

**Titre:** Modélisation géométrique de turbomachines  
Title:

**Auteurs:** B. Ozell, & Ricardo Camarero  
Authors:

**Date:** 1984

**Type:** Rapport / Report

**Référence:** Ozell, B., & Camarero, R. (1984). Modélisation géométrique de turbomachines.  
Citation: (Rapport technique n° EP-R-84-10). <https://publications.polymtl.ca/10094/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/10094/>  
PolyPublie URL:

**Version:** Version officielle de l'éditeur / Published version

**Conditions d'utilisation:** Tous droits réservés / All rights reserved  
Terms of Use:

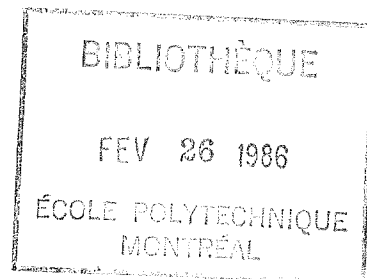
 **Document publié chez l'éditeur officiel**  
Document issued by the official publisher

**Institution:** École Polytechnique de Montréal

**Numéro de rapport:** EP-R-84-10  
Report number:

**URL officiel:**  
Official URL:

**Mention légale:**  
Legal notice:



MODELISATION GEOMETRIQUE  
DE TURBOMACHINES

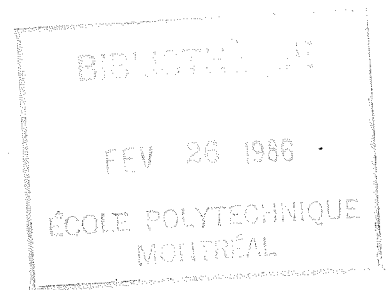
B. OZELL

R. CAMARERO

Département de mathématiques appliquées

novembre 1984

EPM/RT-84-10



### Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet P.RAI P.8122  
du CRSNG en collaboration avec les Ateliers d'Ingénierie Dominion  
et l'appui financier du fond F.C.A.C.

TABLE DES MATIÈRES

	page
RÉSUMÉ .....	iv
ABSTRACT .....	v
REMERCIEMENTS .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	ix
CHAPITRE I - INTRODUCTION .....	1
1.1 Position du problème .....	1
CHAPITRE II - STRUCTURE ET ALGORITHME GÉNÉRAL .....	2
2.1 Enoncé du problème et définition des termes employés .....	2
2.2 Caractérisation des objets .....	4
2.3 Les splines paramétriques .....	7
2.4 Les systèmes de coordonnées .....	9
2.5 Structure de données globale .....	15
CHAPITRE III - LES PROGRAMMES .....	20
3.1 La conception d'un modèle .....	20
a) L'utilisation .....	20
b) Le fonctionnement .....	22
3.2 Le raffinement du modèle .....	25
a) L'utilisation .....	25
b) Le fonctionnement .....	28
3.3 La construction d'une coquille .....	30
a) L'utilisation .....	30
b) Le fonctionnement .....	34

	page
3.4 La création d'un maillage adapté .....	35
a) L'utilisation .....	35
b) Le fonctionnement .....	37
3.5 L'affichage par un progiciel spécialisé .....	38
3.6 Caractéristiques globales supplémentaires .....	39
a) L'utilisation des programmes .....	39
b) Possibilités et restrictions .....	41
CHAPITRE IV - RÉSULTATS .....	44
4.1 Conception et raffinement des modèles .....	44
4.2 Construction des coquilles .....	46
4.3 Création de maillages adaptés .....	47
4.4 Possibilités supplémentaires .....	47

LISTE DES FIGURES

	page
Figure 1. Caractérisation d'une pale par deux ensembles de courbes à sa surface .....	49
Figure 2. Caractérisation d'un moyeu par une surface de révolution .....	50
Figure 3. Position des éléments de la turbine dans un repère cartésien .....	51
Figure 4. Position des éléments de la turbine dans un repère cylindrique .....	52
Figure 5. Position des éléments de la turbine dans un repère toroïdal .....	53
Figure 6. Utilisation des fichiers par les programmes .....	54
Figure 7. Menu du programme de conception d'un modèle .....	55
Figure 8. Changement de projection .....	56
Figure 9. Changement de niveau .....	57
Figure 10. Mise à l'échelle d'un profil .....	58
Figure 11. Translation d'un profil .....	59
Figure 12. Rotation d'un profil .....	60
Figure 13. Ajout de profils en les copiant de d'autres niveaux ..	61
Figure 14. Déplacement dans l'ordre des profils .....	62
Figure 15. Elimination d'un profil .....	63

Liste des figures (suite)	page
Figure 16. Création d'un profil: insertion entre d'autres niveaux ou remplacement d'un niveau .....	64
Figure 17. Création d'un profil: entrée de la coordonnée constante et des points de définition .....	65
Figure 18. Modification d'un profil .....	66
Figure 18. Modification d'un profil (suite) .....	67
Figure 19. Modification du moyeu ou du carter .....	68
Figure 20. Affichage dans un repère à trois dimensions .....	69
Figure 21. Utilisation des procédures d'affichage 3D .....	70
Figure 22. Agrandissement de la fenêtre d'affichage .....	71
Figure 23. Translation de la fenêtre d'affichage .....	72
Figure 24. Modification des paramètres d'affichage .....	73
Figure 25. Confirmation de la fin du programme .....	74
Figure 26. Menu du programme de raffinement du modèle .....	75
Figure 27. Application, sur tous les niveaux, de l'algorithme de répartition des points naturels .....	76
Figure 28. Application, sur un seul niveau, de l'algorithme de répartition des points naturels .....	77
Figure 29. Interpolation de profils intermédiaires entre le moyeu et le carter .....	78
Figure 30. Affichage de tous les points .....	79

Liste de figures (suite)	page
Figure 31. Affichage d'aucun point .....	80
Figure 32. Choix des points et affichage dans un repère à trois dimensions .....	81
Figure 33. Modification de la position du point d'attaque d'un profil .....	82
Figure 34. Les parties d'une coquille .....	83
Figure 35. Construction d'une coquille: affichage des deux profils résultant de l'intersection de la pale avec les moyeu et carter .....	84
Figure 36. Caractérisation de quatre segments de droite .....	85
Figure 37. Répartition des points sur les segments de droite .....	86
Figure 38. Largeur du canal interaube: nombre de pales de la turbine .....	87
Figure 39. Répartition de points sur la distance interaube .....	88
Figure 40. Remontée de la séquence d'opération du programme .....	89
Figure 41. Exemple d'utilisation du programme de création de maillage adapté .....	90
Figure 42. Exemple d'utilisation du programme de "passage" à MOVIE ..	91
Figure 43. Exemples de maillages bidimensionnels en C et en O (référence [ 1 ] ) .....	92
Figure 44. Exemple de modélisation d'un profil non fermé .....	93



Liste des figures (suite)	page
Figure 45. Vue du premier modèle raffiné (étude d'une pale; coordonnées cartésiennes) .....	94
Figure 46. Vue du deuxième modèle raffiné (turbine de type KAPLAN; coordonnées toroïdales) .....	95
Figure 47. Vue du troisième modèle raffiné (turbine de type FRANCIS; coordonnées toroïdales) .....	96
Figure 48. Vue du quatrième modèle raffiné (partie aval d'un groupe-bulbe; coordonnées cylindriques) .....	99
Figure 49. Vue du cinquième modèle raffiné (groupe-bulbe et enveloppe de l'alternateur; coordonnées cylindriques ..	100
Figure 50. Vue de la coquille construite pour le premier modèle ...	101
Figure 51. Vues de la coquille construite pour le deuxième modèle (rotations autour de l'axe central: 0, 90, 180 et 270 degrés) .....	102
Figure 52. Vues de la coquille construite pour le troisième modèle (rotations autour de l'axe central: 0, 40, 80 et 200 degrés) .....	103
Figure 53. Surfaces de coordonnées du maillage créé pour le premier modèle .....	104
Figure 54. Surfaces de coordonnées du maillage créé pour le deuxième modèle (rotation: 0 degré) .....	105

Liste des figures (suite)	page
Figure 55. Surfaces de coordonnées du maillage créé pour le troisième modèle (rotation: 300 degrés) .....	106
Figure 56. Vue d'un modèle raffiné représentant une quille de bateau .....	107

CHAPITRE I  
INTRODUCTION

1.1 POSITION DU PROBLÈME

La conception assistée par ordinateur de turbines efficaces et adaptées à leur type d'environnement occupe une place prépondérante dans l'aménagement d'un barrage hydro-électrique. L'utilisation de l'ordinateur, à titre d'outil pour le concepteur détermine trois grandes étapes: la création d'un modèle de turbine ("modélisation"); la résolution numérique, sur ce modèle, d'équations différentielles régissant des phénomènes physiques (les équations de Navier-Stokes); l'analyse des résultats obtenus, à la lumière des connaissances déjà acquises sur le comportement physique des fluides et des matériaux, de même que des autres facteurs qui y sont en jeu.

Le travail présenté ici concerne les turbines et, principalement, l'élaboration d'un progiciel servant à la conception de modèles aptes à servir de base à la résolution des équations différentielles et à l'analyse des résultats. La mise en oeuvre réelle de ces turbines "modélisées" sera, par la suite, possible avec un minimum de tests et, par conséquent, de risques financiers ou autres, étant donné l'étude approfondie effectuée à l'aide de l'ordinateur.

## CHAPITRE II

### STRUCTURE ET ALGORITHME GÉNÉRAL

#### 2.1 ÉNONCÉ DU PROBLÈME ET DÉFINITION

La résolution numérique d'équations différentielles demande l'usage de ce qu'il est convenu d'appeler un "MAILLAGE". Celui-ci est en fait un ensemble de points (coordonnées) à l'intérieur d'un domaine donné de calcul. A chacun de ces points, sera approximée, directement ou par itérations successives, la solution de l'équation différentielle.

La finalité des présents programmes est donc de fournir un tel maillage, dans un espace à trois dimensions (3D), à partir de la définition géométrique d'une turbine. On divise, à cet effet, une turbine en trois parties: les PALES, le MOYEU et le CARTER. Essentiellement, les pales étant toutes identiques, la définition d'une seule d'entre elles est suffisante. Le moyeu est la partie centrale de la turbine auquel les pales sont fixées et le carter en est l'enveloppe, la surface extérieure qui délimite la turbine. Notons que dans les turbines hydrauliques, le carter est solidaire des pales, tandis que les turbines à gaz, il représente le corps de la turbomachine et n'est ainsi pas en rotation. (1)

Le volume fermé à l'intérieur duquel sera construit un maillage est, quant à lui, un CANAL qui s'étend d'une pale à une autre, du moyeu au carter, et, par prolongement des pales, du PLAN D'ENTRÉE

---

(1) Une terminologie différente, selon le domaine d'application, amène quelquefois le moyeu à être appelé une couronne, le carter une ceinture et les pales, des aubes.

de l'eau dans la turbine jusqu'à son PLAN DE SORTIE. Le prolongement mentionné résulte de deux surfaces "réglées" issues respectivement du BORD D'ATTAQUE (la partie de la pale qui entre la première en contact avec l'eau) vers le plan d'entrée, et du BORD DE FUITE (la partie de la pale par où l'eau quitte la surface de celle-ci) vers le plan de sortie. On conviendra d'appeler "COQUILLE" l'ensemble de ces surfaces qui délimitent le canal.

On parle, de plus, de "MAILLAGE ADAPTÉ" lorsque les frontières physiques du canal correspondent à des surfaces de coordonnées d'un système curviligne de référence. La résolution numérique subséquente des équations décrivant le comportement des fluides permet alors un traitement adéquat des conditions limites imposées près des parois. Aucune imprécision résultant de méthodes d'interpolation de la géométrie des frontières n'est alors introduite.

L'introduction d'un système de coordonnées curviligne permet de trouver des transformations qui font correspondre une région physique arbitraire à un parallélépipède rectangle. L'avantage majeur est que les calculs entourant la génération du maillage adapté et, par la suite, la résolution des équations différentielles sont tous effectués dans le domaine transformé qui, lui, n'a plus la complexité initiale tout en étant facilement discrétisable à l'aide, par exemple, de simples différences finies. Les équations avec lesquelles on doit travailler sont cependant un peu plus compliquées, mais les attraits de la transformation demeurent tout de même plus grands que les problèmes rencontrés.

En plus d'une bonne application des conditions frontières de la mécanique des fluides et d'une certaine simplicité globale de calcul,

une autre caractéristique importante est la possibilité d'augmenter la concentration des noeuds dans les endroits où les variations des propriétés du fluide sont à surveiller. La répartition (contrôlée par l'utilisateur) des noeuds sur la coquille exerce, en effet, cette influence sur celle des noeuds à l'intérieur du canal en imposant les conditions frontières au problème de génération de maillage.

## 2.2 CARACTÉRISATION DES OBJETS

Les pales, le moyeu et le carter peuvent être considérés comme des objets ayant une certaine existence en mémoire dans l'ordinateur. On sait, en fait, qu'ils sont représentés par un ensemble de valeurs réelles, les coordonnées, correspondant à des points dans l'espace matériel. Ces objets peuvent néanmoins être formellement caractérisés de cette façon. En effet, si on associe ces coordonnées à des points situés aux limites physiques de chaque objet, on peut, par une méthode d'interpolation, avoir une définition complète du volume qu'il occupe.

Essentiellement, les limites réelles d'une pale constitue une surface repliée sur elle-même, dans l'espace à trois dimensions; les deux extrémités étant bornées par le moyeu et le carter. Cette surface peut être caractérisée par deux ensembles de lignes la parcourant du moyeu au carter, d'une part, et en faisant le tour (du bord de fuite pour y revenir en passant par le bord d'attaque) de la pale, d'autre part (Fig. 1). Ces deux familles de courbes forment un réseau (quadrillage) dont l'intersection d'une ligne d'une famille avec une de l'autre, procure un point. Ces points serviront de base

à la définition, par interpolation de la pale.

Il est à remarquer que d'autres approches sont possibles pour caractériser des objets de cette espèce. Ainsi, une autre représentation de l'objet aurait pu être obtenue par des éléments solides tels que des hexaèdres. Puisqu'en réalité, nous n'étions intéressés que par ce qui se passe à la surface de la pale, ce choix plus complexe n'a pas été retenu. D'autre part, on aurait pu caractériser directement la pale sans passer par l'intermédiaire de deux familles de courbes, mais plutôt à l'aide d'un seul ensemble de plaques ("patches"). De telles méthodes d'interpolation, comportant deux paramètres qui relient une portion de plan à la surface, existent et fonctionnent bien. Toutefois, l'approche proposée facilite les calculs d'interpolation et ne cause aucun ennui particulier en ce qui a trait à la représentation de la pale.

Cette simplification des calculs n'est pas le seul avantage de cette méthode. Celle-ci permet, en effet, d'introduire la notion, bien connue en ce domaine, de profil. Un PROFIL est une coupe de la pale selon un plan ou, plus généralement, selon une surface quelconque située entre le moyeu et le carter. Ces profils forment donc une des deux familles de courbes servant à définir la pale. Ils seront créés par l'interpolation des coordonnées des points connus. Cette interpolation est réalisée par des splines paramétriques et ce, pour chacune des coordonnées. Une plus grande attention est accordée à ce procédé dans la prochaine section de ce chapitre.

Les profils seront aussi considérés comme des NIVEAUX entre

le moyeu et le carter, c'est-à-dire que chaque niveau sera une différente coupe plus ou moins éloignée du moyeu ou du carter. Cet ensemble de "lignes de niveaux", par interpolation, complètera le quadrillage de la surface. Cette interpolation sera également réalisée par des splines paramétriques à partir des coordonnées des points appartenant chacun à un niveau différent; on créera ainsi l'autre famille de courbes nécessaire à la description géométrique de la surface de la pale.

Quant au moyeu et au carter, on notera que leurs limites physiques constituent généralement deux surfaces de révolution (Fig. 2). En tirant avantage de cette particularité, il est dès lors suffisant de définir seulement une ligne, pour chacune, dans un plan donné et un axe de révolution. Cette ligne sera donc créée à partir de points de ce plan et, ensuite, par interpolation de chacune de leurs coordonnées à l'aide toujours de splines paramétriques.

En vue d'apporter une dernière précision, on mentionnera que la pale est caractérisée à l'aide de profils habituellement tous situés entre le moyeu et le carter; plus précisément, aucun profil n'est explicitement défini à la surface du moyeu et/ou du carter. C'est par extrapolation qu'on calculera un prolongement de la pale jusqu'à intersection avec le moyeu, dans un sens, et avec le carter, dans l'autre. Cette façon de procéder permet la modification de la forme du moyeu et du carter, sans porter atteinte à la définition de la pale, c'est-à-dire sans être obligé de modifier aussi les profils (niveaux) des extrémités de la pale, afin d'y refléter le changement apporté au moyeu et/ou au carter, et vice-versa. C'est donc à l'aide de tous les niveaux déjà



définis, ainsi que de ces deux nouveaux, que sera trouvé le deuxième ensemble de lignes parcourant la pale du moyeu au carter.

### 2.3 LES SPLINES PARAMÉTRIQUES

Les façons de tracer une courbe assez lisse, interpolant des points dans l'espace, sont multiples. Souvent deux fonctions du type:

$$y = f(x)$$

$$z = g(x) ,$$

donnant deux coordonnées à partir d'une d'entre elles, définissent bien la courbe à représenter. Toutefois, pour les objets considérés, il n'existe généralement pas de fonction explicite, ou même implicite, reliant leurs coordonnées.

Une approche plus adéquate consiste à paramétrer la courbe. On aura alors trois fonctions,  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$ , reliées à un seul paramètre  $t$ . Chaque coordonnée est alors indépendante des deux autres et, en particulier, du système de référence utilisé pour définir les points. Afin de s'assurer que la courbe dessinée ne varie pas avec une rotation du repère, il faut que la forme des trois fonctions soit compatible.

On notera qu'aucun type d'approximation (au sens, par exemple, des moindres carrés) ne sera présent et que les courbes sont donc contraintes à passer par les points qui les définissent (collocation).

Les splines cubiques sont un outil très apprécié pour la construction de courbes. Ce sont des polynômes de degré 3, continus par morceaux, avec des dérivées premières et, possiblement, secondes continues aux points de collocation. La paramétrisation est relativement facile à

réaliser puisqu'il s'agit seulement de faire dépendre les coordonnées du paramètre  $t$  et de calculer des coefficients pour les splines selon chaque coordonnée. La méthode habituelle de construction et de résolution d'un système d'équations où une matrice tridiagonale est présente, s'emploie alors très bien.

L'invariance, sous des rotations du système de référence, étant assurée par la paramétrisation, une seule question demeure: comment choisir les valeurs du paramètre  $t$  à chaque noeud?

Essentiellement, une bonne paramétrisation devrait dépendre de la longueur d'arc entre chaque point. En pratique, on fait une approximation en évaluant plutôt la distance entre chaque point par:

$$\sqrt{(x_{i+1}-x_i)^2 + (y_{i+1}-y_i)^2 + (z_{i+1}-z_i)^2}$$

La variation du paramètre, entre deux points successifs, doit être la même pour chaque coordonnée, c'est-à-dire un intervalle unique décrit le domaine des trois fonctions paramétrées. La mesure de la distance est satisfaisante puisqu'elle tient compte des trois coordonnées et s'applique ainsi très bien à toutes les fonctions. Cette façon de faire procure une courbe des plus lisses et prévient surtout les aberrations produites par des points espacés trop irrégulièrement.

L'approximation de toutes ces longueurs d'arc chaque fois que les splines sont recalculées, leur rétention en mémoire, de même qu'une variation inégale du paramètre entre chaque point, entraînent une complexité non souhaitable. C'est ainsi qu'on songe à quelque chose de moins lourd. Si l'on varie simplement le paramètre  $t$  entre 0 et 1,

sur la distance entre deux points successifs, on dispose alors de la simplicité attendue. On y perdra toutefois certaines caractéristiques considérées comme acquises. Les points devront ainsi être assez régulièrement espacés afin de prévenir tout soubresaut dans le dessin des courbes. Ceci peut sembler une contrainte indésirable, mais vu la latitude donnée au concepteur lors de la création de la turbine, il sera tout à son loisir d'introduire quelques nouveaux points pour rétablir une disposition régulière. Le travail pour le calcul de nouvelles splines ainsi que pour celui des valeurs intermédiaires nécessaires à leur traçage est alors dramatiquement réduit, sans parler de l'avantage supplémentaire fourni par des paramètres variant tous à l'intérieur des mêmes limites.

#### 2.4 LES SYSTÈMES DE COORDONNÉES

On a parlé jusqu'à maintenant des coordonnées des points servant à la caractérisation d'objets à trois dimensions. L'usage de ces coordonnées implique la référence à une origine.

Le repère qu'on rencontre le plus souvent, en général, est sans contredit celui des coordonnées cartésiennes où trois axes (ceux des  $x$ ,  $y$  et  $z$ ), orientés, sont perpendiculaires entre eux; leur intersection servant d'origine.

Pour l'application actuelle, où des surfaces de révolution sont présentes, on constate qu'un autre système de référence est très approprié. Il s'agit des coordonnées cylindriques où deux coordonnées ( $r$  et  $z$ ), sont situées dans un plan, selon un repère cartésien à deux

dimensions, la troisième ( $\theta$ ) provenant d'une rotation de ce plan autour d'un de ses axes (celui des  $z$ ). L'origine est située à l'intersection des deux axes  $r$  et  $z$ .

Encore un autre système de référence peut être imaginé, soit celui des coordonnées dites "toroïdales". De la même façon que dans le cas cylindrique, deux coordonnées ( $R$  et  $\phi$ ) sont situées dans un plan selon, cette fois, un système à deux dimensions de coordonnées polaires. L'origine de ce repère 2D étant fixée, on pose, dans ce plan, un axe de révolution perpendiculaire au segment de droite reliant l'origine et le point où  $R=a$  et  $\phi=0$  et passant par ce dernier point. La troisième coordonnée ( $\theta$ ) provient alors de la rotation du plan autour de cet axe. L'origine du système à trois dimensions est alors le cercle, de rayon "a", dessiné par la rotation de l'origine du repère 2D. Le nom de ce système fait référence au tore décrit par la surface de coordonnée constante  $R$ .

La justification de l'utilité de ce dernier système provient du fait que, souvent, le moyeu et le carter de beaucoup de turbines, en plus d'être des surfaces de révolution, forment un genre d'entonnoir en coude où l'eau s'engouffre sur un plan horizontal pour en ressortir à la verticale. Les courbes 2D, engendrant de telles surfaces de révolution, présenteront donc une courbure qu'il devient alors très aisé de décrire avec un repère toroïdal.

Le système de coordonnées cartésiennes s'avèrent tout de même utile dans certains cas strictement académiques où aucune surface de révolution n'est en cause mais où l'on retrouve, au lieu, des plans on-

dulés pour représenter les limites identifiées par le moyeu et le carter.

Nous nous retrouvons ainsi en présence de trois différents systèmes de référence dits cartésien avec  $(x, y, z)$ , cylindrique avec  $(r, \theta, z)$  et toroïdal avec  $(R, \theta, \phi)$ . Une relation entre les deux premiers est relativement facile si l'on fait correspondre leur origine et leur axe des  $z$  respectifs. On a alors:

$$\left. \begin{array}{l} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = z \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctg(y/x) \\ z = z \end{array} \right.$$

Il est aussi possible de faire de même entre les deux derniers en faisant correspondre leur axe de rotations respectif, de même que l'origine du système cylindrique et le centre du "cercle origine" du système toroïdal.

On a alors:

$$\left. \begin{array}{l} r = a - R \cos \phi \\ \theta = \theta \\ z = R \sin \phi \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} R = \sqrt{(a-r)^2 + z^2} \\ \theta = \theta \\ \phi = \arctg(z/(a-r)) \end{array} \right.$$

On s'aperçoit donc qu'on peut exprimer les coordonnées d'un point par rapport à trois systèmes différents de référence, chacun étant mis à profit dans différentes situations. Considérons, pour des fins explicatives, une pale hypothétique, assez peu vrillée, semblable à une aile d'avion.

Si l'on désire surtout étudier la pale et que le moyeu et le carter ne sont que des plans utilisés pour borner celle-ci, le repère cartésien est pleinement indiqué. En utilisant ce système de coordonnées, il est convenu de placer la pale de telle façon que la coordonnée  $x$  s'étende du moyeu au carter, que la coordonnée  $z$  soit orientée dans la direc-

tion du courant et que celle en  $y$ , indique une certaine profondeur ou épaisseur de la pale. Le moyeu et le carter pourront alors être décrits simplement par des lignes dans le plan  $xz$ . (Fig. 3).

Si, de façon peut-être plus réaliste, le moyeu et le carter sont des surfaces de révolution (p.e. vis-à-vis des pales d'un groupe-bulbe), il devient essentiel d'avoir un angle comme une des coordonnées. Le repère cylindrique permet à l'axe des  $z$  d'être l'axe de révolution. Ainsi, la pale devra être placée de façon à ce que la coordonnée  $r$  marque la distance du moyeu au carter, celle en  $z$  marquant la direction du courant, tandis que la coordonnée  $\theta$ , angle de rotation, devient une dimension reliée à l'épaisseur de la pale. Le moyeu et le carter sont représentés par des lignes dans le plan  $rz$ . (Fig. 4).

