470E+02 | 1.870E+02 |
| 587.120 | 1.760E+04 | 1.870E+04 | -1.940E+03 | 8.240E+03 | 6.070E+02 | 1.570E+02 | 1.570E+02 | 1.450E+02 |
| 1360.730 | 1.140E+04 | 2.100E+04 | -5.620E+03 | 9.010E+03 | 2.960E+02 | 7.550E+01 | 7.550E+01 | 1.000E+02 |
| 3408.740 | 8.790E+03 | 3.180E+04 | -1.080E+04 | 9.170E+03 | 1.790E+02 | 2.810E+01 | 2.810E+01 | 6.470E+01 |
| 7183.560 | 8.460E+03 | 5.680E+04 | -1.960E+04 | 8.900E+03 | 1.520E+02 | 1.210E+01 | 1.210E+01 | 5.320E+01 |

4.1.1.4. Balourds

| N° du balourd | Station | Module (lb.in) | Angle (deg) |
|---------------|---------|----------------|-------------|
| 1 | 2 | 0.01 | 0 |

4.1.2. Analyse et résultats

Dans toutes les analyses suivantes on a considéré une distribution de masses consistantes et des conditions cubiques pour le lissage des coefficients de paliers à coefficients variables.

4.1.2.1. Cas paliers à coefficients constants

4.1.2.1.1. Problème aux valeurs propres

4.1.2.1.1.1. Problème aux valeurs propres non amorti

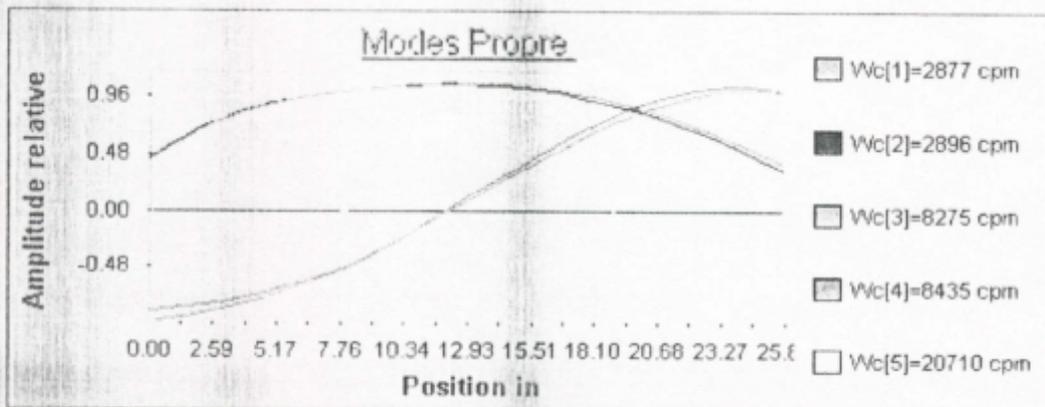


Figure 4.1-3 Modes propres de vibration

4.1.2.1.1.2. Problème aux valeurs propres amorti

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|------------------------------|--------------------|
| -40.3 | 2170 | 20722 |
| -8.23 | 883. | 8432 |
| -8.50 | 867. | 8279 |
| -.583 | 303. | 2893 |
| -.601 | 301. | 2874 |

Valeurs propres du problème amorti

4.1.2.1.2. Réponse permanente :

Dans ce qui suit on présente les amplitudes et phases suivant la direction x seulement (le résultat suivant la direction y étant similaire)

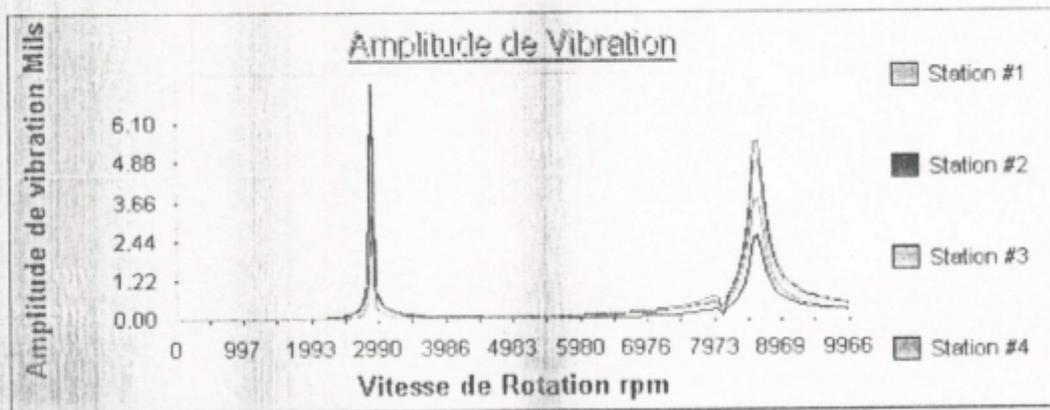


Figure 4.1-4 Amplitude de vibration direction x (toutes les stations)

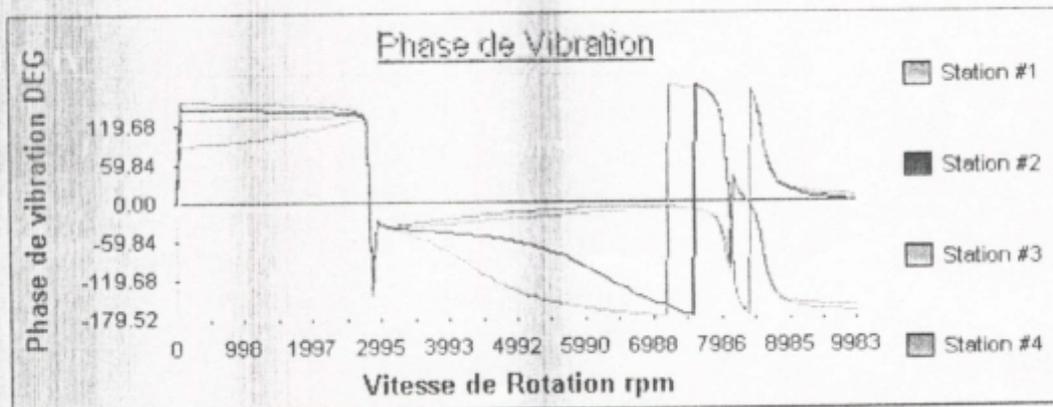


Figure 4.1-5 Angle de phase direction x (toutes les stations)

L'on notera la variation brusque d'amplitude au voisinage de 3000 rpm et le changement de phase au niveau de toutes les stations du rotor à cette vitesse ; ceci est dû à la première vitesse critiques trouvée dans l'analyse du problème aux valeurs propres (2877rpm).

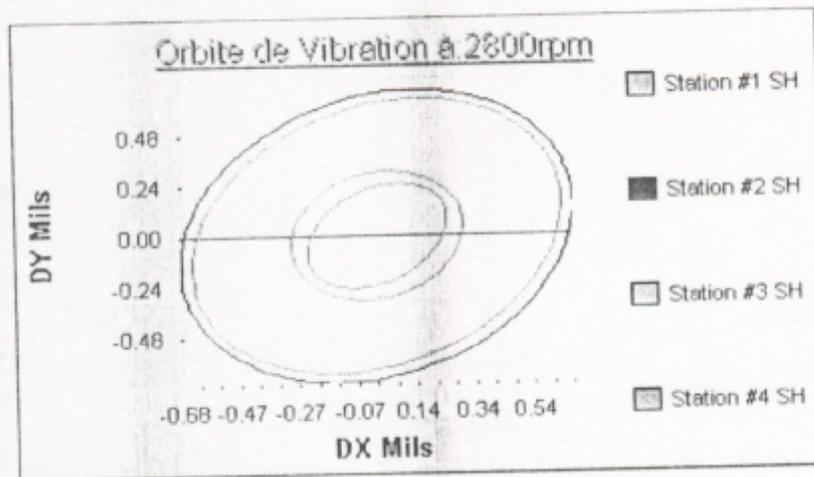


Figure 4.1-6 Orbite de vibration à 2800 rpm (toutes les stations)

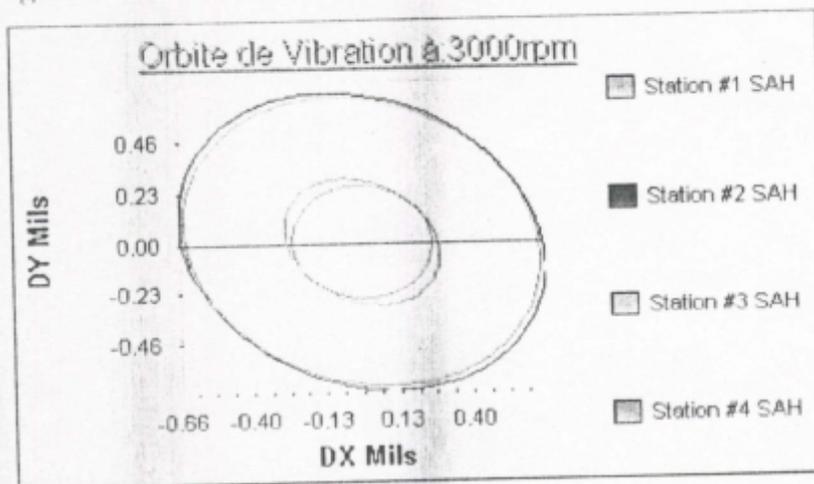


Figure 4.1-7 Orbite de vibration à 3000 rpm (toutes les stations)

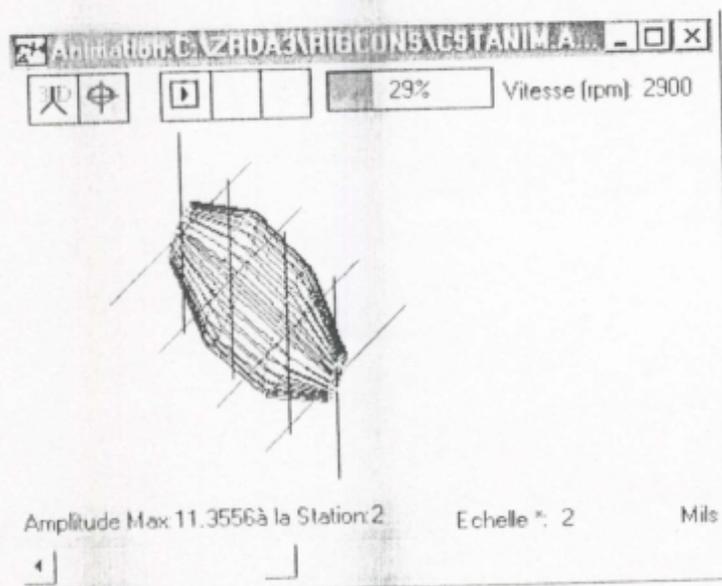


Figure 4.1-8 Déformée du modèle à 2900 rpm

4.1.2.2.Utilisation de paliers hydrodynamiques

4.1.2.2.1.Problème aux valeurs propres

4.1.2.2.1.1.Problème aux valeurs propres non amorti

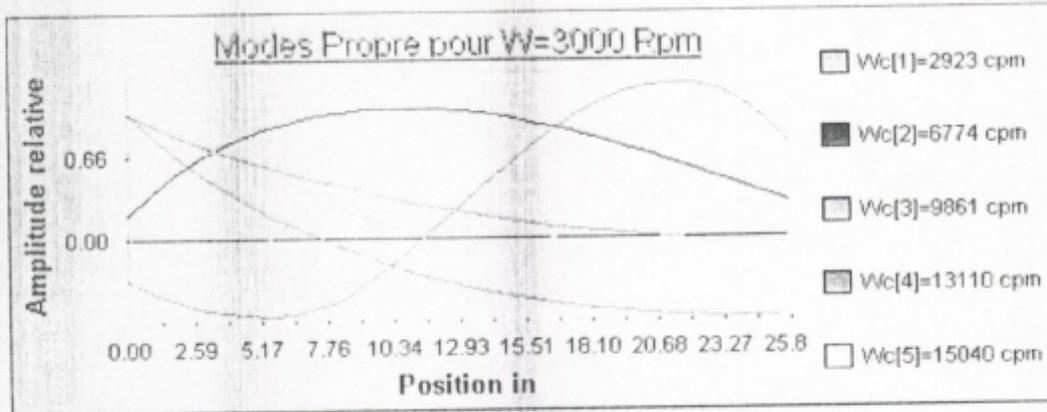


Figure 4.1-9 Modes propres de vibration

4.1.2.2.1.2.Problème aux valeurs propres amorti :

L'analyse du problème aux valeurs propres amorti se fait pour la vitesse de rotation de 3000 rpm avec conditions aux limites cubiques pour le lissage des coefficients de palier et une distribution de masses consistante.

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|---------------------------|-----------------|
| -54.64 | 1477.65 | 14110.51 |
| -7.68 | 390.18 | 3725.94 |
| -33.67 | 384.46 | 3671.32 |
| -75.82 | 185.70 | 1773.30 |
| -69.87 | 178.07 | 1700.44 |

Valeurs propres du problème amorti

4.1.2.2.2.Réponse permanente

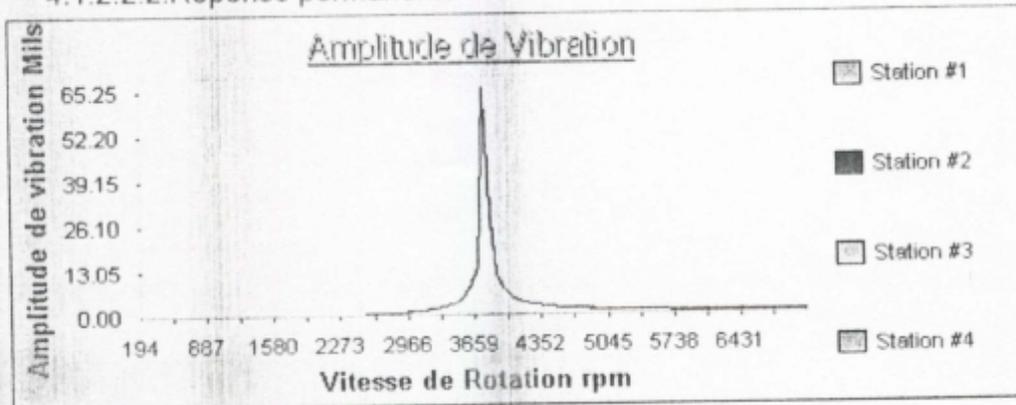


Figure 4.1-10 Amplitudes de vibration direction x (toutes stations)

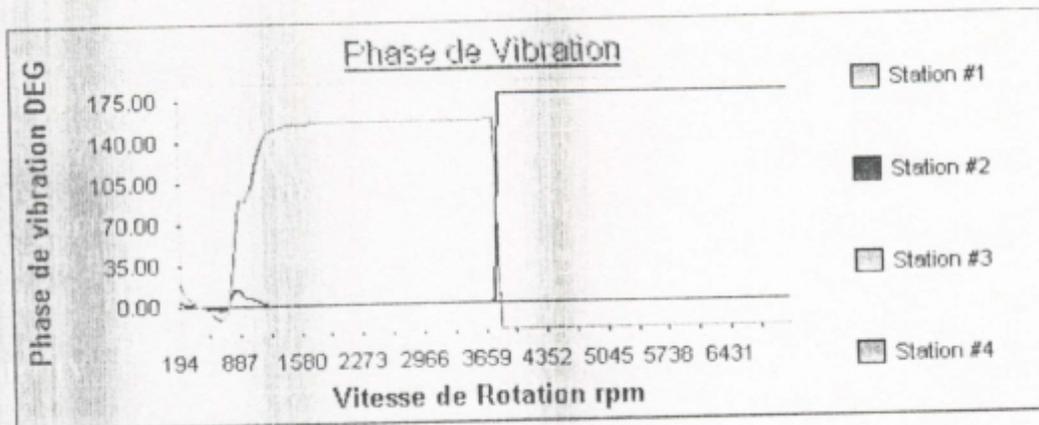


Figure 4.1-11 Angle de phase de vibration direction x (toutes stations)

On remarque la variation brusque d'amplitude au voisinage de 3760 rpm et le changement de phase au niveau de toutes les stations du rotor à cette vitesse qui correspond à la deuxième vitesse critique.

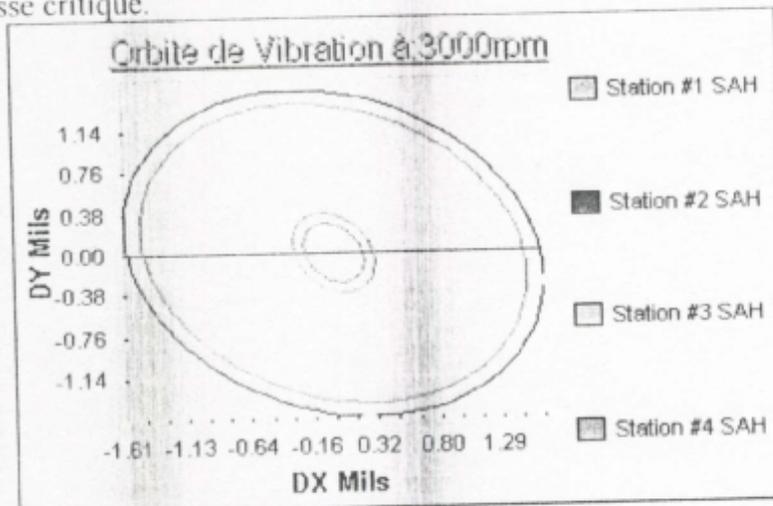


Figure 4.1-12 Orbite de vibration à 3000 rpm

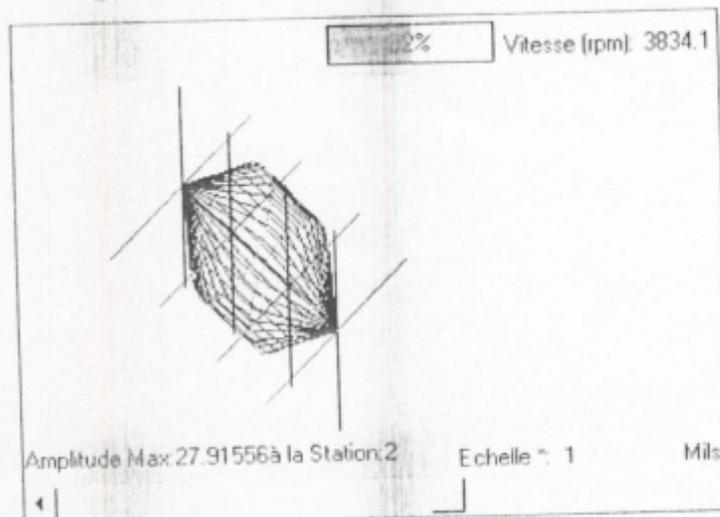


Figure 4.1-13 Animation de la déformée à 3834 rpm

4.1.2.2.3. Analyse de stabilité :

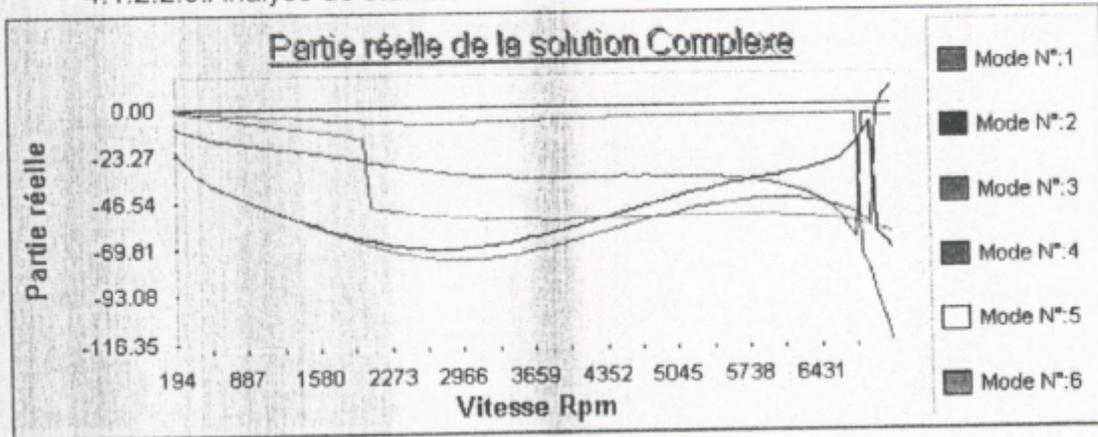


Figure 4.1-14 Partie réelle de la solution complexe(modes 1-6)

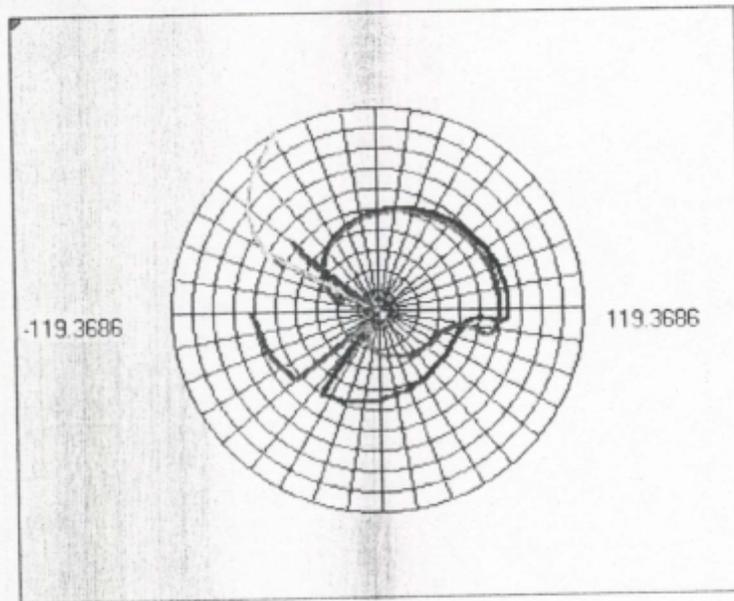


Figure 4.1-15 Diagramme de Nyquist modes (1-5)

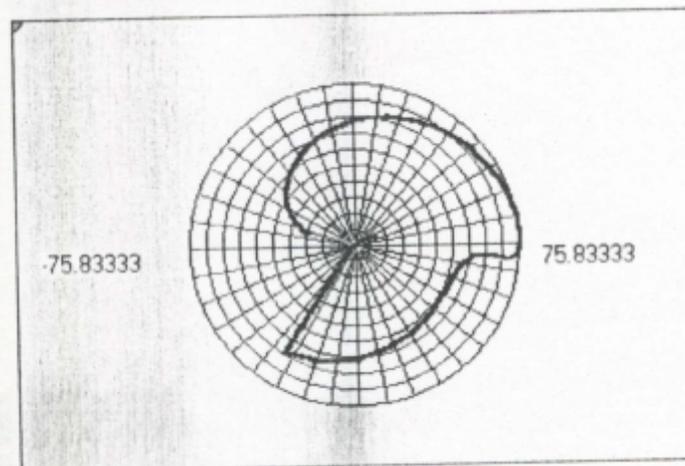


Figure 4.1-16 Diagramme de Nyquist Mode N°1

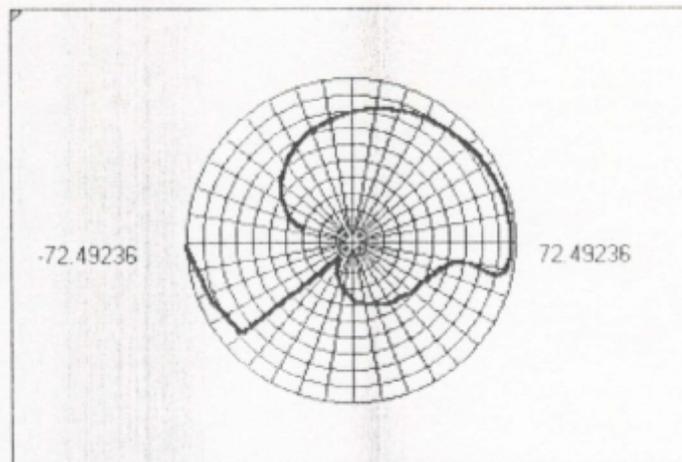


Figure 4.1-17 Diagramme de Nyquist Mode N°2

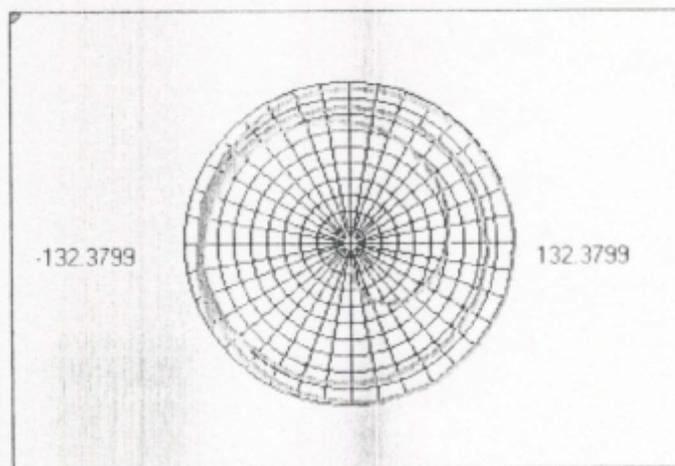


Figure 4.1-18 Diagramme de Nyquist Mode N°7

Diagramme de Campbell

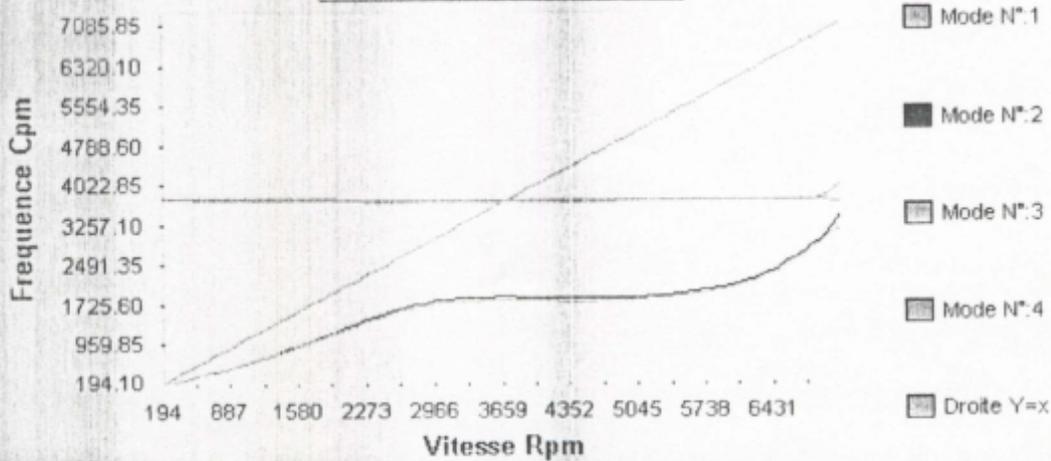


Figure 4.1-19 Diagramme de Campbell

L'on remarque à partir du diagramme de Campbell que le système du fait de sa rotation risque de rencontrer l'une de ses vitesses critiques; les deux vitesses critiques qu'on risque de rencontrer correspondent à la troisième et quatrième fréquence propre.

