

2/85

THESE

2085

PRESENTEE A
L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PAR :
Bachir BOUDRAA

Pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en Electronique appliquée

OPTION : Acquisition et traitement de l'information

ADAPTATION DE L'APPLE II + A L'INFOGRAPHIE DE HAUTE GAMME

Soutenu le 1^{er} Juillet 1985 devant la Commission d'Examen :

MM. A. AINOUCHE Président

A. ADANE Rapporteur

K.S GRABOWSKI

A. ZERGUERRAS

E. KARAKHANIAN

} Examineurs

S. HAFFARESSAS Invité

THESE

PRESENTEE A
L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PAR :
Bachir BOUDRAA

Pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en Electronique appliquée

OPTION : Acquisition et traitement de l'information

ADAPTATION DE L'APPLE II + A L'INFOGRAPHIE DE HAUTE GAMME

Soutenu le 1^{er} Juillet 1985 devant la Commission d'Examen :

MM. A. AINOUCHE Président
A. ADANE Rapporteur
K.S GRABOWSKI
A. ZERGUERRAS } Examineurs
E. KARAKHANIAN
S. HAFFARESSAS Invité

DÉDICACES

A ma femme,

A mon fils Hanza et ma fille Sarah,

A ma mère,

A la mémoire de mon père et de mon frère,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

SOMMAIRE

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION:..... | 1 |
| <u>CHAPITRE I/ : LE GRAPHISME PAR ORDINATEUR:</u> | |
| I.1. INTRODUCTION:..... | 4 |
| I.2. ORGANES CONSTITUTIFS (OU HARDWARE) D'UN SYSTEME GRAPHIQUE. | 6 |
| I.2.1. Les unités centrales GPU et CPU:..... | 6 |
| I.2.2. Le clavier alphanumérique et le clavier de fonctions:..... | 7 |
| I.2.3. Consoles graphiques:..... | 7 |
| I.2.4. Les digitaliseurs:..... | 10 |
| I.2.5. Les machines à dessiner:..... | 12 |
| I.2.6. Les photoplotters:..... | 12 |
| I.2.7. Les disques et les contrôleurs de disques:..... | 13 |
| I.2.8. Autres éléments:..... | 13 |
| I.3. LES LOGICIELS DU SYSTEME GRAPHIQUE:..... | 13 |
| I.3.1. Introduction:..... | 13 |
| I.3.2. Les logiciels graphiques de base:..... | 14 |
| I.3.2.1. Les fonctions primitives graphiques:..... | 16 |
| I.3.2.2. Les fonctions de fenêtrage:..... | 18 |
| I.3.2.3. Autres fonctions utilitaires:..... | 18 |
| I.4. LES APPLICATIONS:..... | 19 |
| I.4.1. Critères de réalisation des logiciels graphiques "orientés problèmes":..... | 19 |
| I.4.2. Principe de la modélisation graphique bidimensionnelle:..... | 20 |
| I.4.2.1. Introduction:..... | 20 |
| I.4.2.2. Transformation bidimensionnelle (2D):..... | 20 |
| I.4.2.3. Formes graphiques ou menu:..... | 22 |
| I.4.2.4. Procédure générale de la modélisation 2D. | 29 |
| I.4.3. Principe de la modélisation graphique tridimensionnelle:..... | 29 |
| I.4.3.1. Introduction:..... | 29 |
| I.4.3.2. Transformations tridimensionnelles (3D).. | 32 |
| I.4.3.3. Transformation perspective:..... | 33 |
| I.4.3.4. Transformation fenêtrage:..... | 36 |
| I.4.3.5. Elimination des surfaces cachées:..... | 38 |

CHAPITRE II/: ADAPTATION DU MICROORDINATEUR APPLE II+ A L'INFOGRAPHIE

| | |
|---|----|
| II.1. INTRODUCTION:..... | 42 |
| II.2. LES CONTRAINTES IMPOSEES PAR UNE APPLICATION DONNEE EN INFOGRAPHIE:..... | 45 |
| II.2.1. L'animation graphique:..... | 45 |
| II.2.2. L'architecture et l'urbanisme:..... | 47 |
| II.2.3. La mécanique:..... | 49 |
| II.2.4. L'électronique:..... | 53 |
| II.3. L'EXPLOITATION DES RESULTATS:..... | 54 |
| II.3.1. Projection dans l'espace d'une pièce mécanique:... | 54 |
| II.3.2. L'animation graphique: le dessin animé:..... | 59 |
| II.3.3. L'architecture et l'aménagement urbain:..... | 60 |
| II.3.4. L'électronique: cas d'un circuit imprimé:..... | 64 |

CHAPITRE III/: APPLICATION DE L'INFOGRAPHIE AUX ANTENNES PARABOLOIDES

| | |
|--|-----|
| III.1. INTRODUCTION:..... | 68 |
| III.2. CHAMP RAYONNE A GRANDE DISTANCE PAR UNE ANTENNE PARABOLOIDE:..... | 72 |
| III.3. GRANDEURS CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE PARABOLOIDE:..... | 73 |
| III.3.1. Diagramme de rayonnement:..... | 73 |
| III.3.2. Gain, directivité et facteur de gain:..... | 74 |
| III.3.3. Impédance d'entrée et bande passante d'une antenne paraboloïde:..... | 78 |
| III.4. LES LOGICIELS D'APPLICATION:..... | 80 |
| III.4.1. Le facteur de gain:..... | 81 |
| III.4.2. Le rendement d'illumination (spill-over):..... | 87 |
| III.4.3. Rendement global:..... | 89 |
| III.4.4. Diagramme de rayonnement:..... | 90 |
| III.4.4.1. Introduction:..... | 90 |
| III.4.4.2. Diagramme de rayonnement 3D:..... | 92 |
| III.4.4.3. Diagramme de rayonnement 2D, en coordonnées polaires:..... | 95 |
| III.4.4.4. Diagramme de rayonnement 2D, en coordonnées cartésiennes:..... | 95 |
| III.5. CONCLUSION:..... | 104 |

CHAPITRE IV/: INTERPRETATION DES RESULTATS.

| | |
|--|-----|
| IV.1. INTRODUCTION:..... | 107 |
| IV.2. PROJECTION DANS L'ESPACE D'UNE PIECE MECANIQUE:..... | 107 |
| IV.3. AMENAGEMENT URBAIN:..... | 109 |
| IV.4. ANIMATION GRAPHIQUE: DESSIN ANIME:..... | 110 |
| IV.5. CIRCUIT IMPRIME:..... | 111 |
| IV.6. ANTENNES PARABOLOIDES:..... | 112 |
| <u>CONCLUSION/</u> :..... | 119 |

ANNEXES
=====

| | |
|---|-----|
| <u>ANNEXE 1/</u> : RAYONNEMENT D'UNE OUVERTURE: LES FORMULES DE KOTTLER:.... | A-1 |
| <u>ANNEXE 2/</u> : RAYONNEMENT DU PARABOLOIDE:..... | B-1 |
| 1 - Introduction:..... | B-1 |
| 2 - Méthode des charges et des courants induits à la surface du réflecteur:..... | B-3 |
| 3 - Méthode de la distribution de champ à l'ouverture:.. | B-7 |
| 4 - Cas où l'ouverture est circulaire:..... | B-9 |
| <u>ANNEXE 3/</u> : LISTINGS:..... | C-1 |

BIBLIOGRAPHIE

AVANT PROPOS

La post-graduation d'Electronique Appliquée du Département d'Electronique de l'Ecole Nationale Polytechnique a pu voir le jour et a pu nous accueillir grâce aux efforts que Monsieur A. ADANE, Maître de Conférences et Directeur de l'Institut d'Electronique de l'U.S.T.H.B. a déployé. Qu'il trouve ici l'expression de notre plus profonde reconnaissance.

Nous le remercions d'autant plus qu'il a par ailleurs accepté de nous guider et de nous conseiller tout au long de ce travail.

Monsieur A. AINOUCHE, Professeur à l'U.S.T.H.B. a bien voulu s'intéresser à ce travail et accepter la présidence de ce jury. Nous lui en sommes profondément reconnaissants.

Nous remercions très sincèrement Monsieur K.S. GRABOWSKI, Professeur à l'E.N.P., pour ses précieux conseils et pour avoir accepté de participer au jury.

Nous remercions bien vivement Monsieur A. ZERGUERRAS, Chargé de Cours et Directeur du Département de Génie Mécanique de l'E.N.P. qui a bien voulu s'intéresser à notre travail et accepter de participer au jury de l'examen.

Que Messieurs E. KARAKHANIAN, Professeur à l'E.N.P. et S. HAFFAËSSAS, Maître assistant et responsable du centre de calcul de l'E.N.P. soient vivement remerciés pour l'intérêt qu'ils ont accordés à notre travail en acceptant de le juger.

Nous tenons particulièrement à témoigner notre profonde gratitude à Messieurs F. BRIKCI, Chargé de Cours à l'E.N.P. pour ses conseils et ses encouragements et Y. FLAMANT pour sa collaboration, sa sympathie et sa disponibilité à tout moment.

Un grand merci emprunt d'affection va à Messieurs N. LAIEB, Docteur Ingénieur et R. SADO UN, enseignant-chercheur à l'E.N.P., pour leur amitié et pour nous avoir secondé dans ce travail.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail, en particulier à Messieurs B. BERKANI, pour la frappe du résumé et M. MAZARI pour celle de la thèse.

INTRODUCTION

Jusqu'à un passé récent, il fallait pour réaliser dans l'industrie un prototype, consulter un certain nombre de catalogues et d'archives, puis exécuter des travaux fastidieux de préparation de plans. A titre d'exemple, on comptait chez le constructeur de voiture "Volkswagen" près de 125000m^2 de papier, 250000 copies de dessins, 150000 appels téléphoniques et autres travaux divers de volume important, lorsqu'on voulait concevoir un nouveau modèle d'automobile |1|.

Aujourd'hui, les systèmes graphiques utilisant l'électronique, permettent de créer entièrement des formes nouvelles grâce aux techniques de conception, de dessin et de fabrication assistés par ordinateur (CAO, DAO, FAO, CFAO et autres) |2, 3, 4|

Les atouts maîtres de ces nouvelles techniques sont le gain de temps, la prise de décision rapide, l'accroissement de la productivité et les coûts de revient moindres. Le concepteur n'a plus de traits d'encre à tracer, ni de liasses de plans à manipuler. Tout se passe dans l'ordinateur.

Cependant, pour être efficaces, ces techniques doivent allier les programmes informatiques de conception aux logiciels et aux matériels graphiques.

Les données sur la géométrie des pièces conçues, leur nombre et leur modèle de fabrication sont stockés dans des bases de données. Chaque opérateur, étant devant un écran alphanumérique, vient y chercher l'information souhaitée. Pour cela, il se sert d'une table à digitaliser, d'un clavier de fonctions, d'une table traçante, d'une imprimante et d'autres accessoires graphiques divers qui constituent la partie matérielle (ou hardware) du système. Il dispose également de logiciels d'application qui sont réalisés souvent dans des langages évolués tels que le FORTRAN, le BASIC ou le PASCAL et qui constituent la partie logicielle (ou software) du système.

On distingue deux sortes de graphisme [4]:

- a) Le graphisme non interactif (appelé encore passif): ce sont essentiellement des images vidéos créées par ordinateur et sur lesquelles l'opérateur n'a ni influence, ni contrôle.
- b) Le graphisme interactif: ce procédé permet à l'opérateur d'agir sur les graphiques grâce à des signaux provenant des circuits d'entrée tels que le clavier et le photostyle.

De nos jours, le graphisme interactif connaît un essor remarquable dans plusieurs domaines. Dans le secteur industriel, on peut citer les applications suivantes: l'aéronautique (conception d'avions ou d'hélicoptères) [2,4], l'électronique (circuits imprimés, circuits intégrés, systèmes digitaux) [5,6], la construction électrique (schématisation) [2], la construction automobile (carrosserie, plans descriptifs ou schémas de câblage) [1], la construction navale (navires ou voiliers) [1], l'architecture (urbanisme, dessin de projet) [7,8], la mécanique (commande numérique des machines, simulation de mécanismes, dessins de finition, mécanique des fluides) [9,10,11], la météorologie (indication des variations de pression et de températures, voies ferrées, contours divers) [13], l'animation graphique (éducation et loisirs) [14] et autres branches d'activités (cartographie, confection textile, cuir, optique, technique vidéos et autres) [15,16,17].

On notera cependant que le principe de base de la réalisation du graphisme est identique pour tous ces domaines d'application.

Le travail qui est présenté ici consiste essentiellement à maîtriser les techniques du graphisme par ordinateur, en vue de résoudre des problèmes de modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle. Pour cela, nous avons utilisé un microordinateur APPLE II+, destiné à l'origine à des calculs scientifiques relativement élaborés, et pouvant également réaliser des travaux de graphisme élémentaire.

En développant des logiciels d'application dans différents secteurs d'activité tels que ceux décrits précédemment, nous avons pu ainsi enrichir la bibliothèque logicielle de l'APPLE II+, de façon à l'adapter au graphisme de haute gamme.

En particulier, nous avons pu simuler sur ordinateur le rayonnement des antennes paraboloides. Ce qui nous a permis d'obtenir un certain nombre d'informations intéressantes quant à l'optimisation des paramètres de construction de telles antennes ou de leur emplacement *in situ*.

Le chapitre I porte sur une présentation du graphisme par ordinateur (ou infographie).

Le chapitre II décrit comment nous avons adapté le micro-ordinateur APPLE II+ et développé des applications concernant notamment l'animation graphique, l'architecture, l'électronique, la représentation de courbes mathématiques et la mécanique.

Dans le chapitre III, nous montrons comment optimiser le facteur de gain et tracer les diagrammes de rayonnement d'antennes paraboloides à l'aide de l'APPLE II+. Ceci permet de déduire le bon choix de l'antenne primaire, du diamètre de l'antenne paraboloides et la distance focale pour une fréquence de travail donnée.

Le chapitre IV est une discussion des résultats obtenus.

En conclusion, nous montrons comment les logiciels mis au point ont transformé l'APPLE II+ en un microordinateur graphique capable de résoudre des problèmes de modélisation bidimensionnelle ou tridimensionnelle, en particulier dans le cas des antennes de surface. -

=====0=====

I.1. INTRODUCTION-PRINCIPE |4,12,18|

De façon générale, l'infographie (ou graphisme par ordinateur) est l'art d'associer du matériel informatique et des logiciels pour permettre de visualiser des graphiques ou des images à partir de données décrivant l'objet à représenter.

Le principe du graphisme par ordinateur consiste à utiliser des techniques de tracé en coordonnées cartésiennes. Ainsi, pour générer une image sur un écran cathodique, on décompose ce dernier, non plus en lignes de caractères, mais en une grille de points, que l'on adresse par un système de coordonnées cartésiennes. Autrement dit, la surface de visualisation graphique correspond à un quadrillage régulier qui permet de repérer tout point accessible en mémoire par un couple (x,y) donnant la position du point lumineux sur l'écran.

En infographie, on distingue deux sortes d'opérations |18| :

- a) la simulation de dessins par ordinateur: Elle consiste à présenter un graphique ou une image à partir d'un traitement préalable de données caractérisant le phénomène ou l'objet à décrire.
- b) la saisie de données graphiques: Elle consiste à digitaliser une forme graphique pour la mettre en mémoire sous forme de données numériques en vue d'un traitement ultérieur de celle-ci.

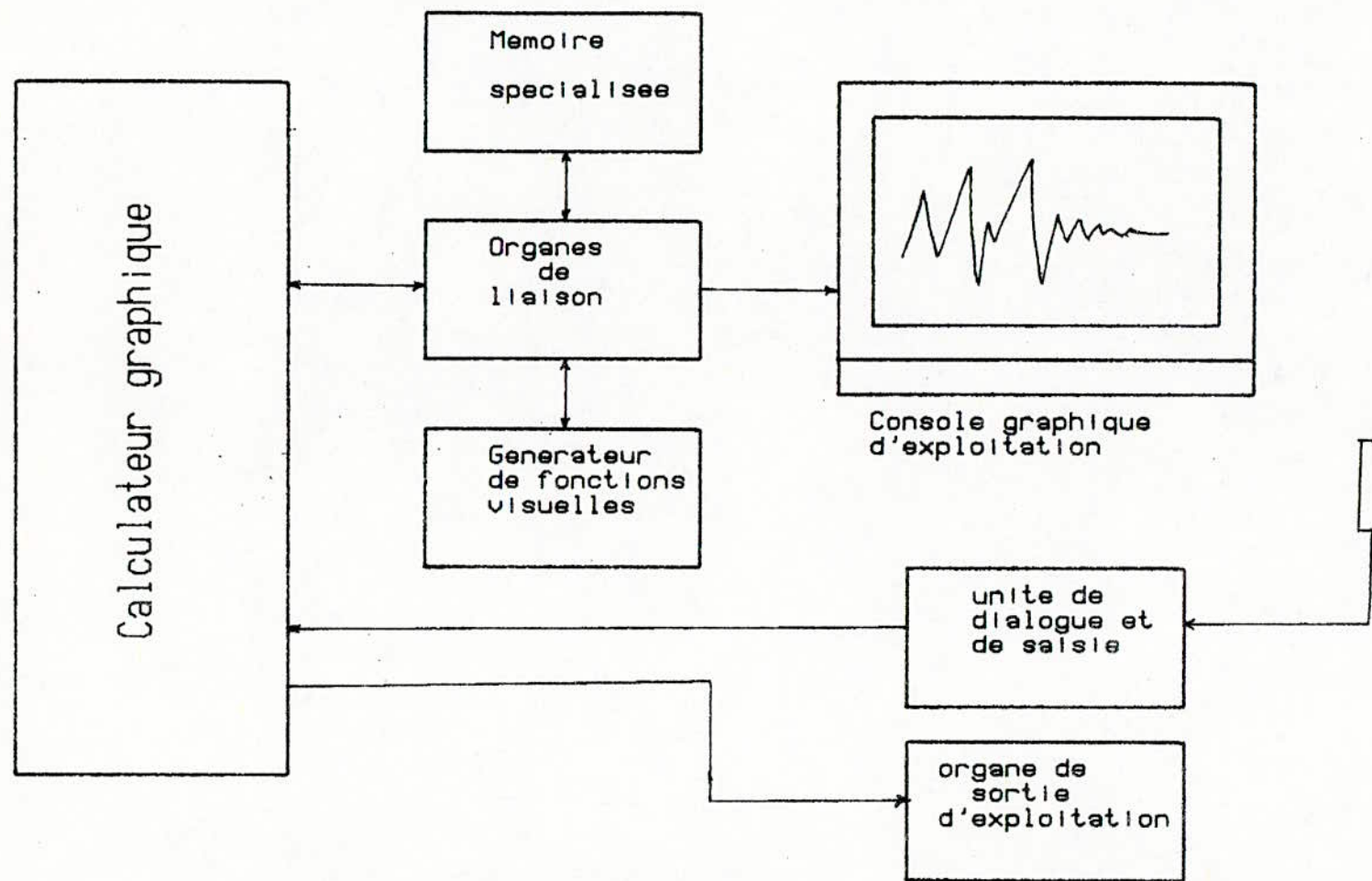
Un système graphique comprend les principaux blocs suivants (figure I-1):

- un calculateur électronique dont le rôle est de traiter les informations graphiques.
- une mémoire spécialisée devant stocker toutes les informations concernant l'objet à manipuler.
- un générateur de fonctions visuelles permettant la modification et l'insertion rapides de symboles ou de fonctions sur l'objet à visualiser.

// HAPITRE I

=====

LE GRAPHISME PAR ORDINATEUR



Fig(I-1): synoptique d'un systeme graphique

- une console de visualisation chargée d'afficher les résultats du traitement du calculateur sous forme graphique.
- des unités de dialogue telles que le photostyle, la table à digitaliser, le clavier ou autres.
- des organes de liaison entre ces différents blocs (pouvant être un processeur graphique).
- des organes de sortie: les machines à dessiner.

En outre, l'ordinateur graphique doit posséder un logiciel graphique de base. Ainsi des langages standards, tels que le BASIC ou le PASCAL interprétés ou compilés sur un calculateur, sont complétés par une bibliothèque graphique. Celle-ci consiste en un ensemble d'instructions qui permettent de réaliser aisément des opérations d'entrée - sortie graphiques. On peut par exemple visualiser un point sur un écran (PLOT) ou se déplacer d'un point à un autre avec tracé (DRAW) ou sans tracé (MOVE).

I.2. ORGANES CONSTITUTIFS (OU HARDWARE) D'UN SYSTEME GRAPHIQUE

I.2.1. Les unités centrales GPU et CPU |2,4,18| =====

Le GPU (ou Graphic Process Unity) traite les images, le CPU (ou Central Process Unity) traite les données numériques. Ces traitements se font également dans des langages évolués tels que le BASIC, le FORTRAN, le PASCAL, l'APL. La mémoire est divisée en deux parties: la page mémoire programmes et données et la page mémoire graphique. Dans cette dernière, l'image est stockée sous forme de tableaux de nombres binaires qui représentent les valeurs des éléments de l'image ou pixels. Dans le cas simple où on stocke une image en noir et blanc, les pixels noirs sont représentés par des "1" logiques et les pixels blancs par des "0" logiques.

L'expérience montre que la mémoire centrale d'un ordinateur graphique doit être assez grande. Elle doit être d'au moins 64 kilos octets dans le cas par exemple d'une modélisation complète de pièces mécaniques. Un minimum de 32 K.O.

sont réservés à la page graphique ayant alors une résolution de 512 x 512 points [4].

I.2.2. Le clavier alphanumérique et le clavier de
=====|
fonctions:|2,4,18|
=====

Le clavier alphanumérique constitue l'élément essentiel du dialogue entre l'homme et la machine. Il permet au concepteur de formuler des commandes, d'écrire un programme ou d'introduire des données dans ce programme. Dans le cas d'un graphisme interactif et conversationnel le clavier de fonctions permet de créer, par des points, des courbes telles que les droites, les cercles, les coniques ou celles générant des surfaces et des volumes. L'opérateur dispose également de fonctions utilitaires telles que la visualisation d'une pièce sous différents angles, la représentation de différentes coupes, l'agrandissement ou la réduction d'échelles.

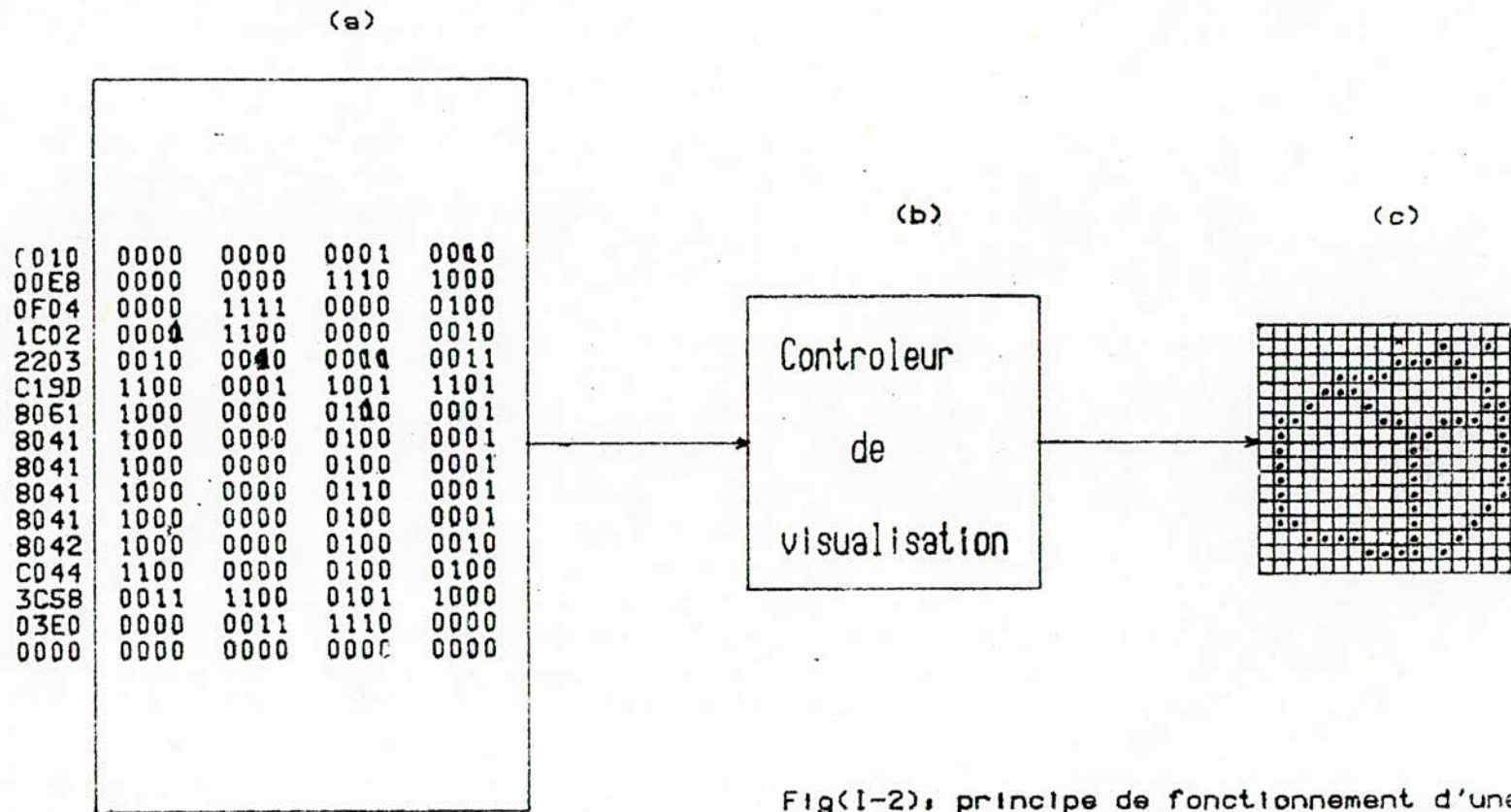
Certains caractères, symboles et formes utilitaires peuvent aussi être disponibles sur ce clavier de fonctions (exemple du symbole d'une porte logique en électronique ou du cube en mécanique).

I.2.3. Consoles graphiques (ou unités d'affichage):|2,4,18|
=====

Les moniteurs vidéos les plus récents ont une composition très simple, soit:

- une mémoire digitale contenant la zone tampon de l'image à visualiser stockée sous forme de matrice de valeurs d'intensité lumineuse (ou pixels),
- un écran de visualisation, par exemple un moniteur T.V. sans la partie son et réception, à large bande et à haute résolution,
- un interface appelé contrôleur de visualisation transmettant le contenu du buffer au moniteur.

Le mode de fonctionnement de ce type de console est schématisé sur la figure I-2. Le contrôleur de visualisation lit



Fig(1-2); principe de fonctionnement d'une console de visualisation

le tableau (a) represente les donnees d'architecture dans la zone tampon

le bloc (b) represente le controleur de visualisation

le bloc (c) represente l'ecran graphique

successivement les bytes des données et convertit les "0" et "1" en un signal vidéo correspondant respectivement à un point noir et un point blanc sur l'écran. Pour modifier l'image il suffit de changer les valeurs de la zone tampon. On peut ainsi faire des rotations, translations, ... de l'objet sur l'écran.

L'écran graphique doit présenter les caractéristiques suivantes |2,4,18|.

- * dimensions/: elles sont caractérisées soit par la diagonale de l'écran, soit par la surface de visualisation donnée en général par le rapport longueur sur hauteur (qui est généralement de 4/3). Les écrans les plus usités ont une diagonale supérieure à 38cm.
- * définition/: elle est déterminée par l'écart minimum de deux entités affichées. Elle est liée à la technologie de l'écran et à la définition informatique basée sur le nombre de points adressables. On peut dire que l'écart est bon s'il n'excède pas 0.25 mm.
- * précision/: elle est caractérisée par l'écart entre la position programmée et la position affichée.
- * fidélité liée à la précision/: c'est la qualité permettant de commencer un tracé en un point exact (c'est-à-dire un bon enchaînement des vecteurs).
- * brillance et contraste/: ils dépendent de la technologie d'affichage et de l'éclairage ambiant.
- * vitesse d'affichage/: c'est un paramètre très important car il peut limiter la densité de l'image affichée.

On distingue plusieurs technologies de fabrication d'écrans graphiques. On peut citer notamment:

- les tubes à mémoire où l'image peut être conservée pendant un laps de temps très long, de l'ordre de quelques heures.
- les tubes à balayage cavalier où l'image est obtenue par balayage déclenché et une légère rémanence de l'écran.
- les tubes à plasma où l'image se forme par ionisation d'un gaz au croisement d'électrodes perpendiculaires. Notons que ces tubes sont peu commercialisés.
- les LCD (Liquide Cristal Display): ce sont des écrans plats conçus pour remplacer dans le future le tube à rayons cathodiques, tout en offrant une profondeur réduite, de meilleures précision et linéarité et surtout, des tensions de commande et de maintien réduites.

I.2.4. Les digitaliseurs: |2,4,18|
=====

De façon générale, un digitaliseur se compose d'une surface de travail plane et d'un dispositif de suivi de contour. Il permet de traduire en données numériques un dessin ou un contour d'objet. Dans le cas de l'enregistrement d'un point, l'appareil traduit les coordonnées de ce dernier en information binaire (figure I-3).

Pour réaliser la saisie d'un dessin, on doit poser celui-ci sur une table à digitaliser et procéder par déplacement continu du dispositif de suivi. Les données numériques peuvent alors être stockées en mémoire ou sur bande magnétique. Le digitaliseur peut être indifféremment utilisé seul ou avec un écran de contrôle. L'écran de contrôle est en fait une consôle qui permet à l'opérateur de faire une première ébauche de la digitalisation obtenue (ou brouillon du dessin). Le digitaliseur dispose alors d'un ensemble de fonctions qui forment par



Figure I-3/: Digitalisation d'un dessin 3D.



Figure I-4/: Photoplotter.

définition un menu. Celles-ci sont juxtaposées au brouillon de façon qu'on puisse agir sur les échelles, ajouter des symboles caractéristiques ou modifier des formes. Le digitaliseur possède aussi des fonctions auxiliaires, comme le calcul de périmètre ou de surface. Les surfaces traitées varient du format normalisé A0 (1198 x 840) au format A4 (197 x 210). La précision des relevés est située entre 0.5 et 0.1 mm.

I.2.5. Les machines à dessiner: |2,4,18|
=====

Elles forment avec l'écran graphique les organes indispensables à toute manipulation graphique par ordinateur. Ainsi, quand on veut reproduire sur papier, un dessin contenu dans la mémoire, on utilise une table traçante XY ou une imprimante graphique.

On distingue trois sortes de machines à dessiner qui diffèrent par leur technologie. Ce sont les machines à plats, les machines à roulement et les machines à tambour.

Il existe aussi des imprimantes graphiques conçues spécialement pour réaliser à la fois la fonction d'imprimante classique d'ordinateur et celle de machine à dessiner. Les avantages de ces appareils sont la rapidité d'exécution, un temps de tracé indépendant de la complexité du dessin. Mais leur inconvénient majeur est de donner une image discontinue se traduisant par une perte de définition de l'image.

I.2.6. Les photoplotters: |2,4,18|
=====

Ces outils permettent d'imprimer des dessins sur du papier photosensible. Leurs applications portent principalement sur la réalisation de circuits imprimés (figure I-4).

Avec les photoplotters, il est possible de réaliser la fonction inverse: celle de procéder au relevé d'un dessin par Scanning.

I.2.7. Les disques et les contrôleurs de disques: |2,4,18|
=====

Des disques durs ou des disquettes sont souvent utilisés pour enregistrer les fichiers descriptifs créés pour chaque pièce. L'enregistrement et la lecture se font à l'aide de contrôleurs (ou drivers) compatibles avec le système graphique. Les fichiers graphiques sont élaborés progressivement de façon à pouvoir stocker toutes les informations concernant la conception détaillée de l'objet.

I.2.8. Autres éléments: |2,4,18|
=====

Associés aux organes cités précédemment, divers outils graphiques assurent une simplicité dans la relation homme-machine. Ce sont par exemple le réticule (deux lignes perpendiculaires déplaçables sur l'écran), la boule roulante, le manche à balai, le crayon lumineux ou d'autres types d'accessoires graphiques. Ces outils permettent de dessiner des points, des objets ou des fonctions prises sur un menu affiché en bordure d'écran (déplacement, rotation, effets de grossissement ou de réduction, effet de fenêtrage, suppression...).

I.3. LES LOGICIELS DU SYSTEME GRAPHIQUE:

I.3.1. Introduction:
=====

Un système de conception graphique comprend des modules de programmes spécifiques à chaque type d'application graphique. On dit aussi langages orientés problèmes. En outre, le système doit renfermer des moyens de dialogue, de contrôle et de supervision de l'exécution des divers modules ainsi que des moyens de stockage et de restitution des informations générées à partir d'une base de données. Les différents systèmes d'applications graphiques ne peuvent cependant traiter que leur propre base de données.

On distingue deux sortes de logiciels (figure I-5):

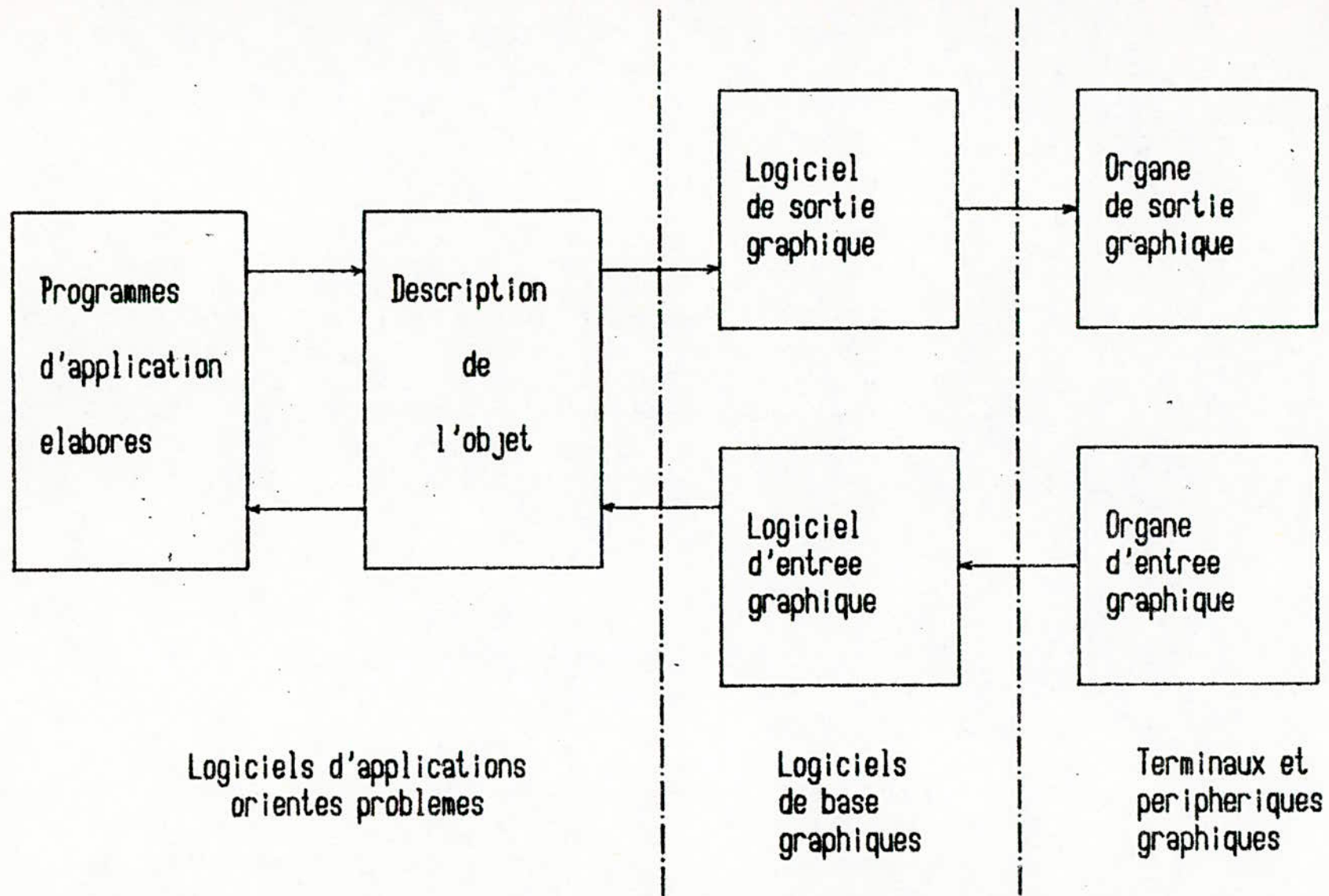
- a) les logiciels de base/: Ils correspondent à des fonctions communes à plusieurs applications. Comme logiciels de base on peut citer ceux destinés aux écrans interactifs, aux machines à dessiner, à la gestion de bases de données et aux modélisations tridimensionnelles.
- b) les logiciels élaborés/: Ce sont des fonctions orientées problèmes, réalisées de façon à être aussi interactives que possible.

D'une façon générale, on peut dire qu'un logiciel graphique est réalisé de façon à faciliter l'utilisation des entrées-sorties graphiques. Sans de tels logiciels, les programmes d'application graphiques seraient extrêmement difficiles à écrire. Ainsi, un ensemble de sous-programmes et de fonctions sont pré-définis dans le système, puis utilisés lors de l'écriture d'un programme d'application graphique.

I.3.2. Les logiciels graphiques de base: |2,4,18,26| =====

Les fonctions et les procédures d'un système graphique sont classées en modules-programmes de sorte que chaque module concerne une application bien particulière. Il est alors possible de compléter le système en apportant des corrections logicielles uniquement sur le module concerné. Les fonctions de base nécessaires à un système graphique sont les suivantes:

- * les primitives graphiques/: cet ensemble de fonctions permet la visualisation de points, lignes, caractères de texte, arcs de cercle et autres fonctions graphiques simples.
- * les fonctions de fenêtrage/: ces fonctions permettent au programmeur de choisir un système de coordonnées pour la définition de l'image et définir les bornes de la portion de l'image qu'il désire visualiser.



Fig(I-5): structure d'un logiciel graphique interactif

- * les fonctions de segmentation/: ce sont des fonctions avec lesquelles une modification de l'image est facilement réalisable.
- * les fonctions des transformations à deux dimensions/: elles permettent de faire des rotations, des translations, des agrandissements d'échelles ou des compressions de l'image.
- * les fonctions d'entrée/: l'utilisateur peut, grâce à ces fonctions, procéder à différentes commandes à l'aide du clavier ou d'un autre circuit d'entrée.

Dans les paragraphes suivants, nous allons définir de manière plus précise les fonctions les plus importantes parmi celles-ci.