Si, toutefois, les lignes identifiant le moyeu et le carter présentent un coude dans le système de coordonnées cylindriques (p.e. les turbines de types Francis ou Kaplan), il est alors utile de passer au repère toroidal. Un axe de révolution est alors au centre d'un cercle origine de rayon fixe  $a$ . La coordonnée  $R$  s'étend toujours du moyeu au carter, tandis que l'angle  $\phi$  devient une unité dans la direction du courant et l'angle  $\theta$  indique la rotation et demeure relié à l'épaisseur de la pale. Le moyeu et le carter sont représentés par des lignes dans le plan  $R\phi$ . (Fig. 5).

Comme on le constate, il existe une certaine similitude entre l'usage de ces trois systèmes de coordonnées. L'ensemble des programmes présentés ici tire profit de ce lien entre les repères. On traitera les trois indifféremment et sans problème, en considérant chaque coordonnée

comme indépendante du système de référence. C'est ainsi que la première s'étendra toujours du moyeu au carter, la deuxième marquant généralement l'épaisseur de la pale, la troisième demeurant, autant que possible, dans la direction du courant. L'orientation, ou le sens, est libre pour toutes les coordonnées.

L'affichage et la modification d'objets 3D, à l'aide d'écrans graphiques n'en comportant que deux, causent indubitablement certains problèmes. L'utilisation de projections de ces objets, permettant de passer d'un domaine 3D à un 2D, est alors obligatoire. Si une technique de perspective est toutefois employée, il est alors assez facile de percevoir une certaine profondeur dans les images affichées à l'écran, c'est-à-dire sans trop perdre d'informations sur la forme réelle de l'objet. Cependant, la communication inverse, de l'utilisateur vers le programme, est plus restrictive. Les outils associés à ces écrans (p.e. curseurs, stylo, souris) ne permettent pas le passage de toutes les données géométriques que l'on souhaiterait: seulement deux dimensions à la fois pourront être saisies par le programme, étant donné l'absence de profondeur réelle de l'écran. On sera donc forcé d'utiliser et de travailler avec ces projections en ce qui concerne les modifications géométriques à apporter aux objets et, en conséquence, développer une méthode de communication, dont l'utilisation soit acceptable.

On peut "projeter" facilement les profils d'une pale sur trois surfaces différentes, correspondant chacune à une valeur constante de chaque coordonnée. L'aspect pratique et rapide de ce type de projections,

sur une surface de coordonnées, n'est certes pas négligé puisque cela n'est en fait qu'"oublier" temporairement une des coordonnées pour n'afficher que les deux autres. Les modifications à un profil sont alors faites très aisément puisque le plan de l'écran correspond aux deux dimensions du profil.

Dans le cas du repère cartésien, pourront donc être affichées, les coordonnées projetées sur les plans  $xy$ ,  $xz$  et  $yz$ . Ces trois projections de chacun des profils d'une pale correspondent à des vues bien réelles. Mais qu'arrive-t-il lorsque les objets sont décrits dans un repère cylindrique ou toroïdal? Le même type de projections est utilisé par les programmes, peu importe le système de référence. On a alors des projections orthogonales, mais dans un repère curviligne. Les coordonnées cylindriques donneront des projections sur un cylindre (pour  $r$  constant) et sur des plans (pour  $z$  ou  $\theta$  constant). De même, pour les coordonnées toroïdales, on aura des projections sur un tore (pour  $R$  constant), sur un cône (pour  $\phi$  constant) et sur un plan (pour  $\theta$  constant); cette dernière projection occasionnant toutefois une déformation supplémentaire puisqu'on affiche alors des coordonnées polaires ( $R$  et  $\phi$ ) selon le système cartésien de l'écran ( $R$  en abscisse,  $\phi$  en ordonnée).

Les moyeu et carter n'ont cependant pas à subir de projections de ce style puisque les courbes les définissant résident dans un plan. Seuls ceux décrits dans un système toroïdal, selon des coordonnées polaires (avec  $R$  et  $\phi$ ), subiront la déformation lors de l'affichage à l'écran, avec un système cartésien.

Toutes ces altérations de la forme réelle des profils peuvent



sembler déroutantes, mais sont au fond très vite bien utilisées une fois comprises. Il existe toujours, néanmoins, une façon plus tangible d'observer les courbes définissant les objets qui nous intéressent. Quoiqu'un peu plus dispendieux, l'affichage dans un repère cartésien à trois dimensions, avec de "vraies" projections sur un plan d'orientation variable, constitue une nécessité dans cet environnement. Certains sous-programmes ont donc été prévus à cet effet. Les profils et, facultativement, les deux lignes définissant moyeu et carter peuvent ainsi être tous affichés en même temps à l'écran après transformation, s'il y a lieu, en coordonnées cartésiennes. Des rotations variables des objets sont alors possibles afin que l'on soit en mesure d'avoir une vision de ceux-ci tels qu'ils seraient perçus en réalité.

Aucune technique de perspective n'est utilisée dans ce programme pour ne pas embarrasser l'algorithme et nuire à sa rapidité. Cependant, une représentation plus complète avec perspective, lignes cachées ou surfaces cachées et couleurs est disponible par l'intermédiaire d'un progiciel appelé MOVIE (originaire de Brigham Young University). Un programme de "passage" a été écrit pour transformer la présente structure de données en celle employée par MOVIE. Nous reviendrons à ce sujet au cours des prochaines sections.

## 2.5 STRUCTURE DE DONNÉES GLOBALE

La base de données employée permet de conserver les éléments nécessaires à la description géométrique de quatre catégories d'"objets":

- la pale en version non raffinée: les profils, le moyeu et le carter,
- la pale raffinée: les profils (les points "naturels"), le moyeu et le carter,
- la coquille,
- le maillage adapté.

On a ainsi quatre types de fichiers correspondant chacun à une catégorie particulière d'objet. Ces fichiers forment les liens entre les programmes utilisés.

Même si la nature de l'information, nécessaire à la description d'un objet, diffère selon le type de fichiers, on établit tout de même trois groupes de données distinctes à l'intérieur de chaque fichier. Il s'agit tout d'abord d'un enregistrement comprenant, dans tous les cas, une variable d'identification, une autre donnant le nom du repère utilisé et, s'il y a lieu, la valeur (1) du rayon "a" du cercle origine du système toroïdal. La première est une chaîne de quatre caractères qui identifie le type du fichier. Un fichier erroné sera donc détecté si cette chaîne ne correspond pas à un des quatre types déjà établis. (Les abréviations 'PROF', 'NATU', 'COQU' et 'MAIL' ont été utilisées.) La deuxième est de même format et identifie le système de coordonnées ('CART', 'CYLI', 'TORO'). Cet enregistrement est toujours traité et validé par une même procédure (sous-routine) qui s'occupe aussi de tout l'aspect interactif pour le choix du nom d'un fichier par l'utilisateur. Le format des autres données dépend un peu plus du type de fichier. Différentes variables de contrôle indiquant entre autres les nombres de points décri-

---

(1) A moins d'indications contraires, tous les nombres contenus dans les fichiers sont de type réel.

vant un objet, forment le groupe suivant, tandis que les coordonnées des points forment le dernier.

Un premier type de fichier est celui utilisé par le programme de conception d'un modèle pour la turbine. En plus de son enregistrement d'identification, trois entiers indiquent le nombre total de niveaux et les nombres de points définissant respectivement le moyeu et le carter. Viennent ensuite, pour chaque niveau, le nombre de points pour ce profil et leurs coordonnées. Suivent enfin les coordonnées des points du moyeu et du carter.

Le deuxième type de fichier contient une description géométrique raffinée de la pale. Deux caractéristiques nouvelles apparaissent alors sous la forme d'un point d'attaque sur chaque profil et d'un même nombre de points à chaque niveau. Les autres éléments d'information et leur format sont essentiellement les mêmes que les précédents à l'exception du nombre de points sur chaque profil qui ne sera pas répété pour chaque niveau, mais adjoint une fois pour toutes au nombre de niveaux et, aussi, de la présence d'une valeur logique (vrai ou faux) indiquant la présence ou non d'un point d'attaque.

Le troisième type de fichier doit décrire une coquille. Etant donné le nombre assez élevé de points qui s'ajoute à la description d'une pale pour former une coquille, il a été convenu de conserver plutôt tous les paramètres permettant de recréer une coquille donnée à partir d'une pale. On diminue ainsi le volume du fichier, en exigeant simplement, à chaque utilisation de la coquille en vue d'un maillage, qu'elle soit recalculée. C'est ainsi que le format de ce fichier est

exactement le même que celui contenant la version raffinée de la pale avec, en plus, les valeurs de treize paramètres (trois entiers donnant les nombres de points sur la distance interaube et les nombres en amont et en aval de la pale, quatre angles, les deux longueurs des segments de droites à l'origine des surfaces réglées, la distance interaube et trois paramètres de concentration).

Enfin, le quatrième type de fichier (celui du maillage adapté) contient en plus de son identification, trois entiers indiquant les nombres de points selon les trois directions du repère et deux autres pour les nombres de points en amont et en aval du profil. Les coordonnées de tous les points du maillage viennent par la suite.

Tel qu'illustré (Fig. 6), seuls ces fichiers servent d'intrants ou d'extrants aux programmes présentés.

Une dernière note consiste à préciser le mode d'utilisation de ces fichiers de données par les programmes. Chacun de ces derniers possède des procédures (sous-routines) de lecture et d'écriture qui lui sont propres afin de traiter les données dans leurs formats respectifs. Toutes ces procédures, cependant, font appel à une même autre procédure qui prend à son compte la validation de l'enregistrement d'identification de chaque fichier. Elle s'occupe aussi de l'interaction avec l'utilisateur pour le choix d'un fichier et des appels nécessaires pour l'ouverture et la fermeture de ce fichier. Ainsi, en général, lorsque les commandes de lecture ou d'écriture sont demandées, la procédure de validation est appelée et, ensuite, la description géométrique de l'objet est lue ou écrite.

Mentionnons, enfin, que dans les deux premiers programmes (conception et raffinement du modèle), ces commandes sont accessibles n'importe quand afin de permettre, par l'écriture, de conserver des descriptions intermédiaires d'une turbine et, par la lecture de recommencer avec une autre turbine, sans avoir à quitter. Les deux autres programmes ont été conçus en fonction d'une utilisation typiquement séquentielle où l'utilisateur détermine un fichier à lire, exécute une fonction (construit une coquille ou crée un maillage), écrit le résultat sur un autre fichier et, s'il y a lieu, recommence.

## CHAPITRE III

### LES PROGRAMMES

Les différents programmes proposés découpent, en fait, le problème plus grand de la conception d'une turbine et de la génération d'un maillage adapté. On retrouve ainsi quatre étapes principales.

#### 3.1 LA CONCEPTION D'UN MODÈLE

##### 3.1-a L'utilisation

Ce premier programme traite tout l'aspect de création/modification géométrique de la turbine, c'est-à-dire de la pale, du moyeu et du carter. On peut ainsi préciser la forme réelle de la turbine avant de s'engager à l'étudier de plus près.

L'affichage des profils est fait à l'aide des projections mentionnées à la section 2.4. Un profil est ainsi affiché, de même qu'un menu (Fig. 7) où il sera possible de choisir différentes options telles que de changer interactivement la projection utilisée (Fig. 8) ou le niveau (profil) affiché à l'écran (Fig. 9). La courbe représentant le profil est alors dessinée selon cette projection en plus des symboles identifiant les points.

Divers outils sont prévus à l'intention du concepteur afin que celui-ci puisse faire subir aux composantes de la turbine, des mises à l'échelle (Fig. 10), des translations (Fig. 11) et des rotations (Fig. 12). De plus, la possibilité lui est offerte de modifier la forme de la pale soit par l'ajout de profils en les copiant d'autres niveaux (Fig. 13),

par des déplacements dans l'ordre des profils (Fig. 14), par l'élimination de certains d'entre eux (Fig. 15) ou, encore, par leur création et insertion entre d'autres niveaux (Fig. 16).

Un profil est créé, sur une surface de coordonnées correspondant à une coordonnée constante, à partir de points entrés à l'écran avec les curseurs (Fig. 17). Chaque profil, de même que les lignes représentant moyeu et carter peuvent aussi être modifiés en ajoutant, détruisant ou déplaçant, à l'écran, des points qui les définissent, à l'aide des curseurs (Figs 18 et 19). L'affichage dans un repère cartésien à trois dimensions, pour une meilleure perception de la forme réelle de la turbine, est aussi disponible (Figs 20 et 21).

Une fonction "zoom" permet de modifier la fenêtre d'affichage. On pourra spécifier à l'aide des curseurs, deux coins opposés d'une nouvelle fenêtre (Fig. 22) ou en faire calculer une automatiquement, légèrement plus grande que l'objet à y afficher. Il est aussi possible de faire subir des translations à la fenêtre, à raison de multiples du cadre d'affichage (Fig. 23).

On notera de plus que le tracé des splines définissant chaque profil est approximé par un certain nombre de segments de droite. Plus ce nombre de segments est élevé entre deux points de définition, meilleure sera la représentation des courbes à l'écran. (Toutefois, en ce qui concerne l'affichage 3D où tous les profils sont affichés en même temps, aucun symbole n'est utilisé pour identifier les points et un seul segment de droite est dessiné entre deux points consécutifs, afin de sauver un peu de temps de calcul.) Un paramètre permet de

préciser le nombre de segments à mettre entre deux points de définition, tandis qu'un autre donne la dimension des symboles identifiant les points, relativement au cadre de l'écran. Ces deux paramètres sont modifiables interactivement en tout temps (Fig. 24).

On aura remarqué enfin que certaines informations pertinentes sont aussi toujours inscrites dans le cadre dessiné à l'écran. Il s'agit du numéro du niveau présentement affiché et du nombre total de niveaux (coin supérieur droit du cadre), de deux vecteurs indiquant les axes des coordonnées affichées (coin inférieur gauche), des valeurs physiques qui correspondent aux bornes du cadre (bas de l'écran), ainsi que du système de coordonnées utilisé et du nom du fichier édité. Un point est aussi affiché pour identifier l'origine du système d'axes lorsque celle-ci se situe dans le cadre.

Pour des raisons sécuritaires (cf. section 3.6), la fin du programme doit être confirmé par l'utilisateur (Fig. 25).

### 3.1-b Le fonctionnement

L'utilisation de projections sur une surface, correspondant à une coordonnée constante, permet de ne considérer que les deux autres coordonnées de chaque point pour l'affichage et pour toutes les modifications à apporter aux profils. Ainsi chaque procédure (sous-routine ou fonction) recevra en paramètres deux tableaux contenant ces deux coordonnées de tous les points d'un profil (p.e. en cartésien:  $(x,y)$ ,  $(x,z)$  ou  $(y,z)$ ).



Les procédures de translation et de rotation sont ainsi exécutées en deux dimensions sur cette surface. De même, la procédure de modification du profil ne fait que changer les valeurs de deux coordonnées à la fois. Toutefois, la coordonnée projetée (celle qui est inutilisée) sera touchée lors de l'élimination d'un point (disparition d'une valeur) ou de l'ajout d'un autre (la coordonnée projetée du point ajouté aura la même valeur que celle du point qui le précède).

La création d'un profil suit le cheminement suivant: choix d'une valeur constante à donner à la coordonnée projetée, positionnement des points à l'aide des curseurs et fin, en bouclant s'il y a lieu (en reliant les premier et dernier points), de l'entrée graphique. Ce nouveau profil prendra place avant ou après le niveau courant, ou encore, le remplacera.

La numérotation des profils correspond, en fait, à leur ordre dans la zone de mémoire qui leur est réservée dans le programme. L'agencement des profils, à l'intérieur de cette zone, peut être modifiée de quatre façons. (Notons que même si les profils peuvent ainsi changer de place en mémoire, leurs coordonnées n'en sont aucunement modifiées.) La création d'un nouveau profil, tel qu'expliqué ci-haut, peut augmenter le nombre de profils; les niveaux supérieurs sont alors poussés (en copiant chacun un niveau plus haut) afin de faire une place à ce nouveau profil. L'élimination d'un profil active le processus inverse; les niveaux supérieurs sont ramenés afin de combler la place libérée par ce profil. La procédure de copie, après un niveau donné, d'une sous-suite de profils peut augmenter le nombre de profils par plus qu'un seul à la fois. Elle crée, tout d'abord assez d'espace après ce niveau en poussant

les niveaux supérieurs, puis elle copie les profils désirés en cet endroit. Des modifications peuvent aussi être apportées à la suite, simplement en modifiant l'ordre des profils, sans augmenter ni diminuer leur nombre total. Une sous-suite de profils sera sélectionnée et insérée à un nouvel endroit. Chaque profil sera copié dans une zone tampon, une place sera faite après le niveau désigné et le profil y sera inséré. On procédera ainsi jusqu'à ce que tous les profils de la sous-suite aient été insérés à leur nouvel emplacement.

Dans les cas où des niveaux sont ajoutés, des tests ont été prévus afin de ne pas dépasser le maximum permis (en paramètre lors de la compilation des programmes). De même, un autre test permet de savoir quand tous les niveaux ont été éliminés (les seules options disponibles sont alors la création ou la lecture d'une nouvelle pale).

Précisons encore que même si aucun profil n'est présent (après les avoir tous éliminés ou à l'état initial du programme), les définitions du moyeu et du carter sont toujours présentes. En effet, on ne peut pas les éliminer et, à l'état initial, elles sont définies par deux segments de droite arbitrairement positionnés lors de la compilation des programmes. Cependant, aucun repère (cartésien, cylindrique ou toroidal) n'est considéré par défaut en débutant le programme et son choix doit être fait si la création d'une nouvelle pale est envisagée.

D'autre part, les commandes d'affichage 3D font appel à un ensemble de procédures qui doivent tout d'abord trouver les coordonnées de l'objet dans un repère cartésien (changement de repère s'il y a lieu). C'est à ces nouvelles valeurs que la matrice courante des transformations sera appliquée. Cette matrice est mise à jour chaque fois qu'une

commande de rotation ( 'X', 'Y' ou 'Z' ) est donnée et ce n'est que lorsque la commande d'affichage proprement dite ('A') est envoyée que tous les points subissent les rotations, puis la projection sur le plan de l'écran. Puisque les coordonnées cartésiennes originales de tous les points sont toujours présentes en mémoire, il est donc possible de ramener ('R'), en tout temps, la position de l'objet à celle de départ en posant simplement la matrice de transformation égale à l'identité. De plus, une variable logique indique si les lignes de définition des moyeu et carter doivent être tracées ou non. Une commande ('M') est prévue pour faire basculer cette variable logique. La commande de fin ('F') rétablit les fenêtres antérieures d'affichage afin de retourner au programme dans le même état qu'à l'appel.

On notera que la procédure d'affichage 3D, de même qu'une des options de la fonction "zoom", permet de déterminer automatiquement une fenêtre légèrement plus grande que l'objet à y afficher.

Quant aux autres fonctions disponibles au menu, mentionnons seulement qu'elles ne font que modifier chacune quelques variables de contrôle en permettant à l'utilisateur d'entrer de nouvelles valeurs à l'aide soit du clavier (changer le niveau, modifier les paramètres d'affichage, changer la projection, "zoom" option de translation) ou des curseurs graphiques ("zoom" option de nouveau cadre).

### 3.2 LE RAFFINEMENT DU MODÈLE

#### 3.2-a L'utilisation

Ce second programme permet le raffinement de la définition

géométrique des objets par la répartition de nouveaux points, habituellement en plus grand nombre que les originaux, sur les profils déjà définis et, ensuite, la création par interpolation de profils intermédiaires supplémentaires.

Le squelette de ce programme étant le même que le précédent, les méthodes d'affichage des objets sont donc très semblables. Les mêmes fonctions relatives à l'affichage sont disponibles vu leur mise en commun par les deux programmes. (Fig. 26).

Dans un premier temps, un nombre égal de points sont répartis "naturellement" sur la ligne (profil) associée à chaque niveau, proportionnellement à la courbure locale de chacun de ces profils. La courbure est calculée en deux dimensions, à partir seulement des deux dernières coordonnées, afin d'éviter que des variations dans la première coordonnée (orientée du moyeu au carter) n'influence la distribution des nouveaux points. Un paramètre de concentration, fourni par l'utilisateur, permet de faire varier la répartition. On peut appliquer l'algorithme sur tous les profils à la fois (Fig. 27) ou les traiter séparément (Fig. 28).

Par la suite, à l'aide de ces nouveaux points, deux profils sont créés automatiquement, par extrapolation, à l'intersection de la pale avec le moyeu et avec le carter. La définition de la pale étant connue alors dans toute sa longueur, il n'y a plus qu'à créer l'autre ensemble de courbes pour compléter le quadrillage. Les points naturels, répartis selon la courbure de chaque profil, sont alors considérés comme des points d'intersection du maillage sur la pale, à l'aide desquels sont

calculées de nouvelles fonctions splines dans cette autre direction, une fonction de concentration (avec un paramètre variable fourni par l'utilisateur) est utilisée pour créer de nouveaux profils à partir des dernières splines calculées (Fig. 29).

Des possibilités supplémentaires viennent, entre autres, de deux symboles différents utilisés pour marquer les points originaux et ceux dont la répartition a été calculée sur chaque profil. On peut ainsi, selon l'état courant, afficher les deux ensembles de points (Fig.30), seulement l'un ou l'autre, ou aucun (Fig. 31). La courbe représentant le profil sera néanmoins toujours présente. On notera, en conséquence, que trois tableaux de points sont concurremment conservés en mémoire: les points originaux par lesquels les profils sont définis, les nouveaux points répartis sur ces profils, et ceux créés par l'interpolation de profils intermédiaires supplémentaires. On pourra ainsi, en tout temps, reprendre le choix des paramètres de concentration, afin d'influencer la disposition finale des points dans l'espace.

Une autre considération découle du même ordre d'idées, lors de l'affichage 3D. On a ainsi le loisir de "voir" soit les profils représentés par les points originaux, soit les mêmes profils mais représentés par les points naturels répartis selon la courbure, soit les nouveaux profils créés par interpolation (Fig. 32). On peut ainsi constater l'évolution du raffinement de la pale et modifier, s'il y a lieu, les différents paramètres de concentration.

Une dernière considération est celle relative à un point d'attaque défini sur chaque profil. Celui-ci provient de la nécessité de

préciser un bord d'attaque sur la pale, d'où sera issue une surface réglée jusqu'au plan d'entrée (voir section 2.1). Les points d'attaque pour chaque profil sont calculés automatiquement sitôt après l'évaluation des splines définissant les profils. Toutefois, l'emplacement de ce point crucial est modifiable de façon interactive par la suite (Fig. 33). Ce point particulier sera marqué par un symbole supplémentaire et sera toujours présent à l'écran avec le dessin d'un profil. C'est à partir de ce point que seront définis l'intrados et l'extrados du profil qui doivent recevoir chacun le même nombre de points naturels étant donné que l'on cherche à faire un maillage dans un canal borné par deux pales identiques. En conséquence, ce point fera toujours partie des nouveaux ensembles de points créés pour raffiner la définition géométrique de la pale.

### 3.2-b Le fonctionnement

La procédure de répartition des points naturels traite un seul profil à la fois. Elle calcule tout d'abord la courbure locale, à l'aide de deux coordonnées, du profil en chacun de ses points de définition. Cette courbure est obtenue à l'aide de l'expression de la dérivée seconde d'une fonction paramétrée et implique donc les coefficients des splines correspondant aux deux dernières coordonnées de chaque point. Disposant ainsi de la courbure en chaque point de définition du profil en fonction d'une approximation de la longueur d'arc séparant ce point et le premier du profil, on peut alors appliquer la méthode du trapèze pour trouver la valeur de l'intégrale de cette fonc-

tion pour une longueur d'arc donné. On tentera alors de répartir le nombre demandé de points naturels de telle façon que les longueurs d'arc les séparant sous-tendent tous la même aire sous la fonction définie à partir des courbures. Le paramètre de concentration impose son effet sur le calcul des courbures et correspond à une transformation linéaire (translation, dilatation) des valeurs qui seraient autrement trouvées. La seule contrainte est de faire en sorte qu'autant de points soient de part et d'autre du point d'attaque.

L'extrapolation permettant la création des deux profils extrêmes (sur le moyeu et le carter) est faite de façon fort simple, mais très pratique et efficace. Pour déterminer une projection du dernier profil d'un des deux bouts de la pale, sur la surface correspondante (le moyeu ou le carter), une droite est tirée à partir de deux points appartenant, l'un à ce profil et l'autre, à son profil voisin, jusqu'à l'intersection avec la surface de révolution. Le calcul de cette intersection demande la résolution d'un polynôme du troisième degré (à cause des splines définissant le moyeu et le carter) qui est faite de façon directe.

C'est avec la définition de nouvelles fonctions splines reliant moyeu et carter qu'est employée une fonction de répartition et de concentration de profils intermédiaires. Cette fonction dispose des points successivement sur chaque courbe définie par ces nouvelles splines, selon une formule correspondant à une application qui permet de concentrer à volonté les points vers les extrémités de la spline, c'est-à-dire près des moyeu et carter. Le paramètre autorise la varia-

tion de la concentration d'une situation où les points sont régulièrement espacés jusqu'à une où les points sont presque tous situés aux extrémités.