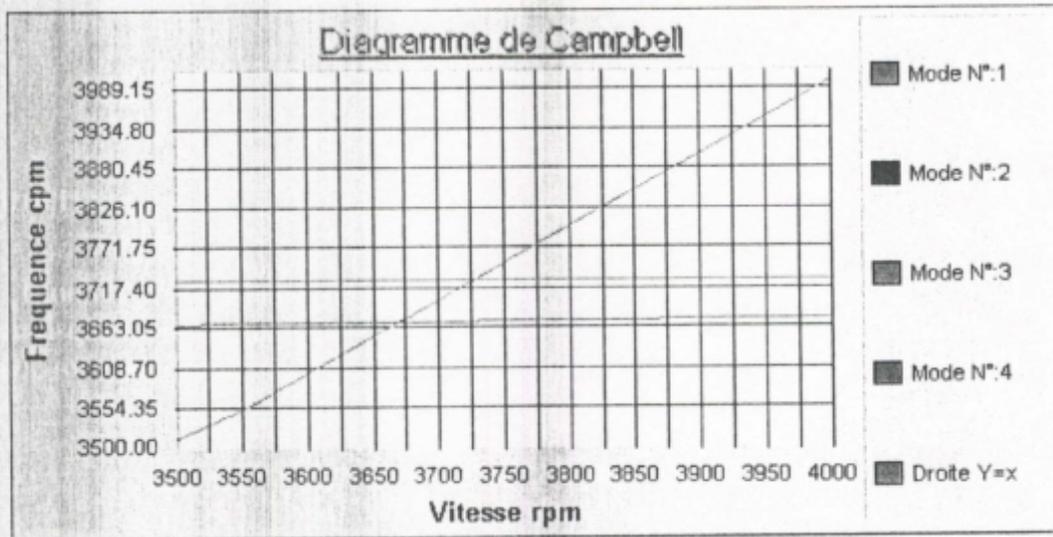


Figure 4.1-20 Zoom sur le diagramme de Campbell

Un zoom nous permet de déterminer ces deux valeurs qui sont à peu près égales à:

$$Wc_1=3665 \text{ cpm et } Wc_2=3725 \text{ cpm}$$

Chapitre IV

Rotation des
rotations des
rotations des

4.2. Application à une Pompe Alimentaire centrifuge multi-étagée :

On se propose de résumer quelques possibilités du logiciel par l'étude d'un exemple d'application qui consiste en une pompe centrifuge multi-étagée cf. [20] pp. 149-154.
 Un schéma de la pompe est donné sur la figure suivante :

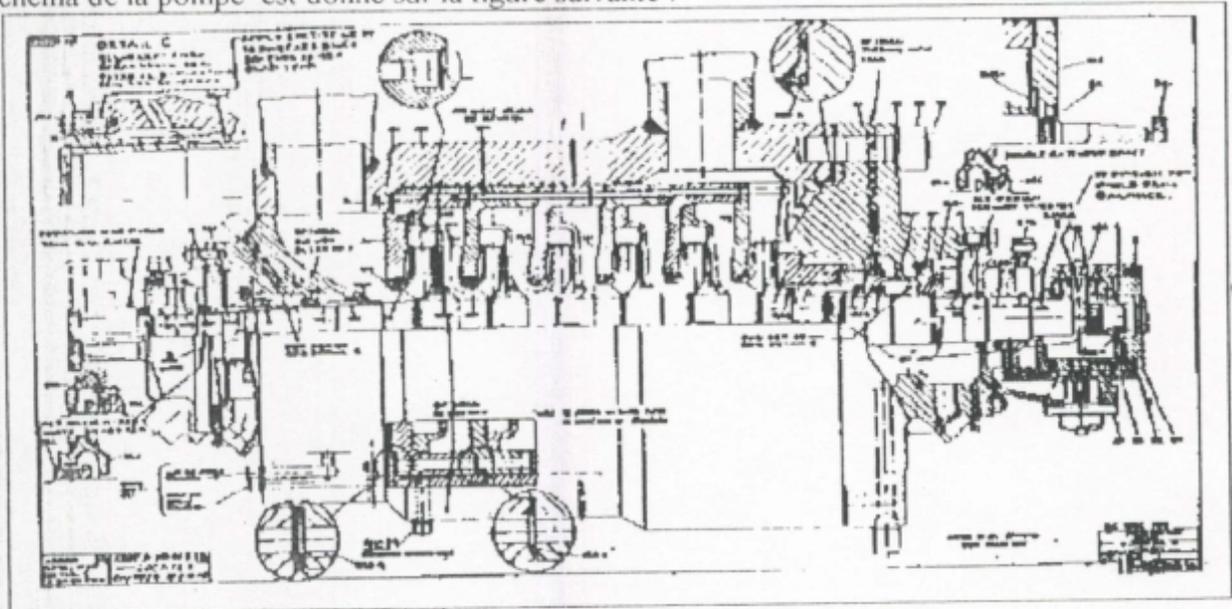


Figure 4.2-1 Dessin d'ensemble de la Pompe multi-étagée

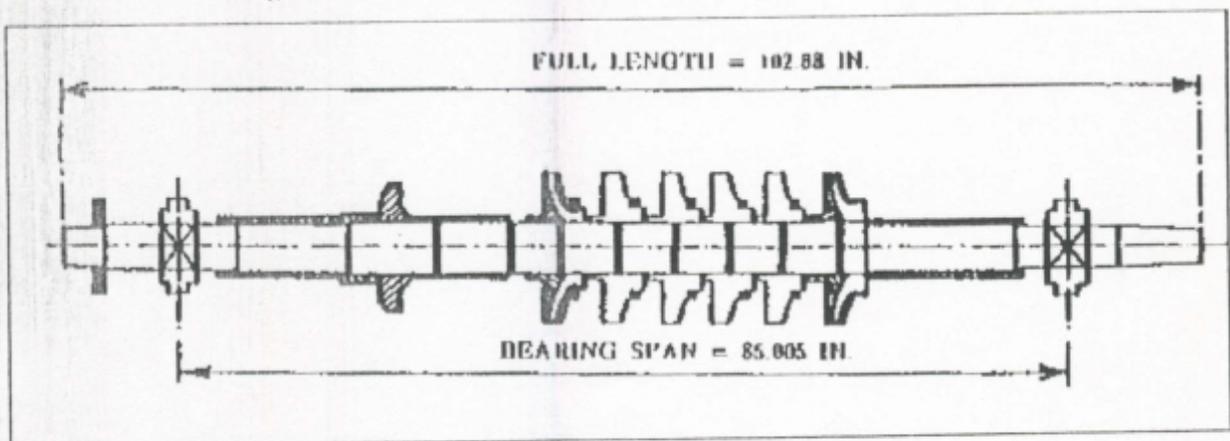


Figure 4.2-2 Schématisation de la Pompe multi-étagée

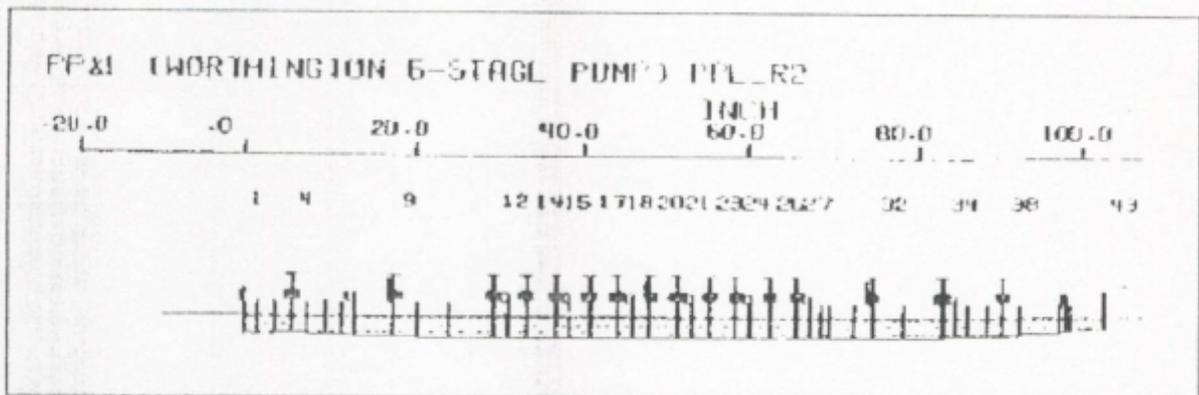


Figure 4.2-3 Modèle discret de la pompe

Le constructeur de la pompe a fournit l'information sur les dimensions du rotor et les coefficients de rigidité et d'amortissement des différents points de d'interaction rotor stator pour différents vitesses comme le montre le tableau 4.2-1.

Le rotor de la pompe a une longueur de 102.88 in (261.32 cm) et pèse 1590 lbf (721 Kgf).

Note: 1 lbf = 0.4536 Kgf

1 Kgf = 9.81 N

Il a été modélisé par 43 stations (fig 4.2.-3). Les paliers se trouvent aux stations 4 et 38. Des effets paliers se trouvent aux stations indiquées par les symboles \square selon la figure .4.2.-3

Le tableau 4.2-1 montre le fichier de données relatives a la pompe alimentaire dont un dessin d'ensemble est montre par la figure 4.2-1

Les analyses sont combinées par différents pourcentages des coefficients relatifs aux joints d'étanchéité

| Eléments | Stations |
|--------------------|-------------------|
| BreakDown Bushings | 9,34 |
| Wear rings | 12,15,18,21,24,27 |
| Interstage Bushing | 14, 17,20,23, 26 |
| Balancing Drum | 32 |

Pour évaluer l'influence des joints étanches sur les vibrations et plus particulièrement au fur et a mesure que les tolérances des joints augmentent du fait de l'usure et que les coefficients diminuent

4.2.1.Données du modèle

Les données relatives à la géométrie sont données par le constructeur et sont reproduits ci-après. La numérotation des stations commence au coté gauche du modèle .

4.2.1.1.Composants du modèle

| N° de Station | Longueur (in) | Diamètre (in) | Description du Composant | Masse (lbs) | Ip lbs -in ² | It lbs -in ² |
|---------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 1.625 | 5.625 | Moyeu d'accouplement | 134 | 1072 | 536 |
| 2 | 2.000 | 5.625 | | | | |
| 3 | 2.000 | 4.490 | | | | |
| 4 | 2.000 | 4.490 | ⊗Palier entrée | | | |
| 5 | 2.375 | 5.687 | | | | |
| 6 | 1.625 | 5.750 | | | | |

| | | | | | | |
|----|-------|-------|---------------------------|------|------|------|
| 7 | 1.500 | 5.750 | | | | |
| 8 | 4.750 | 6.000 | Manchon fileté d'arbre | 9.6 | 110 | 55 |
| 9 | 2.500 | 6.020 | ⊗Coussinet d'arrêt | 24 | 222 | 111 |
| 10 | 3.895 | 6.875 | | | | |
| 11 | 5.250 | 6.500 | | | | |
| 12 | 1.750 | 6.570 | ⊗Bague d'usure | | | |
| 13 | 2.250 | 6.570 | Roue d'aubes | 70 | 2030 | 1020 |
| 14 | 3.250 | 6.570 | ⊗Coussinet inter étage | | | |
| 15 | 1.750 | 6.520 | ⊗Bague d'usure | | | |
| 16 | 2.250 | 6.520 | Roue d'aubes | 70 | 2030 | 1020 |
| 17 | 3.250 | 6.520 | Coussinet inter étage | | | |
| 18 | 1.750 | 6.470 | ⊗Bague d'usure | | | |
| 19 | 2.250 | 6.470 | Roue d'aubes | 70 | 2030 | 1020 |
| 20 | 3.250 | 6.470 | ⊗Coussinet inter étage | | | |
| 21 | 1.750 | 6.420 | ⊗Bague d'usure | | | |
| 22 | 2.250 | 6.420 | Roue d'aubes | 70 | 2030 | 1020 |
| 23 | 3.250 | 6.420 | ⊗Coussinet inter étage | | | |
| 24 | 1.750 | 6.380 | ⊗Bague d'usure | | | |
| 25 | 2.250 | 6.380 | Roue d'aubes | 70 | 2030 | 1020 |
| 26 | 3.250 | 6.380 | ⊗Coussinet inter étage | | | |
| 27 | 1.750 | 6.280 | ⊗Bague d'usure | | | |
| 28 | 1.000 | 6.280 | Roue d'aubes | 70 | 2030 | 1020 |
| 29 | 1.130 | 6.280 | | | | |
| 30 | 2.750 | 6.250 | | | | |
| 31 | 2.250 | 6.000 | | | | |
| 32 | 3.750 | 6.000 | ⊗Dispositif d'équilibrage | 89 | 2160 | 1080 |
| 33 | 4.750 | 6.000 | | | | |
| 34 | 1.550 | 5.750 | ⊗Coussinet d'arrêt | 24 | 222 | 111 |
| 35 | 1.625 | 5.750 | Manchon fileté d'arbre | 9.6 | 110 | 110 |
| 36 | 2.375 | 5.690 | | | | |
| 37 | 2.000 | 5.495 | | | | |
| 38 | 2.000 | 5.495 | ⊗Palier sortie | | | |
| 39 | 4.625 | 4.875 | | | | |
| 40 | 1.000 | 4.125 | | | | |
| 41 | 0.625 | 4.125 | Coussinet de Butée | 32.6 | 320 | 160 |
| 42 | 4.000 | 3.500 | | | | |
| 43 | 0.000 | 3.500 | | | | |

Tableau 4.2-1 Données du modèle

Tous les composants précédés par ⊗ ont des coefficients dynamiques comme suit :
 Les paramètres des palier et des dispositifs d'étanchéité à la vitesse nominale de 5600 rpm
 sont : $\rho_{eau} = 0.0321 \text{ lbm/in}^3$, $\nu_{eau} = 0.0026 \text{ in}^2/\text{sec}$

| Nom du dispositif | DP (psi) | rayon (in) | jeu radial (Mils) | Land (Mils) | Longueur des trous (Mils) | profondeur (Mils) | Nombre de trous |
|--------------------------|----------|------------|-------------------|-------------|---------------------------|-------------------|-----------------|
| Bague d'usure | 607 | 5.344 | 8 | 33 | 34 | 32 | 19 |
| Coussinet inter étage | 177 | 44.177 | 8 | 33 | 34 | 32 | 14 |
| Dispositif d'équilibrage | 4188 | 5.150 | 7 | 100 | 100 | 60 | 53 |
| Coussinet d'arrêt | 230 | 3.500 | 5 | 76 | 76 | 55 | 32 |

4.2.1.2. Paliers

| Unités : | | Coefficients de raideur | | | | K | [lbs/in] | | | |
|---|--------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|
| | | Coefficients d'amortissement | | | | C | [lbs-sec/in] | | | |
| Coefficients de Palier (donnés du constructeur) : | | | | | | | | | | |
| Stations | type | Coefficients | | | | | | | | |
| 4,38 | Bearing | 2000.00 | 3.965E+05 | 1.597E+06 | -1.940E+06 | 6.413E+05 | 1.547E+04 | -1.475E+03 | -1.274E+03 | 1.843E+04 |
| | | 3000.00 | 4.130E+05 | 1.920E+06 | -2.480E+06 | 9.380E+05 | -4.830E+04 | -1.690E+03 | 7.100E+01 | 1.550E+04 |
| | | 4000.00 | 4.020E+05 | 2.100E+06 | -2.640E+06 | 9.760E+05 | -5.070E+04 | -1.320E+03 | 1.140E+03 | 1.220E+04 |
| | | 4450.00 | 3.688E+05 | 2.036E+06 | -2.348E+06 | 7.400E+05 | 8.752E+03 | -5.616E+02 | 1.411E+03 | 1.017E+04 |
| | | 5000.00 | 2.670E+05 | 1.630E+06 | -1.170E+06 | -1.160E+05 | 2.160E+05 | 1.650E+03 | 1.160E+03 | 6.670E+03 |
| | | 5600.00 | 3.766E+05 | 2.135E+06 | -2.445E+06 | 7.747E+05 | 7.238E+03 | -4.497E+02 | 1.867E+02 | 8.386E+03 |
| 9,34 | Breakdown bushing | 2000.00 | 1.149E+04 | 1.280E+02 | -2.880E+02 | 1.149E+04 | 9.600E-01 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 9.600E-01 |
| | | 3000.00 | 1.130E+04 | 2.350E+02 | -3.690E+02 | 1.120E+04 | 1.080E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.080E+00 |
| | | 4000.00 | 1.110E+04 | 3.370E+02 | -4.450E+02 | 1.100E+04 | 1.210E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.210E+00 |
| | | 4450.00 | 1.101E+04 | 3.840E+02 | -4.800E+02 | 1.085E+04 | 1.280E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.280E+00 |
| | | 5000.00 | 1.080E+04 | 4.340E+02 | -5.160E+02 | 1.070E+04 | 1.400E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.400E+00 |
| | | 5600.00 | 1.056E+04 | 4.800E+02 | -5.440E+02 | 1.050E+04 | 1.600E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 1.600E+00 |
| 12,15, 24,27, ,18,21 | Wear Ring | 2000.00 | 2.254E+04 | 1.309E+04 | -1.309E+04 | 2.254E+04 | 1.250E+02 | -5.740E+00 | -5.740E+00 | 1.250E+02 |
| | | 3000.00 | 5.291E+04 | 2.911E+04 | -2.911E+04 | 5.291E+04 | 1.853E+02 | -8.950E+00 | -8.950E+00 | 1.853E+02 |
| | | 4000.00 | 9.905E+04 | 5.201E+04 | -5.201E+04 | 9.905E+04 | 2.484E+02 | -1.228E+01 | -1.228E+01 | 2.484E+02 |
| | | 4450.00 | 1.238E+05 | 6.428E+04 | -6.428E+04 | 1.238E+05 | 2.759E+02 | -1.380E+01 | -1.380E+01 | 2.759E+02 |
| | | 5000.00 | 1.395E+05 | 7.664E+04 | -7.664E+04 | 1.395E+05 | 2.927E+02 | -1.552E+01 | -1.552E+01 | 2.927E+02 |
| | | 5600.00 | 1.524E+05 | 8.983E+04 | -8.983E+04 | 1.524E+05 | 3.064E+02 | -1.735E+01 | -1.735E+01 | 3.064E+02 |
| 14 ,17,20,23,26 | Interstage bushing | 2000.00 | 2.930E+03 | 2.724E+03 | -2.724E+03 | 2.930E+03 | 2.601E+01 | -1.790E+00 | -1.790E+00 | 2.601E+01 |
| | | 3000.00 | 7.724E+03 | 6.074E+03 | -6.074E+03 | 7.724E+03 | 3.867E+01 | -3.010E+00 | -3.010E+00 | 3.867E+01 |
| | | 4000.00 | 1.281E+04 | 1.073E+04 | -1.073E+04 | 1.281E+04 | 5.121E+01 | -3.830E+00 | -3.830E+00 | 5.121E+01 |
| | | 4450.00 | 1.675E+04 | 1.350E+04 | -1.350E+04 | 1.675E+04 | 5.792E+01 | -4.330E+00 | -4.330E+00 | 5.792E+01 |
| | | 5000.00 | 2.095E+04 | 1.686E+04 | -1.686E+04 | 2.095E+04 | 6.440E+01 | -4.910E+00 | -4.910E+00 | 6.440E+01 |
| | | 5600.00 | 2.651E+04 | 2.110E+04 | -2.110E+04 | 2.651E+04 | 7.197E+01 | -5.560E+00 | -5.560E+00 | 7.197E+01 |
| 32 | Balancing Drum | 2000.00 | 1.150E+04 | 2.393E+05 | -2.393E+05 | 1.150E+04 | 2.285E+03 | -1.948E+03 | -1.948E+03 | 2.285E+03 |
| | | 3000.00 | 2.607E+04 | 5.348E+05 | -5.348E+05 | 2.607E+04 | 3.405E+03 | -2.925E+03 | -2.925E+03 | 3.405E+03 |
| | | 4000.00 | 5.060E+04 | 9.171E+05 | -9.171E+05 | 5.060E+04 | 4.379E+03 | -3.933E+03 | -3.933E+03 | 4.379E+03 |
| | | 4450.00 | 6.458E+04 | 1.120E+06 | -1.120E+06 | 6.458E+04 | 4.805E+03 | -4.390E+03 | -4.390E+03 | 4.805E+03 |
| | | 5000.00 | 7.417E+04 | 1.338E+06 | -1.338E+06 | 7.417E+04 | 5.109E+03 | -4.937E+03 | -4.937E+03 | 5.109E+03 |
| | | 5600.00 | 8.255E+04 | 1.578E+06 | -1.578E+06 | 8.255E+04 | 5.381E+03 | -5.531E+03 | -5.531E+03 | 5.381E+03 |

Tableau 4.2-2 Coefficients de paliers

4.2.2. Modélisation :

Le modèle est saisi graphiquement à l'aide de l'éditeur de modèle de WRDA, en respectant l'ordre et les numéros de stations de chaque objet.

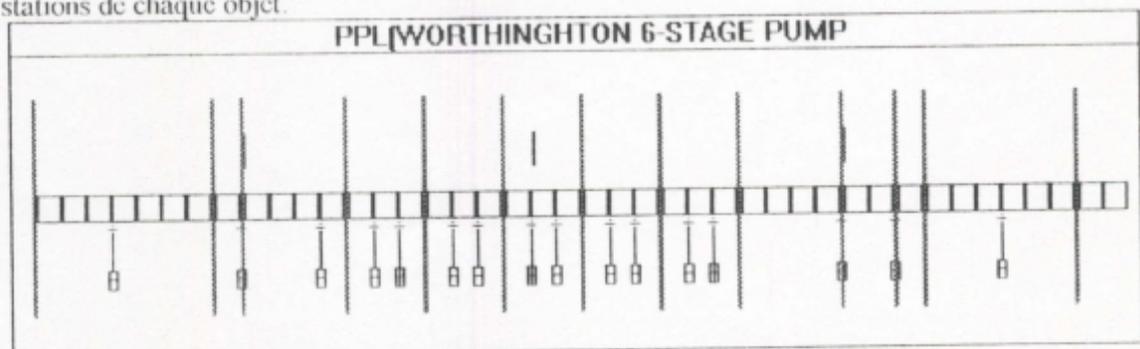


Figure 4.2-4: Modèle avec dessin préalable

La commande du dessin avec mise à l'échelle permet de vérifier les données introduites pour les arbres et les disques.

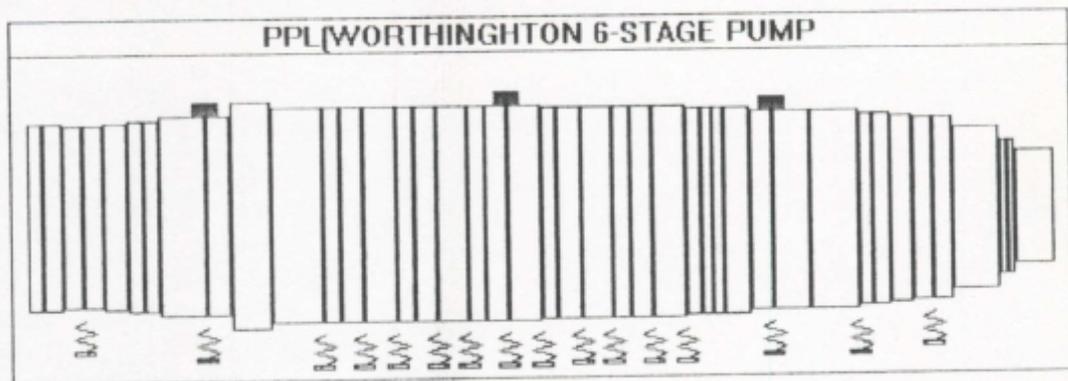


Figure 4.2-5: Modèle avec dessin mis à l'échelle

On notera l'utilité des fonctions de duplication des objets; pour ce modèle, les composants identiques sont :

Arbres

| Nombre | Stations |
|--------|----------|
| 2 | 3,4 |
| 2 | 34,37 |
| 2 | 35,6 |
| 2 | 33,8 |

Disques

| Nombre | Désignation | Stations |
|--------|------------------------|-------------------|
| 6 | Roue d'aubes | 13,16,19,22,25,28 |
| 2 | Coussinet d'arrêt | 9,34 |
| 2 | Manchon fileté d'arbre | 8,35 |

Paliers

| Nombre | Désignation | Stations |
|--------|-------------------------|-------------------|
| 6 | Palier (entrée, sortie) | 4,38 |
| 2 | Bagues d'usure | 12,15,18,21,24,27 |
| 2 | Manchon fileté d'arbre | 8,35 |

Il y a en tout dix objets dont les données doivent être saisies on économisera la saisie de 18 objets (28-10) par la fonction dupliquer objet de l'éditeur de modèle.

La représentation à l'échelle sert l'analyste à identifier une erreur éventuelle de saisie de donnée (« géométrique seulement »).

