Rapport du Lt. Colonel Salmon

au sujet des échos radar enregistrés lors d'un vol de F-16 belges au cours de la nuit du 30 au 31 mars 1990

DOS DE COUVERTURE

INTRODUCTION EXPLICATIVE

En février 2025, suite à la demande d'une astrophysicienne belge, j'ai entrepris les démarches pour obtenir une copie d'un rapport officiel commandé par le ministère belge de la Défense concernant les fameux échos radar captés lors de la prétendue vague ovni belge. Le professeur Meessen avait personnellement conclu, dans un ouvrage publié par la SOBEPS, que ces échos prouvaient définitivement qu'ils ne pouvaient avoir été engendrés que par un vaisseau spatial extraterrestre.

Après diverses démarches administratives, j'ai pu me procurer ce rapport, qui démontrera aux personnes attentives que c'est sur la base de celui-ci que le professeur Meessen s'est rétracté dans un second ouvrage publié par la SOBEPS.

La lecture de ce rapport, rédigé par un ingénieur de la Défense, montre que, contrairement à ce qui se dit et s'écrit encore ici et là, les fameux échos radar captés lors de la prétendue vague ovni belge n'ont en aucun cas été causés par un engin extraterrestre.

Depuis juin 2025, j'ai déjà partagé ce rapport avec plusieurs chercheurs reconnus. Je pense pouvoir désormais le déposer sur archive.org afin d'en assurer une plus large diffusion. Ceux qui continueront d'affirmer que ces échos radar ont été causés par un vaisseau extraterrestre seront donc à considérer désormais comme très mal informés ou agissant de mauvaise foi.

Marc Hallet - Fev.2026

ENGLISH TRANSLATION :

In February 2025, following a request from a Belgian astrophysicist, I decided to obtain a copy of an official report commissioned by the Belgian Ministry of Defense concerning the famous radar echoes obtained during the so-called Belgian UFO wave. Professor Meessen had personally concluded in a book published by SOBEPS that these echoes definitively proved they could only have been generated by a spacecraft from another world.

After various administrative procedures, I was able to obtain this report, which will show those who are attentive that it was on the basis on which Professor Meessen retracted his statement in a second book published by SOBEPS.

Reading the report prepared by a Defense engineer shows that, contrary to what is still being said and written here and there, the famous radar echoes obtained during the so-called Belgian UFO wave were in no way caused by any extraterrestrial craft.

Since June 2025 I have already shared this report with several reputable researchers. I believe I can now upload it to archive.org so that it can receive wider dissemination. Those who will continue to claim that these radar echoes were caused by an extraterrestrial craft will therefore be considered as very misinformed or acting in bad faith.

A la mémoire de

feu le Lt. Col. SALMON

LA DÉFENSE
Secrétariat Administratif et Technique
Rue Lambermont 8
1000 Bruxelles
BELGIQUE

À l'attention de
Monsieur Marc HALLET
[redacted]

Votre courriel du	Votre référence :	Notre référence :	Bruxelles, 18 JUIN 2025
10/02/2025		SAT7 - OBPA 04/25	

Objet : Votre demande de publicité de l'administration concernant un rapport technique

Monsieur HALLET,

En application de la loi du 11 avril 1994 relative à la publicité de l'administration (ci-après « la LPA »), vous avez demandé au Ministère de la Défense la consultation ou la communication sous forme de copie d'un rapport technique rédigé sous la direction du Colonel SALMON traitant certains échos radars captés par un de nos F-16 durant la nuit du 30 au 31 mars 1990. Votre demande a fait l'objet d'un examen approfondi par les services compétents de la Défense.

À l'issue de l'examen du rapport, il a été constaté que celui-ci contient certaines données techniques permettant de déduire des informations relatives aux capacités opérationnelles des avions de type F-16, notamment au niveau de la performance du système radar. Ce système est toujours utilisé et la pleine transparence sur ses caractéristiques porterait donc atteinte aux intérêts de défense de la BELGIQUE et de ses alliés, qui utilisent également ce système actuellement. Compte tenu de leur portée et de leur caractère essentiel, l'intérêt de la publicité ne l'emporte pas sur la protection de ces intérêts de défense. Pour ces raisons, il a été décidé de rendre illisibles les données en question dans la copie communiquée du rapport et ce en application de l'article 6, § 1er, 4° de la LPA[1]. Conformément au principe de publicité partielle consacré à l'article 6, § 4 de la LPA, le reste du contenu du rapport est toutefois rendu public.

---

[1] *Art. 6. § 1er. L'instance administrative rejette la demande de consultation, d'explication ou de communication sous forme de copie d'un document administratif si elle a constaté que l'intérêt de la publicité ne l'emporte pas sur la protection de l'un des intérêts suivants :*
(...)
4° l'ordre public, la sûreté ou la défense nationales ;
(...).

Vous trouverez, en pièce jointe, une copie expurgée du rapport rédigé sous la direction du Colonel SALMON.

Un recours contre cette décision de refus partiel, conformément à l'article 8, § 2 de la LPA, est possible en adressant une demande de reconsidération au Cabinet du Ministre de la Défense, Chef SAT, rue Lambermont 8, 1000 BRUXELLES et en demandant, au même moment, à la Commission d'accès aux et de réutilisation des documents administratifs (CADA), d'émettre un avis. Le siège de la CADA est situé Parc Atrium, rue des Colonies 11, 1000 BRUXELLES. Vous pouvez également envoyer vos demandes de reconsidération et d'avis par voie électronique aux adresses électroniques suivantes, respectivement :

- MOD-PUBADMIN_OPENBESTUUR@mil.be;
- Ctb-Cada@rrn.fgov.be.

Veuillez agréer, Monsieur, l'assurance de ma considération très distinguée.



Sébastien GOMRÉE
Général de brigade
Chef du Secrétariat Administratif et Technique

Rapport du Lt Col SALMON

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION

I.1. LES FAITS

I.2 OBJECTIFS POURSUIVIS

II. ANALYSE DES OBSERVATIONS

II.1. DONNEES RECOLTEES

II.1.A. La traie au sol des F-16

II.1.B. L'écran du radar

II.1.C. Autres données

II.2. TRAITEMENT DES DONNEES

II.2.A. Vue d'ensemble de la poursuite

II.2.B. Reconstitution des trajectoires

II.2.C. Calcul des paramètres des 13 interceptions

II.2.D. Interprétations

II.3. Conclusion

III. REBONDISSEMENT DANS L'ANALYSE : LE FILTRE DE KALMAN

III.1. ROLE DU FILTRE DE KALMAN

III.2. REMISE EN QUESTION DU MODELE

III.3. DANGERS D'INTERPRETATION DUS A L'INTERVENTION DU FILTRE DE KALMAN

III.3.A. Discontinuités apparentes de la trajectoire de la cible

III.3.B Génération de trajectoires fictives

III.3.C Changement de cible en cours d'interception

III.4. TENTATIVE DE RECONSTITUTION DES INTERCEPTIONS

III.5. CONCLUSION

IV. CONCLUSIONS

I. INTRODUCTION

I. INTRODUCTION

I.1. LES FAITS

30 mars 1990, 23 heures locales. Un maréchal des logis de la gendarmerie observe depuis son domicile de Romilliès, trois lumières inhabituelles. Il contacte aussitôt le CRC GLONS pour confirmation. 23H15, nouvel appel au MDL qui relate une nouvelle observation : trois nouvelles lumières évoluent en direction des trois premières. Le contrôleur responsable de GLONS observe de son côté un contact non-identifié. 23h20 la patrouille envoyée sur place confirme les observations du MDL : 23H50-00H00, le TCC/RP SOMMERZAKE confirme le contact non-identifié de GLONS. 23H56, GLONS donne l'ordre de décollage aux deux F-16 du ARA-Beauchamp. 00H05, les deux chasseurs décollent, et récolteront, entre 00H13 et 00H50, 13 contacts radar, faisant l'objet du présent rapport.

I-2. OBJECTIFS POURSUIVIS

L'objectif est clair : il s'agit d'extraire un maximum d'informations ~~fondées~~ des données enregistrées au cours de la poursuite.

Après avoir défini l'ensemble de ces données (chapitre 1), nous exposerons en détail leur analyse, telle qu'elle s'est présentée dans le temps. ~~L'étude~~ Un modèle de calcul a été établi pour vérifier la ~~vrai~~ crédibilité des résultats affichés sur l'écran de visualisation du radar. Il fait l'objet du chapitre 2.

A l'issue de cette vérification subsistaient encore certains points obscurs. ~~qui n'ont pas~~ C'est en essayant d'élucider ces derniers qu'est entré en scène ce fameux trouble-fête qu'est le "filtre de Kalman" au sein du radar (Chapitre III).

II. ANALYSE DES OBSERVATIONS

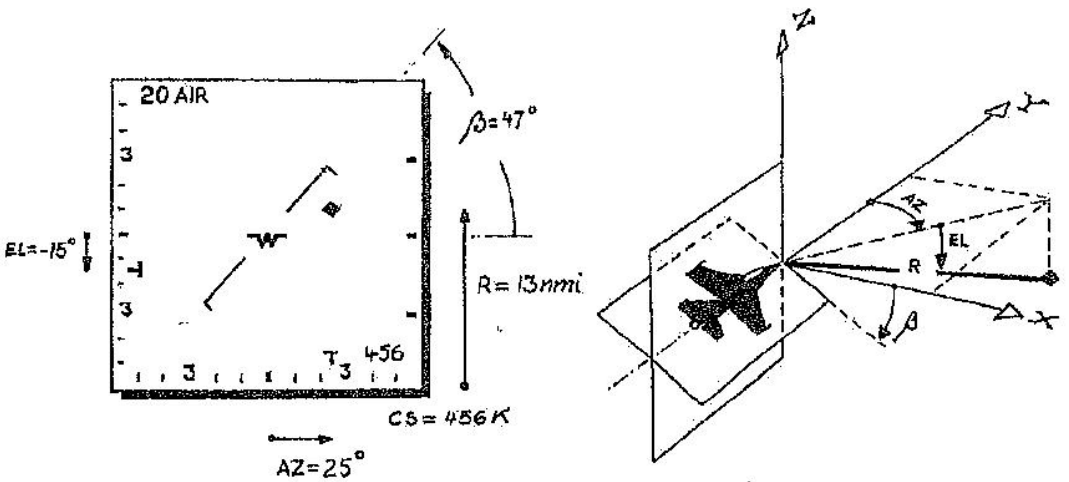


Figure 4.

II. ANALYSE DES OBSERVATIONS

II.1. DONNÉES RÉCOLTÉES

Les données en rapport avec le vol des F-16 et des interceptions au cours de la nuit du 30 au 31 mars 1990 sont les suivantes :

II.1. A. La trace au sol des F-16

En réalité, on dispose d'une seule trace pour les deux F-16 : la raison en est simple : pendant un vol "en formation", un signal d'identification (IFF) est suffisant pour les deux avions. Ce n'est qu'au moment de se séparer qu'ils doivent chacun émettre ce signal. L'IFF est un code émis par l'avion et qui permet aux radars au sol d'identifier les échos.

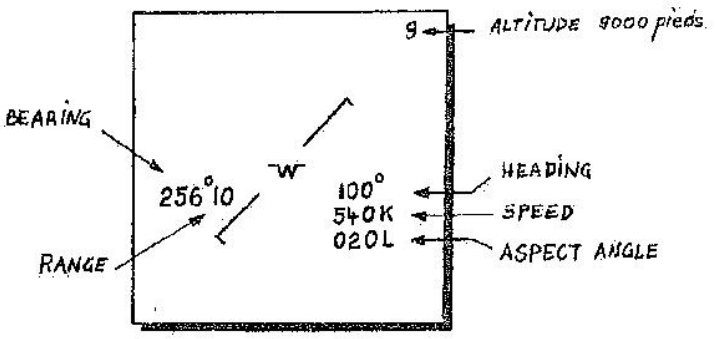
L'évolution des F-16 au cours de la poursuite a été enregistrée par les radars de GLONS et de SEMMERZAKE. Seul l'enregistrement de SEMMERZAKE s'est avéré complet : la trajectoire enregistrée par GLONS a été à certains moments interrompue en raison des virages serrés pris par les F-16.

II.1. B. L'écran du radar

Il est possible, sur chaque F-16, d'enregistrer sur bande magnétique le signal vidéo de l'écran radar. Ce dernier est riche en informations concernant la (ou les) cible(s) qui se présente(nt), et permet au pilote d'entreprendre certaines actions. Cet "radar display" affiche deux types d'informations : des PARAMETRES "BRUTS", c'est-à-dire des mesures réalisées par le radar, et d'autre part, les paramètres de la cible poursuivie, calculés par le radar.

- LES DONNÉES BRUTES

Bien que issues d'un premier traitement (voir Annexe A), ces données sont considérées comme brutes par opposition aux résultats, qui découlent d'un traitement beaucoup plus complexe. La figure 1 reprend les données brutes et leur représentation sur l'écran radar.


9
ALTITUDE 9000 pieds
BEARING
256°10
W
100°
540K
020L
HEADING
SPEED
ASPECT ANGLE
RANGE

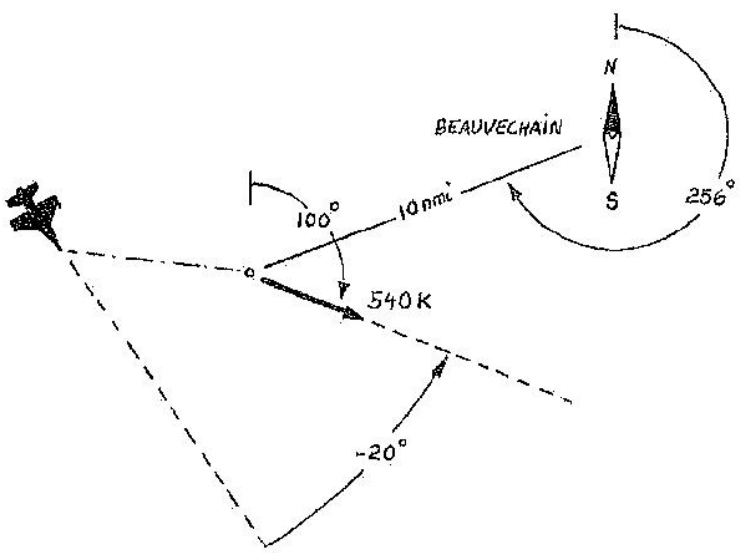

N
BEAUVECHAIN
S
256°
100°
10 nmi
540K
20°

Figure 8

L'AZIMUT (AZ), L'ELEVATION (EL), la DISTANCE (R) et la VITESSE RELATIVE (CS pour closing speed) sont les 4 données brutes se rapportant à la cible. Il faut noter la donnée supplémentaire β, l'ANGLE DE ROULIS (ROLL ANGLE), qui représente l'angle de rotation du F16 autour de son axe (le symbole "W" représente le plan des ailes du F-16, et la ligne d'horizon continue symbolise l'horizon). La figure correspond au F16 montrant le sol de son aile droite. Cette donnée se révélera très précieuse, bien qu'affichée avec peu de précision.

A l'exception de la VITESSE RELATIVE - Cible - F16, qui apparaît sur l'écran sous forme d'un nombre, les autres données y figurent sous la forme d'un symbole positionné en regard d'une règle graduée, dont la résolution est faible (10° pour AZ et EL, 1/4 de fond d'échelle pour R) pour des raisons évidentes : d'une part l'écran radar a pour but d'informer rapidement le pilote au sujet de la cible, et doit donc être le plus lisible possible : une graduation plus fine surchargerait l'écran. D'autre part, le pilote n'a besoin que d'une information approximative. Ce n'est pas lui, mais bien le radar, qui calculera avec précision les paramètres nécessaires au tir par exemple. On verra que cette limitation en résolution gênera le traitement des données brutes.

- LES PARAMÈTRES CALCULÉS (figure 2)

Ils sont au nombre de 6 :

1. L'ALTITUDE, affichée en milliers de pieds, correspond à l'altitude de la cible par rapport au sol.
2. La "Target HEADING", en degrés, représente l'angle entre le Nord magnétique et la tangente à la trajectoire, mesuré dans le plan horizontal.
3. La "Target Calibrated airSPEED", qui vaut la norme du vecteur vitesse de la cible par rapport au sol.
4. L'"ASPECT ANGLE", en degrés, est la direction de vol de la cible par rapport à celle du F16, ou l'angle entre les projections dans le plan horizontal, des tangentes aux trajectoires du F-16 et de la cible ; l'angle étant compté à partir de la trajectoire du F-16, positivement vers la droite.

5. L'angle de "BEARING" par rapport au "BULLSEYE". Le "bullseye" est un point au sol, choisi par le pilote, lui servant de point de repère. L'angle de BEARING est l'angle entre le Nord magnétique et la cible. Dans notre cas, le bullseye était la base de BEAUVECHAIN.

6. La distance au "bullseye" est la distance en nmi, entre la cible et le bullseye.

II A. C. Autres données

D'après les pilotes, leurs F-16 ont volé à une altitude constante d'environ 10.000 pieds, et à une vitesse approximative de 400kt (±50K), sans post-combustion.

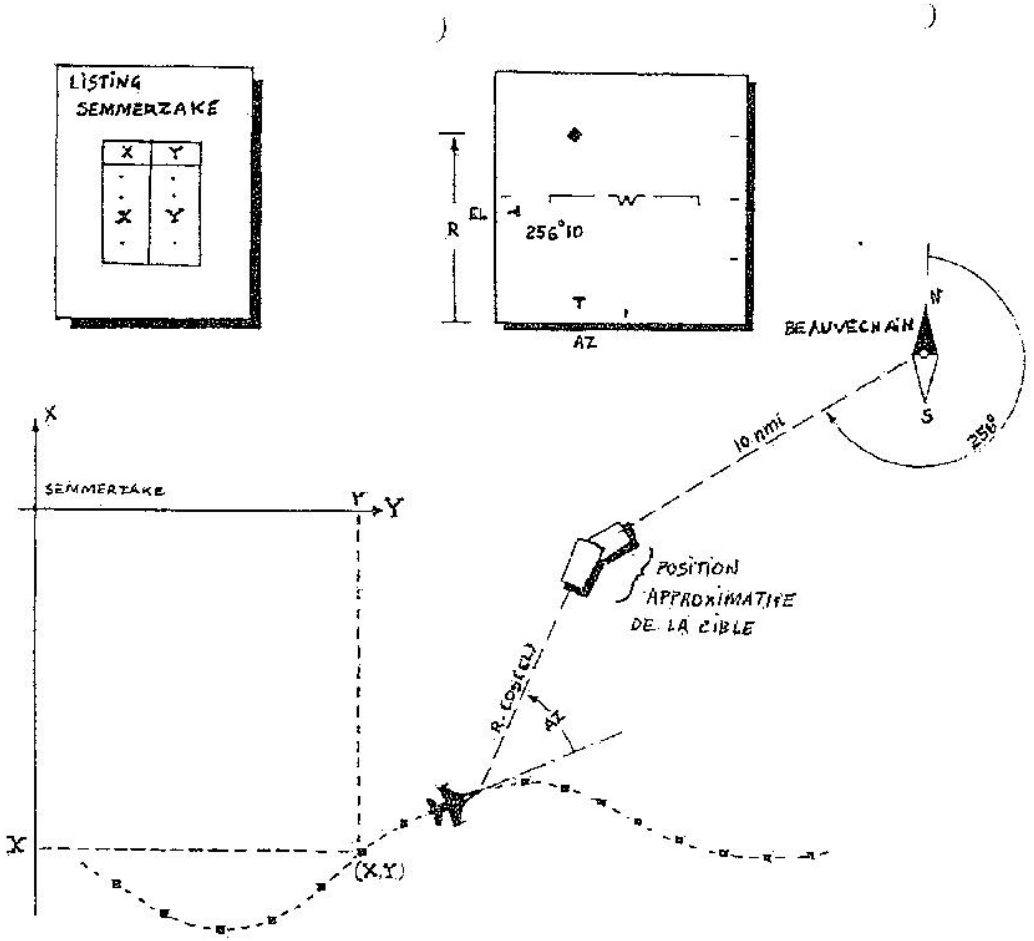

LISTING
SEMMERZAKE
X
Y
R
EL
W
256°10
T
AZ
BEAUVECHAIN
N
S
258°
10 nmi
X
SEMMERZAKE
Y
Y
POSITION
APPROXIMATIVE
DE LA CIBLE
R.Cos(EL)
AZ
X
(X,Y)

Figure 3.