Une variable d'"état" indique, de plus, les points qui doivent être affichés avec le profil, à l'écran. Cette variable, à l'image de celles donnant la projection et le niveau courants, est modifiable en tout temps, directement par l'utilisateur.

Mentionnons enfin, en ce qui concerne le point d'attaque, que la façon "automatique" de trouver ce point tire son origine de la définition de celui-ci. Puisque dans chacun des trois systèmes de référence, la troisième coordonnée est toujours sensiblement dans la direction du courant et que le point de fuite est le point, facile à trouver, où "commence" le profil; le point d'attaque sera le point dont la différence entre sa troisième coordonnée et celle du point de fuite est la plus grande. Le point d'attaque, contrairement au point de fuite, ne sera pas nécessairement un des points de définition du profil mais bien le point correspondant à la valeur maximale ou minimale (selon l'orientation du profil) atteinte par la troisième coordonnée.

### 3.3 LA CONSTRUCTION D'UNE COQUILLE

#### 3.3-a L'utilisation

Lorsque la description géométrique de la pale est raffinée, l'étape suivante consiste à construire la coquille qui délimitera le canal interaube. Le domaine de calcul que constitue ce canal, sera borné par l'intrados et l'extrados de deux pales consécutives, quatre



surfaces réglées, les plans d'entrée et de sortie et les deux surfaces définies par le moyeu et le carter (Fig. 34). On notera que les deux pales et les surfaces réglées respectives qui en sont issues devront être identiques, à une translation près dans la direction de la deuxième coordonnée. Cette condition résulte de la nature même d'une turbine qui est une répétition périodique de la même pale. Il est ainsi suffisant de ne considérer qu'un seul canal compris entre deux pales voisines.

La construction de la coquille débute avec l'affichage des deux profils provenant de l'intersection de la pale avec le moyeu et le carter (extrémités de la pale). Ces profils sont dessinés, à l'intérieur chacun d'une portion de l'écran, sur un plan formé des deuxième et troisième coordonnées de leurs points (Fig. 35).

La première étape est de construire les deux surfaces réglées associées à une pale et, plus particulièrement, de définir l'intersection de ces surfaces avec le moyeu et le carter. La façon de procéder est de tracer des lignes, en suivant les surfaces du moyeu et du carter, qui partent des points d'attaque et de fuite des profils affichés, vers les plans d'entrée et de sortie, dans une direction donnée par l'utilisateur. Les projections de ces lignes, sur le plan formé des deuxième et troisième coordonnées, constituent en fait des segments de droite qui sont tracés à l'écran comme tels, tandis que la première coordonnée reflète plutôt la forme du moyeu et du carter. Cette dernière coordonnée est prise en charge par le programme qui fait automatiquement toutes les interpolations nécessaires afin d'assurer, dans cette direction, une distribution des points semblable à celle sur les bords de la pale.

L'utilisateur doit aussi donner deux longueurs représentant respectivement la distance, selon la troisième coordonnée, séparant le plan d'entrée ou de sortie du point d'attaque ou de fuite du profil situé sur le moyeu, en terme d'unités de sa corde. (La corde d'un profil est le segment qui relie son point d'attaque et son point de fuite.) Les plans d'entrée et de sortie sont placés de telle façon que tous les points appartenant à un plan aient la même troisième coordonnée. Dans les repères cartésien et cylindrique, les deux plans sont alors parallèles; tandis qu'en coordonnées toroïdales, ils sont à angle. Il est donc suffisant que l'utilisateur précise la distance, selon la troisième coordonnée, du plan d'entrée ou de sortie au bord d'un profil pour que la position des plans soit connue (Fig. 36).

Le segment de droite qui forme l'arête d'une surface réglée sur le plan d'entrée ou de sortie est alors bien défini et des points y sont répartis selon une distribution semblable à celle des bords de la pale. Les lignes (segments de droite dans le plan des deuxième et troisième coordonnées) issues des profils intermédiaires peuvent dès lors être créés en reliant le point d'attaque ou de fuite d'un profil au point du niveau correspondant sur le plan d'entrée ou de sortie.

Enfin, des points sont répartis sur chaque segment de droite créé, selon deux paramètres de concentration (un pour l'attaque, un pour la fuite) fournis par l'utilisateur (Fig. 37). Ce dernier n'a toutefois pas à donner le nombre de points puisque le programme le détermine lui-même. L'espacement entre le premier point sur la surface réglée et le point adjacent sur le profil doit être semblable à l'espacement des points voisins sur le profil. De plus, la distance entre les points doit augmenter, en

s'éloignant de la pale, par un facteur égal à  $(1 + \text{concentration})$ .

Précisons que le programme "reconnaît" le bord de fuite et le bord d'attaque de la pale et qu'en conséquence, celle-ci peut être orientée indifféremment dans un sens ou dans l'autre, c'est-à-dire selon le sens du courant. Différents tests sont aussi présents afin de prévenir que les segments de droite spécifiés par l'utilisateur, pour la génération des surfaces réglées, soient trop longs et débordent les courbes de définition du moyeu ou du carter.

La seconde étape consiste à donner une certaine largeur au canal en spécifiant le décalage entre deux pales successives. L'utilisateur donnera le nombre total de pales sur la turbine (Fig. 38) c'est-à-dire, de façon indirecte, la distance entre deux pales. Dans le cas de système de coordonnées cylindrique ou toroïdale, le décalage sera de  $(2\pi)/(\text{nombre de pales.})$  Afin d'uniformiser, on a convenu d'adopter le même calcul dans le cas cartésien, en permettant toutefois une valeur éventuellement non entière comme nombre de pales pour que la distance entre les deux pales, selon l'axe des "y", puisse être quelconque.

Des points sont par la suite répartis sur la distance inter-aube selon, encore, un paramètre (fourni par l'utilisateur) de concentration près des parois (Fig. 39). Tous les autres points sur la coquille sont alors déduits par interpolation de ceux déjà connus.

On notera que le calcul d'une nouvelle fenêtre d'affichage est fait automatiquement par le programme au fur et à mesure que l'utilisateur progresse dans la création de la coquille.

Il est de plus possible, après l'entrée d'un groupe de paramètres et la visualisation de leur influence sur l'objet, de recommencer

chaque étape afin de changer certains paramètres au lieu de poursuivre dans le déroulement du programme (Fig. 40). On peut ainsi "remonter" n'importe quand la séquence d'opérations pour recommencer une ou plusieurs étapes passées de la construction de la coquille avec de nouvelles valeurs.

### 3.3-b Le fonctionnement

La première étape est de générer deux surfaces réglées, issues respectivement du bord d'attaque et du bord de fuite d'une même pale. Le programme calcule tout d'abord les deuxième et troisième coordonnées de tous les points de ces surfaces, c'est-à-dire successivement: les quatre points correspondant aux bornes des deux segments de droite situés à l'intersection des surfaces sur les plans d'entrée ou de sortie (en utilisant les angles et les longueurs donnés par l'utilisateur), tous les points de ces deux segments de droite (par interpolation linéaire entre le moyeu et le carter), puis tous les autres points des surfaces (pour chaque niveau, à partir de la pale vers les plans d'entrée ou de sortie, en respectant les concentrations demandées par l'utilisateur). Par la suite, est calculée la première coordonnée des points situés à l'intersection des surfaces avec le moyeu ou le carter (en déterminant, pour chaque coordonnée troisième déjà calculée, la valeur du paramètre de la spline décrivant la coordonnée troisième des points de définition du moyeu ou du carter; puis en introduisant cette valeur dans celle décrivant la coordonnée première). Enfin, la première coordonnée de tous les autres points situés entre le moyeu et le carter, sur les surfaces réglées, est obtenue (par interpolation linéaire entre moyeu et carter).

La procédure de résolution des polynômes de troisième degré, afin de trouver la valeur du paramètre, est la même que celle utilisée dans le programme de raffinement de la pale, pour trouver l'intersection de la pale avec les surfaces des moyeu et carter.

La seconde étape consiste d'abord à créer une seconde pale en décalant la première et ses deux surfaces réglées dans la direction de la deuxième coordonnée, d'une distance établie d'après le nombre de pales spécifié par l'utilisateur ( $2\pi$  / nombre de pales). L'intrados d'une pale, avec les surfaces réglées, et l'extrados de l'autre, avec les mêmes surfaces mais décalées, forment ainsi des bornes du canal. Les première et troisième coordonnées des autres points situés entre ces limites, sur les plans d'entrée et de sortie et à la surface des moyeu et carter, sont alors calculées par interpolation entre les pales et entre les surfaces réglées. La deuxième coordonnée est ensuite calculée à l'aide d'une fonction de concentration identique à celle utilisée, dans le raffinement de la pale, pour créer des profils intermédiaires.

On se rappellera cependant que tous ces calculs ne sont pas effectués lors de la construction de la coquille, mais bien seulement lors de son utilisation subséquente pour y créer un maillage. Quoique simples, certains calculs sont toutefois requis pour l'affichage des coordonnées de certains points (coordonnées deuxième et troisième des points à la surface du moyeu ou du carter).

### 3.4 LA CRÉATION D'UN MAILLAGE ADAPTÉ

#### 3.4-a L'utilisation

Après la construction d'une coquille, la dernière étape est la génération d'un maillage adapté. L'approche proposée par certains auteurs [ 1, 2 ] pour établir la relation (cf section 2.1) entre l'espace physique délimité par la coquille et un domaine de calcul plus simple, consiste à résoudre un système d'équations elliptiques, non linéaires et couplées, avec autant d'équations que la dimension de l'espace considéré (trois, dans le cas présent). Ces équations décrivent, en fait, les transformations subies par un parallépipède rectangle qui serait étiré et déformé jusqu'à adapter la forme du canal. La solution du système d'équations permet donc d'introduire un système de coordonnées curviligne où le canal devient un simple parallépipède rectangle. Les équations de la mécanique des fluides, exprimées dans ce nouveau repère curviligne, peuvent alors être résolues par des méthodes discrètes (éléments finis, différences finies), sur un maillage composé de points régulièrement disposés dans ce repère. Ces points sont l'intersection de surfaces de coordonnées curvilignes constantes et espacées de façon uniforme.

La résolution numérique d'équations elliptiques est réalisée par une méthode itérative et, afin d'accélérer le processus de convergence, on y inclut une technique de relaxation (Gauss-Seidel).

Même si la génération d'un maillage adapté demande beaucoup de calculs, l'interaction avec l'utilisateur est cependant minimale. Celui-ci contrôle le déroulement du programme à l'aide de deux paramètres: le nombre d'itérations successives à compléter et un facteur de relaxation " $\omega$ ". Après chaque itération, le résidu est affiché à l'écran afin de lui permettre de suivre l'évolution de la solution. Ainsi, en se

basant sur les valeurs de la norme du résidu, il pourra demander, à chaque fois que le nombre déjà spécifié d'itérations est atteint, de poursuivre les calculs à partir de la solution courante en entrant deux nouveaux paramètres (Fig. 41). Il peut ainsi exercer une influence sur la convergence de la méthode, en changeant la valeur du facteur de relaxation ( $0 < \omega < 2$ ). Ce procédé interactif se continuera jusqu'à ce que l'utilisateur considère la solution satisfaisante, c'est-à-dire ayant un résidu assez petit, en quel cas, aucune itération supplémentaire ne sera demandée. Il lui sera alors loisible de visualiser les résultats immédiatement d'une façon très simple (en dessinant, l'un après l'autre, toutes les surfaces de coordonnées curvilignes du maillage) ou avec plus de réalisme en s'en remettant à l'utilisation subséquente d'un progiciel spécialisé (MOVIE.BYU).

### 3.4-b Le fonctionnement

L'affectation de valeurs initiales aux points intérieurs du canal constitue une première étape qui est faite par simple interpolation linéaire des coordonnées entre les parois contenant deux pales successives. Tout autre paire de surfaces aurait pu être choisie, celle-ci convenant toutefois le mieux au présent problème.

En deuxième étape, les conditions frontières sont imposées afin de déterminer les "termes forcés", c'est-à-dire les valeurs à donner à certains termes du système d'équations pour que soit respectée la répartition des points sur les frontières. Les termes forcés correspondant aux première et troisième coordonnée sont trouvés à partir des surfaces contenant les pales, tandis que ceux correspondant à la deuxième

coordonnée sont trouvés à partir des surfaces du moyeu et du carter. Ils sont par la suite interpolés linéairement dans tout le domaine afin d'y créer, en résolvant le système, une concentration semblable à celle aux frontières.

Les étapes suivantes consistent à effectuer les itérations demandées par l'utilisateur et nécessaires à la résolution numérique du système par la méthode des différences finies. Cette dernière est appliquée sur tout un bloc de points à la fois, orienté entre les deux pales ou leurs prolongements, et dont la position varie d'abord du plan de sortie au plan d'entrée et du moyeu au carter. Chaque mise à jour d'un bloc de points nécessite la construction d'une matrice tridiagonale et la résolution du système linéaire d'équations correspondant.

Tous les calculs sont exécutés dans le repère curviligne et, à la fin de chaque itération, la moyenne quadratique des résidus ponctuels est affichée à l'écran avec le numéro de séquence de l'itération.

On trouvera plus de précisions sur les équations à résoudre, les manipulations nécessaires et la méthode de programmation, dans les références à ce sujet [ 8 ] .

### 3.5 L'AFFICHAGE PAR UN PROGICIEL SPÉCIALISÉ

Un dernier programme, enfin, provient de la nécessité de transformer la structure de données utilisée pour décrire les objets en une qui soit acceptable par le progiciel MOVIE (employé pour un réalisme plus grand dans la visualisation des résultats de chaque programme).



Ce "post-processeur" ne fait qu'exprimer dans un repère cartésien (en effectuant les conversions, s'il y a lieu), les coordonnées des points décrivant les objets, de même que décrire les relations entre les points permettant de dessiner l'objet à partir seulement de surfaces triangulaires ou quadrilatères, dans un format compatible avec MOVIE.

Mentionnons simplement que l'utilisateur n'a qu'à fournir interactivement les noms des fichiers à lire et à écrire, (Fig. 42) et que le programme s'occupe de faire toutes les manipulations nécessaires à la conversion telles qu'entre autres reconnaître le type des objets traités.

### 3.6 CARACTÉRISTIQUES GLOBALES SUPPLÉMENTAIRES

#### 3.6-a Utilisation des programmes

Quelques précisions restent encore à apporter quant à l'emploi des programmes. Mentionnons tout d'abord que les divers paramètres de concentration utilisés par les programmes varient tous à l'intérieur d'un même intervalle  $[0,1]$ ; 0 donnant une distribution uniforme et 1, un maximum de concentration) afin d'assurer une certaine régularité. Plus encore, une valeur donnée produira toujours à peu près la même distribution dans tous les algorithmes de concentration (des points naturels sur un profil, des profils intermédiaires entre moyeu et carter, des points sur les surfaces réglées et des points sur la distance interaube). Une telle calibration permet alors à l'utilisateur d'apprendre assez rapidement à connaître l'effet des paramètres de concentration

et ainsi être en mesure d'obtenir la répartition désirée sans perte inutile de temps.

La validation des intrants est une particularité essentielle pour des programmes à caractère hautement interactif. En conséquence, tous les intrants fournis interactivement font donc l'objet de tests divers et des messages d'erreur ont été prévus à l'intention de l'utilisateur, dans les cas de commandes inexistantes, de valeurs hors-limites ou, tout simplement, de données incompréhensibles par un programme. Rappelons en outre la présence, au début de chaque fichier composant la base de données, d'un enregistrement d'identification. La validation de ce dernier permet de se prémunir contre l'utilisation d'un fichier servant normalement à d'autres applications (absence d'un tel enregistrement) ou, encore, d'un fichier contenant la description d'un objet autre que celui escompté (identification de format correct mais décrivant un objet différent). Un message approprié est aussi prévu lorsque le nom donné par l'utilisateur ne correspond à aucun fichier dans la librairie (fichier inexistant).

Une protection particulière est accordée aux données dans le programme de conception du modèle. L'élimination de profils formant la description géométrique d'une pale est toujours effectuée un seul profil à la fois avec confirmation, de la part de l'utilisateur, de l'action-entreprise. De même, la fin du programme doit aussi être confirmée par l'utilisateur.

Soulignons aussi l'emploi, par tous les programmes, de deux mêmes procédures de gestion des fichiers. Cette centralisation rend

dès lors le logiciel plus portable puisque les énoncés contrôlant l'utilisation dynamique de fichiers sont tous regroupés. De même, les normes employées de programmation structurée combinées à un langage standard (Fortran-77) permettent d'assurer finalement d'assez bonnes caractéristiques de portabilité.

### 3.6-B Possibilités et restrictions

Certains aspects du problème initial ont été traités très généralement afin de permettre un élargissement futur des logiciels présentés. Une première possibilité importante est celle de pouvoir raffiner, sans problème, la description géométrique d'une pale sans nécessairement définir la présence d'un point d'attaque. La version proposée du programme possède en effet cette capacité quoiqu'elle n'apparaisse pas au menu. Le programme de construction de la coquille étant basé sur la présence d'un bord d'attaque, on a voulu éliminer toute tentative de créer une pale n'en ayant pas. Cette alternative de ne pas toujours définir un bord d'attaque est justifiée par l'emploi, dans certains programmes de mécanique des fluides, de maillages de types différents (en C, en O, ... Fig. 43). Ces maillages ne requièrent pas nécessairement le même nombre de points naturels sur l'intrados que sur l'extrados d'un profil. Ce dernier est alors traité en une seule partie et des points sont librement répartis sur tout son contour (sans la restriction voulant qu'un des points naturels soit le point d'attaque).

Une seconde possibilité fort intéressante est celle de concevoir et raffiner la description d'une pale comprenant des profils non fermés, c'est-à-dire un bord de fuite ne consistant pas en une

arête aiguë mais plutôt en une mince bande laissant place, en aval, à un sillage où certains phénomènes sont concentrés. Le programme de conception permet donc la création et la modification de tels profils qui souvent correspondent en fait à des profils fermés dont on aurait tronqué une partie (Fig. 44). Le programme de raffinement rendra alors possible la répartition de points naturels sur ces profils. La construction de la coquille et la génération d'un maillage demanderait simplement que l'on s'entende sur la façon de créer les surfaces réglées qui seraient alors dédoublées et peut-être même non parallèles. Ces deux derniers programmes pourraient alors être adaptés en conséquence du traitement à accorder à la zone de sillage créée en aval du profil.

Un aspect du problème qui ne fut pas traité dans le programme de conception du modèle est celui de la définition de pale qui dépasserait celles du moyeu ou du carter, c'est-à-dire de l'existence d'un ou plusieurs profils à l'extérieur de l'intervalle entre le moyeu et le carter. Une façon d'exploiter ce qui pourrait être considéré comme une anomalie de conception serait d'interpoler, plutôt que d'extrapoler, un profil à la surface du moyeu ou du carter. Au lieu de tenter un prolongement de la pale, cette méthode s'assimilerait à un algorithme d'intersection, dans l'espace, entre deux surfaces.

Une dernière note, enfin, pour préciser que la résolution des équations différentielles pour la génération d'un maillage adapté produit des résultats différents, pour un même canal, selon le système de coordonnées utilisé. L'utilisateur devra donc baser le choix du repère

sur les caractéristiques générales du maillage recherché. On remarquera, toutefois, que les propriétés les plus souvent désirées sont justement obtenues en employant les repères appropriés aux types de turbines tel que suggéré à la section 2.4. (1) On adjoint alors à la facilité de conception d'une turbine à l'aide d'un repère adéquat, la conclusion heureuse d'un maillage "bien" adapté.

---

(1) Un système de coordonnées curviligne qui suit l'écoulement produit aussi un très bon maillage, mais demande une analyse préliminaire bi-dimensionnelle du canal.

CHAPITRE IV  
RÉSULTATS ET CONCLUSION

Ce dernier chapitre a pour but de présenter quelques exemples de conception de turbines et de préparation d'un maillage adapté.

4.1 CONCEPTION ET RAFFINEMENT DES MODELES

Les caractéristiques principales de cinq modèles, conçus et raffinés par les programmes décrits auparavant, sont montrées dans les tableaux suivants:

Tableau 1 : Caractéristiques des modèles conçus

Modèle	1	2	3	4	5
Repère employé	cart *	toro	toro	cyli	cyli
Nombre total de niveaux	4	9	9	9	9
Nombre moyen de points par niveau	11	37	37	37	37
Nombre de points pour la définition du moyeu	4	33	33	34	44
nombre de points pour la définition du carter	5	33	33	33	39

NOTE: Le modèle 1 a été créé à partir de points entrés à l'écran, tandis que les modèles 2 et 3 (type KAPLAN et FRANCIS) proviennent de turbines déjà existantes. Les modèles 4 et 5 ont été tirés du modèle 2 (KAPLAN) en modifiant leurs moyeu et carter afin de fournir un exemple d'un groupe-bulbe.

Tableau 2: Caractéristiques des modèles raffinés.

Modèle	1	2	3	4	5
Nombre de points naturels par niveau	31	41	41	41	41
Concentration des points naturels	.3	.4	.4	.3	.3
Nombre de niveaux insérés entre le moyeu et le carter	6	10	10	9	9
Concentration des niveaux vers les parois	.3	.2	.2	.3	.3

Les figures 45 à 49 montrent des images produites par le logiciel MOVIE, des turbines modélisées. Pour un plus grand réalisme, les images de certains modèles ont été produites avec plus qu'une seule pale. On notera, en contrepartie, qu'on distingue alors moins bien les limites du moyeu (en particulier pour une turbine de type FRANCIS). Trois couleurs différentes ont été choisies afin d'être en mesure de bien identifier les pales, le moyeu et le carter (ce dernier montré en transparence).

## 4.2 Construction des coquilles

Des coquilles, telles que définies à la section 2.1, ont ensuite été construites pour les modèles 1, 2 et 3, en utilisant les paramètres suivants:

Tableau 2: Caractéristiques principales des coquilles

Modèle	1		2		3	
Angles directeurs sur le moyeu (bas; attaque et fuite)	-10	0	-70	-75	-25	-65
Angles directeurs sur le carter (haut; attaque et fuite)	10	5	-70	-75	-25	-65
Longueurs, en terme des cordes des profils, pour la création des surfaces réglées (attaque et fuite)	.8	.8	.7	.6	.4	1.1
Concentration des points sur les surfaces réglées (attaque et fuite)	.25	.2	.1	.1	.1	.1
Nombre de pales	1.6		4		8	
Nombre de points interaube	9		9		8	
Concentration des points interaube	.3		.1		.1	

Les figures 50 à 52 montrent des photos des images (produites par MOVIE) de ces coquilles vues sous quelques angles différents. Afin de saisir un peu mieux la position et la forme de chacun de ces canaux



interaubes, le moyeu au complet est présent dans chaque image mais presque complètement transparent. Les couleurs employées pour identifier les parties de la turbine dans la série de photos précédentes ont été retenues tandis que deux nouvelles teintes identifient les surfaces réglées et les plans d'entrée et de sortie.

#### 4.3 Création de maillages adaptés

Des maillages adaptés ayant été créés à l'intérieur des trois coquilles construites, les figures 53 à 55 montrent les surfaces de coordonnées de ces maillages. On y présente, d'une part, les surfaces entre le moyeu et le carter et, d'autre part, les surfaces entre le plan d'entrée et le plan de sortie. Pour le premier modèle, on a respectivement dessiné toutes les surfaces et une surface sur deux, tandis que pour les deuxième et troisième modèles, on a dessiné, dans toutes les images, une surface sur trois.

#### 4.4 Possibilités supplémentaires

Ce logiciel a été créé avec l'intention d'aider à la modélisation et à l'étude des turbines. Les programmes demeurent toutefois assez versatiles et, si l'on fait abstraction dans les menus de la terminologie directement reliée aux turbines, il devient possible de modéliser facilement d'autres genres d'objets. A titre d'exemple, la figure 56 montre une image où la pale est devenue une quille de bateau, tandis que le moyeu est plutôt considéré comme un bulbe attaché à la quille.

RÉFÉRENCES

1. THOMPSON, J.F., "Numerical Solution of Flow Problems using Body-Fitted Coordinate Systems". Lecture Series 1978-4, Computational Fluid Dynamics, March 13-17, 1978.
2. GARON, A., CAMARERO, R., "Generation of Surface-Fitted Coordinate Grids". Advances in Grid Generation, FED, Vols, Editor: K.N. Ghia, p 117-122, 1983.
3. CAMARERO, R., REGGIO, M., "Three-Dimensionnal Body-Fitted Coordinates for Turbomachine Applications". Computers in Flow Predictions and Fluid Dynamics Experiments, Editor: K.N. Ghia, T.J. Muller, and B.R. Patel, p 51-57, 1981.