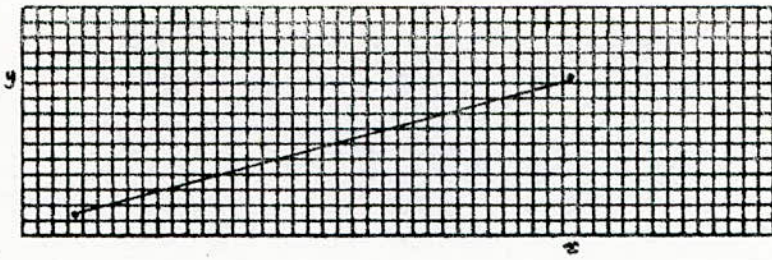
1.3.2.1. Les fonction primitives graphiques: -----

Ces fonctions sont utilisées pour spécifier les lignes et les caractères composant l'image. Elles complètent les langages classiques tels que le BASIC, le FORTRAN ou le PASCAL. Les plus importantes sont intitulées respectivement:

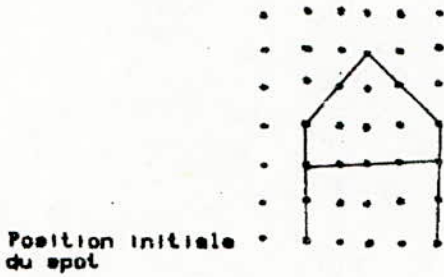
MOVETO (x,y)/ : Elle consiste à placer le faisceau à la position (x,y) du système de coordonnées de l'écran et réaliser la réinitialisation à (x,y).

LINETO (x,y)/ : Elle permet de tracer une ligne droite de la position actuelle jusqu'au point de coordonnées (x,y) et de procéder à l'initialisation à la position (x,y) pour le prochain caractère (figure I-6).

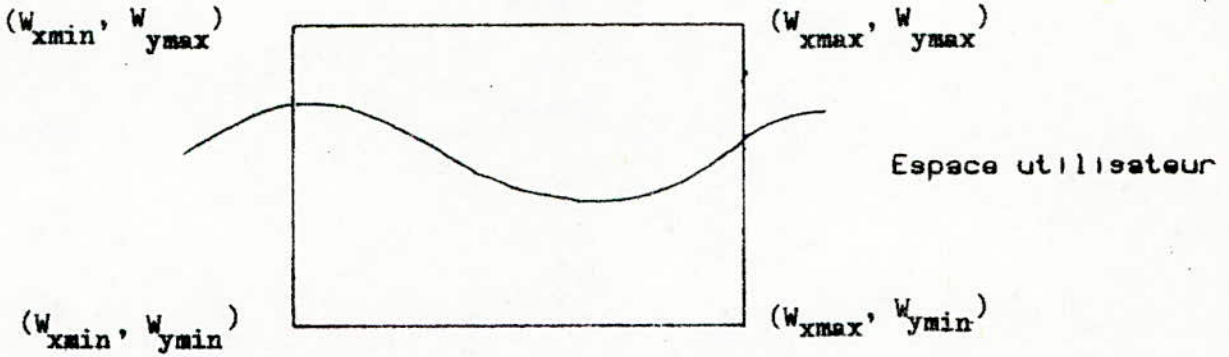
DRAWTEXT(S) / : Elle affiche un texte S sur l'écran selon les conditions suivantes: le point du premier caractère qui est le plus bas et se trouve à gauche doit coïncider avec la dernière position du spot (figure I-7).



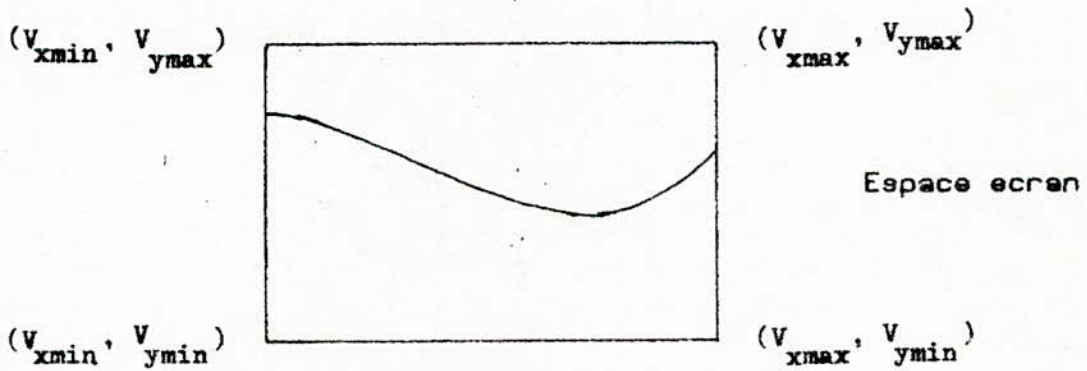
Fig(I-6), LINTO (x,y)



Fig(I-7), DRAWTEXT (A)



Fig(I-8), WINDOW



Fig(I-9), VIEWPORT

PENCOLOR (C)/: Elle revient à tracer une courbe ou à placer un caractère sur l'écran avec une couleur spécifiée C.

Notons que certains systèmes possèdent d'autres fonctions primitives graphiques telles que la visualisation d'un point de coordonnées (x,y) sur l'écran (ou HPLOT (x,y)) de lignes en pointillés, de lignes avec différentes couleurs, d'arcs de cercle et autres.

I.3.2.2. Les fonctions de fenêtrage:

Ce sont les fonctions suivantes:

SETWINDOW (W_{xmin}, W_{xmax}, W_{ymin}, W_{ymax}): Celle-ci donne la position de la fenêtre sur l'image qui s'étend du point (W_{xmin}, W_{ymin}) en bas et à gauche, au point (W_{xmax}, W_{ymax}) en haut et à droite, au niveau de l'espace des données (appelé également espace utilisateur ou espace observateur) (figure I-8).

SETVIEWPORT (V_{xmin}, V_{ymin}, V_{xmax}, V_{ymax}): Celle-ci définit la fenêtre correspondant au SETWINDOW précédent et la visualise sur l'écran. Elle s'étend du point (V_{xmin}, V_{ymin}) en bas et à gauche jusqu'au point (V_{xmax}, V_{ymax}) situé en haut et à droit de l'écran. (figure I-9).

I.3.2.3. Autres fonctions utilitaires:

Pour compléter un support logiciel graphique simple, il est utile que les systèmes graphiques disposent de fonctions telles que :

CLEARSCREEN: C'est à dire effacer l'écran en mode graphique.

INITGRAPHICS: C'est une fonction appelée au début de l'exécution d'un programme de manipulation graphique pour effacer l'écran et l'initialiser au mode graphique. Elle est souvent

utilisée pour passer du mode texte au mode graphique.

FILLSCREEN(C): Qui consiste à remplir l'écran avec une couleur C.

I.4. LES APPLICATIONS:

I.4.1. Critères de réalisation des logiciels graphiques
=====

"orientés problèmes"

=====

Il y a beaucoup de façons de créer des objets. Aucun programme ne pourrait les contenir toutes. Chaque discipline, chaque secteur (par exemple l'architecture, la construction navale, la mécanique ou l'électronique) demande des procédures d'acquisition spécialement adaptés. Toutefois la méthodologie de création des logiciels d'application est identique à tous les domaines et elle doit répondre aux critères suivants: |4,18|

- la simplicité/: C'est à dire que les logiciels doivent être facilement compris par l'utilisateur..
- la consistance/: Qui est l'aptitude de l'ordinateur à disposer de systèmes de coordonnées, de fonctions graphiques nommées et prédéfinies ainsi que de programmes d'aide à la correction des erreurs.
- l'extension/: On doit avoir des fonctions et des subroutines qui permettent des manipulations graphiques assez aisées et englobent une large gamme d'applications. Elles doivent offrir la possibilité d'être complétées par l'utilisateur suivant les exigences de l'application mise en oeuvre.
- la robustesse/: Pour protéger l'appareil contre les fausses manoeuvres, le logiciel réalisé doit être capable d'arrêter l'exécution du programme, s'il y a des erreurs et de signaler leurs natures.
- Les performances/: Autrement dit, le temps de réponse des logiciels et des systèmes graphiques doit être

assez court (de l'ordre de quelques secondes).

Notons que ce temps de réponse (logiciel + système) est limité par le type de langage utilisé et la vitesse d'exécution du processeur.

I.4.2. Principe de la modélisation graphique bidimensionnelle:
=====

I.4.2.1. Introduction:

La modélisation graphique bidimensionnelle est, par définition, la représentation de courbes ou d'objets dans un système de coordonnées à deux dimensions. Et toute représentation bidimensionnelle peut être construite en combinant trois éléments de base: le point, le segment et l'arc de cercle. De ce fait, une relation est établie entre le système de coordonnées et l'écran (figure I-10). La modélisation d'un objet nécessite au préalable une étude détaillée de sa géométrie dans l'espace afin d'en déduire le contour, les différentes faces et coupes. On obtient ainsi un premier modèle, à partir duquel l'opérateur peut éventuellement agir pour modifier la forme de l'objet. Pour réaliser cette opération, on utilise les outils mathématiques tels que les équations algébriques et les opérations de rotation, translation, changement d'échelle et autres.

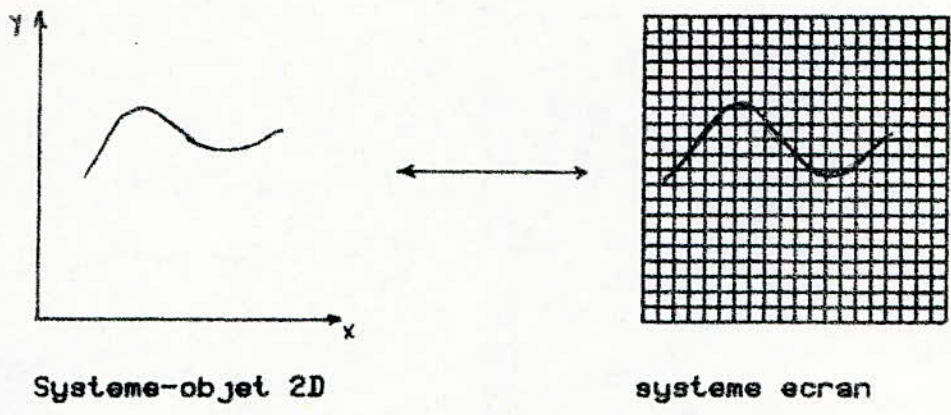
Un menu défini à l'avance aide à la conception finale de l'objet.

Les exemples les plus courants de modélisation graphique bidimensionnelle sont :

- la représentation graphique en temps réel d'une grandeur physique qui évolue dans le temps,
- le schéma d'un circuit imprimé en électronique,
- l'architecture et l'urbanisme et autres.

I.4.2.2. Transformation bidimensionnelle (2D):

Ce sont des transformations affines qui permettent au concepteur de procéder à la suppression partielle ou totale d'un objet visualisé sur écran, de compléter une partie par symétrie et d'effectuer des rotations, des translations ou des changements d'échelle.



Fig(I-10): modelisation graphique 2D

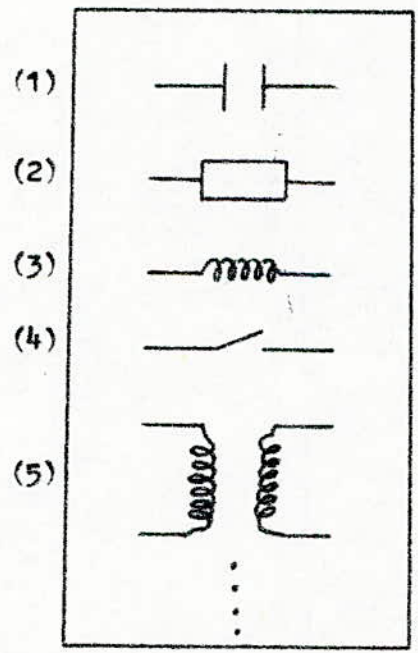


Figure I-11/: Menu d'une application simplifiée au schéma électrique.

I.4.2.3. Formes graphiques ou menu: |23,24,25,26,27|

Un menu est un ensemble de formes graphiques utilitaires créées par logiciel et stockées sur disquette. Ceci afin de faciliter la tâche de l'utilisateur. Ainsi, lors d'une conception donnée, il suffit d'appeler la forme graphique voulue et de la positionner sur l'écran.

A titre d'exemple, la figure (I-11) donne le menu d'une application simplifiée au schéma électrique.

Voyons comment réaliser un schéma de câblage électrique à partir de ce menu et, de façon plus générale, comment construire une table de forme graphique pour une application donnée.

a) Codification des déplacements:

Pour expliquer la conception d'un menu, nous allons raisonner sur le symbole le plus simple: le condensateur. Celui-ci va être représenté selon le même principe que celui développé au paragraphe (I.2.3). Il sera visualisé sur écran par un ensemble de points correspondants à des codes bien déterminés. Pour représenter le condensateur, le concepteur doit choisir un point origine. Puis, il procède à des déplacements successifs du point, jusqu'à obtention de la forme finale.

De façon générale, la traduction des différents déplacements sous forme d'octets graphiques nécessite l'élaboration d'une table de codage des vecteurs déplacements |23|. Le tableau I-1 définit les vecteurs associés aux différents déplacements orthogonaux spécifiques au système Apple II et les codes correspondants.

Pour obtenir un déplacement oblique, il suffit de combiner deux déplacements orthogonaux (voir tableau I-2).

| Symbole | Type de déplacement | code machine | code mnemonique |
|---------|------------------------------|--------------|-----------------|
| ↑ | vers le haut sans tracé | 000 | H |
| ↑ | vers le haut avec tracé | 100 | h |
| → | vers la droite sans tracé | 001 | D |
| → | vers la droite avec tracé | 101 | d |
| ↓ | vers la bas sans tracé | 010 | B |
| ↓ | vers le bas avec tracé | 110 | b |
| ← | vers la gauche sans tracé | 011 | G |
| ← | vers la gauche avec tracé | 111 | g |

Tableau (I-1): codage des vecteurs déplacement
sur APPLE II+

















| Symbole | équivalents orthogonaux | code machine | code mnémonique |
|---|---|--------------|-----------------|
|  |  | 001 000 | DH |
|  |  | 101 000 | dH |
|  |  | 001 010 | DB |
|  |  | 101 010 | dB |
|  |  | 010 011 | GB |
|  |  | 110 011 | bG |
|  |  | 011 000 | GH |
|  |  | 111 000 | Gh |

Tableau (I-2): Codage des déplacements obliques

| | |
|------------|----|
| 00 101 101 | 2D |
| 00 101 101 | 2D |
| 00 100 110 | 26 |
| 10 101 001 | A9 |
| 00 100 100 | 24 |
| 00 110 001 | 31 |
| 00 101 101 | 2D |
| 00 101 101 | 2D |
| 00 000 000 | 00 |

Tableau I-3/: Regroupement en octet des codes du condensateur

b) Format d'un octet graphique:

Les codes des vecteurs des déplacements sont regroupés par un ensemble de deux ou trois bits pour former un octet graphique. La figure (I-12) montre que celui-ci comporte trois champs où $T = 0$ correspond à un déplacement sans tracé et $T = 1$ est relatif à un déplacement avec tracé.

Dans le champ 1 il n'est pas nécessaire de définir la valeur de T car elle est implicitement nulle. Autrement dit, ce champ correspond toujours à un déplacement sans tracé. Notons qu'une valeur nulle du champ 1 revient à ne pas tenir compte de celui-ci et qu'un octet nul marque la fin de la forme graphique.

c) Exemple: Représentation graphique d'un condensateur:

La figure (I-13) donne l'image agrandie du condensateur tel qu'on peut l'obtenir sur un écran graphique. Cette représentation sera codée par la succession des vecteurs-déplacements suivants établis à partir du tableau I-1:

→ → → → ↕↓ ↕↓ → ↕↓ ↕↓ → → → →

Ainsi les codes machines correspondants seront:

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 101 | 101 | 101 | 101 | 100 | 110 | 010 | 101 | 001 | 100 |
| 100 | 110 | 001 | 101 | 101 | 101 | 101 | | | |

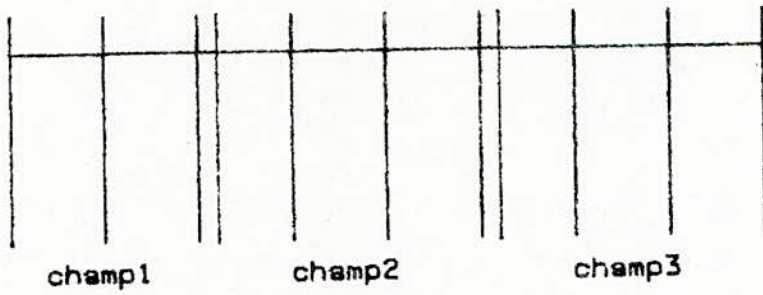
Après regroupement, on obtient les octets graphiques servant à représenter un condensateur: tableau I-3.

d) Représentation hexadécimale de la forme d'un objet:
cas du condensateur

Les octets obtenus précédemment seront transcodés en hexadécimal puis stockés en mémoire.

Dans le cas du condensateur, nous aurons:

2D, 2D, 26, A9, 24, 31, 2D, 2D, 0



Fig(I-12): organisation d'un octet graphique

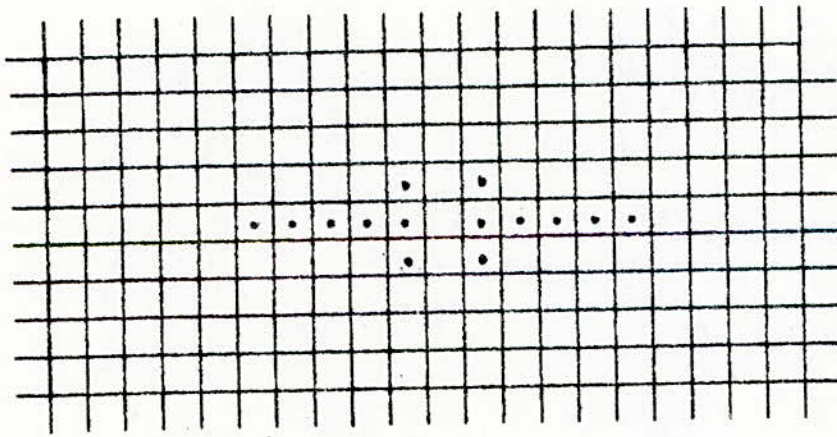


Fig (I-13): representation du condensateur sur la grille de l'ecran

e) Généralisation aux autres symboles du menu
"schéma électrique":

Nous procéderons de la même manière pour obtenir les formes graphiques des éléments (2), (3), (4)... du menu de la figure (I-11). Ces objets seront rangés dans une table. Des adresses et des codes leur seront attribués.

La table graphique finale obtenue est représentée par la figure (I-14).

L'adresse ADD correspond à l'implantation de la table en mémoire et indique le nombre de formes graphiques constituant le menu. Remarquons que ce nombre ne doit pas excéder 255 dans le cas de l'Apple II+.

Entre $ADD+2$ et $ADD+(2n + 2)$, on doit indiquer les adresses des débuts des différentes formes graphiques en mémoire.

Nous plaçons ensuite à partir de l'adresse $ADD + (2n+4)$ les différentes formes précédemment créées et traduites en hexadécimal.

f) Visualisation d'une forme quelconque du menu sur l'écran:

Une instruction:

DRAW I AT X,Y

est prévue sur le système Apple II+ et permet de représenter sur l'écran la forme numéro I aux coordonnées (X,Y).

L'instruction:

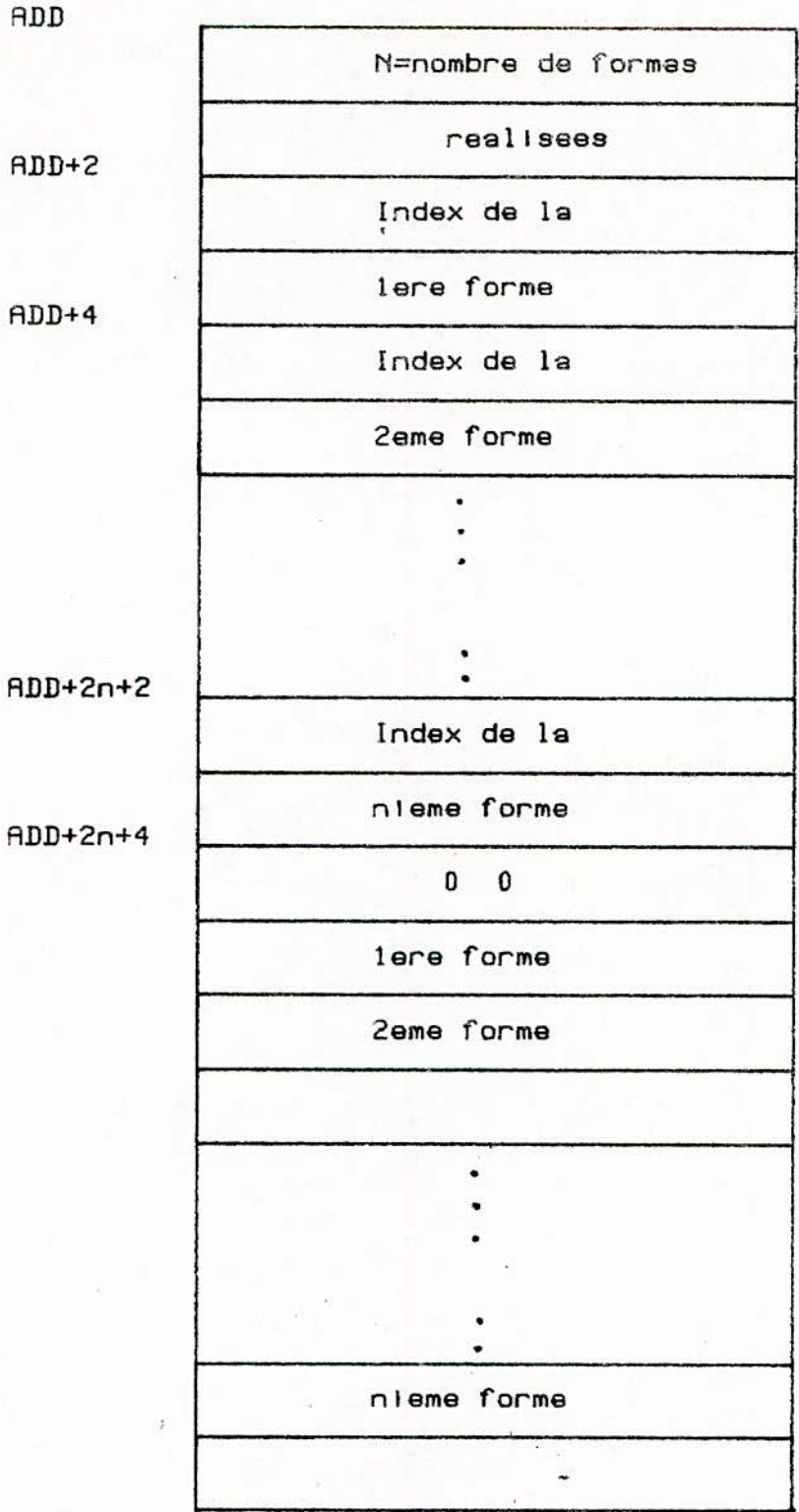
XDRAW I AT X,Y

permet l'effacement total de la forme numéro I.

L'apple II+ possède également des instructions de rotation et de changement d'échelle de ces formes.

Ainsi, ROT = θ fait subir une rotation d'un angle θ à la forme considérée. Cette instruction ne fait des rotations que par pas de 45° .

D'autre part SCALE = n permet d'agrandir cette forme n fois.



Fig(I-14): organisation en memoire des elements du menu

I.4.2.4. Procédure générale de la modélisation 2D:

Pour une application donnée on doit :

- Définir un menu formé de symboles du type (1), (2),... de la figure (I-11).
- Elaborer un programme d'aide au tracé.
- Faire appel aux sous-programmes qui permettent la transformation de l'objet (rotation, translation et changement d'échelles par exemple).

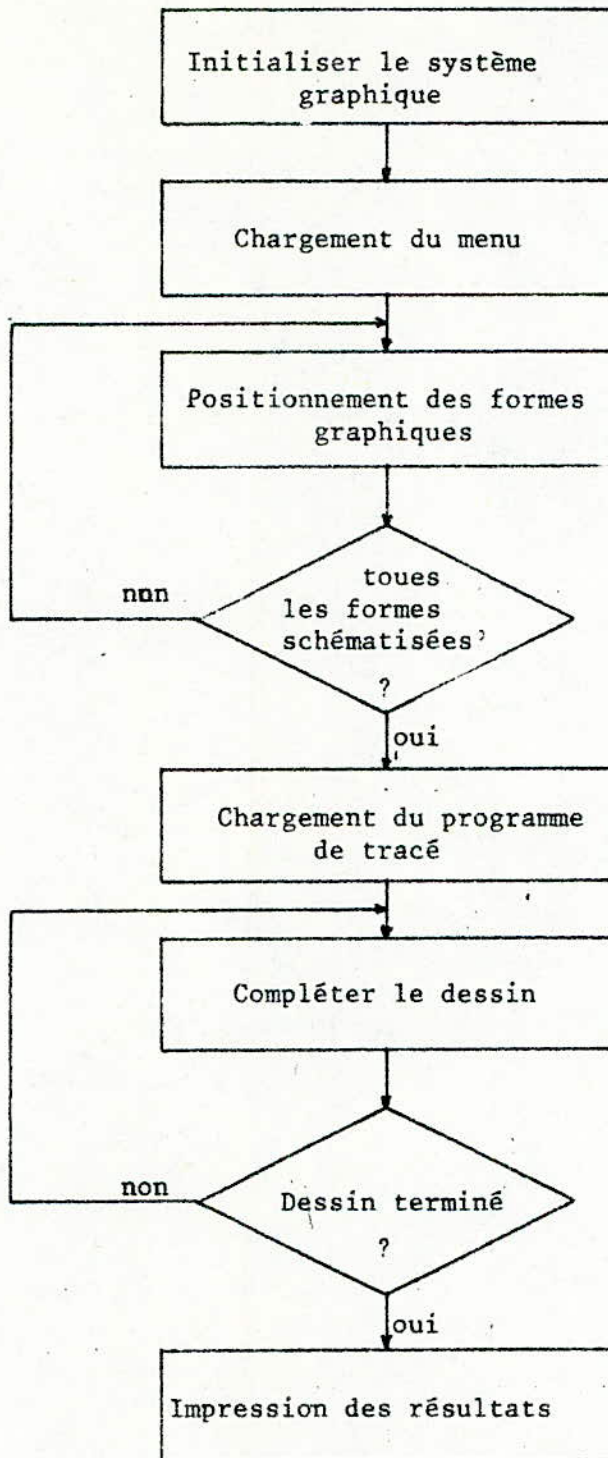
Ceci est schématisé par l'organigramme donné par la figure (I-15).

I.4.3. Principe de la modélisation graphique tridimensionnelle :
=====

I.4.3.1. Introduction:

La modélisation graphique tridimensionnelle (3D) est la représentation de courbes ou d'objets dans un système de coordonnées à trois dimensions. En effet, considérons une scène composée de N objets à trois dimensions. L'ensemble de ces objets est repéré dans un système de coordonnées cartésiennes tridimensionnel, appelé système-objet (World Space). Il n'existe pas de règles bien définies pour fixer l'origine du système-objet, sauf qu'il faut choisir le système de référence de façon à pouvoir représenter tous les objets de la scène et rendre aisée l'application de toute opération de transformation. Ainsi, dans la littérature [4,18], on trouve que la méthode la plus courante est celle qui lie l'origine du système-objet soit à un sommet d'un objet soit à un centre de symétrie. Remarquons toutefois, que certains auteurs préfèrent lier le système-objet à l'élément le plus important de la scène [4].

Le problème qui se pose dans une modélisation graphique 3D est de pouvoir représenter un objet à trois dimensions sur un écran graphique qui est, par construction, bidimensionnel. Il faut donc établir une relation entre deux systèmes de référence de dimensions différentes: le système-objet (3D) et le système-écran (2D).



Fig(I-15): organigramme d'une modelisation 2D

Cette correspondance doit reproduire aussi fidèlement que possible l'image d'un objet sur l'écran. Pour cela, on procède à une combinaison de plusieurs transformations qui sont la perspective, la rotation, la translation, le changement d'échelle et autres. A ces opérations, on peut associer également les techniques d'élimination de surfaces cachées, de brillance, de couleur, de texture, d'ombrage... Ceci aboutit à deux classes de données graphiques qui correspondent respectivement à la géométrie de l'objet et à la topologie de la scène.

La géométrie de l'objet peut être définie à partir de la mesure des coordonnées d'un point quelconque de celui-ci par rapport au système-objet. Ceci permet ensuite de déterminer les dimensions de l'objet.

La topologie de la scène formée de plusieurs objets consiste à construire celle-ci en adoptant la hiérarchie suivante:

- Détermination des sommets de chaque objet et stockage en mémoire de leurs coordonnées.
- Construction de polygones à partir des sommets de l'objet (ceci requiert un traitement de données pour former l'objet).
- Reconstitution numérique des objets composant la scène.
- Combinaison de ces objets en vue de former la scène.
- Affichage de la scène sur l'écran.

De façon générale, la modélisation graphique 3D nécessite l'utilisation des opérations suivantes:

- Les transformations tridimensionnelles (rotation, translation,...).
- Les transformations perspectives.
- Les transformations de fenêtrage (WINDOWING).
- Élimination des surfaces cachées.
- Ombrage, texture, coloration.

I.4.3.2. Transformations tridimensionnelles (3D):

Comme dans le cas d'une modélisation 2D, la représentation d'un objet tridimensionnel nécessite une étude approfondie de sa géométrie dans l'espace afin d'en déterminer un ensemble de courbes constituant la forme finale de l'objet.

L'objet à modéliser sur l'écran est défini au départ dans le système-objet (notons que le trièdre du système-objet est de sens direct). La correspondance espace-objet espace-écran est établie de la manière suivante |4| :

Un point M dont des coordonnées sont (x_1, y_1, z_1) dans le système-objet sera repéré dans un système de référence lié à l'observateur (ou système-observateur) par les coordonnées (x_e, y_e, z_e) telles que (figure I-16):

$$(x_e, y_e, z_e) = |x_1, y_1, z_1| \times V \quad (I-1)$$

V est une transformation visuelle qui permet, de façon générale, à l'observateur de choisir une vue de l'objet et représenter cette dernière sur l'écran avec un maximum de détails. Elle a pour expression générale:

$$V = W \circ A \quad (I-2)$$

W représente les opérations de rotation, translation, changement d'échelle, identité ou leur combinaison.

A est une opération de symétrie par rapport à l'écran. Elle existe quelque soit la transformation V envisagée, car elle permet d'obtenir une image réelle de l'objet sur l'écran. Si on ne tenait pas compte de la transformation A, on obtiendrait une image virtuelle (comme par exemple dans le cas d'un miroir).

La représentation matricielle de A est :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (I-3)$$

Elle a été exprimée dans le système de coordonnées homogènes [4] afin de simplifier ultérieurement les algorithmes de calcul.

Soient $(x'_e, y'_e, z'_e, 1)$ les coordonnées du point M dans un trièdre lié à l'observateur et de même sens que celui du système-objet.

Soient $(x_e, y_e, z_e, 1)$ les coordonnées de ce point dans le système-observateur (trièdre rétrograde).

L'application de l'opération A donne :

$$(x'_e, y'_e, z'_e, 1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{pmatrix} \quad (I-4)$$

D'où :

$$x'_e = x_e \quad (I-5)$$

$$y'_e = y_e \quad (I-6)$$

$$z'_e = -z_e \quad (I-7)$$

On voit donc que cette transformation permet d'inverser le sens du trièdre du système-observateur par rapport à celui du système-objet.

I.4.3.3. Transformation perspective:

De façon générale, la perspective est l'art de représenter par le dessin sur un plan les objets tels qu'ils paraissent vus à une certaine distance et dans une position donnée. Pour la perspective cavalière, le point de vue est rejeté à l'infini.

Dans notre cas, la perspective consiste à faire une projection oblique de chaque point d'un objet sur l'écran graphique selon la direction de l'observation.

Ainsi, le point M de coordonnées (x_e, y_e, z_e) dans l'espace observateur sera projeté sur l'écran en un point P de coordonnées (x_s, y_s) : figure (I-17).

Pour des applications graphiques, il est très utile de déterminer les relations existant entre les coordonnées M et P.

Soient Q et Q' les projections orthogonales sur l'axe \vec{oz}_e , des points M et P respectivement. Elles déterminent deux segments de droite: MQ et PQ'. Le segment PQ' est la projection de MQ sur l'écran graphique. Il est perpendiculaire à \vec{oz}_e au point Q' qui est le centre de l'écran. A partir des triangles semblables OPQ' et OMQ (figure I-17), on peut écrire les rapports de similitude suivants:

$$\frac{D}{z_e} = \frac{x_s}{x_e} = \frac{y_s}{y_e} \quad (\text{I-8})$$

D est la distance observateur-écran et z_e est la profondeur de l'objet.

D'où :

$$x_s = x_e \left(\frac{D}{z_e} \right) \quad (\text{I-9})$$

$$y_s = y_e \left(\frac{D}{z_e} \right) \quad (\text{I-10})$$

Si on désire réduire le format de la représentation graphique, il faut diviser les dimensions de l'objet par un facteur d'échelle. Soient S_x et S_y , les facteurs d'échelle qui agissent respectivement sur l'abscisse x_e et l'ordonnée y_e . L'expression générale des coordonnées x_s et y_s devient alors:

$$x_s = \left(\frac{D}{S_x} \right) \frac{x_e}{z_e} \quad (\text{I-11})$$

$$y_s = \left(\frac{D}{S_y} \right) \frac{y_e}{z_e} \quad (\text{I-12})$$

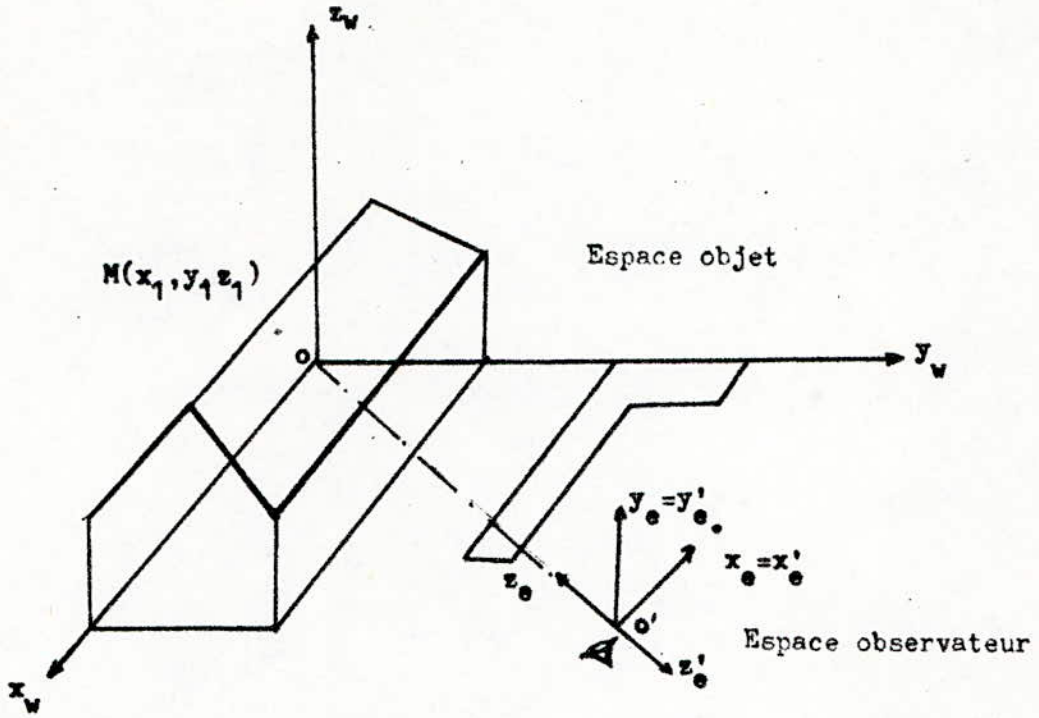


Figure I-16: Transformations 3D (espace objet-espace observateur)

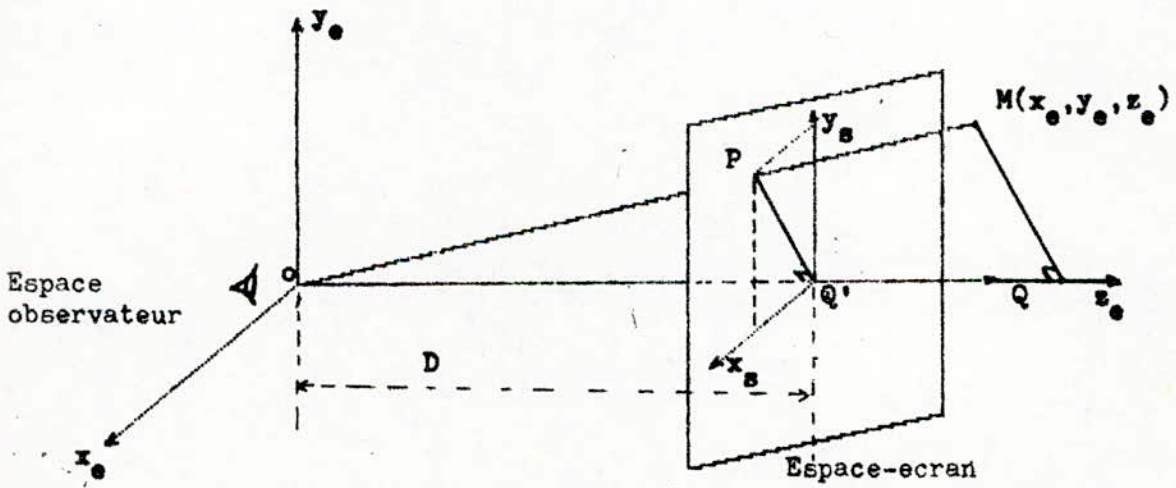


Figure I-17: Transformation perspective (espace observateur-espace ecran)

Quand on veut traduire toutes les informations que nous venons de voir sous forme d'algorithmes et de programmes, il faut décomposer celles-ci en une série d'opérations simples. Ainsi la rotation, la translation et la symétrie peuvent être obtenues à partir d'un ensemble d'opérations de multiplication et d'addition. Quant à la perspective, il faut effectuer des opérations d'addition, de multiplication et de division. Dans ce cas, le temps de réponse du système devient plus long, car l'opération de division introduit un retard supplémentaire.

Si on devait réaliser de tels algorithmes sur tous les points d'un objet (point par point), les calculs deviendraient fastidieux. Or, pour déterminer une droite, il suffit de connaître deux de ses points. Pour projeter un segment, il suffit donc de transformer ses deux extrémités. Ceci réduit énormément le temps de réponse du système graphique.

I.4.3.4. Transformation "fenêtrage":

Cette opération est indispensable si on s'intéresse seulement à une partie de la scène. Elle évoque donc une fenêtre (ou WINDOW) dans l'espace-objet. Cette fenêtre se traduit sur l'écran par un cadre rectangulaire appelé VIEWPORT. Par suite, à l'intérieur de ce dernier, toutes les informations sélectionnées par la fenêtre seront visualisées.

L'image du centre de la fenêtre se transforme en général au centre du cadre ou VIEWPORT.

Soient V_{cx} et V_{cy} les coordonnées de ce dernier (figure I-18):

$$V_{cx} = \frac{V_{xl} + V_{xr}}{2} \quad (I-13)$$

$$V_{cy} = \frac{V_{yb} + V_{yt}}{2} \quad (I-14)$$

V_{xl} et V_{yb} sont les coordonnées du coin inférieur du VIEWPORT, situé à gauche de l'écran.