II. 2. TRAITEMENT DES DONNÉES

Une approche rapide, mais naïve du problème serait de considérer d'emblée les données affichées sur le display comme le reflet de la réalité, et de les interpréter sans précaution. Il faut bien réaliser qu'entre les cibles observées et le pilote se trouve le radar, qui comme tout appareil de mesure, ne fournit qu'une image de la réalité

Sans entrer dans les détails, le radar adopte le schéma de calcul suivant.

En 2 un premier temps, il mesure des grandeurs relatives : les angles d'observation (Azimut et Elévation), la distance et la vitesse de rapprochement ou d'éloignement de la cible. Les mesures, bien que considérées comme brutes, rappelons-le, émanent déjà d'un certain ~~filtrage~~ traitement (Annexe A).

Ensuite, afin de calculer des grandeurs propres à la cible (position, vitesse, direction de vol, etc), le radar doit transposer les mesures dans un référentiel fixé au sol. Cette transposition ne peut se faire que si l'on connait à tout instant l'évolution du F16 dans ce référentiel. C'est là le rôle de la "plate-forme inertielle" qui calcule, sur base des vecteurs accélération et vitesse de l'avion, les positions successives de ce dernier dans le référentiel.

Ces deux séries de calcul font l'objet d'algorithmes très élaborés, qui se basent sur des données qui ne sont pas toutes à notre disposition, notamment celles issues de la plate-forme d'inertie. Il nous est donc impossible de reprendre les manipulations successives des données de départ, aboutissant aux paramètres affichés sur le display du radar.

~~L'analyse des données qui suit va en un premier temps, donner une vue d'ensemble de la poursuite, et ensuite permettra la reconstitution de la trajectoire des différentes cibles.~~

L'analyse des données relevées a deux objectifs. En un premier temps, elle donnera une vue d'ensemble de la poursuite. Ensuite, elle tentera de vérifier les paramètres calculés par le radar, en partant des données brutes.

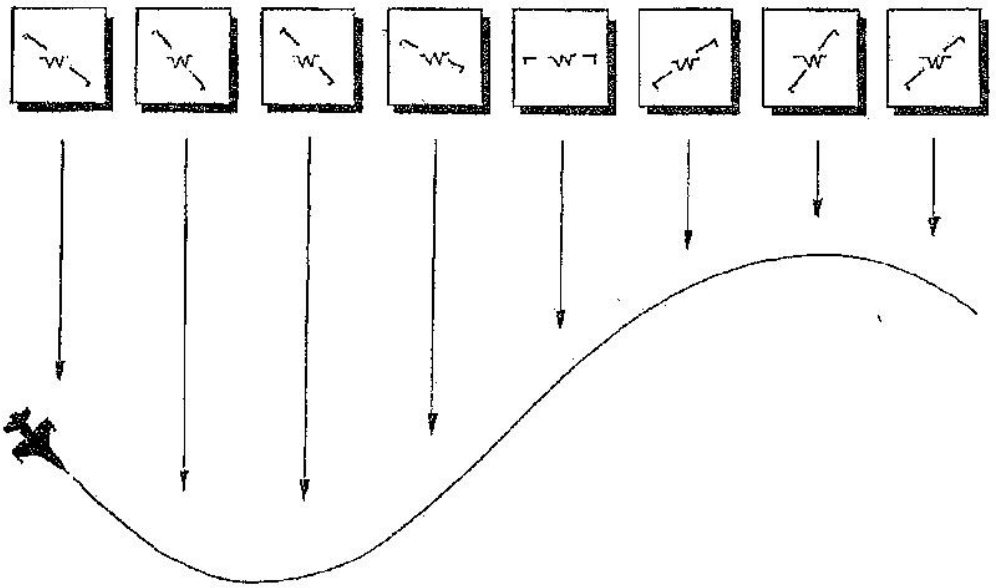


Figure 4

II.2. A. Vue d'ensemble de la poursuite

Avant d'entrer dans les détails de chacune des 13 interceptions, plaçons-nous à une échelle de temps plus importante en considérant l'ensemble des observations.

Nous avons vu que deux grandeurs calculées par le radar donnent la position des cibles relativement à un point fixe du sol. Il s'agit du "BEARING ANGLE", et de la distance par rapport à ce point. La seule considération de ces deux valeurs et du point de référence (BEAUVECHAIN) nous est donc suffisante pour placer sur une carte la position approximative des cibles interceptées.

Une deuxième façon de localiser ces dernières consiste à rattacher leur position relative par rapport au radar du F-16, à la trajectoire au sol de celui-ci, pour autant qu'il soit possible de déterminer à quels morceaux de la trajectoire ~~au sol de celui-ci, pour~~ du F-16 correspondent les interceptions.

La figure 3 illustre ces deux techniques : d'une part la position par rapport à Beauvechain (256°, 10nmi) lue sur ~~le disp~~ l'écran radar, et d'autre part la trajectoire au sol, donnée point par point par rapport à Semmerzake, et la position relative de la cible par rapport au radar, lue également sur l'écran (distance relative R, azimut AZ et élévation EL).

Comment identifier les morceaux de la trajectoire du F-16 correspondant aux interceptions ? C'est ici qu'entre en scène la précieuse donnée β, l'angle de ~~tangage~~ roulis du F-16. L'évolution de cet angle au cours du vol vous renseigne de façon indirecte sur les changements de direction réalisés par le F-16. Ainsi la comparaison de la forme de la trajectoire du F-16 avec l'évolution de l'angle β affiché en permanence au cours de la poursuite a permis ~~d'établir la correspondance temporelle entre les données~~ de synchroniser les données du radar ~~sur ce~~ du F-16 sur celles du radar de Semmerzake. (Figure 4)

Il faut noter que sans une trajectoire aussi riche en virages, il n'aurait pas été possible de mener à bien cette procédure, dont le résultat apparaît sur la figure 5.

La légende en est la suivante :

- en ~~BLANC~~ ORANGE, vous découvrez la trajectoire du F-16 ;

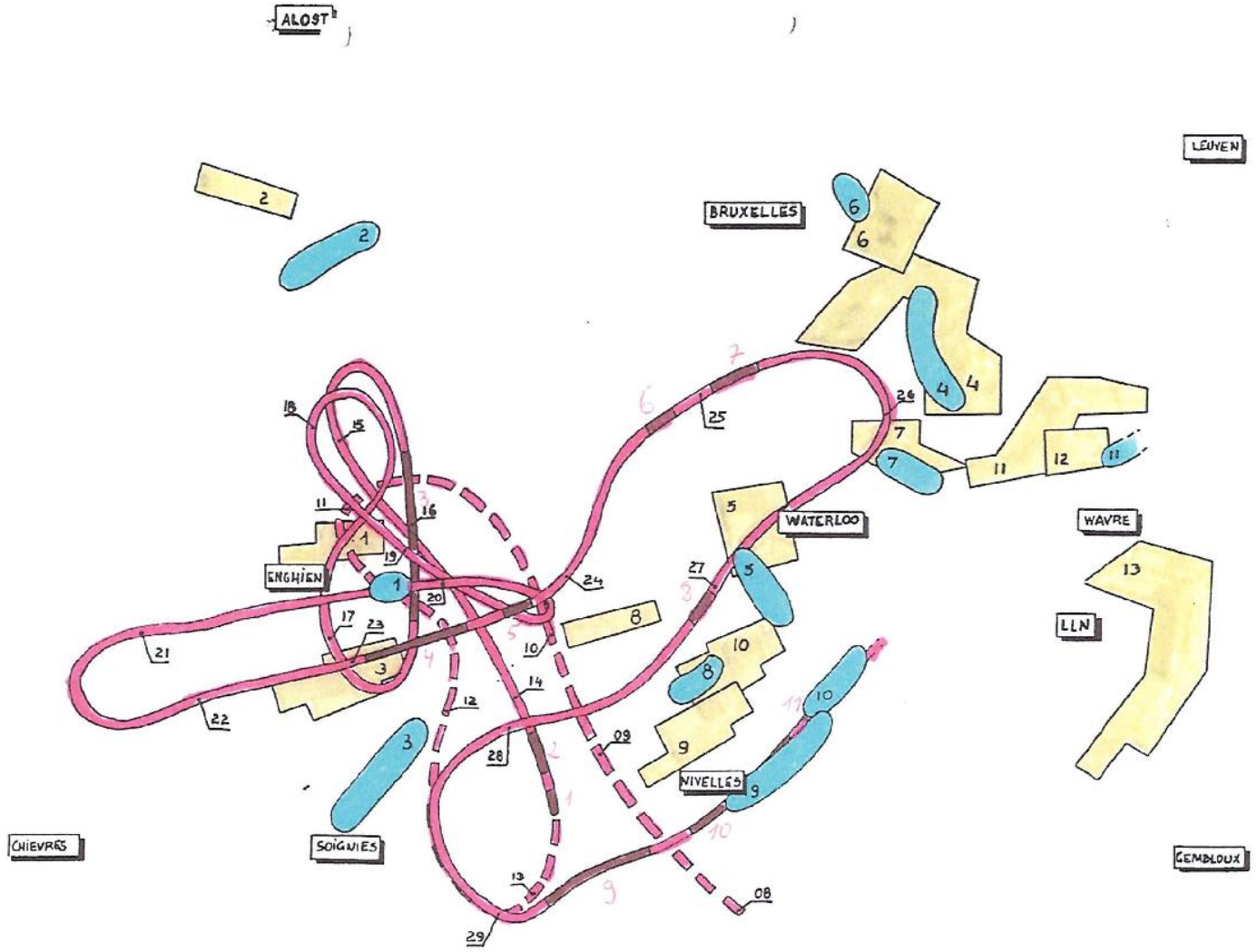

SEMMERZAKE
ALOST
LEUVEN
BRUXELLES
WATERLOO
WAVRE
LLN
ENGHIEN
NIVELLES
SOIGNIES
CHIEVRES
GEMBLOUX

figure 5

- en ROUGE, les parties de cette trajectoire correspondant aux 11 premières interceptions (les données de Semmerzake ne nous ont pas permis d'aller au-delà);
- en VERT les positions approximatives ~~des~~ des cibles, déterminées par rapport à Beauvechain;
- en BLEU par rapport à la trajectoire des F-16;
- des étiquettes indiquent, minute après minute, l'heure sur la trajectoire (les minutes indiquées suivent 24H00).

Que nous apprend cette carte?
Elle nous offre une vue d'ensemble de la poursuite, avec les remarques suivantes:

1. aucune erreur grossière n'a été commise par la plate-forme d'inertie. En effet, pour calculer la position d'une cible par rapport à BEAUVECHAIN, le radar ajoute à la position du F-16 que lui fournit la centrale inertielle, la position relative de la cible considérée. N'ayant pas accès aux positions calculées par la plate-forme, nous les avons substituées, dans la seconde méthode, par les positions mesurées à SEMMERZAKE.

Dans l'ensemble, la disposition des différentes cibles est identique. La différence provient du fait que la trajectoire mesurée par Semmerzake correspond en réalité au F-16 dont l'IFF était activé, mais malheureusement pas à celui dont l'écran radar a été enregistré.

2. les positions des cibles ne semblent pas former une structure régulière. Cette observation nous permet d'affirmer que dans la mesure où les cibles correspondent effectivement à des objets matériels (ce qui n'est pas encore démontré), il est plus que probable que les différentes interceptions ne se rapportent pas à un seul objet!

3. On peut déjà annoncer que les interceptions 8, 9 et 10 sont relatives au second F-16. En vol de formation de nuit, observer son compagnon, afin de garder ses distances ou bien afin de le suivre dans ses manœuvres, est plus aisé au radar qu'à l'oeil nu! Ces 3 interceptions nous serviront de cibles "témoins" lors de l'analyse en détail qui va suivre.

II.2.B Reconstitution des trajectoires.

Partant des données mesurées (Azimut, Elévation, Distance et Vitesse relative), et des données de la plate-forme inertielle, le radar détermine les caractéristiques du mouvement des cibles qu'il poursuit.

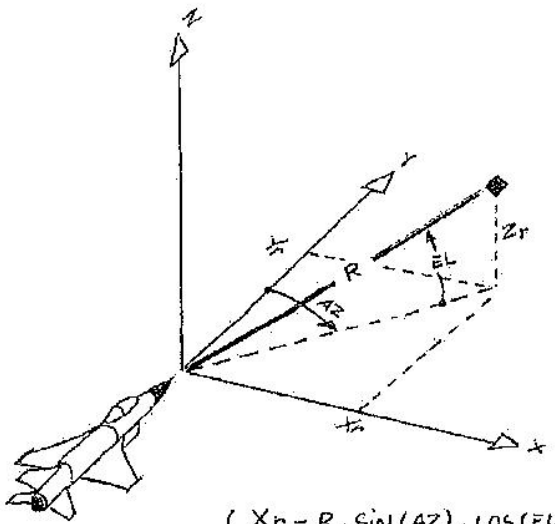
De notre côté, si l'on désire se faire une idée de la trajectoire de ces cibles, il nous faut également connaître à tout moment la situation du F-16 dans l'espace. De cette façon, connaissant le mouvement relatif d'une cible poursuivie par rapport au radar, et la situation de ce dernier par rapport au sol, il sera possible de ramener le mouvement de la cible dans un repère fixe, et d'en calculer la position point par point.

Il faut noter qu'au niveau de chaque interception, l'échelle de temps utilisée est de quelques secondes et qu'il est dès lors inutile de se baser sur les données de Semmerzake ou d'autres radars au sol pour remplacer la plate-forme inertielle dans le calcul de la position instantannée du F-16. En moyenne, un radar au sol, comme celui de Semmerzake, échantillonne une trajectoire avec une période avoisinant les 10 secondes, et est donc incapable de reconstituer la trajectoire du F-16 sur les quelques 20 secondes, qui correspondent à la durée de la plus longue interception!

Nous avons procédé d'une autre manière, nos calculs se basant sur le modèle décrit ci-dessous.

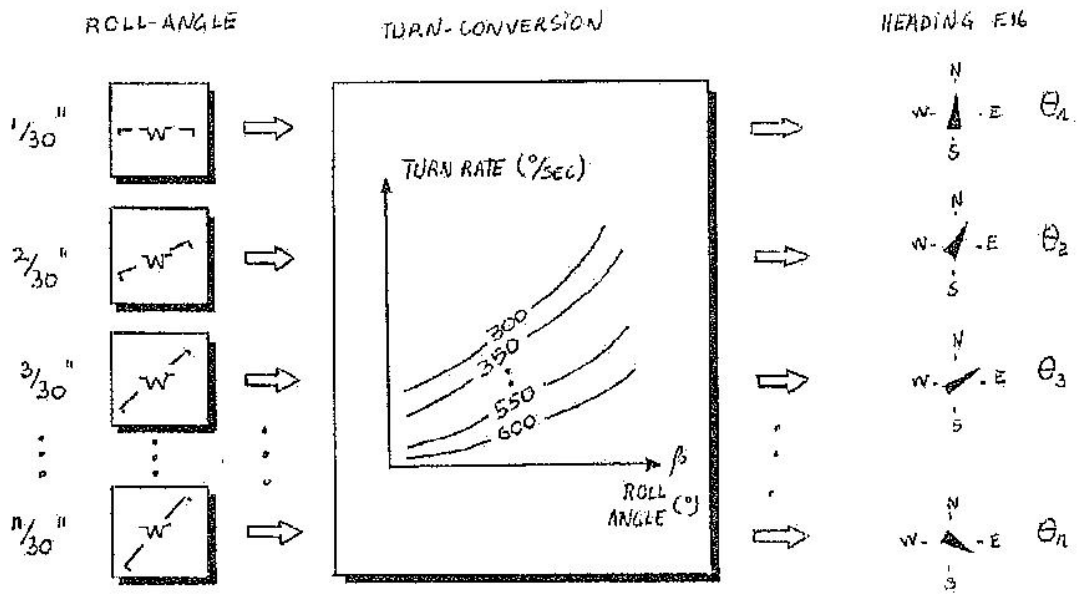
Les hypothèses simplificatrices du modèle sont les suivantes : la vitesse ainsi que l'altitude du F-16 sont supposées être constantes au cours d'une même interception. L'altitude est fixée à 10.000 pieds (environ 3km), d'après la valeur moyenne donnée par les radars au sol, et d'après ~~la valeur moyenne donnée par~~ le pilote lui-même. La vitesse peut être différente d'une interception à l'autre, et l'on acceptera des valeurs de 350 à 550 noeuds (soit 650 à 1000km/h.)