Le zoom suivant permet de vérifier l'angle de phase du balourd (0°)

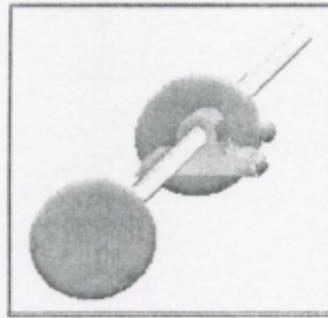


Figure 4.2-6 Zoom 3D du modèle stations 8-10

4.2.3. Analyse et résultats

4.2.3.1. Problème aux valeurs propres

4.2.3.1.1. Problème aux valeurs propres non amorti :

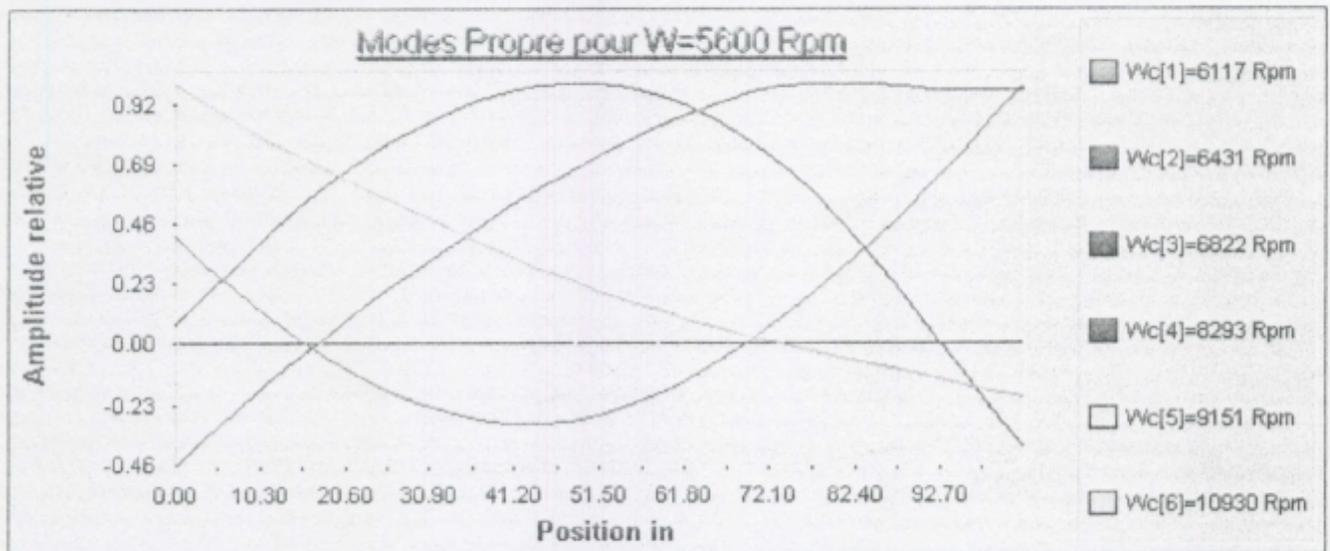


Figure 4.2-7 Modes Propres de vibration

| Mode N° | Fréquence (cpm) |
|---------|-----------------|
| 1 | 6117 |
| 2 | 6431 |
| 3 | 6822 |
| 4 | 8293 |
| 5 | 9151 |
| 6 | 10930 |

Tableau 4.2-3 Fréquences naturelles du système

4.2.3.1.2. Problème aux valeurs propres amorti

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|---------------------------|-----------------|
| -547.46 | 1007.67 | 9622.54 |
| -112.41 | 465.86 | 4448.64 |
| 5.982971 | 279.32 | 2667.31 |
| -119.49 | 235.09 | 2244.94 |

Tableau 4.2-4 Fréquences naturelles du Problème amorti du système

4.2.3.2. Réponse permanente

4.2.3.2.1. Amplitudes de vibration :

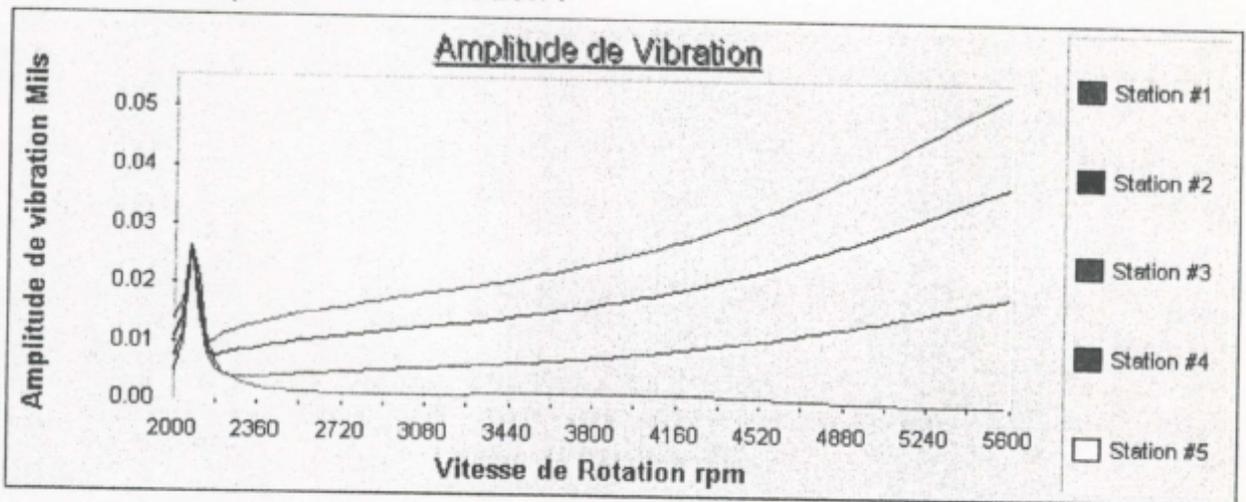


Figure 4.2-8 Amplitude de vibration stations (1..5)

4.2.3.2.2. Phase de vibration :

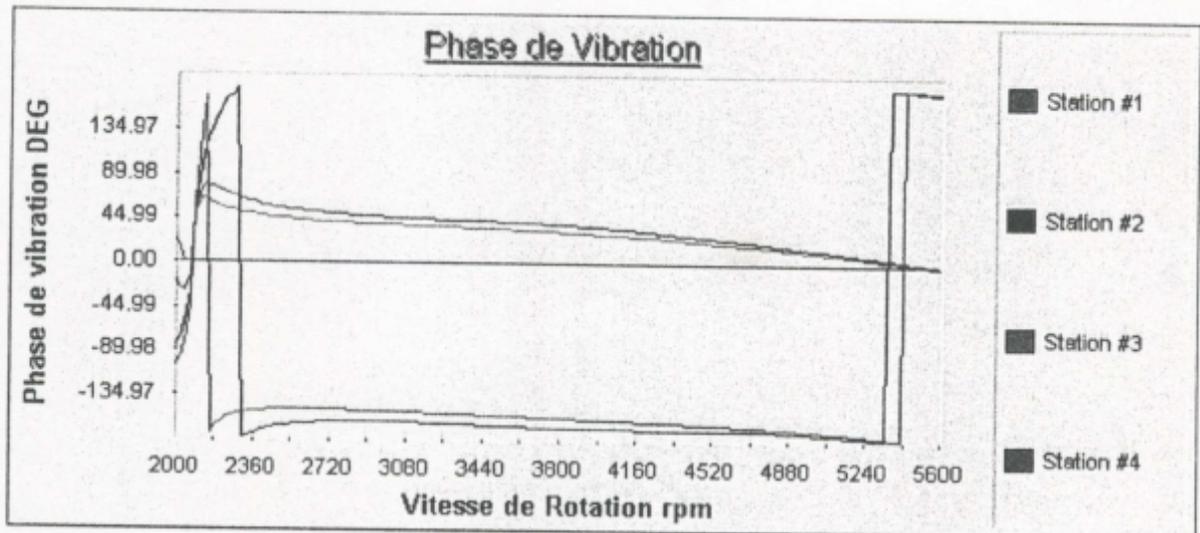


Figure 4.2-9 Phase de vibration stations (1..5)

4.2.3.2.3.Orbites de vibrations :

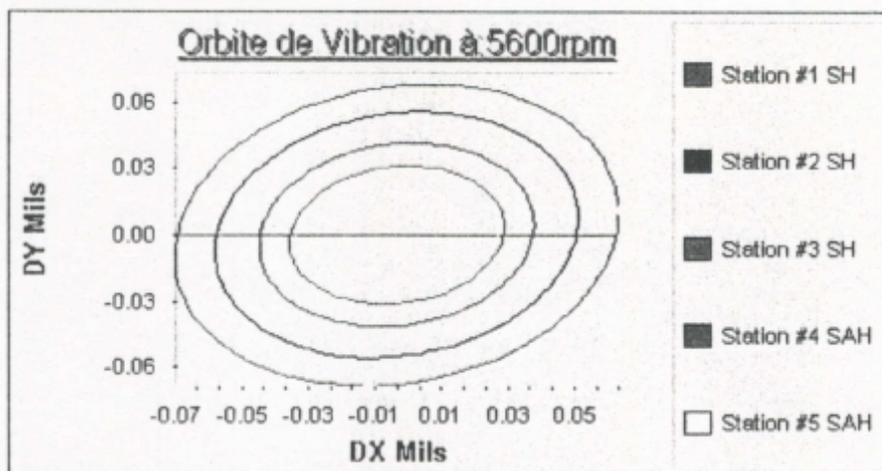


Figure 4.2-10: Orbites de vibration Station (1..5) à 5600 rpm

4.2.3.2.4.Déformée du modèle :

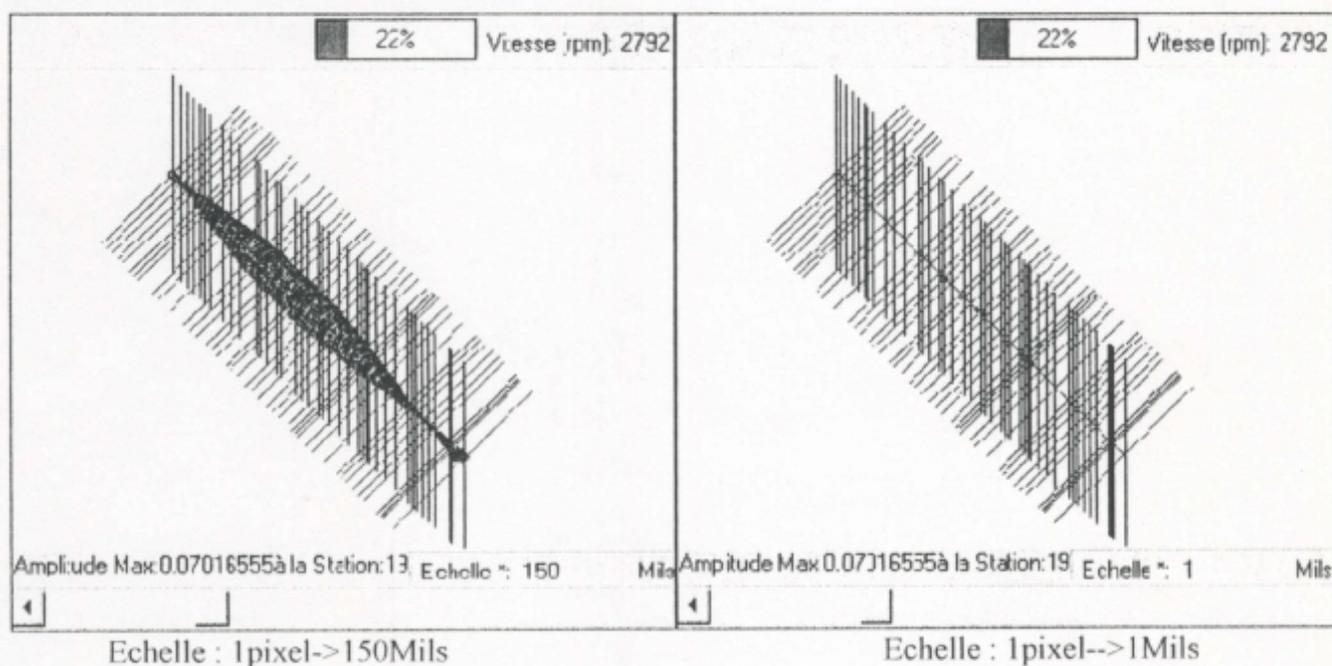


Figure 4.2-11 Déformée du modèle à la vitesse de 2792 rpm

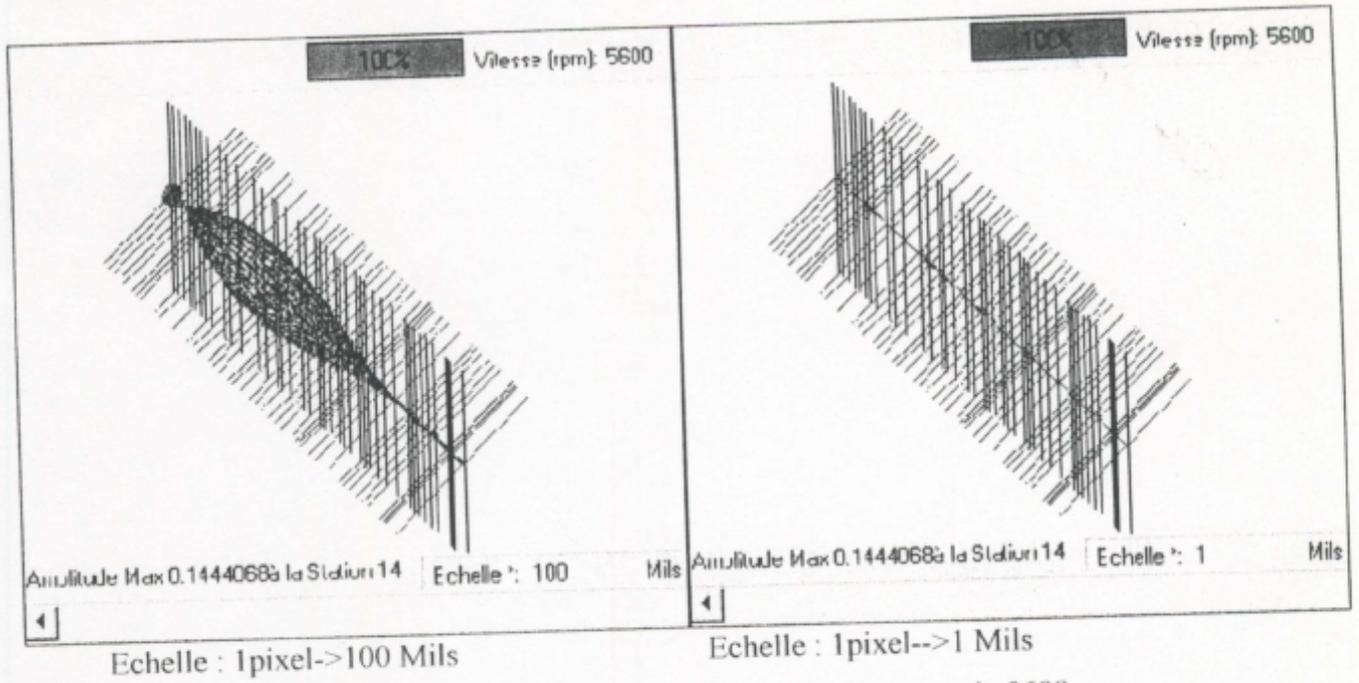


Figure 4.2-12 Déformée du modèle à la vitesse nominale 5600 rpm

4.2.4.Simulation de l'usure des joints étanches :

Les analyses suivantes sont effectuées pour différents pourcentages des coefficients relatifs aux joints d'étanchéité, pour évaluer l'influence des joints étanches sur les vibrations et au fur et à mesure que les tolérances des joints augmentent du fait de l'usure.

4.2.4.1.Etude avec performances des joints étanches à 0% :

Ce cas correspond à l'usure totale des joints; et comme si ces organes d'étanchéité n'existaient pas et que la pompe tourne à vide car on néglige l'effet palier induit par le fluide entraîné par la pompe

4.2.4.1.1.Problème au valeurs propres

4.2.4.1.1.1.Problème au valeurs propres non amorti

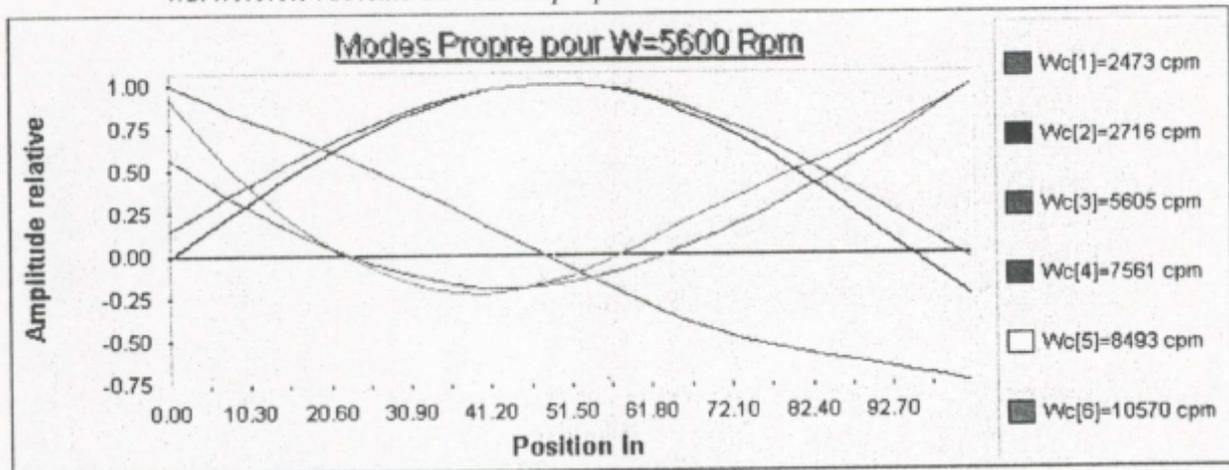


Figure 4.2.4.1-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm

4.2.4.1.1.2.Problème au valeurs propres amorti

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|---------------------------|-----------------|
| 3.91 | 1189.20 | 11356.02 |
| -205.12 | 350.69 | 3348.84 |
| 130.75 | 338.36 | 3231.10 |
| 2.39 | 300.99 | 2874.24 |
| -35.48 | 270.52 | 2583.27 |

4.2.4.1.2. Réponse permanente

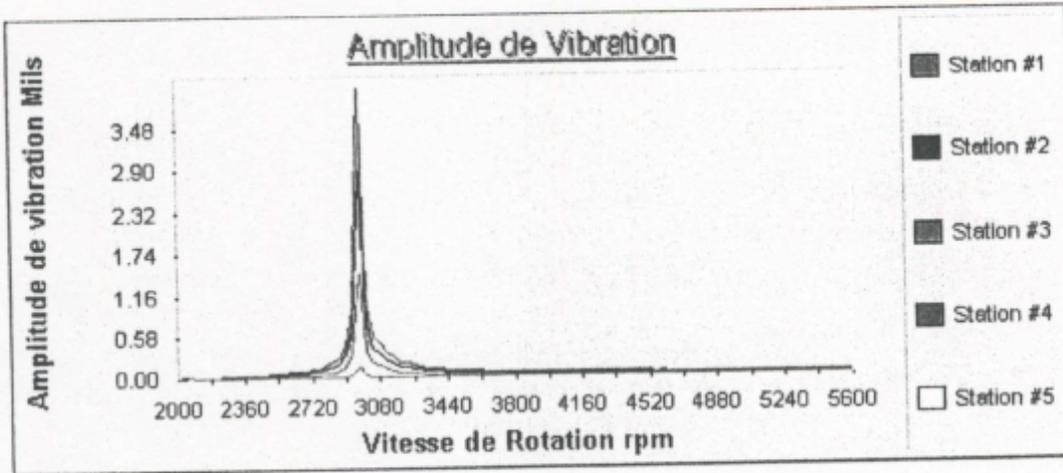


Figure 4.2.4.1-2 Amplitude de vibration direction x (Stations 1-5)

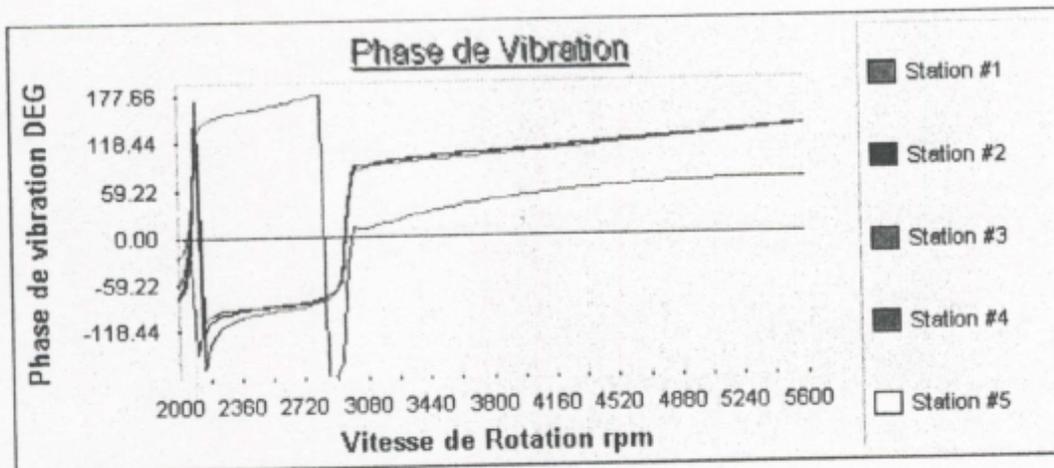


Figure 4.2.4.1-3 Angle de phase direction x (Stations 1-5)

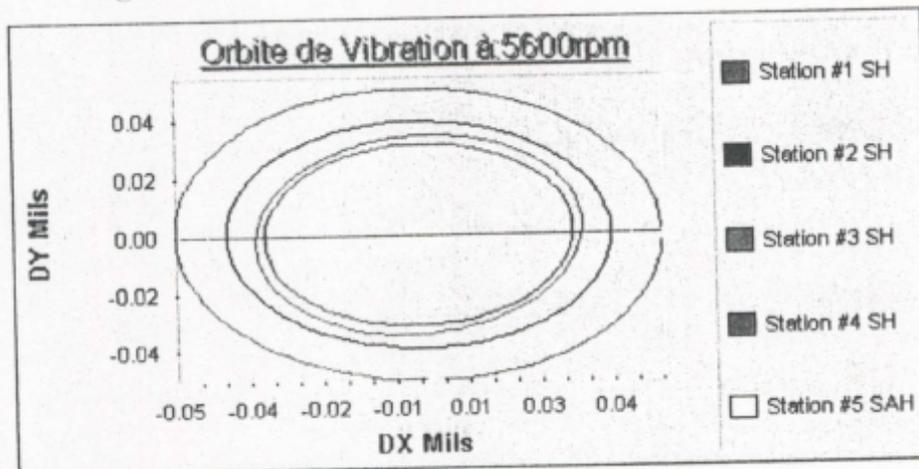


Figure 4.2.4.1-4 Orbite de vibration à 5600 rpm stations (1-5)

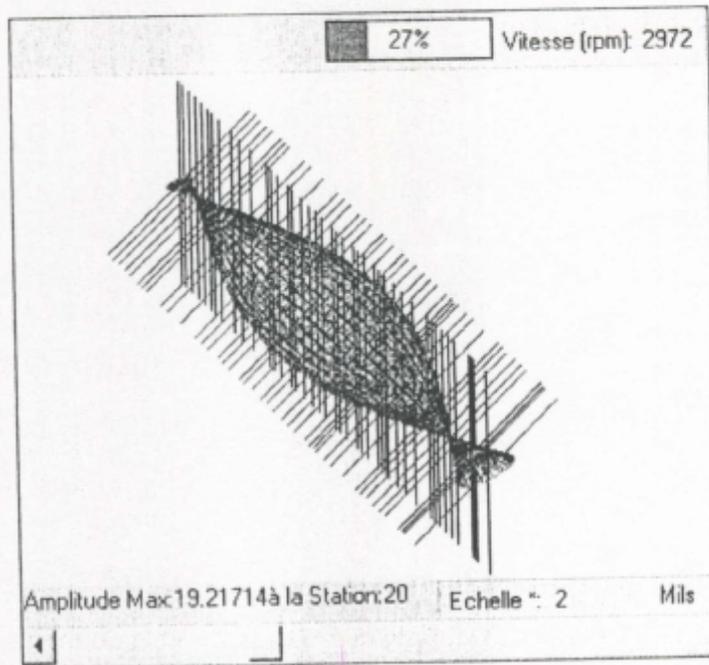


Figure 4.2.4.1-5 Déformée du modèle à 2972 rpm (échelle=2)

4.2.4.1.3. Analyse de stabilité

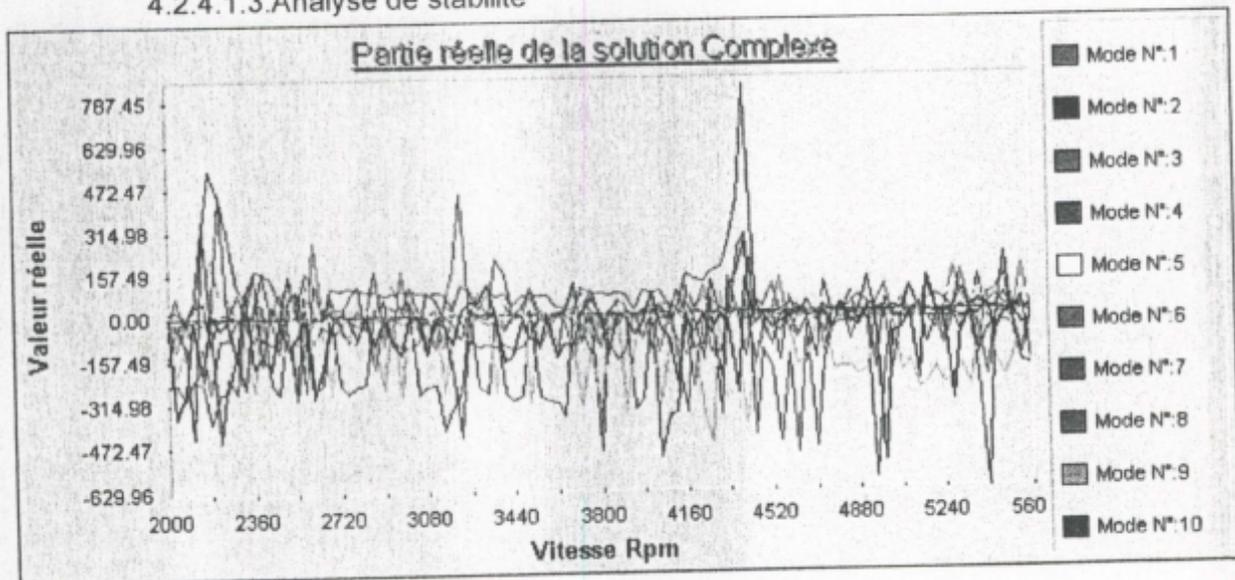


Figure 4.2.4.1-6 Partie réelle de la solution complexe

4.2.4.2. Etude avec performances des joints étanches à 20%

Ce cas correspond à très grande usure des joints.

4.2.4.2.1. Problème au valeurs propres

4.2.4.2.1.1. Problème au valeurs propres non amorti

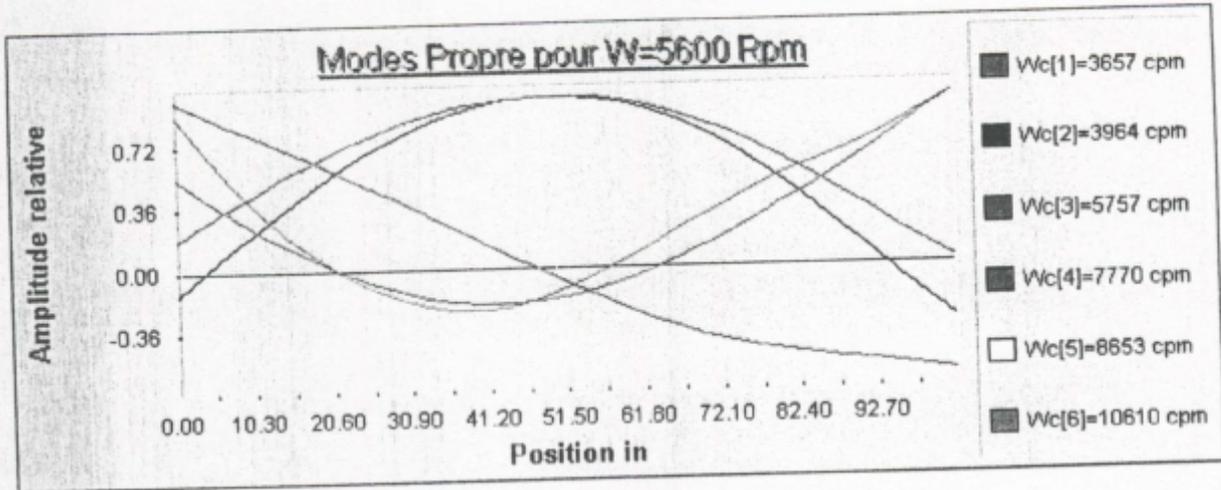


Figure 4.2.4.2-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm

4.2.4.2.1.2. Problème au valeurs propres amorti

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|---------------------------|-----------------|
| -51.69 | 1197.11 | 11431.56 |
| -107.11 | 700.68 | 6690.96 |
| -111.62 | 429.88 | 4105.02 |
| -40.06 | 325.86 | 3111.77 |
| -115.15 | 57.23 | 546.53 |

4.2.4.2.2. Réponse permanente

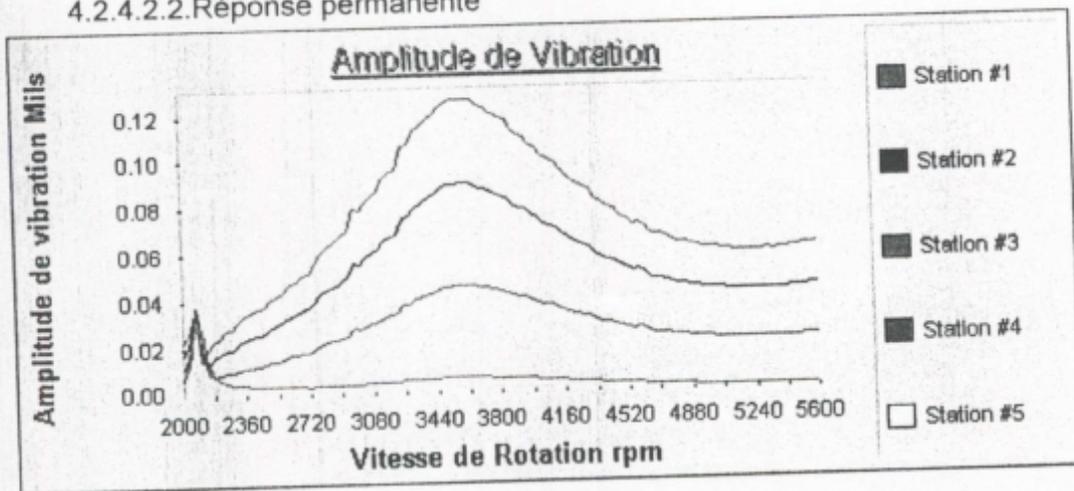


Figure 4.2.4.2-2 Amplitude de vibration direction x (Stations 1-5)