V_{xr} et V_{yt} sont celles du coin supérieur du cadre rectangulaire et se trouvant à droite de l'écran.

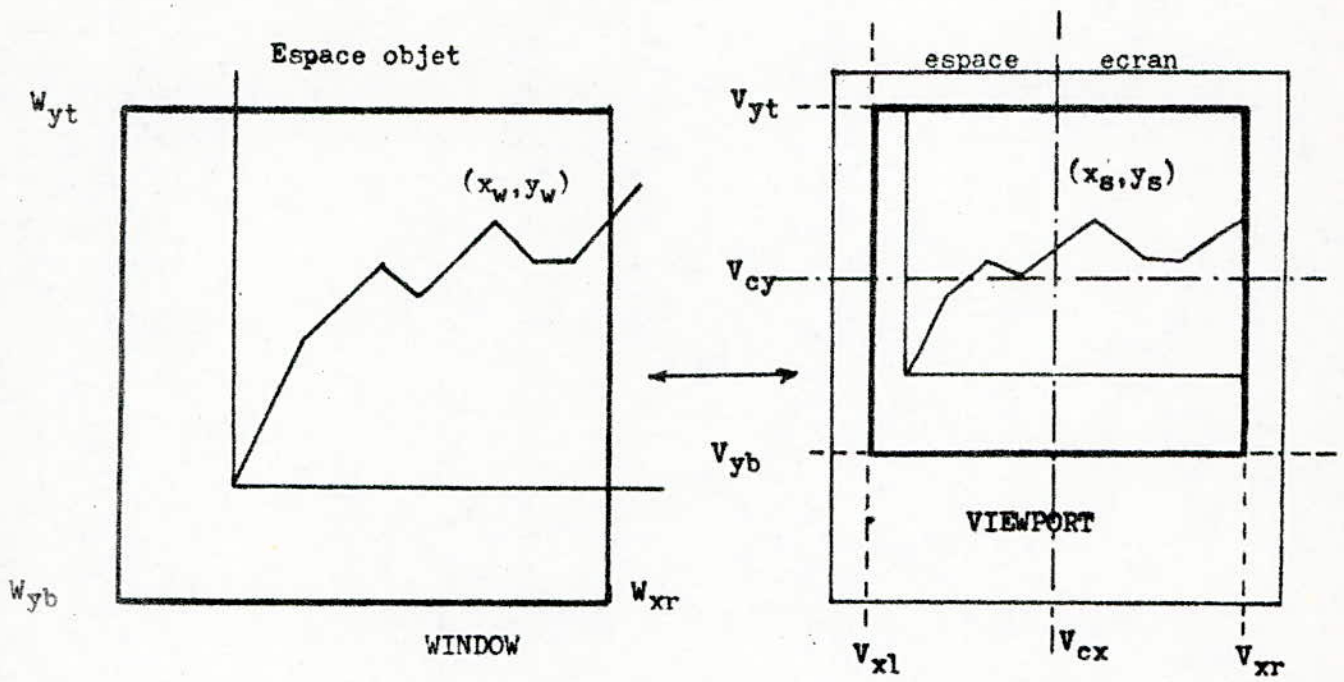


Figure I-18: WINDOW et VIEWPORT

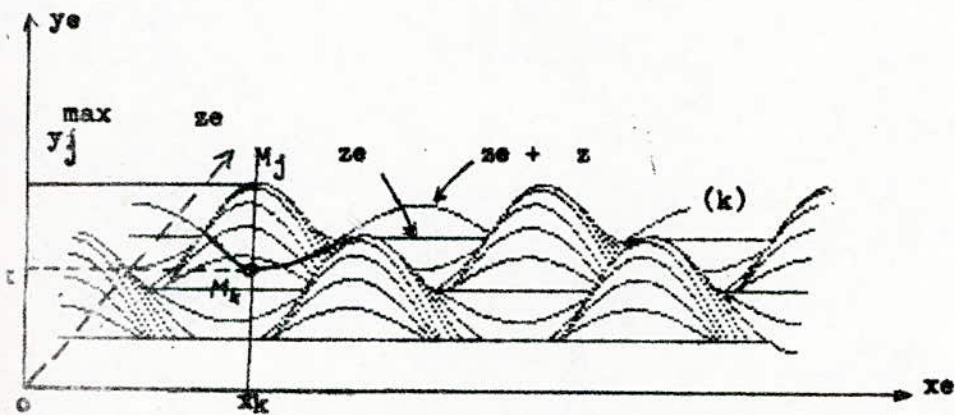


Figure I-19: Elimination du tracé des points cachés.

Soient $2V_{sx}$ la largeur du cadre et $2V_{sy}$ sa hauteur. Un point d'un objet contenu dans la fenêtre se projettera en perspective dans le VIEWPORT selon un point de coordonnées :

$$x_s = \left(\frac{DV_{sx}}{S_{z_e}} \right) x_e + V_{cx} \quad (I-15)$$

$$y_s = \left(\frac{DV_{sy}}{S_{z_e}} \right) y_e + V_{cy} \quad (I-16)$$

Ceci est un système de deux équations à deux inconnues, dont l'expression générale est :

$$x_s = a \frac{x_e}{z_e} + b \quad (I-17)$$

$$y_s = c \frac{y_e}{z_e} + d \quad (I-18)$$

Il suffit donc de calculer les coefficients a,b,c et d une fois pour toutes, puis d'utiliser le système d'équation (I-17) et (I-18) pour en déduire les coordonnées x_s et y_s .

Avec cette méthode, il n'est plus nécessaire de répéter chaque fois les opérations de multiplication et de division requises dans le calcul des coefficients des équations (I-17) et (I-18). Ceci augmente la rapidité du déroulement de l'algorithme.

I.4.3.5. Elimination des surfaces cachées: |18,19,20,21|

L'ensemble des points(x_s, y_s) qu'on obtient par perspective donne une image d'objets où même les surfaces arrières sont visualisées. Or la plupart des objets sont opaques et masquent toute vision de ce qui se trouve derrière eux. Ainsi, les faces arrières ne sont pas visibles. Par conséquent, il ne faut pas représenter sur l'écran les surfaces cachées d'un objet.

WRIGHT |19| a mis au point un algorithme que nous utilisons ici pour éliminer ce type de surface.

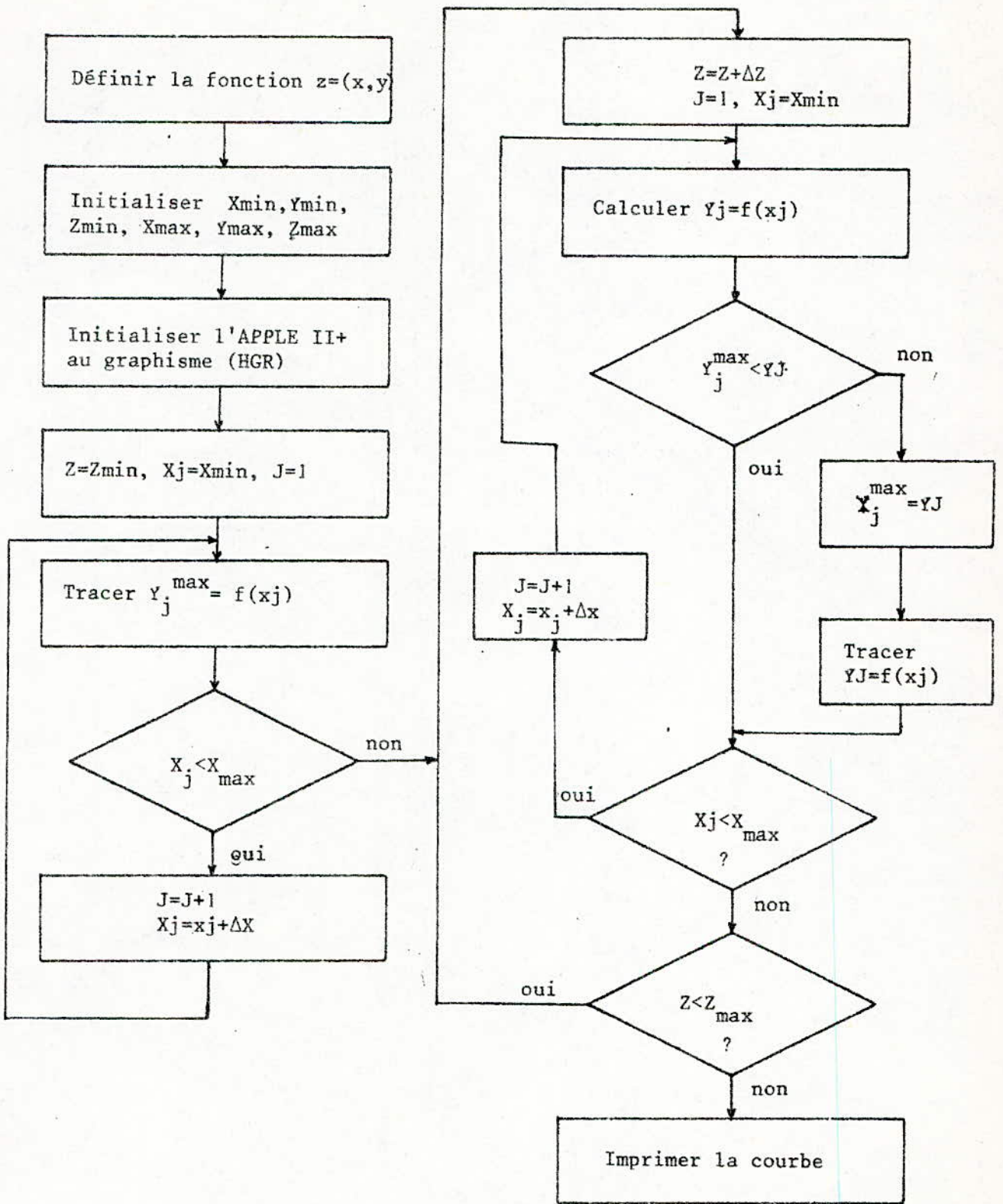
A titre d'exemple, considérons le cas de la représentation d'une fonction d'équation $z = f(x,y)$ qui décrit dans l'espace une surface quelconque S .

Pour la représenter sur l'écran, il faut la décomposer en une suite de courbes qui se trouvent chacune dans un plan parallèle à l'écran. Autrement dit, ces courbes résultent de l'intersection de la surface considérée S avec une série de plans perpendiculaires à la profondeur z_e . L'algorithme d'une telle application nécessite les opérations suivantes :

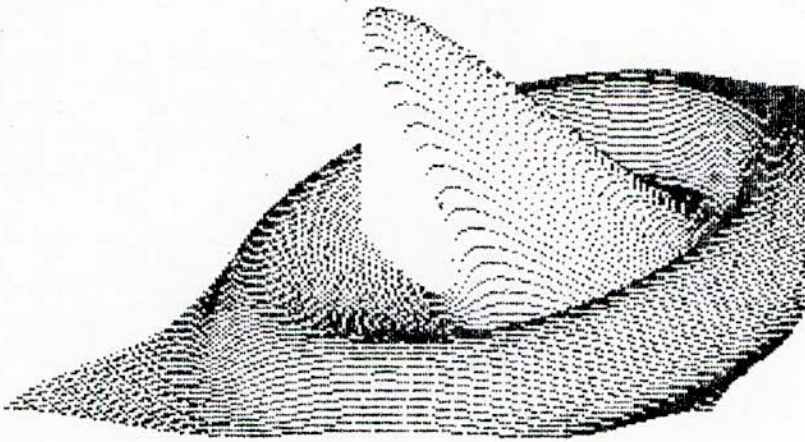
- analyse des différentes coupes (à $z_e = \text{constante}$) en débutant par la section la plus proche de l'observateur.
- dessin intégral de la courbe correspondant à la première section.
- passage d'une section à une autre pas à pas.
- représentation des courbes contenues dans les autres plans de coupe, en tenant compte du fait qu'il faut éliminer les parties cachées. Pour cela, on procède par comparaison de l'altitude des points de même abscisse. En effet, soit M_k d'altitude y_k et d'abscisse s_k . Celui-ci appartient à une courbe (k) qu'on doit tracer. Soit y_j^{\max} l'altitude la plus haute parmi celles des points M_j de même abscisse que M_k , soit x_k , mais qui ont été visualisés auparavant (figure I-19):

- * si $y_k < y_j^{\max}$: le point M_k est caché par l'élément de surface $y_j^{\max} \times \Delta x_j$ du point M_j^{\max} . La visualisation du point M_j^{\max} est alors sauvegardée.
- * si $y_k = y_j^{\max}$: les points M_k et M_j^{\max} sont confondus et sont visualisés en un point unique.
- * si $y_k > y_j^{\max}$: les points M_k et M_j^{\max} étant distincts l'un de l'autre, ils sont affichés ensemble sur l'écran.

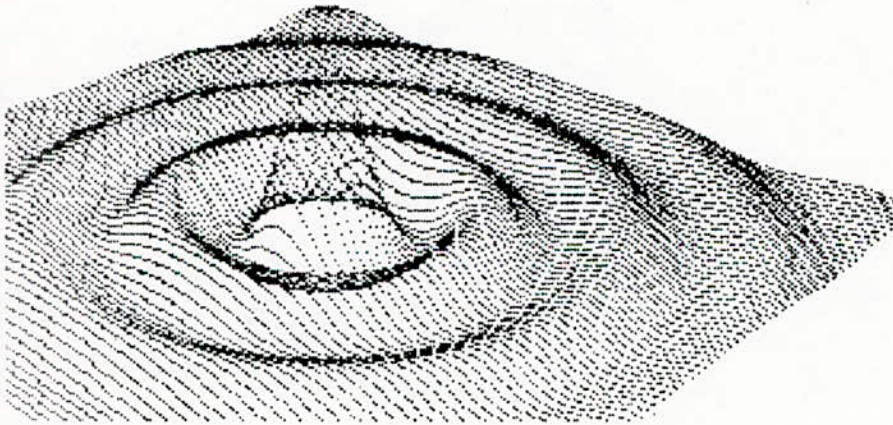
L'organigramme de cette application est donné par la figure (I-20). La figure (I-21) donne un exemple de représentation en perspective de ce type de fonctions.



Fig(I-20), organigramme de représentation d'une surface S d'équation $z=f(x,y)$



(b)



(a)

Figure. I-21: Représentation 3D d'une surface S d'équation $z=f(x,y)$.

-(a) Vue sans élimination des lignes cachées.

-(b) Vue d'un autre point d'observation et avec élimination des lignes cachées.

II CHAPITRE II
=====

ADAPTATION DU MICROORDINATEUR

APPLE II+ A L'INFOGRAPHIE

II.1. INTRODUCTION

Le problème que nous devons aborder ici est de voir comment un système destiné à des applications scientifiques courantes et pouvant également réaliser des travaux de graphisme élémentaire peut être transformé en un ordinateur graphique de haute gamme.

De façon générale, la génération de graphiques sur écran peut se faire de trois façons: hardware, software ou combinaison des deux [4,18].

- * Le mode hardware est simple d'utilisation. Dans ce cas, les droites, cercles, coniques et symboles particuliers sont engendrés rapidement (en quelques secondes) grâce à des éléments hardware, tels que ceux décrits dans le paragraphe I-2. Cependant, il n'est pas possible de générer avec cette méthode toute forme graphique voulue.
- * Le mode software nécessite un temps relativement long pour mettre au point les programmes (de quelques minutes à quelques heures, suivant la complexité du problème). Mais, comme nous allons le voir dans les paragraphes suivants, cette méthode présente l'avantage de générer toute forme graphique désirée.
- * La combinaison hardware + software est le mode le plus employé car, la simplicité et la rapidité d'utilisation du mode hardware ainsi que le pouvoir de conception du mode software sont conservés.

Nous disposons pour cela d'un microordinateur APPLE II+, dont la capacité mémoire RAM est de 48 K.O. Le tableau II-1 décrit l'organisation de cette mémoire. Elle est répartie comme suit [24]:

- 8 K.O. (adresses 8192 à 16384) sont réservés à la page graphique haute résolution et correspondent à une matrice de valeurs de pixels de 280 x 192 points.
- 10 K.O. (adresses 38400 à 49181) sont alloués au système D.O.S. (Disk Operating System).
- 3 K.O. (adresses 0 à 3072) sont utilisés par le système (pile, gestion du clavier et autres).
- 27 K.O. sont laissés à l'utilisateur.

| | | |
|-------------|--|---|
| 0000 0 | | Page zéro |
| 00FF 255 | | |
| 0100 256 | | Pile du 6502 |
| 01FF 511 | | |
| 0200 512 | | utilisé par GETLN, s/p de lecture d'une ligne |
| 02FF 767 | | |
| 0300 768 | | 300 à 3CF inutilisé. Le reste adresses systèmes |
| 03FF 1023 | | |
| 0400 1024 | | page 1 graphique basse résolution |
| 07FF 2047 | | |
| 0800 2048 | | page 2 graphique basse résolution |
| 0BFF 3071 | | |
| 0C00 3072 | | Rien |
| 1FFF 8191 | | |
| 2000 8192 | | page 1 graphique haute résolution |
| 3FFF 16383 | | |
| 4000 16384 | | page 2 graphique haute résolution |
| 5FFF 24575 | | |
| 6000 24576 | | Rien |
| 95FF 38399 | | |
| 96000 30400 | | D.O.S. |
| BFFF 49151 | | |

Tableau(II-1): organisation memoire de l'APPLE II+

Un problème de capacité mémoire se pose donc quand on veut représenter par APPLE II+ une pièce à géométrie complexe. Il est cependant partiellement résolu par la présence d'un contrôleur de deux unités de disquettes qui ajoutent 2 x 143 K.O. de mémoire à sa capacité initiale de stockage.

Ce système est également équipé d'un clavier alphanumérique. La console graphique est un téléviseur SONELEC noir et blanc que nous avons adapté à l'APPLE II+.

Deux potentiomètres (appelés manettes ou paddles) aident le manipulateur à générer des tracés continus. (Un point sur l'écran est alors repéré par la position des curseurs de ces potentiomètres).

Une imprimante graphique EPSON FX-80, de vitesse 80 CPS, permet d'inscrire nos résultats sur papier.

Les logiciels disponibles sur ce système sont le langage machine du microprocesseur 6502 de Signetics, le Basic Applesoft (interprété) et l'Apple Pascal (Compilé).

Cette configuration matérielle et logicielle du système APPLE II+ permet de réaliser des calculs scientifiques relativement élaborés et des travaux de graphisme élémentaire (c'est à dire, tracer des segments de droite ou des courbes élémentaires).

Pour faire du graphisme plus performant, il faudrait apporter des extensions hardware ou software au microordinateur APPLE II+, requises par les modes de génération graphique (hardware, software ou hardware + software).

Comme l'appareil dont nous disposons ne comporte pas d'accessoires graphiques, nous avons été amené à fixer notre choix à l'utilisation de la méthode software.

Pour cela, nous sommes partis d'applications englobant la plupart des problèmes rencontrés en graphisme et formant ainsi des exemples de base. Ce sont la représentation en perspective d'une pièce mécanique, l'architecture et l'urbanisme, l'animation graphique et le circuit imprimé.

En effet, ces domaines utilisent le plus fréquemment le dessin, mettent en jeu des opérations géométriques assez complexes et font appel à toutes les techniques graphiques possibles.

II.2. LES CONTRAINTES IMPOSEES PAR UNE APPLICATION DONNEE EN INFOGRAPHIE:

II.2.1. L'animation graphique =====

Pour animer un dessin, on décompose son mouvement en un certain nombre d'étapes; chacune d'elles étant visualisée par une image sur l'écran graphique.

Il se pose alors un problème lors de la visualisation de deux images successives. En effet, chaque image est affichée sur l'écran pendant un intervalle de temps t_i , et le changement d'image dure t_c .

Afin que le mouvement paraisse réel, il faut éliminer le phénomène de scintillement [14]. Ceci est obtenu quand :

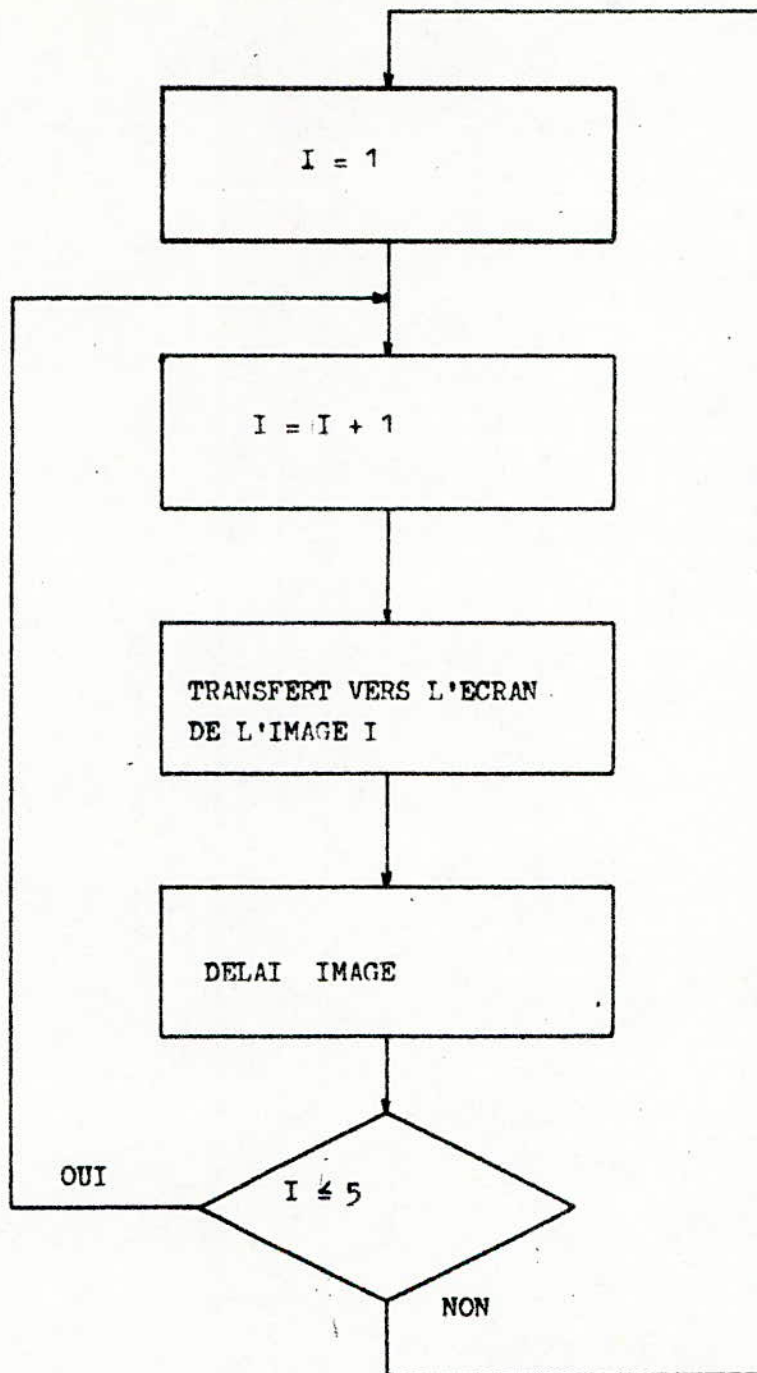
$$t_c < t_i \quad \text{et} \quad t_i + t_c = \frac{1}{15} \text{ à } \frac{1}{20} \text{ seconde} \quad (\text{II-1})$$

Une page graphique haute résolution de l'APPLE II+ représente 8 Kilos-octets. En outre, il faudrait réserver un minimum de 8 Kilos octets pour l'implantation des programmes de la réalisation des images et de leur animation.

Comme le système est limité en mémoire à 48 K.O., il ne pourra pas stocker simultanément plus de cinq images différentes. Pour évaluer les temps t_i et t_c , considérons un film cyclique décomposable en quatre images différentes (I_1, I_2, I_3, I_4). Il sera donc formé de la succession d'images suivantes:
 $I_1, I_2, I_3, I_4, I_1, I_2, I_3, I_4, \dots$

Le programme de visualisation du film sera donné par l'organigramme de la figure (II-1).

En BASIC, le transfert de l'image n° i dure plusieurs secondes. En effet, le seul test d'une boucle "FOR...NEXT..." dure



Fig(II-1), organigramme de visualisation d'un film cyclique
forme de 4 images

1 ms et dans le cas d'une image de 8 K.O., le test de la boucle :

FOR I = 1 TO 8192

nécessite un temps d'environ 8 secondes. Si on ajoute à ceci les instructions du programme de transfert répétées dans la boucle, on voit que ce langage n'est pas applicable au dessin animé. La seule solution reste donc une estimation des temps t_i et t_c en langage machine.

Le programme donné en annexe 3 par le listing (III-1) traduit l'organigramme de la figure (II-1) en langage machine (assembleur 6502) de l'APPLE II+

Pour évaluer t_c , considérons la sous-routine TRANS de ce programme. Le microprocesseur 6502 de l'APPLE II+ fonctionne à 1 MHz, le nombre de cycles est donc en même temps la durée en μs |23,24|. TRANS met donc un temps d'exécution de 16.5 ms.

Dans le cas où on envoie 20 images par seconde (ce qui correspond à 50 ms par image), on doit donc réaliser un délai d'image t_i de 33.5 ms. Ceci est obtenu par la sous-routine DELAI de ce programme. On voit dans celle-ci que la durée des instructions de la boucle élémentaire (ou première boucle) est de 9 μs . Si on répète ces instructions $M_1 = 256$ fois (valeur maximale de l'Octet), il faudra pratiquement mettre un temps de 2.3 ms pour réaliser la première boucle. Pour couvrir le temps de 33.5 ms, il faut répéter 15 fois cette dernière à l'aide de la boucle principale (ou deuxième boucle), car $M_2 = \frac{33.5}{2.3} \approx 15$.

En résumé, les contraintes imposées par l'animation graphique sont:

- les durées d'affichage et de changement d'image:

$$t_c < t_i \text{ et } t_i + t_c = 0.4 \text{ à } 0.66 \text{ s.}$$

- la capacité mémoire de la page graphique (8 K.O. par image dans le cas de l'APPLE II+).
- le type du langage utilisé: langage machine.
- le choix des constantes de la boucle réalisant le délai:
($M_1 = 256$ et $M_2 = 15$ dans le cas de l'exemple précédent).

II.2.2. Architecture et urbanisme:

=====

Les problèmes les plus fréquemment traités dans ces domaines sont |2,7,8|:

- L'étude de bâtiments d'habitation ou à usage industriel à partir d'éléments standards qui représentent approximativement 90% de l'ensemble des symboles formant un plan architectural. C'est à dire:

- * les portes,
- * les cloisons,
- * les poutres,
- * les châssis de fenêtres,
- * les toits,
- * les contours de maisons,
- * les balcons,
- * les arbres
- * et les symboles utilitaires tels que ceux des voitures.

- Etablissement de schémas d'implantation d'espaces ou de tracé de réseaux de distribution. L'implantation d'espaces consiste à agencer les bâtiments ou les espaces verts dans une région donnée. Les réseaux de distribution sont les différentes canalisation et câbleries qui sont nécessaires à l'arrivée de fluides ou transport d'énergie ou aux télécommunications.
- Visualisation d'un site. En particulier la question qui se pose est de savoir si l'implantation d'un bâtiment ne va pas détruire l'architecture de l'environnement. Pour cela, on procède à une introduction en mémoire des relevés photographiques du lieu avant construction du bâtiment. Puis, on visualise ce dernier de façon à trouver le meilleur emplacement sur le site et la forme la plus harmonieuse de l'édifice. Ceci revient à produire diverses images du bâtiment à partir de plusieurs points de vue. Notons que la mémorisation des données du site se fait soit par numérisation des relevés photographiques soit par des techniques point par point.

Pour augmenter la rapidité du système graphique, et rendre aisée l'interactivité du manipulateur avec la machine, on prédéfinit les éléments de tracé de base (porte, cloison, poutre, fenêtre et autres) dans des fichiers, appelés fichiers de formes graphiques usuelles. Ainsi, lors d'une conception d'un dessin ou d'un plan architectural, il suffit d'appeler le symbole

voulu et le positionner sur l'écran à l'endroit indiqué par des coordonnées (X,Y). Cet affichage sera alors obtenu immédiatement (en quelques dixièmes de seconde).

La définition de ces éléments en mémoire se fait grâce à la méthode de codage exposée au paragraphe I.4.2.3.

Pour compléter son dessin, l'utilisateur doit disposer également d'un programme général de tracé qui doit être écrit dans un langage évolué. Dans notre cas, nous avons utilisé le BASIC APPLESOFT pour la réalisation de ce programme. Ce langage offre une possibilité d'interaction avec le langage machine qui a servi à définir les formes graphiques codées auparavant.

Notons que dans le cas de l'APPLE II+ dont nous disposons, la taille mémoire de 48 K.O. limite sa capacité de stockage. On ne peut, donc, pas prédéfinir autant de symboles graphiques que l'on voudrait.

L'organigramme d'une telle application est donné à la figure (II-2).

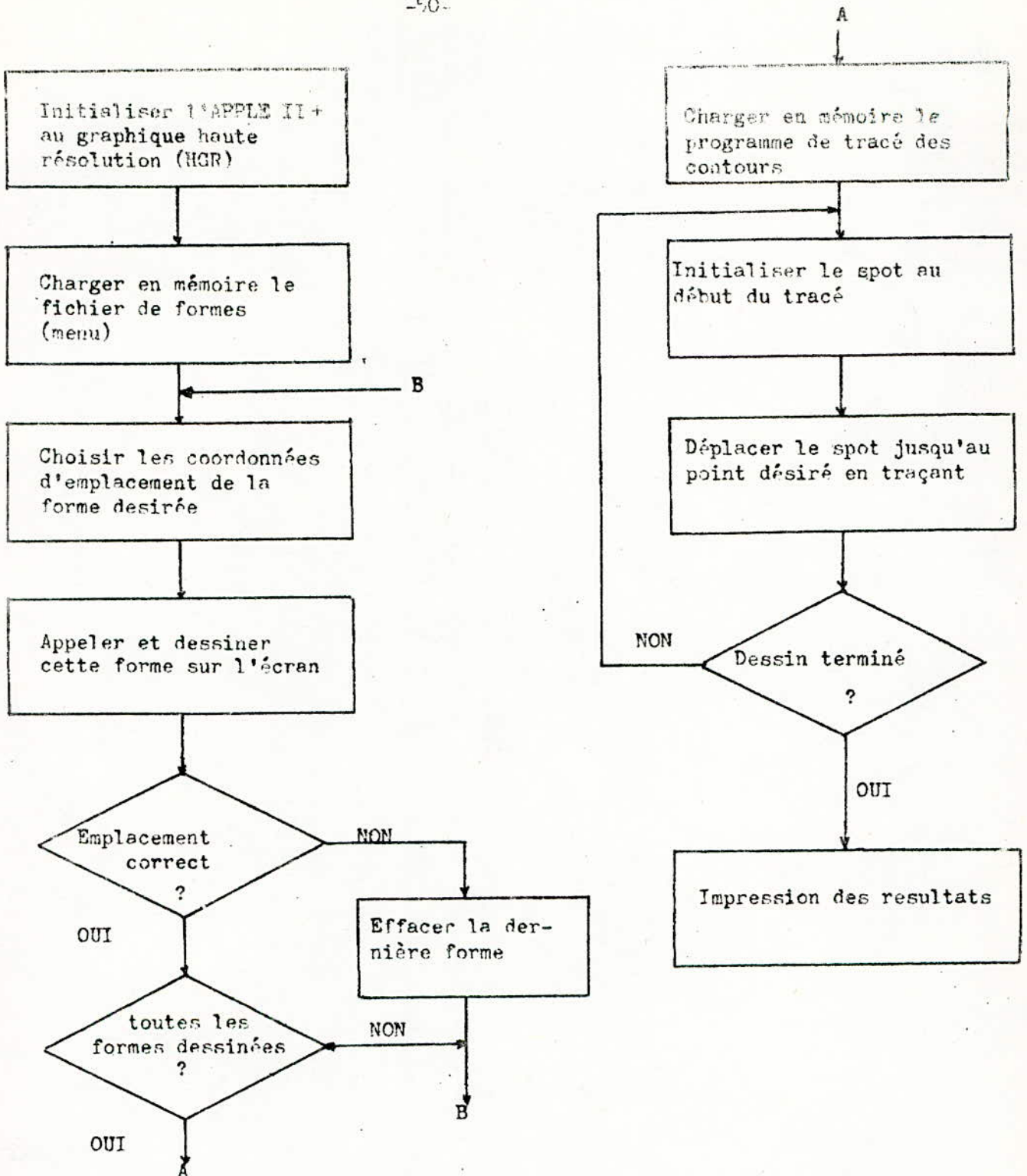
II.2.3. Mécanique:

=====

L'utilisation du graphisme dans ce domaine a pour but de résoudre les problèmes suivants:

- execution rapide du dessin industriel classique,
- définition de formes géométriques pour le dessin et l'usinage (fuselage d'avions, coques de navires, carrosseries d'automobiles),
- étude cinématique de mécanismes,
- conception de composants mécaniques (verins, pompes et roulements),
- découpe de matériaux, minimisant les pertes (réalisation de châssis en tôle, tronçonnage en lamelles de rondins).

Les techniques étudiées aux paragraphes I.4.2. et I.4.3 sont applicables à l'ensemble des problèmes que nous venons de citer. Notamment, les techniques de modélisation permettent de



Figure(II-2):Organigramme du dessin en architecture et urbanisme

décrire les pièces mécaniques à 2D et à 3D. Leur représentation graphique complète est obtenue à l'aide des techniques algorithmiques telles que celles d'élimination de surfaces cachées, d'ombrage, d'hachurrage, de texture et de couleur.

L'organigramme de la figure (II-3) illustre l'organisation d'un système graphique pour les applications mécaniques.

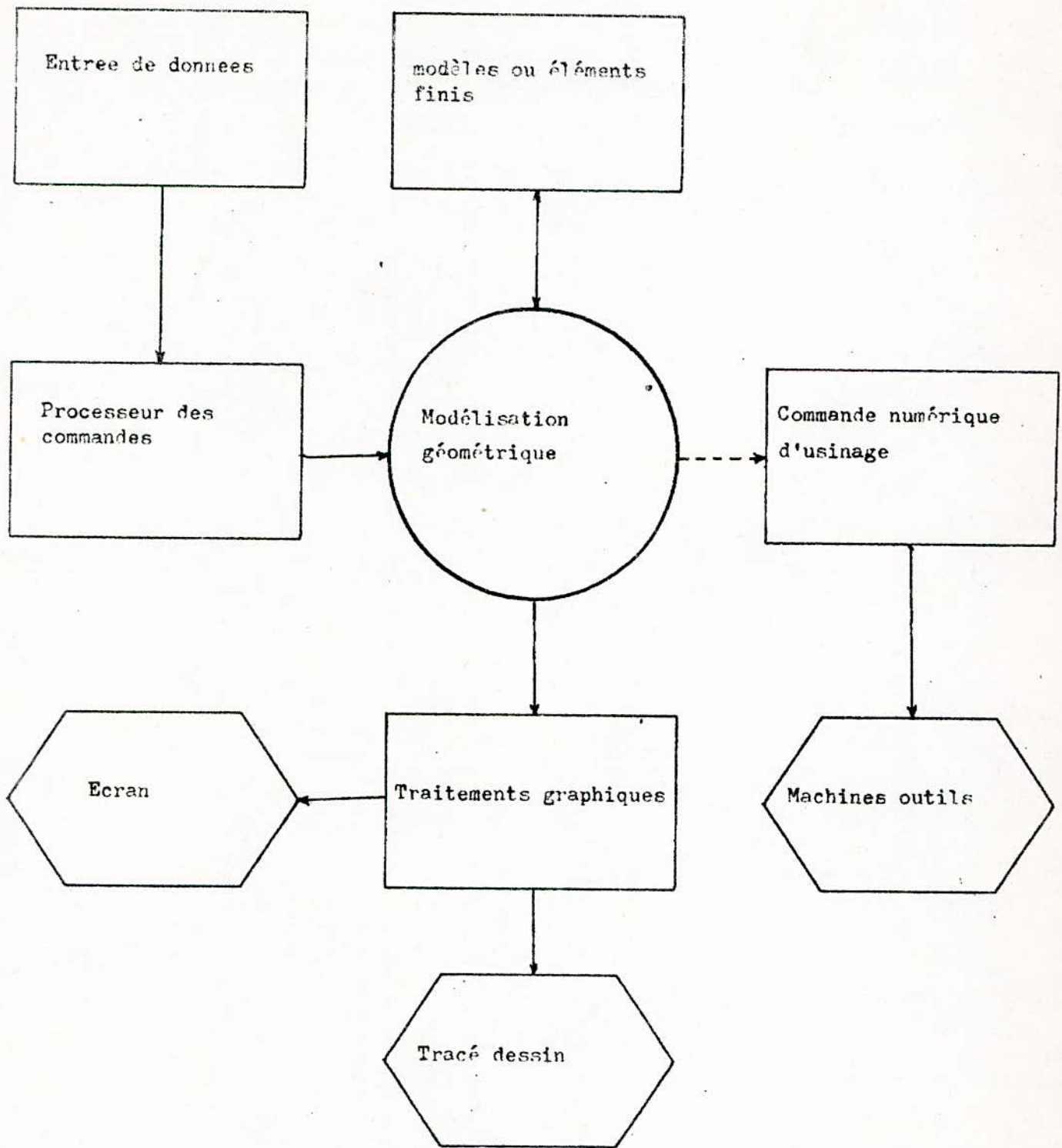
Dans le cas du système APPLE II+, les données sur la géométrie de la pièce seront introduites grâce au clavier.

Comme pour les applications examinées précédemment, la modélisation géométrique d'une pièce est obtenue en s'aidant d'un menu prédéfini dans le système. Le traitement graphique de la pièce nous permet d'obtenir notre dessin sur un écran ou sur du papier grâce à une imprimante graphique.

Dans le cas d'une fabrication assistée par ordinateur, une commande de machines-outils est prévue sur le système graphique.

Malgré la capacité mémoire relativement réduite de l'APPLE II+, nous nous sommes intéressés à la représentation dans l'espace 3D d'une pièce mécanique. En effet, la tendance actuelle en matière de dessin industriel par ordinateur qui est liée au développement récent des techniques de conception assistée par ordinateur (CAO), est de représenter les objets dans l'espace. (par exemple, la vue éclatée d'une boîte de vitesse) [2]. Afin de mettre au point la méthode, nous avons pris l'exemple de la représentation en perspective d'une pièce cubique pour différentes positions de cette dernière dans l'espace. Les logiciels que nous avons ainsi réalisés ont été stockés sur disquette. Ils permettent la visualisation de ce cube, sa translation, sa projection en perspective,...

Le langage le mieux adapté à des applications mécaniques est le PASCAL (APPLE PASCAL). Mais l'imprimante graphique EPSON FX-80 dont nous disposons ne permet pas d'inscrire les données graphiques dans ce langage, mais uniquement en BASIC APPLESOFT. Ceci nous a amené à écrire tous les programmes d'application graphique dans ce dernier langage.



Fig(II-3); organigramme d'un systeme graphique pour des applications mecaniques

II.2.4. L'électronique: =====

Dans ce domaine, l'infographie intervient essentiellement à deux niveaux [2,4,5,6]:

- la conception physico-électronique de composants discrets et intégrés, de circuits ou sous-systèmes (filtres, amplificateurs, alimentation, et autres).
- la schématisation de circuits électroniques, c'est à dire essentiellement l'assemblage de composants, de circuits ou de sous-systèmes.