Le radar est conçu d'une telle manière qu'une rotation du F-16 autour de son axe n'affecte pas les angles d'azimut et d'élevation. En effet, le radar est attaché à un repère dit "stabilisé dans l'espace": l'assiette du F-16 ne perturbe pas son fonctionnement (voir figures).



$$\begin{cases} Xr = R \cdot \sin(AZ) \cdot \cos(EL) \\ Yr = R \cdot \cos(AZ) \cdot \cos(EL) \\ Zr = R \cdot \sin(EL) \end{cases}$$

Figure 6


ROLL-ANGLE
TURN-CONVERSION
HEADING F16
1/30"
2/30"
3/30"
n/30"
TURN RATE (°/SEC)
300
350
550
600
β
ROLL ANGLE (°)
N
W
E
S
θ1
θ2
θ3
θn

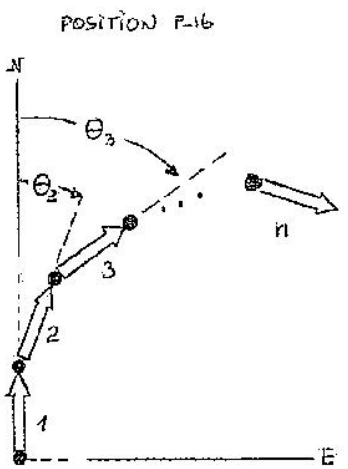
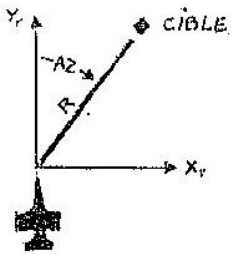
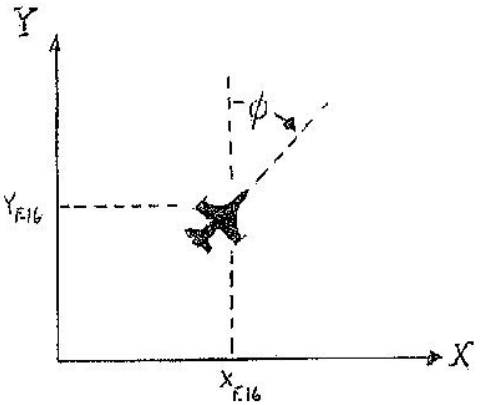

POSITION F-16
N
θ3
θ2
n
3
2
1
E

Figure 7



POSITION CIBLE/F.16



POSITION F.16

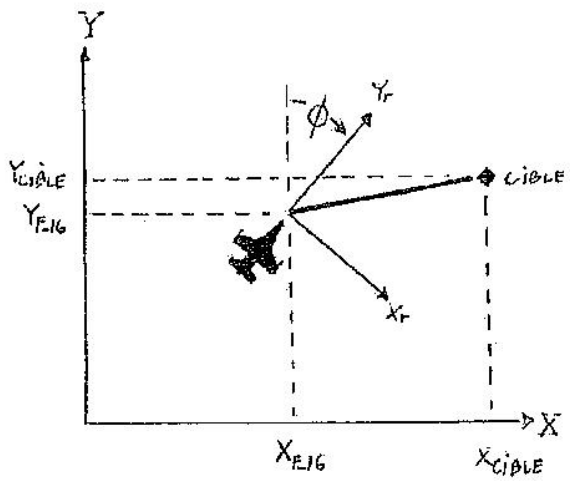


Figure 2.

La reconstitution de la trajectoire d'une cible revient à calculer sa position dans un repère solidaire du sol, à intervalles réguliers. On a choisi comme intervalle de temps 1/30 de seconde, la plus fine résolution en temps dont nous disposons (l'enregistrement de l'écran radar s'est fait au rythme de 30 images par seconde). ~~Une première et~~

Une première étape consiste à calculer les positions relatives dans le repère fixé au socle de l'antenne du radar (figure 6).

Ensuite, il faut calculer les positions du F-16 aux mêmes instants. Pour ce faire, il suffit d'intégrer le vecteur vitesse du F-16, en partant d'une position initiale déterminée (x=0, y=0, z= 10.000 pieds). Mais dans quel direction intégrer ce vecteur? C'est l'angle de ~~"tangage"~~ "roulis", β, qui nous permet de lever cette indétermination. Il existe en effet, pour le F-16, des abaques faisant correspondre à chaque angle de roulis, le taux de variation de la courbure (TURN RATE, °/sec). Ainsi, par exemple, un F-16 évoluant à 500 noeuds et affichant un angle de roll de 70° tournera de 7° par seconde. Il sera ainsi possible, point par point, de reconstituer la trajectoire du F-16 comme l'illustre la figure 7.

Disposant des positions successives de la trajectoire de la cible par rapport au F-16, et de celle du F-16 par rapport au sol, il reste à superposer les deux, sans oublier la rotation à appliquer au repère relatif cible/F-16 pour que ce dernier reste bien dans le prolongement de l'axe du F-16 lors des virages (figure 8).

Ainsi, la position de la cible sera déterminée par l'équation suivante, à raison de 30 échantillons par seconde, et où $\phi(n)$ représente la direction instantannée du F-16, déterminée grâce à l'angle de roulis β.

$$\begin{bmatrix} x(n) \\ r(n) \\ z(n) \end{bmatrix}_{CIBLE} = \begin{bmatrix} x(n) \\ r(n) \\ z(n) \end{bmatrix}_{F\text{-}16} + \begin{bmatrix} \cos\phi(n) & -\sin\phi(n) & 0 \\ -\sin\phi(n) & \cos\phi(n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(n) \\ r(n) \\ z(n) \end{bmatrix}_{CIBLE/F\text{-}16}$$

La trajectoire des 13 interceptions a été ainsi reconstituée, donnant pour chacune la position instantannée 30 fois par seconde. Pour se donner une idée plus précise de la trajectoire des cibles, leur représentation figure en annexe B, avec,

pour chaque cible,

- la projection au sol de sa trajectoire (fig. B.i.1, avec i = 1 .. 13 selon la cible). Chacun des "pavés" du sol a 0,1 nmi (mesure) de côté, soit environ 180 m.
- la projection au sol des trajectoires de la cible et du F.16 (fig. B.i-2) Le sol est ici représenté par un quadrillage de 1 nmi x 1 nmi.
- la trajectoire en 3 dimensions de la cible (fig B.i.3); toutes les 1/2 secondes un trait vertical ~~relie~~ bleu relie la trajectoire au sol.
- les trajectoires en 3 dimension de la cible et du F16 (fig B.i.4).

En résumé, pour reconstituer les trajectoires d'une cible, nous avons

1. relevé les données brutes à l'écran (azimut, élévation, distance, vitesse relative), à raison de 30 relevés par seconde pour chaque donnée.
2. calculé la position relative de la cible par rapport au radar
3. calculé la position ~~relo~~ instantannée du F-16 par rapport au sol, en supposant son altitude et sa vitesse constante, et en déduisant ses changements de direction de l'évolution de l'angle de roulis.
4. déduit la position instantannée de la cible par rapport au sol, sur base des calculs réalisés aux étapes 2 et 3

Quelques remarques importantes sont à formuler quant à la méthode de calcul des trajectoires

1. Imprécisions sur les données de départ.

Comme il a été signalé précédemment, les données "brutes" ne sont affichées sur l'écran radar qu'avec une précision limitée. En effet, les échelles d'azimut et d'élévation ne portent des graduations que toutes les 10°, et l'échelle de distance ne comporte que 4 graduations ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ du fond d'échelle, qui est, selon le cas, de 10, 20 ou 40 nmi). Il a donc été nécessaire de rendre ces échelles plus fines, en plaçant sur l'écran, des échelles graduées. Malgré cet artifice, les données brutes d'azimut et d'élévation, ~~sont~~ n'ont été relevées qu'au 1/2 degré près. Quant à la donnée relative à la distance, nous avons préféré partir de la mesure initiale et lui ajouter l'intégrale temporelle de la vitesse relative (puisque cette dernière représente la variation de la ~~vitesse~~ distance relative au cours du temps).

[RAJOUTER *]

~~Cette imprécision sur les données brutes introduira inévitablement des erreurs sur la position calculée par notre modèle. Il ne faudra en aucun cas perdre de vue cette remarque importante lors de l'interprétation des résultats.~~

2. Impact des hypothèses de départ du modèle

Nous avons supposé que l'altitude ainsi que la vitesse du F-16 sont restées constantes au cours des interceptions. En réalité, ces valeurs ont fluctué autour de valeurs constantes. A nouveau, il faudra à tout moment garder à l'esprit les limites de ces hypothèses lors de l'interprétation.

II.2. C. Calcul des paramètres des 13 interceptions

Jusqu'ici, nous avons considéré les données "brutes" affichées et en avons déduit des trajectoires.

Nous nous proposons, à partir de ces trajectoires, de vérifier certains paramètres qui ont été calculés par le radar. Ces paramètres sont l'altitude de la cible, sa vitesse absolue, et sa "direction de vol par rapport au F-16" (ou "ASPECT-ANGLE")

A. Altitude de la cible

Pour déterminer ce paramètre, il suffit de prendre la coordonnée "z" de la position instantannée de la cible, calculée au paragraphe précédent.

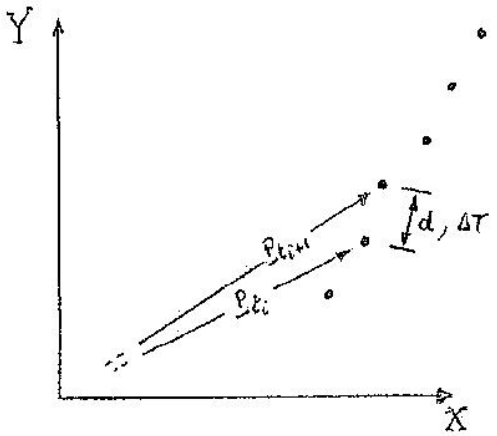
En reprenant la formule de la position, on peut remarquer que l'altitude z(n) vaut, d'après notre modèle, $Z_{F\text{-}16}(n) + Z_{CIBLE/F\text{-}16}(n)$, c'est-à-dire l'altitude du F-16, qui vaut R.SIN(EL). L'altitude calculée de cette façon, sera sensible à toute erreur sur

- l'altitude du F-16, qui rappelons-le a été fixée à 10.000 pieds et maintenue constante durant les interceptions
- la distance relative R, et
- l'angle d'élévation de l'antenne, EL.

Aux ~~courbes des~~ figures B.1.5.a de l'annexe B sont comparées l'altitude calculée par le modèle (bleu), et celle calculée par le radar (rouge).

[*] Avant d'entreprendre des manipulations sur les données relevées à l'écran, il a été indispensable de "lisser" les pour éviter que des variations "en palier" dues à la nature "quantifiée" du relevé ne soient associées par erreur au mouvement de la cible observée

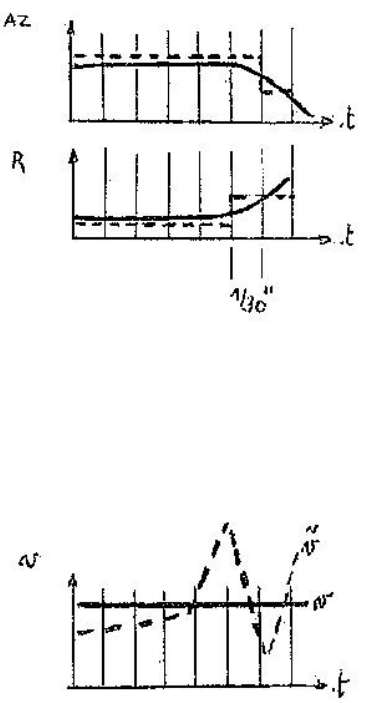
Malgré ces précautions, les imprécisions sur ces données brutes introduiront inévitablement des erreurs sur la position des cibles, calculée par notre modèle.

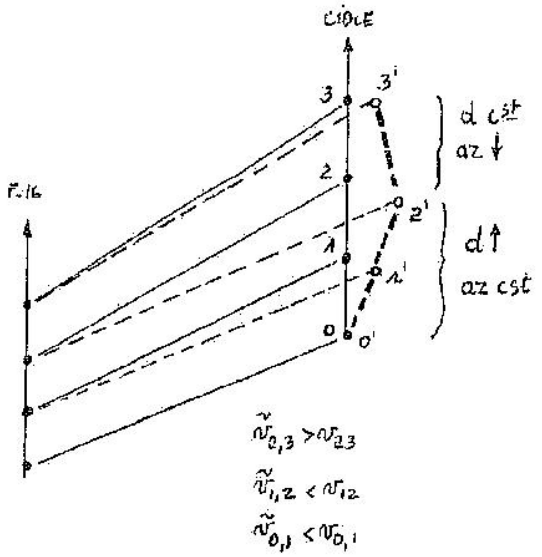


$$\tilde{V}_{i,i+1} = \frac{\|\underline{P}(t_{i+1}) - \underline{P}(t_i)\|}{(t_{i+1} - t_i)} = \frac{d}{\Delta T}$$

$\Delta T = 1/30''$

Figure 9





$\tilde{V}_{2,3} > V_{23}$

$\tilde{V}_{1,2} < V_{12}$

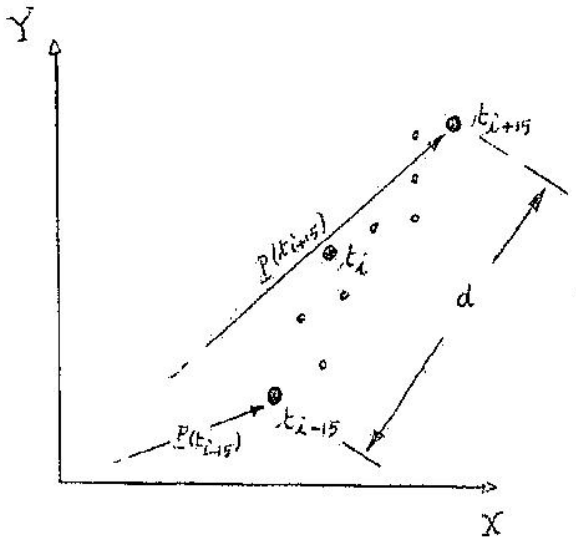
$\tilde{V}_{0,1} \leq V_{0,1}$

Figure 10

2. Vitesse de la cible

Le calcul de la position instantannée des cibles nous permet, par simple différentiation, d'en déterminer la vitesse instantannée (figure 8g). La première application de cette méthode fut un échec, car elle donnait une vitesse en "dents de scie" qui aurait pu être considérée, à tort comme le signe d'un mouvement anormal de la part des cibles. Comme ce phénomène apparaissait également pour les "cibles-témoin" 8, 9 et 10 (qui ne sont, rappelons-le, rien d'autre que le second F-16), le caractère extra-ordinaire de ces vitesses devait être attribué à la méthode de calcul. En effet, en travaillant sur des intervalles de temps aussi brefs (1/30° de seconde), il apparait une erreur de "quantification" pour la raison que suit. D'~~1/30~~ un trentième de seconde à l'autre, dans la réalité, toutes les données brutes se modifient de manière cohérente et continue. Leur évolution au cour du temps n'est pas indépendante, mais dépend de la trajectoire réelle de la cible. Ainsi, si en réalité, l'azimut et la distance changent au ~~moment~~ même moment, mais que, par la nature imprécise et quantifiée du relevé à l'écran, on estime que la distance s'est modifiée avant que l'azimut ne change, la trajectoire obtenue sera différente de la trajectoire réelle. La figure 10 évoque cette différence, avec en trait continu, les courbes réelles, et en trait interrompu, les courbes issues du modèle. (Les vitesses calculées sont marquées d'un symbole ~). On peut facilement constater, en comparant la distance parcourue entre deux points successifs, d'une part sur la courbe réelle et d'autre part sur la courbe en trait interrompu, que les vitesses instantannées vont tantôt être sous-estimées, tantôt surestimées. Une autre explication de ce phénomène ~~de ce phénomène~~ est l'utilisation de différences finies ($\underline{P}(t_{i+1}) - \underline{P}(t_i)$) dans le calcul des vitesses instantannées. Il est bien connu que l'erreur absolue sur une différence est la somme des erreurs absolues sur chaque terme. L'erreur relative sur la différence sera donc importante, et apparaîtra au niveau du calcul des vitesses!

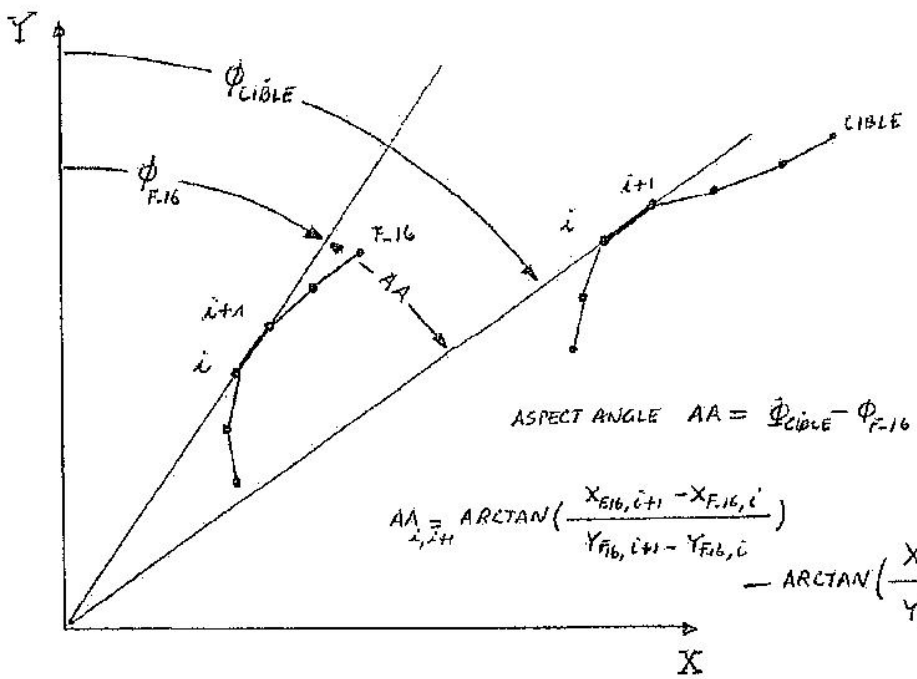
Pour éviter ce phénomène parasite, nous n'avons pas considéré des vitesses instantannées, mais des vitesses moyennes, calculées sur base



$$\tilde{V}_i = \frac{\| \underline{P}(t_{i+15}) - \underline{P}(t_{i-15}) \|}{(t_{i+15} - t_{i-15})}$$

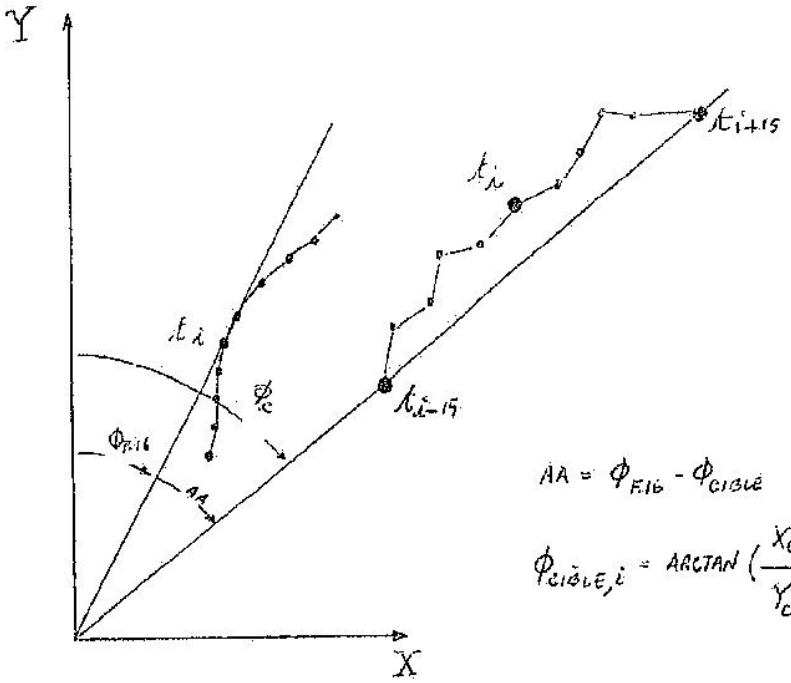
$$= \frac{d}{30 \cdot \Delta T} \quad ; \Delta T = 1/30^{s}$$