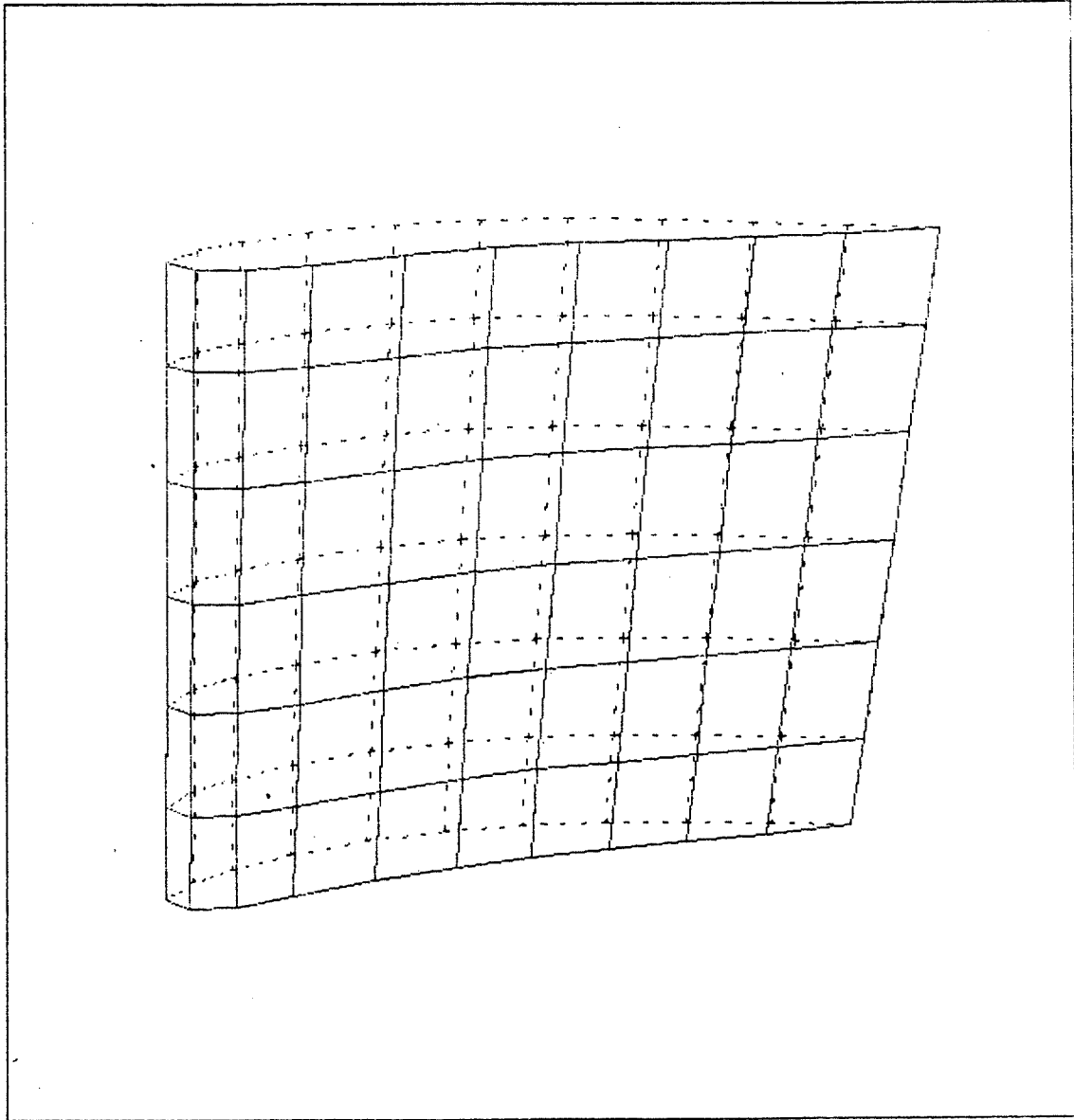


Figure 1: Caractérisation d'une pale par deux ensembles de courbes à sa surface

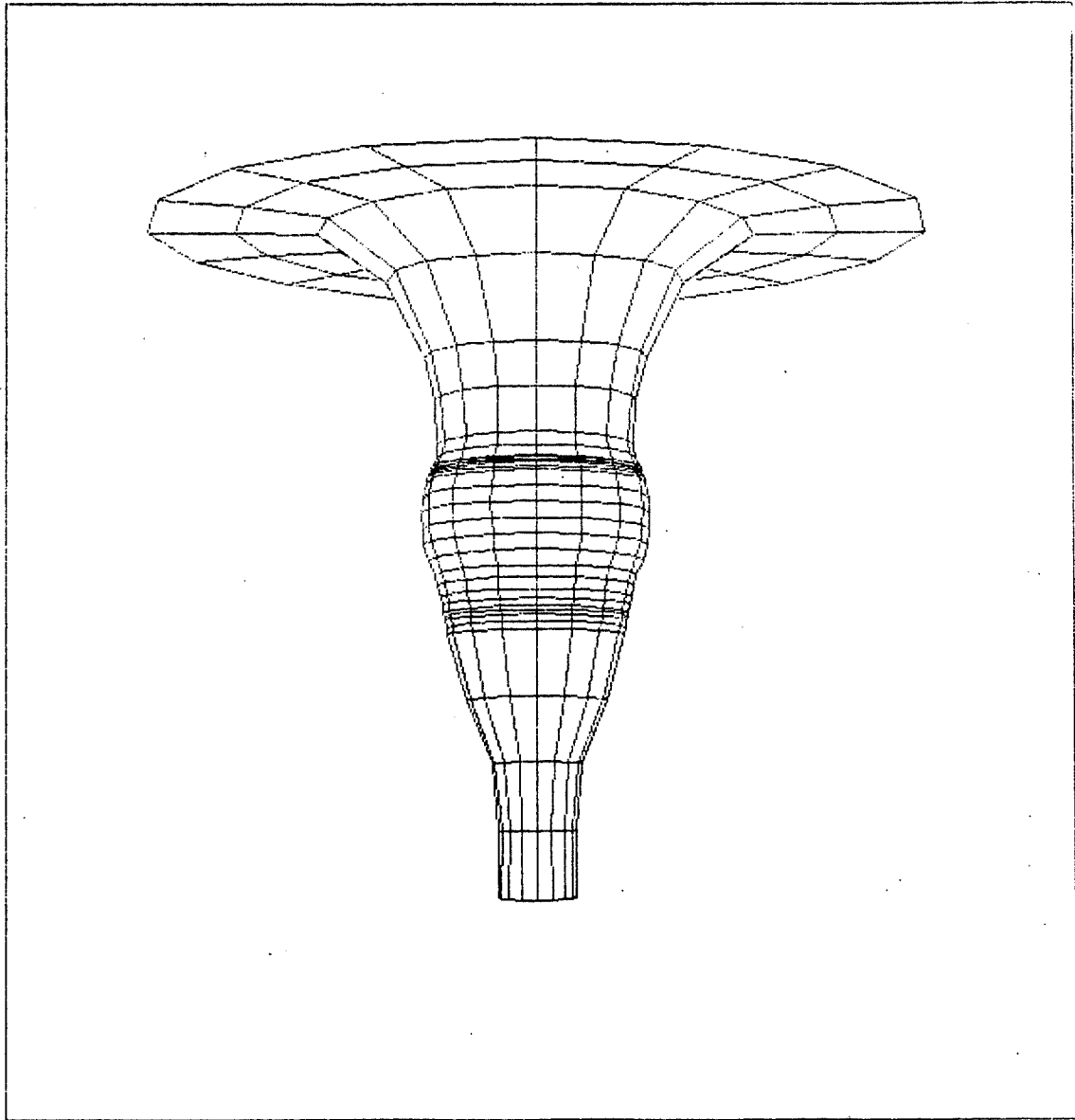


Figure 2: Caractérisation d'un moyeu par une surface de révolution

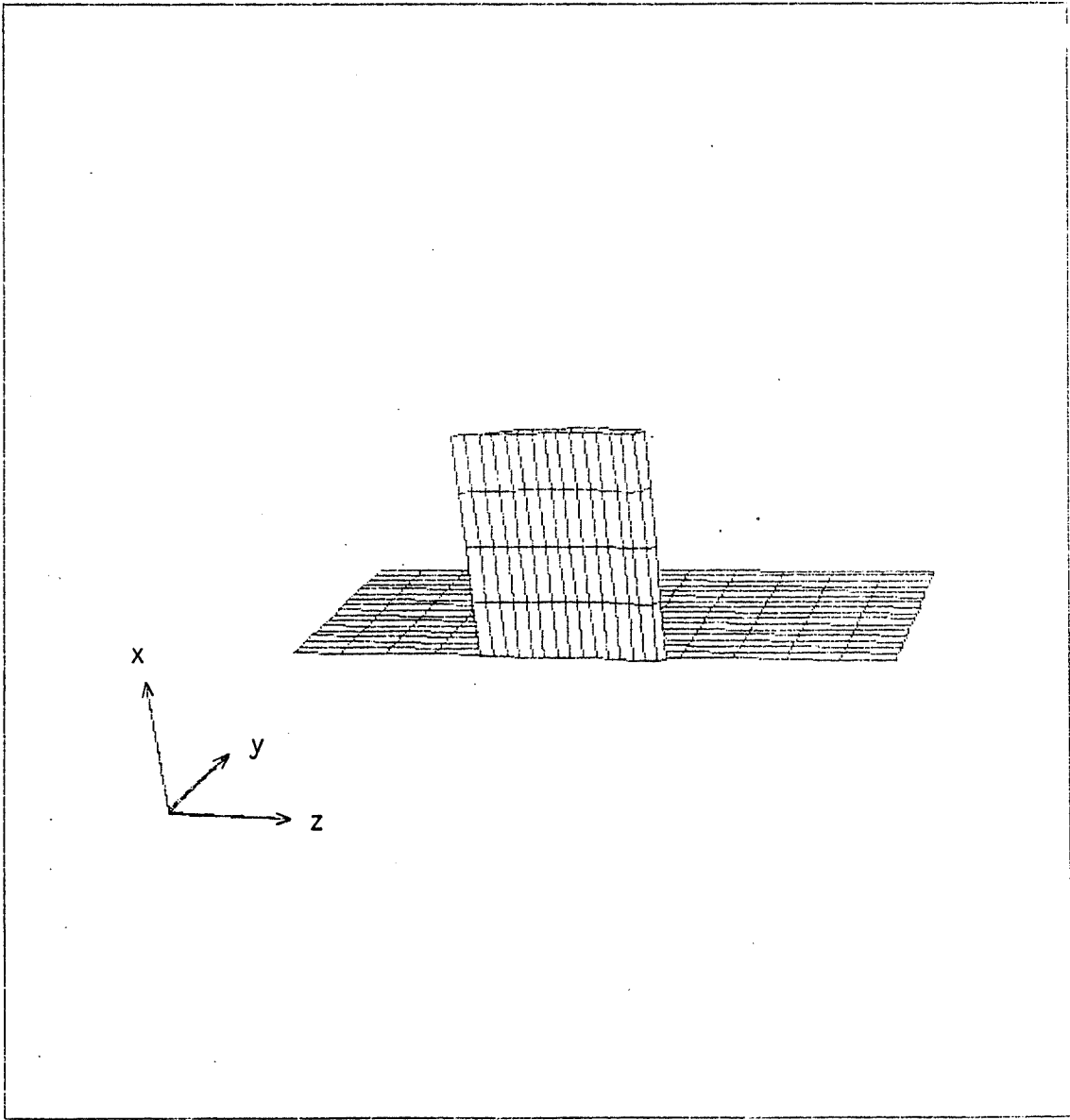


Figure 3: Position des éléments de la turbine dans un repère cartésien

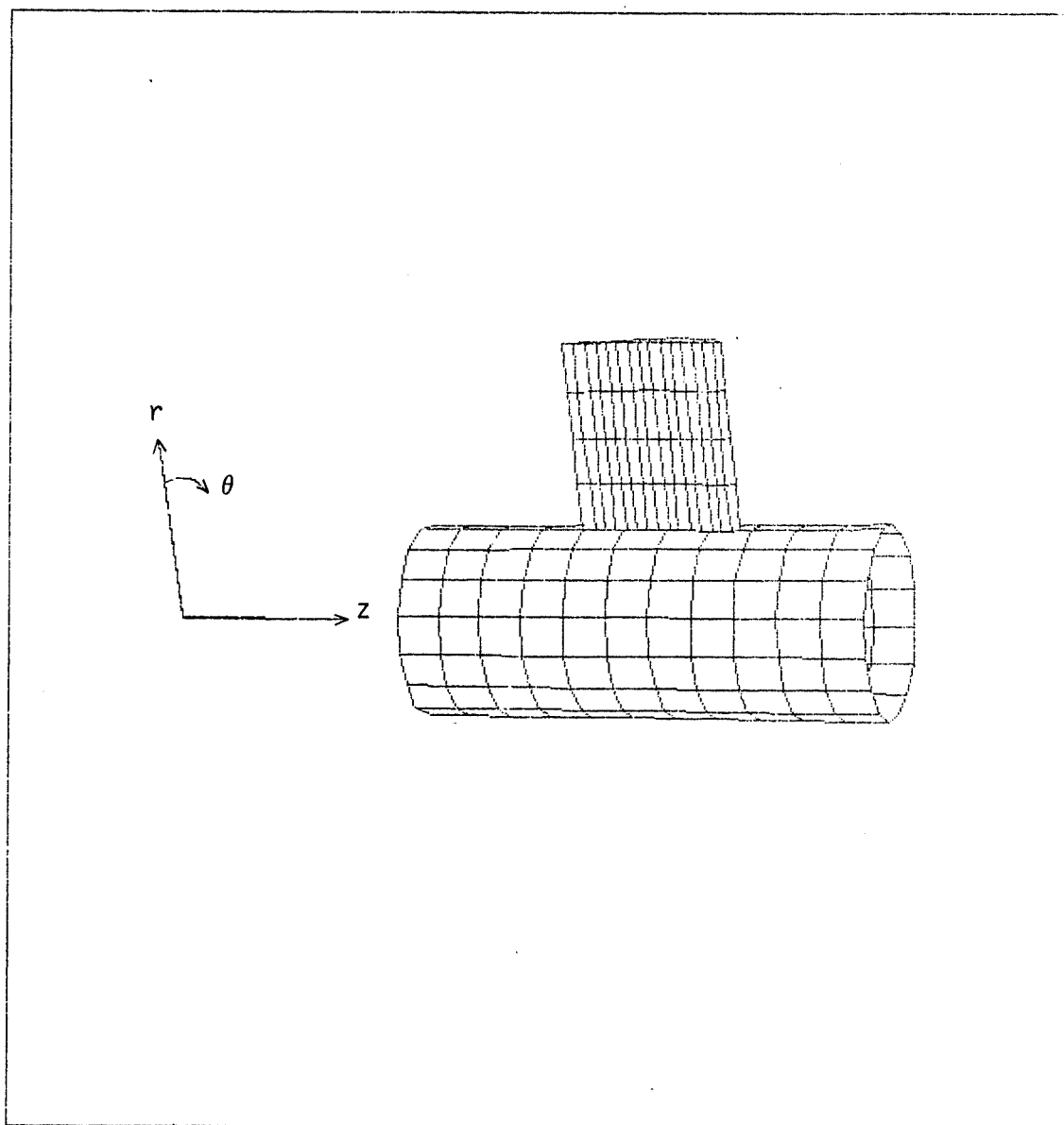


Figure 4: Position des éléments de la turbine dans un repère cylindrique

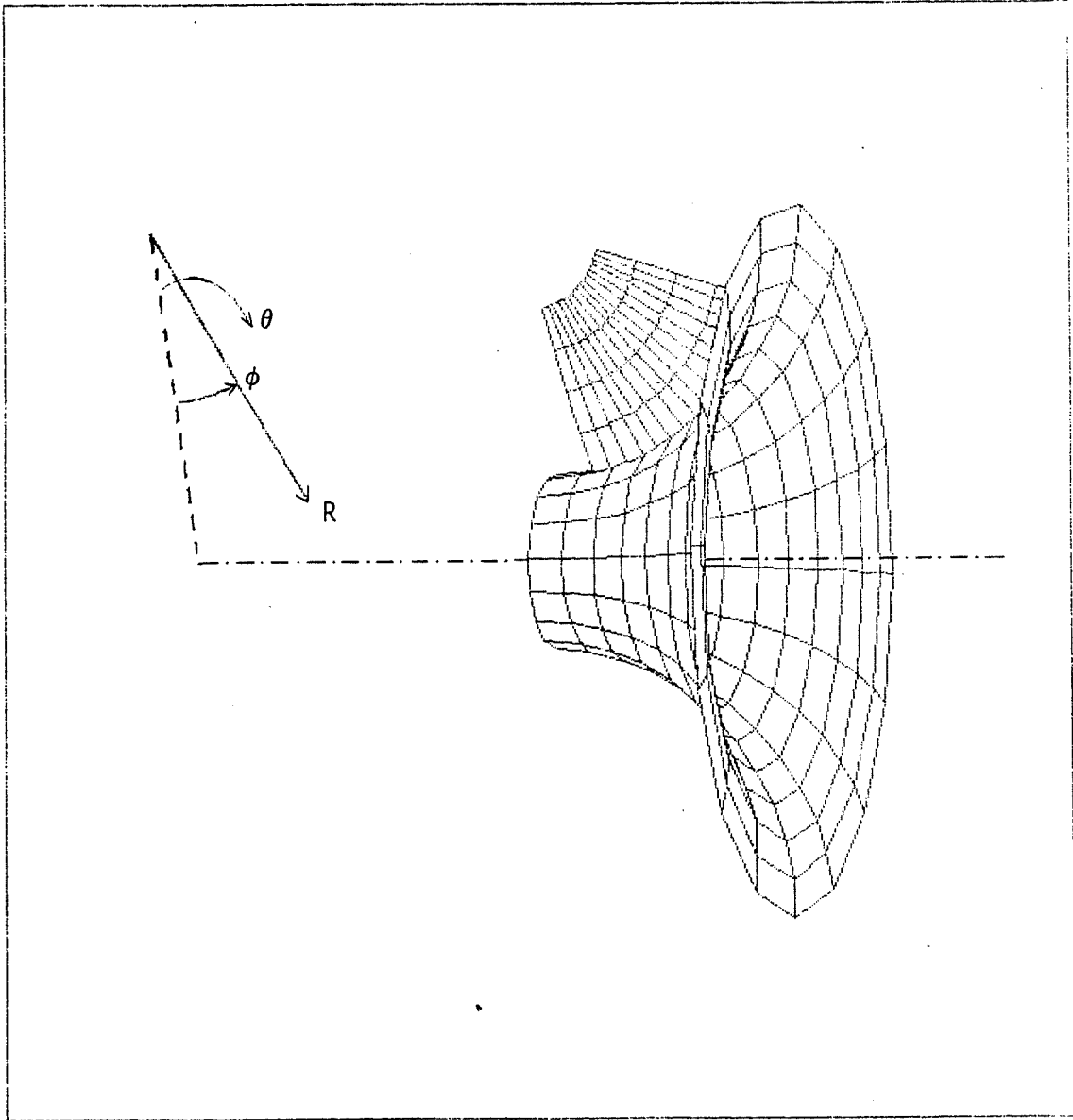


Figure 5: Position des éléments de la turbine dans un repère toroidal

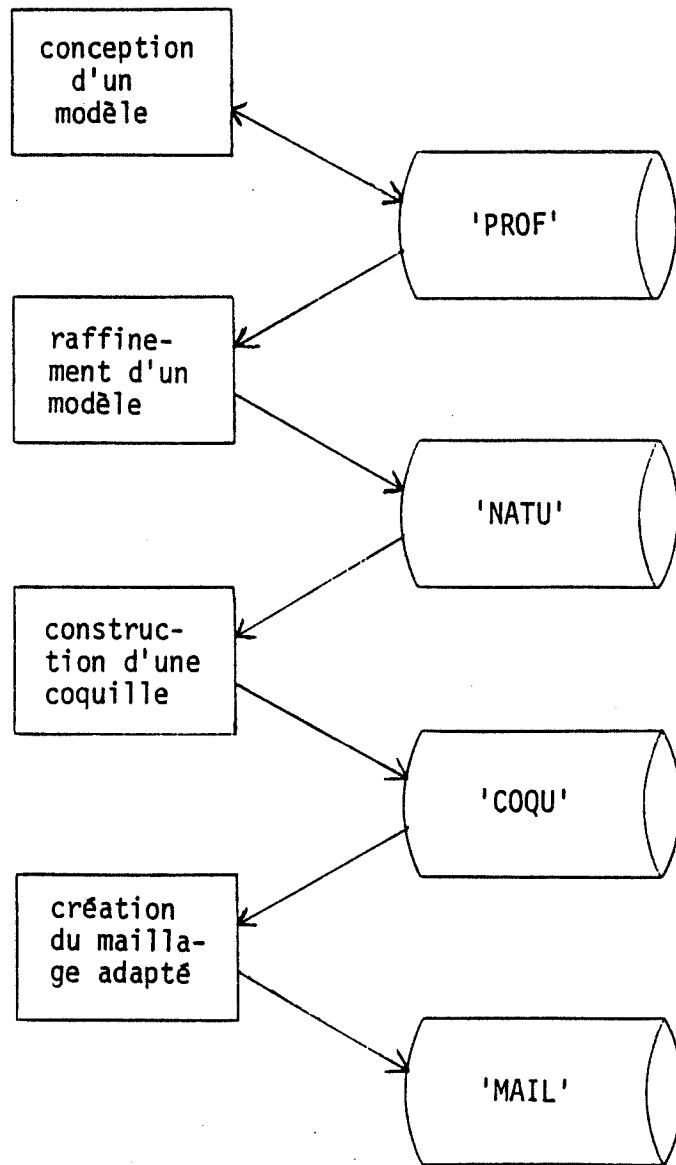


Figure 6: Utilisation des fichiers par les programmes



- Q CREER PROFIL
  - 1 MOD. MOYEU CARTER
  - 2 MODIFIER PROFIL
  - 3 MISE A L' ECHELLE
  - 4 ZOOM
  - 5 LIRE PROFILS
  - 6 ECRIRE PROFILS
  - 7 COPY PROFIL
  - 8 MOUE PROFIL
  - 9 CHANGER NIVEAU
  - A AFFICHAGE 3D
  - M MODIFIER PARAM.
  - T TRANSLATION
  - R ROTATION
  - F FIN
  - P CHANGER PROJECT.
- ...CHOIX

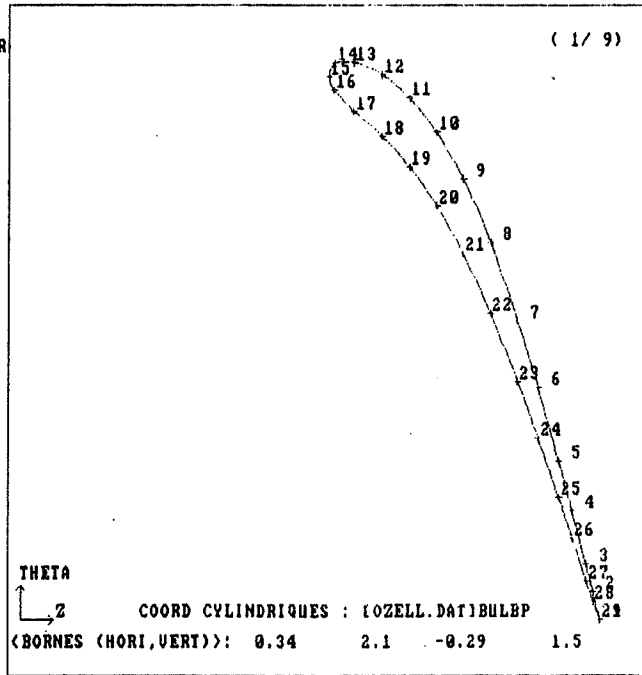


Figure 7: Menu du programme de conception d'un modèle

0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOUE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 I TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

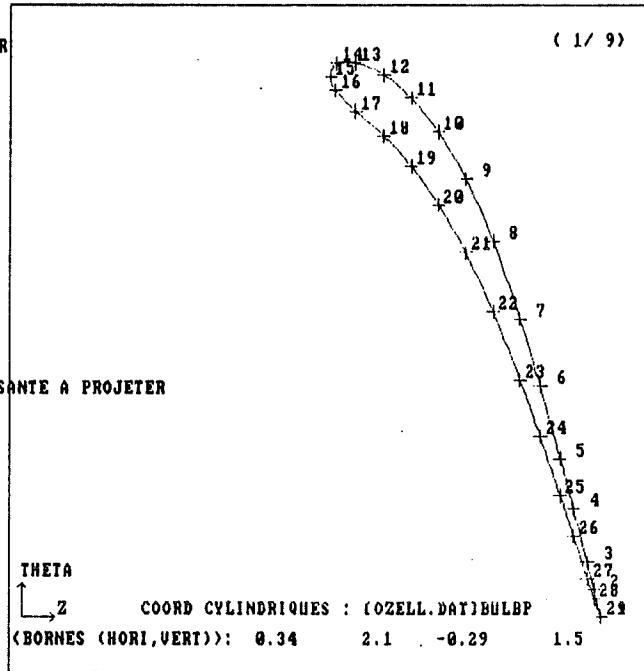
...CHOIX

P

CHOIX DE LA COMPOSANTE A PROJETER

1-R 2-THETA 3-Z

2



0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOUE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 I TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