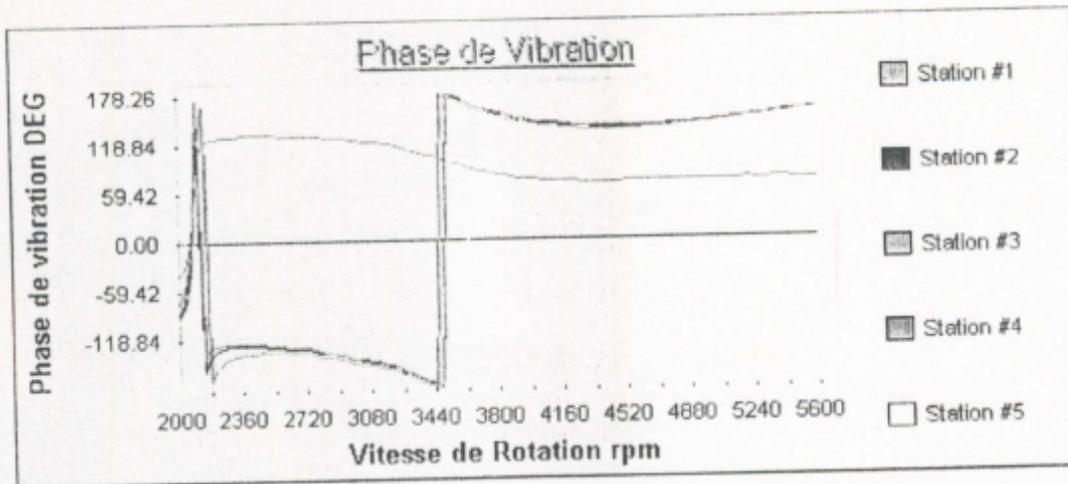


Figure 4.2.4.2-3 Angle de phase direction x (Stations 1-5)

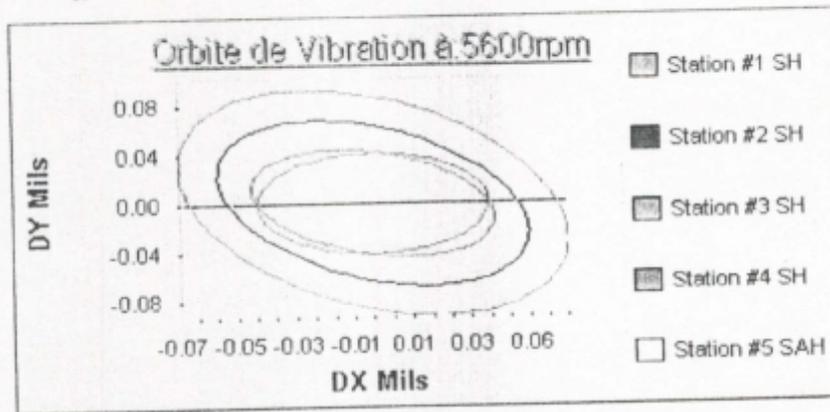


Figure 4.2.4.2-4 Orbite de vibration à 5600 rpm stations (1-5)

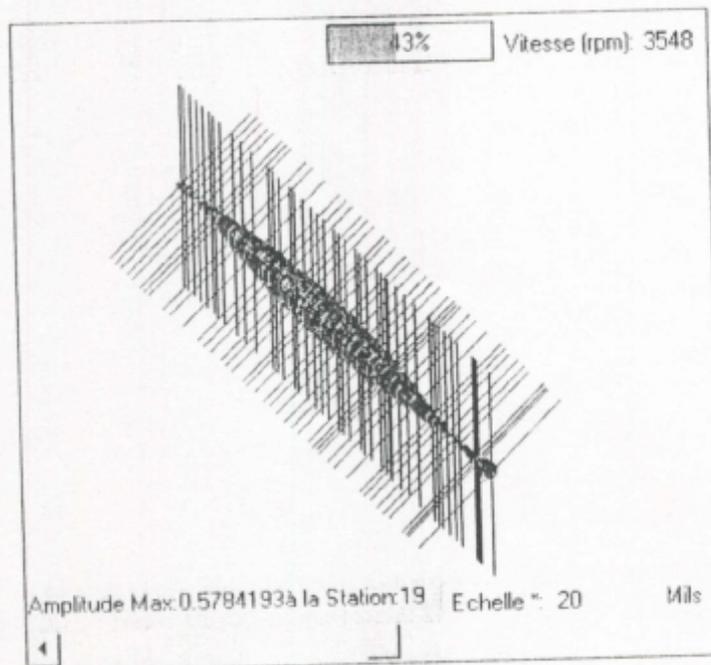


Figure 4.2.4.2-5 Déformée du modèle à 3548 rpm (échelle = 20)

4.2.4.3. Etude avec performances des joints étanches à 50%

Ce cas correspond à une usure moyenne des joints.

4.2.4.3.1. Problème au valeurs propres

4.2.4.3.1.1. Problème au valeurs propres non amorti

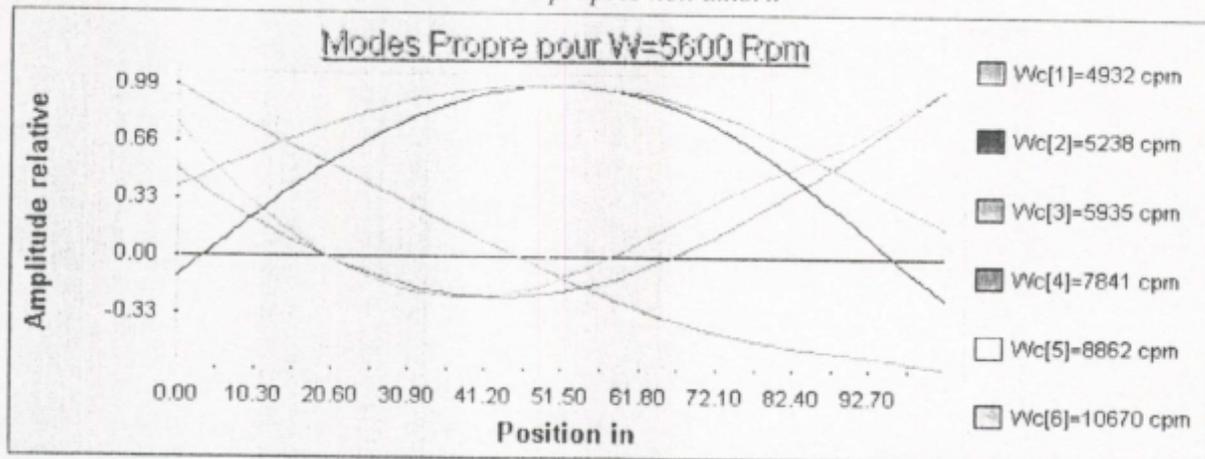


Figure 4.2.4.3-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm

4.2.4.3.1.2. Problème au valeurs propres amorti

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|---------------------------|-----------------|
| 63.00 | 1058.50 | 10107.96 |
| -304.98 | 769.11 | 7344.49 |
| 234.91 | 404.64 | 3864.06 |
| -72.44 | 259.38 | 2476.91 |

4.2.4.3.2. Réponse permanente

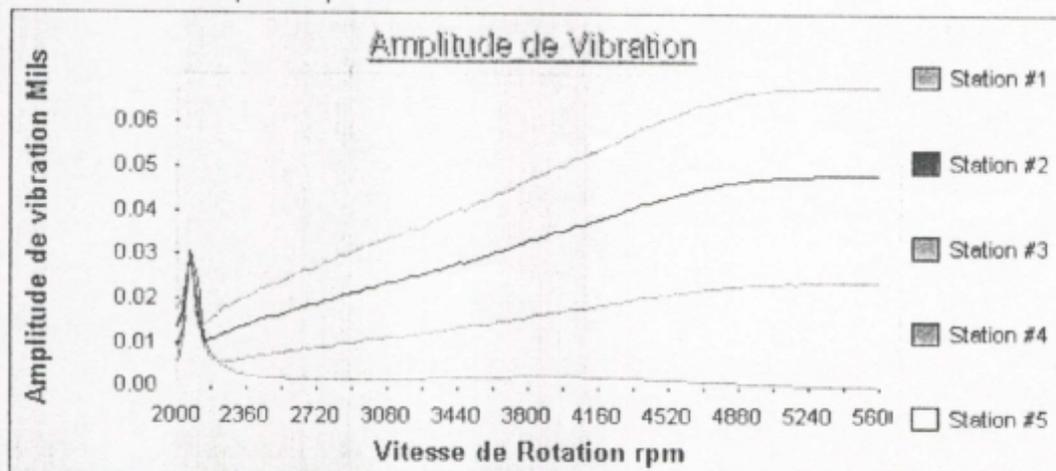


Figure 4.2.4.3-2 Amplitude de vibration direction x (Stations 1-5)

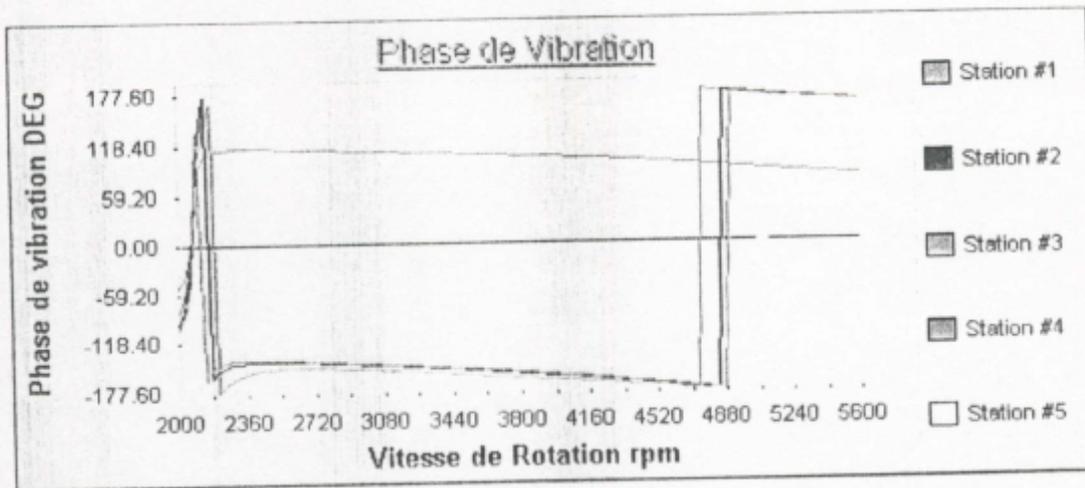


Figure 4.2.4.3-3 Angle de phase direction x (Stations 1-5)

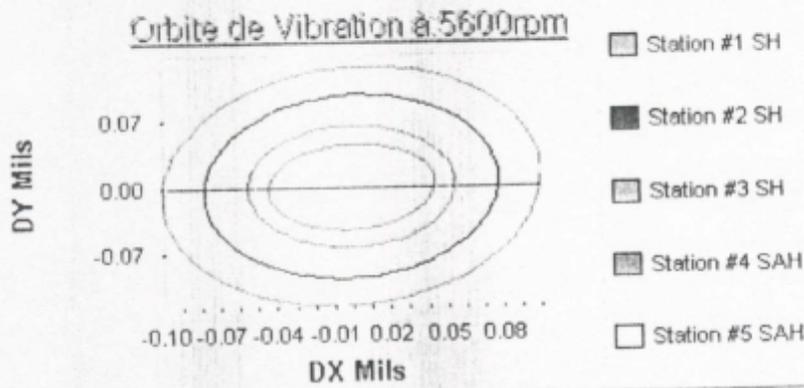


Figure 4.2.4.3-4 Orbite de vibration à 5600 rpm stations (1-5)

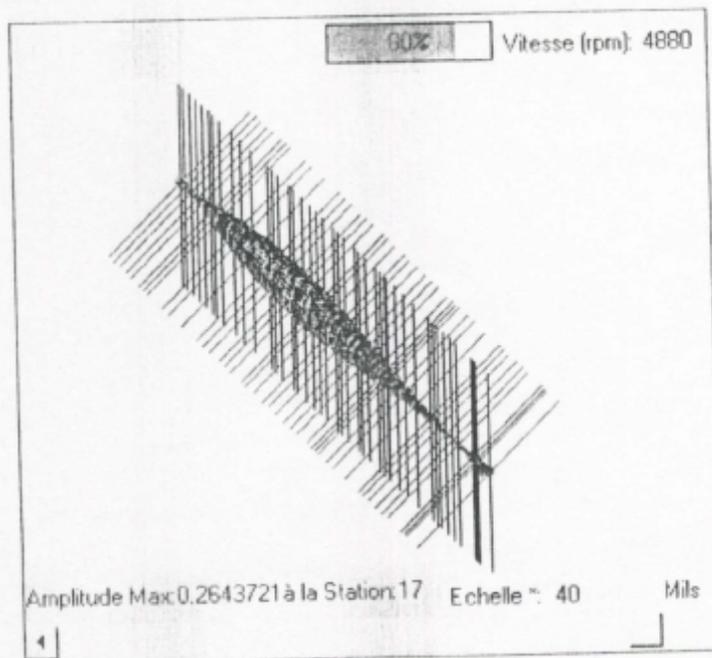


Figure 4.2.4.3-5 Déformée du modèle à 4880 rpm (échelle 40)

4.2.4.3.3. Analyse de stabilité

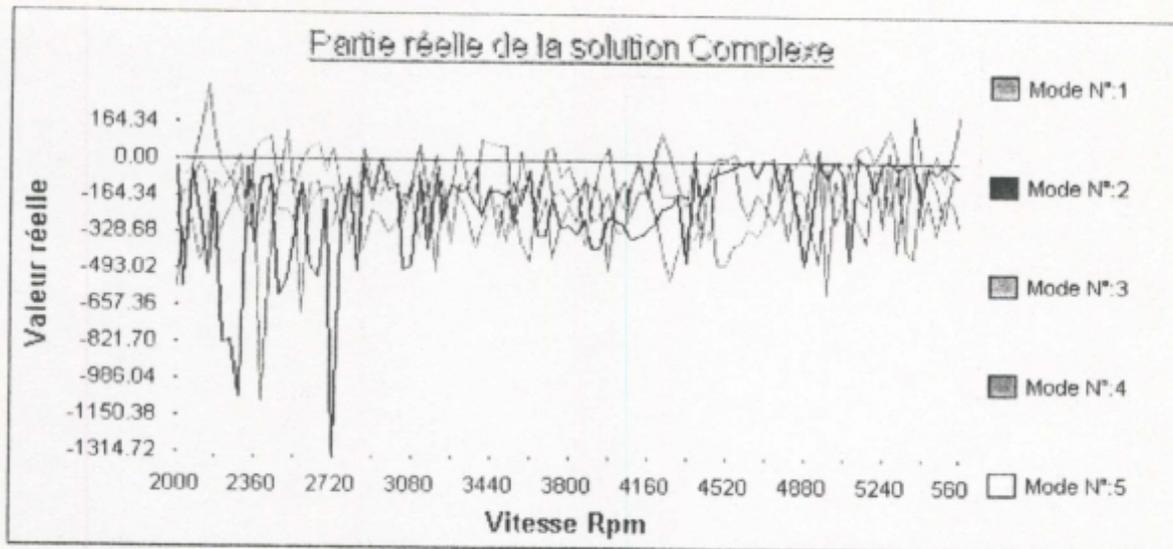


Figure 4.2.4.3-6 Partie réelle de la solution complexe

4.2.4.4. Etude avec performances des joints étanches à 80%

Ce cas correspond à une usure faible des joints.

4.2.4.4.1. Problème au valeurs propres

4.2.4.4.1.1. Problème au valeurs propres non amorti

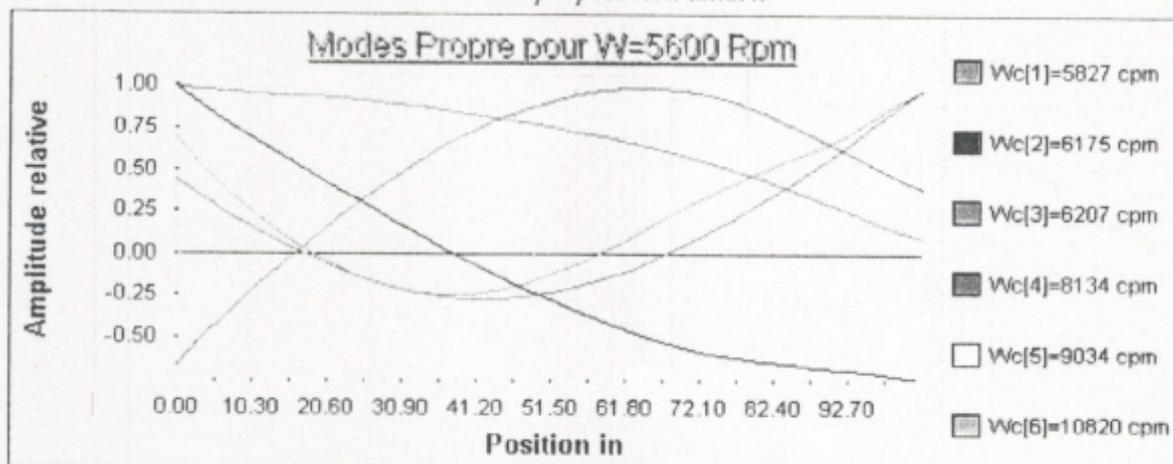


Figure 4.2.4.4-1 Modes propres de vibration à 5600 rpm

4.2.4.4.1.2. Problème au valeurs propres amorti

| α | Fréquence [rad/S] β | Fréquence [cpm] |
|----------|---------------------------|-----------------|
| -534.98 | 779.09 | 10795.86 |
| -202.79 | 599.95 | 5729.14 |
| -79.06 | 328.69 | 3138.79 |
| -58.36 | 264.77 | 2528.34 |

4.2.4.4.2. Réponse permanente :

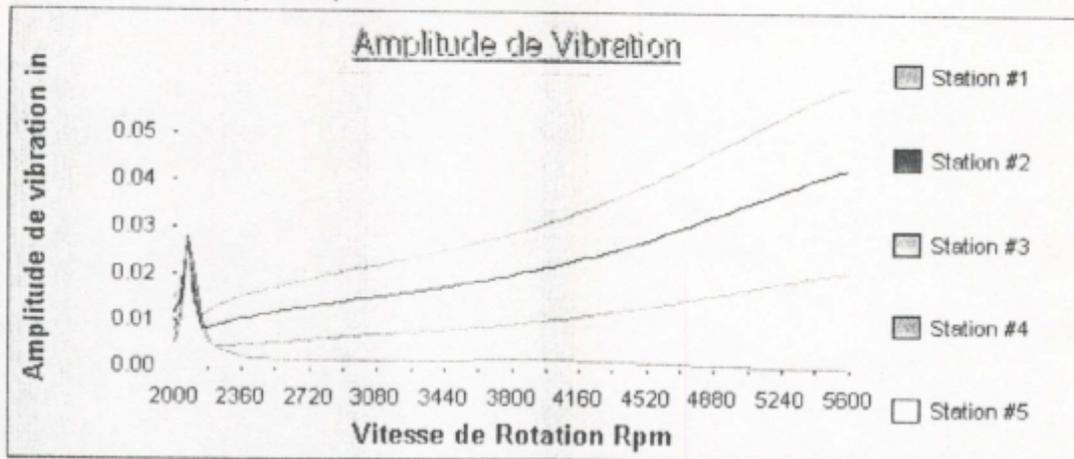


Figure 4.2.4.4-2 Amplitude de vibration direction x (Stations 1-5)

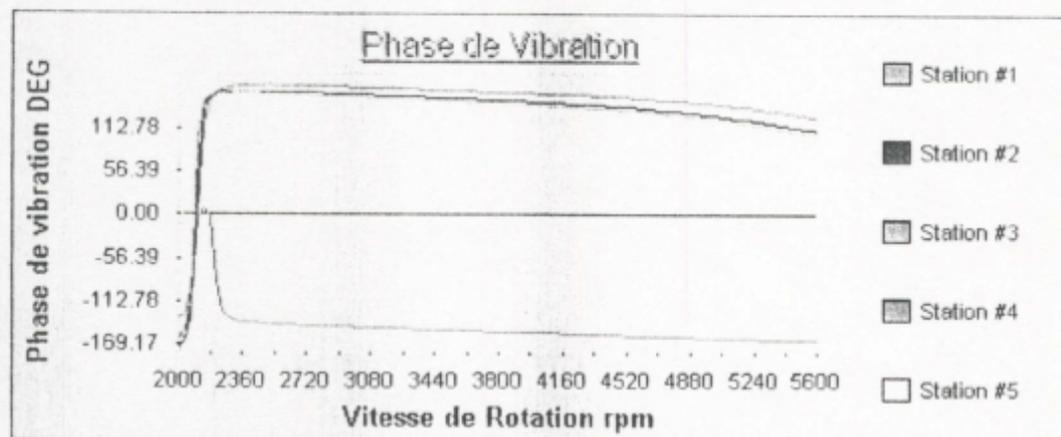


Figure 4.2.4.4-3 Angle de phase direction x (Stations 1-5)

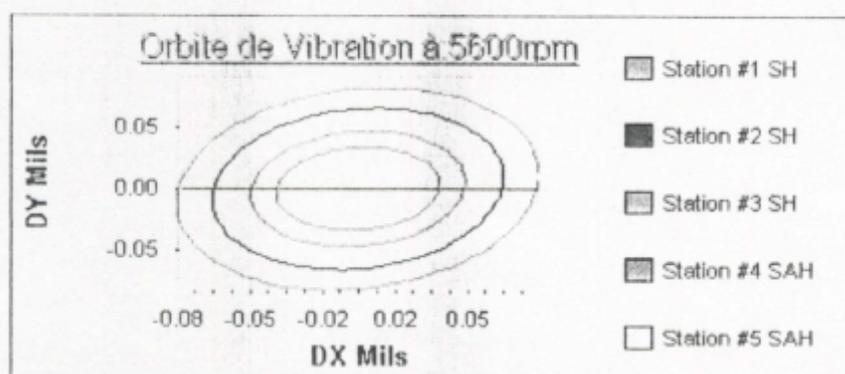


Figure 4.2.4.4-4 Orbite de vibration à 5600 rpm stations (1-5)

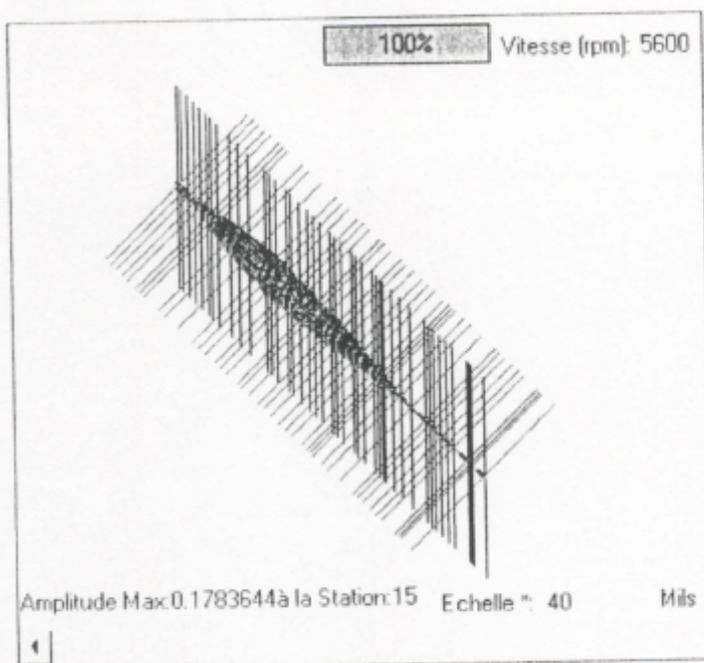


Figure 4.2.4.4-5 Déformée du modèle à 5600 rpm (échelle =40)

4.2.4.4.3. Analyse de stabilité

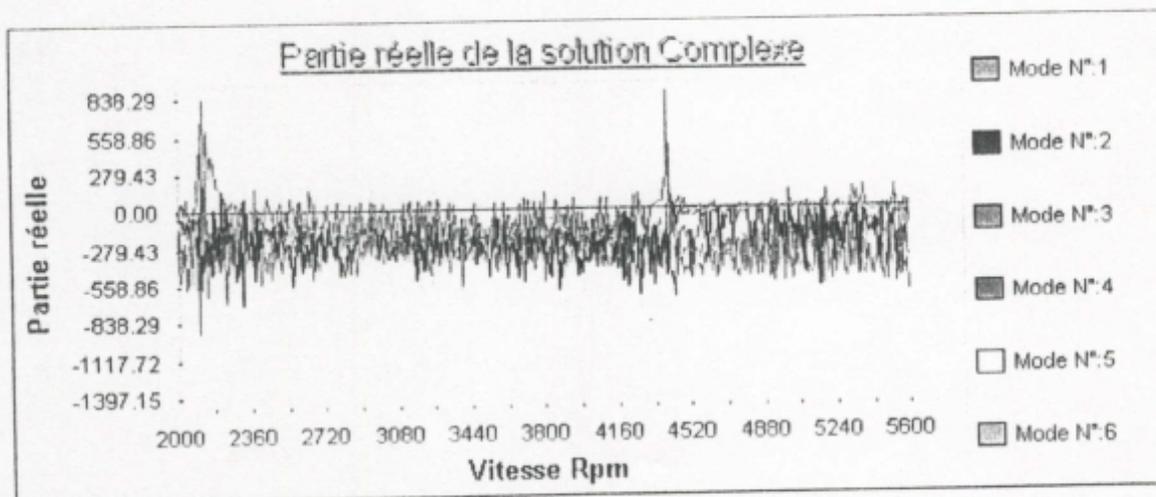


Figure 4.2.4.4-6 Partie réelle de la solution complexe

D'après les différentes études précédentes on peut aisément constater l'effet de l'usure sur le comportement du rotor ; on peut noter les points suivants :

Concernant les fréquences critiques du problème au valeurs propres non amorti varient suivant le même sens que les performances des joints d'étanchéité (croit avec les performances).

Exemple pour la première vitesse critique pour

| Performances | Valeur de la première vitesse critique (cpm) |
|--------------|--|
| 0% | 2473 cpm |
| 20% | 3657 cpm |
| 50% | 4932 cpm |
| 80% | 5827 cpm |

Les amplitudes de vibration s'atténuent au fur et à mesure que les performances des joints d'étanchéité augmentent

| Performances | Maximum de l'amplitude (Mils) |
|--------------|-------------------------------|
| 0% | 3.48 Mils |
| 20% | 0.12 Mils |
| 50% | 0.06 Mils |
| 80% | 0.05 Mils |

Ceci pour les stations sélectionnées dans la visualisation; il en va de même pour les autres stations.

La déformée du rotor tend à se stabiliser quand les performances des joints d'étanchéité augmentent est constaté en lançant l'animation de la déformée ou en comparant les figures 4.2.4.1-5, 4.2.4.2-5, 4.2.4.3-5 et 4.2.4.4-5 avec leurs facteurs d'échelle respectifs.

CONCLUSION

CONCLUSION

De tout temps, l'homme s'est passionné pour la création des machines et des mécanismes; il a compris très vite que les systèmes rotatifs sont à la base de tout transport mécanique de masse ou d'énergie. Il nous a aussi montré son intérêt qu'il portait pour communiquer avec son prochain et témoigner de son temps par les peintures rupestres.

Notre travail guidé par ces deux réflexions, s'inscrit dans le cadre du projet de recherche « analyse dynamique des rotors » et contribue par une synthèse de plusieurs travaux à la mise en oeuvre d'un logiciel d'analyse dynamique; notre contribution a consistée à passer en revue les techniques les plus récentes de traitement et de visualisation de l'information et de les implementer sous forme de logiciel.

On a vu à travers les exemples présentés qu'à l'aide de ce logiciel et de son interface interactive, il n'est plus nécessaire d'avoir des compétences en informatique pour faire une analyse dynamique d'un système de rotor. L'accès simple aux données du modèle, la visualisation de plusieurs résultats en même temps, la notion de projet introduite diminuent le risque d'erreur et facilitent l'analyse. Le logiciel développé servira dans le domaine industriel aussi bien pour l'étude et la conception de nouvelles machines tournantes que pour le diagnostic d'autres machines déjà en marche. Il contribuera aussi d'un point de vue pédagogique à l'assimilation de la théorie de la dynamique de machines tournantes. Cependant on peut considérer le logiciel comme une plate-forme d'étude qui peut être enrichie avec quelques extensions supplémentaires à savoir l'analyse en torsion, la considération de nouveaux types de paliers et même des études énergétiques (transfert de chaleur et interaction fluide-structure).