Figure II



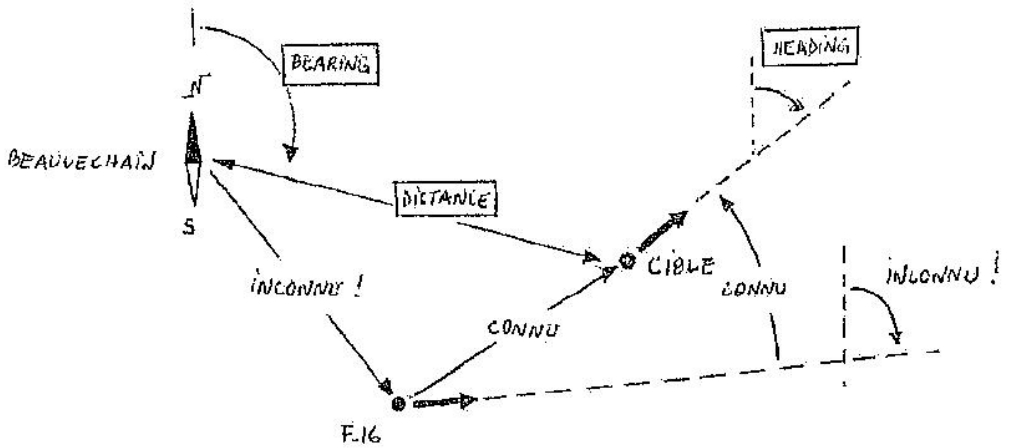
ASPECT ANGLE $AA = \Phi_{CIBLE} - \Phi_{F-16}$

$$AA_{i,i+1} = ARCTAN\left(\frac{X_{F16,i+1} - X_{F16,i}}{Y_{F16,i+1} - Y_{F16,i}}\right) - ARCTAN\left(\frac{X_{C,i+1} - X_{C,i}}{Y_{C,i+1} - Y_{C,i}}\right)$$



$$AA = \phi_{F16} - \phi_{CIBLE}$$

$$\phi_{CIBLE,i} = ARCTAN\left(\frac{X_C(t_{i+15}) - X_C(t_{i-15})}{Y_C(t_{i+15}) - Y_C(t_{i-15})}\right)$$


BEARING
N
BEAUVECHAIN
S
DISTANCE
HEADING
CIBLE
INCONNU !
CONNU
CONNU
INCONNU !
F-16

d'intervalles de temps plus longs (de l'ordre d'une seconde plutôt que de 1/20e de seconde). La figure 11 illustre cette technique, qui permet de gommer quelque peu les erreurs introduites par le phénomène. En chaque point de la trajectoire, la vitesse sera calculée en considérant une position antérieure de T/2 secondes, et une position ultérieure de $\frac{T}{2}$ seconde, et en divisant la distance séparant ces 2 positions par l'intervalle de temps T. L'opération est alors répétée en chaque point de la trajectoire. Il est évident qu'en procédant de la sorte, il sera impossible de calculer la vitesse pour les quelques premiers points de la trajectoire, ainsi que pour les quelques derniers points.

Les résultats de ces calculs sont repris, pour chaque interception, aux figures B.i.5.c (i=1..13) de l'annexe B. 2 courbes y figurent, en bleu les vitesses calculées par notre modèle, et en rouge, celles calculées par le radar et affichées sur l'écran

Deux remarques importantes :

1. Le radar, travaillant "on line", ne peut afficher la vitesse moyenne qu'il calcule, qu'avec un certain retard. Le calcul a' posteriori que l'on a réalisé nous a permis de "recentrer" la vitesse courbe bleue. (courbe bleue).
2. Comme la vitesse a été calculée sur base des positions successives de la trajectoire des cibles, la précision avec laquelle a été déterminée cette dernière déterminera la précision obtenue sur les vitesses. La trajectoire a été calculée à partir de la position relative de la cible par rapport au F-16, et de la position du F16 par rapport au sol. Ainsi la vitesse du F16 dont la valeur a été choisie et maintenue constante, aura une influence non négligeable sur le calcul des positions successives des trajectoires, et donc aussi sur le calcul des vitesses. Il faudra donc rester très prudent dans l'interprétation des résultats, en raison de leur sensibilité par rapport aux hypothèses du modèle, et aux erreurs sur les données de départ.

3. Direction de vol de la cible par rapport au F-16 ("Aspect Angle").

Ce paramètre se calcule sur base de la comparaison des trajectoires de la cible et du F-16. Le principe est simple et consiste à considérer deux points successifs de la trajectoire F-16, et les deux points successifs correspondant, de la trajectoire de la cible, comme l'illustre la figure 12. (La formule est en fait plus compliquée, pour tenir compte de tous les cas de figure rencontrés dans la pratique, mais le raisonnement est le même).

Comme dans le cas des vitesses, les "différences finies" utilisées pour le calcul introduisent des erreurs importantes qui se traduisent par des courbes en dents de scie; et l'on devra, de la même manière, considérer des valeurs moyennes plutôt que des valeurs instantannées, comme l'indique la figure 13.

Les directions de vol relatives de (Aspect angle) des cibles sont reprises sur les diagrammes des figures 3.C.S.b (λ=1..13) où, comme par les autres diagrammes, la courbe bleue correspond aux résultats du modèle, alors que la courbe rouge reprend les résultats du radar. La "direction de vol relative" calculée par le radar est, comme la vitesse calculée, affichée avec un certain retard dont il faudra tenir compte lors de la comparaison.

Après l'altitude, la vitesse et la direction relative de la cible, restent 3 paramètres à calculer : la distance de la cible par rapport à Beauvechain, la position angulaire de la cible par rapport au même point de référence, et la direction de vol de la cible par rapport au Nord. Ces 3 derniers paramètres, repris à la figure 14 nécessitent la connaissance de la position du F-16 par rapport à Beauvechain, ainsi que sa direction de vol par rapport au nord. Ces deux renseignements n'étant pas donnés avec suffisamment de précision à l'échelle de temps considérée, nous avons pris, pour chaque cible, un repère fixe au sol dont l'origine (0,0,0) se situe à la verticale sous la position initiale de F-16 en début d'interception. Le calcul des derniers paramètres a donc été épargné en raison des erreurs trop importantes qui auraient été introduites, empêchant toute interprétation valable.

Le paragraphe suivant est consacré à l'interprétation des paramètres calculés.

Une dernière figure (B. d. 5. (d)) a été ajoutée et consiste en la juxtaposition de la distance relative mesurée par le radar (courbe rouge) et de la même distance relative, calculée par intégration de la vitesse de rapprochement, également mesurée par le radar. Il me faudra pas se laisser troubler par le caractère "en escalier" de la courbe rouge. Celui est dû à l'imprécision du relevé à l'écran, de la position du diamant représentant la cible. Pour certaines interceptions, des discontinuités plus importantes ont été observées (interceptions 4, 11 et 13.) et seront expliquées au paragraphe suivant, consacré à l'interprétation des paramètres calculés.

II.2.D. Interprétations

En annexe B sont repris les résultats du calcul a posteriori basés sur le modèle décrit précédemment.

Nous passerons en revue les différentes interceptions, afin de découvrir l'une ou l'autre particularité...

1. Interception 1

Nous laisserons de côté cette interception pour la simple raison qu'elle est incomplète : seules les 2 dernières secondes précédant la perte de la cible ont été enregistrées. Nous avons cependant indiqué sur les figures les différentes légendes nécessaires à la compréhension des résultats.

2. Interceptions 8-9-10

Il est intéressant d'entamer l'analyse des résultats par ces 3 interceptions car elles correspondent au vol d'un des 2 F-16. Leur interprétation nous permettra de se faire une idée de la qualité du modèle utilisé.

Les figures B.8.2, B.9.2 et B.10.2 soulèvent une première anomalie : elles montrent une trajectoire légèrement oscillante du F-16 "poursuivi". Cette oscillation peut résulter de deux phénomènes. Le premier a été décrit précédemment (II.2.C) : les données brutes, ou du moins leurs évolutions dans le temps ne sont pas indépendantes, et leur relevé à l'écran, avec l'impression que l'on connait, provoque une décorrélation aléatoire se traduisant précisément par un "bruit" autour d'une trajectoire moyenne que l'on peut deviner.

supérieure à 1000 pieds. cependant, pour éviter de surcharger cette valeur
inutilement l'écran, ~~l'altitude~~ est arrondie de façon à n'afficher que les milliers, ce qui explique les sauts brutaux.

En moyenne, nous pouvons considérer que l'altitude calculée par notre modèle correspond bien à celle affichée.

- ASPECT-ANGLE (figures B.8, B.9, B.10. 5.(b)) et VITESSE (fig. B.8,9,10,5(c))

Une rapide comparaison des courbes permet de conclure qu'en moyenne, les valeurs des paramètres calculés par le radar d'une part et sur base du modèle de l'autre, observent la même tendance. Les écarts, relativement importants autour de cette moyenne résultent des erreurs au niveau de angles d'observation, comme expliqué précédemment. Il faut noter que plus la distance F-16 – Cible sera importante, plus l'erreur angulaire déformera la trajectoire, et, partant, les paramètres calculés. Comme la distance relative est précisément plus élevé dans le cas des autres interceptions, il faudra s'attendre à des écarts ~~[illegible]~~ importants ~~[illegible]~~ par rapport à la réalité.

Au niveau des valeurs, la vitesse affichée avoisinne les 400K, ce qui correspond aux données des pilotes

- DISTANCE RELATIVE et CLOSING SPEED (fig B.8, B.9, B.10. 5(d))

On peut observer une bonne cohérence entre les deux données brutes.

3. INTERCEPTION N° 2 :

Commençons par observer les courbes de la figure B.2.5 et la correspondance entre

- ALTITUDE : L'altitude affichée par le radar ~~fut été acceptée~~, ~~comme le confirme la courbe~~ et l'altitude issue de calculée par notre modèle est acceptable.

- ASPECT ANGLE : peut également être accepté si on juge la ressemblance entre les courbes

- VITESSE : Une nette différence apparaît à ce niveau ~~des~~ ~~courbes~~. Comment l'expliquer ? Calculons l'ordre de grandeur de la vitesse à partir de la courbe d'altitude : en 4 secondes, la cible perd 8000 pieds. La vitesse correspondante est donc de environ de 1900 nmi/h. Comment alors admettre que le radar affiche une vitesse aussi faible que 200 nmi/h ? Cette valeur de 200 nmi/h est la vitesse affichée, non calculée. L'écran de visualisation a été conçu pour afficher la vitesse à l'aide de 3 "digit", pas un de plus. Résultat : le chiffre "1" des milliers a été omis !

La vitesse calculée par notre modèle s'avère donc être une bonne estimation de la vitesse de la cible : 1500 nmi/h = 2780 km/h. Aucun avion, en temps de paix, ne peut franchir le mur du son sous les 36000 pieds (50.000 pieds en descente)

- DISTANCE - CLOSING-SPEED : Il subsiste un demi nmi de différence en fin d'interception, valeur inférieure à la précision de la lecture de la distance relative sur écran ! Il y a donc bonne cohérence entre les deux données "brutes".

en projection au sol de sa trajectoire, représentée figure B.2.2, laisse apparaître des oscillations dont on connaît maintenant l'origine.

La figure B.2.3 illustre bien la descente vertigineuse de la cible.

4. INTERCEPTION 3

Les courbes de la figure B.3.5 nous permettent d'obtenir une bonne cohérence entre les valeurs affichées sur l'écran de visualisation. La seule curiosité réside au niveau des courbes (c) : la vitesse calculée par notre modèle présente des oscillations, alors que la vitesse affichée à l'écran montre plutôt des paliers. Ces derniers ~~s'expliquent~~ se justifient aisément en mode SAM (cfr pt III sur le "filtre de KALMAN")

La vitesse affichée en mode SAM est à qualifier de "moyenne", alors que celle issue de notre modèle est plutôt une vitesse "instantanée", même si une moyenne mobile lui est appliquée dans le modèle. Aucune de ces 2 vitesses ne correspond donc à la réalité. Cependant, les oscillations gravitent plus autour des paliers, si bien que la tendance est comparable. Si l'on en croit les valeurs de la vitesse, la cible n°3 a effectué un vol supersonique (1800 km/h) sous l'altitude autorisée. L'hypothèse d'un avion commun est ici aussi à écarter.

Les courbes B.3.1 à B.3.4. donnent une vue d'ensemble de cette interception

5. INTERCEPTION 4

Cette interception est différente des précédentes en ce sens qu'elle présente une nette discontinuité, qui apparaît clairement sur les figures B.4.1 et B.4.4. Les valeurs affichées à l'écran sont restées cohérentes pendant les 15 premières secondes, comme le montrent les courbes de la figure B.4.5. A partir de ce moment, les valeurs affichées et celles calculées par le modèle diffèrent sensiblement.

La courbe (d) est particulièrement intéressante. Pendant les 15 premières secondes, l'évolution de la distance relative correspond à la vitesse relative affichée. Ensuite, se présente un phénomène curieux. Le "diamant" représentant la cible sur l'écran change brusquement de place, indiquant un rapprochement brutal de la cible (Ce phénomène a même laissé perplexe un major pilote polytechnicien qui a avoué ne jamais avoir été témoin d'un tel déplacement de la part du "diamant".). Ce phénomène amènera les ufologues qui pourraient considérer cet incident comme la première observation de mouvements brusques des "ovni".

Gardons l'esprit critique. Nous découvrirons au point III comment peuvent s'expliquer ces discontinuités qui, nous allons le voir, se présentent également au cours d'autres interceptions (11 et 13).

Une fois de plus, la vitesse affichée est supersonique et à basse altitude.

6. INTERCEPTION 5

Les figures B.5.S. indiquent une cohérence des différents paramètres, à l'exception de la vitesse. Estimons rapidement l'ordre de grandeur de cette dernière. Sur la courbe de l'altitude, nous pouvons suivre l'évolution dans le plan vertical : 4000 pieds en 6 secondes, soit 0.7 nmi en 6 secondes. La projection de la figure B.S.1. nous permet de calculer le déplacement moyen de la cible dans le plan horizontal : 1.5 nmi. Au total, la cible aura une vitesse moyenne de 1000 nmi/h environ, correspondant effectivement à la vitesse calculée par le modèle. La différence entre cette vitesse et celle calculée par le radar s'explique comme suit : vers la fin de l'interception, le F-16 entame un virage vers la gauche, alors que la cible se situe sur sa droite. Le modèle n'a pas compensé correctement l'effet du virage, sous-estimant ce dernier. L'erreur effectuée sur la trajectoire du F-16 se répercutera sur celle de la cible, en l'allongeant de façon artificielle. La vitesse de la cible sera dès lors surestimée.

Au niveau de la trajectoire, cette interception n'a rien d'exceptionnel.

7. INTERCEPTION 6

Figure B.6.S : tous les paramètres, à l'exception, à nouveau, de la vitesse de la cible, se montrent cohérents. La différence entre les courbes de la figure B.6.S.(c) posent des oscillations parasites visibles sur la trajectoire. Vérifions l'ordre de grandeur de la vitesse : dans le plan vertical, la cible s'élève de 2000 pieds, soit 0,33 nmi. Dans le plan horizontal, (fig. B.6.1), le déplacement est de 0,5 nmi.

Au total, 0,6 nmi en 4 secondes, soit une vitesse moyenne de 540 K. La différence avec les 400 nmi/h affichés à l'écran provient d'une mauvaise estimation de la vitesse du F-16 dans notre modèle, pour cette interception.

Tout comme l'interception 5, rien d'exceptionnel ne caractérise la trajectoire correspondant à cette interception.

8. INTERCEPTION 7

De loin l'une des plus impressionnantes, la cible interceptée entame une folle ascension : elle avale, presqu'à la verticale, 15000 pieds en 8 secondes, ce qui correspond à une vitesse supérieure à 1000 nmi/h.

Ne nous réjouissons pas d'être en présence d'un objet volant dont les caractéristiques permettent de telles performances : nous découvrirons au point III qu'il en est autrement.

9. INTERCEPTION 8 11

Cette interception, au même titre que l'interception 4, peut se décomposer en deux parties. Pendant les 5 premières secondes, les paramètres affichés par le radar correspondent à ceux calculés par le modèle : entre la 5e et la 6e seconde apparaît une discontinuité, bien visible sur la figure B.11.5.(d), et également sur l'écran de visualisation où le diamant change brusquement de position. A nouveau, le point III tentera d'élucider ce mystère.

10. INTERCEPTION 12

Aucune anomalie n'est à signaler au cours de cette interception, sinon la vitesse de la cible qui est, comme pour la plupart des cibles précédentes, surestimée.

11. INTERCEPTION 13

Le modèle permet ici de mettre en évidence une curieuse particularité : l'altitude de la cible devrait idéalement suivre la même évolution que l'angle d'élévation de l'antenne du radar. Tel n'est pourtant pas le cas. L'altitude calculée par notre modèle (cfig. B. 13.5 (a), courbe bleue) suit effectivement l'évolution monotone de l'angle d'élévation. Par contre, l'altitude calculée par le radar inverse son évolution au moment de passer sous le niveau "0". La première réaction face à ce phénomène est de faire remarquer que l'écran n'est pas prévu pour afficher des altitudes négatives, n'indiquant de ce fait que la valeur absolue de l'altitude. Mais comment alors expliquer que le radar a été amené à observer une cible sous le niveau "0" ? Une explication plausible consiste à imaginer une configuration telle que le sol joue le rôle de réflecteur pour les échos radar. La cible se serait alors rapprochée du sol, et, au moment où elle aurait repris un mouvement ascensionnel, le radar aurait continué l'interception sur son image ! Ceci pourrait expliquer pourquoi l'angle d'élévation ne suit pas l'évolution de l'altitude. Nous verrons plus loin (point III) que telle n'est pas la bonne interprétation.

A la 5e seconde de l'interception, une discontinuité apparaît au niveau de la distance relative. Il s'agit là du phénomène déjà rencontré au cours des interceptions 4 et 12. Nous verrons au point III comment peuvent s'expliquer ces discontinuités inquiétantes.

III.3 ~~Conclusion~~

Le modèle développé ~~conjecturé~~ nous a permis de confronter une grande partie des valeurs affichées sous les yeux des pilotes. Cependant, il subsiste encore certains points d'interrogation ; citons notamment les fameuses discontinuités ~~de dérivée relatives~~ des paramètres "distance relative". ~~Autrement dit le modèle prédit est incomplet~~. C'est en essayant de s'éclaircir les points obscurs que nous nous sommes aperçus d'une erreur d'interprétation fondamentale : les données, jusqu'ici considérées comme "brutes", à savoir les angles d'élevation, d'azimut, de distance et de vitesse relatives, ne sont pas des mesures de la réalité, mais proviennent déjà d'un certain traitement.

Notre modèle a finalement permis ~~que~~ de vérifier les algorithmes de calcul des paramètres affichés, rien de plus ! Il est plus important de se demander d'où viennent les valeurs des données considérées "brutes" jusqu'alors ! C'est précisément l'objet du point suivant.