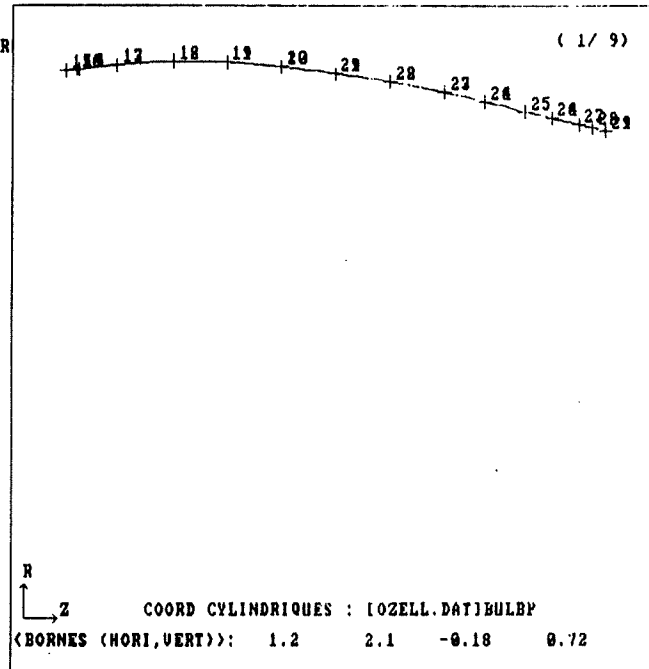


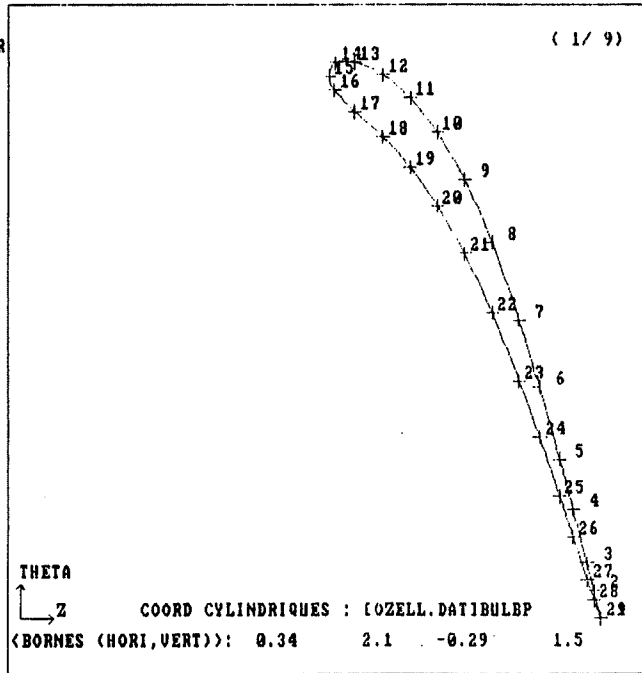
Figure 8: Changement de projection

0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOUVEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 I TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
9

NIVEAU : 1/ 9

NOUVEAU...  
6



0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOUVEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 I TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

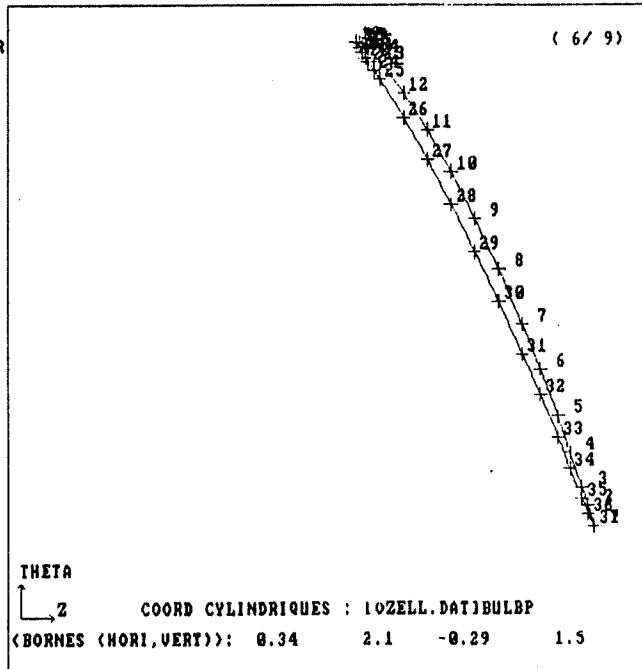
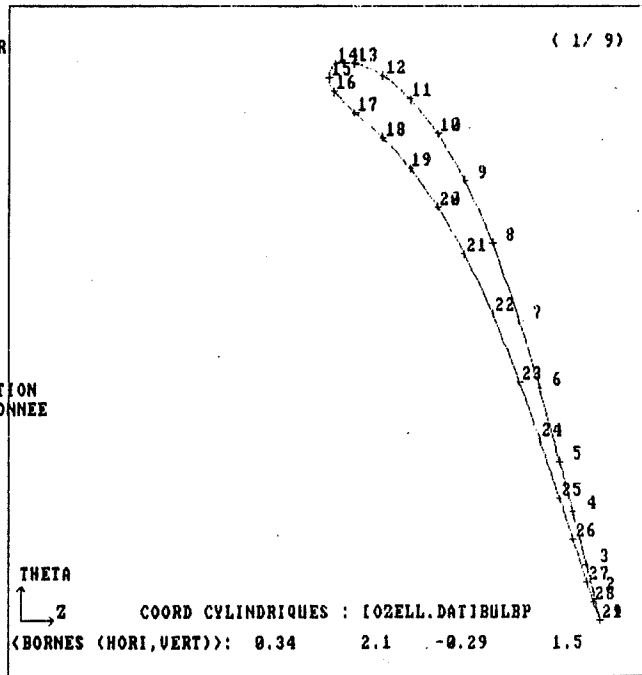


Figure 9: Changement de niveau

- Q CREER PROFIL
- 1 MOD. MOYEU CARTER
- 2 MODIFIER PROFIL
- 3 MISE A L'ECHELLE
- 4 ZOOM
- 5 LIRE PROFILS
- 6 ECRIRE PROFILS
- 7 COPY PROFIL
- 8 MOUE PROFIL
- 9 CHANGER NIVEAU
- A AFFICHAGE 3D
- M MODIFIER PARAM.
- T TRANSLATION
- R ROTATION
- F FIN
- P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

- 3
- FACTEUR DE DILATATION
- EN ABCISSE ET ORDONNEE
- 1.0 0.7



- Q CREER PROFIL
- 1 MOD. MOYEU CARTER
- 2 MODIFIER PROFIL
- 3 MISE A L'ECHELLE
- 4 ZOOM
- 5 LIRE PROFILS
- 6 ECRIRE PROFILS
- 7 COPY PROFIL
- 8 MOUE PROFIL
- 9 CHANGER NIVEAU
- A AFFICHAGE 3D
- M MODIFIER PARAM.
- T TRANSLATION
- R ROTATION
- F FIN
- P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

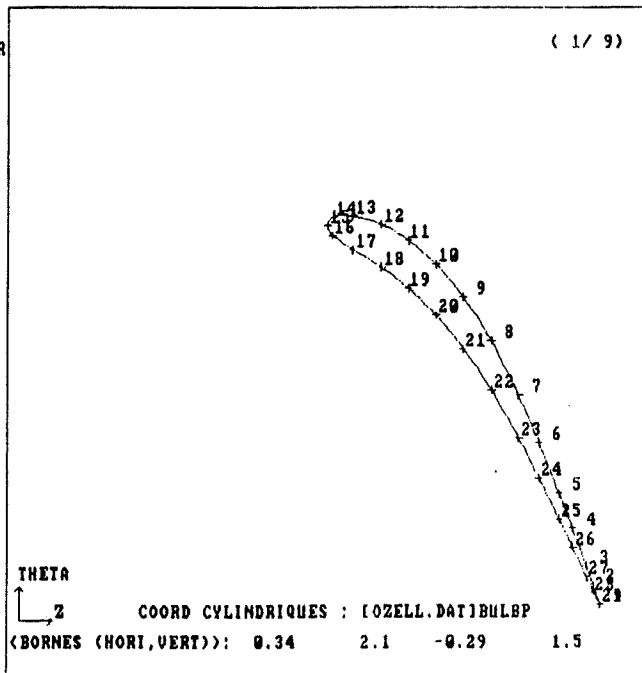
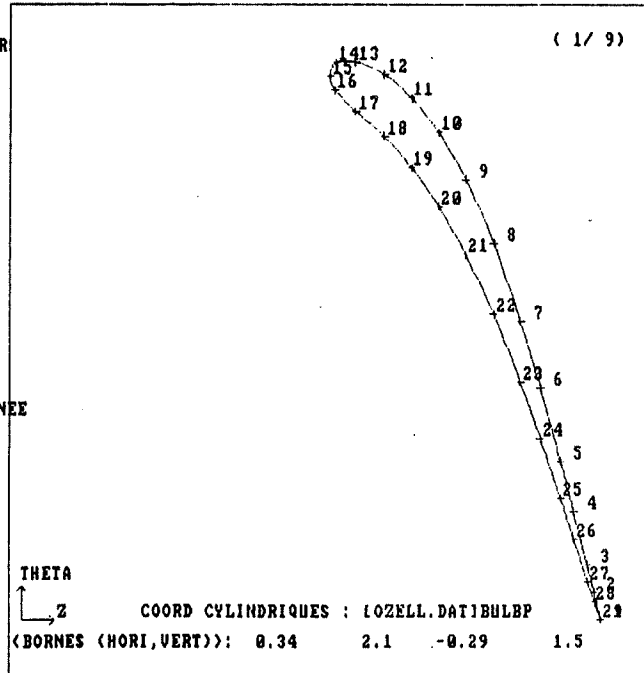


Figure 10: Mise à l'échelle d'un profil

- 0 CREER PROFIL
- 1 MOD. MOYEU CARTER
- 2 MODIFIER PROFIL
- 3 MISE A L'ECHELLE
- 4 ZOOM
- 5 LIRE PROFILS
- 6 ECRIRE PROFILS
- 7 COPY PROFIL
- 8 MOVE PROFIL
- 9 CHANGER NIVEAU
- A AFFICHAGE 3D
- M MODIFIER PARAM.
- T TRANSLATION
- R ROTATION
- F FIN
- P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

T  
 TRANSLATION :  
 ABSCISSE ET ORDONNEE  
 -0.2 0.6



- 0 CREER PROFIL
- 1 MOD. MOYEU CARTER
- 2 MODIFIER PROFIL
- 3 MISE A L'ECHELLE
- 4 ZOOM
- 5 LIRE PROFILS
- 6 ECRIRE PROFILS
- 7 COPY PROFIL
- 8 MOVE PROFIL
- 9 CHANGER NIVEAU
- A AFFICHAGE 3D
- M MODIFIER PARAM.
- T TRANSLATION
- R ROTATION
- F FIN
- P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

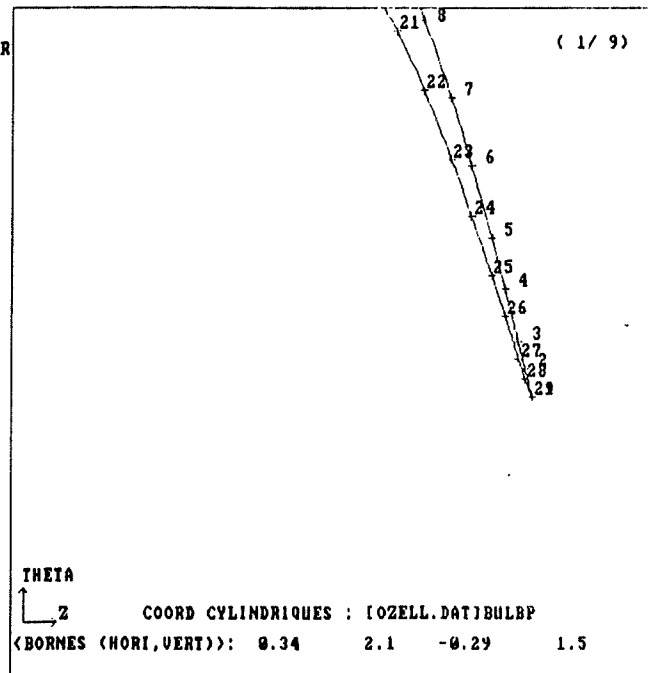
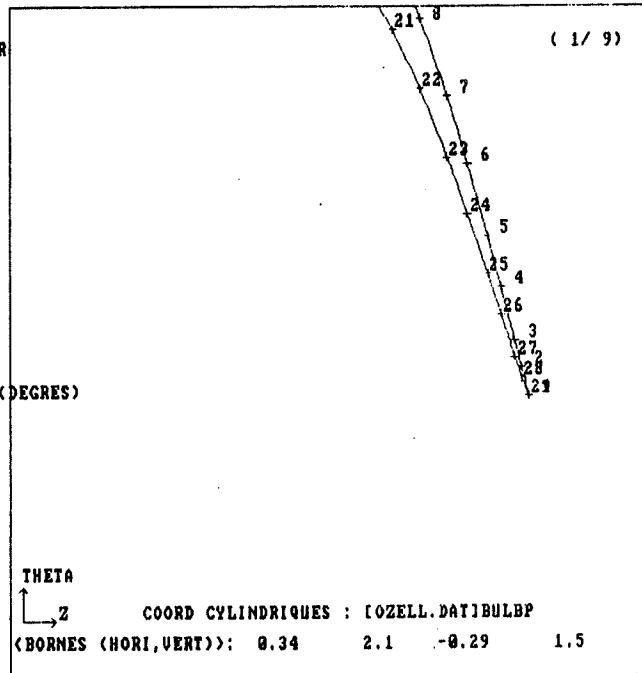


Figure 11: Translation d'un profil

Q CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
 R  
 ROTATION : ANGLE (DEGRES)  
 -20.0



Q CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

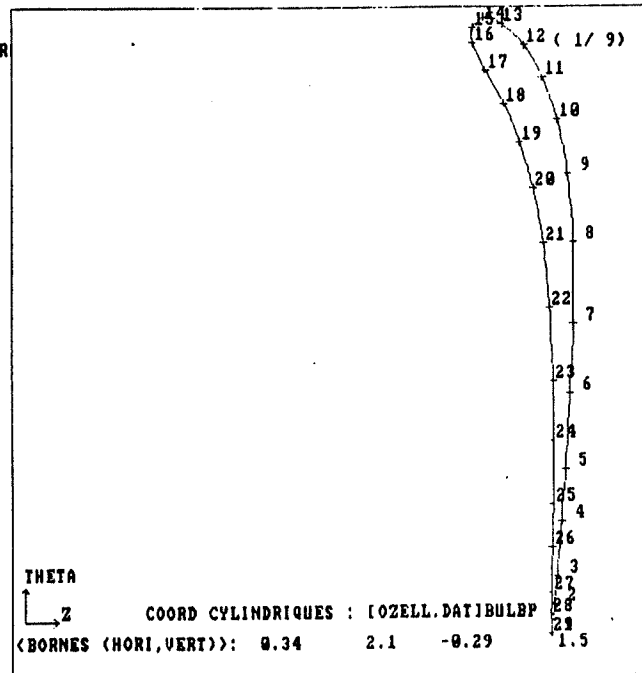
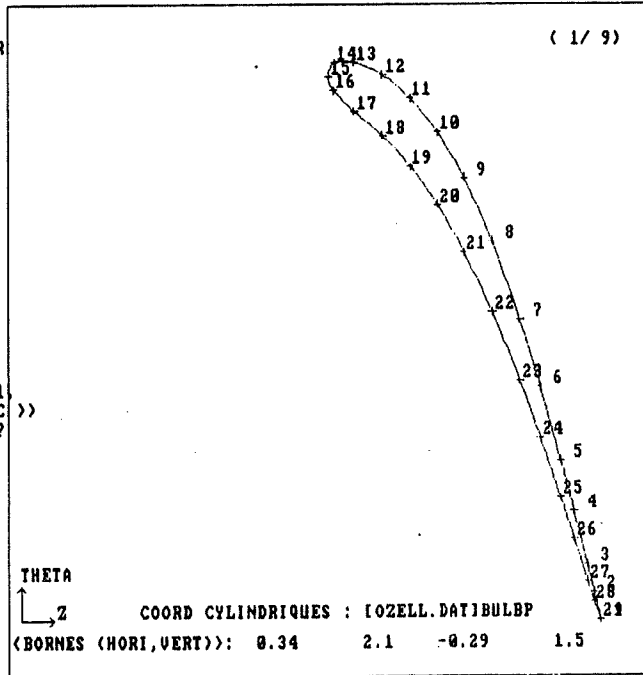


Figure 12: Rotation d'un profil

0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 I TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
 ?  
 (( COPY APRES NIV1  
 DE NIV2 A NIV3 INC ))  
 NIV1, NIV2, NIV3 ?  
 2 4 8



0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 I TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

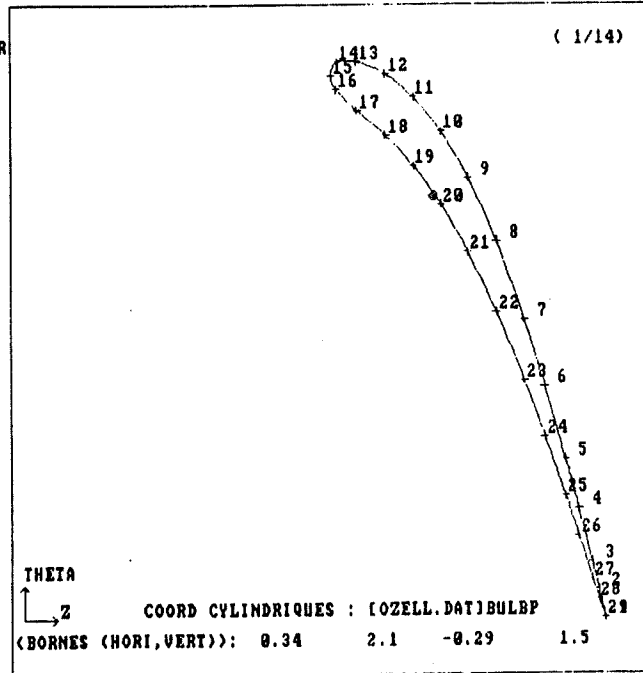


Figure 13: Ajout de profils en les copiant de d'autres niveaux

```

0 CREER PROFIL
1 MOD. MOUV. CARTER
2 MODIFIER PROFIL
3 MISE A L'ECHELLE
4 ZOOM
5 LINE PROFILS
6 ECRIRE PROFILS
7 COPY PROFIL
8 MOUV PROFIL
9 CHANGER NIVEAU
A AFFICHAGE 3D
M MODIFIER PARAM.
T TRANSLATION
R ROTATION
F FIN
P CHANGER PROJECT.

...CHOIX
8
<< MOUV APRES NIV1,
DE NIV2 A NIV3 INC >>
NIV1, NIV2, NIV3 ?
11 2 5

```

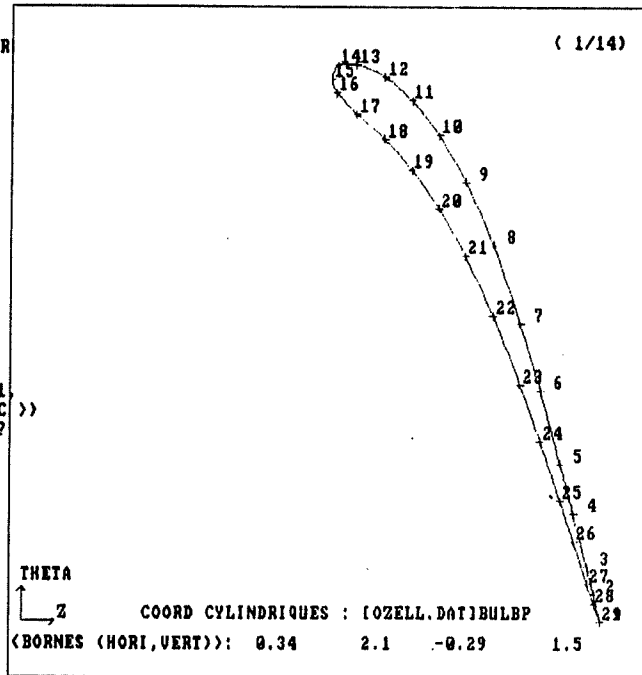


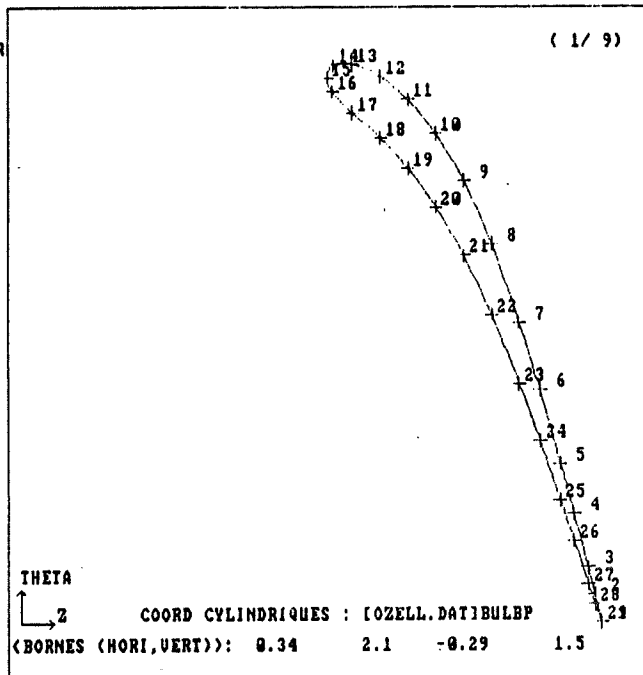
Figure 14: Déplacement dans l'ordre des profils



INSERTION AVANT LE NIVEAU COURANT : +2  
INSERTION APRES LE NIVEAU COURANT : +1  
REPLACEMENT DU NIVEAU COURANT : 0  
EFFACEMENT DU NIVEAU COURANT : -1  
NUL ( SI N (> -1,0,1,2 )  
-1

Figure 15: Elimination d'un profil

0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOUV. CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 ...CHOIX  
 0



INSERTION AVANT LE NIVEAU COURANT : +2  
 INSERTION APRES LE NIVEAU COURANT : +1  
 REMPLACEMENT DU NIVEAU COURANT : 0  
 EFFACEMENT DU NIVEAU COURANT : -1  
 NUL ( SI M < > -1,0,1,2 )  
 1

Figure 16: Création d'un profil: insertion  
 entre d'autres niveaux ou  
 remplacement d'un niveau

VALEUR COORD (CONST)  
1.3

( 2/10)

THETA  
↑  
└─ Z  
COORD CYLINDRIQUES : (OZELL.DAT)BULBP  
<BORNES (HORI,VERT)>: 0.34 2.1 -0.29 1.5

VALEUR COORD (CONST)  
1.3

( 2/10)

A POUR AJOUTER  
F POUR FINIR  
B POUR BOUCLER

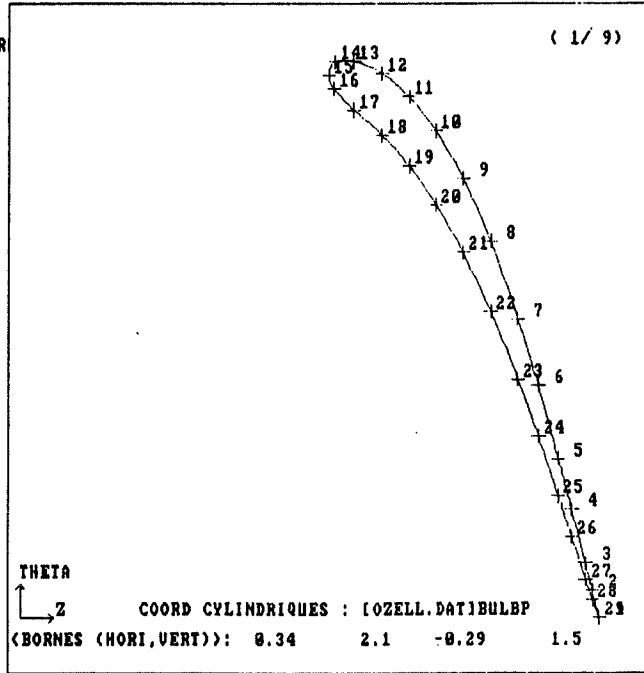
+ 8  
+ 7  
+ 6  
+ 5  
+ 4  
+ 3  
+ 2  
+ 1

THETA  
↑  
└─ Z  
COORD CYLINDRIQUES : (OZELL.DAT)BULBP  
<BORNES (HORI,VERT)>: 0.34 2.1 -0.29 1.5

Figure 17: Création d'un profil: entrée de la coordonnée constante et des points de définition

- 0 CREER PROFIL
- 1 MOD. MOUV. CARTER
- 2 MODIFIER PROFIL
- 3 MISE A L'ECHELLE
- 4 ZOOM
- 5 LIRE PROFILS
- 6 ECRIRE PROFILS
- 7 COPY PROFIL
- 8 MOVE PROFIL
- 9 CHANGER NIVEAU
- A AFFICHAGE 3D
- M MODIFIER PARAM.
- T TRANSLATION
- R ROTATION
- F FIN
- P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
2



NUMERO DU POINT ?  
( 0 POUR FINIR )  
22

OPTIONS :