Les grands domaines d'application dans l'industrie électronique sont :

- * les circuits et systèmes analogiques,
- * les circuits et systèmes logiques,
- * le dessin concernant la production de masques de circuits intégrés monolithiques ou hybrides, ainsi que l'implantation des circuits imprimés,
- * les télécommunications et traitement du signal.

Notre travail a consisté, ici, à élaborer des logiciels d'application pour le dessin des circuits imprimés. Pour cela, nous avons adopté la même procédure que celle utilisée en architecture et urbanisme et qui consiste à élaborer un menu de symboles électroniques utilitaires. Ce sont essentiellement les pastilles de connexions normalisées, correspondant aux:

- circuits intégrés ayant 8,14 et 16 broches de connexions,
- dipôles (par exemple les résistances, condensateurs et diodes),
- transistors (triple pastilles),
- connecteur compatible avec le "fond de panier" de l'APPLE II+.

Le codage de ce menu est obtenu grâce à la méthode exposée au paragraphe I.4.2.3., autrement dit, en langage machine. Le tracé des pistes reliant les différents composants est réalisé à l'aide du programme général de tracé utilisé en archi-

teature. Rappelons que ce programme a été élaboré en BASIC APPLESOFT. Ce dernier permet une interaction avec le langage machine qui a servi pour le codage du menu.

L'organigramme d'une telle application est donné par la figure (II-4).

II.3. EXPLOITATION DES RESULTATS:

II.3.1. Projection dans l'espace d'une pièce mécanique: =====

Le programme élaboré dans ce domaine est présenté en annexe 3 (listing III.2). Il comporte deux parties:

- la phase de la préparation de l'objet en mémoire,
- la phase de dessin de l'objet sur l'écran,

La phase préparation de l'objet consiste à créer celui-ci puis le manipuler et enfin le stocker en mémoire.

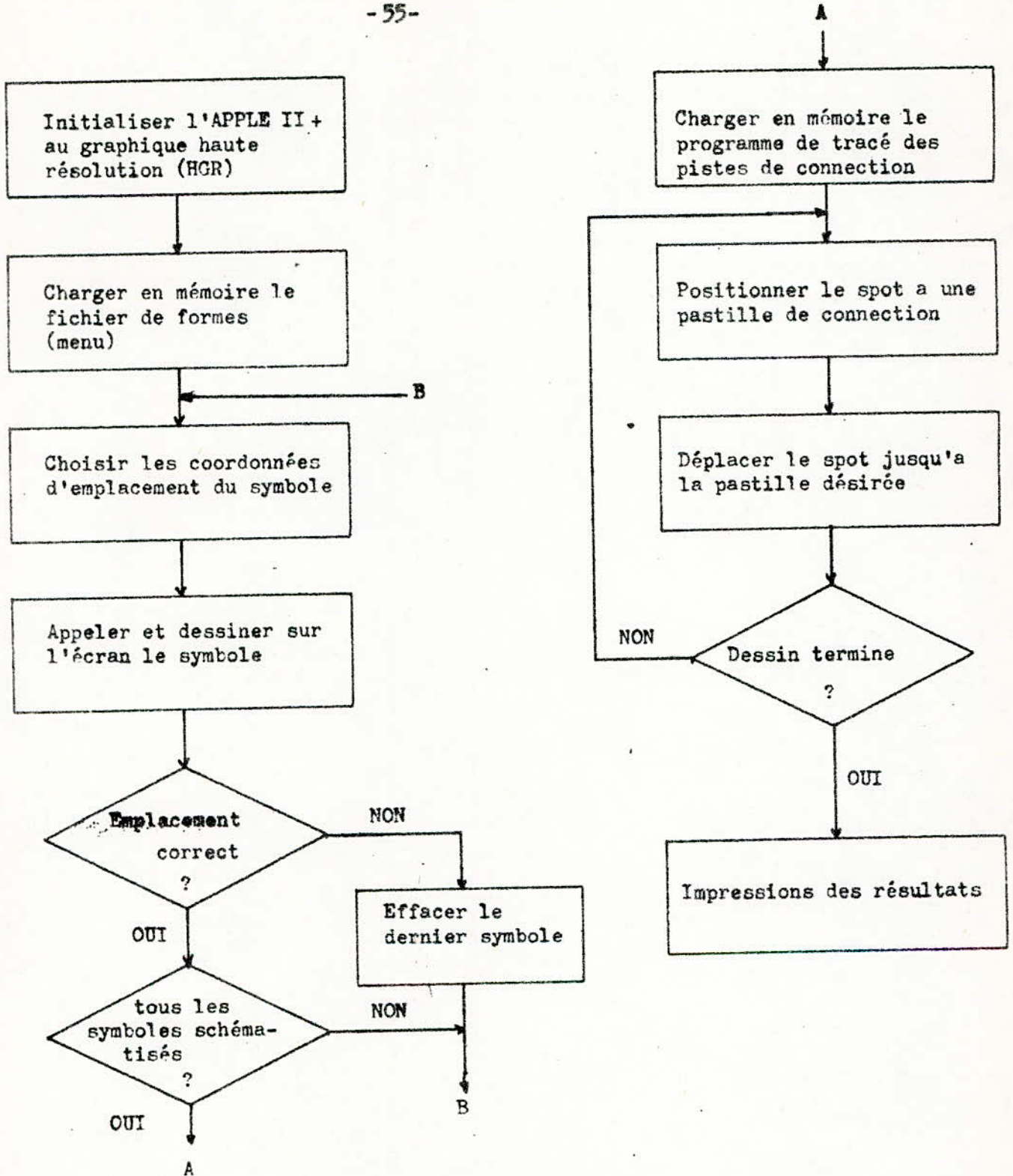
Le déroulement du programme permet à l'utilisateur de choisir dans un menu affiché sur l'écran, l'option qui lui convient. Ce menu est donné par le listing III.2.1.

Ainsi, pour créer un objet, on choisit l'option (1) de ce menu. Il en résulte le sous-programme (décrit par le listing III.2.2.) qui comporte les sous-options permettant de:

- créer un cercle,
- créer un arc de cercle,
- chaîner des cercles,
- créer des chaînes,
- chaîner des couples,
- pointiller des segments.

La combinaison de ces sous-options donne une image de l'objet. Deux cas sont alors à distinguer:

- a) la création de l'objet est complètement achevée. Il suffit alors de stocker les données graphiques sur disquette en appelant l'option (2) du listing III.2.1.



Fig(II-4): organigramme de trace d'un circuit imprimé

b) l'objet est de structure complexe et l'image ainsi réalisée n'est qu'une ébauche de l'objet. Pour compléter le dessin, il faut prendre l'option (4) du listing III.2.1. Puis quand cela s'avère nécessaire on utilise les options (5),(9),(10) et (11) du même listing. Après toutes ces opérations, on se sert de l'option (2) pour stocker les données graphiques ainsi obtenues, sur une disquette.

Pour résumer, ceci revient dans la plupart des cas à créer de nouvelles formes qu'il faut ajouter à la première ébauche préalablement stockée en mémoire. On a donc une interaction entre le sous-programme de création et celui qui sert à compléter l'objet.

L'option (5) sert à modifier la structure de l'objet (addition ou suppression de détails dans le dessin).

L'option (9) permet de réaliser les opérations suivantes :
(voir listing III.2.3.)

- translation de l'objet,
- rotation par rapport à un axe (voir listing III.2.4.),
- symétrie par rapport à un axe ou à un plan,
- fusion de deux objets,
- agrandissement et réduction des échelles,
- déformation selon une direction quelconque.

L'option (10) autorise l'examen détaillé de toutes les parties construites de l'objet. A cet effet, cette option décompose l'objet en une série de blocs. L'affichage et l'étude de l'objet se fait ensuite bloc par bloc. Cette manière de procéder nous a été imposée par le fait que l'APPLE II+ ne peut afficher que 280 x 192 pixels.

L'option (11) est l'option qui permet de consulter le fichier bloc ainsi créé.

La deuxième phase est celle du dessin sur l'écran, de l'objet obtenu en mémoire lors de la phase préparatoire précédemment décrite. Les options (6),(7) et (8) sont utilisées à cette fin.

L'option (6) est décrite par le listing III.2.5. les sous-options de ce menu indiquent au manipulateur qu'il peut effec-

tuer un dessin par élément, pas à pas ou par bloc.

Une image d'un objet est visualisée sur l'écran à condition que les dimensions de cet objet, après projection en perspective, soient comprises dans les limites que nous avons précédemment indiquées, c'est à dire :

$$0 \leq x \leq 279$$

$$0 \leq y \leq 131$$

Pour cela, le programme que nous avons élaboré fait un traitement préalable, en calculant les dimensions de l'objet obtenu après projection, pour en déduire la fenêtre dont la visualisation serait possible.

Une fois le dessin obtenu sur l'écran, deux cas peuvent alors se présenter :

- a) le dessin est complètement achevé. Il suffit de stocker sur une disquette l'image obtenue sur l'écran en choisissant l'option (7).
- b) le dessin nécessite un certain nombre de modifications. On peut dans ce cas être amené à faire appel à nouveau aux options (5), (9), (10) et (11) du listing III.2.1.

En conclusion, on peut dire que ce programme facilite la création, la manipulation et le dessin d'un objet. Le menu principal donné par le listing III.2.1. peut être enrichi à d'autres options en ajoutant des sous-programmes tels que ceux éliminant les surfaces cachées ou créant des ombres, mais il faut pour cela augmenter la capacité mémoire centrale de l'APPLE II+. Les résultats obtenus sont représentés par les figures (II-3a) et (II-3b).

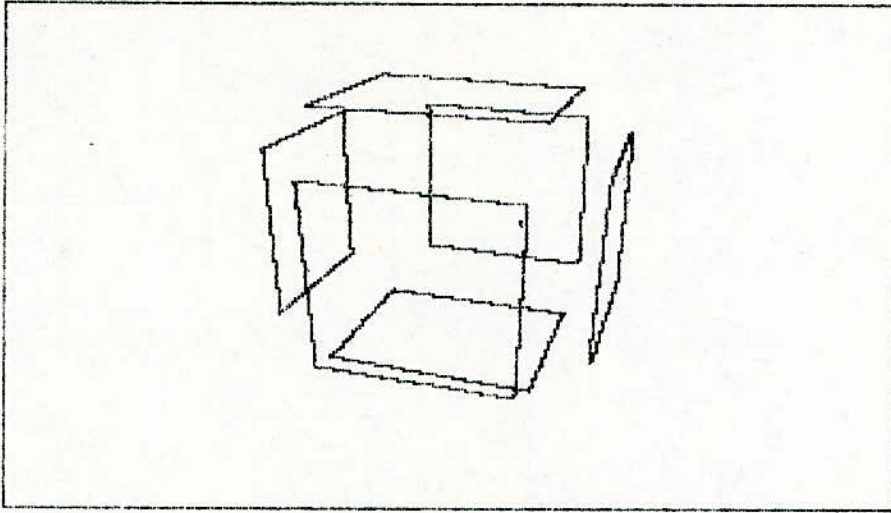


Figure II-5a/: Représentation en perspective d'un cube éclaté.

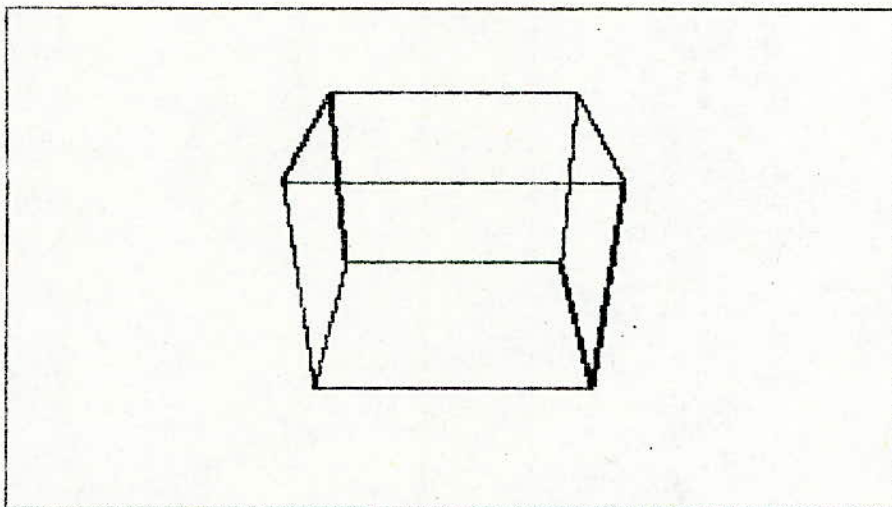


Figure II-5b/: Représentation du même cube assemblé vu d'un autre point d'observation.

II.3.2. L'animation graphique: le dessin animé =====

Le programme élaboré dans ce domaine est présenté en annexe 3 par le listing III.3.

Comme en mécanique, il comporte deux phases:

- élaboration des images ou des étapes du mouvement,
- transmission de ces images vers l'écran pour simuler le mouvement.

Dans notre cas, nous avons utilisé le langage BASIC APPLESOFT pour la réalisation de la première phase, à cause de sa simplicité. Par contre, la deuxième phase a nécessité l'emploi du langage machine pour les raisons invoquées au paragraphe II.2.1. Ceci implique une interaction BASIC APPLESOFT-machine du microprocesseur 6502.

L'application que nous avons choisi est relative au mouvement d'un personnage humoristique. La capacité mémoire assez limitée de l'APPLE II+ et la morphologie du personnage nous oblige à choisir une décomposition du dessin animé en cinq images (voir paragraphe II.2.1.) C'est à dire: la tête, le ventre, les pieds, le côté gauche et le bras du personnage, numérotés dans l'ordre de la forme 1 à la forme 5. Pour créer l'une de ces formes, nous avons utilisé la méthode de codage en langage machine exposée au paragraphe I.4.2.3.

Par exemple, pour créer la tête du personnage, on lui fait correspondre le numéro 1 (voir ligne 60 du listing III.3.1.). Puis, choisissant une origine qui permet de positionner cette tête sur l'écran.

Les différents déplacements ont été codés en langage machine de façon à générer la forme complète de la tête. Les données ainsi obtenues sont transcodées en décimal pour être introduites en mémoire en langage APPLESOFT (voir listing III.3.1.).

La phase animation est réalisée par le programme donné le listing III.3.2. Elle comporte trois parties:

- le mouvement, dont le sous-programme est situé entre les adresses mémoires \$ 6300 et \$ 6343.
- le changement d'images, dont le sous-programme se trouve entre les adresses \$ 634C et \$ 636D.
- le délai nécessaire à la suppression du scintillement sur l'écran est caractérisé par le sous-programme se trouvant entre les adresses \$ 6370 et \$ 6379.

Les tables des données graphiques correspondant à chaque partie sont données par le tableau II-2. Ces différentes parties vont se déplacer jusqu'aux coordonnées indiquées par le tableau II-2.

Les résultats obtenus sont donnés par les figures II-6 et II-7. Celles-ci illustrent respectivement le menu formant les différentes étapes de l'image ainsi que l'image complète obtenue en fin de mouvement.

Notons que si l'on voulait créer des dessins animés plus complexes (comme ceux projetés en cinéma ou en télévision), il faudrait prévoir une extension mémoire beaucoup plus importante que celle de l'APPLE II+ dont nous disposons.

II.3.3. L'architecture et l'aménagement urbain: =====

Le programme élaboré dans ce domaine est présenté en annexe 3 par le listing III-4. Il comporte deux parties:

- chargement du menu en mémoire (listing III.4.1.)
- utilisation d'un programme de tracé (listing III.4.2.) pour compléter le dessin.

Le menu que nous avons choisi est constitué de quelques éléments très employés en dessin d'architecture. Ce sont:

- la porte simple et double battants,
- la fenêtre simple et double battants,
- le balcon,
- l'arbre,
- autres symboles utilitaires tels que celui d'une voiture.

| | | | |
|-------|----|----|-------|
| 64 D5 | 29 | 1D | 64 E5 |
| 64 D4 | BF | 1C | 64 E4 |
| 64 D3 | FC | 1D | 64 E3 |
| 64 D2 | 26 | 1E | 64 E2 |
| 64 D1 | 08 | 1C | 64 E1 |

Tableau II-2: Positions mémoires contenant les adresses d'implantations des différentes formes du menu.

| | | | |
|-------|----|----|-------|
| 64 C5 | 8F | 28 | 64 C5 |
| 64 C1 | 74 | 23 | 64 C6 |
| 64 C2 | 72 | 87 | 64 C7 |
| 64 C3 | 70 | 3C | 64 C8 |
| 64 C4 | 78 | 15 | 64 C9 |

Tableau II-3: Adresses mémoires contenant les coordonnées finales des formes graphiques (en hexadécimal)

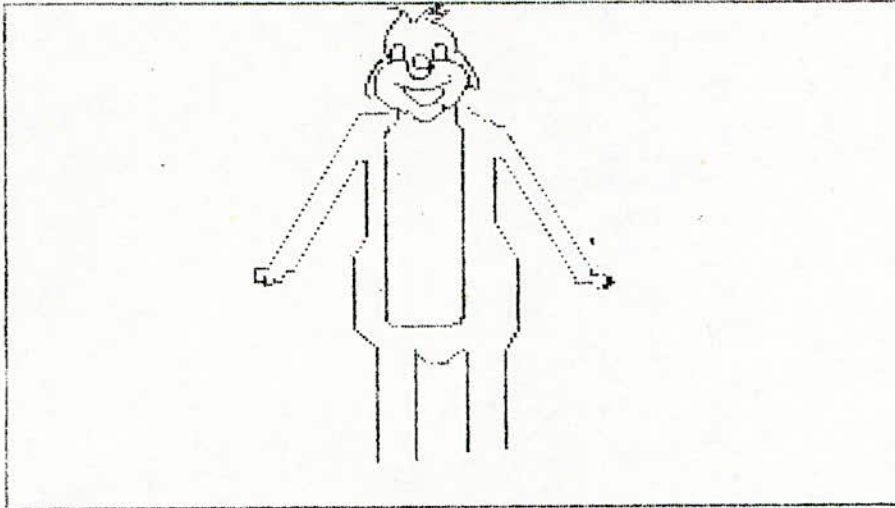


Figure II-6/: Dessin animé par APPLE II+.

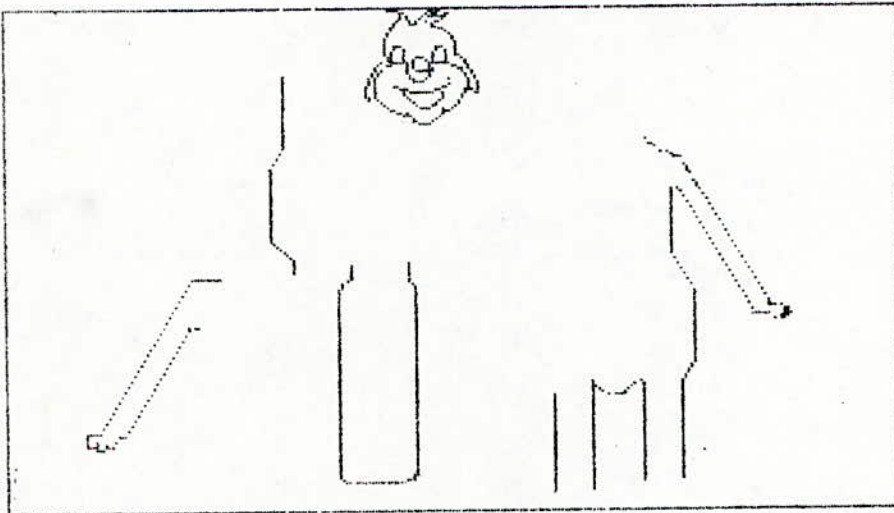


Figure II-7/: Menu du dessin animé.

On peut enrichir ce menu par d'autres éléments. Il suffit pour cela d'employer la méthode de codage des formes graphiques développées au paragraphe (I.4.2.3.) et de les ajouter en fin de menu. Ceci revient à changer la ligne 60 du programme donné par le listing III-4-1, en introduisant le nombre total de formes graphiques constituant le menu final et en spécifiant leurs indices à partir de l'adresse de début.

Lors d'un tracé en architecture et urbanisme, on appelle tout d'abord les formes désirées du menu pour les positionner aux endroits choisis par des coordonnées (x,y) sur l'écran. Cet appel peut être fait en mode immédiat grâce à l'instruction:

DRAW n AT x,y (II-2)

où n est le numéro de la forme graphique à positionner et (x,y) sont les coordonnées-écran repérant l'origine de l'emplacement de la forme désirée. Si la forme est mal-positionnée, il est possible de l'effacer en utilisant l'instruction:

XDRAW n AT x,y (II-3)

n et (x,y) auront alors les mêmes valeurs que celles attribuées à l'instruction (II-2).

On peut changer l'échelle de la forme en utilisant l'instruction:

SCALE = s (II-4)

s est le facteur multiplicatif choisi par l'opérateur.

La rotation d'une forme avant son tracé est également possible par l'utilisation de l'instruction:

ROT = r (II-5)

r correspond à l'angle de rotation désirée.

Notons que ROT n'agit que pour des valeurs modulo: 0, 16, 32, 48 et 64. Ce qui correspond respectivement à des angles de rotation de: 0, 90, 180, 270 et 360°.

L'avantage principal de la création d'un tel menu est évidemment la rapidité d'exécution d'un dessin, obtenue lors d'une conception utilisant ces formes.

Pour compléter notre dessin, on fait appel ensuite au programme de tracé, (voir listing III.4.2.). Celui-ci équivaut à un crayon et une gomme habituellement utilisés en dessin classique. Son déroulement affiche un spot sur l'écran que l'on peut déplacer ensuite dans toutes les directions grâce à un codage préalable de ces déplacements. Avec ce programme, on peut aisément tracer ou effacer toute ligne et toute forme représentées sur l'écran.

Les dessins donnés par les figures II-8 et II-9 représentent respectivement le menu que nous avons créé pour cette application et un exemple de dessin réalisé par cette méthode. Ce dessin représente un exemple d'un aménagement urbain créé par APPLE II+.

Des résultats identiques peuvent être obtenus dans le cas du bâtiment et génie civil . Car la plupart des symboles graphiques que nécessitent ces applications présentent une certaine similitude.

Remarquons qu'il existe également une ressemblance entre les conceptions du dessin d'une pièce cubique dans le cas de la mécanique et celui d'un contour de bâtiment. De ce fait, on peut très bien adapter le programme conçu pour des applications mécaniques à l'architecture et l'aménagement urbain.

II.3.4. L'Electronique: cas d'un circuit imprimé =====

Le programme que nous avons mis au point pour cette application est donné en annexe 3 par le listing III-5.

La méthode utilisée est la même que celle décrite dans le domaine de l'architecture et urbanisme.

Ce programme comporte deux étapes :

- chargement du menu en mémoire (listing III.5.1.)
- utilisation du programme de tracé (listing III.4.2.).

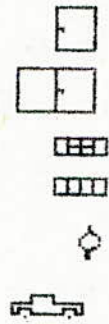


Figure II-8/ Menu d'architecture et d'aménagement urbain.

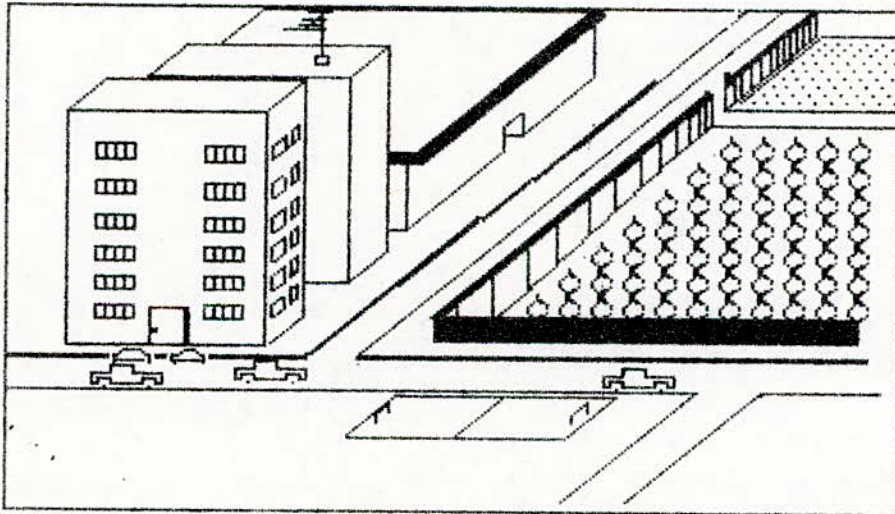


Figure II-9/: Aménagement urbain par APPLE II+.

Le menu de cette application comporte les éléments les plus usités lors du tracé d'un circuit imprimé: c'est à dire les pastilles de connexion normalisées correspondant aux: (voir figure II-10).

- circuits intégrés ayant 8, 14 et 16 broches,
- trois connexions d'un transistor,
- double pastille pour un dipole (résistance, condensateur, self ou diode),
- pastilles de connecteurs de "fond de panier".

Le tracé du circuit imprimé de la figure II-11 a été réalisé par combinaison des deux étapes en mode conversationnel et immédiat. Il correspond au schéma de câblage d'une carte d'interface analogique-numérique connectée à l'APPLE II+.

Le format du dessin est imposé par les caractéristiques de l'imprimante graphique EPSON FX-80 que nous avons utilisé, mais, les résultats obtenus ne sont point altérés par une telle contrainte. Ainsi, avec un coordinatographe, il serait possible de recopier fidèlement et rapidement le dessin sur une plaque de circuit imprimé et aux échelles désirées.

Remarquons que le graphisme 2D est le seul employé pour la construction d'un circuit imprimé, alors que les autres applications précédemment étudiées peuvent indifféremment utiliser soit la représentation bidimensionnelle, soit la représentation tridimensionnelle.

=====0=====

□ □

□ □

.....
.....

.....
.....

.....
.....

Figure II-10/: Menu du tracé d'un circuit imprimé.

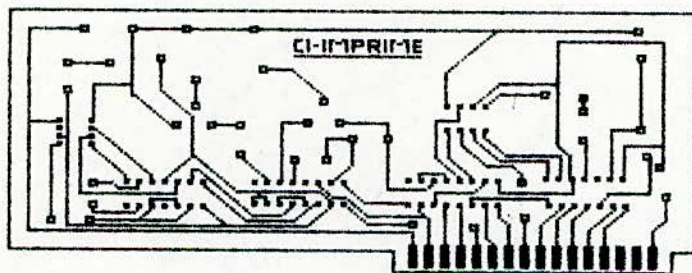


Figure II-11/: Circuit imprimé par l'APPLE II+

// CHAPITRE III

=====

APPLICATION DE L'INFOGRAPHIE AUX ANTENNES

PARABOLOIDES

III.1. INTRODUCTION

De nos jours, les télécommunications sont le plus souvent organisées en liaisons point à point et de ce fait, ce type de transmission nécessite des aériens très directifs.

Ainsi, les liaisons pas satellite, les faisceaux hertziens, la radioastronomie ou les radars utilisent couramment des antennes paraboloides qui ont la propriété de transformer les ondes sphériques en ondes planes et par conséquent de concentrer le rayonnement électromagnétique en un faisceau de rayons parallèles.

Notons que l'amélioration des performances des liaisons peut être obtenue par des antennes paraboloides de configuration spéciale. Ce sont par exemple les antennes à double réflecteur (ou CASSEGRAIN) et les antennes OFF-SET.

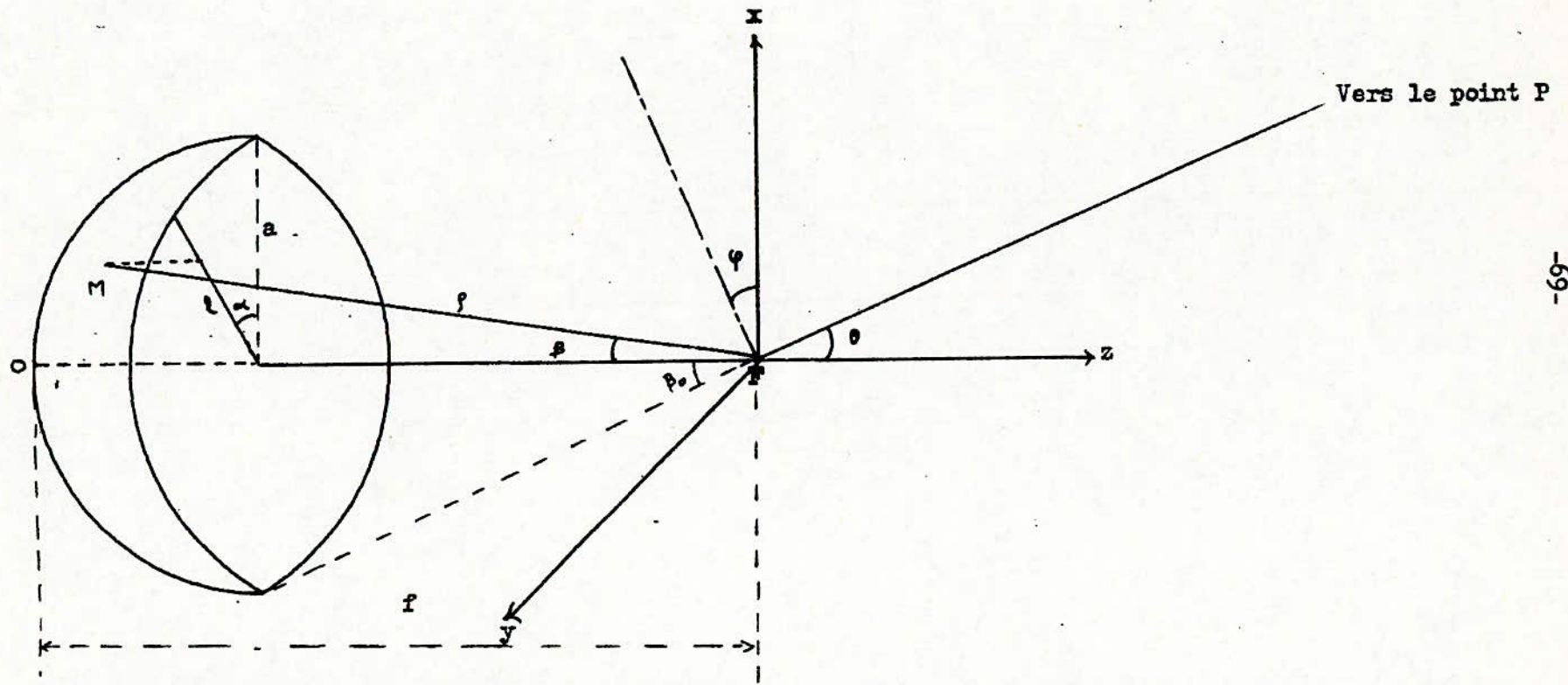
Une antenne paraboloides [32,33,34,35,36] se compose essentiellement d'un réflecteur paraboloidal au foyer duquel se trouve une source de rayonnement électromagnétique (voir figure III-1). La source primaire est habituellement un panneau de doublets, un réseau de fentes ou un cornet. Le réflecteur paraboloidal est soit une surface conductrice pleine, soit une surface grillagée d'équation:

$$\rho = \frac{2 f}{1 + \cos \beta} \quad (\text{III-1})$$

β est l'angle que fait l'axe \vec{oz} du paraboloides avec la direction de propagation \vec{FM} du champ électromagnétique issue de la source primaire. f est la distance focale du paraboloides. Elle est liée au diamètre $D = 2a$ du réflecteur par l'expression:

$$D = 4f \operatorname{tg} (\beta_0/2) \quad (\text{III-2})$$

De façon générale, une antenne est caractérisée essentiellement par son diagramme de rayonnement ainsi que par la courbe de l'impédance de rayonnement en fonction de la fréquence [34,35,36]. A partir du diagramme de rayonnement, on peut déduire la directivité, le gain dans la direction de rayonnement maximum, l'angle d'ouverture à 3 dB du lobe principal, les lobes secondaires,



Fig(III-1), champ a grande distance

le lobe arrière et les directions où le rayonnement est nul. Le comportement de l'impédance du rayonnement en fréquence nous donne des informations sur la bande passante de l'antenne.

Jusqu'à maintenant, la mise au point d'antennes de grandes dimensions (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) nécessitait une étude préalable de leurs caractéristiques, sur modèle réduit. Le principe d'une telle étude est basé sur le fait que les dimensions de la surface rayonnante sont inversement proportionnelles à la fréquence de travail. Par suite, les mesures sur prototype à l'échelle réduite se font à une fréquence de travail plus élevée que celle de l'antenne à l'échelle. Pour le transfert des résultats de ces mesures, on procède ensuite par homothétie |35,38|.

Dans le cas d'une antenne parabolique, travaillant à une fréquence $F = c/\lambda$ dans un milieu sans pertes, nous pouvons montrer qu'à l'ouverture on a : |36|

$$\frac{4\pi f}{\lambda} = \text{constante} \quad (\text{III-3})$$

Supposons qu'on réalise un modèle réduit de cette antenne de façon que le diamètre de l'ouverture D devienne $D' = kD$ (avec $k < 1$). On peut déduire de la relation (III-3) que sa fréquence de travail F' sera déterminée par le rapport

$$\frac{F'}{F} = \frac{D}{D'} = k$$

Cette méthode donne de bons résultats, mais ceux-ci risquent d'être faussés par la présence d'obstacles, surtout si les sources primaires de l'antenne réelle et de son modèle réduit ne sont pas de même nature. A titre d'exemple, une antenne d'ouverture $D = 6\text{m}$ et fonctionnant à $F = 1\text{ GHz}$ nécessite une source électromagnétique au foyer qui est en général un réseau de dipôles électriques alimentés par une ligne coaxiale. Son modèle réduit à 10 GHz est caractérisé par un diamètre d'ouverture de 60 cm et par une source primaire équivalente au réseau de doublets, c'est à dire au réseau de fentes alimentés par un guide d'onde (théorème de Babinet |34|). L'antenne primaire du

modèle réduit est donc beaucoup plus encombrante que celle de l'ouverture réelle et elle va perturber davantage le rayonnement électromagnétique réfléchi.

La question qu'on peut se poser est celle de savoir quelle peut être la contribution de l'infographie à la mise au point des antennes paraboloides.

Le graphisme par ordinateur n'a pas la prétention de se substituer à la technique des modèles réduits, mais il peut permettre un choix rapide et sûr de la source primaire et de la géométrie du réflecteur paraboloidal et apporter ainsi une aide appréciable au concepteur.

Pour cela, il faut élaborer des logiciels d'application de façon à pouvoir tracer rapidement les diagrammes de rayonnement de ce type d'antenne pour diverses valeurs des paramètres de construction. On évite ainsi tous les essais et par suite tous les tâtonnements qu'on aurait à effectuer pour ajuster expérimentalement une antenne paraboloides.

Les logiciels d'application s'obtiennent à partir de l'expression du champ électromagnétique rayonné par cette antenne. Notons que le calcul du champ est en général très complexe (voir annexes 1 et 2). Il fait appel à des notions d'optique ondulatoire et à la théorie des antennes de surface. Comme le rayonnement électromagnétique émis par une antenne paraboloides est presque entièrement concentré vers une direction donnée, on peut faire un certain nombre d'approximations raisonnables et simplifier notablement l'expression du champ électromagnétique (voir annexe 2).

Après une brève revue de la théorie des antennes paraboloides, voyons comment réaliser les logiciels d'application sur le microordinateur APPLE II+ dans le cas où il s'agit de dimensionner correctement ce type d'antenne.

III.2. CHAMP RAYONNE A GRANDE DISTANCE PAR UNE ANTENNE PARABOLOÏDE:

D'après les annexes 1 et 2, le champ électromagnétique rayonné par un paraboloïde se calcule à partir des formules de Kottler. Ces dernières s'écrivent :

$$\vec{E}_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} \left\{ -j\omega \vec{K}_e \psi + \frac{\eta_e}{\epsilon} \vec{\nabla}\psi \right\} dS + \frac{1}{4\pi} \oint_{\Gamma_A} \frac{\sigma_e}{\epsilon} \vec{\nabla}\psi ds \quad (III-4)$$

$$\vec{H}_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} \{ \vec{K}_e \times \vec{\nabla}\psi \} dS \quad (III-5)$$

avec $\psi(r) = \frac{e^{-jkr}}{r}$ et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

A est la surface de l'ouverture qui est limitée par un contour Γ_A définissant les bords de l'ouverture.

\vec{K}_e et η_e sont respectivement les densités superficielles de courants et de charges induites dans la partie concave du paraboloïde. σ_e représente la densité linéique de charge induite le long de Γ_A .

Supposons que la polarisation du champ émis par la source primaire soit réctiligne et verticale (annexe 2). En faisant l'approximation du rayonnement à grande distance (c'est-à-dire $R \gg \frac{2D^2}{\lambda}$ [35]), on peut simplifier énormément ces formules et dans le cas du champ électrique en un point P défini par (R, θ, ϕ) (voir figure III-1), on obtient :

$$E_{\theta} = j \frac{e^{-jkR}}{2\lambda R} E_A (1 + \cos \theta) \iint_{(A)} F(1, \alpha) e^{jkl \sin \theta \cos(\alpha - \phi)} l dl d\alpha \quad (III-6)$$

Ceci suppose que le centre d'alimentation de la source primaire coïncide avec le foyer d'un paraboloïde parfait (c'est à dire sans déformations ni pertes par transmission), et le calcul du champ électrique (III-6) est ainsi ramené à celui du rayonnement d'une ouverture circulaire équiphase d'éclairement $F(1, \alpha)$. Dans la plupart des cas rencontrés en pratique, la source au foyer donne une distribution du champ à l'ouverture qui

est sensiblement invariante par rotation autour de l'axe du paraboloïde. L'illumination $F(1, \alpha)$ est alors indépendante de α pour des raisons de symétrie. De même, E_θ présente une symétrie de révolution autour de \vec{oz} et on peut faire $\phi = 0$ dans l'expression (III-6).

Dans la littérature [32,33,34,35,36], les illuminations qui sont le plus fréquemment étudiées sont du type :

$$F(m) = N_1 + N_2 (1-m^2)^p \quad (\text{III-7})$$

avec $m = l/a$. p , N_1 et N_2 sont des paramètres ajustés de façon à représenter aussi réellement que possible la loi d'éclairément.

Après intégration, on trouve (voir annexe 2):

$$|E_\theta| = \frac{\pi a^2 E_A |1 + \cos \theta|}{\lambda R} \left| N_1 \frac{J_1(u)}{u} + N_2 2^p p! \frac{J_{p+1}(u)}{u^{p+1}} \right| \quad (\text{III-8})$$

$$\text{avec } u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta.$$

L'expression (III-8) du champ électrique est fondamentale pour notre problème, car c'est à partir de celle-ci que nous comptons appliquer l'infographie à l'étude des diagrammes de rayonnement et des courbes de gain en fonction des paramètres de construction.