III. REBONDISSEMENT DANS L'ANALYSE :

LE "FILTRE DE KALMAN".

III. REBONDISSEMENT DANS L'ANALYSE : LE FILTRE DE KALMAN

III.1. ROLE DU FILTRE DE KALMAN

Par souci de simplicité, nous allons procéder par analogie pour comprendre la présence du filtre de KALMAN au sein du radar.

Au volant d'un véhicule, il vous arrive souvent, même inconsciemment, de quitter la chaussée des yeux, pour jeter un regard sur la signalisation, le paysage... voire sur une jolie fille. Sans le savoir, voici les opérations que vous effectuez : en un premier temps, vous allez prendre connaissance de certaines données nécessaires : la vitesse de votre véhicule (même sans relever le tachymètre, vous avez en permanence une idée de votre propre vitesse), et surtout la configuration que prend la chaussée devant vous (obstacles éventuels, virages...) ; ensuite, vous vous autoriserez à observer le paysage. De façon inconsciente, vous allez reconstituer mentalement la chaussée et l'évolution de votre véhicule sur celle-ci. Régulièrement cependant, il vous faudra corriger votre situation afin de ne pas quitter la route! La fréquence avec laquelle vous vous corrigerez sera fonction de la complexité de la route et de votre vitesse.

Le mode S.A.M. du radar F-16 ("Situation Awareness Mode") adopte précisément le même principe. Dans notre analogie, le chemin à suivre est remplacé par la cible à intercepter, et le paysage que le conducteur s'autorise à admirer est ici à comparer au volume de l'espace pouvant contenir d'autres cibles potentielles.

Afin de ne pas perdre de vue la cible, tout en observant une autre partie de l'espace, le radar commencera par acquérir un maximum d'informations : les angles (azimut, élévation) sous lesquels il observe la cible, la distance et la vitesse relative de cette dernière. Ces données, enregistrées pendant un certain temps (phase de "tracking"), permettront au radar, et plus précisément au filtre de KALMAN, d'extrapoler la position de la cible, autorisant ainsi un balayage des reste

de l'espace (phase de "search"). A la manière du conducteur qui doit régulièrement corriger sa position sur la chaussée, le radar recentrera régulièrement sur la position qu'il aura estimé être celle de la cible. Au cours de chaque phase de tracking, le radar mettra à jour les valeurs estimées par le filtre de KALMAN.

Ce filtre a donc un rôle de PREDICTION, qui permet au radar de fonctionner en mode SAM tout en suivant la cible. Ce rôle n'est pas le seul. Un autre est d'assurer la CONTINUITE des données mesurées: azimut, élévation, distance et vitesse relative. En effet, la cible, ennemi potentiel, est susceptible d'être détruite à tout moment par les missiles de F-16. Le radar doit donc en permanence calculer les paramètres de tir correspondant à la cible poursuivie. Pour le faire, il a besoin des données citées ci-dessus qui doivent donc être présentes à tout moment "à l'entrée" du calculateur. Sans le filtre de KALMAN, et en mode SAM, les données auraient un caractère discontinu (dans le temps). Le rôle de continuité apparaît également en phase de tracking par, le STT. En effet, suite aux manoeuvres que réalise la cible poursuivie, la surface radar de cette dernière risque de devenir si faible, sous certaines configurations, que les impulsions de retour tombent sous le seuil de détection, de sorte que le radar ne soit plus en mesure de récolter les informations nécessaires au calcul des paramètres de tir. Dans ce cas, le filtre de KALMAN prend le relais, et sur base des valeurs passées des données, on réalise une prévision, assurant ainsi leur continuité.

Cette brève approche du filtre de KALMAN va nous dégager la voie vers de nouvelles hypothèses.

III. 2. REMISE EN QUESTION DU MODELE

Pour rappel, le modèle décrit au point II.2 partait de "données brutes" et de quelques hypothèses (vitesse et altitude du F-16) pour recalculer certains paramètres que le radar affiche sur son écran.

Les "input" du modèle avaient été explicitement appelés "données brutes" car il allait de soi qu'elles constituaient des valeurs mesurées, provenant directement du monde extérieur (au radar). Tel n'est pas le cas puisque, comme nous l'avons souligné au point précédent, les différents paramètres mesurés sont mémorisés et extrapolés par le filtre de Kalman, pour assurer les rôles de prédiction et de continuité. Nous ne pouvons donc plus qualifier les données de "brutes", puisqu'elles font l'objet d'un traitement particulier.

En conséquence, les trajectoires et paramètres calculés par le modèle ne correspondent pas à tout moment à la réalité, mais bien à une image déformée de celle-ci. Le point suivant nous montre pourquoi il faut rester très prudent face aux valeurs affichées par le radar sur son écran.

III.3. DANGERS D'INTERPRETATION DUS A L'INTERVENTION DU FILTRE DE KALMAN

Le filtre de KALMAN est à l'origine de 3 phénomènes pouvant conduire à de mauvaises interprétations.

III.3.A. Discontinuités apparentes de la trajectoire de la cible

En fonctionnement S.A.M., pendant les phases de SEARCH, le filtre de KALMAN extrapole la trajectoire de la cible afin d'aider le radar à retrouver cette dernière et d'entamer une phase de TRACKING. Une prévision est par définition entachée d'erreurs, de sorte que la position de la cible estimée par le filtre de KALMAN et la position réelle ne correspondent pas. Si l'erreur de prévision n'est pas trop importante (c'est à dire si le vecteur mesuré [azimut, elevation, distance, vitesse relative] reste compris dans une fenêtre de 4 dimensions centrée sur le vecteur extrapolé), les valeurs extrapolées seront mises à jour et il apparaîtra une discontinuité qui se répercutera sur les valeurs calculées, comme la vitesse ou l'altitude par exemple, pouvant donner l'impression d'une brutale modification dans le comportement de la cible, qui, dans le cadre du dossier "OVNI", constituerait à tort un argument en faveur!

Le phénomène peut également apparaître en mode STT (tracking pur). Au moment où le signal de retour en provenance de la cible est trop faible ou disparaît, le filtre de KALMAN prend le relais, attendant que le signal reprenne éventuellement de la consistance. Dans ce cas, et si la position de la cible ne diffère pas sensiblement de celle estimée par le filtre de KALMAN, une discontinuité semblable à celle évoquée précédemment risque d'apparaître, avec les conséquences que l'on sait.

III.3.B. Générations de trajectoires fictives.

Le phénomène peut se présenter tant en mode SAM qu'en mode STT.

En mode SAM, on peut imaginer que, quittant la phase de search pour revenir à la phase de tracking, aucun signal ne soit au rendez-vous. Cela signifie que, durant pendant la phase de search, des données ont été générées par le filtre de KALMAN, alors qu'aucune cible n'était présente! Un morceau de trajectoire correspondant à cette période de search sera fabriqué de

toutes pièces par notre modèle, il sera donc fictif.

En mode STT, en cas de perte de la cible, le radar n'interrompt pas son interception, espérant retrouver la cible un peu plus tard grâce à l'action du filtre de KALMAN. Si malgré l'aide de ce dernier (et après un temps déterminé, [redacted]) aucune cible n'est récupérée, le radar entame alors une phase du "CONICAL SCAN", constituant le dernier recours avant la perte définitive de la cible : l'antenne effectue un "fin balayage" autour de la direction présumée et tente de réacquérir la cible qui, par chance, se situerait non loin de la position estimée par le filtre de KALMAN. Dans le cas où aucune cible ne fait son apparition au cours du CONICAL SCAN, une trajectoire fictive aura été générée depuis la perte effective de la cible.

III.3.c. Changement de cible en cours d'interception

Le phénomène est plus délicat à aborder : il suppose une bonne compréhension du fonctionnement du radar.

Il faut se souvenir (cfr annexe A) que la distance et la vitesse relatives mesurées par un radar à impulsions sont par nature ambiguës. Grâce à ses multiples FRI (Fréquence de Répétition des Impulsions), le radar est en mesure de lever ces ambiguïtés. Cette opération est réalisée en tout début de l'interception, au cours de la phase initiale d'acquisition ; et le radar ne la répétera que lors d'une phase ultérieure d'acquisition (passage du mode SAM au mode STT) ou à l'issue d'un conical scan "fructueux".

Le phénomène de changement de cible pourra se présenter dans les conditions suivantes. Prenons, pour les besoins de l'explication, une ambiguïté en distance de 10 nmi et une ambiguïté en vitesse de 300 noeuds. Considérons également le radar en mode SAM, en phase de search. Le filtre de KALMAN estime la position future de la cible en déployant une fenêtre à 4 dimensions (azimut, élévation, distance et vitesse relative), dans laquelle il espère retrouver la cible au prochain tracking. Si tel n'est pas le cas, mais qu'une autre cible possédant environ la même position angulaire, et dont la distance et la vitesse relatives sont respectivement à un multiple près de 10 nmi et de 300 noeuds, le radar aura l'impression d'avoir récupéré la

cible initiale, alors qu'il en est autrement d'interception sera alors composé de cibles différentes, donc de morceaux de trajectoires différentes.

Tenant compte de la présence d'un filtre de Kalman, et des phénomènes qu'il peut entraîner, il est possible d'apporter, pour certaines interceptions du moins, une explication. Nous insistons cependant sur le fait qu'il ne s'agit toujours que d'hypothèses, puisque le déroulement réalisé ci-dessus au sujet du filtre de Kalman est en majeure partie issu de la réflexion, son fonctionnement n'étant que suggéré dans la documentation.

III. 4 TENTATIVE DE RECONSTITUTION DES INTERCEPTIONS

Il est intéressant d'entamer la reconstitution par les interceptions 8, 9 et 10 qui, rappelons-le, correspondent à la "poursuite" d'un F-16 et non d'une cible. Nous profiterons de ces interceptions-témoins pour confirmer l'intervention du filtre de KALMAN en mode SAM. Toutes les explications qui suivent font référence aux graphes de l'annexe C, qui alignent, en fonction du temps, les valeurs de la vitesse relative ("closing speed") en couleur noire, et celle de la vitesse de la cible, calculée par le radar, en rouge. Pourquoi ces deux paramètres ? L'un représente l'ensemble des valeurs mesurées et extrapolées par le filtre de KALMAN : la vitesse relative, et l'autre représente l'ensemble des paramètres calculés par le radar. Le mode utilisé au cours de chaque interception est indiqué par un code de couleur, dont la légende est reprise sur le graphe de l'interception 3 : en bleu, la phase SEARCH du mode SAM ; en vert, la phase TRACKING du même mode, et en ORANGE le mode STT, et en rouge la phase de "CONICAL SCAN".

- INTERCEPTION 10

Le mode de fonctionnement utilisé pour l'interception 10 était le mode S.A.M. La succession des phases de SEARCH et de TRACKING n'est pas indiquée avec le code de couleurs. Néanmoins l'évolution de la vitesse relative montre clairement l'intervention du filtre de KALMAN : des segments linéaires

(Correspondant à l'extrapolation linéaire lors des phases de SEARCH) ainsi qu'une série de mises à jour (correspondant aux phases de TRACKING) se succèdent. La vitesse absolue affiche également des discontinuités (sauf à la 4e seconde)

Face à ces courbes, et connaissant le type de cible [redacted] les valeurs affichées restent tout à fait réalistes pour un F-16!

- INTERCEPTION 7

Cette interception, qui d'après notre modèle était l'une des plus impressionnante, est complètement remise en cause par la présence du fils de KALIMAN. Regardons de plus près le déroulement de cette interception

Juste avant l'interception, un nuage de points apparaît à l'écran de visualisation. Lors du second passage de l'antenne sur ce nuage, le pilote choisit un point au hasard, que le radar semble accepter. Voici les actions successives qu'a entreprises le radar :

Il réalise une première acquisition, phase au cours de laquelle aucune valeur n'est affichée à l'écran. Il envoie une rafale d'impulsions en direction de la cible [redacted], lui permettant d'obtenir une première idée de l'azimut, de l'élévation, de la distance et de la vitesse relatives, nécessaires au calcul des caractéristiques de vol de la cible.

En mode SAM, le radar entame une phase de SEARCH, balayant un volume de l'espace choisi par le pilote ou par défaut. Cette phase correspond, sur le graphe, au trait bleu [redacted]. Le fils de KALIMAN intervient dès la première phase de SEARCH et extrapole la valeur de la vitesse relative. Au terme de la 1e phase de SEARCH, le radar s'attend à retrouver la cible à l'endroit désigné par le fils de KALIMAN. Malheureusement, aucune cible n'est au rendez-vous comme le prouve la phase de TRACKING très brève suivie du CONICAL SCAN. Ce dernier ne suffit pas pour retrouver la cible, à cause de l'absence de mise à jour de la vitesse relative. Celle-ci semble diminuer singulièrement de façon linéaire,

nous indiquant que le filtre de KALMAN est toujours actif. Le même scénario se présente au tour de la nouvelle phase de SEARCH, où le radar n'a guère plus de chance que précédemment : la pêche n'est pas fructueuse, à nouveau aucune cible ne se présente dans la fenêtre de prédiction. Cette fois-ci, à l'issue d'une ultime tentative de réacquisition (second conical scan), le radar traîne les bras et abandonne ses recherches.

Apparemment aucune mise à jour des "input" n'a été réalisée, comme le montre le caractère linéaire de la vitesse relative, et l'absence de discontinuités. On est précisément en présence du phénomène décrit en III.3.B ci-dessus, où il y a de fortes chances que pendant les 8 secondes qu'a duré cette interception, une trajectoire fictive a été générée sur base de l'extrapolation du filtre de KALMAN.

– INTERCEPTION 4

La 4ième interception débute en mode SAM, dont la première phase de TRACKING est fructueuse. L'estimateur de KALMAN prend le relève pendant la phase SEARCH qui suit. Le second TRACKING a manifestement du mal à maintenir la cible, et même le recours au CONICAL SCAN reste vain. Le 3e tracking [redacted] ne parviennent pas à rattraper les "input". Il faudra un passage au mode STT pour mettre les derniers à jour. [redacted]. Une telle mise à jour n'aurait pas été possible en mode SAM, car la discontinuité est trop importante et amène le "nouveau" signal bien en dehors de la fenêtre de prédiction, et donc introuvable. Ce signal ne peut être décelé que si le radar entreprend une nouvelle phase d'acquisition (et donc ne considère plus de fenêtre de prédiction), condition qu'il remplit en passant au mode STT.

La discontinuité de la vitesse relative s'accompagne d'une discontinuité au niveau des autres "input" : le diamant représentant la cible sur l'écran change brutalement de position (17 nmi → 15 nmi), et

les curseurs d'azimut et d'élévation inversent leur course ! Cette discontinuité générale au niveau des "input" nous mène droit vers l'hypothèse du changement de cible (III.B.c).

Deux secondes plus tard, la vitesse relative marque à nouveau une discontinuité (de moindre importance), mais cette fois-ci sans modification brutale au niveau des autres inputs. Il s'agit ici probablement d'une simple mise à jour au sein d'un même mode. Le signal est malgré tout faible car le mode STT est bientôt interrompu pour laisser place au contact scan, qui permet de récupérer un signal, qui s'avère finalement peu convaincant et s'éteint moins de 2 secondes plus tard.

En résumé, il apparaît assez clairement que les 15 premières secondes concernent une cible plus que probablement fictive. La suite est moins évidente à élucider : le radar a bien changé de cible en passant au mode STT, mais sur quel signal a-t-il pu porter son attention ? Les secondes 17 à 23 restent sans véritable explication, faute d'arguments valables.

- INTERCEPTIONS 11 ET 13

Ces interceptions présentent une certaine similitude : au cours des 3 ou 4 premières secondes, la vitesse relative suit une évolution linéaire et puis présente une discontinuité comparable. Il est vraisemblable que la discontinuité corresponde à un changement de cible, le radar "sautant" au passage sur un signal ~~très~~, qui s'avérera très bref (1 seconde dans les 2 cas).

L'interception 13 présente une particularité qui risque de se révéler importante : peu de temps avant la discontinuité (2ème ou 3ème seconde), alors que l'angle d'élévation décroit linéairement vers des valeurs davantage négatives, l'altitude calculée par le radar inverse son évolution : décroissant de 7000 pieds à 0 pieds, elle croît alors pour atteindre 5000 pieds au moment de la discontinuité. En principe, l'altitude et l'angle d'élévation devraient montrer la même évolution ! Le phénomène prend tout son sens si l'on introduit le filtre de KALMAN : si l'on considère l'élévation comme une valeur extrapolée et non mesurée pendant les 5 premières secondes, alors

elle correspond à une cible fictive, qui, immatérielle, est amenée par le filtre de KALMAN sous le niveau de la mer. L'écran du radar n'étant pas habitué à des cibles pouvant descendre sous le niveau "0", aucun signe n'a été prévu devant les 2 "digit" de l'altitude. Il s'agit donc bien d'une altitude qui, comme l'élevation, ne cesse de décroître, mais dont le signe n'est pas affiché. Ceci prouve qu'une cible fictive a été générée au cours des 5 premières secondes.

Tout pour l'interception 12 que pour la 13, une première partie de concerne une cible fictive, et est suivie par un changement sur une autre cible, qui est éphémère.

_ LES AUTRES INTERCEPTIONS (2, 3, 5, 6, 12)

L'interception la plus impressionnante reste l'interception n°3, car pendant plus de 15 secondes, et en mode SAM, une cible a pu être maintenue. La succession des "segments" linéaires au niveau des "inputs" indique clairement l'intervention du filtre de KALMAN. Le maintien d'un signal en mode SAM sur une période aussi importante (en comparaison avec les autres interceptions) est le signe de la présence effective d'une cible. La trajectoire réelle ne correspondra cependant pas à celle reconstituée par notre modèle en raison de l'intervention du filtre de KALMAN.

Les interceptions 5, 6 et 12 présentent des similitudes :

- le mode utilisé est le STT,
- la cible a été sélectionnée un peu hâtivement par le pilote. Ce dernier n'a pas attendu que le radar confirme à plusieurs reprises la présence d'une cible potentielle. Au contraire, dès la première apparition à l'écran d'un symbole représentant une cible, le pilote a tenté l'interception, alors qu'il pouvait simplement être en présence d'"anges", comme les appellent communément les pilotes.
- les interceptions sont de courte durée : entre 3 et 6 secondes.
- la vitesse relative a un caractère constant et proche de 300 kts.

Certains doutes apparaissent légitimes devant ces ressemblances :

- les "anges", c'est à dire des points apparaissant çà et là sur l'écran (le plus souvent à distance importante), sont fréquents au cours d'un vol et n'inquiètent en général pas les pilotes. Il se fait que dans le cas de la poursuite, ces derniers, un peu sous pression, n'ont pas eu la patience d'attendre un ou l'autre balayage supplémentaire de l'antenne, qui aurait permis de confirmer si les points observés à l'écran correspondaient à des cibles potentielles, ou à des "anges". La plupart des anges proviennent de réflexions parasites sur le sol. En raison de l'irrégularité de celui-ci, les échos n'apparaissent que de façon épisodique et timide, ~~comme~~
- un second argument saurait semer une confusion avec le sol : le caractère constant de la vitesse relative. Ne serait-ce pas tout simplement le reflet de la propre vitesse du F-16 sur le sol ?