- MODIFICATION
- NUL
- SUPPRESSION
- ADDITION

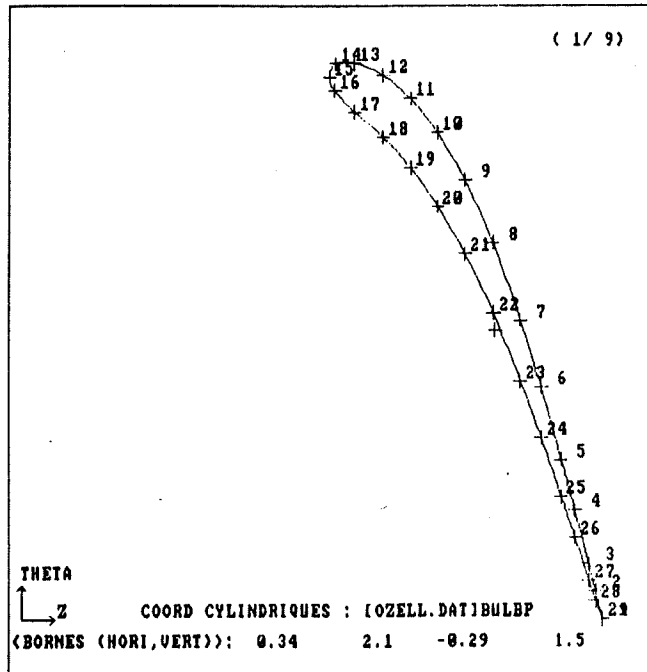


Figure 18: Modification d'un profil

- 9 CREER PROFIL
  - 1 MOD. MOUVU CARTER
  - 2 MODIFIER PROFIL
  - 3 MISE A L'ECHELLE
  - 4 ZOOM
  - 5 LIRE PROFILS
  - 6 ECRIRE PROFILS
  - 7 COPY PROFIL
  - 8 MOVE PROFIL
  - 9 CHANGER NIVEAU
  - A AFFICHAGE 3D
  - M MODIFIER PARAM.
  - T TRANSLATION
  - R ROTATION
  - F FIN
  - P CHANGER PROJECT.
- ...CHOIX

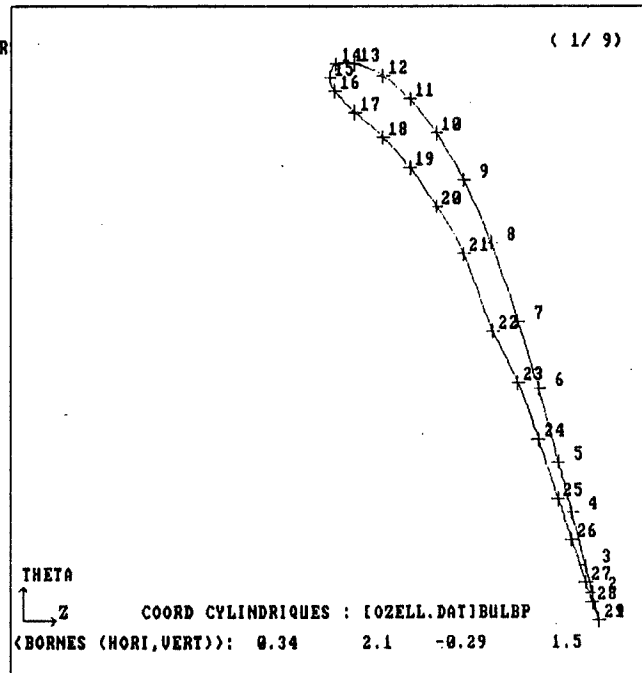


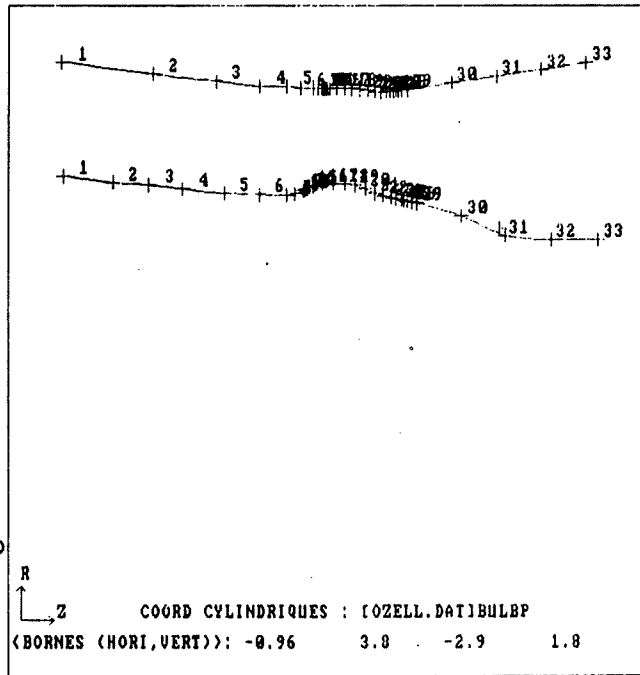
Figure 18: Modification d'un profil (suite)

B(BAS) OU H(AUT) +  
NUMERO DU POINT ?  
( F POUR FINIR )  
B31

OPTIONS :

MODIFICATION  
NUL  
SUPPRESSION  
ADDITION

MODIF. <ENTER/OUI>



MODIF. <ENTER/OUI>

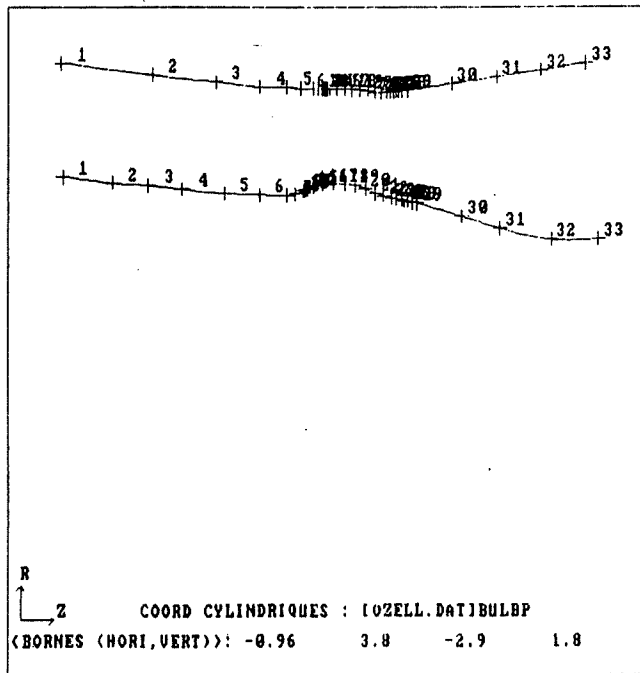
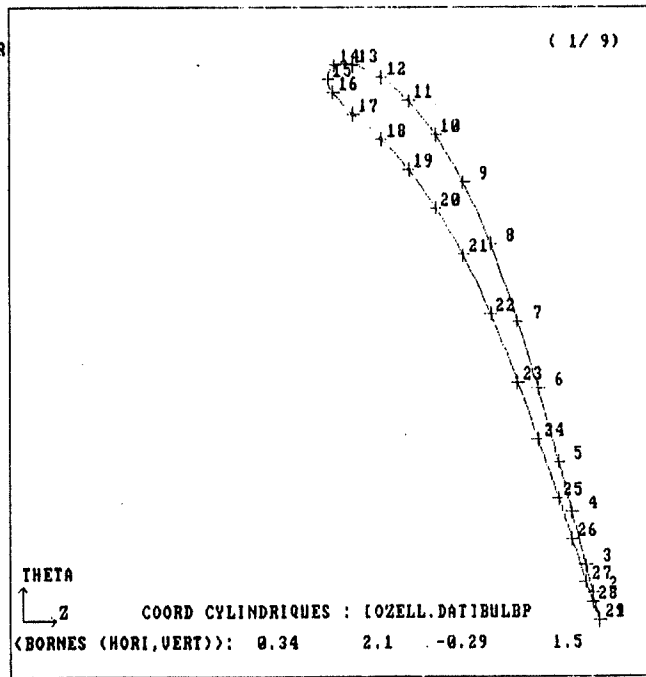


Figure 19: Modification du moyeu ou du carter

- 0 CREER PROFIL
- 1 MOD. MOYEU CARTER
- 2 MODIFIER PROFIL
- 3 MISE A L'ECHELLE
- 4 ZOOM
- 5 LIRE PROFILS
- 6 ECRIRE PROFILS
- 7 COPY PROFIL
- 8 MOUE PROFIL
- 9 CHANGER NIVEAU
- A AFFICHAGE 3D
- M MODIFIER PARAM.
- T TRANSLATION
- R ROTATION
- F FIN
- P CHANGER PROJECT.
- ...CHOIX
- A



- X,Y,Z+ANGLE: ROTATION
- A: AFFICHAGE
- M: AVEC/SANS MOYEU+CARTER
- R: REINITIALISATION
- F: FINIR
- CHOIX...

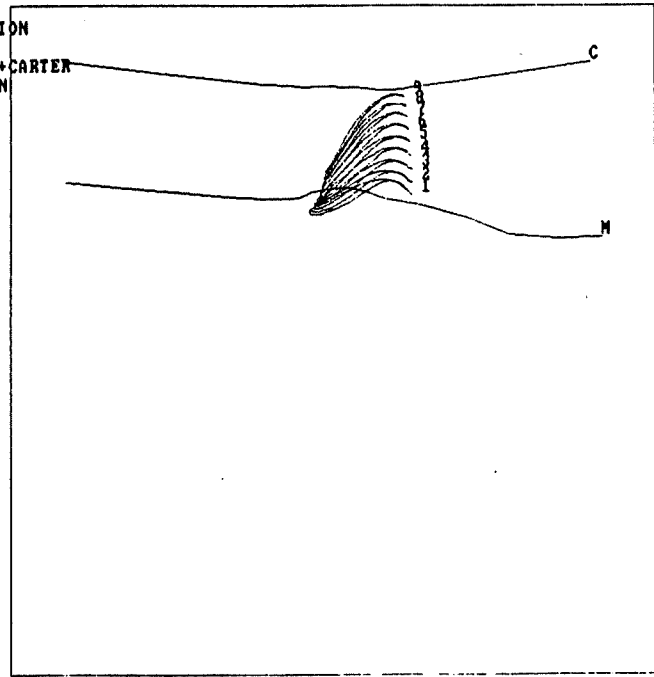
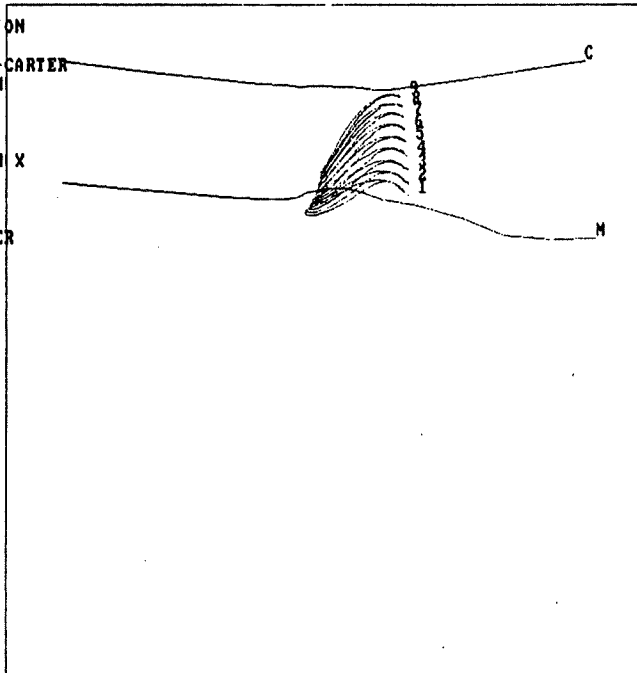


Figure 20: Affichage dans un repère à trois dimensions

X,Y,Z+ANGLE: ROTATION  
A: AFFICHAGE  
M: AVEC/SANS MOYEU+CARTER  
R: REINITIALISATION  
F: FINIR  
CHOIX...  
X -10  
ROTATION EN X  
-10. DEGRES  
CHOIX...  
M  
SANS MOYEU+CARTER  
CHOIX...  
A



X,Y,Z+ANGLE: ROTATION  
A: AFFICHAGE  
M: AVEC/SANS MOYEU+CARTER  
R: REINITIALISATION  
F: FINIR  
CHOIX...

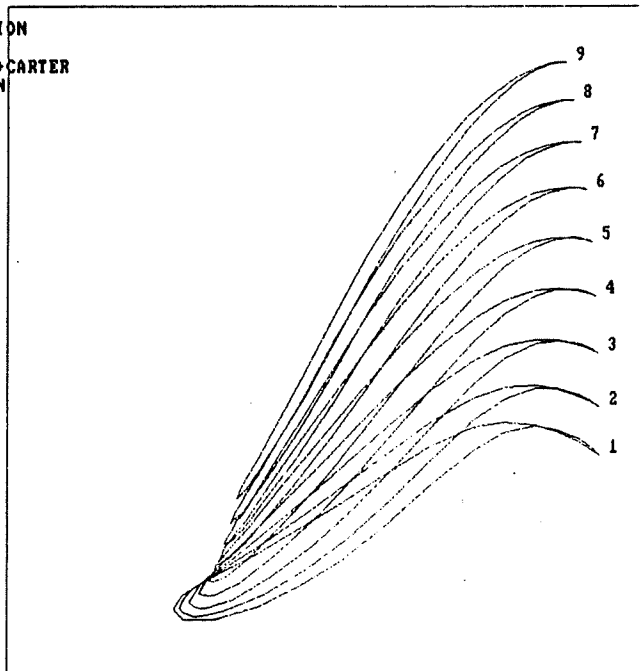


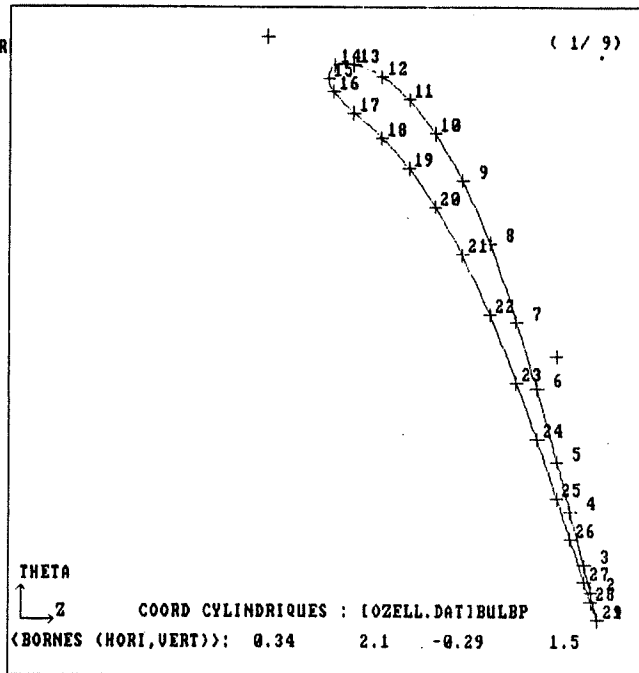
Figure 21: Utilisation des procédures d'affichage 3D



0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
 4

A AUTOMATIQUE  
 M NUL  
 T TRANSLATION  
 Z ZOOM



0 CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

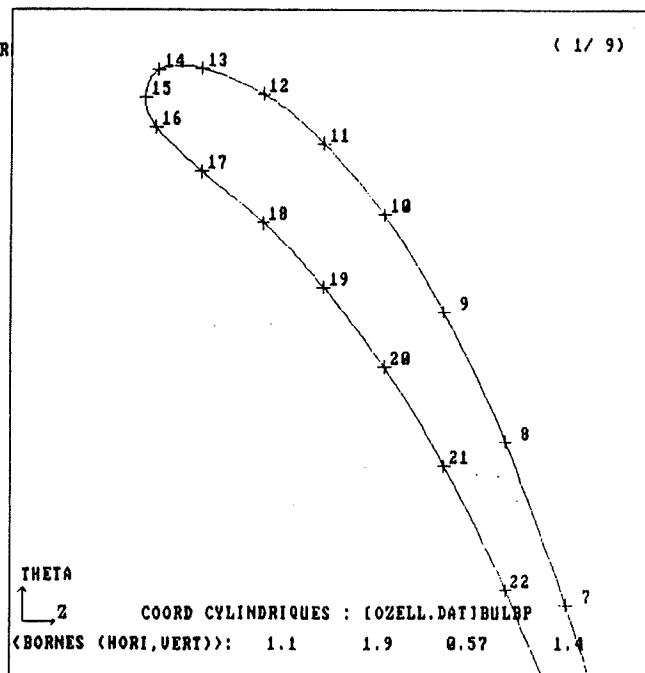


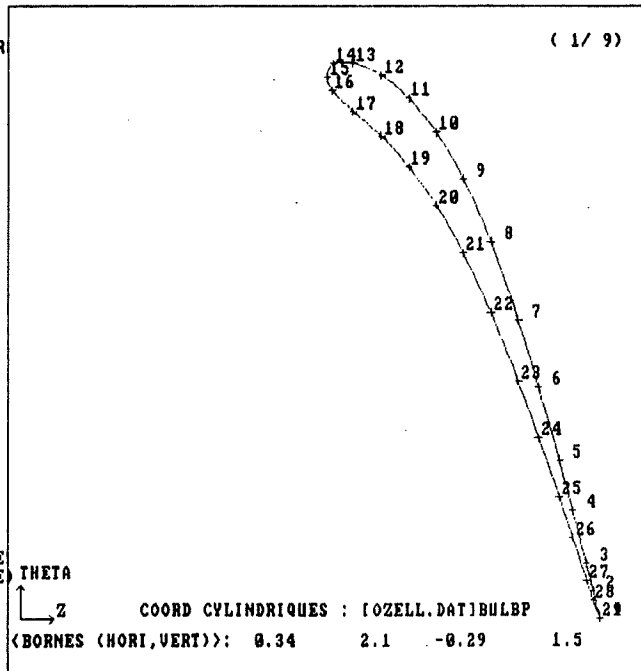
Figure 22: Agrandissement de la fenêtr d'affichage

Q CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
 4

A AUTOMATIQUE  
 M NUL  
 T TRANSLATION  
 Z ZOOM

ABSCISSE ET ORDONNEE  
 (MULTIPLE DU CADRE)  
 0.5 -0.1



Q CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEN CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

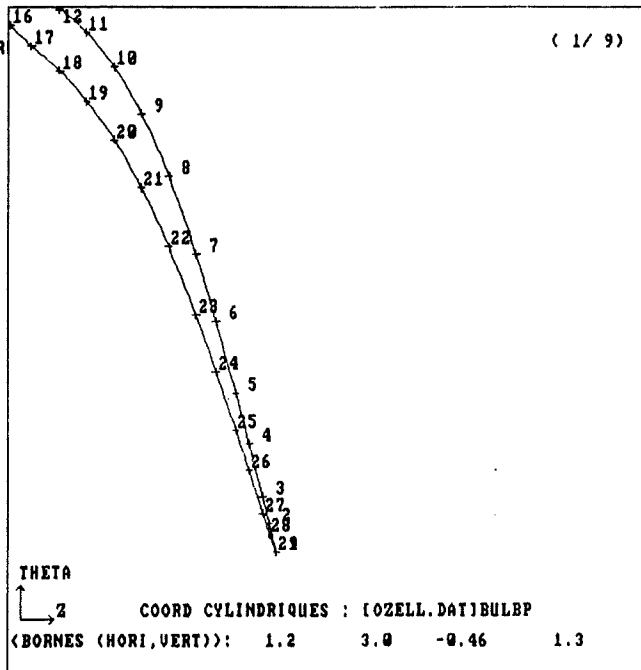


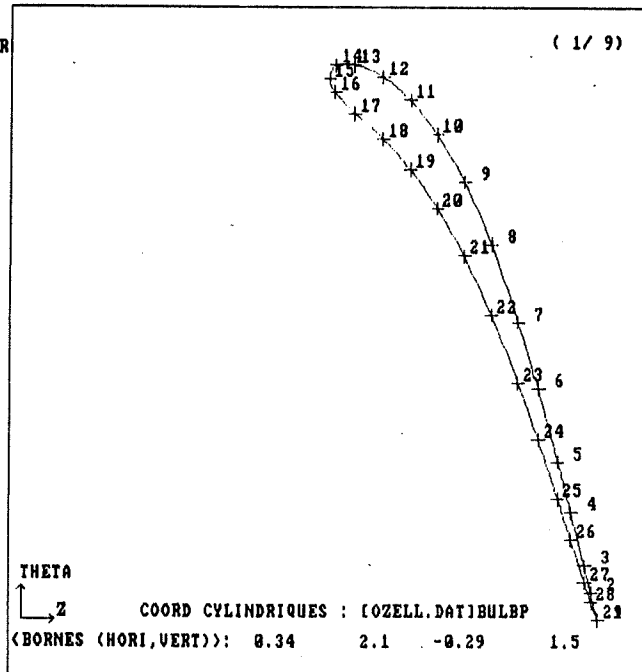
Figure 23: Translation de la fenêtr d'affichage

Q CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEU CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX  
 M

NINS = 18  
 DL = 188.8

NOUVELLES VALEURS  
 6 188.



Q CREER PROFIL  
 1 MOD. MOYEU CARTER  
 2 MODIFIER PROFIL  
 3 MISE A L'ECHELLE  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 COPY PROFIL  
 8 MOVE PROFIL  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 T TRANSLATION  
 R ROTATION  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.