RÉFÉRENCES

REFERENCES

- [1] Norbert GIAMBIASI - Jean Claude RAULT - Jean Claude SABONNADIÈRE
« Introduction à la CONCEPTION ASSISTÉE par ORDINATEUR »
Edition HERMES 1983
- [2] R.Camarero, L.Grangers
« Introduction à la conception assistée par ordinateur »
Ecole Polytechnique de Montréal 1990
- [3] G.Dhatt, G.Touzot « Une présentation de la méthode des éléments finis »
Edition. Maloine 2^{ème} édition
- [4] Philippe Schweizer « Infographie I et II »
Collection Informatique, Presses Polytechniques romandes 1987
- [5] M.Maghraoui « Dynamique de machines tournantes Modélisation des systèmes de rotors : cas vécus »
Conférence Internationale PROVIB' 93
Institut de mécanique - Université de Blida, 1993
- [6] M.Maghraoui « Numérical Stability Analysis of Rotor-Bearing Systems »
International Conference of pure and applied Mathematics
College of Science, University of BAHRAIN 1995
- [7] M.Maghraoui « Logiciel RDA 'Rotor Dynamic Analysis' sous DOS et documentation »
- [8] B.Barsky « Mathématiques et CAO » B.SPLINES
Volume 6 Hermès 1987
- [9] P.Bezier « Mathématiques et CAO » Courbes et surfaces
Volume 4 Hermès 1987
- [10] M.Blanc « Modélisation géométrique et CFAO »
Ensam Paris 1987
- [11] M.Maghraoui « Control of rotating machinery vibration using an active
multi-frequency spectral optimisation »
Thèse Phd CWAU
Cleveland Ohio USA, 1989
- [12] R.Bigret « Vibration des machines tournantes et des structures »
Edition. Technique et documentation 1980
- [13] J.F.Imbert « Analyse des structures par éléments finis »
Sup'Aéro Ecole Supérieure d'Aéronautique et de l'espace
Edition. Cepedaus 3^{ème} édition, 1991

REFERENCES

- [14] K.Rayane,Challali.M,Hassaid.B « Contribution à l'élaboration d'un Logiciel de CFAO 3D pour surfaces gauches »
Mémoire Ingénieur INGM 1992
- [15] R.D.ARNELL, P.B.DAVIES,J.HALLING and T.L.WHOMES
« Tribology » Priciples and design Applications
Edition :MACMILLAN ,1991
- [16] Technical Report « Rotor-Bearing Dynamics Design Technology »
Pat III : Design Handbook for Fluid Film Type Bearings
Air Force Aero Propulsion Laboratory
Wright-Patterson Air Force Base, Ohio ,1965
- [17] P.Norton, P.Yao « Borland C++, Programmation Windows »
Edition . Sybex 1992
- [18] Borland Pascal 7 « Livre d'or de la programmation Windows »
Edition. Sybex 1992
- [19] Borland C++ « Programmation Graphique pour Windows avec Borland C++ »
Edition. Sybex 1993
- [20] Maghraoui, M. & Adams M. L., Engineering Report on Feed Water Pump Vibration Problems, Machinery Vibrations Institute, Cleveland, USA 1990.
- [21] P.Jaulent « Génie logiciel : les méthodes »
Ed Arrmand Collin 1992
- [22] Borland « Logiciel et documentation Delphi ver 1.00 sous Windows »
« Guide de programmation »
« Guide de developpement des composants » Editeur Borland 1995
- [23] P.L George « Génération automatique de maillages :application au méthodes d'éléments finis ».
Edition Masson 1990.
- [24] Z.Sahnoun « An Interactive Génération of Interactive graphics programs »
Rensseler Polytechnic Institue
Troy Newyork. 1984
- [25] G.GrandPierre, R.Cotté « Graphisme 3D en turbo Pascal »
Edition . Editest 1986
- [26] J.Willey& Sons « Applied Numerical methods »
Ed . Maloine 2^{ème} édition 1982

REFERENCES

- [27] Yvon GARDAN « SYSTEMES DE CFAO »
Edition HERMES 1982
- [28] Bendjaima « Etude de la lubrification Méthode des différences finies»
Thèse de Magister Institut de Mécanique
Université de Constantine soutenance prévue fin 96
- [29] Boukhlef « Etude de la lubrification Méthode des éléments finis»
Institut de Mécanique Blida soutenance prévue fin 96

ANNEXES

Quelques Définitions

Rotor :

C'est un arbre tournant, c'est toute la partie tournante d'une machine, section d'arbre, accouplements, engrenages, disques,...

Stator :

C'est la partie fixe de la machine.

Paliers :

C'est la connexion entre le rotor et le stator ex Palier à roulement {Ball Bearing}.

Fréquence naturelle :

Ce sont les oscillations libres d'un système dynamique, c'est une caractéristique physique du système.

Vitesse Critique {Critical Speed} :

C'est la vitesse de rotation de la machine qui est égale à l'une des fréquences naturelles.

Stabilité :

Etant donné un modèle avec des paliers à coefficients dépendant de la vitesse de rotation; la résolution du problème aux valeurs propres généralisé nous donne une solution de la forme $\lambda_i = \alpha_i \pm j\beta_i$ pour différentes vitesses d'analyse; λ_i correspond à la valeur propre.

$$\text{On a } x(t) = Ae^{\lambda t} = Ae^{(\alpha_i \pm j\beta_i t)} = A(e^{\alpha_i} e^{\pm j\beta_i t})$$

Le seuil d'instabilité correspond à la valeur de la vitesse de rotation du rotor qui rend la partie réelle de la valeur propre nulle.

Seuil d'instabilité: {Threshold of instability}

λ_i Valeur propre : {Eigenvalue}.

Balourd :

C'est une masse excentrique (produit masse excentricité), en général on la définit par une force harmonique tournante synchrone avec la vitesse du rotor {Unbalance}.

Réponse :

Transitoire Disparaît avec le temps; Fonction du temps {transient}.

Permanente Existe toujours; Indépendante du temps {Steady state}.

Mode de vibration :

C'est la manière dont vibre un système quand il est excité par l'une de ces fréquences naturelles. C'est la déformation relative des points du rotor.

ANNEXE A

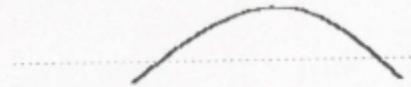
Pour une poutre libre on a :



1^{er} mode rigide (Cylindrique)



2^{ème} mode rigide (Conique)



1^{er} Mode de flexion « U »



2^{ème} Mode de flexion « S »

Rotor rigide :

Un rotor est considéré comme rigide s'il n'est pas déformé par des modes flexibles durant son opération, la vitesse de rotation de la machine est inférieure à la première fréquence des modes de flexion.

Rotor flexible :

C'est un rotor qui n'est pas rigide; si la vitesse de rotation de la machine est supérieure à la première fréquence naturelle du mode de flexion.

Equilibrage: {Balancing}

C'est une méthode corrective pour éliminer (réduire) le balourd existant dans la machine.

Introduction à Windows

Présentation :

Windows de Microsoft est une extension graphique au système d'exploitation MS-DOS dans plusieurs directions DOS a été créer pour traiter un seul programme à la fois ; *Windows* est capable d'en faire tourner plusieurs en même temps. DOS a des possibilités graphiques limitées; *Windows* propose des graphiques de haut niveau. DOS demande à chaque programme de créer sa propre interface utilisateur ce qui signifie que les utilisateurs doivent apprendre un jeu de commande différent pour chaque programme DOS qu'ils utilisent. Avoir une structure différente des programmes, c'est un peu comme si des voitures avaient des organes de conduite placés différemment selon les marques. La variation, c'est bien, mais une interface standard permet à l'utilisateur de se servir de n'importe quel programme *Windows* avec le minimum d'entraînement. *Windows* propose un ensemble d'objets d'interface utilisateur formé de fenêtres, de menus et d'icônes, c'est a dire un *{look and feel}* cohérent pour tous les programmes, ce qui rend les applications Windows faciles à apprendre et à utiliser.

Windows fournit une interface utilisateur graphique multitâche appelé GUI (graphique user interface) qui encourage la création de programmes interactifs. *Windows* représente un type relativement nouveau d'environnement de travail optimisé en ce qui concerne l'interaction, le dialogue en l'homme et l'ordinateur. Les programmes *Windows* ont une structure différente de celle des programmes écrit pour les environnements différents. Cette structure a beaucoup de chose en commun avec des programmes écrit pour d'autres GUI comme le Macintosh ou « Présentation Manager » d'OS/2, les programmes qui tournent sous de tels environnements sont dit « pilotés sur événement » leur structure est organisée autour d'événements déclenchés par l'utilisateur (frappe de clavier ou clic de souris) l'architecture de tels programmes est plus proche des systèmes d'exploitation que des logiciels d'application standard. [19]

Programmation pilotée par événement (messages):

La plupart des programmes écrits pour DOS sont organisés de façon séquentielle selon un enchaînement de procédures. De telles structures ont un début un milieu et une fin parfaitement déterminées.

ANNEXE B

Considérons par exemples un programme affichant une série d'écrans de données pour la création d'un document quelconque. La figure.1 montre le caractère strict de la façon dont travaille ce programme.

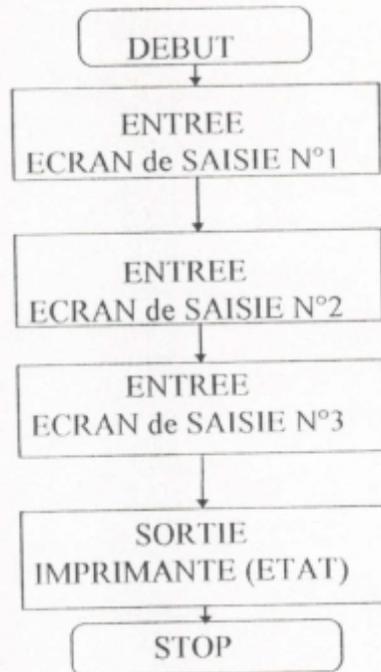


Figure 1 Programme organisé en séquences.

Dans la logique précédente si l'on suppose que l'on fait une erreur dans l'écran de saisie n°1 et on passe à l'écran 2 il n'est plus possible de revenir en arrière, chose qui dans un programme piloté sur événement est parfaitement possible.

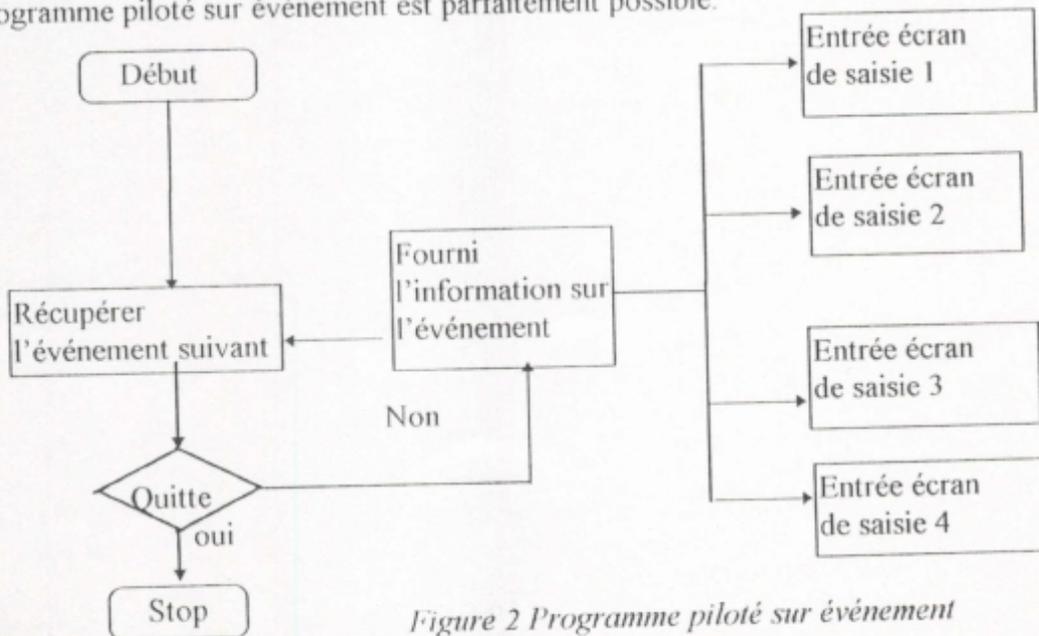


Figure 2 Programme piloté sur événement

Ce n'est pas qu'un seul des aspects de différence sur la façon dont travaille un programme piloté sur événement et son homologue séquentiel.

Un système d'exploitation piloté sur événement comme *Windows* va plus loin ce qui correspondrait ici à renseigner une rubrique de chacun des écrans dans n'importe quel ordre.

Message :

C'est une information relative à un chargement quelconque de l'interface avec l'utilisateur, comme une fenêtre qu'on déplace ou une touche du clavier sur la quelle on vient de taper ; Ou un click de souris (pointage) à une position donné de l'écran.

Sorties Graphiques :

Toutes les sorties créés par *Windows* sont graphiques on voit sur la figure 3 un exemple de droites, de figures pleines et de tests que peut créer GDI. Comme on peut s'y attendre, cela signifie que l'on peut dessiner des figures géométriques : droites, cercles, rectangles objets etc. . Le texte lui même est considéré comme un objet graphique il est ainsi plus facile de mélanger texte et figures géométrique. Paradoxalement, alors que ces systèmes graphiques rendent plus facile tout ce qui concerne les formes géométriques, ils tendent à rendre plus complexe ce qui concerne le texte.

Les formes géométriques sont plus faciles a traiter parce que le programme ne calcule pas chaque pixel. En appelant simplement la routine rectangle GDI va dessiner un rectangle plein. Afficher du texte est plus délicat car, pour GDI, le texte est aussi un objet graphique. Sa mise en place s'effectue avec des coordonnées exprimées en pixels, et non plus en nombre de caractères.

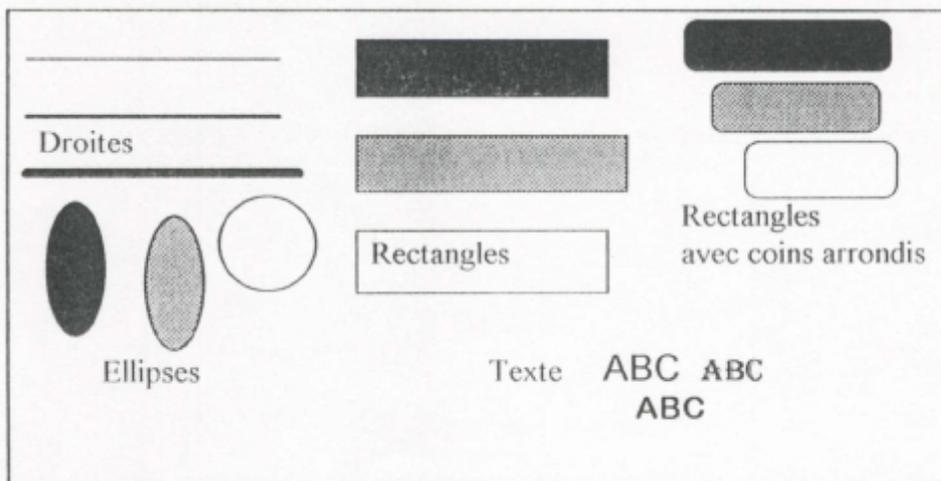


Figure 3 Exemple de sorties graphiques

GDI {*graphic device interface*}, interface avec périphérique graphique.

Graphiques indépendants des périphériques :

C'est donc GDI qui est à la base de cette indépendance du graphique vis-à-vis des périphériques. Il en résulte que *Windows* peut tracer la même figure sur des périphériques différents en appelant les mêmes routines. Ainsi pour tracer un rectangle sur l'écran ou l'imprimante on appellera *Rectangle*. C'est au GDI qu'il appartient de faire en sorte que vu du programme tous les périphériques se ressemblent, parmi ces périphériques on trouve aussi bien des écrans d'affichage C.G.A. où un pixel est allumé ou non que des imprimantes *post-script* capables de dessiner les plus complexes.

Pour certains périphériques, GDI va même jusqu'à faire une simulation logicielle des possibilités ignorées du matériel.

GDI connaît quatre types d'affichage; L'écran, les périphériques de copie d'écran (imprimante et traceurs), les *bitmaps* et les *metafichiers*. Parmi ceux là deux représentent des périphériques physiques, l'écran d'affichage et les systèmes de copie.

Les *pseudo-périphériques*:

Un *pseudo-périphérique* constitue un moyen de stockage d'image en mémoire ou sur disque ainsi qu'un moyen standard de partager les images graphiques entre applications.

Lorsqu'on affiche les informations sur un écran, GDI utilise une approche intitulée fenêtre, ce qui entraîne que chaque fenêtre est traitée comme une simple face de dessin isolée. Lorsqu'un programme dessine dans une fenêtre les coordonnées par défaut du dessin sont déterminées par rapport à l'origine (0,0) des coins supérieurs gauche de fenêtre figure 4.

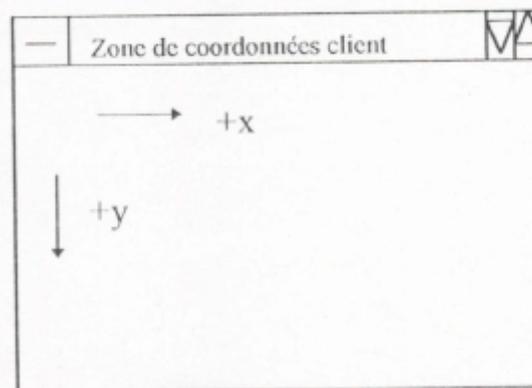


Figure 4 Origine par défaut des coordonnées dans la zone de l'utilisateur

Un système graphique orienté fenêtres implique aussi une découpe (*clipping*) des images aux limites de fenêtre chaque dessin sera limité au cadre de la fenêtre, et il ne sera possible, même volontairement, de dépasser ces limites, ce mécanisme de protection fonctionne de deux côtés; On peut être sûr qu'une autre fenêtre appartenant à une autre tâche ne risque pas de venir « baver » dans sa propre fenêtre.

Norme GKS

Introduction

La bibliothèque graphique GKS (*Graphic Kernel System*) [4] a été définie pour faciliter le développement et l'utilisation des applications graphiques. Elle offre les primitives de base pour le traçage en deux dimensions en mode vectoriel et/ou matriciel, ainsi que pour l'interaction avec l'utilisateur. Développée en Allemagne, elle deviendra la norme ISO (*International Standard Organisation*), en 1985 et commence à jouer son rôle de bibliothèque standard puisque les constructeurs de matériels informatique l'implémentent sur leurs systèmes.

Cette bibliothèque a été définie pour être utilisée par la majorité des applications graphiques, bien qu'elles puissent appartenir à des domaines fort divers, pour standardiser l'infographie comme furent unifiés jadis les langages de programmation. Les intentions sous-jacentes à la normalisation sont :

- Faciliter la portabilité d'applications graphiques sur diverses installations.
- Faciliter l'introduction du graphique dans les applications.

La bibliothèque GKS supporte de façon très unifiée les divers périphériques d'entrée et de sortie graphique, elle offre les primitives requises tant par les applications hautement interactives, que simplement passives, tout en restant d'une complexité abordable.

Orientation générale:

- Consistance
- Compatibilité avec les règles couramment admises
- Orthogonalité
- Fonctionnalité
 - Universalité.
 - Minimalisation : nombre de primitives restreint.
 - Simplicité: primitives d'usage aisé.
 - Richesse : primitives de haut niveau.
- Interface utilisateur
 - Convivial.
 - Support de gestion des erreurs.
- Périphériques graphiques
 - Indépendance du matériel.
 - Support d'une gamme étendue de périphériques.
- Implémentation
 - Facile à implémenter
 - Définitions claires et indépendantes d'un langage
 - Efficacité
 - Robustesse

La généralisation de GKS à trois dimensions est en bonne voie et contribuera fortement à la diffusion de cette norme.

Le concept de bibliothèque graphique

Toute application requiert à son niveau le plus bas d'interface avec les périphériques graphiques utilisés. Les primitives d'affichage peuvent prendre des formes très variées mais correspondent fonctionnellement à un ensemble limité d'opérations de base:

- Afficher un point
- Tracer un segment de droite
- Copier une matrice de points
- Dessiner un polygone rempli
- Afficher un caractère

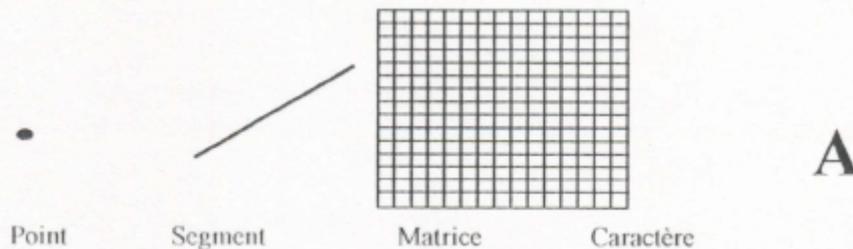


Figure 1 Opérations graphiques de base

De même, les primitives d'entrée graphique peuvent être réduites à cinq fonctions génériques, décrites dans la définition de GKS. D'autres primitives de niveau plus élevé sont aussi communes à de nombreuses applications, telle que le changement de système de coordonnées, le découpage l'élimination de parties cachées etc..

Pour éviter la constante réécriture des primitives graphiques, on les regroupe dans une bibliothèque qui sera utilisée pour le développement des applications. Les premières bibliothèques graphiques étaient fournies par des fournisseurs de périphériques (*Calcomp* pour les traceurs, *Plot10* pour les écrans vectoriels) afin de simplifier la mise en oeuvre de leurs équipements. Ces bibliothèques hautement dépendantes du matériel, sont très primitives en ce qui concerne les objets géométriques supportés (changement d'échelle, d'origine).

De nombreux centres de calculs ont été amenés à augmenter la portabilité de ces bibliothèques pour permettre leurs usages sur divers équipements, tout particulièrement pour obtenir une esquisse sur écran avant toute sortie sur papier graphique avec le même programme. Les universités ont joué un rôle important dans l'effort de standardisation en informatique grâce à leurs politique de libre échange de logiciels qui fit ressentir la nécessité d'une uniformisation aussi dans le domaine du graphique.

Les logiciels de CAO sont fortement graphiques et peuvent être développés plus aisément si l'on dispose de d'un bon noyau de primitives graphiques. Une bibliothèque graphique assez complète se composera de plusieurs catégories de primitives :

- Traçage 2-D
- Traçage 3-D
- Changement de système de coordonnées
- Paramétrisation de l'affichage mode de fonctionnement
- Entrées graphiques
- Gestion des erreurs
- Utilitaires

Examinons les primitives minimales pour chaque catégorie:

Traçage 2D

- Tracé d'un point
- Test de couleur d'un point
- Tracé d'un segment de droite
- Tracé d'une surface polygonale
- Tracé de caractère
- Tracé de matrice de points
- Tracé d'une courbe d'interpolation

Tracé 3-D

- Tracé d'un segment de droite

Changement de repère

- Spécification d'une clôture et d'une fenêtre
- Spécification d'une projection

Paramètres

- Sélection du mode de traçage, couleur et largeur de trait
- Sélection du type, taille et de l'orientation des caractères
- Travail en coordonnées absolues ou relatives
- Activation ou inhibition du découpage

Entrée graphique

- Les cinq périphériques logiques
- Gestion de menus

Gestion des erreurs

- Traitement d'un écran
- Simulation de traceur

La définition cohérente d'une bibliothèque est une tâche tout aussi complexe que sa réalisation, qui présente un intérêt proportionnel à son spectre d'utilisation potentiel. L'usage d'une bibliothèque standardisée est souhaitable lorsqu'elle est disponible dans le cas contraire elle pourra servir de guide pour la définition des modules graphiques de l'application.

Les principes de GKS

La bibliothèque graphique GKS offre au programme d'application une interface cohérente soigneusement modélisée qui par le concept de station de travail permet l'indépendance du matériel. A chaque périphérique sera associé un programme de contrôle spécifique (driver) qui assurera l'interface avec le noyau du système GKS tel que représenté en figure 2.

Le système GKS est organisé en niveaux de complexité croissante, chacun reposant sur les niveaux inférieurs. Le niveau de base contient les primitives de sortie minimales qui peuvent être implémentées facilement sur tous les matériels.

Les niveaux suivants introduisent successivement: Les entrées, les stations de travail multiples, les *métafichiers*, les segments (stockage local)

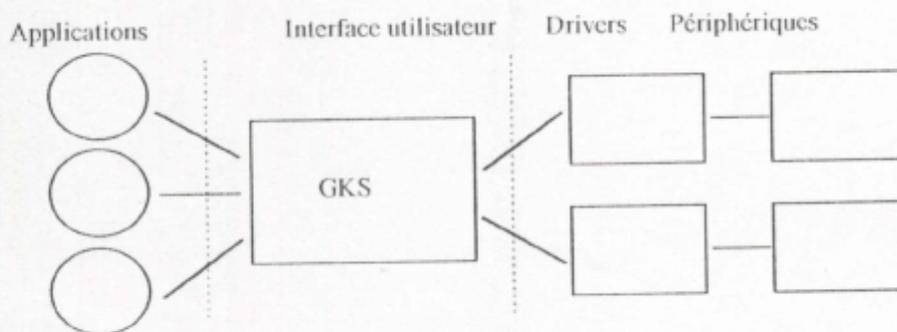


Figure 2 Interfaces normalisées de GKS

La bibliothèque GKS n'est elle-même qu'un niveau dans la hiérarchie logique; elle assure l'indépendance vis-à-vis de l'ordinateur hôte, de son système d'exploitation et même du langage de programmation comme modélisé à la figure 3, il est à noter que GKS est défini indépendamment de tout langage de programmation. Son implémentation variera bien sûr de langage à langage, mais sa fonctionnalité restera la même.

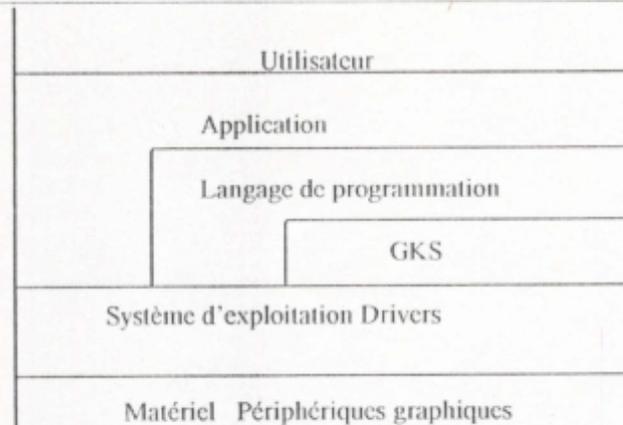


Figure 3 Place de GKS dans la hiérarchie logicielle

Pour garantir l'indépendance vis-à-vis du matériel, GKS introduit le concept de coordonnées normalisées, qui permettent de décomposer le passage des coordonnées du dispositif d'affichage en deux étapes, selon la figure 4. La fenêtre de vision est spécifiée en coordonnées normalisées sans devoir connaître le périphérique de sortie et GKS peut se charger automatiquement de la conversion en coordonnées physiques. Pour assurer l'indépendance des périphériques d'entrée physiques, des opérations d'entrée modélisées sont définies (figure 4). Elles permettent de gérer de manière uniforme le dialogue avec l'utilisateur sur divers équipements.