III.3. GRANDEURS CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE PARABOLOIDE

III.3.1. Diagramme de rayonnement:

=====

Le diagramme de rayonnement du paraboloïde est celui d'une ouverture circulaire équiphasée caractérisée par une loi d'éclairément $F(1, \alpha)$. On peut donc utiliser l'expression (III-8) pour calculer la fonction caractéristique de rayonnement $A(\theta)$ qui permet le tracé de ce diagramme, soit :

$$A(\theta) = \left| \frac{E_\theta}{E_{\max}} \right| \quad (\text{III-9})$$

III.3.2. Gain, directivité et facteur de gain:
=====

Soient P_T , la puissance fournie à l'antenne et $P(\theta, \phi)$, celle qui est rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, ϕ) . Le gain d'une antenne est par définition :

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi P(\theta, \phi)}{P_T} \quad (\text{III-10})$$

Ce rapport permet de comparer $P(\theta, \phi)$ à l'intensité de rayonnement $(\frac{P_T}{4\pi})$ d'une source isotrope.

Dans le cas particulier où l'antenne rayonne intégralement la puissance qu'elle reçoit, on aura :

$$P_T = \int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega \quad (\text{III-11})$$

$d\Omega$ est l'élément d'angle solide.

Le gain ne dépend plus que de $P(\theta, \phi)$ et caractérise ainsi la directivité de l'antenne. L'expression mathématique de cette grandeur est alors :

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi P(\theta, \phi)}{\int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (\text{III-12})$$

En réalité, la puissance qui alimente l'antenne, n'est pas totalement rayonnée par celle-ci pour diverses raisons: pertes par Spill-over, pertes dans la source primaire, absorption de l'énergie par le réflecteur, défocalisation et autres. On est donc amené à définir un rendement de l'antenne η_p qui est le rapport de la puissance globale rayonnée à la puissance totale P_T . Par suite, la relation (III-11) doit être modifiée et s'écrire :

$$\eta_p P_T = \int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega \quad (\text{III-13})$$

En divisant membre à membre cette expression par la quantité $4\pi P(\theta, \phi)$, on établit la relation entre le gain et la directivité. Celle-ci est :

$$G(\theta, \phi) = \eta_p D(\theta, \phi) \quad (\text{III-14})$$

Pour illustrer cette notion de rendement, prenons l'exemple d'un réflecteur paraboloidal éclairé par une source primaire dont le diagramme de rayonnement $I(\beta)$ est un cercle passant par le foyer F et centré sur \vec{oz} (voir figure III-2a). Si on suppose que le réflecteur est parfait, il rayonnera entièrement le rayonnement primaire compris dans un cône de demi-angle au sommet β_0 . Mais, une partie du rayonnement électromagnétique n'est pas interceptée par le paraboloidal (zone hachurée de la figure III-2a). Ceci représente par définition les pertes par Spill-over. Celles-ci peuvent être chiffrées à partir du rapport de la puissance P_i interceptée par le réflecteur à la puissance totale P_T émise par la source primaire (à condition que cette dernière soit sans pertes).

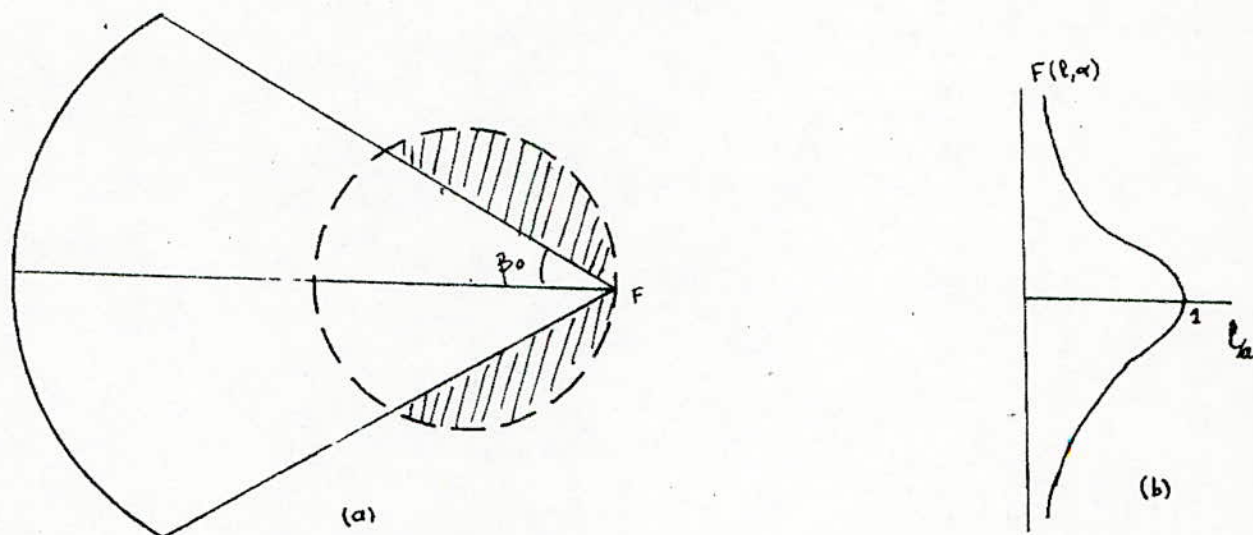
Une antenne paraboloidal est conçue pour concentrer le maximum de puissance vers une direction donnée. Pour réaliser un tel objectif, il faudrait :

- 1°) minimiser les pertes citées précédemment,
- 2°) utiliser une source primaire idéale. C'est à dire placer au foyer F une antenne dont le diagramme de rayonnement $I(\beta) = \text{cte}$ (secteur circulaire de demi-angle au sommet (β_0) (voir figure III-3a). En effet, il est facile de voir que ce type de source primaire peut donner une distribution de champ $F(l, \alpha)$ uniforme à l'ouverture |36| (voir figure III-3b). Il est alors possible de montrer qu'un tel éclairage conduit à un gain de l'antenne paraboloidal le plus élevé possible, dans la direction de rayonnement maximum |36|.

En pratique, les cas les plus fréquemment rencontrés n'atteignent pas cet optimum, car ils correspondent à des illuminations dégressives (voir figure III-2b).

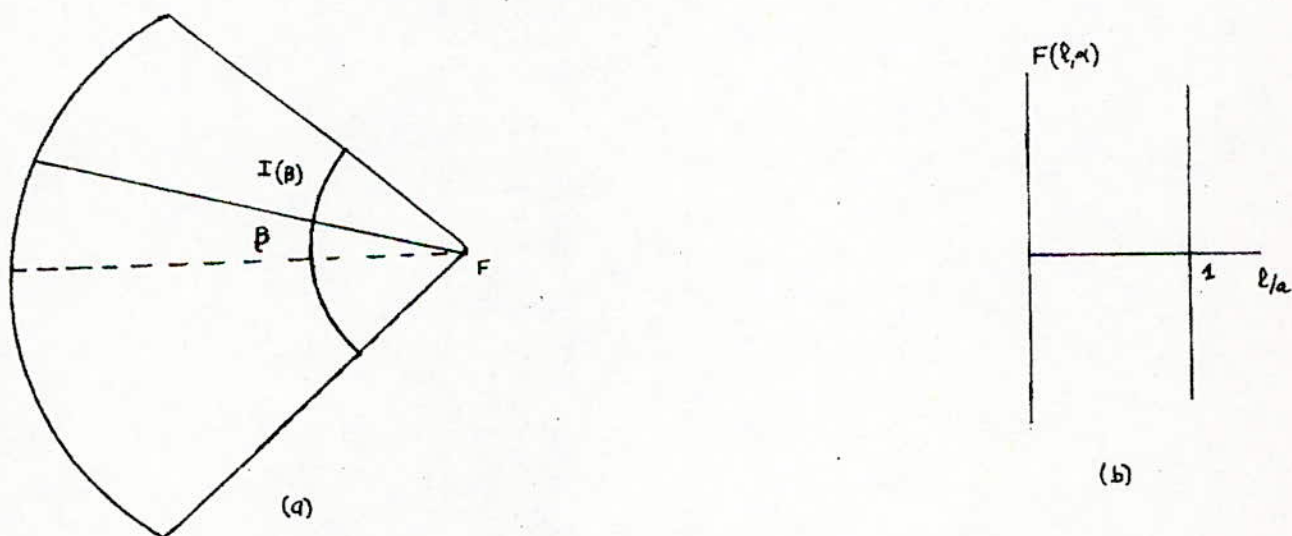
De façon générale, l'intensité de rayonnement est :

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{\mu} \right)^{1/2} | \vec{E}_p |^2 \cdot R^2 \quad (\text{III-15})$$



Fig(III-2): a) pertes par spill over dans le cas d'un eclairement $F(r, \alpha)$ par une source primaire dont le diagramme de rayonnement est un cercle centre sur Oz et passant par le foyer

b) illumination degressive obtenue



Fig(III-3): a) source primaire dont le diagramme de rayonnement est un secteur circulaire centre en F

b) illumination uniforme obtenue

La forme explicite de \vec{E}_p est donnée par (III-6). Comme la distribution de rayonnement maximum pour le paraboloïde correspond à $\theta = 0$ et $\phi = 0$ (c'est à dire le long de \vec{oz}), on peut écrire que :

$$P(0,0) = \frac{1}{2\lambda^2} \left(\frac{\epsilon}{\mu} \right)^{1/2} \left| \iint_{(A)} F(1,\alpha) dS \right|^2 \quad (\text{III-16})$$

Soit une source primaire sans pertes dont le diagramme de rayonnement est entièrement contenu dans le cône de sommet F et de base (A). D'autre part, faisons l'hypothèse que le paraboloïde est un réflecteur parfait. La puissance totale fournie à l'antenne sera :

$$P_T = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{\mu} \right)^{1/2} \iint_{(A)} |F(1,\alpha)|^2 dS \quad (\text{III-17})$$

D'où le gain dans la direction de rayonnement maximum:

$$G_o = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \iint_{(A)} F(1,\alpha) dS \right|^2}{\iint_{(A)} |F(1,\alpha)|^2 dS} \quad (\text{III-18})$$

Dans le cas particulier où $F(1,\alpha) = \text{cte}$ (illumination uniforme), on obtient :

$$G_m = \frac{4\pi}{\lambda^2} A \quad (\text{III-19})$$

L'application de l'inégalité de Schwartz à l'expression (III-18) montre que |36| :

$$G_o \leq G_m \quad (\text{III-20})$$

La valeur (III-19) correspond donc au maximum de gain réalisable par une ouverture.

Par définition, on appelle facteur de gain, le rapport:

$$g = \frac{G_o}{G_m} \quad (\text{III-21})$$

Il permet de chiffrer le taux d'efficacité de l'antenne comme aérien directif.

Remarquons qu'il existe une certaine analogie entre la définition du facteur de gain g et du rendement η_p . En effet, G_0 et $G(\theta, \phi)$ caractérisent des cas réels. Tandis que G_m et $D(\theta, \phi)$ expriment des situations idéales. La définition (III-21) du facteur de gain suppose que l'antenne est sans perte. Pour tenir compte de ces pertes, on doit faire le produit :

$$\eta_g = g \times \eta_p \quad (\text{III-22})$$

η_g est alors appelé facteur de gain global.

III.3.3. Impédance d'entrée et bande passante d'une
=====
antenne parabolôïde:
=====

De façon générale, une antenne émet à la fois de l'énergie active et de l'énergie réactive. Ceci se traduit à son entrée par une impédance dont la partie imaginaire représente la réactance de cette antenne et dont la partie réelle est la somme de la résistance de pertes et de la résistance de rayonnement [34]. La détermination de cette impédance d'entrée est un problème très ardu à résoudre. En effet, la partie réactive fait intervenir les distributions des champs et des courants au voisinage de l'antenne. D'autre part, le calcul de la résistance de rayonnement se fait habituellement en exprimant la puissance rayonnée en fonction des grandeurs d'entrée (champ ou courant, selon le type de feeder). On obtient alors des relations d'autant plus élaborées que la structure de l'antenne est complexe [34,36].

Dans des cas relativement simples (par exemple, celui des antennes filaires), un bon ordre de grandeur de l'impédance d'entrée Z_e peut être obtenu à l'aide de la notion de hauteur effective [34]. Mais, cette méthode ne permet pas d'apprécier correctement la variation de Z_e en fonction de la fréquence. Aussi, il est préférable de déterminer cette impédance par la mesure. Ceci revient à tracer la caractéristique $Z_e(\omega)$

par exemple à l'aide d'un pont d'impédance, en utilisant une ligne de mesure ou en employant des méthodes réflectométriques. La courbe d'impédance d'entrée en fonction de la fréquence permet d'en déduire la bande passante de l'antenne, c'est à dire, la gamme de fréquence dans laquelle le TOS demeure inférieur à la limite fixée par le constructeur |35|.

Remarquons que le gain varie également avec la fréquence. Les variations sont en fait liées à celles de l'impédance d'entrée. En effet, on peut constater à partir de l'équation des télécommunications que $G = k Z_e^{1/2}$.

Pour que l'antenne paraboloidale soit à large bande, il faut choisir la source primaire de façon que ses éléments rayonnants aient une largeur de bande importante. Autrement dit, la variation de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence doit être la plus faible possible dans une large bande de fréquence. Cette condition est nécessaire mais non suffisante, car il faudrait tenir compte de la réaction du réflecteur paraboloidal sur la source primaire. Pour le voir, prenons une antenne primaire isolée dans l'espace et adaptée à son feeder. Elle est alors le siège d'ondes progressives. Mais, dès qu'on la met en présence du réflecteur paraboloidal, il y a apparition d'ondes stationnaires. Celles-ci traduisent la présence de l'onde de dispersion due aux distributions de charge et de courant qui sont induites sur le réflecteur par le champ électromagnétique issu de la source primaire. Le calcul montre |36| que lorsque l'antenne primaire est placée au foyer du réflecteur paraboloidal, le coefficient de réflexion dans le feeder vaut:

$$R = \frac{\lambda \langle G \rangle}{4\pi f} e^{-j(2kf + \delta)} \quad (\text{III-23})$$

$\langle G \rangle$ est le gain moyen de l'antenne primaire, δ est un déphasage constant dû au système source primaire + feeder et f est la distance focale.

Remarquons que dans le cas où f est très grande devant λ , le coefficient de réflexion devient très faible et le TOS tend pratiquement vers l'unité. En fait, pour adapter à nouveau

l'antenne à son feeder, on procède par compensation du désaccord ainsi introduit [35]. On obtient alors une bande passante des antennes paraboloides qui est assez élevée. Elle varie généralement de 400 MHz à 40 GHz [35]. La connaissance de l'impédance d'entrée permet donc de déduire la bande passante de l'antenne paraboloides et n'offre d'intérêt que lorsqu'une adaptation exacte doit être réalisée entre l'antenne et son feeder.

III.4. LES LOGICIELS D'APPLICATION:

Dans le but de développer les technique de l'infographie sur le système APPLE II+, nous avons mis au point au chapitre II des logiciels pour des applications les plus courantes. Ces dernières nécessitaient, presque toutes, l'élaboration de menus constitués de formes graphiques usuelles propres à chaque application. Ceci permettait au concepteur d'élaborer rapidement son dessin grâce à ces menus associés au programme général de tracé.

L'étude des antennes par infographie diffère des applications du chapitre II dans la mesure où elle ne nécessite pas de menu. En effet, rappelons que notre but est de déterminer les principaux paramètres de construction d'une antenne et de les optimiser par infographie. Ceux-ci sont:

- le choix de la source primaire,
- le rendement global d'illumination,
- le rapport du diamètre du réflecteur à la distance focale (D/f),
- le rapport du diamètre du réflecteur à la longueur d'onde de travail (D/λ).

L'antenne primaire est essentiellement caractérisée par son diagramme de rayonnement, son gain et sa bande passante. Notons cependant que notre problème ne nécessite pas la connaissance de la bande passante de la source primaire ou de son impédance d'entrée. Ainsi, nous ferons abstraction de ces deux paramètres dans la suite du travail. La détermination des paramètres précédemment cités se fait essentiellement à partir de la représentation graphique de fonctions mathématiques plus

au moins complexes qui résultent de l'étude des antennes paraboloides. Un tel travail, quand il est manuellement fait, est évidemment long et fastidieux. Pour éviter cet inconvénient, nous avons élaboré des programmes permettant de tracer les courbes de facteur de gain et du rendement d'illumination en fonction de l'angle d'ouverture, ainsi que les différents diagrammes de rayonnement. Le graphisme par ordinateur qui a été ainsi développé ne concerne donc que des paramètres variant dans l'espace et non des objets à concevoir au gré de l'utilisateur.

Dans les logiciels réalisés, les caractéristiques de facteur de gain et de rendement sont obtenues uniquement à partir des techniques de modélisation 2D dans lesquelles le problème à résoudre est le choix judicieux du facteur d'échelle. Par contre, le diagramme de rayonnement nécessite les deux types de modélisation 2D et 3D où les techniques de perspective, de choix d'échelle et d'élimination de surfaces cachées sont utilisées. Voyons maintenant de quelle façon les paramètres de construction cités précédemment interviennent dans le calcul des antennes paraboloides et comment les optimiser par infographie.

III.4.1. Le facteur de gain: =====

Le calcul développé dans ce paragraphe va nous servir à l'élaboration d'un sous-programme de tracé des courbes de facteur de gain pour des illuminations différentes. Le facteur de gain d'une antenne paraboloides peut être calculé dans le cas relativement simple où la distribution de champ à l'ouverture ne dépend pas de α et présente une symétrie de révolution par rapport à \vec{oz} . Ceci revient dans les cas réels à prendre la moyenne arithmétique des diagrammes de rayonnement principaux de la source primaire.

Considérons pour cela l'expression (B-31) du champ électrique où on a fait $e_{1x} \approx 1$ (car $e_{1x} \gg e_{1y}$ par hypothèse), et pour laquelle $\theta = 0$ et $\psi = 0$ (voir annexe 2). On peut déduire de cette expression et de la définition (III-16) de

L'intensité de radiation que :

$$P(0,0) = \frac{P_T}{4\pi \lambda^2} \left| \iint_{(A)} \frac{G^{1/2}(\alpha, \beta)}{\rho} dS \right|^2 \quad (\text{III-24})$$

Le fait que l'illumination ne dépende pas de α signifie que $G(\alpha, \beta) = G(\beta)$. Après intégration de (III-24) sur α , on obtient :

$$G_o = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \left| \int_0^{\beta_o} G^{1/2}(\beta) \rho \sin \beta d\beta \right|^2 \quad (\text{III-25})$$

avec $\rho \sin \beta = \frac{2f \sin \beta}{1 + \cos \beta} = 2f \operatorname{tg} \beta/2$ et $\operatorname{tg} \frac{\beta_o}{2} = \frac{D}{4f}$

($D = 2a$ et le diamètre de l'ouverture du paraboloïde de rayon a).

L'expression (III-25) peut encore s'écrire :

$$G_o = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \operatorname{cotg}^2 \beta_{o/2} \left| \int_0^{\beta_o} G^{1/2}(\beta) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} d\beta \right|^2 \quad (\text{III-26})$$

L'expression (III-19) donne pour le paraboloïde :

$$G_m = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{III-27})$$

D'où le facteur de gain :

$$g = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta_{o/2}} \left| \int_0^{\beta_o} G^{1/2}(\beta) \operatorname{tg} \beta/2 d\beta \right|^2 \quad (\text{III-28})$$

La plupart des antennes primaires ont un diagramme de rayonnement qui peut être approximativement représenté par des fonctions du type |32,33,34,36| :

$$G(\beta) = \begin{cases} 2(n+1) \cos^n \beta & \text{pour } -\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2 \\ 0 & \text{-ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III-29})$$

Ce sont ces antennes et leur association avec un réflecteur paraboloidal que nous allons étudier par infographie.

En substituant (III-29) dans (III-28) et après intégration,

nous obtenons :

$$g_n = 2(n+1) \cotg^2 \beta_0 / 2 \left| \int_0^{\beta_0} \cos^{n/2} \beta \operatorname{tg} \beta / 2 \, d\beta \right|^2 \quad (\text{III-30})$$

et après calcul, on aura pour $n = 2, 4, 6$ et 8 [36] :

$$g_2 = 24(\sin^2 \beta_0 / 2 + \ln \cos \beta_0 / 2)^2 \cotg^2 \beta_0 / 2 \quad (\text{III-31})$$

$$g_4 = 40(\sin^4 \beta_0 / 2 + \ln \cos \beta_0 / 2)^2 \cotg^2 \beta_0 / 2 \quad (\text{III-32})$$

$$g_6 = 14(2 \ln \cos \beta_0 / 2 + \frac{(1 - \cos \beta_0)^3}{3} + \frac{1}{2} \sin^2 \beta_0)^2 \cotg^2 \beta_0 / 2 \quad (\text{III-33})$$

$$g_8 = 18\left(\frac{1 - \cos^2 \beta_0}{4} - 2 \ln \cos \frac{\beta_0}{2} - \frac{(1 - \cos \beta_0)^3}{3} - \frac{1}{2} \sin^2 \beta_0\right)^2 \cotg^2 \beta_0 / 2 \quad (\text{III-34})$$

La détermination de l'optimum du facteur de gain se fait à partir de la représentation graphique des expressions (III-31), (III-32), (III-33) et (III-34).

L'analyse de ces expressions est assez complexe et quand ce travail est effectué manuellement, il est évidemment long et fastidieux. Aussi, nous avons utilisé les techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) pour déterminer rapidement la valeur optimum du facteur de gain. Pour cela, un sous-programme de calcul et de tracé a été mis au point à partir des expressions de g_2 , g_4 , g_6 et g_8 . Son organigramme est donné par la figure (III-5).

Comme les expressions (III-31), (III-32), (III-33) et (III-34) ne dépendent que de β_0 , les courbes correspondantes ont été obtenues par un graphisme 2D, où le seul problème à résoudre a été le choix du facteur d'échelle. En effet, pour avoir la meilleure représentation possible sur écran et par suite sur papier, il faut faire un premier tracé avec un facteur unitaire et en déduire le facteur d'échelle qui donne la meilleure précision sur le résultat (ligne 50 du sous-programme donné le listing III-6). Le sous-programme ainsi développé consiste à initialiser les constantes de calcul et des variables de boucle

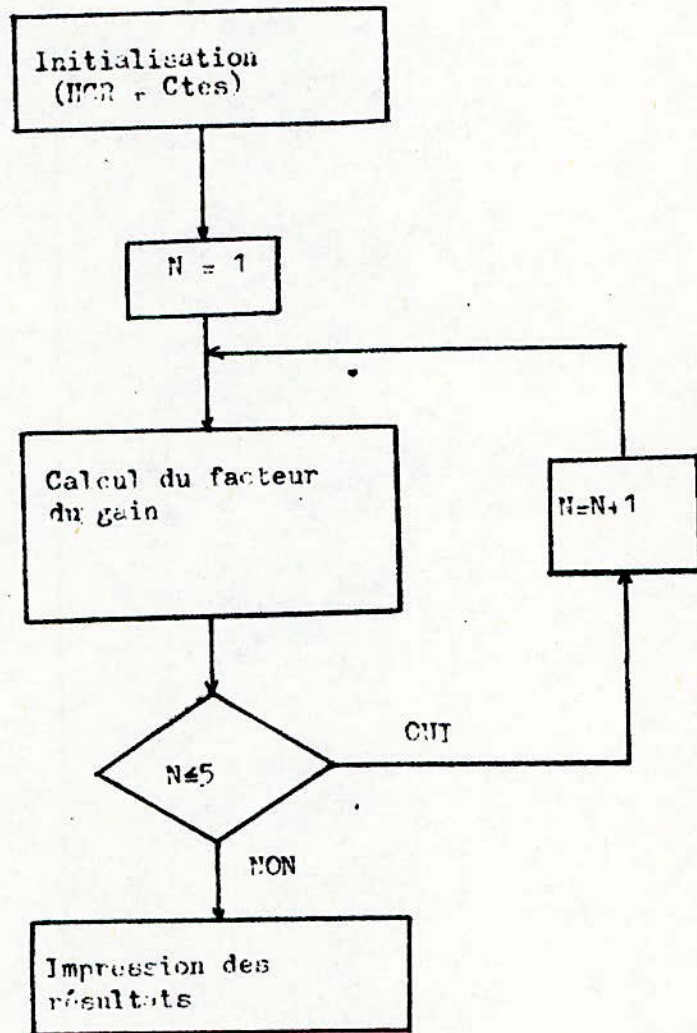


Figure. III-5: Organigramme du tracé du facteur de gain

(lignes 2 à 15), à spécifier les branchements (lignes 20 à 51) au différentes sous-routines pour calculer g_2 , g_4 , g_6 et g_8 (lignes 200 à 550) et à procéder au tracé des courbes (lignes 55 à 115).

Ce sous-programme a été réalisé de façon modulaire, pour permettre son extension à d'autres valeurs que $n \leq 8$, lorsque cela s'avère nécessaire. Par exemple, on peut ajouter des sous-routines au delà de la ligne 600 et modifier les lignes 20 et 70 de façon que les branchements aux nouvelles sous-routines soient possibles.

Les courbes ainsi tracées (voir figure III-6), montrent qu'avec une illumination du type $\cos^n \beta$, on obtient des facteurs de gain dont les maximums dépendent des valeurs de n .

Les coordonnées d'un point quelconque peuvent être déterminées avec une précision meilleure que 10^{-4} grâce à un curseur câlibré et mobile qui se déplace le long de la courbe considérée. Ce curseur est réalisé de façon logicielle par association des instructions HPLLOT et PRINT de l'APPLE II+.

L'intérêt d'un tel curseur est de permettre un affichage rapide et précis des extrêmes d'une fonction. En particulier, la plus grande valeur possible du facteur de gain qui est obtenue par cette méthode, est de 0,828987786. Elle est atteinte pour $n = 2$ et $\beta_0 = 65.9235661$ degrés.

Remarque:

Pour commodité d'écriture et de représentation graphique, l'APPLE II+ affiche la valeur en degrés de β_0 , suivie de la partie décimale qui est chiffrée en centième de degré. Soit $\beta_0 = 65.9235661$. Si cela s'avère nécessaire, on peut faire la conversion sexagésimales. On a alors $\beta_0 = 65^\circ 55'24''$.

Aussi, pour une source primaire au foyer, dont le gain est du type $\cos^n \beta$ et présente une symétrie de révolution autour de \vec{oz} , l'éclairement du paraboloïde est optimum quand $n = 2$ et si l'angle au sommet du cône d'illumination est voisin de $2 \times 66 = 132^\circ$.

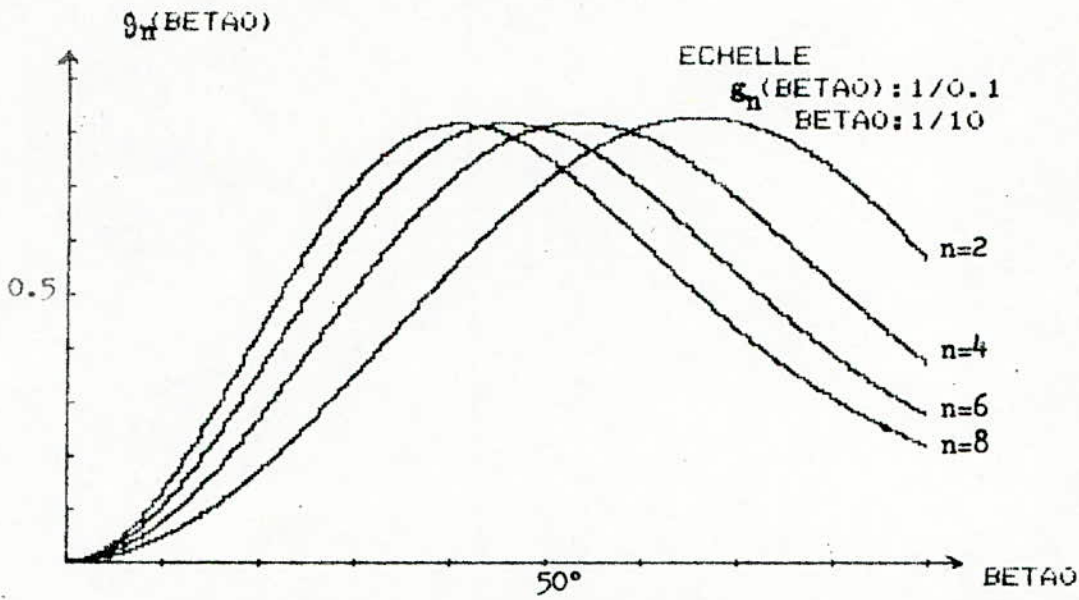


Figure III-6: FACTEUR DE GAIN POUR N=2,4,6,8

GMAX=.828987786
BETAOMAX=65.9235661

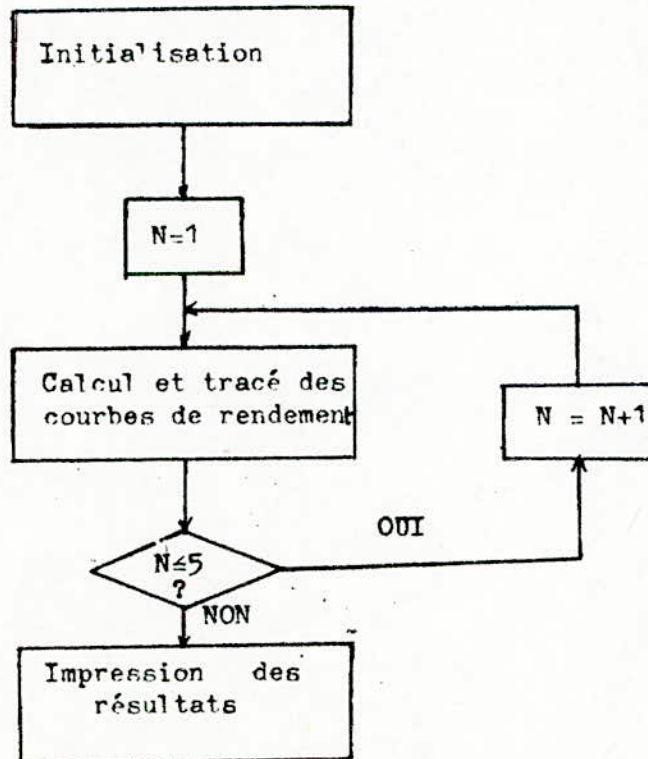


Figure III-7: Organigramme de calcul du rendement d'illumination

Ces résultats sont en bon accord avec ceux qui ont été publiés dans la littérature [32,33,34,35,36].

III.4.2. Le rendement d'illumination (Spill-over)
=====

Rappelons que ce rendement est défini par le rapport de l'énergie interceptée par le paraboloïde à l'énergie totale rayonnée par la source primaire (voir paragraphe III-1). Dans le cas où le diagramme primaire $I(\beta)$ est de révolution, le rendement d'illumination se déduit de l'expression (III-14) et s'écrit [34]:

$$\eta_{s.o.} = \frac{2 \int_0^{\beta_0} I(\beta) \sin \beta \, d\beta}{\int_0^{\pi} I(\beta) \sin \beta \, d\beta} \tag{III-35}$$

Pour le cas particulier des diagrammes de rayonnement typiques donnés par l'expression (III-29), nous aurons :

$$\eta_{s.o.} = \frac{2 \int_0^{\beta_0} \cos^n \beta \sin \beta \, d\beta}{\int_0^{\pi} \cos^n \beta \sin \beta \, d\beta} \tag{III-36}$$

Qui donne après intégration :

$$\eta_{s.o.} = 1 - \cos^{n+1}(\beta_0) \tag{III-37}$$

Le sous-programme de calcul du rendement d'illumination a été mis au point à partir de ces expressions. Son organigramme est donné par la figure (III-7). Il est identique à celui du facteur de gain. En effet, le rendement d'illumination dépend uniquement de β_0 pour n fixé. Le graphisme utilisé est donc du type 2D.

La figure (III-8) donne les courbes $\eta_{s.o.} = f(\beta_0)$ pour $n = 2, 4, 6$ et 8 . Le sous-programme élaboré est donné par le listing (III-7) de l'annexe 3. Il consiste à initialiser le système au graphisme (lignes 0 à 6) et procéder au tracé des

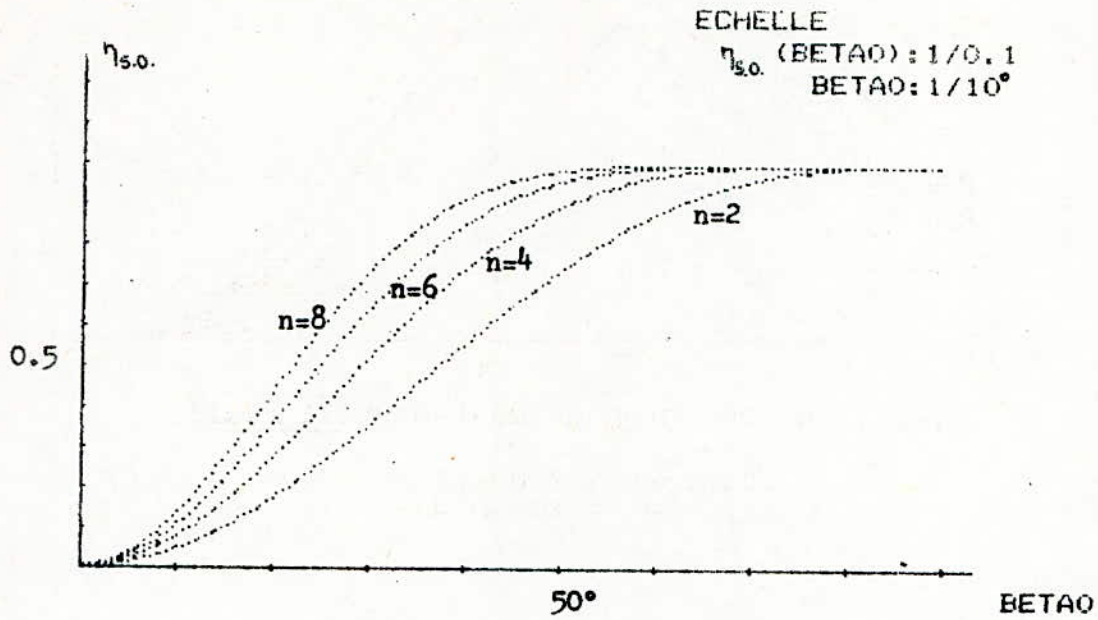


Figure III-8: RENDEMENT D'ILLUMINATION POUR N=2,4,6,8

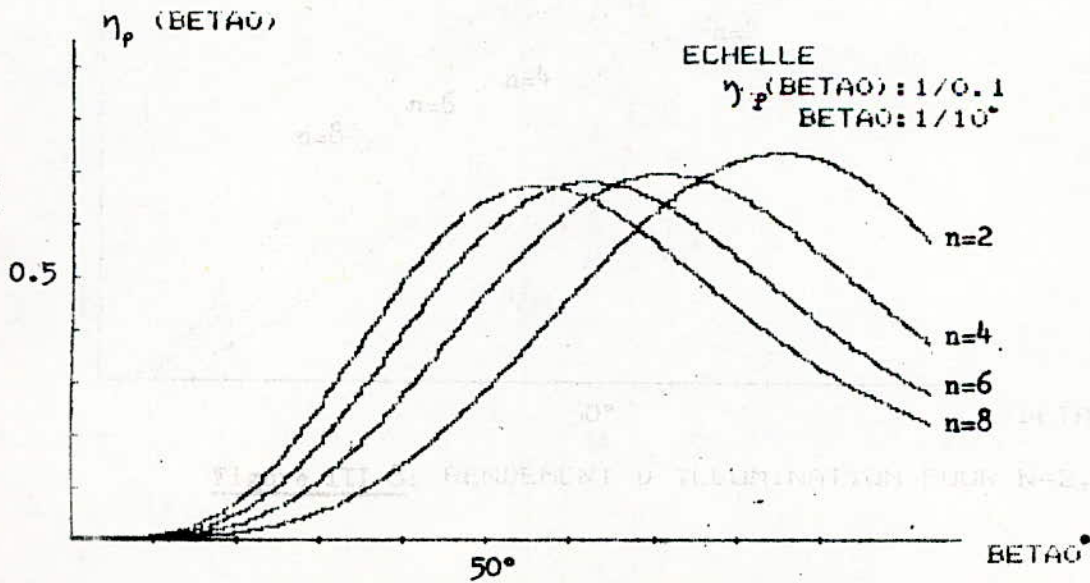


Figure III-9: FACTEUR DE GAIN POUR N=2,4,6,8

GMAX=.736536165
BETA0MAX=73.9490443

courbes (lignes 7 à 100).

Quand on positionne le curseur câlibré au point correspondant à $n = 2$ et $\beta_o = 65.92 \approx 66^\circ$ du réseau de courbes $\eta_{s.o.} = f(\beta_o)$ (figure III-8), on trouve que le rendement d'illumination vaut: $\eta_{s.o.} \approx 0.98$.

On voit donc que les valeurs de $n = 2$ et $\beta_o = 66^\circ$ optimisent le facteur de gain, mais elles ne minimisent pas les pertes par spill-over. En effet, dans ce cas, le rendement d'illumination est maximum et atteint pratiquement l'unité pour des angles voisins de 90° .

III.4.3. Rendement global:
=====

Si on néglige les pertes autres que celles par spill-over, le rendement global de l'ouverture parabolôïde sera le produit du facteur de gain et du rendement d'illumination:

$$\eta_p = g \cdot \eta_{s.o.} \quad (\text{III-38})$$

Le tracé du réseau de courbes $\eta_p = f(\beta_o)$ nécessite le même organigramme que celui décrit par la figure (III-5). Cependant, le sous-programme qui donne les courbes de facteur de gain a été complété par les lignes 35 et 41 du listing (III-8).

Le produit $\eta_p = g \times \eta_{s.o.}$ est ainsi calculé point par point à l'aide de ce logiciel d'application pour différentes valeurs de n et β_o . Ceci permet de tracer η_p au lieu de g .

La figure (III-9) donne les courbes $\eta_p = f(\beta_o)$ obtenues pour $n = 2, 4, 6$ et 8 . La recherche de l'optimum du rendement global se fait à l'aide du curseur mobile et calibré en même temps que le calcul et le tracé point par point de ce réseau de courbes. En fin de tracé, le curseur affiche un rendement global maximum de : $\eta_{pmax} = 0.73536165 \approx 0.74$ pour $n = 2$ et $\beta_o = 73^\circ 56' 57'' \approx 74^\circ$.

Les résultats que nous venons d'obtenir sont difficilement comparables à ceux de la littérature dans la mesure où

peu d'études ont été faites dans ce sens. Ainsi, S. SILVER [36], L. THOUREL [34] et P.F. COMBES [32,33] ont pris comme angle d'ouverture optimum, celui qui correspond au maximum du facteur de gain: c'est à dire $n = 2$ et $\beta_0 \approx 65^\circ$. Ils calculent ensuite le rendement global en faisant le produit du facteur de gain optimum et du rendement d'illumination correspondant à $\beta_0 = 65^\circ$ et pour $n = 2$. Ils trouvent $\eta_p = 0.71$.

BUI-HAÏ [35] suit la même procédure, mais, il prend un angle d'ouverture d'environ 60° . Ceci afin d'avoir un bon niveau d'illumination aux bords du réflecteur. Il tient compte de toutes les pertes possibles qui interviennent dans le calcul du rendement global et trouve $\eta_p \approx 0.58$ pour $\beta_0 \approx 60^\circ$ et $n = 2$.

Bien que nous n'ayons considéré que les pertes par spillover, il nous semble que le meilleur rendement des antenne paraboloides est atteint pour $n = 2$ et $\beta_0 \approx 74^\circ$.