...CHOIX

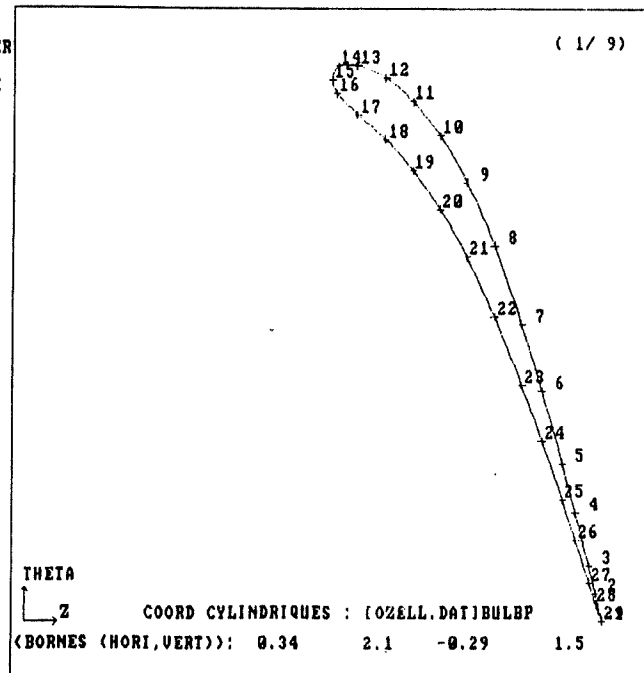


Figure 24: Modification des paramètres d'affichage

```

0 CREER PROFIL
1 MOD. MOYEU CARTER
2 MODIFIER PROFIL
3 MISE A L'ECHELLE
4 ZOOM
5 LIRE PROFILS
6 ECRIRE PROFILS
7 COPY PROFIL
8 MOVE PROFIL
9 CHANGER NIVEAU
A AFFICHAGE 3D
M MODIFIER PARAM.
I TRANSLATION
R ROTATION
F FIN
P CHANGER PROJECT.

...CHOIX
F
'OUI' / <ENTER> ???
OUI

```

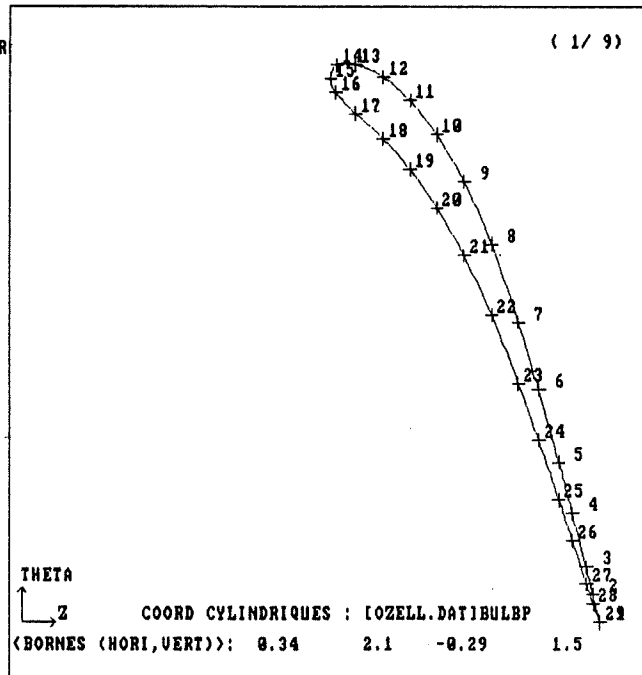


Figure 25: Confirmation de la fin du programme

3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT  
 ...CHOIX

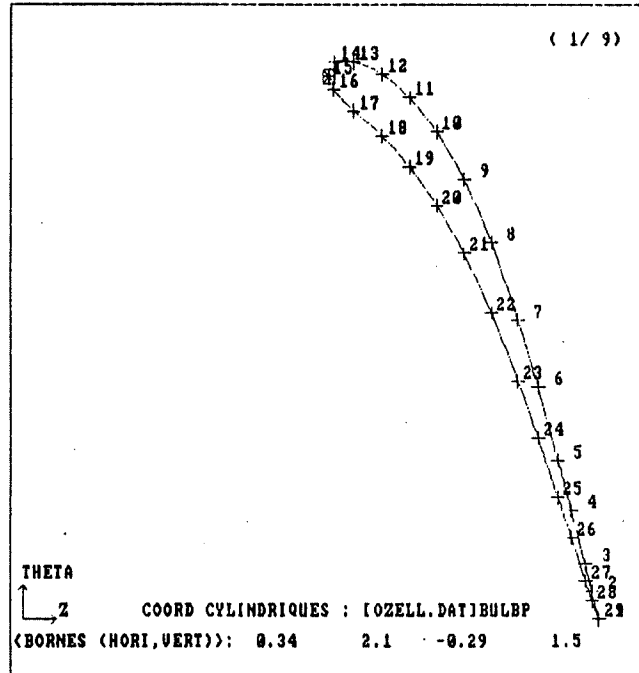


Figure 26: Menu du programme de raffinement du modèle

3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

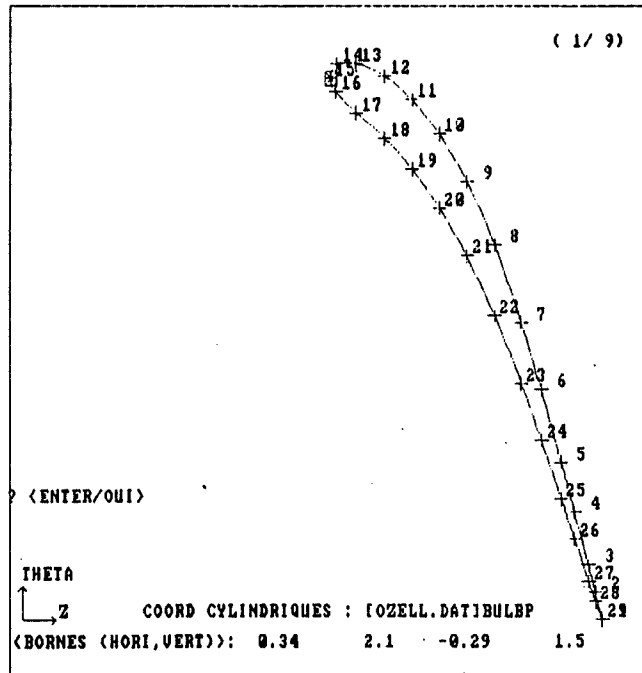
...CHOIX  
3

"POINTS NATURELS"  
NOMBRE : 0  
MODIF. ? 0/1

1  
NOMBRE ?  
TOUS LES NIVEAUX  
SONT AFFECTES...

40  
TOUS LES NIVEAUX ? <ENTER/OUI>

OUI  
CONCENTRATION  
.2



3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX

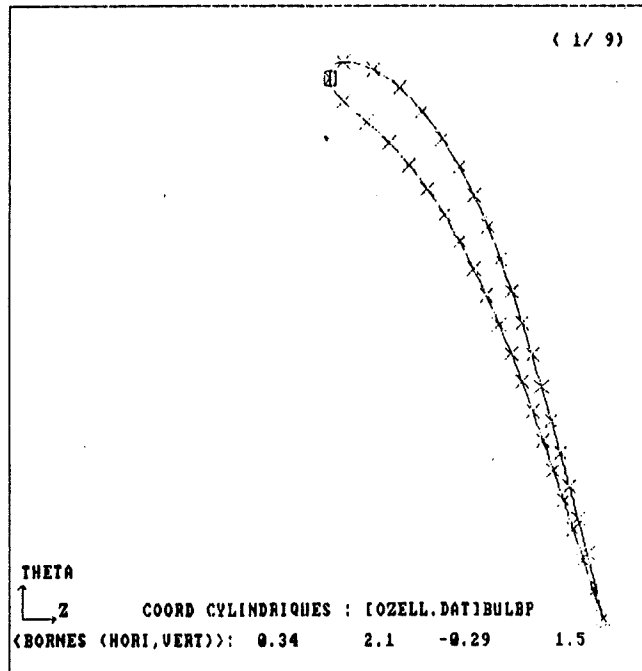


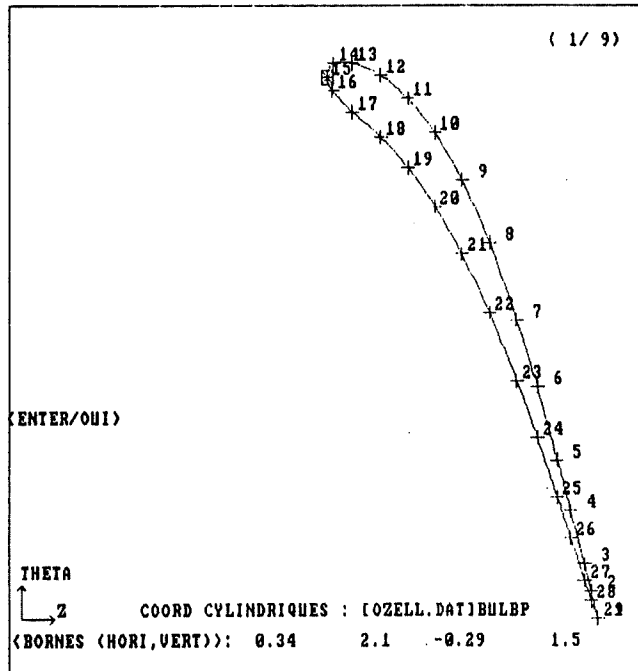
Figure 27: Application, sur tous les niveaux, de l'algorithme de répartition des points naturels

3 PIS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX  
 3

"POINTS NATURELS"  
 NOMBRE : 40  
 MODIF. ? 0/1

TOUS LES NIVEAUX ? (ENTER/OUI)  
 NON



"POINTS NATURELS"  
 NOMBRE : 40

CONCENTRATION ?  
 (ENTRE 0 ET 1)  
 .3

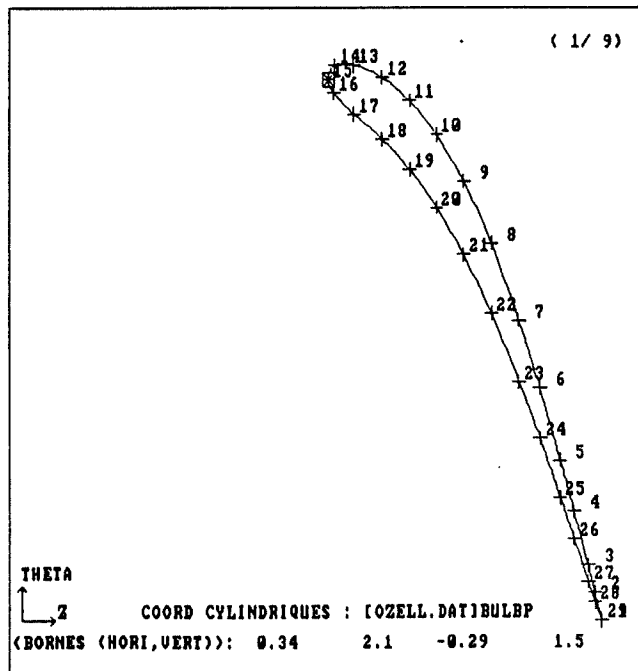


Figure 28: Application, sur un seul niveau, de l'algorithme de répartition des points naturels

3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECHIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX

7  
 ENTREZ LE NOMBRE DE PROFILS  
 A INSERER ENTRE LE MOYEU ET LE CARTER,  
 AINSI QUE LA CONCENTRATION SOUHAITEE  
 11 0.2

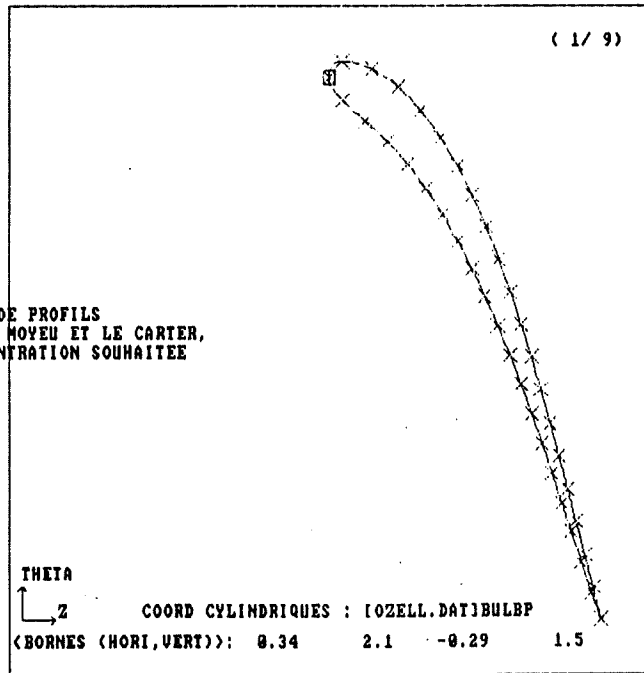


Figure 29: Interpolation de profils intermédiaires entre le moyeu et le carter

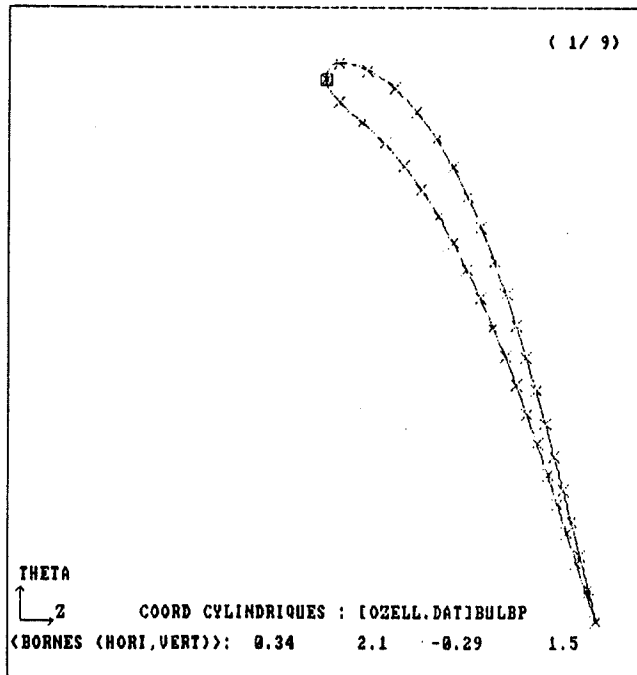


3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX  
 E

0 AUCUN POINT  
 1 PTS DE SPLINE  
 2 PTS NATURELS  
 3 TOUS LES POINTS

ETAT COURANT : 2  
 3



3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX

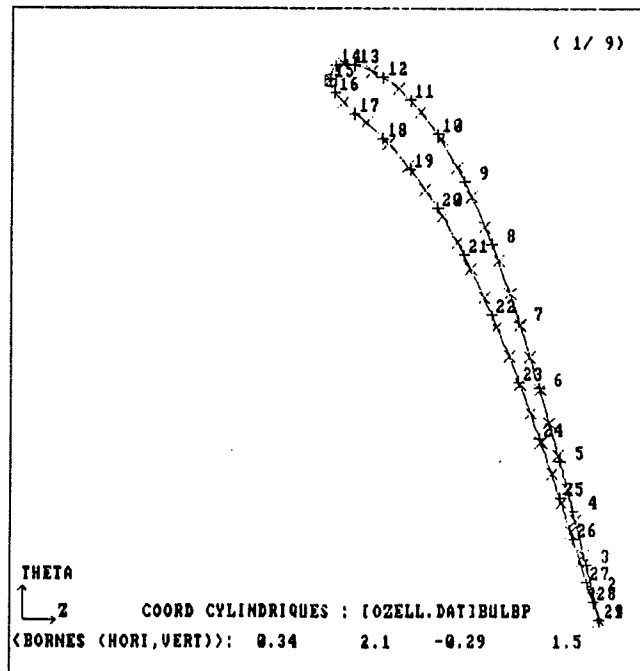


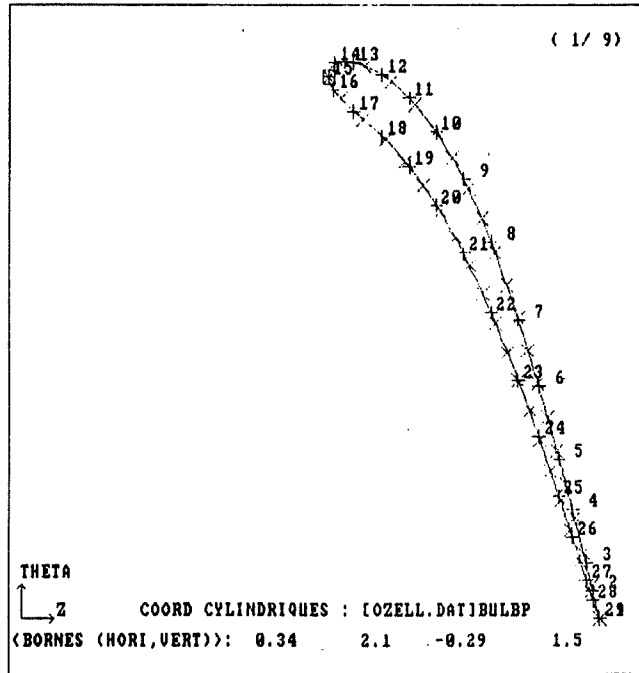
Figure 30: Affichage de tous les points

3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX  
 E

0 AUCUN POINT  
 1 PTS DE SPLINE  
 2 PTS NATURELS  
 3 TOUS LES POINTS

ETAT COURANT : 3  
 0



3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX

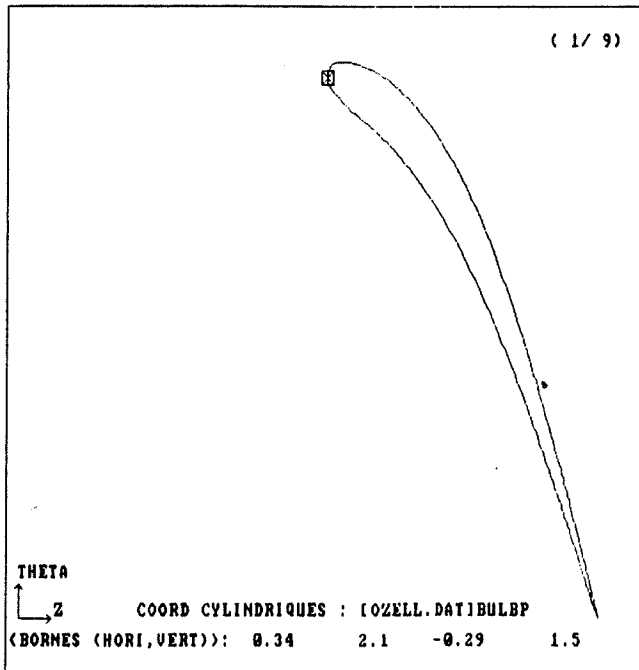


Figure 31: Affichage d'aucun point

0 POINTS ORIGINAUX  
1 POINTS NATURELS  
2 POINTS NATURELS (PROFILS INTERMEDIAIRES)  
2

X,Y,Z+ANGLE: ROTATION  
A: AFFICHAGE  
M: AVEC/SANS MOUV+ CARTER  
R: REINITIALISATION  
F: FINIR  
CHOIX...

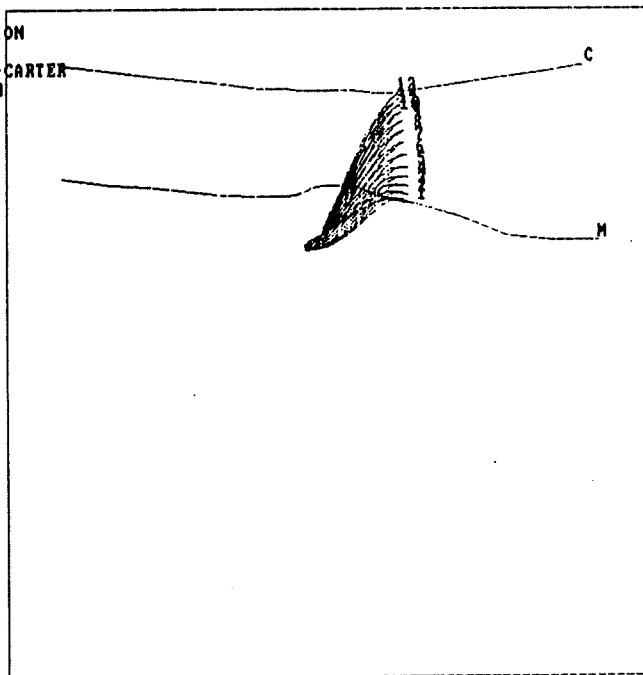


Figure 32: Choix des points et affichage dans un repère cartésien à trois dimensions

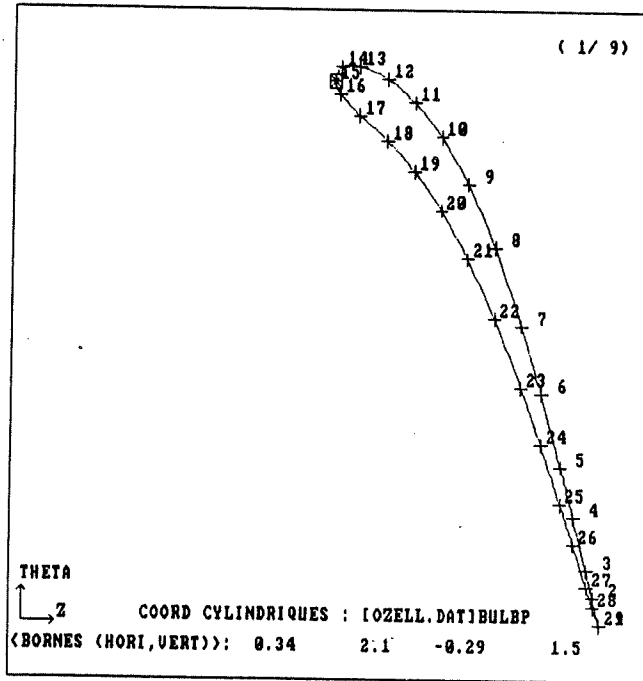
3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX  
 8

POINT D'ATTAQUE

# POINT : 15  
 I = 0.100842

A AUTOMATIQUE  
 P NOUVEAU POINT  
 Q ANCIEN POINT  
 P  
 IATT ET IATT  
 14 .1



3 PTS NATURELS  
 4 ZOOM  
 5 LIRE PROFILS  
 6 ECRIRE PROFILS  
 7 CONC. NIVEAUX  
 8 POINT D'ATTAQUE  
 9 CHANGER NIVEAU  
 A AFFICHAGE 3D  
 M MODIFIER PARAM.  
 F FIN  
 P CHANGER PROJECT.  
 E CHANGER ETAT

...CHOIX

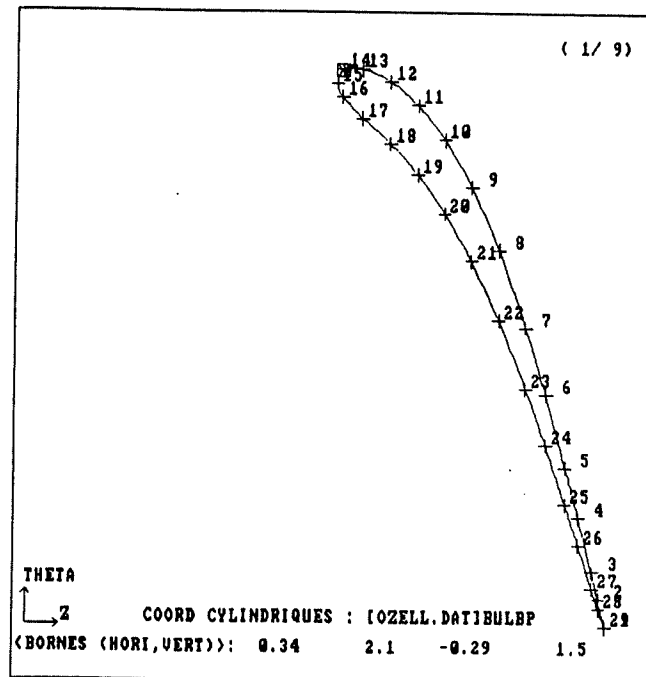


Figure 33: Modification de la position du point d'attaque d'un profil

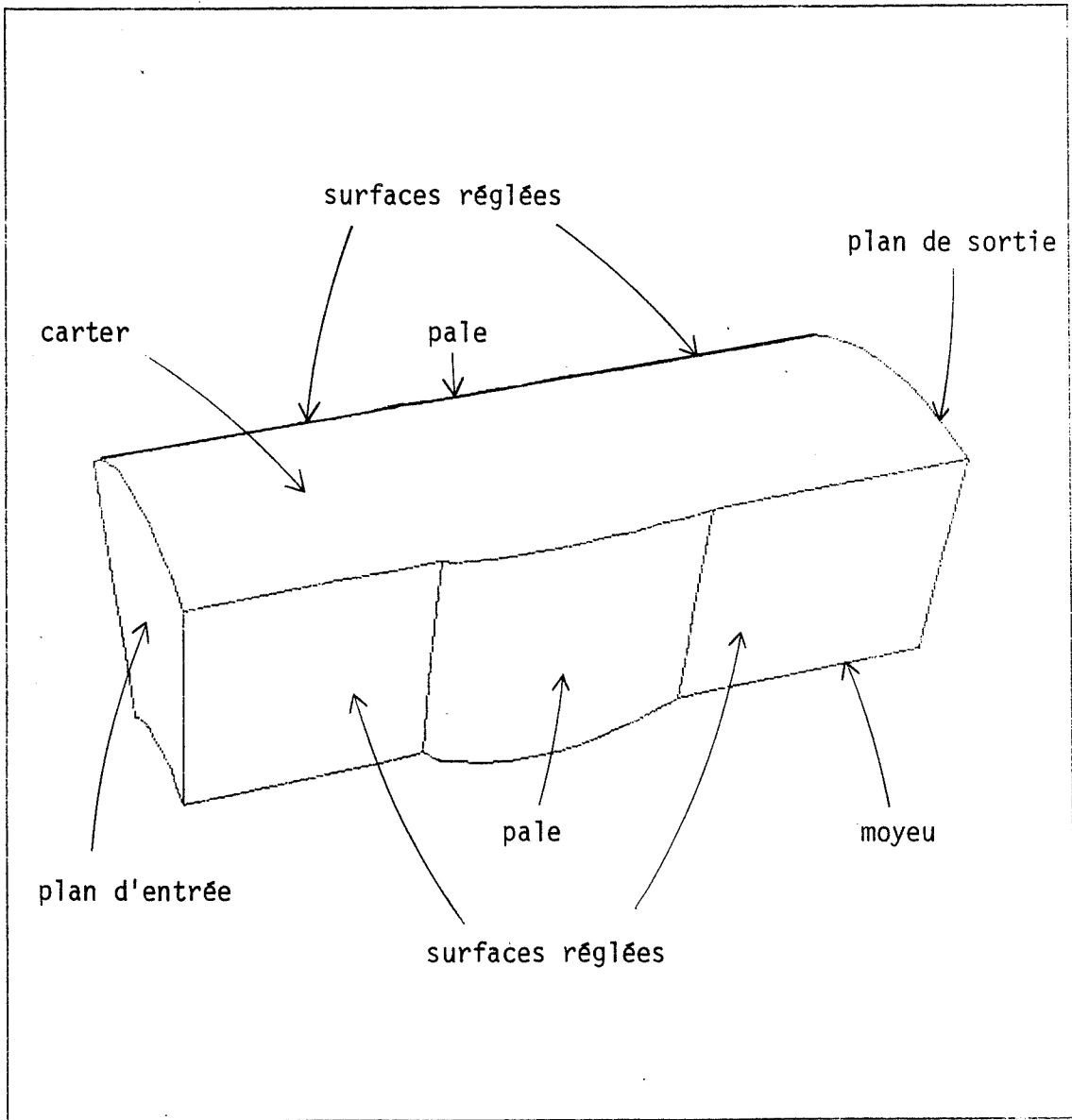


Figure 34: Les parties d'une coquille

OK? ( ENTER / NON )