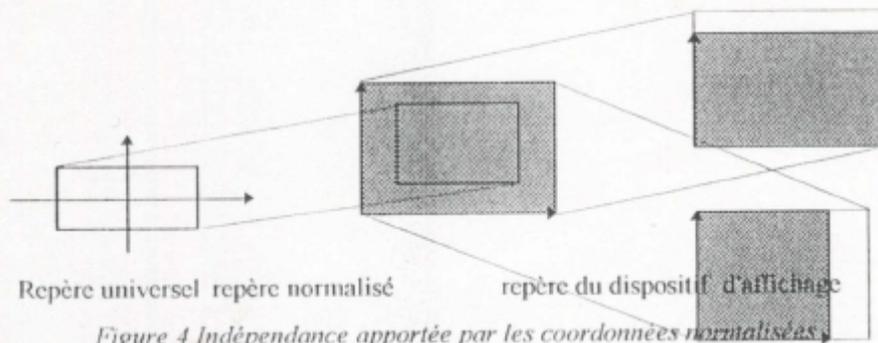


Figure 4 Indépendance apportée par les coordonnées normalisées

Les primitives de sorties sont restreintes aux fonctions de base qui ne peuvent être réalisées par une autre primitive, minimisant ainsi le nombre d'appels que le programmeur doit maîtriser. Toujours par souci de faciliter l'utilisation, les paramètres de traçage ne sont pas inclus dans chaque appel mais sont modifiables par des procédures spécifiques. L'action de ces paramètres (attributs) lors du traçage est décrite précisément pour les divers types d'objets.

D'autres paramètres contrôlant le fonctionnement global d'une station de travail sont modifiables pour offrir toute la flexibilité désirée.

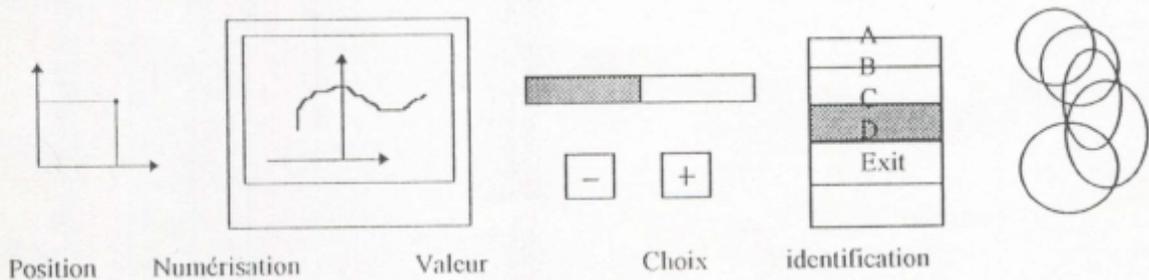


Figure 5 Entrées modélisées

Le Concept de segment, c'est-à-dire de sous-objet formé plusieurs primitives géométriques, permet l'utilisation des possibilités de stockage disponibles sur plusieurs stations graphiques. En contrôlant les attributs des segments, tels

que visibilité, mise en évidence, couleur, on peut augmenter le confort d'interaction et même réaliser des animations.

Le standard GKS introduit la notion de *métafichier* graphique qui permet de stocker séquentiellement et de transmettre des informations graphiques. Un tel fichier peut alors être interprété et produire le même effet que l'exécution directe du programme qui l'a généré (la sortie n'étant alors pas déviée sur un fichier).

Ces concepts, pris séparément, ne sont pas nouveaux, mais GKS est l'une des rares bibliothèques qui les intègre simultanément et de manière cohérente.

Le concept de station de travail

Le terme station de travail tel que défini dans GKS ne correspond pas nécessairement à une station graphique ni à un terminal graphique, mais à un terminal virtuel tel que réalisé dans un environnement multi-fenêtre. Une application peut donc utiliser en même temps plusieurs stations de travail. Un traceur, qui ne permet pas d'interaction, est aussi considéré comme une station de travail de sorte qu'une sortie sur traceur ne se différencie en rien, pour le programmeur, d'un affichage sur écran.

Un type particulier de station de travail est le *métafichier*, utilisé soit en écriture, soit en lecture.

La figure 6 modélise la station de travail comme une zone de traçage rectangulaire et un ou plusieurs périphériques logiques d'entrée.

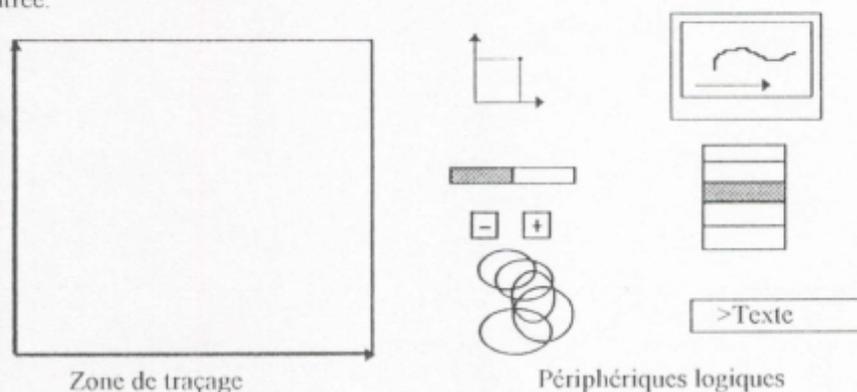


Figure 6 Modèle de la station de travail

Initialisations

Avant de pouvoir utiliser la première primitive de traçage, plusieurs étapes d'initialisation de GKS sont requises.

- L'ouverture du système GKS
- L'ouverture d'au moins une station de travail.
- L'activation d'au moins une station de travail.

De même, l'arrêt du programme doit être précédé d'une fermeture correcte de GKS :

- Désactiver les stations de travail
- Fermer les stations de travail
- Fermer GKS

Une station de travail est repérée par un identificateur (un numéro choisi par l'utilisateur) qui doit être spécifié pour l'ouverture, l'activation, la désactivation et la fermeture. Des renseignements peuvent être obtenus sur les types de stations de travail supportés par une implémentation de GKS à l'aide d'une primitive d'interrogation.

ANNEXE C

Les types de stations de travail sont représentés par des numéros, par exemple :

- 0 stockage de segments
- 1 *métafichier* de sortie
- 2 *métafichier* d'entrée
- 4014 *Tektronix* série 4107 ou compatible
- 4107 *Tektronix* 4107 ou 4109.

Les systèmes de coordonnées

L'utilisateur travaille dans le système de coordonnées de son choix, appelées ci-joint coordonnées universelles *{World coordinates}*. Représentées par des nombres réels. Il y définit la clôture alors que la fenêtre est donnée en coordonnées normalisées du dispositif d'affichage (NDC), variant entre 0 et 1. La transformation d'un repère à l'autre est appelée transformation de normalisation. Une seconde transformation de visualisation est employée pour chaque station de travail, elle fait correspondre une clôture de l'espace normalisé à une fenêtre du dispositif d'affichage exprimée en coordonnées de ce dispositif.

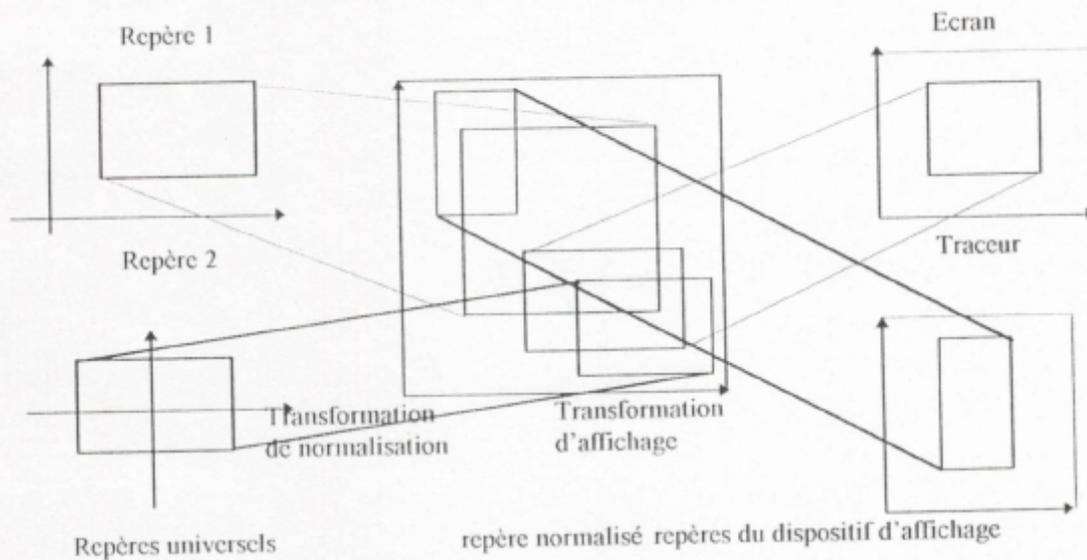


Figure 7 Double transformation de visualisation de GKS

Quatre primitives sont nécessaires pour spécifier cette double transformation, chacune requiert comme premier paramètre le numéro de la transformation ou de la station de travail. La fenêtre et la clôture sont spécifiées, comme habituellement, par leurs coordonnées extrêmes.

Après les initialisations, on définira donc une ou plusieurs transformations de normalisation, qui seront repérées par des numéros, seule l'une d'entrée elles étant active à un instant donné. La transformation numéro zéro est prédéfinie, c'est l'identité.

Les primitives de sortie

Seuls six types d'objets sont supportés par GKS, ils permettent cependant de construire tout type de dessin. La primitive la plus utilisée est le traçage de lignes polygonales *{polyline}* représentés par deux tableaux de réels, l'un pour les coordonnées x l'autre pour les coordonnées Y.

PROCEDURE Polyline (NbSommets : CARDINAL; x, Y : Y OF Real).

Associée à la ligne polygonale, une primitive permet de tracer des marqueurs (petits symboles) {marker} sur ses sommets (mais ne trace pas de ligne polygonale), elle comporte les mêmes paramètres :

PROCEDURE PolyMarker (NbSommets : Cardinal; X, Y : Array OF Real).

Un polygone rempli se dessine très facilement, lui aussi, à partir de la liste de ses sommets:

PROCEDURE FillArea (NbSommets : Cardinal; X, Y. Array Of Real).

Comme actuellement de nombreux dispositifs d'affichage sont basés sur une technologie matricielle et offrent la possibilité d'afficher une matrice de point [bitmap], une primitive de sortie spécifique a été prévue. Une telle matrice de points est représentée par un tableau bi- dimensionnel d'octets dont chaque élément définit la couleur du point correspondant.

PROCEDURE CellArray (Xmin, Ymin, Xmax, Ymax : Real; nX, nY : Cardinal
Couleur : Array OF Byte).

Une chaîne de caractères peut être affichée en spécifiant sa position :

PROCEDURE Text (X,Y : Real; String: Array of Char).

La dernière primitive de sortie est très spéciale, elle permet d'appeler des fonction de traçage spécifiques à la station de travail considérée, par exemple des arcs d'ellipse ou une courbe d'interpolation, en passant deux tableau de coordonnées, un numéro de fonction graphique et un tableau de paramètres supplémentaires. Il est évident que l'emploi de cet appel est à éviter, car chaque type de station travail possède des primitives intrinsèques différentes et que, pour un même type de poste de travail, différents numéros de fonction seront forcément choisis par une même primitive dans diverses implémentations.

PROCEDURE GeneralizedDrawingPrimitive (NbSommets : CARDINAL; X,Y: ARRAY of Real;
NomStandartCallNumber:Cardinal; AlraySize : Cardinal; DirtyShit:ARRAY of BYTE).

Le traçage de ces objets peut être contrôlé par de nombreux paramètres qui sont décrits dans le paragraphe suivant.

Les attributs:

Les attributs sont soit géométriques tel que l'épaisseur des traits ou la hauteur des caractères, soit non géométriques, tel que le type de traitillé ou la police de caractères. Dans le premier cas, ils agissent globalement sur tous les postes de travail, mais seulement pour les primitives tracées plus tard. Dans le second cas, les valeurs des attributs sont placées dans des tables, la valeur courante étant choisie a l'aide d'un indice. Ces paramètres peuvent aussi être définis directement et individuellement, un fanion étant alors utilisé pour spécifier s'il faut considérer la valeur globale ou individuelle.

Pour les lignes brisées, il est possible de contrôler

- Le type de traitillé : trait plein, traitillé, trait point.
- L'épaisseur du trait.
- La couleur du trait (par l'indice dans la table de couleur)

Les marques sont paramétrées par :

- Le type de marque : point, plus, astérix, cercle, croix.
- La taille.
- La couleur.

L'allure d'une chaîne de caractère est contrôlée par :

- La hauteur.
- La direction d'écriture par deux attributs.
- L'alignement selon le haut, le bas, la ligne de base, la gauche, la droite.

Des attributs non géométriques sont utilisables avec les chaînes de caractères :

- Le numéro (ou le nom) de police de caractères.
- La qualité du rendu.
- L'espacement des caractères.
- Le rapport largeur/hauteur.
- La couleur.

Pour des polygones, trois attributs sont disponibles :

- Le type de remplissage: vide, plein, motif, hachuré.
- La couleur de remplissage.

Les segments

Chaque segment, caractérisé par un identificateur de segment (numéro), regroupe plusieurs primitives de sorties en une unité qui peut être:

- transformée
- Rendue visible, ou invisible
- Mise en évidence
- Prioritaire sur d'autres segments pour la visibilité
- Rendue détectable ou indécclable
- Supprimée
- Insérée dans un autre segment

La création d'un segment s'obtient par une instruction de création d'un nouveau segment, suivie d'instruction de traçage et terminée par la fenêtre du segment. Toutes les primitives tracées entre la création et la fermeture font alors partie de ces segments :

CreateSegment (Numero ' : CARDINAL*'),*
(traçage du Segment *)*

CloseSegment (Numero);

Il est à noter qu'une fois un segment fermé, il n'y a aucune possibilité de le rouvrir pour lui ajouter de nouveaux objets. La gestion des numéros de segments est laissée à l'utilisateur.

Un segment peut être stocké localement si le terminal le permet, ce qui peut accroître la rapidité d'interaction dans une configuration « ordinateur central et terminal », mais sans atteindre les performances des stations graphiques.

Un segment peut être manipulé de trois manières différentes :

- copie ou insertion du segment dans un autre segment
- modification dynamique des attributs et des transformations de normalisation.
- Modification des attributs spécifiques du segment
 - visibilité
 - mise en évidence
 - priorité
 - détectabilité
 - destruction de segment
 - transformation de segment

Un autre intérêt des segments est qu'ils peuvent être détectés comme entités, facilitant ainsi la réalisation des fonctions d'édition graphique. Un segment peut être transformé à l'aide d'une matrice de transformation homogène. Une image déjà dessinée peut être modifiée en agissant sur des attributs globaux qui agissent soit dynamiquement, soit conduisent à une reconstruction de l'image avec de nouvelles valeurs. Le changement d'un attribut peut être différé si désiré jusqu'à l'utilisation de l'instruction de mise à jour du poste de travail pour éviter des rafraîchissements trop nombreux.

Les primitives d'entrée

Les primitives d'entrée sont importantes dans les applications graphiques, car elles ont une influence directe sur la qualité de l'interaction avec l'utilisateur. Pour former une station de travail virtuelle, des périphériques logiques de chacun des cinq types cités précédemment plus un périphérique de numérisation de courbe doivent être adjoint au dispositif de sortie. Chacun de ces périphériques peut être géré individuellement, dans l'un des trois modes de lecture (fig. 10.1)

ANNEXE C

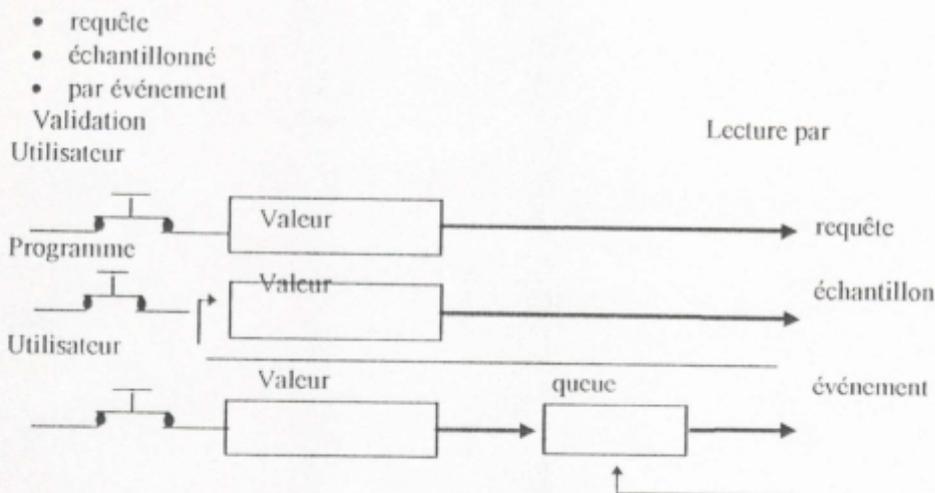


Figure 8 Mode de lecture des périphériques

Dans le mode de requête, lors d'une opération d'entrée, GKS attendra que l'utilisateur ait validé l'entrée d'une manière spécifique à chaque périphérique physique, par exemple pour une souris par lecture d'une pression sur l'une des deux touches. En mode échantillonné, la lecture du périphérique sera effectuée immédiatement dans les niveaux inférieurs de GKS (niveau a et b) à cause de la nécessité d'un traitement multiprocessus difficile à mettre en oeuvre en Fortran.

Lorsque l'utilisateur actionne un périphérique, l'état du périphérique est placé dans une queue d'événements réservée à ce périphérique. Seule cette gestion sophistiquée permet une interaction non contraignante, laissant à l'utilisateur l'initiative de conduire le dialogue.

Un périphérique logique est caractérisé par une mesure, un déclenchement et une rétroaction visuelle fournie par le logiciel de gestion.

Implémentation de GKS

En plus de l'indépendance du matériel, le standard GKS a été défini indépendamment d'un langage de programmation. Pour un langage donné, il faudra choisir des noms de procédures et des conventions de passage de paramètres s'approchant au mieux des définitions de la norme. Les principales implémentations ont été faites en Fortran.

Le standard GKS prévoit plusieurs niveaux d'implémentation, tant pour les opérations de sorties que d'entrées, de manière à faciliter son installation. Le passage à un niveau plus élevé peut être fait ultérieurement si les applications le nécessitent.

Organigrammes des options d'analyse

Problème au valeurs propres non amorti:

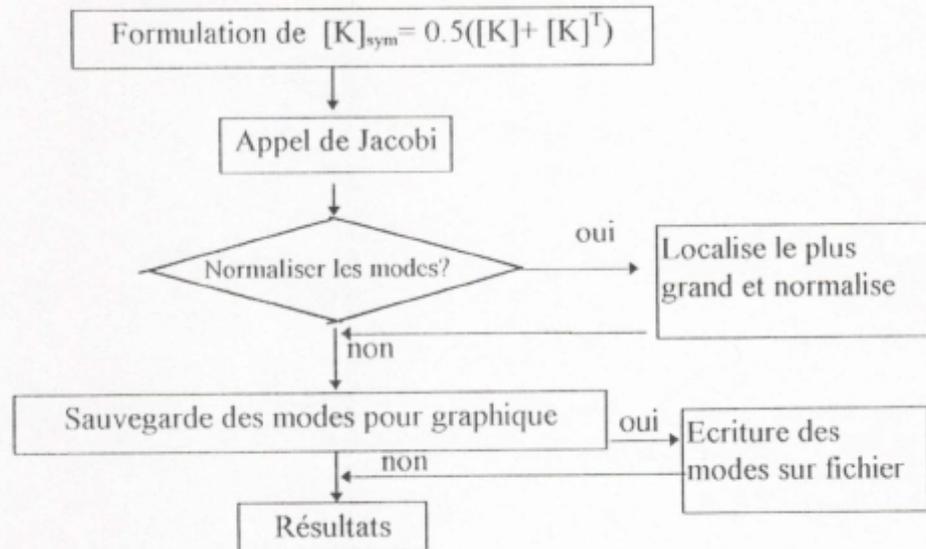


Figure 1 Problème au valeurs propres non amorti

Problème au valeurs propres amorti:

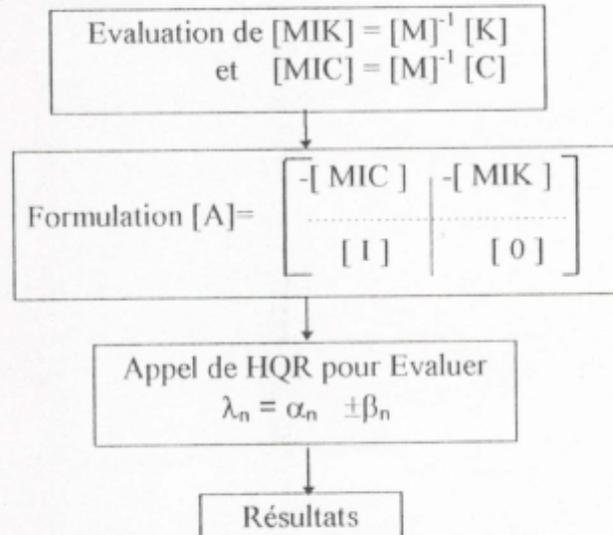


Figure 2 Problème au valeurs propres amorti

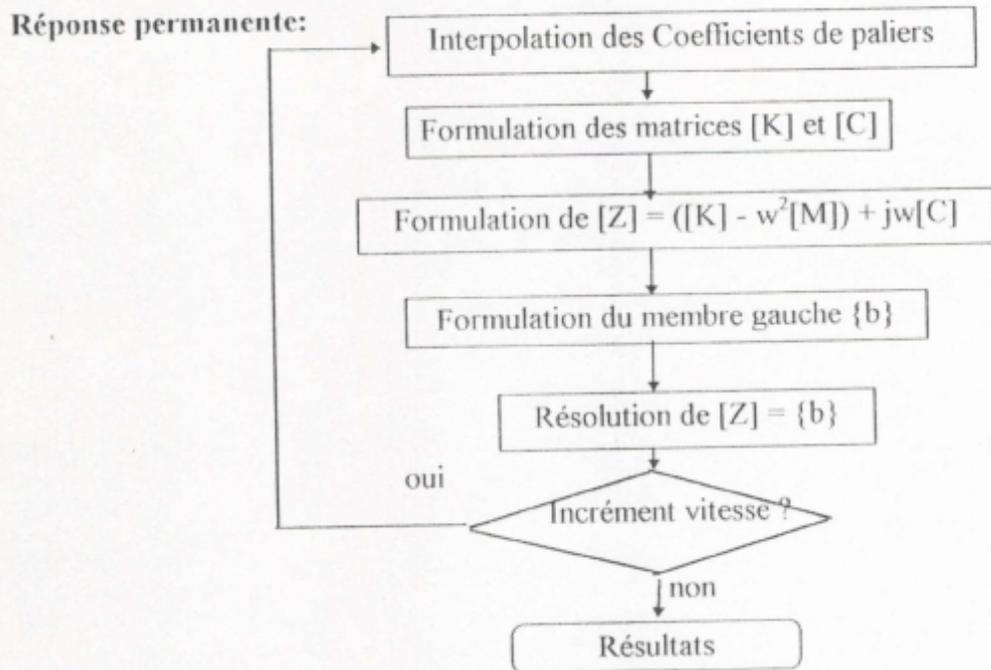


Figure 3 Réponse permanente

Analyse de stabilité

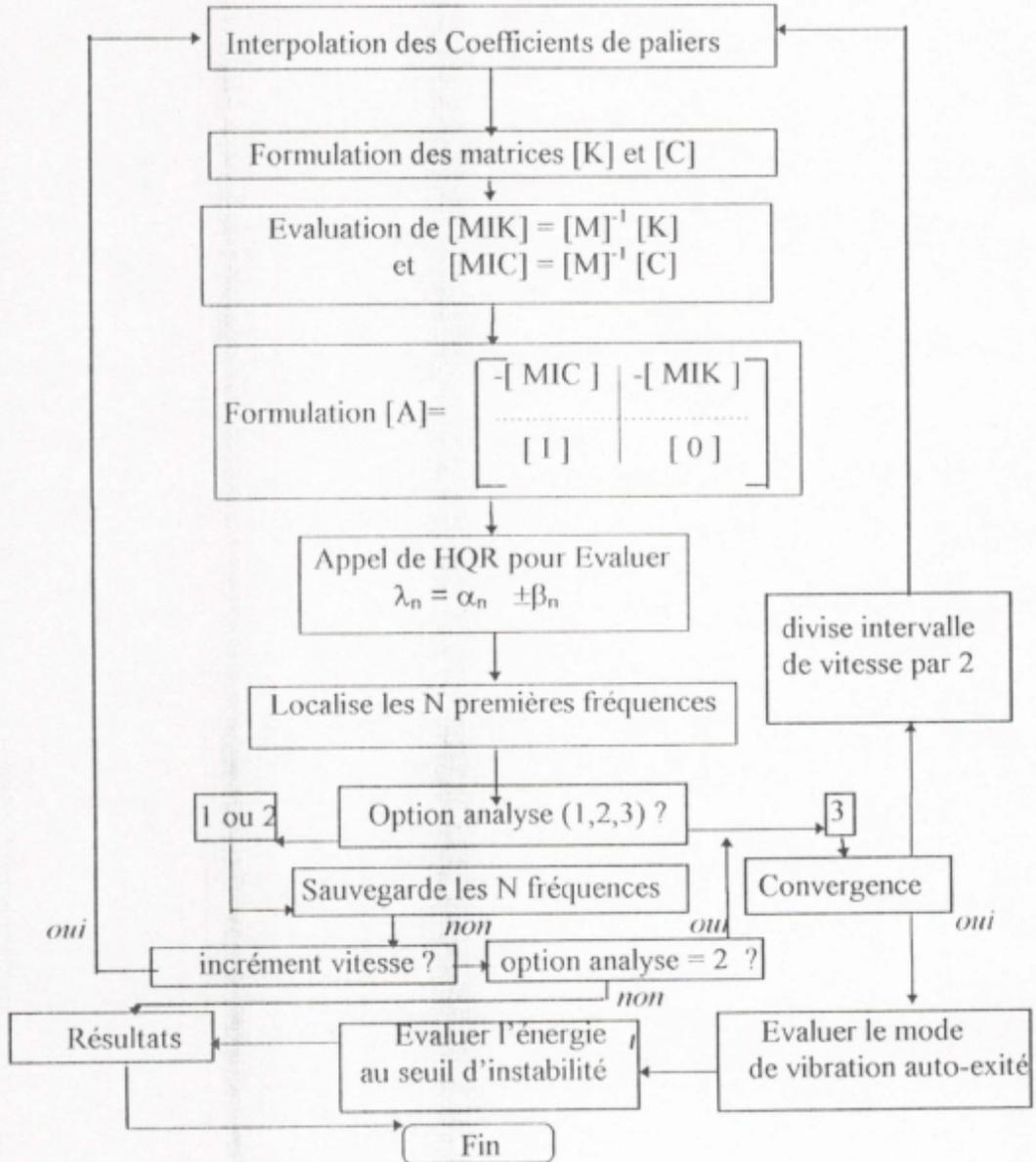


Figure 4 Analyse de stabilité

Structure générale de l'analyse

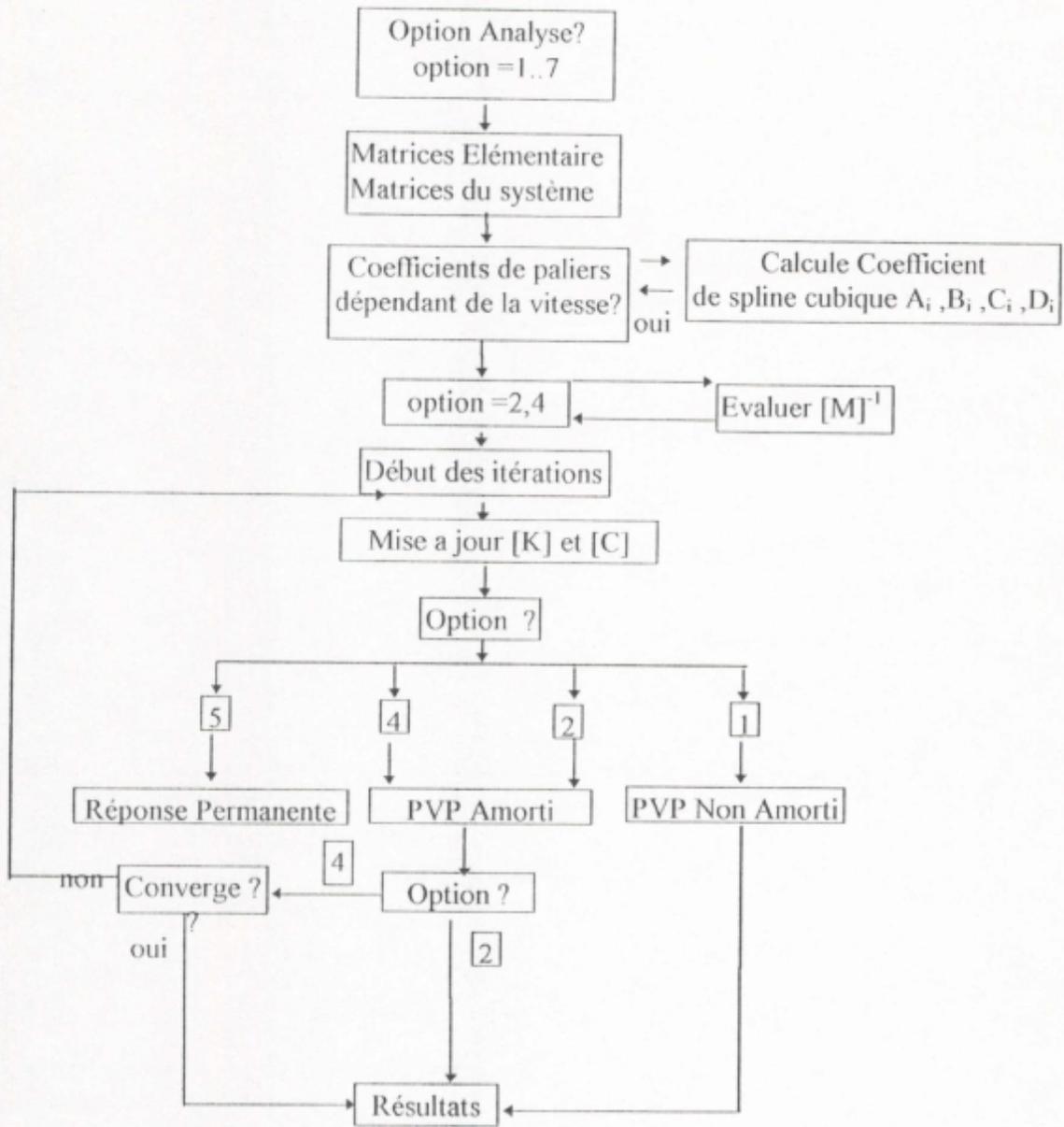


Figure 5 Structure générale du logiciel d'analyse dynamique des rotors RDA

Contraintes de développement, d'exploitation, de maintenance.