La 2e interception est, au même titre que la 3e, impressionnante. Un signal est effectivement présent en début d'interception : le symbole de la cible apparaît au cours de plusieurs balayages successifs de l'antenne. 2 caractéristiques ressortent des courbes : le caractère constant de la vitesse relative, et le caractère linéaire de la vitesse de la cible ainsi que des angles d'azimut et d'élévation. Doit-on y ajouter une note en faveur de la théorie de KALMAN ? Difficile à affirmer. Le caractère constant de la vitesse relative (observé au cours des interceptions 2, 5, 6 et 12), ainsi que sa valeur (proche de 300 kt) pourraient laisser croire, comme suggéré ci-dessus, à de simples contacts avec le sol. Il est possible de vérifier cette hypothèse puisque connaissant les angles d'observation de l'antenne ~~à la cible~~ au moment de l'interception, on peut déterminer la vitesse relative dans le cas où la cible ne serait en réalité autre que le sol, par la formule suivante :

$$V_R = V_{F\text{-}16} \times \cos(az) * \cos(el).$$

estimation correspond à la valeur affichée. De plus, l'altitude affichée au cours de ces interceptions n'est pas celle au niveau du sol.

Par ailleurs, rappelons-nous que le radar est équipé d'un dispositif de suppression des échos fixes ("Clutter cancelling"), permettant à tout moment d'écarter toute cible qui présenterait ~~les mêmes caractéristiques~~ la même vitesse relative que le sol. En guise de précaution supplémentaire, le radar place autour de cette vitesse relative correspondant au sol, un filtre [redacted], pour écarter d'éventuels ~~objets mobiles~~ réfléchis circulant au niveau du sol. Le radar rejette donc théoriquement les échos réfléchis par le sol.

Cependant, si nous nous souvenons du phénomène d'inversion thermique qui s'est manifesté la nuit même de la poursuite, le modèle suivant permet d'accepter l'hypothèse des interceptions avec le sol.

Sur la figure 16, l'inversion thermique se présente entre le sol et le F-16. Les indices de réfraction sont tels que $n_2 = k.n_1$, $k>1$. Dans ce cas, les ondes électromagnétiques s'incurvent vers le bas, avec pour conséquences :

- une erreur sur la position de la cible ($P' \neq P$)
- une surestimation de la distance ($a+b>d$)
- une sous-estimation de la vitesse relative ($V_{F16} \cdot \cos(90°-\alpha) < V_{F16} \cdot \cos(\alpha)$)

En présence de la couche d'inversion thermique, le sol est observé avec une vitesse relative sous-estimée. Ainsi, il est possible que la vitesse $V_{F16} \cdot \cos(90°-\alpha)$ ~~de référence~~ échappe au "Clutter cancelling" et au filtre centré en $V_{F16} \cdot \cos(\alpha')$

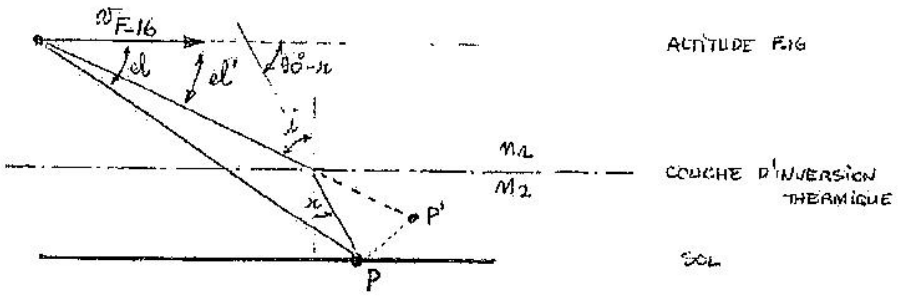

F-16
el
el'
90°-n
i
n1
n2
r
P'
P
ALTITUDE F-16
COUCHE D'INVERSION THERMIQUE
SOL

figure 16

Autrement dit, le modèle d'ordre 1 (ci-dessus) serait associé à l'image d'une couche d'épaisseur thermique irrégulière, qui donnerait au radar une image "mobile" du sol. (Par analogie avec l'objet qui est fixé au fond de la baignoire, mais qui semble bouger lorsque la surface de l'eau est agitée !)

III.5 CONCLUSION

De l'ensemble des interceptions, nous retiendrons que l'utilisation du mode SAM entraîne certaines erreurs d'interprétation, dues au l'intervention du filtre de KALMAN. En comparant la durée des interceptions SAM à celle des interceptions STT, on peut croire que le mode SAM prolonge les interceptions de façon artificielle par une suite d'extrapolations.

Bien que peu documentés sur le fonctionnement précis du filtre de KALMAN, nous savons qu'il intervient dans les calculs réalisés par le radar, et qu'il constitue une source importante d'erreurs, menant à de mauvaises interprétations.

Il est important de préciser, pour éviter tout malentendu, que les explications fournies au point III.4 au sujet des interceptions ne sont que des spéculations.

IV. CONCLUSIONS

IV CONCLUSION

Nous avons établi un modèle afin de vérifier la crédibilité des résultats annoncés par le radar. En raison des nombreuses et inévitables imprécisions sur les données de base relevées à l'écran de simulation, certaines divergences apparaissent, mais sont expliquées.

Des données plus précises et en plus grand nombre (par exemple des données précises de la portion entretenue du F-16 au cours des interceptions) nous auraient permis de rapprocher davantage les résultats issus du modèle, de ceux du radar. Le problème – s'il problème il y a eu – doit se trouver en amont de ce complexe traitement numérique des données : l'ordinateur a fonctionné correctement, mais lui a-t-on présenté des données de base cohérentes? Ces dernières parviennent du monde extérieur, mais sont soirées au passage par le filtre de KALMAN - qui, comme nous l'avons constaté, est à l'origine d'interprétations non fondées!

L'ensemble des données à notre disposition ne nous permet pas d'approfondir davantage le sujet. Si le filtre de KALMAN est effectivement responsable des caractéristiques impressionnantes affichées, il est alors possible de le vérifier, en amenant le radar F-16, au cours d'un vol d'essai, dans la configuration qu'il avait précédemment la nuit du 30 au 31 mars 1970, et en l'obligeant à intercepter des "anges" ou le feuillis du sol. Si les paramètres de vol des cibles, affichés au cours de ce test ne montrent aucune anomalie, on s'excusera auprès de Mrs. KALMAN pour les préjugés que l'on a eus à son égard. Cependant, il ne faut pas oublier qu'une fois encore théorique était

présente de nuit du 30 au 31 mars 1990, et peut avoir joué un rôle non négligeable. Il faudrait, de préférence, organiser de vol-test une nuit au cours de laquelle est susceptible d'apparaître une inversion thermique.

La présente étude n'aura pas élucidé tous les mystères, mais ~~aura~~ permettra d'avoir un jugement plus critique sur les résultats affichés, qui sont parfois loin de représenter la réalité.

En ce qui concerne les O.V.N.I., qu'est-il permis de conclure ? Il est tentant de rapprocher les observation relevées au moyen du radar F-16 aux témoignages oculels qui ont été recueillis en grand nombre au cours de la même nuit. La présente étude ne permet pourtant pas de le faire. Au contraire, ~~l'idée d'une~~ la possibilité d'une erreur d'interprétation en ressort de plus en plus probable.

~~Nous ne mettons pas en doute les témoignages oculels, mais nous aimerions en terminer par un mot d'humour noir de~~

ANNEXES

A. LE RADAR F-16, QUELQUES EXPLICATIONS.

B. RÉSULTATS DU MODELE.

C. INFLUENCE DU FILTRE DE KALMAN.

ANNEXE A :

LE RADAR F-16, QUELQUES EXPLICATIONS

ANNEXE A :
LE RADAR F-16, QUELQUES EXPLICATIONS.

Le radar est actuellement un des outils indispensables dans l'équipement d'un avion de combat. Il vient en aide au pilote en reprenant des tâches qu'il n'est pas en mesure de réaliser. Ainsi détecte-t-il les cibles de nuit comme de jour alors qu'elles ne sont pas directement visibles pour le pilote. Il calcule en même temps une série de paramètres necessaires au tir, et fournit au pilote les informations suivantes au sujet des cibles: position, distance, vitesse, direction de vol, etc. Grâce à cet outil très precieux, un grand nombre d'informations a pu être obtenu sur la trajectoire des cibles poursuivies et considérées comme OVNI.

Cette annexe a pour but principal de montrer comment le radar traite les échos reçus et les considere ou non comme issus de cibles potentielles.

Après une brève description des divers modes de fonctionnement du radar, le processus de traitement des signaux sera décrit, de la réception des échos au niveau de l'antenne, jusqu'à la détection ou la réjection d'une cible éventuelle.

1.MODES DE FONCTIONNEMENT

Le radar qui equipe le F-16 dispose de plusieurs modes de fonctionnement: le mode AIR-TO-AIR (Mode de Combat Aerien), et les modes AIR-TO-GROUND (Mode Air-Sol). Lors de la poursuite du 30-31 mars 1990,le radar est resté en mode Air-to-Air. Ce mode est divisé en sous-modes, qui définissent les différentes configurations du radar. Le radar passe d'une configuration à l'autre de façon soit automatique, soit manuelle. Ces sous-modes sont les suivants:

-SEARCH: (Surveillance ou Recherche) L'antenne du radar effectue le balayage d'une zone définie (par défaut ou par le pilote), en azimuth et en élévation. Au cours de ce balayage, le radar enregistre les échos rentrants, et les traite de façon à afficher sur l'écran radar les cibles potentielles. Ces cibles sont présentées symboliquement au pilote par un carré blanc, positionné en abcisse de l'écran selon leur azimuth, et en ordonnée selon leur distance par rapport au F-16. Le radar a la possibilité d'afficher jusqu'à [redacted] cibles. Il peut en outre maintenir sur l'écran les traces de cibles rencontrées lors d'un balayage, [redacted]. Cette possibilite permettra au pilote de remarquer si l'une ou l'autre des cibles est systématiquement rencontrée lors de chaque balayage, dans quel cas il choisira une des 2 alternatives suivantes correspondant à 2 autres sous-modes: STT (Single Target Tracking, ou Poursuite Monocible sur infos continues PSIC); SAW (Situation Awarness Mode, encore appelé SWT, Search While Track, ou Poursuite Monocible sur infos discontinues, PSID).

-SAM: Avant de passer dans ce mode, le pilote aura préalablement choisi sur son écran la cible qu'il veut analyser "de plus près". L'antenne scrutera le même volume que précédement, mais centré autour de la cible choisie, et le radar marquera l'arret sur cette cible à chaque balayage de la zone. D'un point de vue tactique, ce sous-mode de fonctionnement permet au pilote de maintenir une"vue" sur l'ensemble des cibles potentielles tout en laissant à l'ordinateur la possibilité de surveiller la cible sélectionnée.

-STT : De la même façon que pour le sous-mode SAM, le pilote se choisira une cible parmi l'ensemble des cibles potentielles que lui présente l'écran. Cette cible attirera dans ce cas l'entière attention de l'ordinateur du radar. D'un point de vue tactique, ce sous mode a l'avantage de rafraichir plus souvent les valeurs des paramètres calculés. (Il est donc précis, surtout dans le cas où la cible est très manoeuvrante), mais, il a l'inconvénient de ne plus avertir le pilote de la présence d'autres menaces éventuelles !

-ACM : (Air Combat Mode, encore appelé Automatic Short Range Mode) : Ce sous mode peut être choisi directement par le pilote. Le radar commence par scruter une région de l'espace, et acquiert de façon automatique la cible la plus proche qui se présente dans la zone balayée.

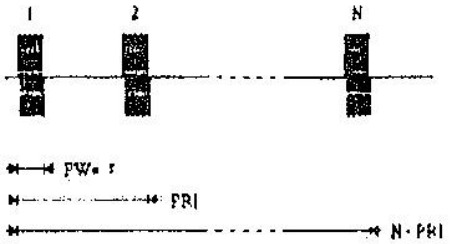


figure A1

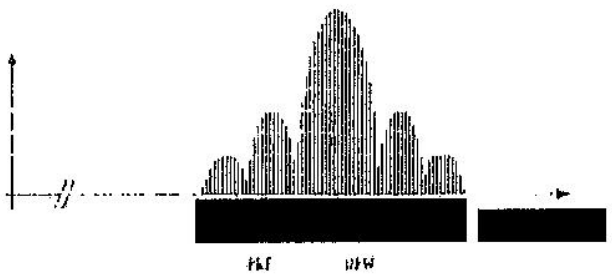


Figure A2.

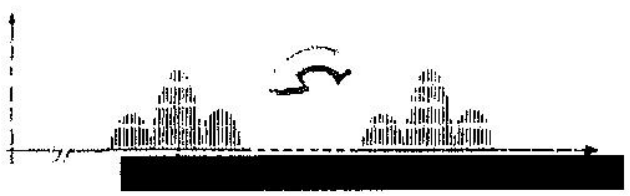


Figure A3

2. FONCTIONNEMENT DU RADAR : LE TRAITEMENT DES SIGNAUX.

Le RADAR utilisé par le F-16 est un Radar Doppler à Impulsions (RDI) (en Anglais, Airborne Interceptor Pulse Doppler Radar, AIPD) . La compréhension du traitement des signaux reçus est primordiale afin d'éviter toute interprétation fortuite des données présentée sur l'écran.

A. STRUCTURE DU SIGNAL ÉMIS.

Le RADAR engendre un signal sinusoidal microonde (fréquence de plusieurs GHz) modulé par un train d'impulsions. La figure A1 montre ce signal et ses différents paramètres, à savoir:

- LI : La largeur d' impulsions du train également appelée PD du Pulse Duration (en anglais PW: Pulse Width) ordre de grandeur: quelques μsec . Elle est constante au moins pendant une rafale, ou train..
- PRI: La période de répetition des impulsion en anglais: "pulse repetition interval" ou le temps qui sépare l'émission de 2 impulsions du train (ordre de grandeur : quelques dizaines de μsec à 1msec).
- FRI: Fréquence de recurrence des impulsions, fréquence de répétition des impulsions du train, =1/PRI (ordre de grandeur : quelques KHz).
- N : Nombre d' impulsions dans le train.

Du choix de la 'LI' dépendra la résolution en distance du radar. De même, le choix de la 'FRI' sera déterminant pour l'ambiguité en distance et en vitesse .

Le spectre du signal émis est représenté sur la figure A2. (On remarquera que ce spectre correspond à un train d' impulsions de durée

infinie. Dans le cas d'un train de durée limitée, chaque raie interne du SIN(x)/x aura elle-même la forme d'un SIN(x)/x.).

B. RÉCEPTION DES ÉCHOS RADAR.

Après avoir touché la cible, le signal émis revient, largement atténué, mais riche en informations. En effet, la comparaison du signal reçu et du signal émis va permettre d'extraire l'information de la "distance relative" ainsi que la vitesse relative de la cible par rapport au F-16. L'information de la distance est déduite du retard existant entre le signal reçu et le signal émis. De même, l'information de la "vitesse relative" se trouve dans le décalage fréquentiel entre les spectres du signal reçu et du signal émis.

La réception se déroule en deux parties : l'une analogique et l'autre numérique. Le traitement analogique a pour but de conditionner le signal reçu pour le préparer au traitement numérique. Ce dernier traitement isolera l'information de distance et de vitesse de la cible.

a. Le conditionement analogique.

Cette partie du traitement du signal reçu comprend 2 étapes principales qui sont :

- Une première transposition en fréquence, dont le but est de 'ramener' le signal reçu à une fréquence où il est plus commode de travailler. On appelera $f_{\emptyset}$ la fréquence à laquelle s'effectue la transposition.
- Une 'détection synchrone' qui apprêtera le signal reçu au traitement numérique.

a.1 Transposition en fréquence.

La figure A3 illustre l'influence de cette opération su le spectre du signal reçu.

a.2 La détection synchrone.

La détection synchrone a pour but de ramener le signal sous une forme telle que l'information (vitesse,distance) soit accessible par le traitement numérique ultérieur. Il est clair que l'information de distance sera extraite en mesurant un délai correspondant au temps de parcour aller-retour des impulsions. Voyons à présent où se cache l'information sur la vitesse relative. Prenons par exemple une cible se rapprochant du radar à vitesse constante. Dans ce cas, la fréquence du signal de retour paraitra plus élevée que la fréquence du signal emis. L'information de vitesse relative sera donc contenue dans la différence de fréquence entre le signal reçu et le signal émis. Ceci n'est pas tout-à-fait rigoureux. en effet, si nous émettons l'hypothèse que cette même cible subit une accélération en direction du radar, le décalage fréquentiel sera croissant puisque proportionellement à la vitesse de rapprochement de la cible. De manière générale, l'information sur la vitesse Doppler résidera dans la différence de phase entre celle du signal reçu et celle du signal émis. La détection synchrone permet précisément d'avoir accès à la phase du signal.

Pour la simplicité de l'écriture, considerons un signal de retour non impulsionnel (donc continu) en sortie de l'étage de transposition en fréquence. Notons-le $COS(\omega_0 t+\Phi(t))$ où $\Phi(t)$ vaut $\int f_d.dt$, (f_d=fréquence Doppler). Si l'on observe le signal de retour pendant un temps suffisamment court, on peut considérer la fréquence Doppler comme étant constante, en dépit de la remarque sur l'accélération éventuelle de la cible mentionnée plus haut. De cette façon on pourra écrire $\Phi(t)=f_d.t$. Une manière de récupérer la phase Doppler est de se mettre à vibrer à fréquence intermédiaire et d'observer le signal reçu. C'est précisément ce que l'on fait en 'mélangeant' le signal $COS(\omega_0 t+\Phi(t))$ avec le signal de référence $COS(\omega_0 t)$. Ce mélange fournit le signal en phase $I=COS(\Phi(t))$, qui vibre justement à la fréquence Doppler. Il suffit donc maintenant de mesurer cette fréquence pour déterminer la vitesse Doppler. Cette opération s'effectue de façon numérique, et sera abordé par la suite. Si nous nous contentons du signal $COS(\Phi(t))$, nous serons dans l'impossibilité de déterminer le signe de la vitesse relative (donc de déterminer si la cible s'approche ou s'éloigne). Il est donc indispensable de se procurer

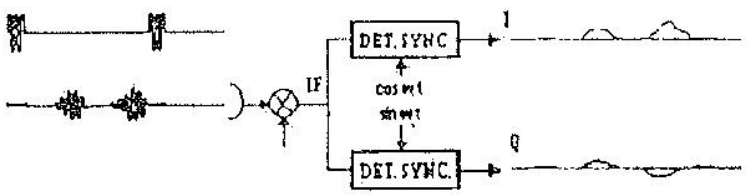


Figure A4

le signal en quadrature Q=SIN(Φ(t)) pour restituer intégralement la phase Φ(t). Il suffit pour ce faire de procéder à une seconde détection, mais cette fois à l'aide du signal de référence en quadrature SIN(ω_0t).

Avant d'entamer le traitement numérique du signal, résumons en un schéma les étapes du traitement analogique, aboutissant sur les signaux I et Q. (Figure A4).

b. Le traitement numérique.