III.4.4. Diagramme de rayonnement:
 =====

III.4.4.1. Introduction:

Le diagramme de rayonnement s'obtient à partir de la fonction caractéristique de rayonnement $A(\eta)$. Pour expliciter celle-ci, on substitue l'expression (III-8) dans (III-9). D'où:

$$A(\theta) = \left| \frac{E_\theta}{E_{\max}} \right| = \left| 1 + \cos \theta \left| N_1 \frac{J_1(u)}{u} + N_2 2^p p! \frac{J_{p+1}(u)}{u^{p+1}} \right| \right| \quad (\text{III-39})$$

avec $u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$.

Pour le cas de faibles angles θ , on a $1 + \cos \theta \approx 2$. Ce qui revient à étudier la fonction caractéristique du rayonnement suivante:

$$A(\theta) = \left| N_1 \frac{J_1(u)}{u} + N_2 2^p p! \frac{J_{p+1}(u)}{u^{p+1}} \right| \quad (\text{III-40})$$

Dans le cas particulier où $p = 0$ (ou illumination uniforme), on aura :

$$A(\theta) = (N_1 + N_2) \left| \frac{J_1(u)}{u} \right| \quad (\text{III-41})$$

Les représentations bidimensionnelles et tridimensionnelles de $A(\theta)$, déduites de (III-40), nous renseignent sur la directivité de l'antenne parabolique et par conséquent sur le choix du rapport D/λ . Pour simplifier le problème, considérons des illuminations de l'ouverture pour lesquelles $N_1 = 0$ et $N_2 = 1$. La fonction caractéristique du rayonnement devient :

$$A(\theta) = 2^p p! \frac{J_{p+1}(u)}{u^{p+1}} \quad (\text{III-42})$$

Le microordinateur APPLE II+ que nous avons utilisé ne possède pas de bibliothèque logicielle pour les fonctions de Bessel. Mais, pour tracer $A(\theta)$, nous n'avons besoin que des fonctions de Bessel de première espèce et d'ordre $n < 9$. En outre, la précision relative du tracé qui est de l'ordre 10^{-3} limite le nombre de chiffres significatifs, fixant les coordonnées d'un point, à un maximum de quatre. Aussi, il est plus simple de créer un logiciel à partir des formes asymptotiques des fonctions de Bessel pour tracer $A(\theta)$, que d'utiliser toute une bibliothèque mathématique. En effet, le développement en série de la fonction de Bessel est donné par [42] :

$$J_m(u) = \left(\frac{u}{2}\right)^m \left\{ \frac{1}{m!} - \frac{(u/2)^2}{1!(m+1)!} + \frac{(u/2)^4}{2!(m+2)!} - \dots \right\} \quad (\text{III-43})$$

Cette expression n'est valable que pour les valeurs entières positives de m . On démontre que pour $0 \leq u \leq 1.5$, l'expression (III-43) devient [42] :

$$J_m(u) \approx \left(\frac{u}{2}\right)^m \frac{1}{m!} \quad (\text{III-44})$$

De même, pour $u > 1.5$ elle peut être approximée par :

$$J_m(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \cos \left(u - m \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (\text{III-45})$$

En raccordant ces deux fonctions, on obtient un diagramme de rayonnement dont le tracé est tout aussi précis que celui obtenu par des méthodes habituelles. Notons cependant la présence d'une légère déformation du diagramme au niveau du point

de raccordement. Pour réduire celle-ci, nous avons considéré l'approximation de (III-43) jusqu'au quatrième ordre. Celle-ci a donné :

$$J_m(u) \approx \left(\frac{u}{2}\right)^m \left\{ \frac{1}{m!} - \frac{(u/2)^2}{1!(m+1)!} + \frac{(u/2)^4}{2!(m+2)!} \right\} \quad \text{(III-46)}$$

En substituant (III-45) et (III-46) dans (III-42), nous obtenons la fonction de rayonnement suivante :

$$A(\theta, p) = \begin{cases} \frac{1}{2(p+1)} \left\{ 1 - \frac{u^2}{4(p+2)} + \frac{u^4}{32(p+3)} \right\} & \text{pour } u \leq 1.5 \\ \sqrt{\frac{2}{\pi}} p! u^{-p-3/2} \cos\left(u - (p+1)\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) & \text{pour } u > 1.5 \end{cases} \quad \text{(III-47)}$$

Cette expression a servi de base aux logiciels développés pour représenter les diagrammes de rayonnement 2D et 3D. Pour éliminer complètement les discontinuités au niveau du point de raccordement, nous avons usé d'un artifice consistant à faire un lissage par infographie autour de ce point. En effet, la courbe obtenue lors du premier tracé (figure III-10), subit tout d'abord une coupure AB au voisinage du point de rebroussement. Ceci donne la figure (III-11). Les deux extrémités A et B sont jointes par un arc de courbe adéquat de façon à obtenir une représentation correcte de la fonction caractéristique de rayonnement $A(\theta, p)$ (figure III-12).

III.4.4.2. Diagramme de rayonnement 3D:

Pour tracer $A(\theta, p)$ nous avons considéré son expression mathématique donnée par (III-47). Les courbes obtenues ont permis d'établir une comparaison spatiale des différents rayonnements en fonction du type d'illumination ($p = 0, 1, 2, \dots$). Pour cela, nous avons utilisé l'algorithme concernant les fonctions du type: $z = f(x, y)$, que nous avons développé au paragraphe (I.4.3.5). Cet algorithme a été cependant adapté aux antennes paraboliques. Le programme mis au point est donné par le listing (III-9). Il comporte les étapes suivantes:

- phase 1 (lignes 1 à 70): initialisation des constantes de calcul,



Figure III-10/: Diagramme sans lissage.



Figure III-11/: Courbe coupée au voisinage du point de rebroussement.



Figure III-12/: Courbe lissée

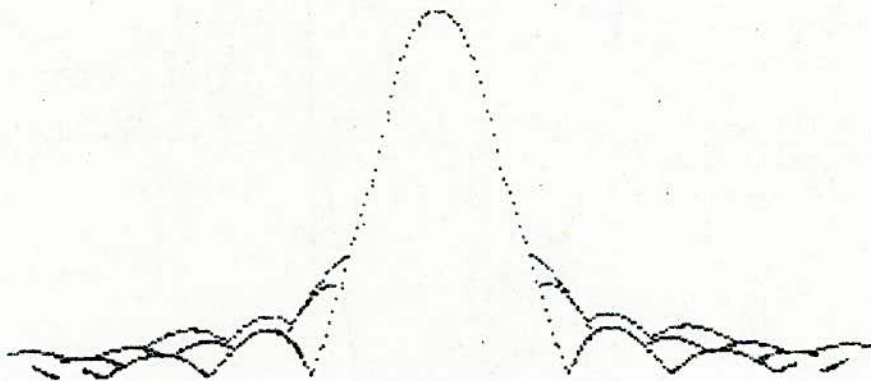
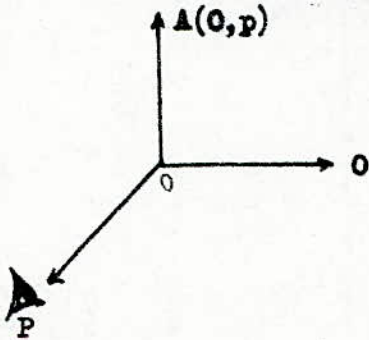


Figure III-13/:

DIAGRAMME DE RAY. 3D: R=10

- phase 2 (lignes 80 à 120): définition de la direction d'observation et changement de repère,
- phase 3 (lignes 130 à 160): préparation au tracé sur écran,
- phase 4 (lignes 170 à 200): branchements aux différents sous-programmes de calcul et de tracé,
- phase 5 (lignes 300 à 351): sous-routine de calcul des points de la fonction dans l'espace objet,
- phase 6 (lignes 400 à 440): sous-programme de changement de repère,
- phase 7 (lignes 500 à 520): sous-programme de calcul de la projection en perspective,
- phase 8 (lignes 600 à 620): sous-programme d'élimination des surfaces cachées.

La représentation obtenue est donnée par la figure (III-13) On constate à partir de celle-ci que lorsque p croît, l'angle d'ouverture à 3dB augmente. Ceci est conforme aux résultats publiés dans la littérature [32,33,34,35,36].

En particulier, les angles d'ouverture sont [32,33] :

$$* \theta_{3dB} \approx 58,5 \lambda/D \quad \text{pour } p = 0 \quad (\text{III-48})$$

$$* \theta_{3dB} \approx 73 \lambda/D \quad \text{pour } p = 1 \quad (\text{III-49})$$

$$* \theta_{3dB} \approx 84 \lambda/D \quad \text{pour } p = 2 \quad (\text{III-50})$$

On voit donc qu'on doit choisir un exposant p le plus faible possible, si on veut réduire l'angle d'ouverture à 3dB.

Lors de l'étude du rayonnement global de l'antenne, nous avons trouvé que celui-ci était optimum pour un gain de la source primaire de la forme $G(\beta) = 6 \cos^2 \beta$. Celle-ci donne une illumination à l'ouverture $F(l/a)$ qui est en fait la développante de la courbe représentant la fonction caractéristique $F(\beta) = k \cos \beta$, dans une direction perpendiculaire à $\vec{o_z}$.

Afin d'utiliser les résultats de l'étude précédente, on peut approcher la caractéristique $F(l/a)$ par une parabole d'équation:

$$F(l/a) = 1 - (l/a)^2 \quad (\text{III-51})$$

Ceci revient donc à faire $p = 1$ dans les expressions (III-7), (III-8) et (III-47) et le critère de choix d'un exposant p le plus faible possible est respecté.

III.4.4.3. Diagramme de rayonnement 2D, en coordonnées

polaires:

Habituellement, le tracé du diagramme polaire se fait en considérant soit le plan \vec{E} , soit le plan \vec{H} . En réalité, on peut prendre dans notre cas n'importe quel plan méridien qui est perpendiculaire au plan de l'ouverture et qui contient l'axe \vec{oz} , car le rayonnement primaire choisi présente une symétrie de révolution autour de cet axe.

Le logiciel mis au point pour ce tracé est donné par le listing (III-10).

Les courbes ainsi obtenues: (voir figures III-14), nous renseignent globalement sur la distribution dans l'espace du rayonnement de l'antenne parabolofide et de ce fait, on peut avoir une bonne idée de la directivité de cette antenne.

Avec un tel diagramme du rayonnement il est difficile de procéder à des lectures précises concernant ses caractéristiques (nombre de lobes secondaires, leurs positions, angle d'ouverture à 3dB, ...), car le rayonnement est en général concentré dans un cône de demi-angle au sommet inférieur ou de l'ordre de 5° . Pour améliorer la précision de lecture au voisinage du lobe principal, il est possible d'étaler l'échelle verticale par un facteur de déformation F et apprécier ainsi la variation de champ pour des petits angles. Mais, comme nous allons le voir maintenant, il est beaucoup plus commode de représenter le diagramme de rayonnement dans un système de coordonnées cartésiennes dans lequel $A(\theta, p)$ est porté en ordonnée et où θ figure en abscisse (pour p fixé).

III.4.4.4. Diagramme de rayonnement 2D, en coordonnées

cartésiennes:

Ce procédé est le plus utilisé pour ce type d'antenne, car il permet de mesurer grâce au curseur électronique câblé

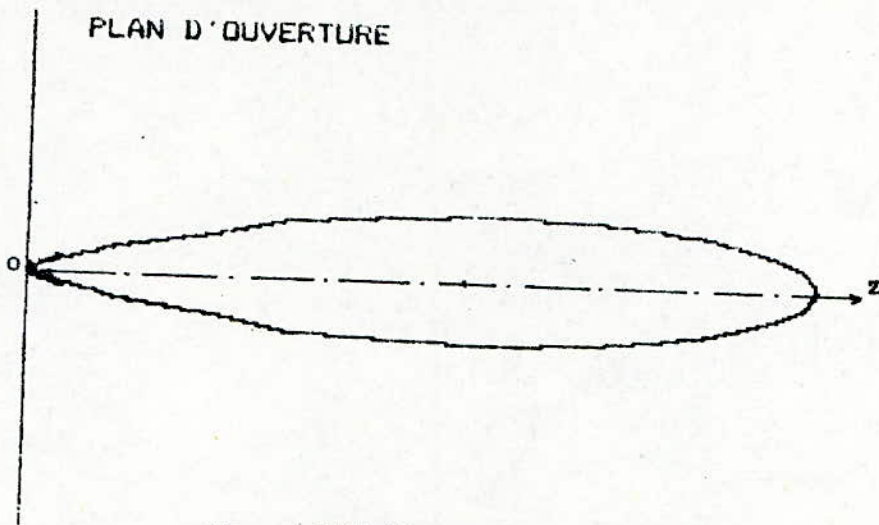


Figure III-14a:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE
TRACE AVEC $F=1000$

POUR $R=5$

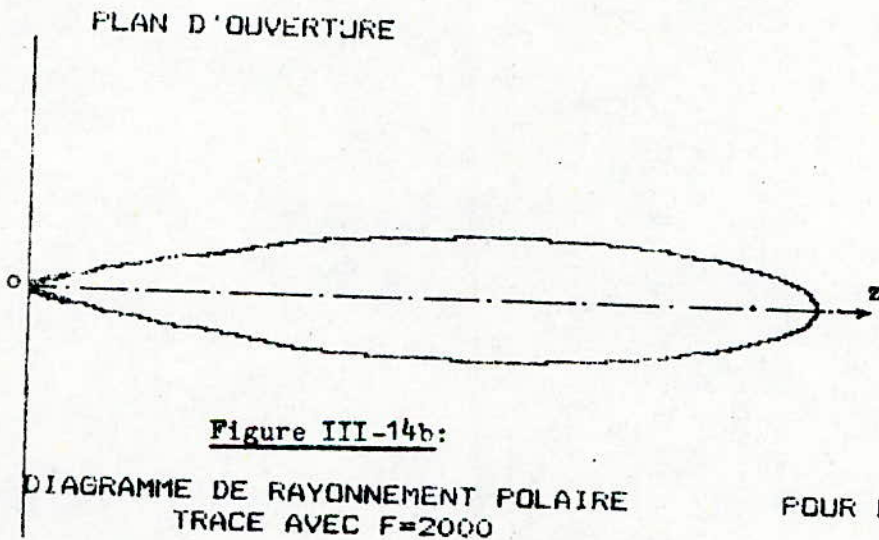


Figure III-14b:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE
TRACE AVEC $F=2000$

POUR $R=10$

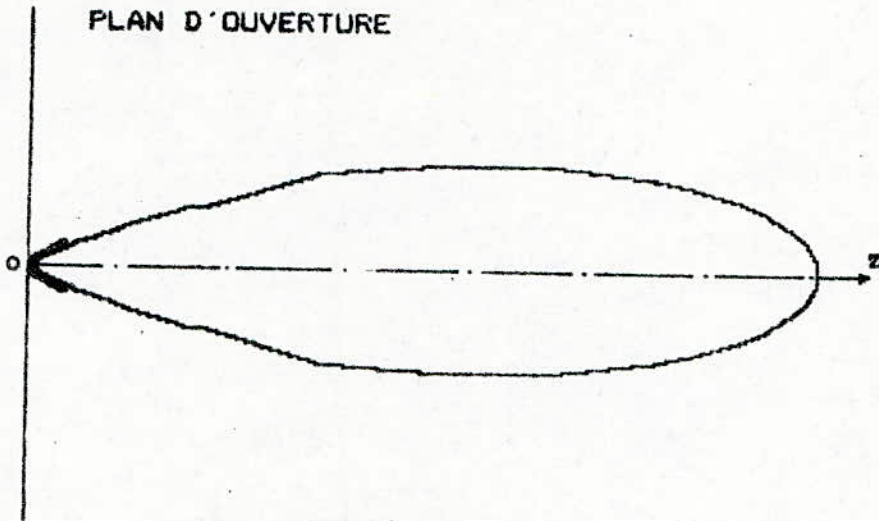


Figure III-14c:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE
TRACE AVEC F=5000

POUR R=15

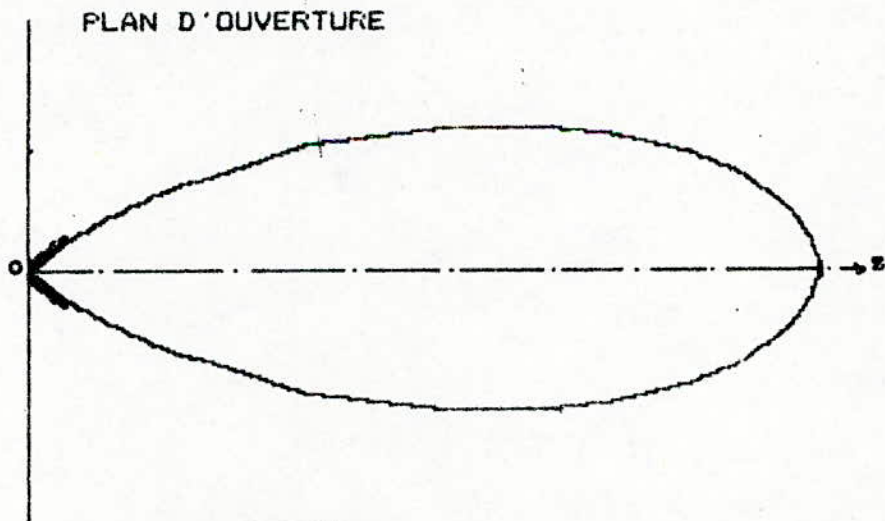


Figure III-14d:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE
TRACE AVEC F=10000

POUR R=20

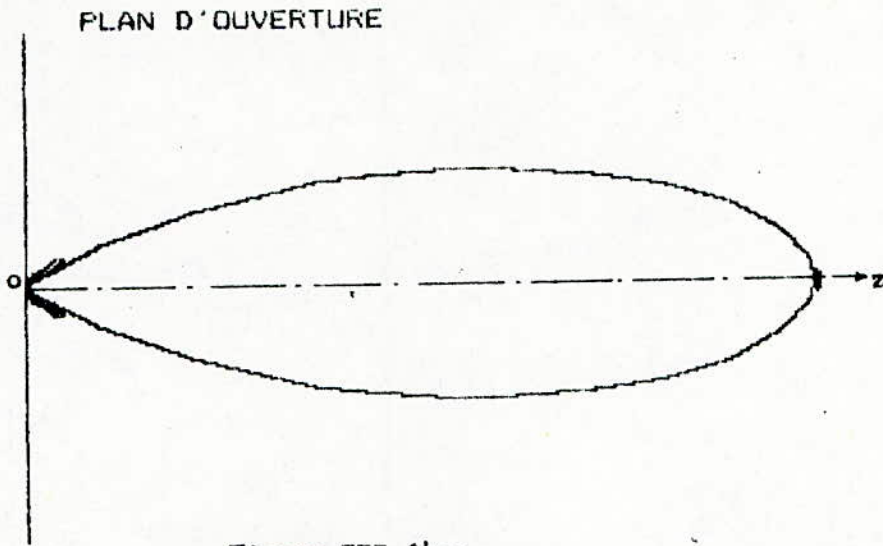


Figure III-14e:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE
TRACE AVEC $F=10000$

POUR $R=25$

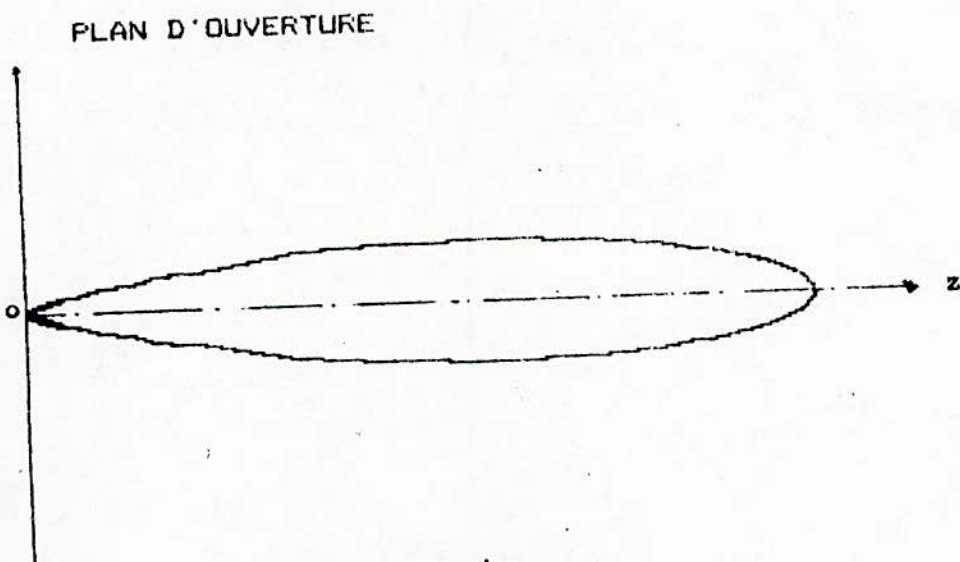


Figure III-14f:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT POLAIRE
TRACE AVEC $F=10000$

POUR $R=50$

et avec la plus grande précision possible les paramètres suivants:

- les rapports des niveaux du lobe principale aux lobes secondaires,
- l'angle d'ouverture à 3dB,
- le nombre de lobes secondaires.

Ceci nous permet d'en déduire les paramètres de construction optimums. A cet effet, nous avons mis au point un programme dont l'organigramme est représenté à la figure (III-15). Son listing est donné en annexe 3 (voir listing III-11). Ce programme comporte les phases suivantes:

- phase 1 (lignes 1 à 9 et 900 à 1012): préparation des axes (échelles commentaires et graduation),
- phase 2 (lignes 10 à 30): initialisation des constantes de calcul,
- phase 3 (lignes 40 à 150): test des limites de validité et tracé des courbes asymptotiques données par les expressions (III-42) et (III-43),
- phase 4 (lignes 300 à 440): définition des courbes asymptotiques données par l'expression (III-47),
- phase 5 (lignes 1016 à 1060): impression des résultats sur papier.

Les courbes représentées par les figures ont été tracé pour différents rapports D/λ , à partir de ce programme (R représenté le rapport D/λ).

On voit à partir de ces différentes courbes que l'angle d'ouverture à 3dB du lobe principal diminue quand D/λ . Autrement dit, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus concentré autour de $\vec{o z}$ que D/λ est élevé.

La recherche de l'optimum du rapport D/λ se fait à partir de l'étude bidimensionnelle du diagramme de rayonnement.

En examinant les courbes obtenues, on constate tout d'abord que plus D/λ croît plus le nombre de lobes secondaires devient

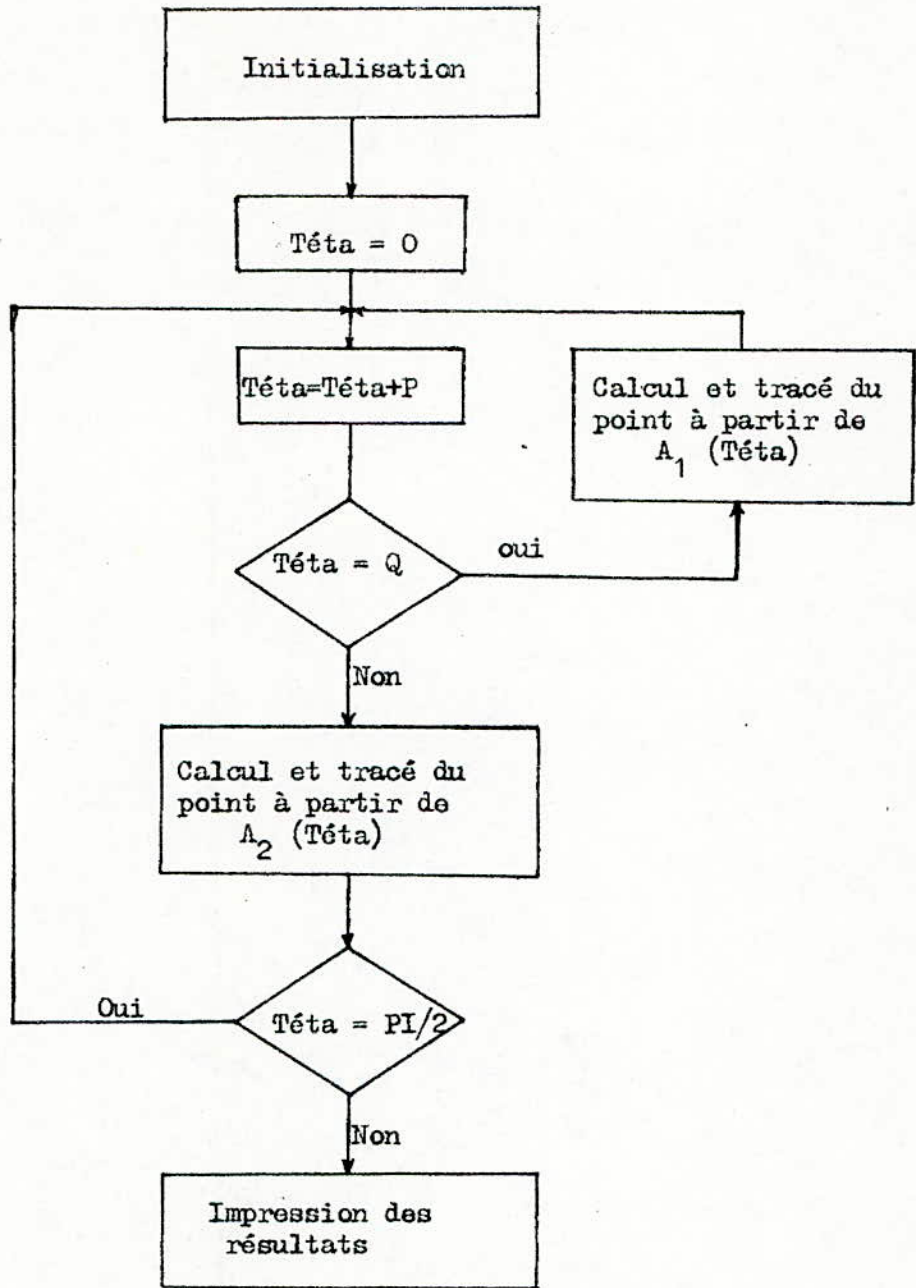


Figure III-15/: Organigramme du tracé du diagramme de rayonnement 2D.

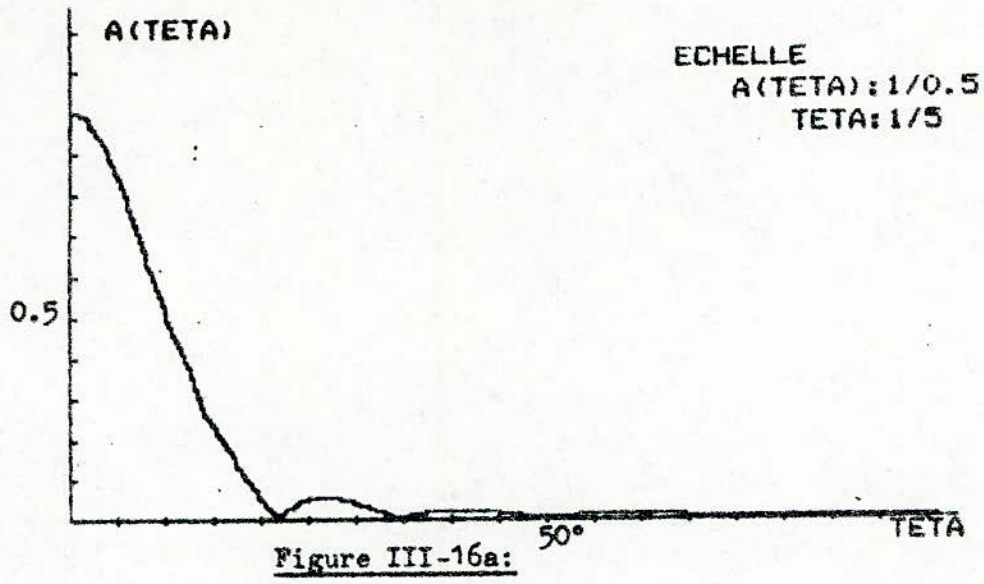


DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=5

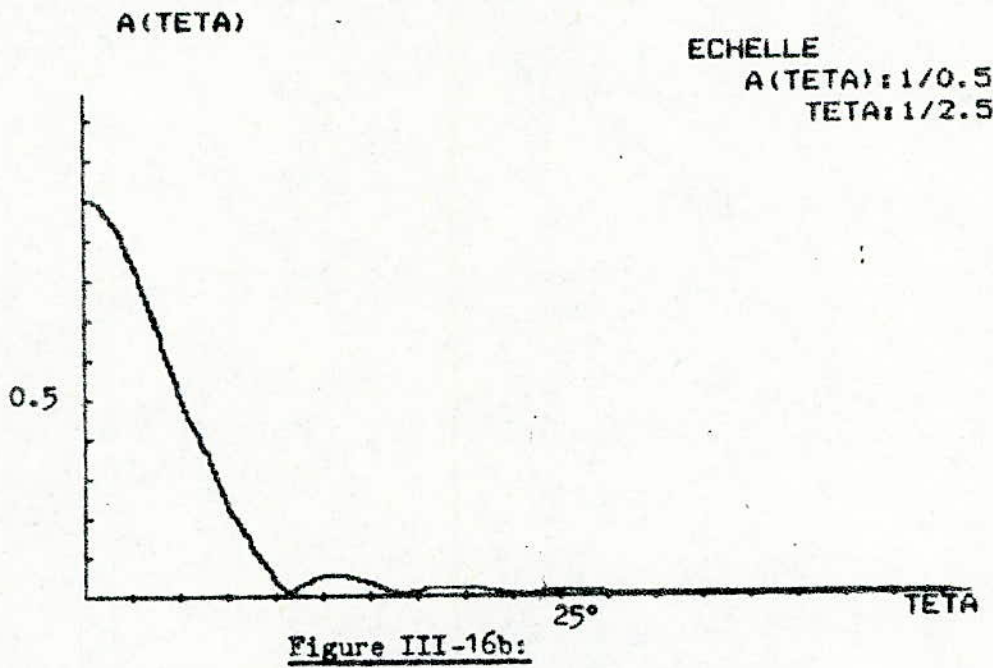


DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=10

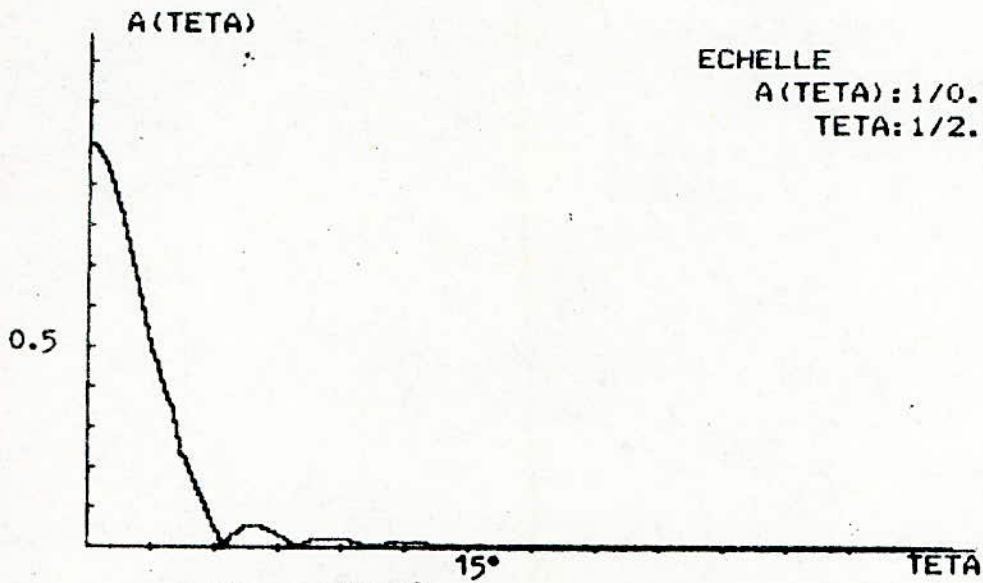


Figure III-16c:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=15

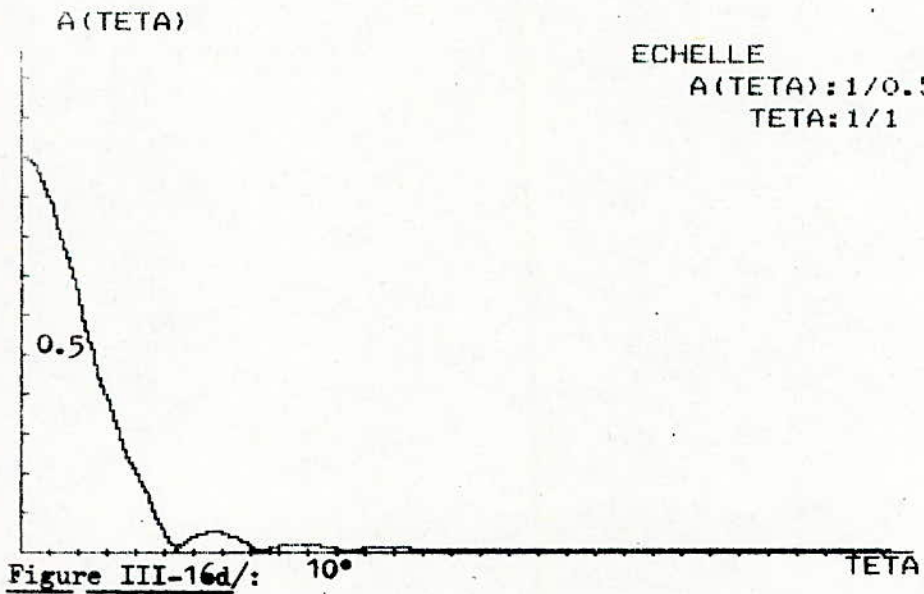


Figure III-16d/:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=20

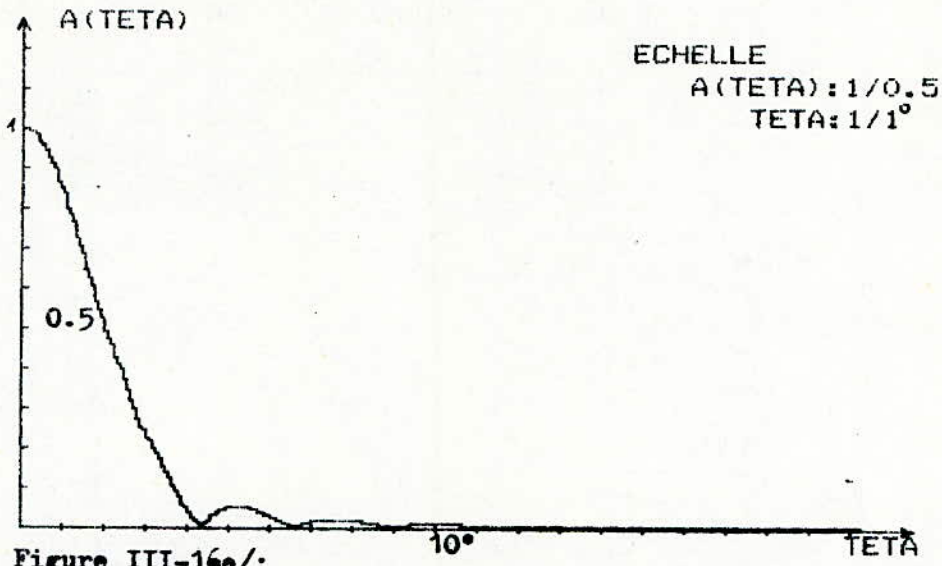


Figure III-16e/:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=25

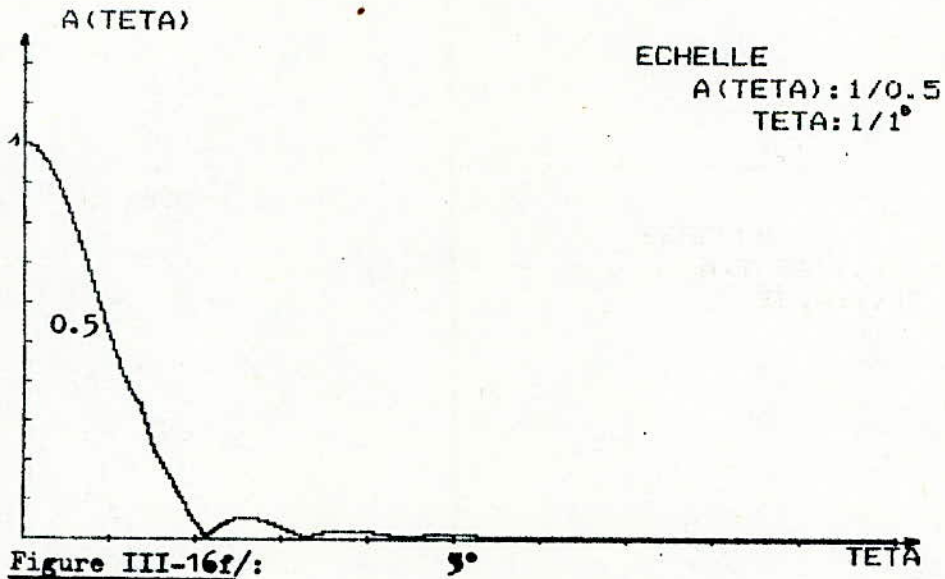


Figure III-16f/:

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=50

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT 2D POUR R=25

ECHELLE
A(TETA): 1/0.5
TETA: 1/1°

élevé (dans le cône de demi-angle au sommet égal à 10°). C'est à dire qu'une partie de la puissance rayonnée est dispersée sous forme de lobes secondaires. Mais, à partir de $D/\lambda \geq 28$, l'accroissement du nombre de lobes secondaires n'entraîne qu'une augmentation infime de la perte de puissance.

D'autre part, l'angle d'ouverture à 3dB dépend aussi du rapport D/λ . Il est alors donné, pour $p = 1$, par l'expression (III-49), soit: $\theta_{3dB} = 73 \lambda/D$. Cette relation permet d'élaborer le tableau III-1 et de tracer la courbe θ_{3dB} de l'expression (III-49) (voir figure III-17). On obtient une hyperbole pour laquelle la variation de l'angle devient inférieure ou de l'ordre de $6'$ (correspondant à $1/10^\circ$) quand $D/\lambda \geq 28$. On a donc intérêt à choisir $D/\lambda \geq 28$.

III.5. CONCLUSION:

En donnant une vision globale des choses, la représentation 3D du diagramme de rayonnement a permis de constater que le rayonnement se concentre d'autant plus autour de l'axe de l'antenne que p tende vers zéro (figure III-13). Une étude plus fine de ces diagrammes, effectuée en représentation 2D, a montré que les caractéristiques d'une antenne paraboloidé parfaite sont optimales si:

- 1°) le gain de l'antenne primaire est: $G(\beta) = 6 \cos^2 \beta$,
- 2°) $\frac{D}{F} = 2.2$ (correspondant à $\beta_0 \approx 74^\circ$)
- 3°) $\frac{D}{\lambda} \geq 28$

Ces conditions résultent de la recherche d'un compromis entre le rendement global et la directivité de l'antenne.