1. Contraintes de développement

1.1. Matériel:

Pour le développement un micro 486 dx2 66 avec 8Mo de mémoire vive a été utilisé .

1.2. Langage de programmation adopté:

Le langage utilisé est BORLAND PASCAL 7 pour post-processeur et le pré-processeur et FORTRAN 32 POWERSTATION pour le processeur.

Bien qu'initialement écrits en Pascal sous BP7 l'interface a été réécrite en Pascal Object pour Delphi 1.0 sous Windows.

Logiciel de base : RDA {Rotor Dynamique Analysis} du Dr Maghraoui est a la base du travail ici présent.

2. Environnement nécessaire :

Certains outils logiciels on été utilisés pour parfaire le développement a savoir :

Help Magicien Pro version 3.0: pour la réalisation du fichier d'aide.

Install Shield version 1.0 : pour le programme d'installation.

Démo-Shield 2.0 : pour la démonstration interactive.

Atelier ressource workshop : Pour la mise en oeuvre des ressources graphiques (Menus, boites de dialogues, images en mode point {bitmaps}, ...).

Turbo DEBUGER pour Windows : Pour l'exécution pas a pas et contrôle des objets, variables, et détection des erreurs d'exécutions.

Turbo profiler : Pour tirer le profile d'exécution et déceler les goulots d'étranglement d'exécution .

3. Bibliothèque de programme imposées.

Pour la programmation en BORLAND PASCAL 7 sous Windows le passage obligé est l'utilisation de la bibliothèque OWL « OBJECT WINDOWS LIBRAIRIE » du même éditeur. Le portage vers DELPHI s'est fait a l'aide des objets composants de DELPHI compatibles OWL.

4. Protocole de communication

En utilisant le logiciel RDA il nous est impératif de travailler avec les formats de fichier de ce dernier que ce soit entrée ou en sortie.

entrée : Format du fichier du modèle RDA

Sortie : différents Format de fichiers résultat de l'analyse de RDA.

Certains format de fichiers de RDA ont été modifiés à savoir format de fichier de données du modèle et format des sorties pour la réponse permanente (Orbite et déformée du rotor).

5. Maintenance et évolution du système .

La technique de développement du logiciel étant modulaire et orientée objet en utilisant une interface des plus sophistiquées sur le marché a savoir Windows 3.1 les différents types de maintenances suivantes sont possibles a savoir :

5.1. Curative (corrective):

Localisation du module, fonction ou de la méthode objet défectueuse et correction du problème.

5.2. Adaptative :

Le langage pascal étant normalisé et portable sur un très grand nombre de systèmes informatique (réseaux, stations graphiques SUN, APPOLO, DEX) et sur plusieurs environnements graphiques OS/2 X-Windows ; OS/2 et une interface graphique développée par IBM ,comparable a celle de Microsoft(Windows) sur bien des points, et qui peut exécuter des applications écrites pour Windows sans recourir a une quelconque re-compilation.

5.3. Evolutive du système :

La philosophie de programmation orientée objet permet de ne pas être limité en terme d'évolution; par exemple : Supposons que l'on veut ajouter un nouvel objet au pré-processeur (par exemple une aube de turbine qui sera disposée sur un disque ou un arbre), pour ce faire on n'aurait qu'à déclarer un nouvel objet AUBE héritant de l'objet de base graphique utilisé, et lui rajouter ses champs supplémentaires et les méthodes supplémentaires de calcul, visualisation, sauvegarde et lecture. Si cette technique était étendue au processeur RDA, chose qu'on recommande pour la suite du travail, on rajouterait des méthodes de calcul des matrices masse, raideurs de l'élément AUBE. Windows étant soumis a beaucoup de mises a jours toujours plus performantes les une que les autres, on voit s'apparaître de nouvelles versions avec Windows NT 4 qui vient de sortir au moment de l'écriture de la présente thèse et qui offre de nouvelles fonctions que ce soit graphique par la bibliothèque « Open GL » orientée CAO et de gestion de mémoire ou de gestion de réseaux donc on n'a pas de soucis a ce faire pour l'avenir de présent travail.

6. Description des interfaces externes du logiciel:

6.1. Interface Matériel/Logiciel:

Les périphériques supportés par le logiciel développé sont tous les périphériques graphiques supportés par Windows lui même a savoir : la plus part des écrans graphiques CGA, EGA, VGA, et même les écrans des stations graphiques de travail Tektronix, GKS, La plupart des tables traçantes et des imprimantes .

6.2. Interface Homme/machine (IHM):

Ergonomie: le post-processeur héritant de l'interface graphique de Windows en tire plusieurs profits; commande du logiciel par menu déroulant, icônes, raccourcis clavier et

souri, les messages d'erreurs sont sous forme de boîtes de dialogue d'une longueur n'excédant pas 150 caractères (ce qui est amplement suffisant), l'édition du modèle sur écran se fait dans une fenêtre standards associée au modèle, l'édition sur papier se fait par la restitution du contenu de la fenêtre du modèle en gardant en vue les possibilités de l'imprimante ou de la table traçante, le format de taille de l'édition sur papier est paramétrable.

6.3.Interface Logiciel/Logiciel:

C'est le pré processeur qui lance le module d'analyse dynamiques (RDA).; pour cela il faut que la fenêtre de saisie du modèle doit être ouverte et active.

Le logiciel WRDA peut exporter avec tout autre logiciel de dessin (*PAINTBRUSH*), traitement de texte (*WRITE*, *WINWORD*) le contenu de n'importe quelle fenêtre (modèle ou graphe d'analyse) par un simple copier coller, pour plus de détails sur les points précédents se référer au guide d'utilisation du logiciel.

CAO Etat de l'art et nouvelle approche

Principaux aspects de la conception (Paramétrique Variationnelle):

On distingue deux types de conceptions: la conception Paramétrique et la conception variationnelle.

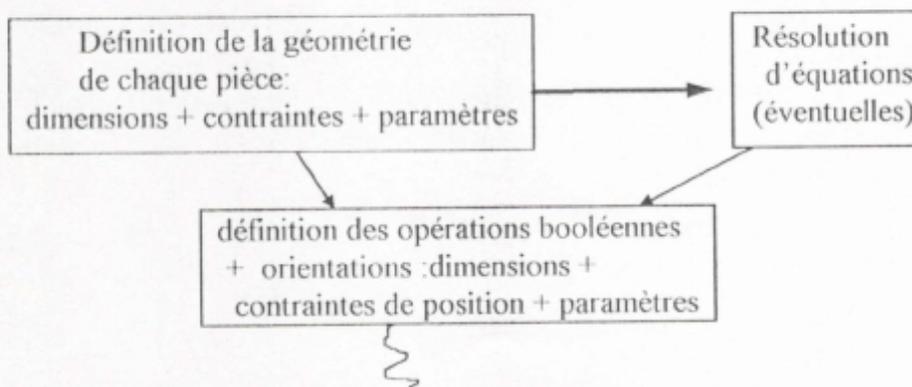
Ces deux types de conception ont un même objectif final qui est : construire un modèle tel que des modifications ultérieures soient faciles à appliquer. Ils incluent plus que de l'information géométrique, sont d'application générale mais souvent présentées dans le cadre de la modélisation volumique, mais ont des différences sur les points de vue :

- de l'efficacité
- des applications
- de la mise en oeuvre.

Principaux objectifs de la méthodologie CAO

- influence sur les coûts:
Les choix en début de conception conditionnent les performances de « l'objet » et les coûts de production
- Coûts de conception:
Les prototypes, l'usinage, la « maintenance » implique des coûts largement supérieurs aux coûts de conception.
- Variantes de conception
Les variantes doivent être envisagées le plus tôt possible les modifications tardives doivent être supprimées (coût, délais,).
- Logiciels:
Les logiciels traditionnels (CAO) sont séquentiels {ONE WAY}. Les modifications impliquent des étapes fastidieuses(il peut être plus économique de repartir à zéro!).

Approche paramétrique variationnelle



Si la pièce n'est pas conforme (MEF,...) ou s'il faut modifier la conception:

- Les contraintes de conceptions seront conservées
- les valeurs des paramètres peuvent être modifiées.

ANNEXE F

Différents outils pour améliorer les procédures de conception

- Programmation : Les constructions se font par des programmes calculant/demandant les valeurs de certaines dimensions.
- Conception paramétrique: les dimensions modifiables sont des paramètres et le positionnement est effectué sous contraintes (relations).
- Conception variationnelle: la définition se fait en trois étapes : topologie/aspect, dimensions, contraintes.

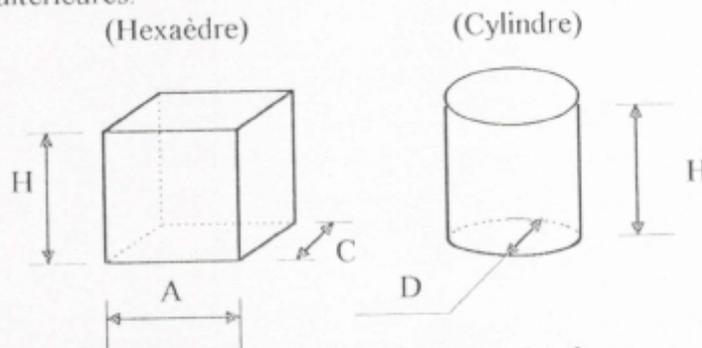
Assemblage : le modèle est composé d'entités séparées. Des liens sont gardés avec des composants d'origine.

- Entité paramétrée *{feature}* : les composants ont une fonction associée : un trou perçant toute la pièce,...Les dimensions sont donc ajustées en fonction de la pièce destination (épaisseur à percer, ...).

Conception paramétrique:

- Les entités sont définies par des dimensions de base (c'est à dire, les dimensions requises par la forme mathématique décrivant l'entité)

Ces dimensions de base sont **enregistrées** comme **paramètres** pour permettre des modifications ultérieures.



Les décisions de positionnement des entités sont **enregistrées** comme **contraintes**

- Position : à la fin de
intersection de
au point.....
à la distance(dx,dy,dz) de
- Orientation: parallèle à
normale à
angle de avec

Ces contraintes seront respectées quelque soient les modifications ultérieures.

- des équations peuvent lier des valeurs de paramètres et/ou des valeurs de contraintes.
ex ϕ cylindre = 1/10 longueur de l'arbre
centre du cylindre = $2 * \phi$ à partir du bord de la pièce.

ANNEXE F

Règle générale de la conception paramétrique:

En règle générale on peut affirmer que les valeurs des paramètres (incluant équations explicites) plus les contraintes de positionnement déterminent complètement la géométrie.

Ce concept peut être un peu plus compris en essayant de répondre à la question suivante:

Comment les logiciels de CAO peuvent-ils prendre en compte les paramètres et les contraintes?

réponse : L'historique de construction enregistre la création de toutes les entités

On a donc une synchronisation de l'information entre les formes évaluées(modèle) et non évaluées(historique).

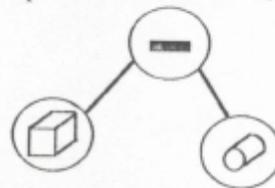
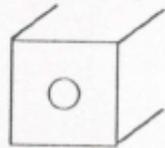
- Méthode n°1: L'arbre CSG (*constructive solid geometry*).

l'arbre est un graphe avec des noeuds et des feuilles; on a donc

| | | | |
|---------|------------------|-----------|---------------------|
| Noeud = | type d'opération | Feuille = | nom de l'objet |
| | objets concernés | | type d'objet |
| | positionnement | | valeur de paramètre |
| | | | |

En conception paramétrique les objets doivent avoir des dimensions exactes; il est nécessaire d'avoir des algorithmes robustes pour les équations booléennes.

exemple



- Méthode n°2: Le fichier {*replay*}

Ce fichier renferme la liste chronologique des commandes utilisés pour créer les entités (en identifiant les paramètres et les contraintes)

exemple

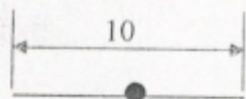
INSERT CYLINDER HEIGHT 40 DIAMETER 10

MID<N° of ligne>

Contrainte

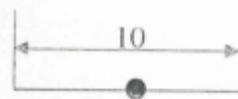
Paramètres

Remarque générale sur le choix des contraintes

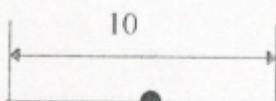


MID

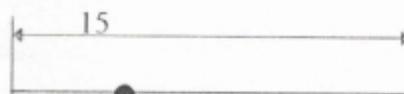
≠



5 a partir de l'extrémité



MID



5 a partir de l'extrémité

en général il est impossible de modifier le type de contrainte!!

Conception variationnelle

la conception variationnelle *{variational sketching}* concerne la géométrie 2D
on définit des profils qui sont un ensemble ordonné de courbes connectées formant des boucles
(contour externe plus trous éventuels).

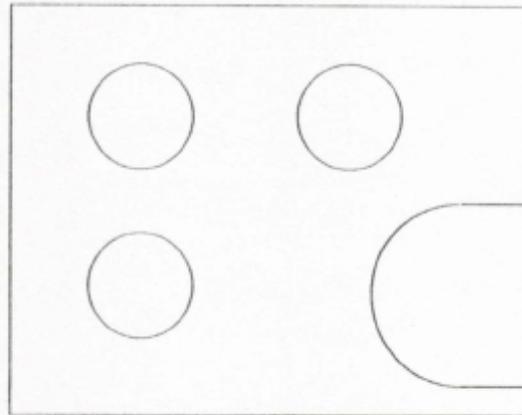


Figure 1 Profil formé de courbes

Etape n°1:

On construit à main levée *{free-hand}* la forme approximative du profil.

NB la forme doit être la plus générale possible

angle de 45°, 90° uniquement si ces valeurs sont immuables.

des contraintes géométriques sont automatiquement reconnues à la construction (et impossible à supprimer plus tard)/

Etape n°2:

Certaines dimensions sont définies comme paramètres.

Etape n°3:

Des contraintes géométriques sont spécifiées:

tangent, parallèle à verticale horizontal.....

Etape N°4:

des équations sont définies pour lier

- des valeurs de paramètres géométriques

- des valeurs non géométriques (poids, module de Young,.....).

Ces étapes peuvent conduire à un profil :

- sous contraint : infinité de solutions
- contraint : 1, 2, ... solutions
- Sur contraint : pas de solutions (conflits).

Modélisation

La construction d'un modèle consiste en l'établissement de l'ensemble des définition et propriétés nécessaires a la description (définition) du modèle.

Cette description comporte notamment :

- La forme géométrique
- Les dimensions
- Les matériaux constitutifs et leurs propriétés
- La fonctionnalité de l'objet

.....

a) La forme géométrique :

la forme définit la géométrie de l'objet ou de ses constituants

b) Les dimensions:

Un Modèle CAO doit être défini avec certaines dimensions. Il n'est pas possible de faire, comme a la main, des dessins dont les dimensions sont non spécifiés ou approximatives.

Un même objet peut éventuellement être utilisé avec différentes dimensions (boulon d'un même type, tuyaux de différents diamètres, vêtements de différents tailles,). Une définition paramétrique permet cette approche. Dans ce cas toutes les dimensions se voient attribuer une valeur. Certaines valeurs sont Comme fixes (non modifiables) tandis que les autres sont des paramètres (valeurs modifiables). Ces paramètres doivent être défini de telle façon que la définition de la pièce qui en résulte est unique et non ambiguë.

Les matériaux constitutifs :

Cette information permet entre autres, d'établir des métrés (volume de béton, nombre de barre d'acier.....), de calculer des propriétés élémentaires (poids, centre de masse et moment d'inertie), de générer des données pour un calcul de résistance (normes, éléments finis,.....).

c) La fonctionnalité de l'objet :

La fonctionnalité de l'objet permet de donner les caractéristiques de son comportement; par exemple:

Prévoir la réponse d'un circuit logique, indépendamment de ses marques dimensions, localisation des composants.

Modes de définition d'un modèle 3D :

Pour discuter des différents modes de définitions géométriques, on ne considérera que les modèles tridimensionnels.

Pour ces modèles, la caractérisation 2D, 2D½, 3D permet de décrire le degré de consistance du modèle généré et les techniques de base de sa construction.

Définition 2D:

La construction du modèle révèle plus du "Dessin Assisté par Ordinateur " DAO que de la CAO. L'utilisateur construit différentes vues planes de l'objet. Il n'y a cependant aucun lien entre ces différentes vues, ni aucune aide a la construction (une dimension déjà définie dans une vue ne peut être utilisée pour construire une autre vue).

Il n'y a également aucun test de cohérence : si une même dimension est définie par deux valeurs différentes dans deux vue différentes, le programme ne produit pas de message d'avertissement, si

ANNEXE F

on modifie une dimension dans une vue, cette modification n'est pas répercutée dans les autres vues et le modèle devient incohérent.

Définition 2D½:

L'utilisateur construit, comme dans la définition 2D, différentes vues planes de l'objet. Il ne doit cependant pas introduire des données redondantes : si une dimension est déjà accessible dans une autre vue, elle peut être utilisée comme aide à la construction. En travaillant de cette façon le modèle final est cohérent.

Il y est également possible de construire à partir de différentes vues des perspectives et des isométries.

Par contre, il n'y a pas de lien entre les différentes vues (liens autres que les aides à la construction). Si on modifie une dimension dans une des vues, cette modification n'est pas automatiquement répercutée dans les autres vues précédemment construites.

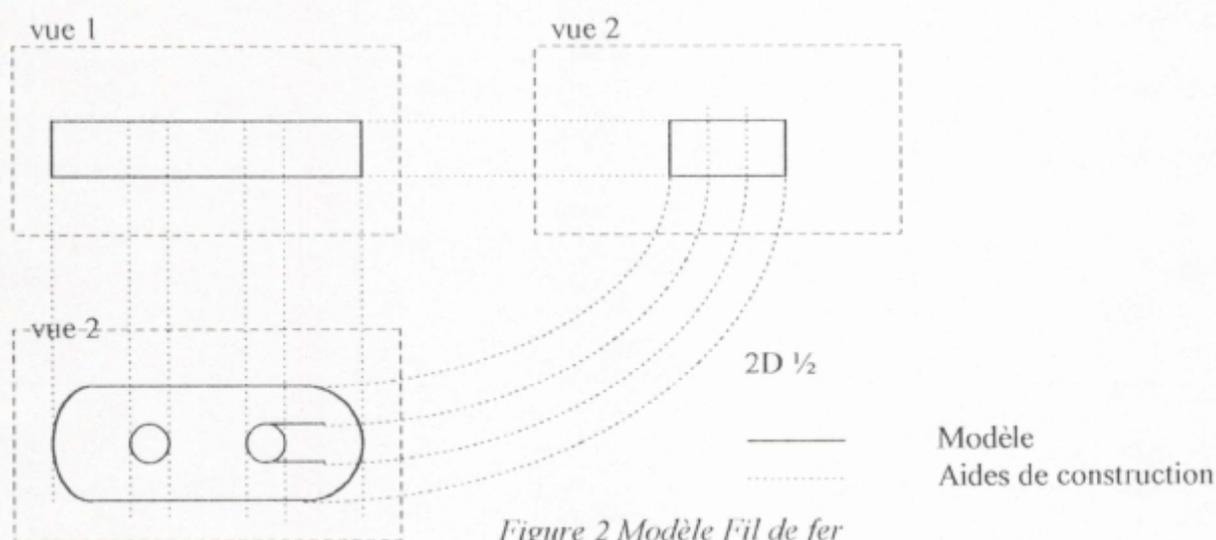


Figure 2 Modèle Fil de fer

Définition 3D

L'utilisateur construit directement un modèle tridimensionnel. Cette construction s'effectue par exemple:

En spécifiant des coordonnées x,y,z .

En définissant des surfaces (cylindres sphères,...) ou des volumes.

En désignant des points dans un plan sur une surface,....

Afin d'aider le travail, plusieurs vues du modèle peuvent être obtenues successivement ou affichées simultanément sur l'écran. Cependant, les vues ne sont que des façons de voir le modèle tridimensionnel: toute modification apportée au modèle (par action dans une des vues) est automatiquement répercutée dans toutes les autres vues. Les commandes peuvent même utiliser plusieurs vues simultanément (définir un plan par 3 points sélectionnés dans trois vues différentes).

La cohérence du modèle 3D et de ses représentations est donc assurée en permanence.

Modélisation Tridimensionnelle :

Il existe trois approches pour la modélisation tridimensionnelle. Par ordre de complexité croissante on trouve :

- Les modèles « fil de fer »
- Les modèles surfaciques
- Les modèles volumiques

Modèles fils de fer {WireFrame}

Un modèle fil de fer est construit uniquement à l'aide de lignes (segments de droites et courbes). La notion de surface tendue entre ces lignes est absente, ainsi que la notion de volume.

Cette technique est en fait utilisée depuis longtemps. Ce type de modèle est très largement répandu car il est à la base des développements de nombreux systèmes de CAO. IL est très efficace quant à la rapidité d'accès et de représentation mais ne permet de faire que très peu de calculs et évaluations complémentaires. De plus l'approche fil de fer souffre des inconvénients suivants :

- a: Il est impossible d'obtenir des représentations avec suppression d'arêtes cachées car les notions de surface et de volume n'existent pas. Lorsque le modèle devient complexe, le nombre de ligne augmente rapidement et la représentation graphique devient confuse et doit être structurée par des « niveaux ».
- b: Comme il n'existe pas de surface, il est impossible de représenter un contour apparent.
- c: Il n'est pas possible de vérifier la présence d'interférences entre plusieurs objets.
- d: La représentation est ambiguë: plusieurs objets différents peuvent produire à la même représentation. Plus grave rien ne garantit que l'objet représenté est cohérent.

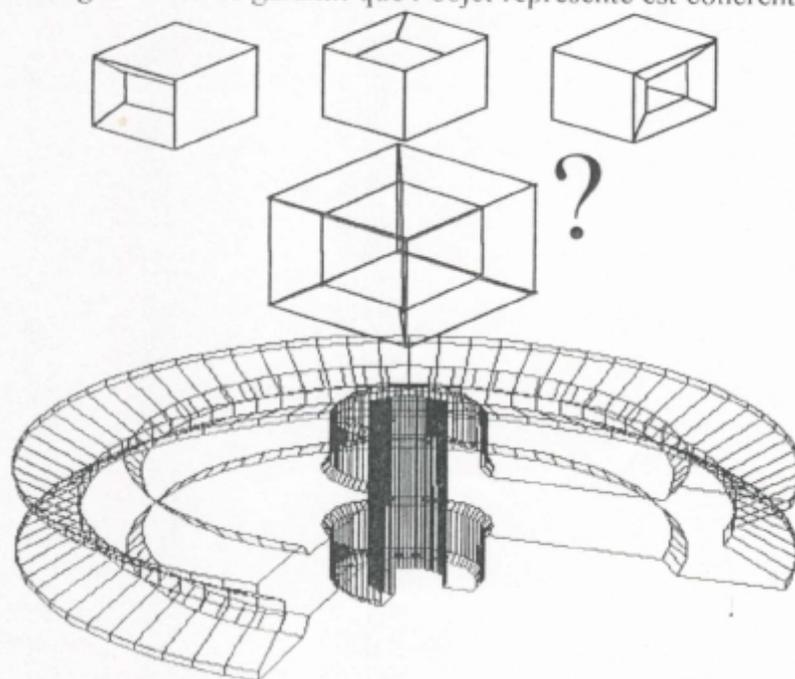


Figure 3 Exemples de modélisation dite fil de fer

Modèle Surfaccique :

Un modèle surfaccique est construit a l'aide de surfaces (planes, surfaces réglées, surfaces de révolution,). La notion de volume n'est pas immédiatement accessible mais peut être introduite facilement en orientant les normales aux surfaces (normale orientée vers l'extérieur du volume).

Les premières représentations de surfaces on été inspirées de la méthode des éléments finis : approximation par morceaux plans, cette approche est particulièrement adaptée au problème de la détermination du vu /caché.

Par contre, dans de nombreux cas, la représentation doit conserver le caractère « lisse » *{Smooth}* de la surface a approcher :

- respect de la continuité des tangentes
- condition de variation de courbure
-

Il n'y a que de rares cas ou la surface peut être décrite analytiquement. La surface sera, lorsque ce n'est pas possible découpée en carreaux courbes *{patch}* raccordés le long de leurs lignes frontières.

La représentation de Coons a été introduite en 1967, suivie par les surfaces de Béziérs 1968 et les B-Splines.

Un système basé sur la modélisation surfaccique doit permettre aisément de :

- définir et modifier la forme d'une surface
- interpoler sur une surface (obtenir les coordonnées de tout point situé sur la surface).
- Calculer les courbes d'intersection de deux surfaces.
- Lisser une surface (selon un critère choisi).

Modèle volumique *{Solid modeling, solid design}*:

Un modèle volumique est construit a partir de volumes élémentaires et d'opérations appliquées a ces volumes. Cette approche bien qu'exacte, est trop lourde pour le modèle désiré (pour l'étude d'une coque, on peut se contenter de définir la surface moyenne de la surface et de préciser l'épaisseur comme propriété attribut).