Il est inutile de rappeler que l'écho de retour est un signal complexe constitué du retour d'un nombre parfois important de surfaces. Parmi ces surfaces, on peut citer le sol, les cibles mobiles au sol (véhicules) et les cibles aérienne. Les différents échos proviennent donc de surfaces qui peuvent se distinguer d'une part par leur distance vis-à-vis du radar, d'autre par l'effet Doppler qu'elle induisent.

b.1 Les "Porte en distances" et les "bancs de filtres Doppler".

L'ordinateur commence par trier les signaux qui lui parviennent, d'une part en distance, et d'autre part en fréquence. Pour effectuer le tri en distance, il échantillonne le signal au fur et à mesure qu'il lui parvient. De cette manière, il scrute des zones de plus en plus éloignées du radar, et distantes l'une de l'autre d'une LI. Ces zones sont ce que l'on appelle des portes de distance (en anglais : "Range gate"). Les échos qui proviennent de surfaces situées à la même distance du radar se retrouvent dans la même porte. En travaillant de cette manière, le radar ne dispose de l'information sur une cible située dans une porte de distance déterminée, qu'au moment où les retours d'impulsion correspondent à cette zone. Les échantillons concernant une même porte de distance seront dès lors espacés de 1 PRI, ce qui conrrespond, pour chaque porte à une fréquence d'échantillonnage égale à à la FRI. Un signal réel échantillonné à cette fréquence devrait, selon le théoréme de Nyquist, vibrer à une fréquence maximale de FRI/2 pour éviter le phénomène de replis des spectres. Dans notre cas, nous disposons d'un signal complexe, constitué des signaux en phase I et de ceux en quadrature Q. Il en résulte que l'on possède deux fois plus d'informations, et un signal situé dans

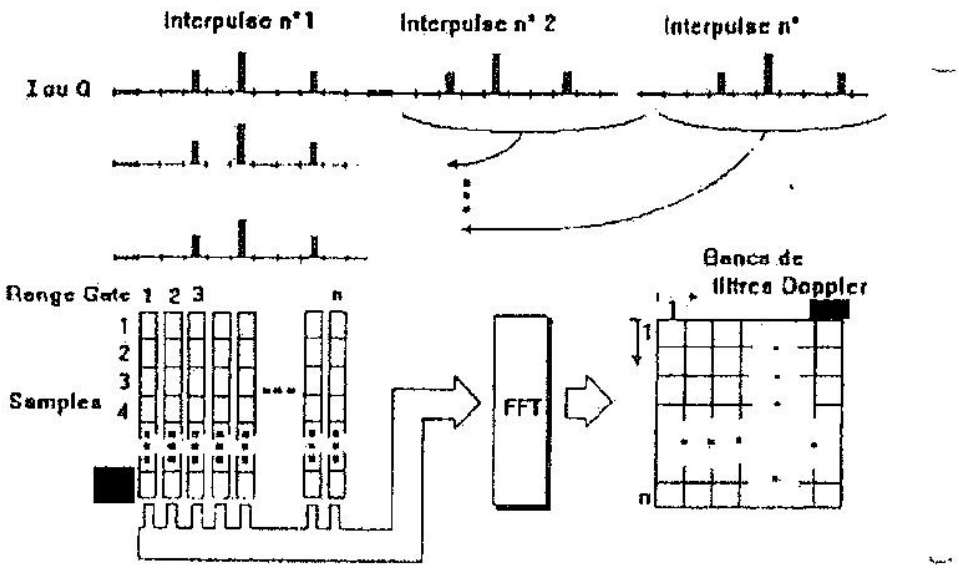

Interpulse n°1
Interpulse n° 2
Interpulse n°
I ou Q
Range Gate 1 2 3
n
Samples
1
2
3
4
FFT
Banca de
filtres Doppler
1
n

Figure A5

une bande passante de largeur égale à la FRI sera échantillonné à fréquence FRI sans replis de spectre.

Pour effectuer le tri en fréquence, le radar effectuera une Transformée de Fourier Discrète sur base des [redacted] échantillons I et des [redacted] échantillons Q de chaque porte de distance. Il obtiendra de cette façon [redacted] échantillons complexes à partir desquels il déterminera [redacted] échantillons de l'amplitude du spectre du signal sur une bande passante totale de FRI. Pour chaque porte de distance il fournira ce qu'on appelle un "banc de filtres Doppler".(Figure A5).

b.2 Circuit "suiveur et suppresseur de fouillis" (Clutter tracker et clutter canceller).

Une subtilité permet au radar de transposer le banc de filtres en fréquence de façon à placer la zone de fréquence correspondant au "fouillis de lobe principal d'antenne" (Main Beam Clutter), c'est-à-dire au retour du sol dans le lobe principal de l'antenne, à fréquence Doppler nulle. Ainsi, il pourra comme on le verra, éliminer une grosse partie du signal parasite, ce qui est surtout important lorsque l'antenne pointe vers le bas. La fréquence Doppler du fouillis de lobe principal est donnée d'une part par la vitesse de l'avion, et d'autre part par l'angle de dépointage de l'antenne radar au moment où le lobe principal illumine le sol (voir plus loin). L'adaptation du banc de filtres devra donc se faire de façon dynamique en fonction de ces paramètres. En pratique, pour s'assurer que le déplacement en fréquence des échos de fouillis soit parfaitement annulé (compensé), le radar emploie un "circuit suiveur de fouillis" (clutter tracker) qui consiste en un détecteur de distance en fouillis ("CLUMP DETECTOR") et un détecteur de fréquence nulle ("ZERO FREQUENCY DETECTOR"). Le Clump Detector examine l'ensemble des portes en distance pendant les 32 premières PRI d'un train d'impulsions (qui en contient au minimum [redacted]) et indique dans quelles portes en distance se trouve probablement le fouillis de lobe principal. Le Zero Frequency Detector détecte, sur ces portes en distances, la présence d'un éventuel déplacement en fréquence par rapport à celle du signal émis, et engendre un signal d'erreur qui modifie le signal de référence au niveau de la détection synchrone. Grâce à la transposition dynamique de son banc de filtre Doppler,

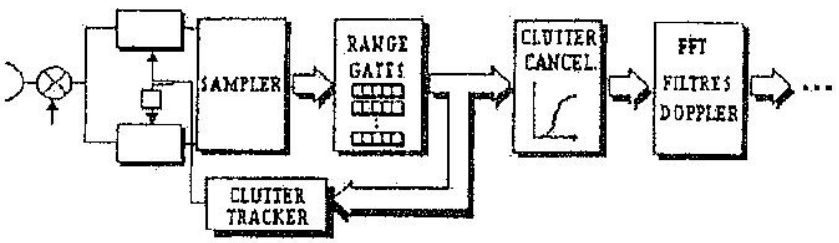


Figure A6

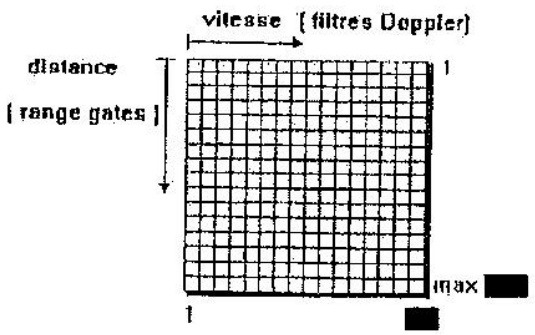


Figure A7

le radar du F-16 annule en permanence le déplacement fréquentiel du fouillis du lobe principal dû à l'effet Doppler. Il suffit donc d'appliquer un filtre passe-haut numérique appelé "suppresseur de fouillis" (CLUTTER CANCELLER) pour s'en débarrasser! L'inconvénient majeur est que les cibles qui auraient le même décalage Doppler que le fouillis de lobe principale (il s'agit donc de cibles mobiles ayant une vitesse transversale par rapport à l'axe avion-cible) passeront inaperçues!
Résumons les opérations rencontrées jusqu'à présent. (Figure A6).

b.3 Matrice "Range velocity", ou CFAR.

A l'issue de la FFT, le radar construit une matrice distance/vitesse au sein de laquelle chaque élément d'indice i,j correspond à l'amplitude vue dans le j ème filtre du banc Doppler et au moment où la porte en distance n° i, était ouverte Cette matrice est représentée à la figure A7.

Sur base de cette matrice d'amplitude construite pour chaque train d'impulsion émis, le radar va effectuer une première validation des échos reçu en tant que cible par la comparaison de chaque amplitude vis-à-vis d' un certain seuil.

Si l'amplitude de l'élément (i,j) de la matrice dépasse le seuil, cela signifie qu'une cible se trouve à une distance correspondant à la i ème porte en distance et dont la vitesse relative correspond à la frequence du j ème filtre du banc Doppler. Ces deux correspondances ne sont pas univoques: on dit qu'il y a ambiguité en distance et/ou en vitesse.

b.4 Ambiguités en distance et en fréquence, description du clutter.

La vitesse relative de la cible et sa distance par rapport au radar sont en effet déterminées de façon ambigue.

En distance, l'ambiguité dépend de la valeur de la PRI choisie: il est en effet impossible de déterminer dans quelle mesure un écho reçu correspond à la dernière impulsion émise ou d'une impulsion antérieure. Il en résulte que seules les cibles dont la distance au radar est telle que le temps de transit aller-retour de l'impulsion est inférieur à la PRI, ont une distance apparente

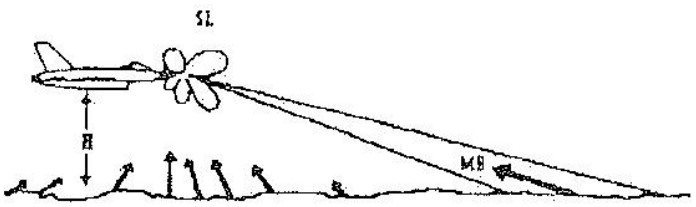


Figure A8

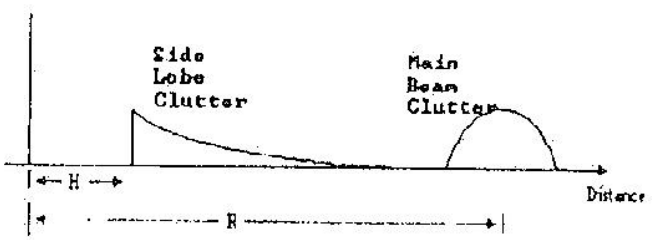


Figure A9

égale à la distance réelle. Les autres cibles verront leur distance apparente égale à leur distance réelle, mais "modulo" la distance maximale apparente.
Quant à la vitesse relative, elle est également déterminé de façon ambigue pour la simple raison que le système entier se comporte comme un échantilloneur à fréquence FRI. En effet, que fait le système sinon sonder son environemment de façon régulière, précisement toutes les PRI secondes? Il en résulte que l'information de décallage fréquentiel Doppler en provenance de l'environnement lui parvient à la même cadence et donc peut-être assimilée à un signal échantillonné à la fréquence FRI. Ainsi, une cible s'éloignant à une vitesse telle que le décalage Doppler est de 12 kHz, apparaitra à 2 kHz dans le banc de filtres Doppler d'un radar dont la FRI est de 10 kHz. Tous les décalages Doppler seront en conséquence à considérer modulo FRI, d'où l'ambiguité annoncée.

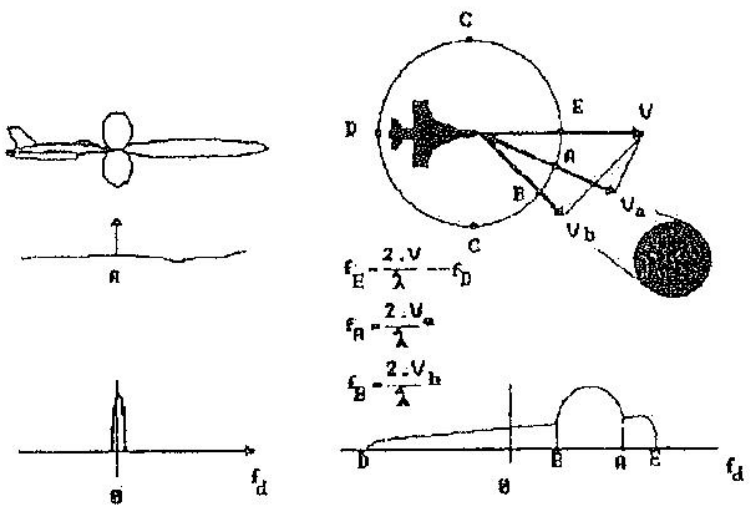
Ces deux types d'ambiguité seront plus ou moins génants selon la FRI utilisée.

Comment apparait la matrice CFAR? Dans le cas le plus défavorable, où l'antenne pointe sous l'horizon, cette matrice comprendra la décomposition des signaux renvoyés par le sol, tant par le lobe principal que par les lobes secondaires.
Tâchons de la reconstituer. Cela se fait en trois étapes: en premier lieu, nous considèrons le profil en distance du "fouillis"; ensuite, son profil en vitesse, et finalement nous reconstituerons la matrice. Un radar "Doppler à impulsions" se construit une image de ses cibles dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel.

En raison du caractère ambigu de la mesure réalisée, il faut distinguer les profils réels et apparents. Prenons le cas général d'un chasseur survolant le sol à une altitude H, l'antenne pointant légèrement vers le bas. (Situation reprise à la figure A8.)

a. Profil réel des distances.

Les lobes secondaires (SL) vont accepter et intégrer les impulsions réfléchies par toute la surface du sol. Les plus importantes proviendront bien entendu de la surface la plus proche, c'est-à-dire de la verticale sous l'avion.



a. b.

Figure A10

Quant au lobe principal (MB), il recevra les échos provenant d'une portion de surface beaucoup plus éloignée, dont la distance variera avec l'angle d'observation.
Le profil de distance (réel) ainsi constitué est représenté à la figure A9.

b. Profil réel des fréquences.

Tracer un seul profil des fréquences n'a pas réellement de sens puisque comme on l'a vu, le signal reçu dans chaque porte en distance est décomposé en ses composantes spectrales.
Montrons néanmoins à quoi ressemble ce profil pour 2 portes en distances choisies aux distances suivantes:

- région située à la verticale de l'avion (SLC) (Figure A10a.)
- région illuminée par le lobe principal. (Figure A10b.).

Un petit mot d'explication concernant ces profils.

Le point qui est le premier à être touché par le signal d'émission est évidemment le point situé juste à la verticale du radar; il est vu par les lobes secondaires de l'antenne. En vol horizontal, à altitude constante, le signal renvoyé par ce point n'affichera aucun décalage spectral. Bien que reçu par un des lobes secondaires, ce point est le plus proche et donc, on devra s'attendre à recevoir une puissance non négligeable.

Le second profil est tracé de la manière suivante: tous les points au sol situés à une même distance du radar se trouvent sur un cercle centré sur l'antenne du radar. Le lobe principal recueillera les signaux en provenance des points situés entre A et B, alors que les signaux issus des points situés sur le reste du cercle seront reçus par les lobes secondaires. Il en résulte le profil de la figure A10b, où les points C ont une vitesse relative nulle et donc se retrouvent à fréquence Doppler nulle; le point D a une vitesse relative de -v (en négligeant l'angle d'élévation de l'antenne) et envoie le signal par les lobes secondaires les plus faibles; le point E a une vitesse relative de +v et correspond à un lobe secondaire plus important (d'où l'amplitude plus élevée par rapport au point D). Enfin,le point A ayant une vitesse relative plus importante que B par rapport au radar, le décalage spectral correspondant sera plus important. De plus, la zone comprise entre A

a.

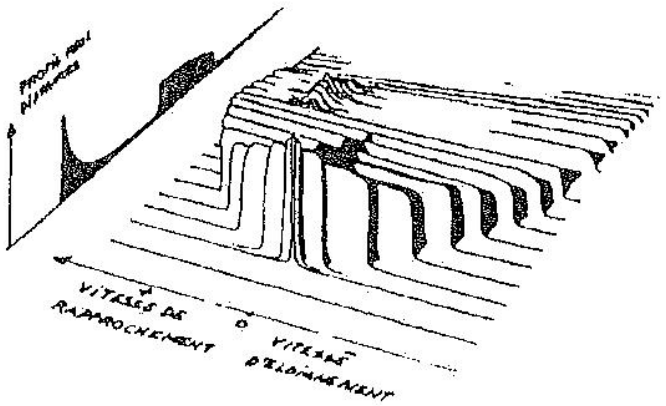
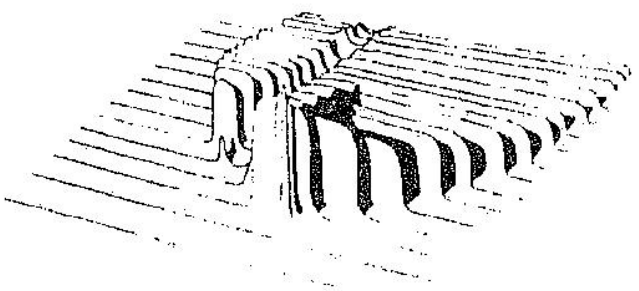


Figure A11

b.



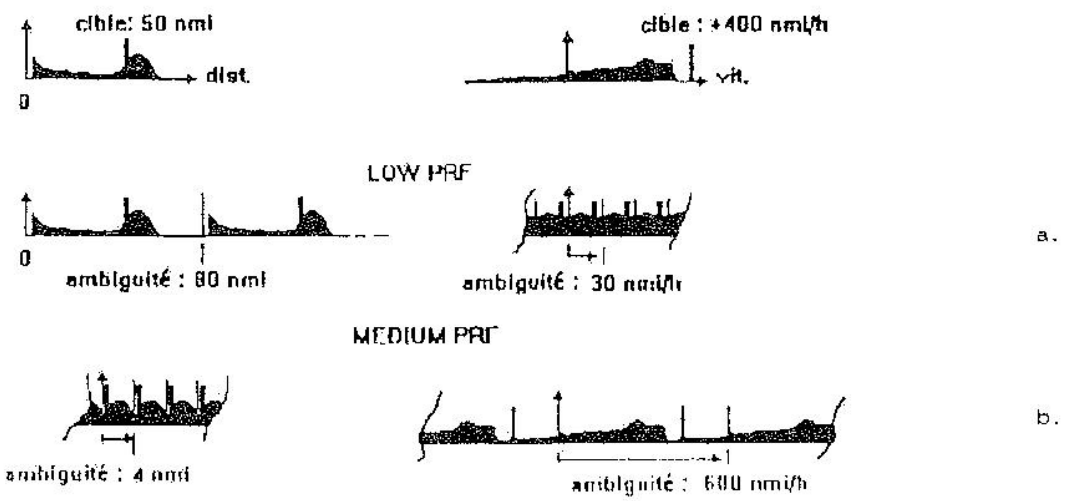


Figure A12

et B est observée par le lobe principal, d'où la différence d'amplitude par rapport au reste du spectre.

c. Profil combiné réel.

Si, pour chaque porte en distance, nous développons le profil en fréquence, nous construisons le profil combiné, qui correspond en pratique à la matrice CFAR décrite précédement, mais ici sans ambiguité, ni en distance, ni en fréquence Doppler.