Le choix du rapport D/λ dépend du type d'utilisation envisagée. Aussi, dans le cas des liaisons hertziennes, ce rapport est déterminé par la réalisation du compromis coût-performance. En effet, le choix de ce rapport dépend de la technologie de construction du paraboloidé, du coût de revient des installations et de la précision souhaitée pour la liaison hertzienne.

| $R=D/\lambda$ | θ_{3dB} | $\theta_{3dB}^{R+1} - \theta_{3dB}^R$ | $R=D/\lambda$ | θ_{3dB} | $\theta_{3dB}^{R+1} - \theta_{3dB}^R$ |
|---------------|----------------|---------------------------------------|---------------|----------------|---------------------------------------|
| 1 | 72.6 | -- | 17 | 4.27 | 0.26 |
| 2 | 36.3 | 36.3 | 18 | 4.03 | 0.24 |
| 3 | 24.2 | 12.1 | 19 | 3.82 | 0.21 |
| 4 | 18.15 | 6.05 | 20 | 3.63 | 0.19 |
| 5 | 14.52 | 3.63 | 21 | 3.45 | 0.18 |
| 6 | 12.1 | 2.42 | 22 | 3.30 | 0.15 |
| 7 | 10.37 | 1.73 | 23 | 3.15 | 0.15 |
| 8 | 9.07 | 1.30 | 24 | 3.02 | 0.13 |
| 9 | 8.06 | 1.07 | 25 | 2.90 | 0.12 |
| 10 | 7.26 | 0.80 | 26 | 2.79 | 0.11 |
| 11 | 6.60 | 0.66 | 27 | 2.68 | 0.11 |
| 12 | 6.05 | 0.55 | 28 | 2.59 | 0.09 |
| 13 | 5.58 | 0.47 | 29 | 2.50 | 0.09 |
| 14 | 5.18 | 0.40 | 30 | 2.42 | 0.08 |
| 15 | 4.84 | 0.34 | 49 | 1.48 | -- |
| 16 | 4.53 | 0.31 | 50 | 1.45 | 0.03 |

Tableau III-1: Variations de l'angle d'ouverture pour des valeurs de $R=D/\lambda$ allant de 1 à 50.

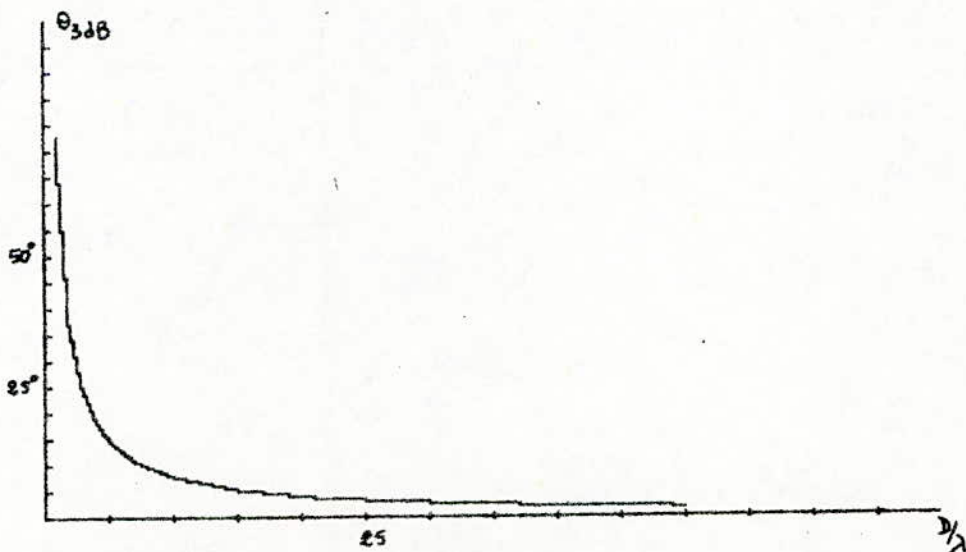


Figure III-17: Courbe de variation $\theta_{3dB}=f(D/\lambda)$.

A titre d'exemple, si on prend $D/\lambda = 30$, on trouve à partir de l'expression (III-49) que l'angle d'ouverture est de $2^{\circ}.43$. Ceci correspond, dans le cas d'une liaison hertzienne point à point de 80 Km, à une surface circulaire arrosée par l'antenne dont le rayon est d'environ 4 Km. Si on choisit un rapport $D/\lambda = 31$, on réduit le rayon de cette surface d'à peine 120 m, mais on augmente le diamètre du paraboloïde (pour une fréquence de travail fixée). Le coût de l'antenne devient donc plus élevé. Tout ceci nous amène à prendre un rapport D/λ le plus bas possible. On a alors intérêt à prendre la valeur limite $D/\lambda = 28$, car celle-ci donne pratiquement la même dispersion de rayonnement que pour des valeurs supérieures à ce rapport, mais, avec un coût moindre.

Afin d'illustrer les résultats que nous avons obtenus, prenons $D/\lambda = 28$ et fixons une fréquence de travail égale à 900 MHz. Le calcul donne alors:

$$D = 9.24 \text{ m} \quad \text{et} \quad f = 4.2 \text{ m}$$

Quant aux liaisons hertziennes par satellites, les critères de choix de ce rapport sont tout autres. Ici le problème est de disposer d'aériens dont le gain soit aussi élevé que possible. Dans la direction de rayonnement maximum, celui-ci vaut:

$$G_m = \eta_p \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2}$$

On voit donc qu'il faut optimiser le rendement global η_n et prendre un rapport D/λ le plus élevé possible. Mais la précision de fabrication des antennes paraboloïdes (qui est en général inférieure ou égale à $\lambda/16$) limite ce gain à environ 70 dB |35|. Ce qui donne $D/\lambda \approx 40$. Ainsi le calcul montre que le diamètre de l'antenne doit être de 1.2m pour une réception TV par satellite dans la bande X ($\lambda = 3\text{cm}$) et que la distance focale doit être égale à 54.5 cm.

// HAPITRE IV
=====

INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1. INTRODUCTION:

Aux chapitre II et III, nous avons mis au point des logiciels d'application graphique dans les domaines de l'électronique, de l'animation graphique, de l'architecture et urbanisme et de la mécanique. Puis, les résultats obtenus sur APPLE II+ avaient fait l'objet d'une discussion préliminaire. Maintenant, nous allons développer cette analyse afin de situer la méthodologie que nous avons appliquée à l'APPLE II+ par rapport aux autres procédés graphiques.

IV.2. PROJECTION DANS L'ESPACE D'UNE PIECE MECANIQUE:

L'exemple que nous avons considéré au paragraphe (II.3.1) était celui de la représentation dans l'espace 3D d'un objet pour différentes positions. Le logiciel mis au point pour créer et manipuler cet objet a été testé sur une pièce cubique et a permis de montrer les avantages de l'infographie par rapport à l'exécution manuelle d'un dessin industriel. (surtout quand il s'agit de modifier partiellement l'objet, de procéder à sa rotation de compléter une partie par symétrie).

En effet, pour reproduire soigneusement le cube en perspective à partir d'un croquis, on se sert habituellement d'encre et d'instruments de dessinateur. Un tel travail dure approximativement 5 mn.

Quand on substitue à cette technique l'infographie, le temps d'exécution est à peine amélioré, car il demeure proche de 5 mn. On voit donc que l'intérêt de l'infographie ne réside pas essentiellement dans ce type d'opération, mais plutôt dans le cas où on effectue des transformations sur l'objet. Ainsi, il est beaucoup plus facile et plus rapide de modifier par ordinateur les tracés obtenus que de les dessiner à nouveau manuellement sous leurs nouvelles formes.

Par exemple, quand on effectue une rotation, une translation ou une symétrie sur le dessin, l'ordinateur graphique met un temps d'exécution d'environ 10 secondes. Par contre, le même travail fait à la main nécessite quelques dizaine de minutes

(car il faut procéder au calcul préalable des transformations, puis exécuter le dessin). De telles opérations sont presque immédiates en infographie, car nous avons prévu leur implantation dans le programme général de tracé.

En outre, il est inutile d'introduire à nouveau les données initiales sur la géométrie de l'objet, du fait qu'elles se trouvent déjà stockées en mémoire.

Les résultats que nous avons ainsi obtenus sont en bon accord avec ceux publiés dans la littérature [4,18,31].

En conclusion, on peut donc à volonté visualiser un objet, le translater, l'agrandir, le réduire, le compléter par symétrie conformément aux menus décrits au paragraphe (II.3.1.). Puis, quand on juge que le dessin est à sa phase finale, on peut l'imprimer sur papier.

Remarquons que pour créer et représenter une pièce mécanique en perspective, on doit en général disposer d'une capacité mémoire bien supérieure à celle de l'APPLE II+ (> 48 K.O.). Cependant, nous avons pu résoudre le problème en usant d'un artifice. Ce dernier consiste tout d'abord à diviser le programme général en deux phases que l'on stocke séparément sur une disquette. La première phase correspond à la préparation de l'objet en mémoire et l'autre permet de représenter cet objet sur écran ou de le dessiner sur papier. Puis, on charge en mémoire centrale de l'APPLE II+ les sous-programmes correspondant uniquement à une phase, c'est à dire les sous-programmes de création de l'objet ou les sous-programmes du dessin décrit au paragraphe (II.3.1.).

Le définition de l'objet en mémoire se fait en chargeant les sous-programmes de la première phase. Lorsque cette définition est achevée, on charge à nouveau la mémoire utilisateur par les sous-programmes du menu de préparation à la visualisation de l'objet sur l'écran.

Cette procédure permet d'avoir des résultats comparables à ceux d'un système ayant une plus grande capacité mémoire, mais

au prix d'un temps global d'exécution plus élevé. (Chaque passage d'un menu à l'autre dure environ 30 secondes).

Si on veut augmenter la rapidité d'exécution du système, il faut donc augmenter la capacité mémoire de l'APPLE II+. Ceci est nécessaire quand on veut représenter une pièce mécanique de géométrie plus complexe.

A titre d'exemple, l'utilisation de la version APPLE IIc (de capacité mémoire 128 K.O.) permettrait d'aborder de tels problèmes et de compléter nos logiciels par des sous-programmes d'élimination des faces cachées, d'ombrage et de texture.

IV.3. AMENAGEMENT URBAIN:

La méthode exposée au paragraphe (II.3.1.) et qui permet de représenter une pièce cubique en perspective peut paraître à priori analogue à celle qui est développée pour dessiner un bâtiment en architecture. En effet, le résultat graphique obtenu sur l'écran dans le cas d'un contour d'une maison ressemble également à un cube.

En réalité, les méthodes développées pour réaliser ces deux dessins diffèrent.

En mécanique, lorsque nous devons représenter une pièce en perspective, on prévoit dans le logiciel mis au point, des sous-programmes permettant d'opérer des transformations géométriques telles que le changement d'échelle, les effets des mouvements de rotation et de translation. Ceci nécessite l'emploi d'un graphisme 3D.

En aménagement urbain, il s'agit en général de déterminer la forme la plus harmonieuse pour l'oeil, en tenant compte du site environnant et du vœux du client. Un tel travail nécessite la réalisation de plusieurs ébauches sur un graphique pour arriver finalement à la forme souhaitée. Le contour cubique dessiné présente dans ce cas une structure figée. On ne fait alors varier que l'emplacement des portes, fenêtres, balcons,...

On peut prévoir l'implantation de jardins, de parkings ou de terrains de jeux.

Si on voulait utiliser le graphisme 3D à la conception d'un aménagement urbain, il faudrait alors un temps d'exécution des calculs très lent, surtout lorsqu'on veut opérer des modifications sur notre ébauche. Par contre, l'emploi d'un graphisme 2D, tel que celui présenté au paragraphe (II.3.3.) est bien adapté à cette application, dans la mesure où le temps d'exécution est meilleur. Son logiciel est constitué de deux phases: l'élaboration d'un menu d'éléments les plus usités dans ce domaine et la mise au point d'un programme général de tracé. Ce dernier est équivalent à l'ensemble crayon-gomme habituellement utilisé en dessin. Il permet le tracé des contours.

Cette procédure présente l'avantage d'une meilleure inter-activité homme-machine, critère très important et très recherché pour ce type d'application.

IV.4. ANIMATION GRAPHIQUE: DESSIN ANIME

La méthode d'animation graphique a fait l'objet d'une bonne discussion aux paragraphes (II.2.1) et (II.3.2.). Rappelons-en les principaux points:

- choix d'un processeur très rapide,
- calcul des durées d'affichage t_i et de changement d'image t_c en respectant l'inéquation suivante (bien connue en télévision):

$$\frac{1}{20} \text{ s} \leq t_i + t_c \leq \frac{1}{15} \text{ s}$$

ceci afin d'éviter les phénomènes de scintillement de l'image.

- estimation de la capacité mémoire nécessaire au calcul et au stockage des différentes étapes du mouvement.

Les logiciels qui nous ont permis d'animer un personnage humoristique simple ont été mis au point par interaction des

langages: machine et Applesoft du microordinateur APPLE II+. Ceci afin d'exploiter au mieux de ses possibilités la capacité mémoire de 48 K.O. de cet appareil et d'augmenter le temps d'élaboration du personnage.

Notons toutefois que notre réalisation n'est qu'une première approche du problème de l'animation graphique et que ce dernier est encore jusqu'à présent mal résolu. En effet, à cause de la capacité mémoire limitée des systèmes informatiques, ceux-ci sont pour l'instant loin d'atteindre les performances de l'enregistrement par appareils de cinéma ou par magnétoscopes.

Ainsi, considérons le cas de la projection d'un film réalisé par la méthode numérique et qui dure une heure. Si on admet qu'une bonne image doit avoir une définition minimale de 512 x 512 pixels, il faut pour cela une page graphique ayant 32 K.O. de mémoire.

Le passage de 20 images par seconde nécessiterait une capacité mémoire locale de $20 \times 32 = 640$ K.O. Et pour une heure de projection, on doit avoir 640×3600 K.O. (ou 3304 Mega-octets!). On voit bien qu'un tel système est irréalisable au stade de la technologie actuelle. Même si un tel ordinateur existait, son coût serait énorme (supérieur à 60 millions de dinars actuels).

Sans doute, l'avenir appartient-il aux disques numériques à lecture par faisceau Laser, type "Compact disk", qui viennent de faire leur apparition sur le marché? Ceux-ci viennent d'être appliqués aux techniques de sonorisation [41]. Doués d'un grand rapport capacité mémoire/encombrement, ils répondent bien aux critères de fidélité exigés par les mélomanes. S'il était possible de décupler ce rapport, l'application des disques compacts à l'animation graphique serait envisageable.

IV.5. CIRCUIT IMPRIME:

Rappelons que le graphisme utilisé pour tracer un circuit imprimé est à deux dimensions et que la procédure employée est la même que celle déjà développée en architecture et urbanisme,

sauf que les éléments du menu sont des connexions de composants électroniques (voir paragraphe II.3.4.).

La méthode développée pourrait être généralisée à la conception des circuits intégrés, à condition de créer des menus spécifiques. En effet, elle donnerait dans ce cas des dessins analogues à ceux de la figure II-4. Leur réduction à une échelle microscopique pourrait être comme une étape de la fabrication assistée par ordinateur (F.A.O.). Ce procédé connaît actuellement un essor remarquable dans le domaine de la conception et la fabrication assistées par ordinateur des circuits intégrés et imprimés [2,5,6]

IV.6. ANTENNES PARABOLOIDES:

Les logiciels décrits par les organigrammes donnés par les figures (III-5), (III-7) et (III-15) ont été élaborés en fonction de deux grandeurs caractéristiques des antennes paraboloides: par le facteur de gain et la directivité. Ils régissent des différentes étapes des tracés des courbes de rendement global $\eta_p = f(\beta_o)$ pour $n = 2, 4, 6$ et 8 (figure III-8) et des diagrammes de rayonnement (figures(III-13), (III-14) et (III-16). Ils permettent également de déterminer toute valeur remarquable, rapidement et avec une précision de 10^{-9} , par déplacement d'un curseur électronique câlibré sur ces courbes.

Aussi, nous n'avons eu aucune difficulté à trouver par infographie que le rendement global passe par son maximum pour $n = 2$ et $\beta_o = 73.9490436$ degrés, dans le cas d'une antenne paraboloides parfaite. C'est à dire caractérisée par une surface du réflecteur paraboloidal sans déformation, ni riguosité, un centre d'alimentation de la source primaire coïncidant avec le foyer du paraboloides, pas de pertes par absorption de la source réfléchissante et pas d'obstacle. Le rayonnement de la source primaire est entièrement dirigé vers le réflecteur. La valeur de β_o ainsi trouvée est nettement plus élevée que celles publiées dans la littérature [32,33,34,35,36], car la différence est d'environ 10° .

Pourtant la méthode ainsi développée se base sur les mêmes hypothèses que celles utilisées par la plupart des chercheurs comme par exemple S. SILVER [36], L. THOUREL [34], BOUI-HAÏ [35] et S.F. COMBES [32,33]. La seule modification que nous avons faite dans le calcul du rendement global est de tenir compte de la variation de pertes par spill-over en fonction de β_0 , alors que tous ces auteurs font comme si les pertes dans l'antenne étaient constantes. Sans doute admettent-ils implicitement que les variations des pertes par spill-over avec l'angle de l'ouverture sont compensées par celles des autres pertes.

La question qui demeure posée est de savoir quel est l'optimum du rendement global dans le cas d'une antenne réelle: c'est à dire une antenne où interviennent les défauts de fabrication et de mise au point expérimentale.

Dans le cas d'une antenne à réflecteur paraboloidal parfait et ne présentant pas de défocalisation, il est indéniable que $\beta_0 \approx 74^\circ$ soit l'optimum avec ces hypothèses. Mais, on peut raffiner le modèle mis au point en étudiant les autres pertes et en les introduisant dans le calcul.

S. SILVER [36] a étudié les pertes dues à l'absence d'un centre d'alimentation. Il trouve alors que celles-ci augmentent avec les erreurs de phase et produisent un décalage du maximum du facteur de gain vers les valeurs inférieures de β_0 : ce qui pourrait neutraliser les variations des pertes par spill-over avec l'angle d'ouverture. En effet, comme le centre de phase d'une source primaire réelle n'est pas ponctuel, les fronts d'onde qui sont émis ne sont pas exactement des sphères. Le plan d'ouverture du réflecteur paraboloidal n'est plus tout à fait equiphase et la phase du champ électromagnétique varie autour d'une valeur constante.

Pour un écart de phase de la forme $\alpha\beta^2$ (ou écart quadratique [35]) et un gain de la source primaire du type $\cos^4 \beta$, S. SILVER [36] montre que le maximum de facteur de gain se déplace de 60° à 50° quand α varie de 0 à $\frac{9}{4} \pi^2$.

Notons que les erreurs de phase peuvent être aussi dues à la défocalisation ou à la forme réelle du réflecteur qui n'est pas exactement paraboloidal à cause des imperfections de surface.

Grâce à leur conception modulaire, les logiciels que nous avons mis au point pourraient être modifiés pour tenir compte de l'influence de tous ces paramètres sur la détermination de la valeur optimale de l'angle β_0 .

Pour cela, le sous-programme donné en annexe 3 par le listing III-8 doit être modifié en remplaçant les sous-programmes de calcul du facteur de gain sans pertes par des sous-programmes où ce facteur serait calculé en tenant compte de toutes les pertes possibles dans l'antenne.

Par exemple, dans le cas de l'absence d'un centre de phase, de la source, le gain $G(\beta)$ intervenant dans le calcul devient alors $G(\beta)e^{-2jk\delta(\beta)}$. Ce qui donne un facteur de gain $|36|$:

$$g = \cotg^2 \beta_0 / 2 \left(\left\{ \int_0^{\beta_0} G^{1/2}(\beta) \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(\beta) \right] \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} d\beta \right\}^2 + \left\{ \int_0^{\beta_0} G^{1/2}(\beta) \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(\beta) \right] \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} d\beta \right\}^2 \right) \quad (\text{IV-1})$$

Cette expression permet de déterminer les facteurs de gain g_2, g_4, g_6 et g_8 (pour $n = 2, 4, 6$ et 8) différents de ceux donnés par les expressions (III-31), (III-32), (III-33) et (III-34). Il suffit ensuite de modifier les sous-routines créées à partir des lignes 200, 300, 400 et 600 du sous-programme donné par le listing III-8, pour tenir compte des nouvelles expressions de g_2, g_4, g_6 et g_8 . Après cette opération, on fait comme dans le cas du paragraphe (III-4.3.), le produit du facteur de gain par le rendement d'illumination pour obtenir le rendement global.

Cet exemple peut être généralisé aux autres paramètres: défocalisation, imperfections de surface et autres.

Cependant, si on veut automatiser tout le calcul, on doit prédéfinir dans le système APPLE II+, des bibliothèques mathématiques. Ce qui permettrait de calculer rapidement les intégrales de l'expression (IV-1), pour des erreurs de phase du type $\alpha\beta$, $\alpha\beta^2$ et $\alpha\beta^3$ par exemple [35]. On pourrait alors considérer des sources dont le gain serait différent de $\cos^n \beta$, mais, ceci nécessiterait une plus grande capacité mémoire.

Pour chiffrer celle-ci, considérons l'exemple du logiciel mis au point pour calculer le facteur de gain sans pertes. Ce programme a nécessité une capacité mémoire d'environ 1 K.O.

Pour tenir compte des erreurs de phase, sa modification nécessite le remplacement de lignes situées entre 200 et 600 par d'autres lignes qui tiennent compte des facteurs obtenus à partir de l'expression (IV-1). La capacité mémoire nécessaire demeure faible car elle est légèrement supérieure à 1 K.O. Mais, si on veut implanter une bibliothèque mathématique pour calculer des intégrales telle que celles de l'expression (IV-1), par des techniques numériques, ceci nécessiterait une capacité mémoire d'environ 10 K.O.

Pour tenir compte des imperfections de surface, la méthode de simulation la plus efficace consiste à procéder à un maillage de la partie concave du paraboloïde. ROBIEUX [38] a mis au point une méthode de calcul par ce type de maillage et où les intégrales de l'expression (IV-1) sont transformées en une somme des contributions de toutes les mailles élémentaires que l'on considère sur la surface réfléchissante. L'expression (IV-1) devient alors :

$$g = \cotg^2 \frac{\beta_0}{2} \left(\left\{ \sum_0^{\beta_0} G^{1/2}(\beta) \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(\beta) \right] \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \Delta\beta \right\}^2 + \left\{ \sum_0^{\beta_0} G^{1/2}(\beta) \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(\beta) \right] \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \Delta\beta \right\}^2 \right) \quad (\text{IV-2})$$

Ceci permet en particulier de considérer un éclaircissement du paraboloïde par des sources primaires autres que $\cos^n \beta$.

Néanmoins les logiciels deviennent beaucoup plus complexes et sans doute la taille mémoire nécessaire sera largement supérieure à 10 K.O.

Un autre point qui mérite d'être discuté est le tracé des diagrammes de rayonnement des antennes paraboloides. Ces diagrammes sont représentés dans la plupart des ouvrages en fonction de la variable intermédiaire $u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$ [32,33,34,35,36], alors que la méthode développée au chapitre III les donne directement en fonction de θ et pour différents rapports $R = D/\lambda$ (voir figures (III-16a) à (III-16f)).

L'utilisation de la variable u a l'inconvénient d'introduire des calculs supplémentaires, surtout quand on veut déterminer des valeurs remarquables d'angle (angle d'ouverture à 3dB, positions des maximums et des zéros). Pour le constater, prenons l'exemple d'une illumination uniforme (correspondant à $n = 0$). La fonction caractéristique de rayonnement vaut 3dB pour $u \approx 1.6$ et on doit résoudre l'équation :

$$\theta_{3dB} = 2 \arcsin \left(\frac{1.6}{\pi} \frac{\lambda}{D} \right) \quad (IV-3)$$

L'angle d'ouverture à 3dB étant de faible valeur, on a donc :

$$\theta_{3dB}^{\circ} = 2 \frac{1.6}{\pi^2} \frac{\lambda}{D} \times 180 = 58.42 \frac{\lambda}{D} \quad (IV-4)$$

Pour un rapport $D/\lambda = 25$, on obtient $\theta_{3dB} \approx 2^{\circ}.34$.

Avec notre logiciel, le travail est beaucoup plus rapide et les résultats sont plus précis. En effet, il suffit tout simplement de tracer le diagramme de rayonnement $A(\theta, n)$ pour $n = 0$, puis de déterminer θ_{3dB} (ou toute autre valeur remarquable) par déplacement du curseur câlibré. Le temps d'exécution du logiciel de tracé de $A(\theta, n)$ dépend évidemment de la résolution désirée. Il est approximativement de 10 secondes pour un pas de calcul de 1/1000. En outre, il y a pendant ce laps de temps calcul et affichage de plusieurs centaines de points par courbe. On considère qu'il faut plus d'une heure pour calculer

à la main une vingtaine de points de la courbe $A(\theta, n)$ et réaliser son tracé sur papier millimétré. Il faudrait pour cela disposer de tables trigonométriques, de tables de fonctions de Bessel et d'instruments de dessin. Le même calcul exécuté par un calculateur ne nécessite que quelques secondes, mais il faut environ une quinzaine de minutes pour reporter sur papier millimétré les résultats numériques obtenus et tracer ainsi la courbe $A(\theta, n)$. (Notons que jusqu'ici cette méthode a été la plus employée pour étudier les antennes). La comparaison de ces différents temps d'exécution fait apparaître clairement la puissance de l'infographie par rapport aux autres méthodes de tracé.

L'APPLE II+ que nous avons utilisé ne possède pas de bibliothèque mathématique. Aussi, les fonctions de Bessel qui interviennent dans le calcul de $A(\theta, n)$ ont été remplacées par leurs formes asymptotiques à l'origine et à l'infini dans le logiciel de tracé des diagrammes de rayonnement. Le raccordement des deux asymptotes se fait ensuite grâce à une technique de lissage exposée au paragraphe III.4.4.1. Tout ceci se traduit par une précision de tracé meilleure que 10^{-4} et une importante réduction de l'occupation mémoire de l'APPLE II+. En effet, la capacité mémoire nécessaire à notre logiciel est d'environ 2 K.O. alors qu'une bibliothèque logicielle des fonctions de Bessel occuperait à elle seule près de 10 K.O.

La conception modulaire des logiciels de tracé de $A(\theta, n)$ permet d'introduire des sous-routines pour tenir compte de la présence des obstacles au rayonnement. Ainsi, lorsque la source primaire forme un obstacle de rayonnement, elle provoque un effet d'ombre de surface (S_0) à l'ouverture (A) du réflecteur paraboloidal. Le champ électromagnétique résultant est alors la somme du champ $(\vec{E}_p)_A$ dû à l'illumination de l'ouverture (A) (calculé sans tenir compte de l'effet d'ombre) et d'un champ $(\vec{E}_p)_{S_0}$ dû à une ouverture de surface (S_0) sur laquelle régnait une même distribution de champ que sur (A), mais opposée en phase.

Au point de vue programmation, le même logiciel sert à calculer les champs $(\vec{E}_p)_A$ et $-(\vec{E}_p)_{S_0}$. Il prévoit ensuite le

calcul du champ résultant $(\vec{E}_p)_A + (\vec{E}_p)_{S_0}$. Il est facile de prévoir que la taille mémoire du logiciel résultant doit être d'environ 2 K.O.

Dans le cas où le gain de la source primaire n'est pas de la forme $\cos^n \beta$, le problème devient évidemment plus complexe car pour le résoudre on doit décomposer la surface du réflecteur en mailles élémentaires convenablement choisies et faire la somme de toutes les contributions au rayonnement pour trouver le champ électromagnétique résultant. Rappelons que cette méthode a été développée initialement par ROBIEUX [38] pour étudier les imperfections de surface du paraboloïde. On estime que si on veut appliquer l'infographie à la méthode de maillage, il faut une taille mémoire supérieure à 10 K.O.

D'autres thèmes auraient pu être abordés ici. Ce sont notamment les problèmes d'adaptation de la source primaire à la ligne d'alimentation. Mais, rappelons que notre objectif initial n'était pas de faire une analyse approfondie des antennes paraboliques. Nous voulions seulement montrer l'intérêt de l'infographie à une telle étude. Aussi la représentation graphique où l'optimisation de systèmes aussi complexe que ces antennes ne nécessitent plus l'utilisation d'un gros centre de calcul. En effet, on vient de voir qu'un petit ordinateur électronique de la taille de l'APPLE II+ est capable de résoudre de tels problèmes.

CONCLUSION

En mettant au point des bibliothèques de logiciels d'application graphique, nous avons répondu à la question initiale: celle de savoir comment rendre l'APPLE II+ capable de faire de la modélisation graphique 2D et 3D de haute gamme.

Cette question cruciale est liée au fait que le graphisme par ordinateur s'est énormément développé au cours de ces dernières années, conduisant à des systèmes très évolués mais coûteux (grande taille mémoire, écran graphique haute résolution, implantation de logiciels graphiques).

L'un des avantages essentiels de l'APPLE II+ que nous avons ainsi enrichi par des logiciels d'application graphique est son prix de revient qui demeure relativement faible. Nos logiciels permettent de procéder au dessin d'un circuit imprimé, à l'étude des antennes paraboliques, à l'animation graphique, à la représentation d'objets en perspective et à l'aménagement urbain. La méthodologie suivie tient compte de l'optimisation de la mémoire disponible et répond au critère d'interactivité homme-machine.

L'organisation des programmes est modulaire. Ce qui rend possible leur extension à l'étude plus complexe des applications que nous avons envisagées. Par exemple, une conception assistée par ordinateur (C.A.O) appliquée au circuit imprimé est possible par l'APPLE II+. Pour cela, il suffirait d'enrichir le menu décrit au paragraphe II.3.4., en introduisant d'autres composants électroniques tels que les circuits LSI ou VLSI. Les éléments supplémentaires du menu seraient les broches de connexions normalisées de microprocesseurs, de mémoires RAM ou ROM, et autres. Il faudrait alors ajouter dans le programme de tracé une subroutine de calcul de la largeur de la piste de conduction en fonction du courant qui la traverse.

Nous avons vu qu'on pouvait optimiser par infographie les paramètres de construction d'antennes paraboliques: c'est à dire, choisir en fonction de la fréquence de travail, l'antenne au

foyer, le diamètre du réflecteur et sa distance focale. L'étude qui a été ainsi faite est une bonne approche du problème car elle considère les paramètres les plus significatifs: soient, le facteur de gain, le rendement d'illumination, la fonction caractéristique de rayonnement, les diagrammes qui en résultent et la directivité. Ici encore, les logiciels ont été conçus de façon à pouvoir les étendre à une étude plus approfondie de ce type d'antenne.

Aussi il serait intéressant de se servir de ce moyen pour aborder l'analyse des problèmes, mal résolus jusqu'à ce jour, de défocalisation, de perturbation du rayonnement par les obstacles, des pertes par transparence du réflecteur ou de l'influence des imperfections de la surface du réflecteur sur le champ électromagnétique rayonné.

=====0=====

(F-) N N E X E S

=====

ANNEXE 1 : RAYONNEMENT D'UNE OUVERTURE:
LES FORMULES DE KOTTLER

De façon générale, l'étude du rayonnement des antennes de surface peut être ramenée à celle de la propagation du champ électromagnétique dans un milieu homogène de volume (V) limité par un ensemble de surfaces $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots, S_N$ figure (A1-1).

Pour traiter cette question, on peut faire appel à la technique des fonctions de Green. Considérons pour cela deux champs de vecteurs \vec{F} et \vec{G} définis, continus sur (V) et dont les dérivées premières et secondes satisfont aux mêmes propriétés (ou conditions de Green) [36].

L'analyse vectorielle permet d'établir la relation suivante :

$$\iiint_{(V)} (\vec{F} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{G} - \vec{G} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{F}) dV = - \iint_{(S_1+S_2+\dots+S_N)} (\vec{G} \operatorname{rot} \vec{F} - \vec{F} \operatorname{rot} \vec{G}) \vec{n} dS \quad (A-1)$$

Cette expression suppose que la normale unitaire \vec{n} aux surfaces soit orientée positivement vers l'intérieur du volume (V).

Admettons maintenant qu'il existe dans (V) un champ électromagnétique tel que \vec{E} et \vec{H} réalisent les conditions de continuité requises pour \vec{F} . Le problème est d'exprimer le champ (\vec{E}, \vec{H}) en un point quelconque du volume (V) en fonction des sources de rayonnement contenues par ce dernier et des valeurs de champ électromagnétique mesurées aux surfaces $(S_1), (S_2) \dots (S_N)$.

D'après l'optique [40], une source ponctuelle de rayonnement émet des ondes sphériques dans un milieu homogène et isotrope. Par conséquent, les champs \vec{E} et \vec{H} dans le volume (V) seront des combinaisons de fonctions d'ondes sphériques et on pourra poser par hypothèse que :

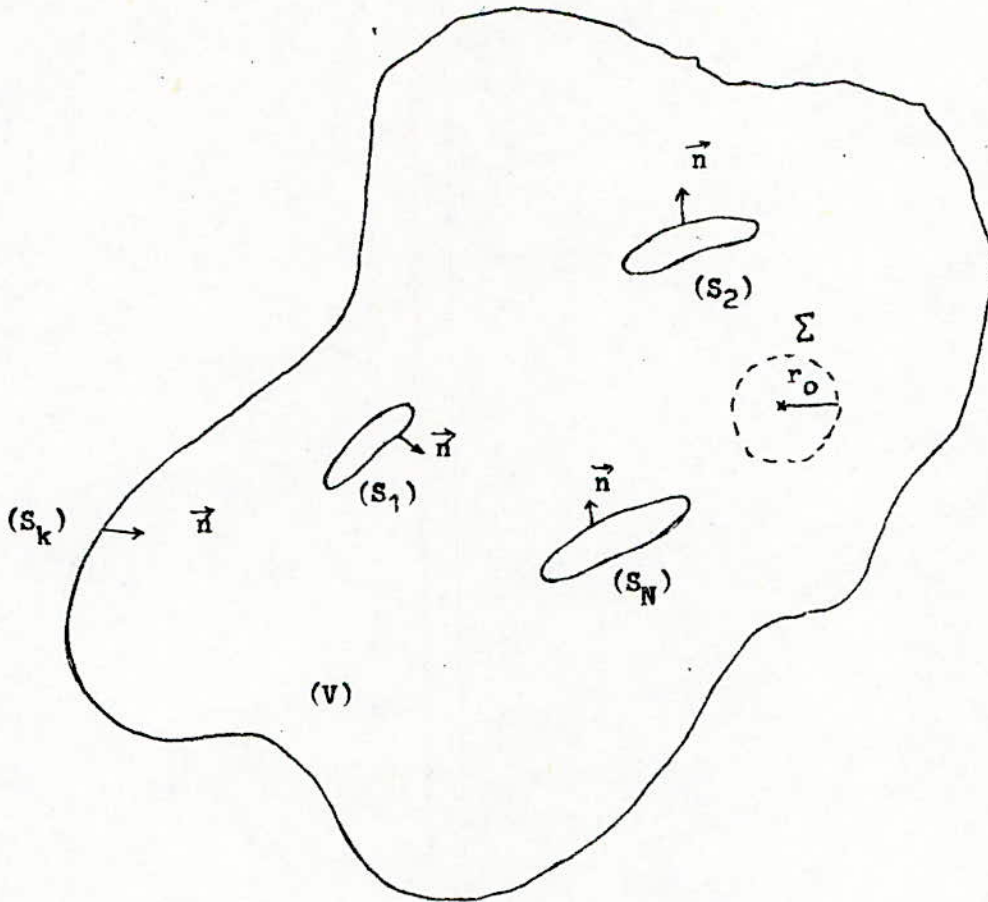


Figure A1-1: Milieu homogène (V) limité par un ensemble de surfaces $(S_1), (S_2), \dots, (S_N)$.

$$\vec{G} = \psi(r)\vec{a} \quad (\text{A-2})$$

$$\text{et } \vec{F} = \vec{E} \text{ ou } \vec{H} \quad (\text{A-3})$$

$$\text{avec } \psi(r) = \frac{e^{-jkr}}{r}$$

\vec{a} est un vecteur arbitraire mais constant et r est la distance qui sépare une source de rayonnement du point P où le champ électromagnétique est mesuré.

Notons que la fonction $\psi(r)$ et par suite \vec{G} satisfont aux conditions de Green sauf en P, car en ce point la fonction $\psi(r)$ présente une singularité ($r = 0$).

Pour calculer \vec{E}_P et \vec{H}_P (ou valeurs du champ au point P), on entoure le point P par une petite sphère (Σ) de rayon r_0 et centrée en P. On obtient ainsi un nouvel espace (V') limité par les surfaces $(S_1), (S_2), \dots, (S_N), (\Sigma)$. Puis on remplace respectivement \vec{F} et \vec{G} par leurs valeurs (A-2) et (A-3) dans l'expression (A-1) et on fait intervenir dans la relation ainsi obtenue, les équations de Maxwell généralisées [36]:

$$\text{rot } \vec{E} = -\vec{I}_m - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A-4})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{I}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A-5})$$

$$\text{div } \vec{B} = \rho_m \quad (\text{A-6})$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho_e \quad (\text{A-7})$$

(rappelons que ρ_e et ρ_m) sont respectivement les densités volumiques de charges électriques et de charges magnétiques, \vec{I}_e et \vec{I}_m sont respectivement les densités de courant électrique et de courant magnétique).

Lorsque $r_0 \rightarrow 0$, le volume (V') devient pratiquement égal à (V) et on peut montrer que [36]:

$$\lim_{r_0 \rightarrow 0} \langle \vec{E} \rangle = \vec{E}_P \quad (\text{A-8})$$

$$\lim_{r_0 \rightarrow 0} \langle \vec{H} \rangle = \vec{H}_P \quad (\text{A-9})$$

D'où les expressions générales des champs \vec{E} et \vec{H} |36| :

$$\begin{aligned} \vec{E}_P = & -\frac{1}{4\pi} \iiint_{(V)} (j\omega\mu\vec{I}_e + \vec{I}_m \times \text{grad}\psi - \frac{\rho_e}{\epsilon} \text{grad}\psi) dV \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{(S_1+\dots+S_N)} \{-j\omega\mu\psi(\vec{n} \times \vec{H}) + (\vec{n} \times \vec{E}) \times \text{grad}\psi + (\vec{n} \cdot \vec{E}) \text{grad}\psi\} dS \end{aligned} \quad (\text{A-10})$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_P = & -\frac{1}{4\pi} \iiint_{(V)} (j\omega\epsilon \vec{I}_m - \vec{I}_e \times \text{grad}\psi - \frac{\rho_m}{\mu} \text{grad}\psi) dV \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{(S_1+\dots+S_N)} \{j\omega\epsilon(\vec{n} \times \vec{E})\psi + (\vec{n} \times \vec{H}) \times \text{grad}\psi + (\vec{n} \cdot \vec{H}) \text{grad}\psi\} dS \end{aligned} \quad (\text{A-11})$$

Considérons maintenant le cas d'une ouverture rayonnante. Celle-ci peut être assimilée à une partie de surface équiphasé (Σ) qui partage l'espace en deux zones (figure A1-2). L'une des régions contient l'ensemble des sources de champ qui engendre la surface d'onde (Σ). Dans l'autre demi-espace se propage le champ électromagnétique issu de la distribution de champ à l'ouverture.