Modélisation Volumique :

Il existe principalement cinq grandes classes de mise en oeuvre de la modélisation volumique :

- a- Modélisation par primitive *{pure primitive instancing}*
- b- Représentation par balayage *{Sweep representation}*
- c- Décomposition cellulaire *{Cellular décomposition}*
- d- Construction géométrique du solides *{Constructive solid géometry CSG}*
- e- Représentation topologique et géométrique *{Boundary representation scheme B-rep}*

De plus, les représentations des modèles sont liées au concept de graphe et d'opérateur booléen. Le choix entre ces différents types de représentations peut être basé sur les critères suivants :

1. Domaine d'application : Quels sont les types de solides pouvant être modélisé par la représentation ?
2. Unicité : Y a t il correspondance biunivoque entre un objet et sa représentation?
3. Validité: Le fait de pouvoir représenter un solide assure t il que ce solide a une géométrie réalisable.

4. Concision: Quelle place la représentation du solide prend t elle dans la base de données?
5. Efficacité: Quel est le calcul nécessaire pour créer, analyser ou modifier le solide?

En général, on trouvera qu'il a un compromis a choisir entre « place utilisée » et « temps de calcul nécessaire ».

Les modes de représentation pour lesquels les éléments constitutifs du solide sont explicitement stockés dans la base de donnée, sont appelés *{evaluated representation}*. Par contre, les modèles de représentations où seuls sont stockées les opérations menant à la construction du solide sont appelés *{unevaluated representation}*.

Les logiciels de CAO utilisent le plus souvent, soit la décomposition en cellules *{Cellular-decomposition}*, CSG ou B-rep.

Modélisation par primitives :

Les modeleurs utilisant cette technique peuvent manipuler un certain nombre de familles d'objets. Chaque famille est définie d'une manière paramétrée. chaque solide créé est complètement défini en spécifiant la famille à laquelle il appartient et les valeurs de paramètres de définition.

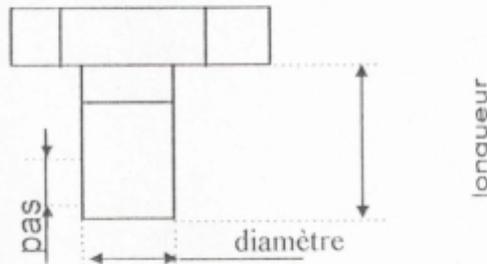


Figure 4 Exemple de primitive

Cette technique présente le désavantage de ne permettre la représentation que de solides pré définis dans le système. Par contre, la place utilisée dans la base de données est très réduite (nom de la famille + valeur des paramètres). Ce type d'approche est réservé a des systèmes de CFAO spécialisé dans un type particulier d'applications.

Une technique associée a ce type de représentation est la « technologie de groupe ». Ce concept a été développé par plusieurs industries en vue d'arriver a une certaine standardisation de la production.

La thèse principale consiste a postuler que de nombreuses pièces peuvent être groupées en classes ou familles d'objets chaque pièce étant définie par un nombre limité de paramètres.

Représentation par balayage *{Sweep representation}*:

Un solide est généré par balayage par des surfaces le long des courbes données. Si la courbe est une droite on a une « extrusion »

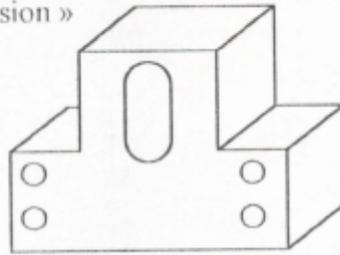


Figure 5 Représentation par balayage

Si la courbe est un arc de cercle on a une révolution.

La courbe peut également être quelconque.

Décomposition cellulaire *{Cellular decomposition}*:

Dans cette technique, l'espace tridimensionnel est considéré comme union d'un certain nombre de cellules. Le choix des cellules élémentaires est basé sur la facilité de représentation du modèle les cellules élémentaires et leurs union sont représentables alors que le modèle volumique complet peut ne pas l'être aisément.

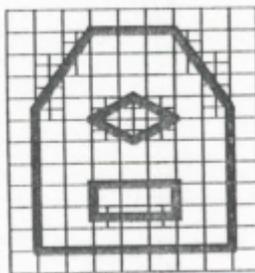


Figure 6 Décomposition cellulaire

Dans le cas de l'énumération de l'occupation spatiale *{spatial enumeration occupancy}*, l'espace tridimensionnel est divisé en cellules cubiques d'une certaine taille et la description des objets est mémorisée en énumérant les cellules occupées. Cette méthode présente l'inconvénient de conduire à des modèles volumineux dont la représentation ne donne pas explicitement les informations de relation entre différentes cellules.

Cette technique a été améliorée sous le nom de *{octree decomposition}* (modèle 3D) ou de *{quadtree decomposition}* (modèle 2D). Dans ce cas, la division spatiale est elle-même soumise à une hiérarchie de sous-divisions. À chaque niveau, la taille des cellules double dans chaque direction, l'espace occupé par un modèle dans la base de données est donc fortement réduit (par rapport à la technique initiale).

Construction géométrique par solides CSG:

Le solide est obtenu par combinaison de solides élémentaires appelés « primitives ». Les opérateurs booléens sont utilisés pour produire la combinaison. Cette approche peut être présentée comme une généralisation de la décomposition cellulaire. Dans le cas de la décomposition

cellulaire le seul opérateur utilisé est l'union : les entités élémentaires sont assemblées (collées) pour former le modèle final.

Par contre, la CSG utilise l'ensemble des opérateurs booléens régularisés, les opérateurs des différentes primitives a assembler ne doivent pas nécessairement coïncider.

La représentation des objets per l'approche CSG se fait par un arbre ordonné dont les noeuds terminaux sont des opérateurs booléens ou des opérateurs de mouvement de corps rigide (translation rotation)

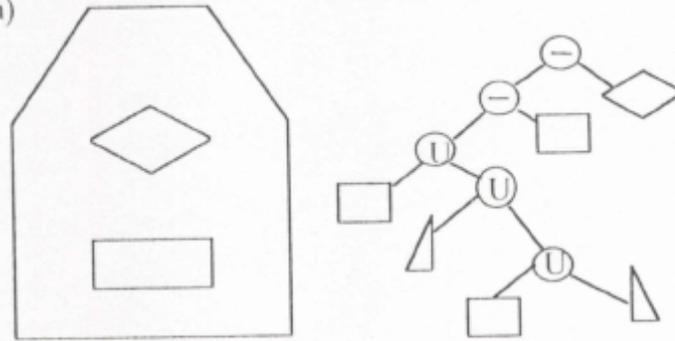


Figure 7 Construction géométrique par solides

Les solides de base sont obtenus souvent par utilisation entités encore plus élémentaires :

| | |
|----------|--------------------------------|
| cube | arête |
| sphère | centre et rayon |
| cylindre | centre de base, rayon, hauteur |

Dans cette formulation, les cotés et faces des solides apparaissent implicitement et non explicitement.

Les informations stockées dans la base de données sont donc en nombre très restreint. Par contre, ces primitives sont souvent insuffisantes pour représenter des volumes compliqués (Zones de raccordements a rayon variable,.....).

Représentation topologique et géométrique {Boundary representation scheme B-rep}

Un solide est représenté par ses frontières. Une frontière est une surface (plane ou non) limitée par des lignes (ou des courbes), ces lignes connectent des points.

Il n'existe donc pas de solide particulier (ou primitive) et tout solide du plus simple au plus compliqué doit être défini explicitement de cette façon.

Les information stockées dans la base de données sont assez volumineuses, même pour les modèles les plus simples. Par contre, il n'y a aucune difficulté a représenter des volumes compliqués.

Les éléments définissant un solide par la méthode B-rep peuvent appartenir a deux catégories principales :

Les éléments topologiques définissant les connexions sous forme de points, arêtes et faces (référéncées par leur labels).

Les éléments géométriques définissant la forme et la position des entités (points, courbes et surfaces).

On différencie parfois les points définissant la topologie de ceux définissant la géométrie. Pour les points définissant topologie seuls les labels on de l'importance, les coordonnées sont inutiles.

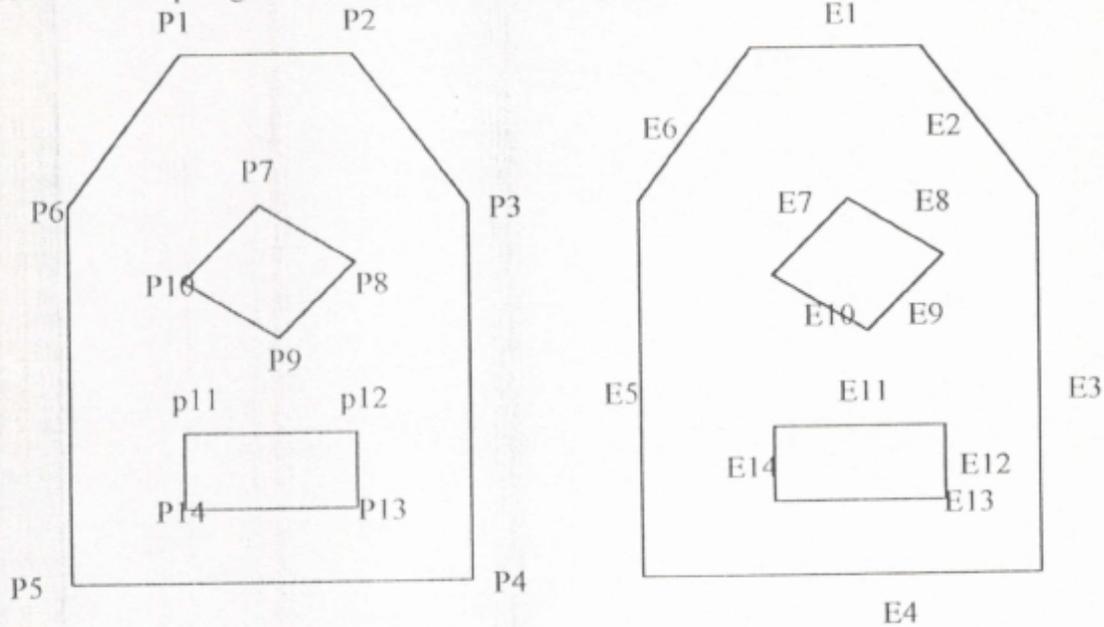


Figure 8 Représentation topologique et géométrique

Opération booléennes sur les solides élémentaires :

Le solide dont on désire construire le modèle est obtenu à partir des solides élémentaires par application d'opérations booléennes (addition, intersection, soustraction), de transformations topologiques (coupure,...) et de transformation (copie, translation, rotation, miroir, mise à l'échelle,...).

Pour les opérateurs booléens on utilisera les opérateurs régularisés afin de garantir le caractère régulier du solide généré.

a) Addition (fusion, union,

Soit deux solides A et B. Le solide $C=A \cup B$ est composé de l'ensemble des deux solides. Toutes parties communes aux deux solides A et B originaux est comptée une fois ou Deux fois.



Figure 9 Union

b) Intersection (common, intersect, ..)

soit deux solides A et B. Le solide $C=A \cap B$ est composé de la partie commune aux deux solides A et B originaux.

c) Soustraction (removal, subtract, ..)

soit deux solides A et B. Le solide $C=A - B$ est composé du solide A dont on retire la partie commune aux deux solides A et B originaux.

d) Coupure (cut, ..)

soit un solide A et un plan. Le nouveau solide obtenu par coupure est composé de la partie du solide original située d'un côté du plan.

Remarque

Les opérateurs booléens utilisés sont dit régularisés car ils assurent que les solide créés n'ont aucune zone de volume nul.

Elimination des parties cachées

Introduction:

De nombreuses applications de l'infographie nécessitent l'affichage d'objets tridimensionnels avec un degré de réalisme souvent assez élevé. La représentation d'un objet en volume sur une surface plane impose de recréer par divers artifices l'impression de profondeur. La projection en perspective et l'estompage en fonction l'éloignement {depth cuting} qui en est dérivé sont les techniques les plus simples. L'élimination des parties cachées {hidden lines and hidden surfaces elimination} permet de conférer aux objets leur opacité naturelle, leur donnant l'aspect de volumes pleins au lieu de squelettes filiformes. Finalement le remplissage des surfaces en utilisant des effets d'illumination et de texture permet d'aboutir au réalisme d'une photographie.

Cette annexe traite de l'aspect le plus complexe de la restitution d'objets tridimensionnels, c'est-à-dire le passage de squelettes filiformes à des volumes opaques masquant les objets placés derrière eux, correspondant à l'élimination des parties cachées. Les techniques de rendu réaliste basées sur des effets d'illumination, de transparence de réflexion d'ombrage forment un domaine distinct.

Avant de viser le but de produire des images de synthèses difficilement discernables des photographies, il importe de rendre l'image suffisamment représentative pour permettre l'identification des objets et de leurs positions respectives. Une image en fil de fer, correspondant au squelette d'un objet, n'est pas très claire et peut même être ambiguë: par exemple, l'escalier de la figure 1 est-il vu de dessus ou de dessous?

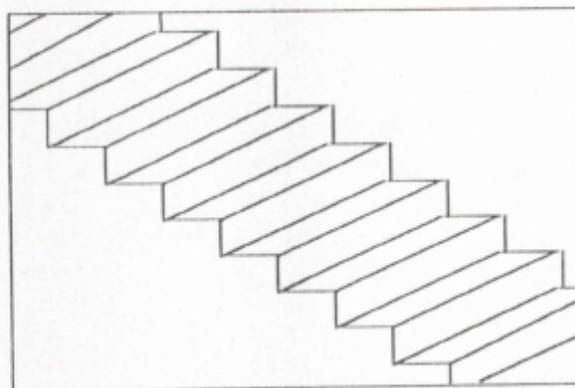


Figure 1 difficulté d'interprétation d'une représentation en fil de fer

Vu que les parties cachées dépendent de la position de l'observateur, l'élimination de ces parties ne doit être faite qu'après que la transformation de visualisation ait été appliquée, c'est à dire une perspective dans le système de coordonnées d'écran normalisées.

Classification des méthodes

De nombreux algorithmes d'élimination des parties cachées ont été développés à partir de bases géométriques différentes. Chaque catégorie comporte des contraintes propres et offre des avantages spécifiques quand au temps d'exécution et à la précision du dessin, correspondant à des

application pouvant aller jusqu'au domaines de l'animation en temps réel et la production d'images de synthèse très réalistes.

L'élimination des parties cachées peut être faite sur une scène composée d'un unique objet, auquel cas les faces opposées à l'observateur sont simplement ignorées, ou composées de plusieurs objets. Ce cas assez général est bien plus complexe, car des faces peuvent être partiellement visibles, nécessitant la détermination de nouvelles frontières.

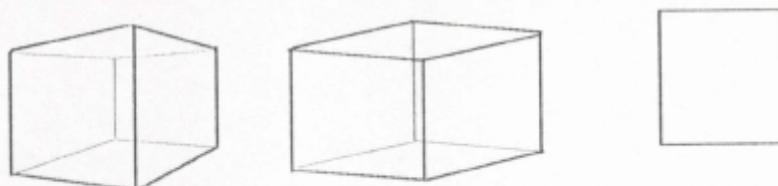


Figure 2 Elimination des faces arrières d'un objet

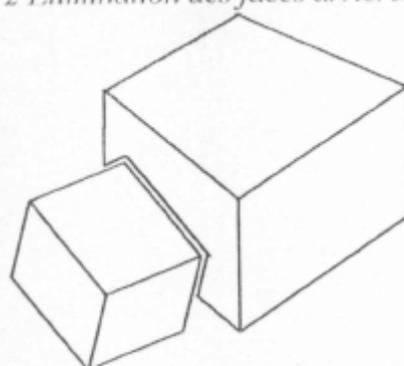


Figure 3 Nouvelle frontière d'une face dans une scène multi-objets

Deux types d'élimination pour les parties cachées existent :

- Pour les lignes cachées
- Pour les faces cachées

Si un dessin au trait est désiré, on utilisera un algorithme d'élimination des lignes cachées qui traitera le cas du masquage d'un segment de droite par une face, et produira comme résultat une collection de segments de droites.

En revanche, si l'image finale doit être une représentation en surfaces, c'est un algorithme d'élimination de faces cachées qu'il faut choisir.

Les objets peuvent être représentés par

- des facettes planes
- des portions de surfaces courbes.

Les problèmes à résoudre pour l'élimination de parties cachées sont donc par ordre de complexité:

- le retrait des faces arrières
- le masquage de objets arrières
- l'intersection des volumes.

Il doivent être résolus pour des volumes à facettes ou des solides décrits par des surfaces courbes; mais on se restreindra au cas des volumes à facettes étant donné que notre problème étant limité à cela.

ANNEXE G

Deux grandes catégories de méthodes d'élimination existent, elles se différencient par le système de coordonnées dans lequel les calculs sont effectués:

- algorithmes dans l'espace objet
- algorithmes dans l'espace image

La première catégorie correspond à la résolution du problème de manière géométrique, sans considérer comme but l'affichage sur un dispositif à résolution finie. Chaque facette est comparée avec toutes les autres facettes, de sorte que le temps de calcul croît avec le carré du nombre de facettes.

Le travail dans l'espace image correspond à ne calculer les parties masquées qu'à la définition requise par le dispositif d'affichage. L'effort de calcul est proportionnel au nombre de facettes F multiplié par le nombre de point P du dispositif d'affichage. Comme le nombre de pixels à traiter est assez élevé, typiquement de l'ordre du million (écran 1000×1000).

Le travail dans l'espace objet est requis lorsque les coordonnées exactes des lignes d'intersection doivent être obtenues (CAO en mécanique).

Modélisation de volumes à facettes

Un volume peut être donné par :

- ses sommets
- ses cotés ses faces.

La simple liste des sommets n'est pas suffisante pour représenter un volume car rien n'indique comment il sont reliés pour définir la surface du volume.

Les cotés qui relient deux sommets, permettent de dessiner le squelette filiforme d'un objet, mais ne comportent pas d'informations décrivant ses faces; une telle représentation n'est pas suffisante pour l'élimination des parties cachées. Plutôt qu'une représentation explicite, ou les coordonnées des sommets sont donnés plusieurs fois, il est préférable de décrire chaque côté par deux pointeurs (ou indices sur ses sommets). L'avantage de cette représentation est qu'elle ne sera appliquée qu'une fois à chaque sommet, mais surtout qu'un sommet ne puisse pas diverger en deux triplets de coordonnées différents suite à l'accumulation d'erreurs d'arrondis, rendant ainsi impossible l'identification de tous les cotés aboutissant à un sommet. Un autre avantage de cette représentation est de pouvoir facilement modifier le volume en déplaçant les sommets.

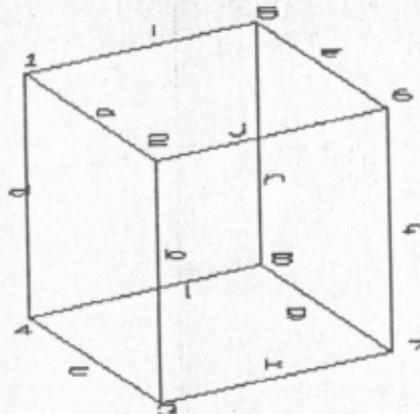


Figure 4 Représentation implicite des cotés.

ANNEXE G

En s'intéressant aux faces, on peut définir pour chacune d'entre elles une liste de sommets en utilisant une notation indirecte (implicite), c'est-à-dire que comme précédemment on ne reportera pas les coordonnées des sommets mais qu'on utilisera des pointeurs.

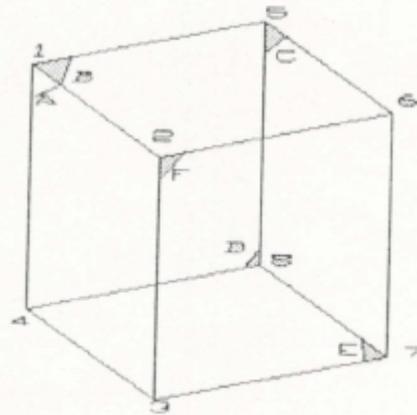


Figure 5 Représentation implicite des faces

Pour certains algorithmes, il est utile de stocker d'autres informations, par exemple les vecteurs normaux aux faces pour l'élimination des faces arrières, ou les vecteurs normaux en chaque sommet pour le calcul de l'illumination selon le modèle de PHONG.

Pour accélérer la recherche des parties cachées on mémoriserà pour chaque objet son volume englobant (encombrement) afin de pouvoir discriminer aisément les objets ne pouvant se masquer. Des pointeurs supplémentaires peuvent aussi être introduits, par exemple pour relier chaque arête aux faces qu'elle sépare.

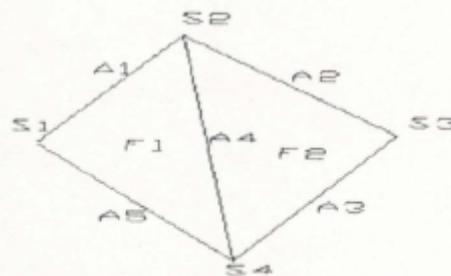


Figure 6 Représentation d'un volume à facettes

Dans cette structure de données, des emplacements pourront être prévus pour mémoriser les variables requises par les algorithmes utilisés lorsque ceux-ci travaillent en plusieurs passes, évitant ainsi la gestion d'une seconde structure

Méthode de l'horizon flottant

La méthode de l'horizon flottant s'applique au tracé des fonctions de l'espace données par une équation de la forme : $F(X, Y, Z) = 0$

L'élimination des parties cachées est faite dans l'espace image de manière simple en considérant le découpage de la surface par des plans parallèles à un plan de base. Comme sur la figure 7,

choisissons des plans $Z=Cte$, l'intersection de la fonction F avec un de ces plans détermine une courbe :

$$F \cap Z = Z_c \quad Y = f(X, Y_c) \quad \text{ou} \quad x = g(Y, Z_c)$$

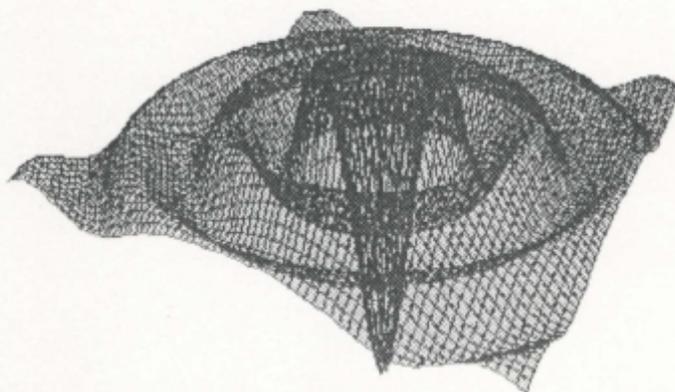


Figure 7 Surface représentée par un treillis

En projetant ces courbes sur le plan $Z=0$, on obtient l'image désirée de la surface si on commence par tracer la courbe située dans le plan $Z=Cte$ le plus proche de l'utilisateur et qu'on emploie la méthode d'élimination des lignes cachées suivante.

Pour chaque valeur de X , on calculera la valeur de Y et on n'affichera le point correspondant que si cette valeur de Y est plus grande que celle mémorisée dans un tableau correspondant à la ligne d'horizon. La surface peut aussi comporter des inflexions vers le bas qui nécessitent l'usage d'une seconde ligne d'horizon pour pouvoir les représenter correctement.

L'affichage d'un point avec gestion des parties cachées, ou du segment de droite reliant le dernier point à l'actuel peut être confié à un procédure et sous réserve de tracer les lignes composant la surface dans l'ordre de la plus proche à la plus éloignée de l'observateur, le traçage peut être fait comme si on utilisait une procédure d'affichage classique. Le calcul de la surface sera fait dans les coordonnées utilisateur, et par l'intermédiaire de la transformation de visualisation on calculera les coordonnées écran des points ou segments à tracer les lignes d'horizon étant dimensionnés selon la largeur de écran.



Figure 8 Exemple d'élimination des parties cachées

Lignes de niveau

Sur les cartes de géographie on voit seulement figurer des couleurs différentes suivant des altitudes, L'énoncé de la méthode est simple :

On va couper la surface par des plans horizontaux a l'altitude désirée et projeter les courbes ainsi obtenues sur le plan de l'écran. Les surfaces seront définies par une équation du type $Z=f(X,Y)$, et décomposée en éléments de surface dont la taille sera définie par l'utilisateur :

On vas découper le plan de l'écran par un quadrillage, et projeter ce quadrillage sur cette surface .

Il ne restera plus alors qu'a chercher l'intersection des plans horizontaux avec les cotés de l'élément de la surface considérée : de la même façon que l'élément de surface forme une approximation de la surface, les segments obtenus formeront une approximation de la ligne de niveau cherchée.

La méthode ainsi exposée donnera de bon résultats pour des fonction pas trop irrégulières mais produira souvent des effets gênant:

On risque de voir de niveau s'arrêter net, se croiser et donc donner des résultats aberrants. Sur une carte on ne voit jamais de ligne de niveau se comporter ainsi. L'erreur provient de se que l'on suppose que les éléments de surfaces sont assimilables a des plans.

Pour l'instant nous dirons simplement que découper l'élément de surface en deux triangles résout le problème: avec trois points distinct on a toujours un plan, et les ennuis évoquées ne risquent plus de se produire .

La partie du plan étudiée est définie par quatre nombres: X_i, X_s, Y_i, Y_s le quadrillage est déterminé par C_x et C_y , qui représente le nombre de cases en x et en y. L'entier n_l représente le nombre de lignes de niveau.

Les niveaux sont étagés entre le niveau le plus bas n_i et le niveau le plus haut n_s . Le tableau n contient les différents niveaux (on a prévu 7 niveaux maximum valeurs aisément modifiable).

Chaque case du quadrillage est définie par quatre nombres :

X_1, X_2, Y_1, Y_2 .

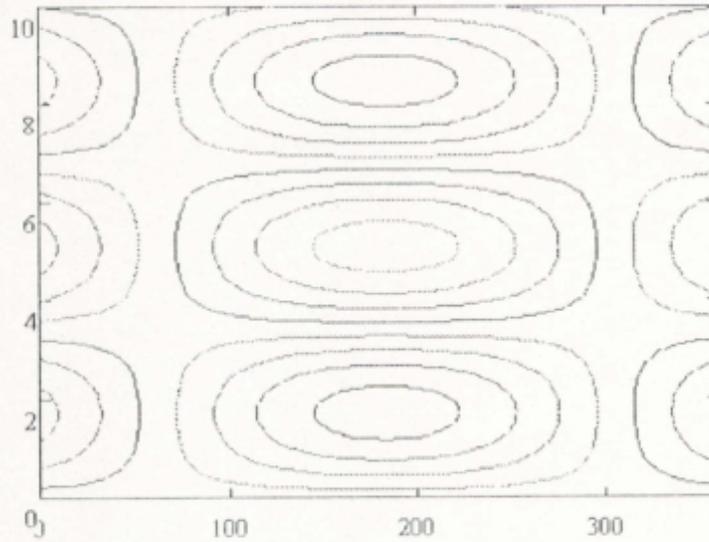
On stocke les cotes des points du quadrillage dans les variables z_1, z_2, z_3, z_4 . Le premier triangle est constitué des points 1, 2 et 3. Les abscisses, ordonnées et cotes correspondantes sont placées dans les tableaux a, b, c avant d'être envoyées à la procédure triangle. L'indice 0 sert a organiser une boucle sans complications. Le deuxième triangle sert a organiser une boucle sans complications . Le deuxième triangle est constitué des points 1, 3 et 4 : il suffit de modifier un seul point.

La procédure triangle détermine le nombre p d'intersections, et place les abscisses et ordonnées des points obtenus dans des tableaux avant de tracer le segment.

Lors de l'utilisation de ce programme, on notera parfois quelques défauts dans le tracé lignes non jointives. Cela peut toujours se résoudre en prenant un quadrillage plus fin.

ANNEXE G

Il est a noter que l'implémentation actuelle peut aller jusqu'à un maillage de 50 par 50 points.
Exemple :



الاسم: POCPH
الرقم: 1
التاريخ: 2018.12.20
الوقت: 10:00