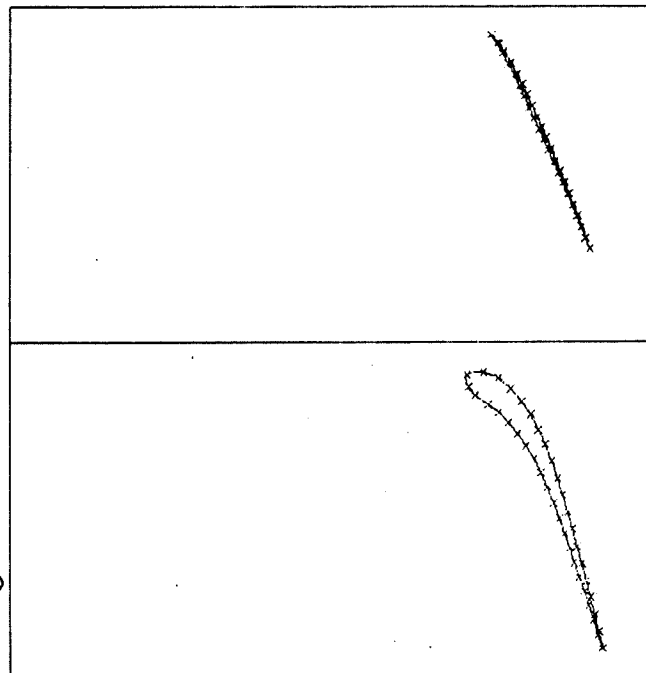
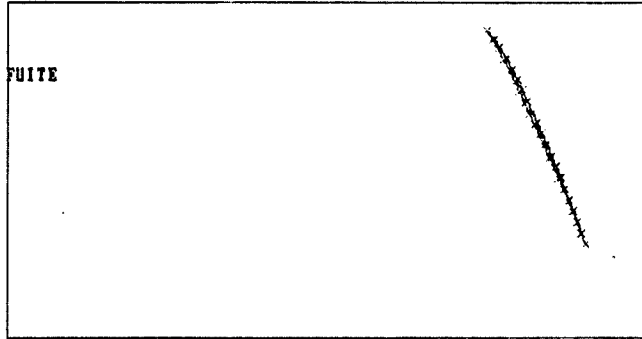
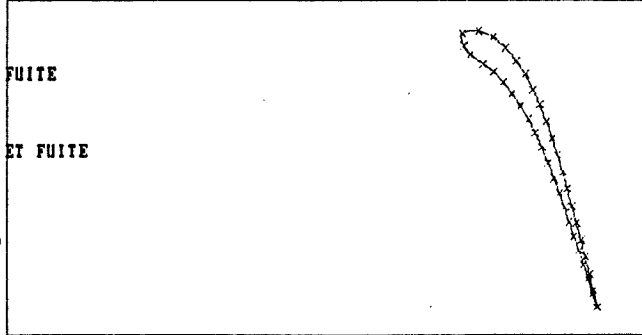


Figure 35: Construction d'une coquille:  
affichage des deux profils résultant  
de l'intersection de la pale avec  
les moyeu et carter

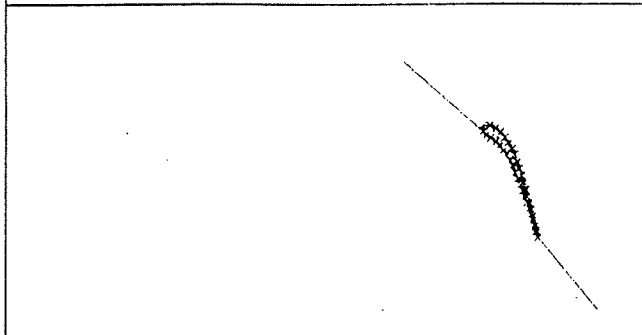
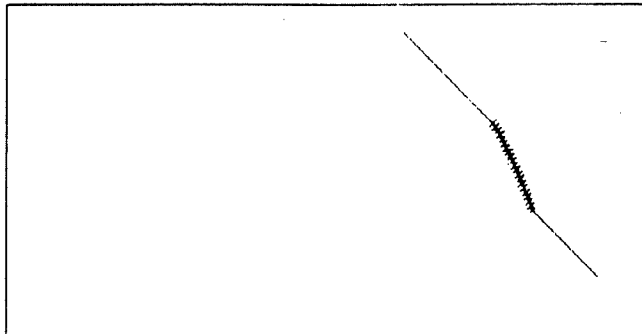
-->  
ANGLES ATTAQUE ET FUITE  
-45 -45



-->  
ANGLES ATTAQUE ET FUITE  
-40 -50  
-->  
LONGUEURS ATTAQUE ET FUITE  
0.9 0.8



OK? ( ENTER / NON )



OK? ( ENTER / NON )

Figure 36: Caractérisation de quatre segments de droite

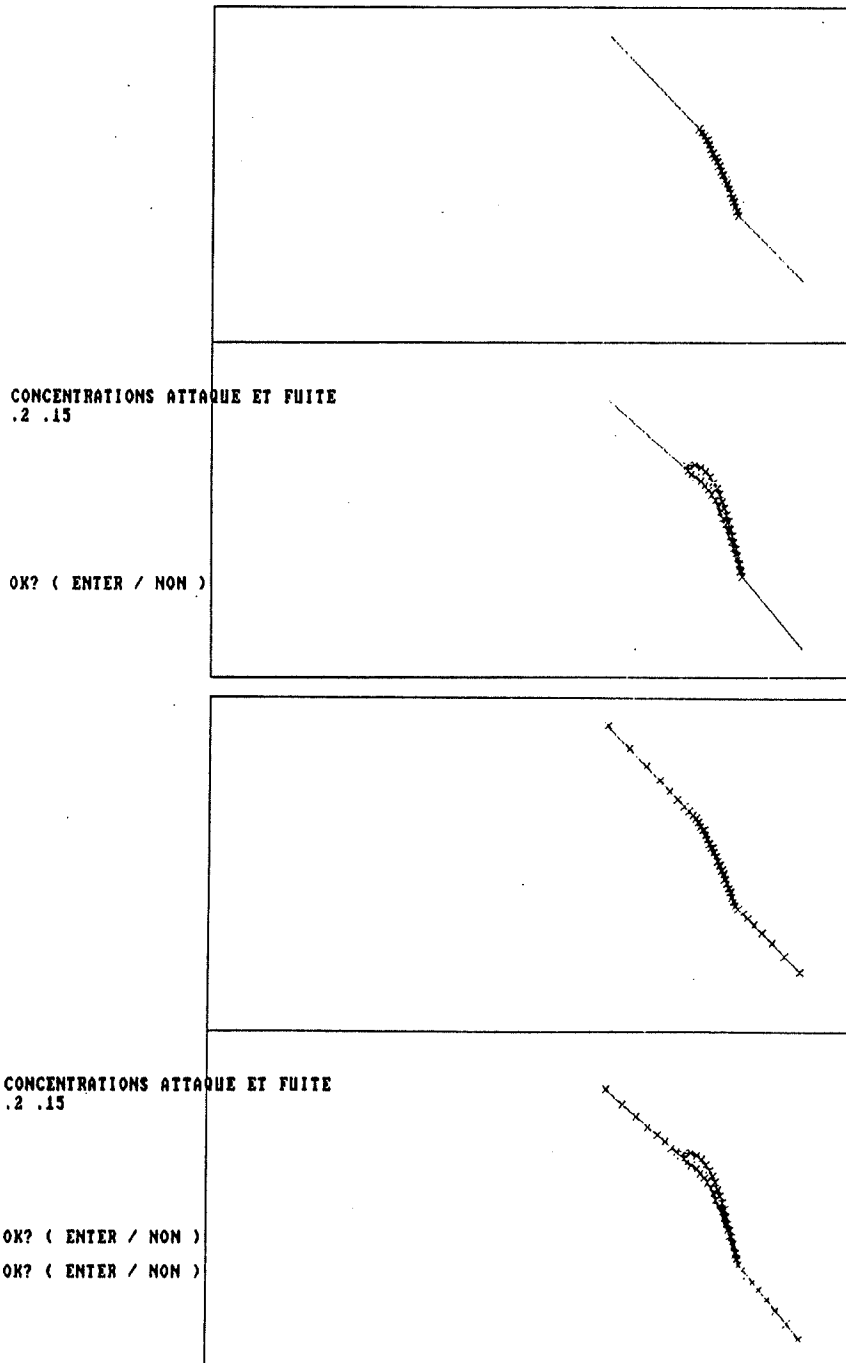
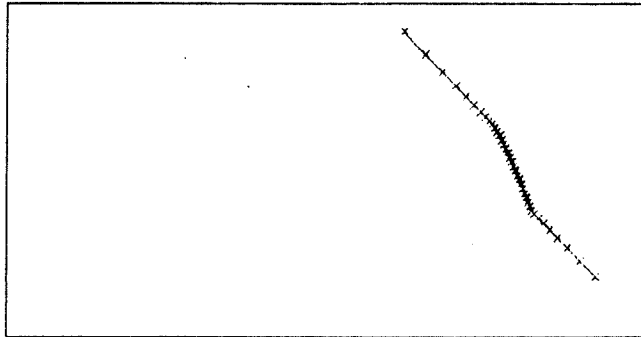


Figure 37: Répartition des points sur  
Les segments de droite

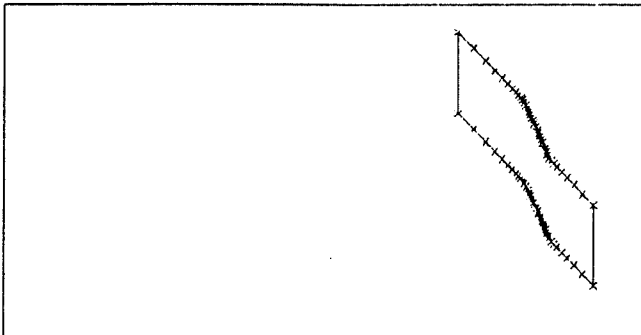
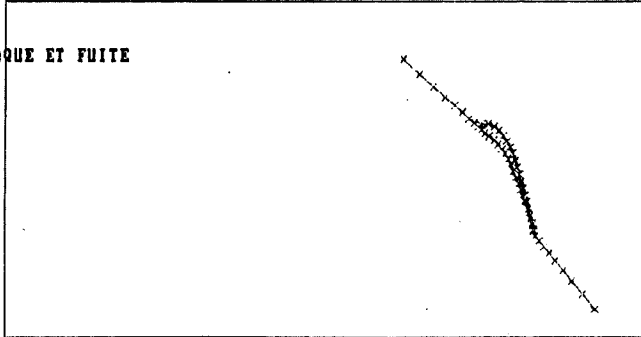


NOMBRE DE PALES  
4



CONCENTRATIONS ATTAQUE ET FUITE  
.2 .15

OK? ( ENTER / NON )  
OK? ( ENTER / NON )



OK? ( ENTER / NON )

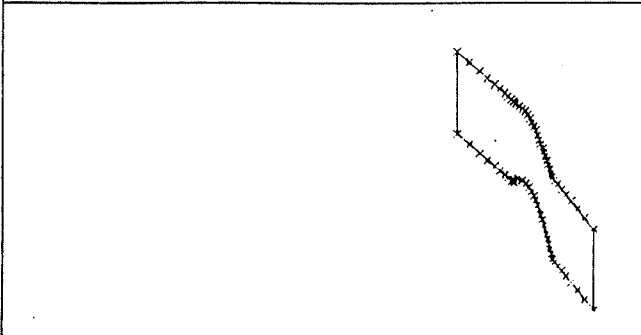
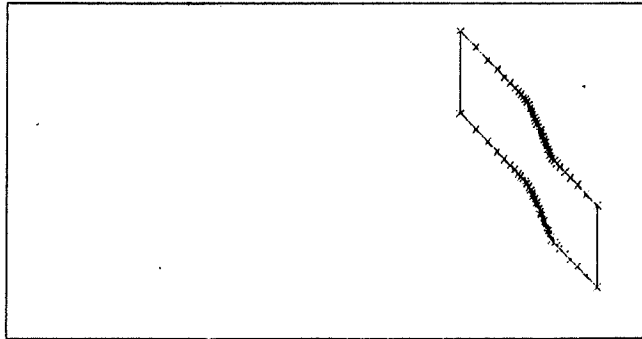
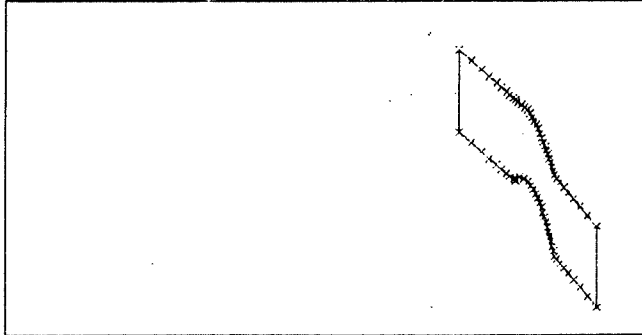


Figure 38: Largeur du canal interaube:  
nombre de pales de la turbine

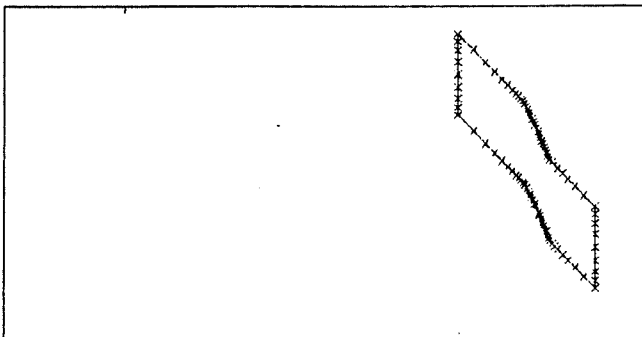
POINTS INTERAUBE  
NOMBRE A INSERER  
CONCENTRATION  
7 .3



OK? ( ENTER / NON )



POINTS INTERAUBE  
NOMBRE A INSERER  
CONCENTRATION  
7 .3



OK? ( ENTER / NON )

OK? ( ENTER / NON )

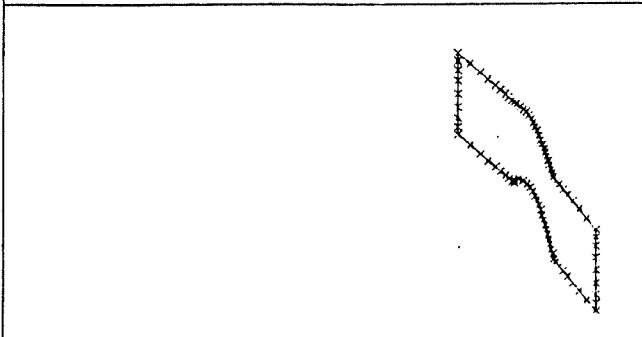
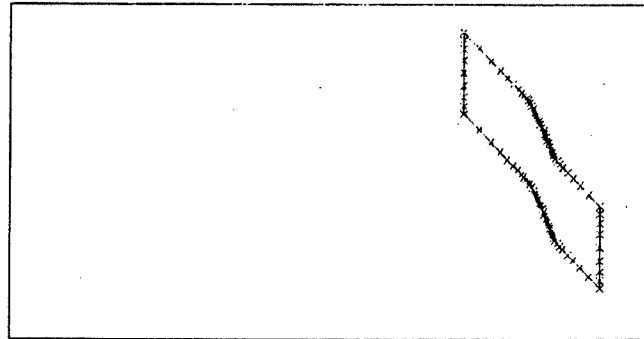
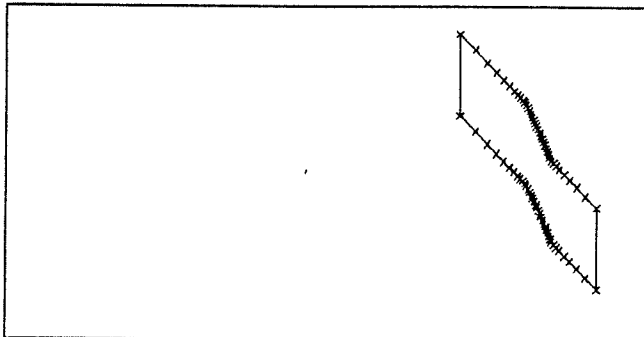
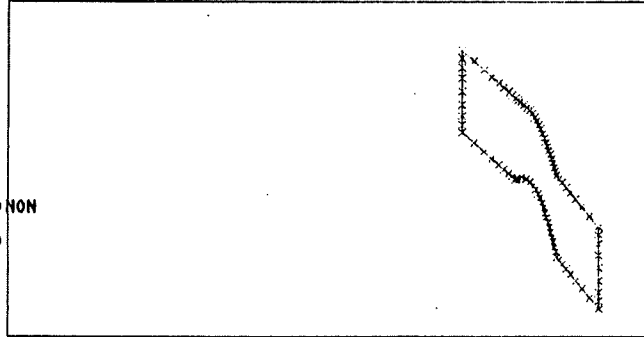


Figure 39: Répartition de points sur  
la distance interaube

POINTS INTERAUBE  
NOMBRE A INSERER  
CONCENTRATION  
7 .3



OK? ( ENTER / NON ) NON  
OK? ( ENTER / NON )



OK? ( ENTER / NON )

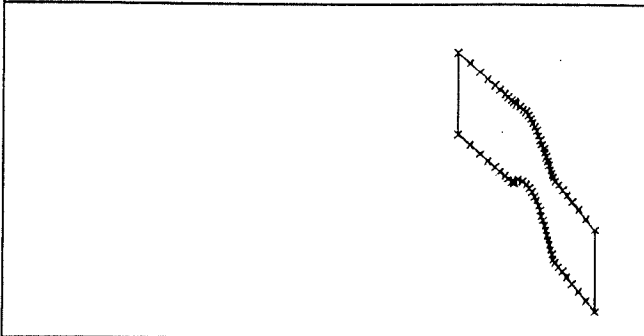


Figure 40: Remontée de la séquence d'opération  
du programme

```

NOMBRE D'ITERATIONS SUCCESSIVES ET FACTEUR DE RELAXATION
5 1.5
ITERATION 1; RESIDU = 0.18819E+01
ITERATION 2; RESIDU = 0.10295E+01
ITERATION 3; RESIDU = 0.71117E+00
ITERATION 4; RESIDU = 0.51441E+00
ITERATION 5; RESIDU = 0.38767E+00
NOMBRE D'ITERATIONS SUCCESSIVES ET FACTEUR DE RELAXATION
5 1.2
ITERATION 6; RESIDU = 0.16445E+00
ITERATION 7; RESIDU = 0.14123E+00
ITERATION 8; RESIDU = 0.12332E+00
ITERATION 9; RESIDU = 0.10860E+00
ITERATION 10; RESIDU = 0.96161E-01
NOMBRE D'ITERATIONS SUCCESSIVES ET FACTEUR DE RELAXATION
3 1.1
ITERATION 11; RESIDU = 0.70887E-01
ITERATION 12; RESIDU = 0.64462E-01
ITERATION 13; RESIDU = 0.58782E-01
NOMBRE D'ITERATIONS SUCCESSIVES ET FACTEUR DE RELAXATION
3 1.0
ITERATION 14; RESIDU = 0.44596E-01
ITERATION 15; RESIDU = 0.41452E-01
ITERATION 16; RESIDU = 0.38594E-01
NOMBRE D'ITERATIONS SUCCESSIVES ET FACTEUR DE RELAXATION
0 0.0

```

Figure 41: Exemple d'utilisation du programme  
de création de maillage adapté

```
$ MOVIE
NOM DU FICHER A LIRE
  BULBN
FICHER A ECRIRE : IOZELL.DATIBULEND
<OUI/ENTER> ?
  OUI
FIN NORMALE
$
```

Figure 42: Exemple d'utilisation du programme  
de "passage" à MOVIE

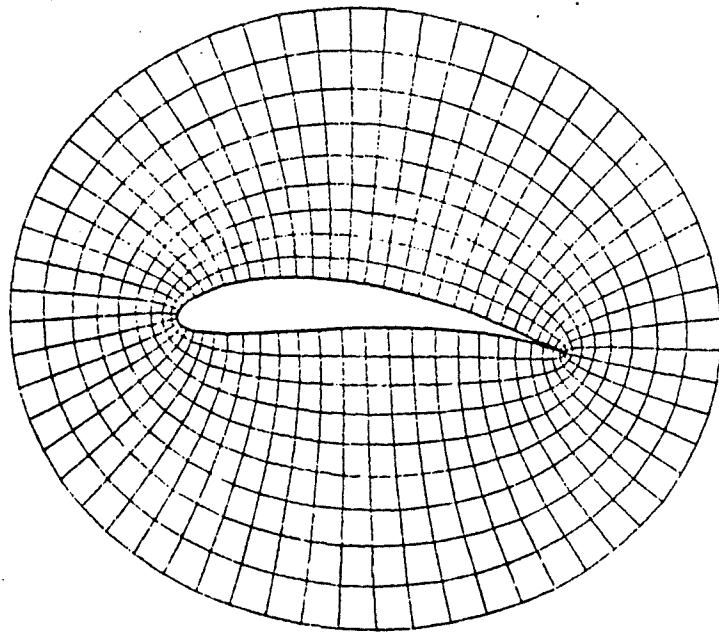
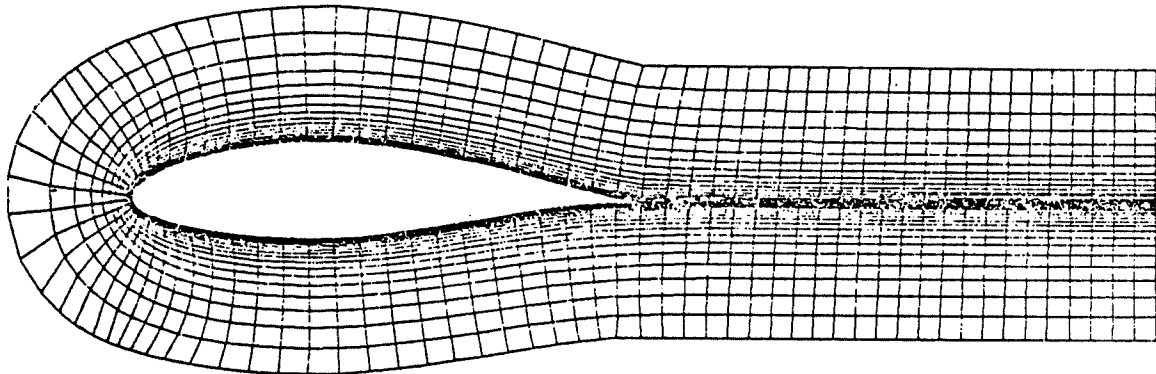


Figure 43: Exemples de maillages bidimensionnels en C et en O (référence [ 1 ])

- 0 CREER PROFIL
  - 1 MOD. MOYEN CARTER
  - 2 MODIFIER PROFIL
  - 3 MISE A L'ECHELLE
  - 4 ZOOM
  - 5 LIRE PROFILS
  - 6 ECRIRE PROFILS
  - 7 COPY PROFIL
  - 8 MOVE PROFIL
  - 9 CHANGER NIVEAU
  - A AFFICHAGE 3D
  - M MODIFIER PARAM.
  - T TRANSLATION
  - R ROTATION
  - F FIN
  - P CHANGER PROJECT.
- ...CHOIX

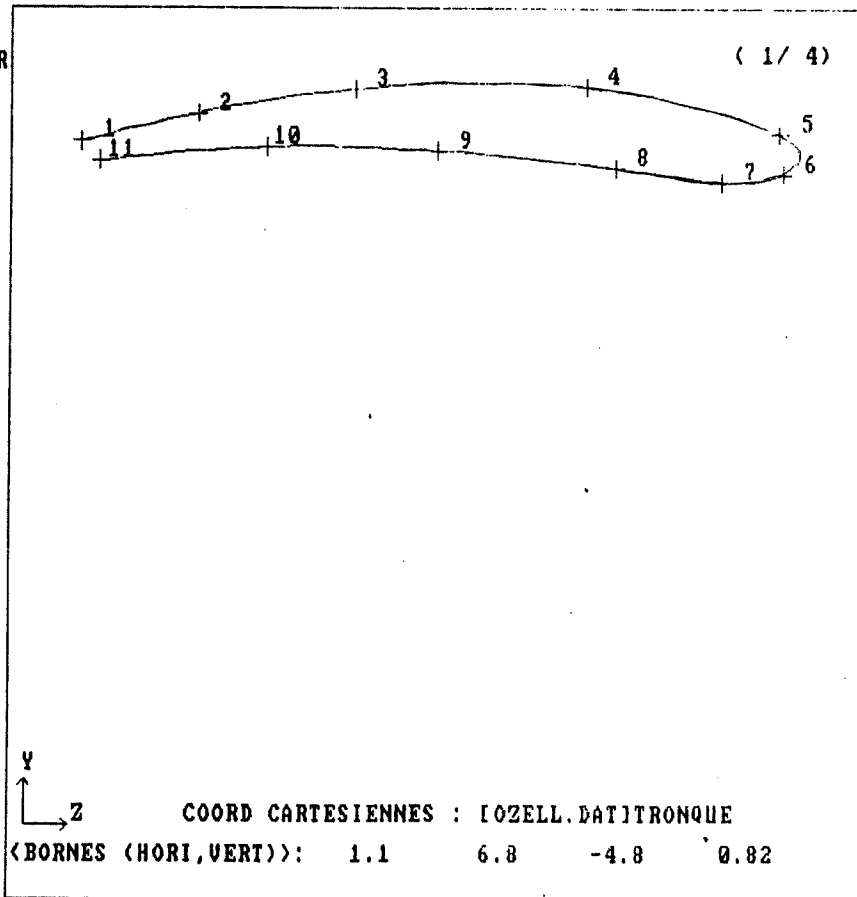


Figure 44: Exemple de modélisation d'un profil non fermé

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289289 9