D'après le principe de Huygens-Fresnel |40|, chaque point de la surface d'onde (Σ) peut être considéré comme une source secondaire d'onde sphérique. Les ondes secondaires ainsi émises se combinent entre elles pour donner un nouveau front d'onde et les surfaces d'onde qui en résultent seront des surfaces non fermées limitées par un contour (Γ).

Le problème du rayonnement de l'ouverture est ramené à celui de deux surfaces (Σ) et (S_∞) qui limitent le volume (V). S_∞ est une calotte sphérique s'appuyant sur (Σ), centrée au point P où nous voulons mesurer le champ et de rayon $R \rightarrow \infty$. Sa contribution à l'infini est nulle car à grande distance, \vec{E}_P et \vec{H}_P décroissent plus vite que $\frac{1}{R}$. En effet, l'application des expressions (A-10) et (A-11) au calcul du rayonnement de S_∞ impose les conditions suivantes |36| :

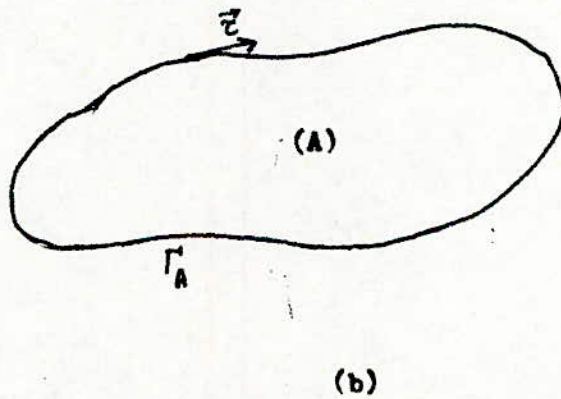
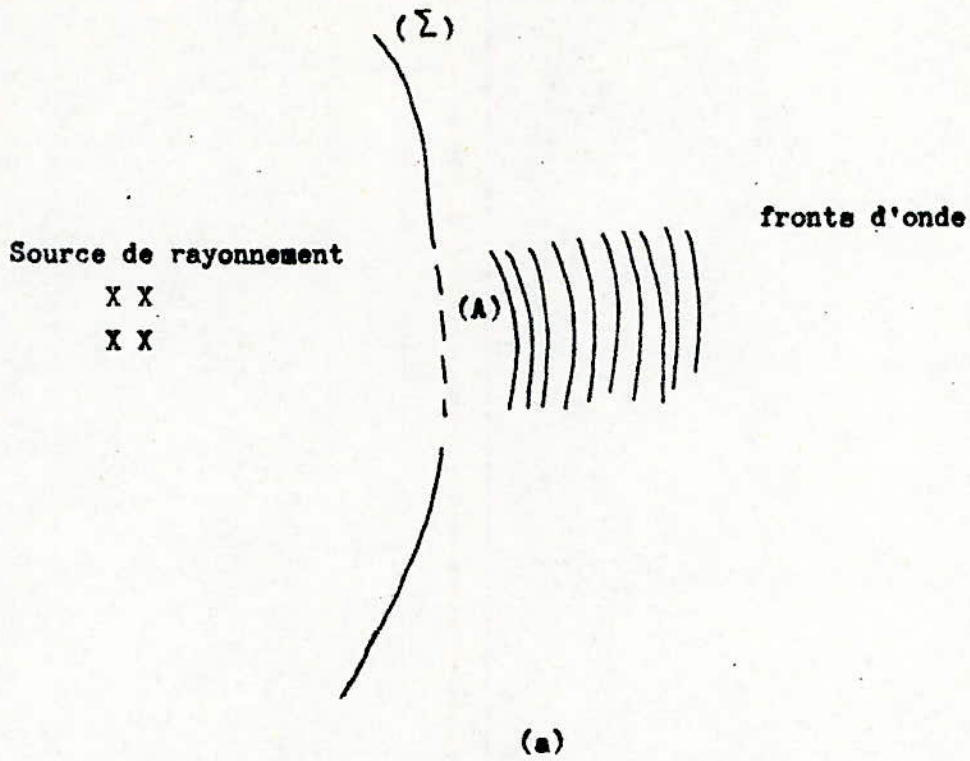


Figure A1-2: Cas des ouvertures rayonnantes
 (a): Principe de Huygens Fresnel
 (b): Rayonnement d'une ouverture

$$* \lim_{R \rightarrow \infty} \{R \cdot \vec{E}\} \text{ doit \u00eatre finie} \quad (\text{A-12})$$

$$* \lim_{R \rightarrow \infty} \{R \cdot \vec{H}\} \text{ doit \u00eatre finie} \quad (\text{A-13})$$

$$* \lim_{R \rightarrow \infty} \{R | (\vec{n} \times \vec{H}) - \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \vec{E} | \} = 0 \quad (\text{A-14})$$

$$* \lim_{R \rightarrow \infty} \{R (\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \vec{n} \times \vec{E} + \vec{H}) \} = 0 \quad (\text{A-15})$$

A partir de ces conditions de rayonnement, on peut d\u00e9duire que \vec{H} est perpendiculaire \u00e0 \vec{n} et \vec{E} , \u00e0 grand distance (c'est \u00e0 dire que \vec{E} et \vec{H} se propagent comme une onde plane).

La source rayonnante (Σ) est caract\u00e9ris\u00e9e par une distribution de champ \vec{E} et \vec{H} diff\u00e9rente de z\u00e9ro sur l'ouverture (A), mais nulle ailleurs. (C'est \u00e0 dire, \u00e9gale \u00e0 z\u00e9ro dans la zone d'ombre). Sur (Σ), on peut donc d\u00e9finir une distribution de courants et de charges \u00e9quivalente aux champs \vec{E} et \vec{H} mesur\u00e9s \u00e0 cette surface. Comme \vec{E} et \vec{H} satisfont aux \u00e9quations de Maxwell, les distributions superficielles de courants et de charges qui en r\u00e9sultent doivent satisfaire \u00e0 l'\u00e9quation de continuit\u00e9.

Sur l'ouverture (A), les distributions superficielles de courants \u00e9lectrique et magn\u00e9tique sont respectivement $\vec{K}_e = \vec{n} \times \vec{H}$ et $\vec{K}_m = -\vec{n} \times \vec{E}$. Dans la zone d'ombre, \vec{K}_e et \vec{K}_m sont nulles.

(A) est limit\u00e9e par un contour (Γ_A) (figure A1-2b) et le passage de l'ouverture \u00e0 la zone d'ombre se fait d'une mani\u00e8re discontinue. Pour qu'il y ait compatibilit\u00e9 avec l'\u00e9quation de continuit\u00e9, il faut introduire une distribution lin\u00e9aire de charges le long de (Γ_A). La distribution de charges \u00e9lectriques est $\sigma_e = -\frac{1}{j\omega} \vec{t} \cdot \vec{H}$ (o\u00f9 \vec{t} est un vecteur unitaire tangent au contour (Γ_A)). La distribution de charges magn\u00e9tiques vaut $\sigma_m = \frac{1}{j\omega} \vec{t} \cdot \vec{E}$ |36|.

Le champ rayonn\u00e9 par (Σ) et par suite par l'ouverture (A) s'obtient en rempla\u00e7ant dans les expressions (A-10) et (A-11) les quantit\u00e9s (V), (A), \vec{I} , \vec{I}_m , ρ_e , ρ_m , $\eta_e = \epsilon(\vec{n} \cdot \vec{E})$ et $\eta_m = \mu(\vec{n} \cdot \vec{H})$ par (A), (Γ_A), \vec{K}_e , \vec{K}_m , η_e , η_m , σ_e et σ_m respectivement |36|.

D'où les formules de Kottler :

$$\vec{E}_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} \{-j\omega\mu (\vec{n} \times \vec{H})\psi + (\vec{n} \times \vec{E}) \times \vec{\Delta}\psi + (\vec{n} \cdot \vec{E}) \vec{\Delta}\psi\} dS$$

$$- \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \oint_{(\Gamma_A)} (\vec{\tau} \cdot \vec{H}) \vec{\Delta}\psi dS \quad (A-16)$$

$$\vec{H}_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} \{j\omega\epsilon (\vec{n} \times \vec{E})\psi + (\vec{n} \times \vec{H}) \times \vec{\Delta}\psi + (n \cdot E) \vec{\Delta}\psi\} dS$$

$$+ \frac{1}{4\pi j\omega\mu} \oint_{(\Gamma_A)} (\vec{\tau} \cdot \vec{E}) \vec{\Delta}\psi dS \quad (A-17)$$

Comme la distribution de S_∞ est nulle, le champ électromagnétique total mesuré au point P du volume (V) sera donné par les relations (A-16) et (A-17).

Remarquons que l'expression (A-16) peut s'écrire encore sous la forme suivante [36] :

$$\vec{E}_P = -\frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} \left(\psi \frac{\partial \vec{E}}{\partial n} - \vec{E} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial n} \right) dS + \frac{1}{4\pi} \oint_{(\Gamma_A)} \psi \vec{E} \times \vec{\tau}$$

$$- \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \oint_{(\Gamma_A)} (\vec{\tau} \cdot \vec{H}) \vec{\Delta}\psi dS \quad (A-18)$$

On voit que ceci généralise la loi de diffraction de Kirchoff. En effet, l'intégrale de surface qui intervient dans l'expression (A-18) n'est autre que la formule de Kirchoff, bien connue en optique [40].

=====0=====

(II-) NNEXE 2 : RAYONNEMENT DU PARABOLOÏDE1 - Introduction:

Considérons l'antenne paraboloidale de la figure (B2-1). La source primaire rayonne un champ électromagnétique (\vec{E}_0, \vec{H}_0) quand elle est isolée dans l'espace. Mais, lorsqu'on la place au foyer du réflecteur paraboloidal, les champs \vec{E}_0 et \vec{H}_0 induisent à la surface de celui-ci une densité de charge η et une densité de courant \vec{k} .

Supposons que la conductivité du réflecteur soit infinie, \vec{k} et $\vec{\eta}$ donnent naissance à une onde de dispersion définie par les champs \vec{E}_1 et \vec{H}_1 . Ceux-ci induisent à leur tour sur la source primaire une distribution de charges et de courants qui vont produire aussi un rayonnement électromagnétique (\vec{E}_2, \vec{H}_2). Puis, le processus recommence.

D'après le principe de superposition, le champ électromagnétique résultant sera caractérisé par :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (\text{B-1})$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \dots \quad (\text{B-2})$$

L'équation du paraboloidale est (voir figure B2-2) :

$$\rho = \frac{2 f}{1 + \cos \beta} \quad (\text{B-3})$$

où f est la distance focale.

Les conditions normales de fonctionnement d'une antenne paraboloidale font que la distance focale f est très grande devant la longueur d'onde λ . Par conséquent, on a $\rho \gg \lambda$. Ceci revient à dire que le réflecteur se trouve dans la zone de rayonnement à grande distance de la source primaire. Dans cette région, le champ décroît en $1/\rho$. A chaque réflexion, le champ sera multiplié par un facteur proportionnel à $1/\rho$ et on pourra négliger les termes d'ordre supérieur à l'unité [36]. D'où :

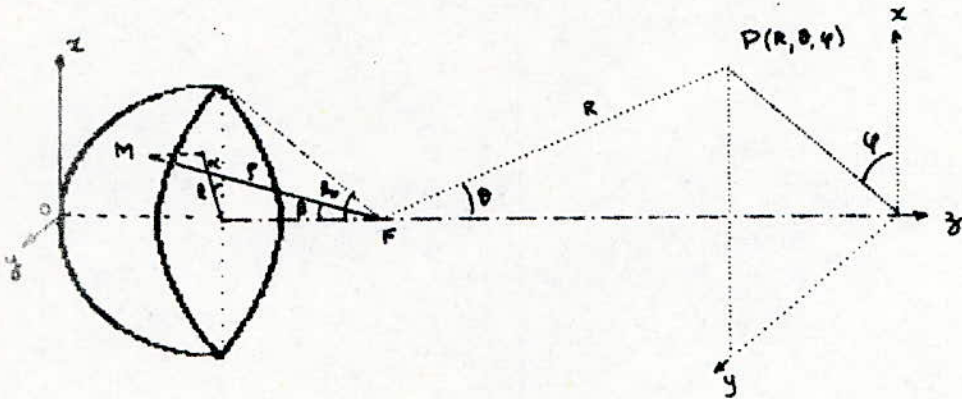


Figure B2-1: Antenne parabolofide

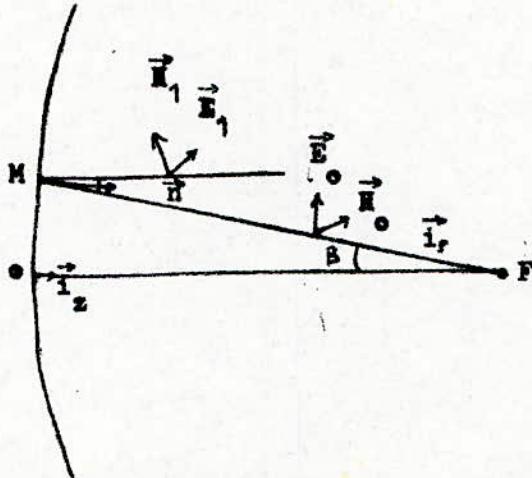


Figure B2-2: Courants et charges induits à la surface du réflecteur.

$$\vec{E} \approx \vec{E}_0 + \vec{E}_1 \quad (\text{B-4})$$

$$\vec{H} \approx \vec{H}_0 + \vec{H}_1 \quad (\text{B-5})$$

Deux méthodes permettent de calculer le champ électromagnétique. L'une utilise la distribution des courants et des charges sur le réflecteur. L'autre considère la distribution du champ à l'ouverture du réflecteur.

2 - METHODE DES CHARGES ET DES COURANTS INDUITS A LA SURFACE DU REFLECTEUR:

La distribution de densité de courant électrique \vec{K}_e , induite à la surface du réflecteur se calcule en supposant que le champ incident (\vec{E}_0, \vec{H}_0) est réfléchi comme une onde plane (\vec{E}_1, \vec{H}_1) par un plan indéfini tangent au point d'incidence M (figure B2-2).

Rappelons que \vec{K}_e vaut par définition :

$$\vec{K}_e = \vec{n} \times \vec{H} \quad (\text{B-6})$$

Quand une onde plane (\vec{E}_0, \vec{H}_0) est réfléchi par un plan indéfini, les conditions aux limites se traduisent par la distribution de courant suivante:

$$\vec{K}_e = 2(\vec{n} \times \vec{H}_0) = 2\left(\frac{\epsilon}{\mu}\right)^{1/2} \{\vec{n} \times (\vec{i}_\rho \times \vec{E}_0)\} \quad (\text{B-7})$$

\vec{n} est la normale à la surface du réflecteur et \vec{i}_ρ est le vecteur unitaire porté par ρ (il définit la direction de propagation du rayonnement issu de la source primaire).

Soit (\vec{E}_1, \vec{H}_1) le champ électromagnétique réfléchi, cette distribution de courant s'écrit également [36]:

$$\vec{K}_e = 2(\vec{n} \times \vec{H}_1) = 2\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \{\vec{n} \times (\vec{i}_z \times \vec{E}_1)\} \quad (\text{B-8})$$

\vec{i}_z est le vecteur unitaire de l'axe oz . Il donne la direction du vecteur de Poynting après réflexion.

Soit P_T , la puissance totale émise par l'antenne primaire et $P(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} |\vec{E}(\alpha, \beta)|^2 R^2$, la puissance rayonnée par l'unité d'angle solide. Son gain $G(\alpha, \beta)$ est par définition:

$$G(\alpha, \beta) = \frac{4\pi P(\alpha, \beta)}{P_T} = \frac{2\pi R^2}{P_T} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} |\vec{E}(\alpha, \beta)|^2 \quad (\text{B-9})$$

Appelons \vec{e}_0 et \vec{e}_1 les vecteurs unitaires qui définissent respectivement la polarisation de \vec{E}_0 et de \vec{E}_1 . Au point M du réflecteur (c'est à dire $R = \rho$), le champ électrique incident sera de la forme $E_0 e^{-jk\rho} \vec{e}_0$, et on peut écrire :

$$\vec{E}_0 = \left[2 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{P_T}{4\pi} \right]^{1/2} \left| \frac{G(\alpha, \beta)}{\rho} \right|^{1/2} e^{-jk\rho} \vec{e}_0 \quad (\text{B-10})$$

De même pour le champ électrique réfléchi on aura :

$$\vec{E}_1 = \left\{ 2 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{P_T}{4\pi} \right\}^{1/2} \left| \frac{G(\alpha, \beta)}{\rho} \right|^{1/2} e^{-jk\rho} \vec{e}_1 \quad (\text{B-11})$$

Les formules de Kottler (A-16) et (A-17) peuvent être facilement adaptées au problème de rayonnement d'une surface (S) de conductivité infinie. Comme la surface considérée doit nécessairement s'appuyer sur l'ouverture rayonnante (A) (c'est à dire qu'elle soit limitée par le même contour Γ_A), il suffit de faire un changement de variable dans les intégrales de surface (A-16) et (A-17) de façon à pouvoir faire la sommation sur (S). Dans le cas du réflecteur paraboloidal, il existe à la surface concave (S) une distribution de courant \vec{K}_e donnée par les expressions (B-7) et (B-8). Mais, sur la surface convexe, on a $\vec{K}_e = 0$ car on est dans la zone d'ombre. Comme \vec{E} et \vec{H} satisfont aux équations de Maxwell, \vec{K}_e doit satisfaire à l'équation de continuité. Ce qui signifie l'existence d'une distribution linéaire de charges le long de Γ_A . Celle-ci est $\sigma_e = -\frac{1}{j\omega} \vec{r} \cdot \vec{H}$. Etant donné qu'il n'y a pas de courants et de charges magnétiques induits sur le réflecteur, on peut écrire par hypothèse que $\vec{K}_m = 0$, $\sigma_m = 0$ et $\eta_m = 0$. D'où :

$$\vec{E}_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{(S)} \left\{ -j\omega \vec{K}_e \psi + \frac{\eta_e}{\epsilon} \vec{\Delta} \psi \right\} dS + \frac{1}{4\pi} \oint_{(\Gamma_A)} \frac{\sigma_e}{\epsilon} \vec{\Delta} \psi dS \quad (B-12)$$

$$\vec{H}_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{(S)} \{ \vec{K}_e \times \vec{\Delta} \psi \} dS \quad (B-13)$$

avec $\psi(r) = \frac{e^{-jkr}}{r}$, $\vec{K}_e = \vec{n} \times \vec{H}$, $\eta_e = \epsilon(\vec{n} \cdot \vec{E})$ et $\sigma_e = \frac{1}{j\omega} \vec{t} \cdot \vec{H}$.

A grande distance ($r \gg \rho$), on peut faire un certain nombre d'approximations. C'est à dire :

- pour l'amplitude, on a $r \approx R$
- pour la phase on a $r = R - \rho \{ \sin \phi \cdot \sin \theta \cos(\alpha - \phi) - \cos \theta \cos \beta \}$
- $\vec{i}_r \approx \vec{i}_R$ (c'est à dire: $\vec{n} \cdot \vec{i}_r \approx \vec{n} \cdot \vec{i}_R \approx \cos \theta$).

En outre, l'application des notions de surface d'onde et de rayons associés au champ de celle-ci permet de dire que le rayonnement est concentré autour de $\vec{o}z$ dans le cas d'un paraboloïde.

Quand on explicite \vec{K}_e , η_e et σ_e en fonction des expressions (B-10) et (B-11) puis on effectue l'approximation du rayonnement à grande distance on obtient après calcul les composantes du champ électrique suivantes [26]:

$$E_R = 0 \quad (B-14)$$

$$E_\theta = -j \frac{\omega \mu}{2\pi R} e^{-jkR} \left\{ \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{P_T}{2\pi} \right\}^{1/2} \vec{i}_\theta \cdot \vec{F} \quad (B-15)$$

$$E_\phi = -j \frac{\omega \mu}{2\pi R} e^{-jkR} \left\{ \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{P_T}{2\pi} \right\}^{1/2} \vec{i}_\phi \cdot \vec{F} \quad (B-16)$$

$$\text{avec } \vec{F} = \vec{F}_t + \vec{F}_z$$

$$\vec{F}_t = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\beta_0} \rho G^{1/2} \vec{e}_1 e^{-jk\rho \{ 1 + \cos \beta \cos \theta - \sin \beta \sin \theta \cos(\alpha - \phi) \}} \sin \beta d\beta d\alpha \quad (B-18)$$

$$\text{et } \vec{F}_z = \vec{i}_k \int_0^{2\pi} \int_0^{\beta_0} \rho G^{1/2} (\vec{n} \cdot \vec{e}_1) e^{-jk\rho \{ 1 + \cos \beta \cos \theta - \sin \beta \sin \theta \cos(\alpha - \phi) \}} \text{tg } \beta d\beta d\alpha \quad (B-19)$$

β_0 indique l'angle d'ouverture maximale vu du point focale F. Le vecteur unitaire \vec{i}_ϕ est toujours dans un plan normal à \vec{i}_k et la contribution de \vec{F}_z à E_ϕ est nulle.

D'autre part, la composante longitudinale $\vec{\Gamma}_z$ n'a d'effet que pour des angles grands. Mais, comme le rayonnement obtenu est par hypothèse à faisceau étroit, l'action de $\vec{\Gamma}_z$ n'aura lieu que pour des petits angles. Elle sera donc négligeable devant celle de la composante transversale $\vec{\Gamma}_t$ (surtout si λ est faible). Il en résulte que E_θ , et E_ϕ sont proportionnels à $\vec{\Gamma}_t$.

Le rayonnement étant concentré autour de \vec{oz} , le champ n'a de valeur notable que pour $\theta \approx 0$ et on peut faire dans (B-18) l'approximation $\rho(1 + \cos \beta \cos \theta) \approx 2f$, d'où :

$$\vec{\Gamma}_t = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\beta_0} G^{1/2} \vec{e}_1 e^{-jk\{2f - \rho \sin \beta \sin \theta \cos(\alpha - \phi)\}} \rho \sin \beta d\beta d\alpha \quad (\text{B-20})$$

Si on ramène l'intégration à l'ouverture du réflecteur, il viendra :

$$\vec{\Gamma}_t = - e^{-j2kf} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{G^{1/2}}{\rho} \vec{e}_1 e^{jkl \sin \theta \cos(\alpha - \phi)} l dl d\alpha \quad (\text{B-21})$$

où a est le rayon de l'ouverture et $l = \rho \sin \beta$.

Supposons que la polarisation \vec{e}_0 soit réctiligne et se trouve dans le plan xoy . C'est à dire que celui-ci forme le plan de polarisation de la source primaire (ou plan \vec{E}). Dans les plans \vec{E} et \vec{H} , le champ réfléchi sera polarisé linéairement. En effet, pour $\phi = 0$, on a (plan \vec{E}) :

$$E_\theta = \frac{j\omega\mu}{2\pi R} e^{-jkR} \left\{ \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{P_T}{2\pi} \right\}^{1/2} \cos \theta \Gamma_{tx} \quad (\text{B-22})$$

avec

$$\Gamma_{tx} = e^{-j2kf} \int_0^a \int_0^{2\pi} e_{1x} \frac{G^{1/2}}{\rho} e^{jkl \sin \theta \cos \alpha} l dl d\alpha \quad (\text{B-23})$$

(Rappelons que \vec{e}_1 est parallèle à l'élément de courant \vec{K}_e induit à la surface du réflecteur et correspondant au champ \vec{E}_1 considéré).

De même, pour $\theta = \frac{\pi}{2}$ (plan \vec{H}), on obtient :

$$E_{\phi} = \frac{j\omega\mu}{2\pi R} e^{-jkR} \left\{ \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{P_T}{2\pi} \right\}^{1/2} \Gamma'_{tx} \quad (B-24)$$

avec

$$\Gamma'_{tx} = e^{-j2kf} \int_0^a \int_0^{2\pi} e_{1x} \frac{G^{1/2}}{\rho} e^{jkl \sin\theta \sin\alpha} l dl d\alpha \quad (B-25)$$

Dans une direction arbitraire, le champ réfléchi aura une polarisation elliptique.

3 - METHODE DE LA DISTRIBUTION DE CHAMP A L'OUVERTURE:

En un point $M(\rho, \alpha, \beta)$ du réflecteur paraboloidal, le champ électrique réfléchi est donné par l'expression (B-11). Par hypothèse, l'énergie électromagnétique est transmise entièrement du réflecteur au plan d'ouverture le long des rayons réfléchis. Comme ceux-ci sont parallèles, l'intensité du champ est conservée, sauf qu'il faut tenir compte du chemin optique $(z_0 - z)$ pour aller du réflecteur au plan d'ouverture. (z_0 est la distance qui sépare le plan d'ouverture de l'origine).

Par suite, le champ électrique mesuré en un point $A(1, \alpha)$ de l'ouverture sera :

$$\vec{E}(1, \alpha) = \vec{E}_1(\rho, \alpha, \beta) e^{-jk(z-z_0)} \quad (B-26)$$

ou encore :

$$\vec{E}(1, \alpha) = \left\{ 2 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{P_T}{4\pi} \right\}^{1/2} \frac{G^{1/2}}{\rho} e^{-jk(\rho + z_0 - z)} \vec{e}_1 \quad (B-27)$$

Cette expression fait intervenir le chemin optique total $(\rho + z_0 - z)$ pour aller du foyer au plan d'ouverture. Il vient en explicitant z :

$$\rho + z_0 - z = \rho + z_0 + \rho \cos \beta - f = f + z_0 = \text{constante.} \quad (B-28)$$

Cette propriété du chemin optique signifie que l'ouverture est une surface équiphasé.

Pour calculer le champ rayonné par le paraboloïde à partir de la distribution de champ à l'ouverture, on fait appel aux formules de Kottler (A-16) et (A-17). Ainsi, le champ

électrique en un point P s'écrit en fonction de $\vec{E}(1, \alpha)$:

$$\begin{aligned} \vec{E}_P = & - \frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} (\psi \frac{\partial \vec{E}}{\partial n} - \vec{E} \frac{\partial \psi}{\partial n}) dS + \frac{1}{4\pi} \oint_{(\Gamma_A)} (\psi \vec{E} \times \vec{\tau}) dS \\ & - \frac{1}{j4\pi \omega \epsilon} \oint_{(\Gamma_A)} (\vec{\tau} \cdot \vec{H}) \vec{\Delta} \psi dS \end{aligned} \quad (B-29)$$

Si on suppose que le champ émis par la source primaire est polarisé linéairement dans la direction ox, il en sera de même pour le champ électrique mesuré à l'ouverture :

$$E_y(1, \alpha) = E_z(1, \alpha) = 0$$

D'autre part, le vecteur $(\vec{E} \times \vec{\tau})$ est normal à l'ouverture (A) et donne naissance à une composante dont l'effet est proportionnel à $\sin \theta$. Comme le rayonnement est à faisceau étroit, la contribution de la première intégrale curviligne de l'expression (B-29) sera donc négligeable.

Lorsque les dimensions de l'ouverture sont grandes devant la longueur d'onde λ , on peut montrer [26] que les intégrales curvilignes sont négligeables devant l'intégrale de surface dans le calcul du champ électrique à grande distance. On a alors:

$$E_{Px} \approx - \frac{1}{4\pi} \iint_{(A)} (\psi \frac{\partial E_x}{\partial n} - E_x \frac{\partial \psi}{\partial n}) dS \quad (B-30)$$

$$\text{avec } E_x = |\vec{E}(1, \alpha)| e_{1x}$$

A grande distance, on peut également faire les approximations suivantes :

- $r \approx R$ pour l'amplitude.
- $r \approx R - l \sin \theta \cos(\alpha - \phi)$ pour la phase.
- $\vec{n} \cdot \vec{l}_r \approx \vec{n} \cdot \vec{l}_R = \cos \theta$ à l'ouverture.
- λ est suffisamment petite pour que :

$$\frac{1}{|\vec{E}(1, \alpha)|} \cdot \frac{\partial |\vec{E}(1, \alpha)|}{\partial n} \ll \frac{2\pi}{\lambda} = k$$

D'autre part, le rayonnement est concentré autour de $\vec{o}z$ et les plus fortes valeurs de \vec{E}_p sont obtenues pour des faibles valeurs de θ . C'est à dire quand $\cos \theta \approx 1$.

Après calcul [26], on trouve:

$$E_{Px} \approx \frac{j\omega\mu}{2\pi R} e^{-jkR} \left\{ \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{P_T}{2\pi} \right\}^{1/2} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{G^{1/2}}{\rho} e_{1x} e^{jk(f+z_0)} e^{jkl \sin \theta \cos(\alpha-\phi)} l dl d\alpha \quad (B-31)$$

Remarquons qu'on trouve pratiquement l'expression de E_θ (ou E_ϕ) donnée par (B-15) (ou (B-16)) dans laquelle on a négligé \vec{I}_z et où:

$$\vec{I}_t = - e^{jk(f+z_0)} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{G^{1/2}}{\rho} \vec{e}_1 e^{jkl \sin \theta \cos(\alpha-\phi)} l dl d\alpha \quad (B-32)$$

Ceci suppose que l'approximation $2f \approx \rho(1 + \cos \alpha \cos \theta)$ équivaut à $2f \approx f + z_0$.

4 - CAS OU L'OUVERTURE EST CIRCULAIRE:

Le champ rayonné (B-31) peut encore s'écrire :

$$E_\theta = j \frac{e^{-jkR}}{\lambda R} E_A \int_0^a \int_0^{2\pi} F(1, \alpha) e^{jkl \sin \theta \cos(\alpha-\phi)} l dl d\alpha \quad (B-33)$$

$$\text{avec } F(1, \alpha) = \frac{G^{1/2}}{\rho} e_{1x} e^{jk(f+z_0)} \text{ et } E_A = \left\{ \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{P_T}{2\pi} \right\}^{1/2}$$

$$\text{En posant } u = \frac{kD}{2} \sin \theta \text{ et } m = \frac{2l}{D} = \frac{l}{a} \quad (\text{avec } D = 2a),$$

On aura :

$$mu = kl \sin \theta$$

et l'expression (B-33) devient :

$$E_\theta = j \frac{e^{-jkR}}{\lambda R} E_A a^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 F(m, \alpha) e^{jmu \cos(\alpha-\phi)} m dm d\alpha \quad (B-34)$$

Comme la distribution du champ à l'ouverture est par raison de symétrie indépendante de ϕ , on peut faire $\phi = 0$ dans (B-34), d'où:

$$E_\theta = j \frac{e^{-jkR}}{\lambda R} E_A a^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 F(m, \alpha) e^{jmu \cos \alpha} m dm d\alpha \quad (B-35)$$

$F(m, \alpha)$ admet également $\vec{o}z$ pour axe de symétrie. Cette fonction

est donc indépendante de α . Ce qui nous permet de séparer les variables d'intégration:

$$E_{\theta} = j \frac{e^{-jkR}}{\lambda R} E_A a^2 \int_0^1 \left\{ \int_0^{2\pi} e^{jmu \cos \alpha} d\alpha \right\} F(m) m dm \quad (B-36)$$

Le calcul de l'expression (B-36) se fait en utilisant les propriétés suivantes des fonctions de Bessel [42]:

$$\int_0^{2\pi} e^{jz \cos \alpha} \cos n\alpha d\alpha = j^n 2\pi J_n(z) \quad (B-37)$$

avec $z = um$.

Et dans le cas où $n = 0$, on obtient :

$$\int_0^{2\pi} e^{jz \cos \alpha} d\alpha = 2\pi J_0(z) \quad (B-38)$$

L'expression (B-36) s'écrit alors :

$$E_{\theta} = j \frac{2\pi E_A a^2}{\lambda R} e^{-jkR} \int_0^1 F(m) J_0(um) m dm \quad (B-39)$$

Le champ électrique rayonné par une ouverture circulaire peut encore s'écrire :

$$E_{\theta} = j \frac{2\pi E_A a^2}{\lambda R} e^{-jkR} \int_0^1 F(m) J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda} m \sin \theta\right) m dm \quad (B-40)$$

Remarque/:

Rappelons que cette expression a été calculée en tenant compte du fait que le champ n'a de valeur significative que pour de faibles valeurs de θ . Mais, si on ne fait pas cette approximation, le champ E_{θ} aura pour expression:

$$E_{\theta} = j \frac{(1 + \cos \theta) \pi a^2 E_A}{\lambda R} e^{-jkR} \int_0^1 F(m) J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda} m \sin \theta\right) m dm \quad (B-41)$$

Dans le cas où:

$$F(m) = N_1 + N_2 (1 - m^2)^P \quad (B-42)$$

$\mu = 1/a$ et N_1 , N_2 et p sont des paramètres que l'on choisit afin de représenter au mieux la loi d'éclairement qu'on veut modéliser. Ainsi, on peut prendre [35]:

$$\begin{aligned}
 N_1 + N_2 &= 1 \\
 \text{et } p &= 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned}$$

Le coefficient N_1 donne alors le niveau d'illumination sur les bords. Il vient après calcul:

$$|E_\theta| = \frac{\pi a^2 E_A |1 + \cos \theta|}{\lambda R} \left| N_1 \frac{J_1(u)}{u} + N_2 2^p p! \frac{J_{p+1}(u)}{u^{p+1}} \right| \quad (\text{B-43})$$

Si la distribution de champ est uniforme à l'ouverture ($p = 0$), on a : $F(m) = N_1 + N_2$ et le champ rayonné devient :

$$|E_\theta| = \frac{\pi a^2 E_A |1 + \cos \theta|}{\lambda R} \left| \frac{J_1(u)}{u} \right| \quad (\text{B-44})$$

Et pour de faibles angles θ , on aura:

$$|E_\theta| \approx \frac{2\pi E_A}{\lambda R} \left| \frac{J_1(u)}{u} \right| \quad (\text{B-45})$$

=====0=====

BIBLIOGRAPHIE

=====

- {1} M. FERRETTI: "CAO: un bilan des réalisations et recherches en construction automobile", le nouvel automatisme, p. 55, (Déc. 1979).
- {2} N. GIAMBIASI, J.C. RAULT et J.C. SABONNADIÈRE: "Introduction à la conception assistée par ordinateur", Ed. Hermes Publishing, Paris (France), (1983).
- {3} A. SEREINE: "Bases de données pour un système de CFAO", le nouvel automatisme, p. 43, (Sept. 1981).
- {4} W.M. NEWMAN et R.F. SPROULL: "Principles of interactive computer graphics", Ed. Mc. Graw Hill, New-York (USA), (1979).
- {5} D. LEWIN: "Computer aided design of digital system", Ed. Edward Harnold, New-York (USA), (1977).
- {6} D. LINDSEY: "The design and drafting of printed circuits", Ed. Mc. Graw Hill, New-York (USA), (1983).
- {7} P. QUINTRAND: "CAO en architecture", Ed. Hermes, Paris (France), (1983).
- {8} E. EASTMAN: "Spatial Synthesis in Computer aided building", Ed. J. Willey, New-York (USA), (1975).
- {9} M. FERRETTI: "Mécanique: Mythe ou réalité de la CAO", le nouvel automatisme, p. 52, (Juin 1981).
- {10} M. FERRETTI: "De nouveaux outils en CAO pour les applications mécaniques", le nouvel automatisme, p. 31, (Avril 1979).
- {11} D.E. HEWITT: "Engineering Drawing and design for mechanical technics", Ed. Mac Millan Press, New-York (USA), (1975).
- {12} J. BERTIN: "La graphique et le traitement graphique de l'information", Ed. Flammarion, Paris (France), (1977).
- {13} R. COPE, F. SAWKO et G. TICKELL: "Computer methods for civil engineers", Ed. Mc Graw Hill, New-York (USA), (1982).
- {14} D. et N. THALMAN: "Informatique graphique", semaine de la micro-informatique à l'INITA (Bordj-El-Bahri), (Juin 1983).
- {15} D.R.F. TAYLOR: "The computer in contemporary cartography", Ed. J. Willey, New-York (USA), (1980).

- {16} A.D. BOARDMAN: "Physics programs, volume optics", Ed. J. Wiley, New-York (USA), (1980).
- {17} J.R. LOURIE: "Textile graphics/computer-aided", Ed. Fairchild Books and Visuals, New-York (USA), (1973).
- {18} M. LUCAS: "La réalisation des logiciels graphiques interactifs", Ed. Eyrolles, Paris (France), (1982).
- {19} T.J. WRIGHT: "A two space solution to the hidden line problem for plotting functions of two variables", IEEE transactions on computer, C-22, 28, (Janv. 1973).
- {20} H. WILLIAMSON: "Hidden line plotting program", communications of the ACM, 15, n° 2, 100, (1972).
- {21} I.E. SUTHERLAND, R.F. SPROULL et R.A. SCHUMACKER: "A characterization of ten hidden surface algorithms", ACM computing surveys, 6, n° 1, (Mars 1974).
- {22} S.D. ROTH: "Ray casting for modeling solids", computer graphics and image processing, 18, 109, (1982).
- {23} J.Y. ASTIER: "La conduite de l'APPLE II", t. I et II, Ed. Eyrolles, Paris (France), (1983).
- {24} B.D. MERLY: "Guide de l'APPLE II", t. I et II, Ed. Edimicro, Paris (France), (1983).
- {25} GROUPE APPLE: "Basic Programing Manual", Ed. APPLE Computer INC., California (USA), (1980).
- {26} GROUPE APPLE: "Applesoft: Basic Programing Reference Manual", Ed. Apple Computer INC, California (USA), (1978).
- {27} GROUPE APPLE: "Apple II reference Manual", Ed. Apple Computer INC., California (USA), (1980).
- {28} GROUPE APPLE: "Apple Pascal: Operating reference Manual", Ed. Apple Computer INC., California (USA), (1980).
- {29} GROUPE APPLE: "Apple Pascal: Operating system Manual", Ed. Apple Computer INC., California (USA), (1980).
- {30} A.R. MILLER: "Programmes en pascal pour scientifiques et ingénieurs", Ed. Sybex, Paris (France), (1982).

- {31} J.P. PETIT: "Panagraphe", Ed. du PSI, Paris (France), (1984).
- {32} P.F. COMBES: "Transmission en espace libre et sur les lignes", Ed. Dunod Université, Paris (France), (1983).
- {33} P.F. COMBES: "Ondes Métriques et centimétriques (guides, circuits passifs, antennes)", Ed. Dunod Université, Paris (France), (1982).
- {34} L. THOUREL: "Les antennes", Ed. Dunod Université, Paris (France), (1971).
- {35} N. BUI-HAI: "Antennes micro-ondes: applications aux faisceaux hertziens", Ed. Masson, Paris (France), (1978).
- {36} S. SILVER: "Microwave antenna theory and design", MIT Radiation laboratory, Ed. BIL, Massachussettes (USA), (1963).
- {37} R. BADOUEL: "Les micro-ondes", 2, Ed. Masson, Paris (France), (1984).
- {38} I. ROBIEUX: "Influence de la précision de fabrication d'une antenne sur ses performances", Annales de radioélectricité, t.x y, 30, (Janv. 1956).
- {39} K.C. GUPTA, R. CARG et R. CHADHA: "Computer aided design of microwave circuits", Ed. Artech House, New-York (USA), (1982).
- {40} BRUHAT: "Cours de physique générale à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique: Optique", Ed. Masson, Paris (France), (1965).
- {41} D. COMMIOT: "Sciences et avenir", 458, 82, (1985).
- {42} F. De COULON: "Théorie et traitement des signaux", 4, Ed. Georgi, Lausanne (Suisse), (1984).