La figure A11a montre ce profil combiné, avec en regard le profil en distance.

Il est important de préciser que la position de la "bosse" due au fouillis du lobe principal, dans cette matrice, peut-être connue à tout moment par le radar, puisqu'elle dépend de l'altitude du radar, de l'angle d'orientation de l'antenne, de la vitesse de l'avion et de la FRI utilisee. Cette bosse se déplacera de façon continue dans une portion limitée de cette matrice. L'objectif du circuit suiveur de fouillis décrit précédemment sera précisément de suivre cette "bosse" et de transposer le spectre de manière à annuler le décalage fréquentiel Doppler., A ce moment, un filtre numérique passe-haut, le suppresseur de fouillis éliminera le fouillis de lobe principal ainsi que tous les éléments de la matrice correspondant à cette fréquence.(Figure A11b).

d. Profil apparent.

En pratique, la matrice CFAR sera ambigue. En effet, rappelons que la distance maximale apparente que le radar peut considérer est dmax = 1/2 . C/FRI. Le radar attribuera donc à toutes les détections une distance inférieure à la distance maximale apparente. De même, au niveau du décalage Doppler, le radar ne pourra détecter que dans une bande passante limitée à FRI. Il en résulte que la matrice CFAR sera limitée en distance et en vitesse et que ce "pavé" de l'espace distance-vitesse reprendra toute cible modulo PRI en distance, et modulo FRI en fréquence.

La figure A12 illustre les effets désagréables de ces ambiguités, selon la FRI choisie (a:basse FRI (low PRF), b:moyenne FRI (medium PRF)).

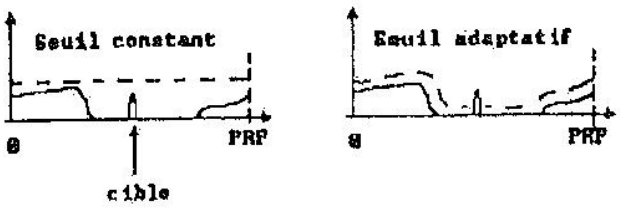


Figure A13

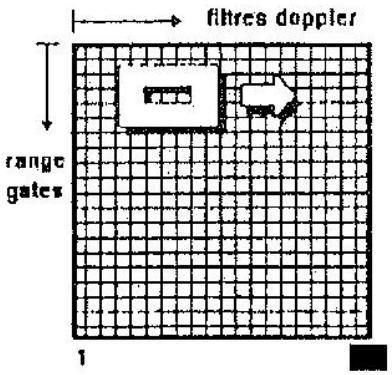


Figure A14

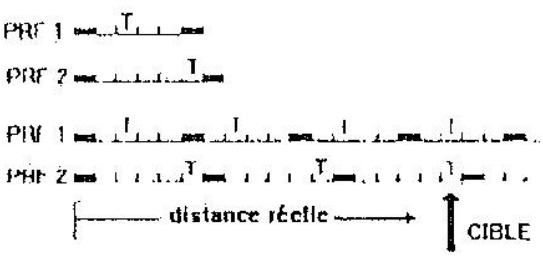


Figure A15

Le radar du F-16 [redacted]. On dit que le F-16 utilise un radar doppler à impulsions [redacted]. Le reste de ce paragraphe consacré au traitement numérique se base sur l'utilisation d'une FRI moyenne, cas le plus général, puisque dans ce cas les ambiguités perturbent les opérations tant en distance qu'en vitesse.

b.5 Notion de seuil adaptatif.

Afin de conserver un taux de fausse alarme constant malgré la présence de fouillis dans la matrice CFAR, il est nécessaire d'ajuster le seuil de détection en fonction du niveau de ce premier. Le seuil est en effet différent pour tous les élément de la matrice CFAR; on dit qu'il est "adaptatif". L'idée est de "recouvrir" la partie de la matrice contenant le fouillis de lobe principal d'un seuil adaptatif dans les deux dimensions. Voyons l'importance du seuil adaptatif, sur un profil de vitesse, par exemple.(Figure A13).

Pour identifier une cible potentielle dans la matrice CFAR, le radar parcourt la matrice à l'aide d'une fenêtre (figure A14), qui possède en son centre une ouverture laissant apparaitre le contenu de 3 filtres dopper adjacents. La plus grande amplitude de ces trois filtres Doppler est comparée à un seuil qui vaut la moyenne des amplitudes des filtres Doppler contenus dans le reste de la fenêtre, multipliée par une constante. La fenêtre est alors déplacée de 3 filtres vers la droite et l'operation est repetée. Ayant épuisé tous les "triplets" de filtres adjacents correspondant à la même porte en distance, le radar memorise la valeur la plus élevée des amplitudes détectées. Si cette valeur est supérieure au seuil, il associera à cette porte en distance un bit de detection "1" et mémorise l'amplitude détectée. Il procédera de la sorte pour les autres portes en distance de la matrice.

A ce niveau-ci, le radar a détecté la présence de cibles dans certaines portes en distance. Ces cibles potentielles détectées ne peuvent plus provenir du fouillis de lobe principal mais il se pourrait qu'un élément bon réflecteur radar, donc particulièrement "brillant" renvoie un signal dont l'amplitude soit supérieur au niveau du seuil adaptatif, il peut alors subsister une fausse alerte. Ce problème sera résolu ainsi que les ambiguités en distance dans les corrélateurs a, b et c.

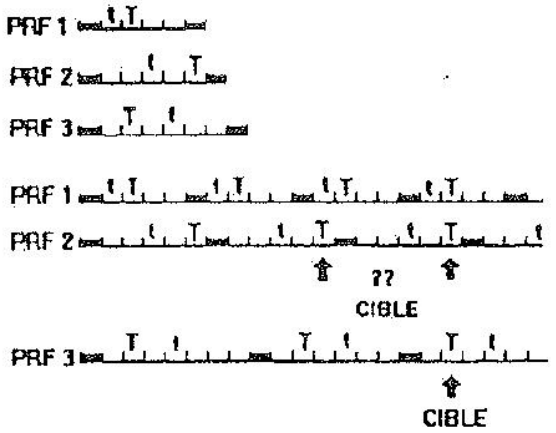


Figure A16

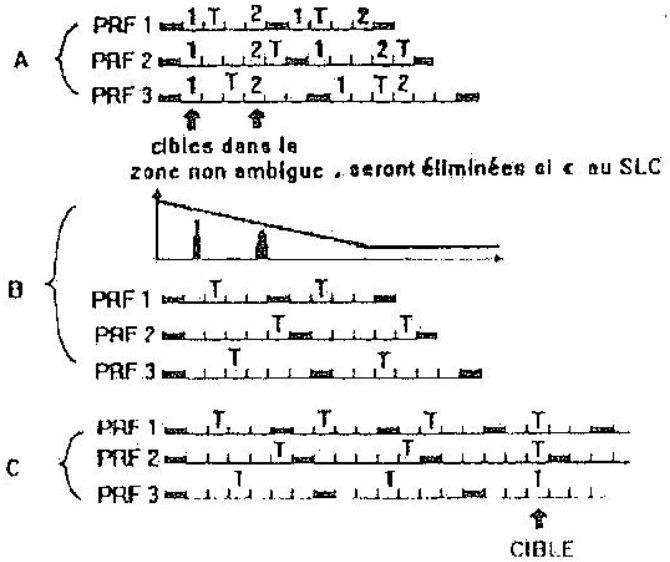


Figure A17

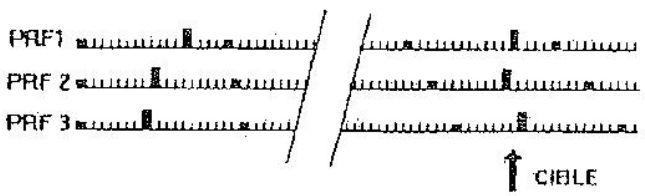


Figure A18

b.6 Les corrélateurs "A, B, C"

En mode MRF (medium PRF) le radar émet successivement [redacted] trains d'au moins [redacted] impulsions chacunes à [redacted] FRI différentes (voir plus loin). La modification de ce paramètre va permettre de lever les ambiguités.

Prenons le cas d'une cible, et l'utilisation de 2 FRI différentes (figure A15). Supposons que l'observation de la matrice CFAR construite pour ces deux FRI ait révélé la présence d'une détection dans la 2ième porte en distance pour la première FRI et la 5ième pour la seconde FRI. Il suffit de répéter ces 2 profils apparents de détection jusqu'à obtenir une coincidence, pour déterminer la distance réelle.

Le cas se complique si deux cibles sont détectées, comme le montre la figure A16. L'utilisation d'une troisième FRI permet de lever l'ambiguité et d'éliminer les faux candidats.

Le corrélateur "ABC" opère de cette façon, mais permet également d'éliminer les cibles au sol dont le retour est suffisamment important que pour être détecté via les lobes secondaires (ex: toit d'une maison).
Il est facile d'identifier une telle cible car elle est située à une distance réelle inférieure à la distance maximale ambigue (pour pouvoir être détectée par les lobes secondaires). Les corrélateurs A et B auront pour but de réaliser un premier tri au niveau des cibles en procédant comme suit: pour chaque porte en distance de chaque FRI, le corrélateur A vérifie si au moins [redacted] bits de détection sont à "1" (c'est-à-dire si un écho à été validé par au moins [redacted] FRI). Dans ce cas, une cible "proche" est détectée et le corrélateur B va comparer l'amplitude de cette détection à un seuil de façon à maintenir la cible ou bien l'éliminer selon son amplitude. Une cible réelle située à une même distance, mais détectée par le lobe principal et donc avec une amplitude beaucoup plus élevée, sera ainsi conservée.

Une fois ce tri réalisé par les corrélateurs A et B sur base de toutes les portes en distances des deux FRI, le corrélateur C va déterminer, pour les cibles candidates restant, leurs distances réelles.
Comme indiqué sur la figure A17, il va considérer, pour toute les FRI, toutes les distances réelles possibles correspondant aux distances apparentes

détectées aux différentes FRI. A nouveau, si pour une distance déterminée, au moins [redacted] FRI donnent une détection, l'ambiguité est levée et la distance réelle est calculée. En pratique, on accepte une tolérance de 1 largeur de porte en distance (Figure A18).

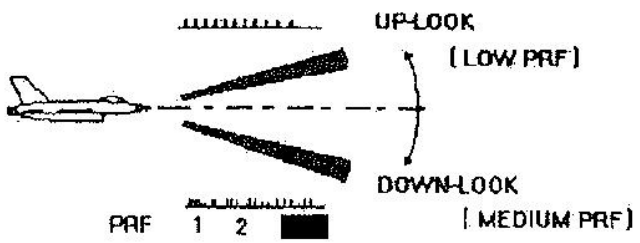


Figure A19

3. DETAIL DES MODES DE FONCTIONNEMENT.

A chaque mode décrit brièvement en début d'annexe correspondent différents traitements. Passons-les en revue.

A. LA PHASE "RECHERCHE" (SEARCH)

(Y-compris la phase RECHERCHE des sous-modes ACM et SAM).

La succession des opérations abordées dans le paragraphe relatif au "traitement numérique" était basée sur la configuration "LOOK-DOWN" du sous mode SEARCH. Ce dernier admet en effet 2 configurations, LOOK-UP et LOOK-DOWN selon que le lobe principal de l'antenne pointe vers le ciel ou vers le sol.

En cofiguration LOOK-DOWN, le radar émet une succession de [redacted] trains d'impulsions à FRI différentes (Figure A19). La durée de ces [redacted] trains d'émission est bien entendu négligeable vis-à-vis de la durée d'un balayage. En réalité, l'antenne a à peine le temps de se déplacer pendant que ces [redacted] trains sont émis. Toute les impulsions contenues dans ces 8 trains ainsi que le calcul réalisé sur base du retour de ces impulsions, concerneront donc la même zone observée.

Pourquoi utiliser plusieurs FRI'S? Une des deux raisons a déjà été évoquée : l'observation d'une cible au moyen de plusieurs FRI'S permet la détermination non-ambigue de la distance de la cible au radar. La deuxième raison se comprend dès que l'on soulève le problème des "zones aveugles". On sait que l'utilisation de la même antenne tant à l'émission qu'à la réception oblige les radars aéroportés à travailler avec un signal impulsionnel plutôt que continu. Il en résulte que si, au moment précis où l'antenne émet, le signal revenant d'une cible parvient à l'antenne, cette cible passera inaperçue. Le changement de FRI au cours de l'observation évitera que l'écho-cible ne se présente systématiquement au moment où le récepteur est bloqué. On parle de "zone aveugle". Le même phénomène se produit au niveau des vitesses, où la "zone aveugle" est matérialisée par le "trou" creusé par le suppresseur de

fouillis. Toute cible évoluant avec une vitesse relative telle qu'elle apparait de manière ambigue au même endroit que le "clutter", sera comme ce dernier , filtré! A nouveau, le changement de FRI empêchera cette coïncidence de se répeter.

Pourquoi en LOOK-DOWN, travailler avec une FRI moyenne, là où des ambiguités apparaissent à la fois en distance et en vitesse? On a vu que la double classification des signaux de retour selon la distance et la vitesse relatives permettait de distinguer deux cibles situées à une même distance relative, mais, évoluant à des vitesses différentes. La discrimination en vitesse fera ressortir du fouillis sol une cible le survolant à basse altitude par exemple. L'utilisation d'une basse FRI, bien que fournissant la distance de façon non-ambigue, n'aurait pu faire la distinction entre la cible et le fouillis sol.

En configuration LOOK-UP, le traitement est simplifié en raison de l'absence de fouillis sol. Une FRI basse est utilisée, de ce fait, l'utilisation des circuits suiveur et suppresseur de fouillis ainsi que le calcul de la matrice des bancs de filtres Doppler sont abandonnés. Il n'est plus nécessaire de lever l'ambiguité en distance, et une détection directe au niveau des portes en distance suffit pour indiquer la présence d'une cible. La notion de seuil adaptatif reste cependant d'application, transposée à une seule dimension seulement. Un circuit supplémentaire est prévu pour accomplir la même tache que le corrélateur B, à savoir l'annulation de "pics" correspondant à des objets au sol ayant une grande surface radar et observée par les lobes secondaires.

Pour compléter l'analyse de sous mode et de ses configurations LOOK UP et DOWN, il faut juste préciser que les cibles détectées sont mémorisées dans une table où sont inscrits leurs distances relatives et les angles d'antenne correspondant à leur observation (élévation et azimuth). La table peut contenir au maximum [redacted] cibles et les valeurs enregistrées sont mises à jour afin de tenir compte du mouvement propre du F-16 pendant l'observation. Ces cibles sont affichées à l'écran, et attendent d'être sélectionnées pour une éventuelle interception.

B. LA PHASE DE "POURSUITE" (TRACKING)

(Sous mode STT ainsi que la phase de poursuite des sous modes STT et SAM)

Durant cette phase, le radar entreprend la poursuite d'une cible parmi celles qui ont été détectées au cours de la phase de recherche. La poursuite ne peut avoir lieu que si une cible a été au préalable choisie puis confirmée.

La sélection, rappelons-le, se fait de façon manuelle ou automatique (ACM). La désignation consiste, pour le pilote, à placer un symbole autour de la cible et pour le radar, à diriger son antenne dans la direction polaire indiquée dans la table en regard de cette cible.

Quelle que soit la position de l'antenne (élévation <0 ou >0), la confirmation de la présence d'une cible obéit aux mêmes critères de traitement qu'en sous mode SEARCH LOOK-DOWN (emploi du mode MFR, [redacted] validations de cible sur les [redacted] FRI) à la différence près que l'antenne ici reste fixe. Si la distance mesurée de cette façon correspond effectivement à celle annoncée dans la table en regard de la cible, on dit qu'il y a ACQUISITION de la cible et le radar est disposé à entreprendre la poursuite.

La phase de poursuite débute par la sélection automatique de la meilleure FRI parmi les [redacted] FRI'S utilisées au cours de la confirmation. La meilleure FRI est celle qui assure la visibilité la plus grande, c'est-à-dire celle qui positionne la cible exactement entre deux zones aveugles en vitesse (correspondant au fouillis de lobe principal), c'est aussi la FRI qui rapproche la cible au plus près du [redacted] du banc des [redacted] filtres Doppler. Tout écart trop important de la cible par rapport au [redacted], ou tout rapprochement de la porte en distance de la zone aveugle d'émission provoquera le changement de FRI.

Si le lecteur est resté attentif jusqu'ici, il aura remarqué que la vitesse relative n'a pas encore été déterminée de façon non-ambigue. C'est précisément à ce moment que l'ambiguité est levée. Nous allons comprendre comment. Au cours de la poursuite, la cible continue son évolution, indépendamment du mouvement du F-16 (sauf dans le cas où elle se rend compte via son système de guerre électronique qu'elle est suivie) et donc les angles sous lesquels la cible est vue, sa distance et sa vitesse relatives sont

susceptibles d'évoluer d'une façon quelconque, mais cohérente en fonction du mouvement relatif de la cible par rapport au radar. Le rôle du radar, en phase de poursuite, est de pouvoir suivre ces différents paramètres aussi rapidement et précisement que possible, car ils sont utilisés avec les données propres au mouvement du F-16, pour calculer tous les autres paramètres tels que la vitesse de la cible, son altitude, sa direction de vol, etc.

Sans entrer dans les détails de la mécanisation, la poursuite des angles se fait grâce à la succession de l'émission par quatre lobes décentrés, qui simule le fonctionnement d'un radar de poursuite monocible à balayage conique. La poursuite en distance et en vitesse s'effectue au niveau de la matrice CFAR, au sein de laquelle tout déplacement de la cible (en distance et/ou en vitesse) est noté.

On pourrait se demander comment le radar soulève l'ambiguité distance alors qu'il n'utilise qu'une seule FRI! Rappelons qu'au terme de la phase de confirmation, la distance est connue de façon non-ambigue, et donc, si le radar reste à tout moment attentif à l'évolution de la cible au niveau des portes en distance aveugles les plus proches, il peut corriger immédiatement la distance. Et pour la vitesse? Pour la vitesse, il suffit de patienter environ 1 seconde, le temps que l'ordinateur estime la vitesse relative à partir de l'évolution de la distance (puisque la vitesse relative n'est rien d'autre que la dérivée temporelle de la distance relative). Cette estimation est réalisée au sein d'un ESTIMATEUR DE KALMAN qui, sur base de valeurs passée et présente de la distance non-ambigue, déduit la vitesse de façon non-ambigue. Le radar corrige cette valeur en prenant la vitesse ambigue et en lui ajoutant le multiple de la FRI qui permet de se rapprocher au plus près de l'estimation. De même que pour la distance, l'évolution de la cible au sein du banc de filtres Doppler permettra la mise à jour de la vitesse relative non-ambigue. L'estimateur de Kalman vient en aide également pour anticiper le positionnement de l'antenne.

Les sous-modes SAM et ACM, tous deux comprenant des phases SEARCH et TRACKING, peuvent être décrits par analogie.

ANNEXE 5 :

RESULTATS DU MODELE

Figure B.1.1

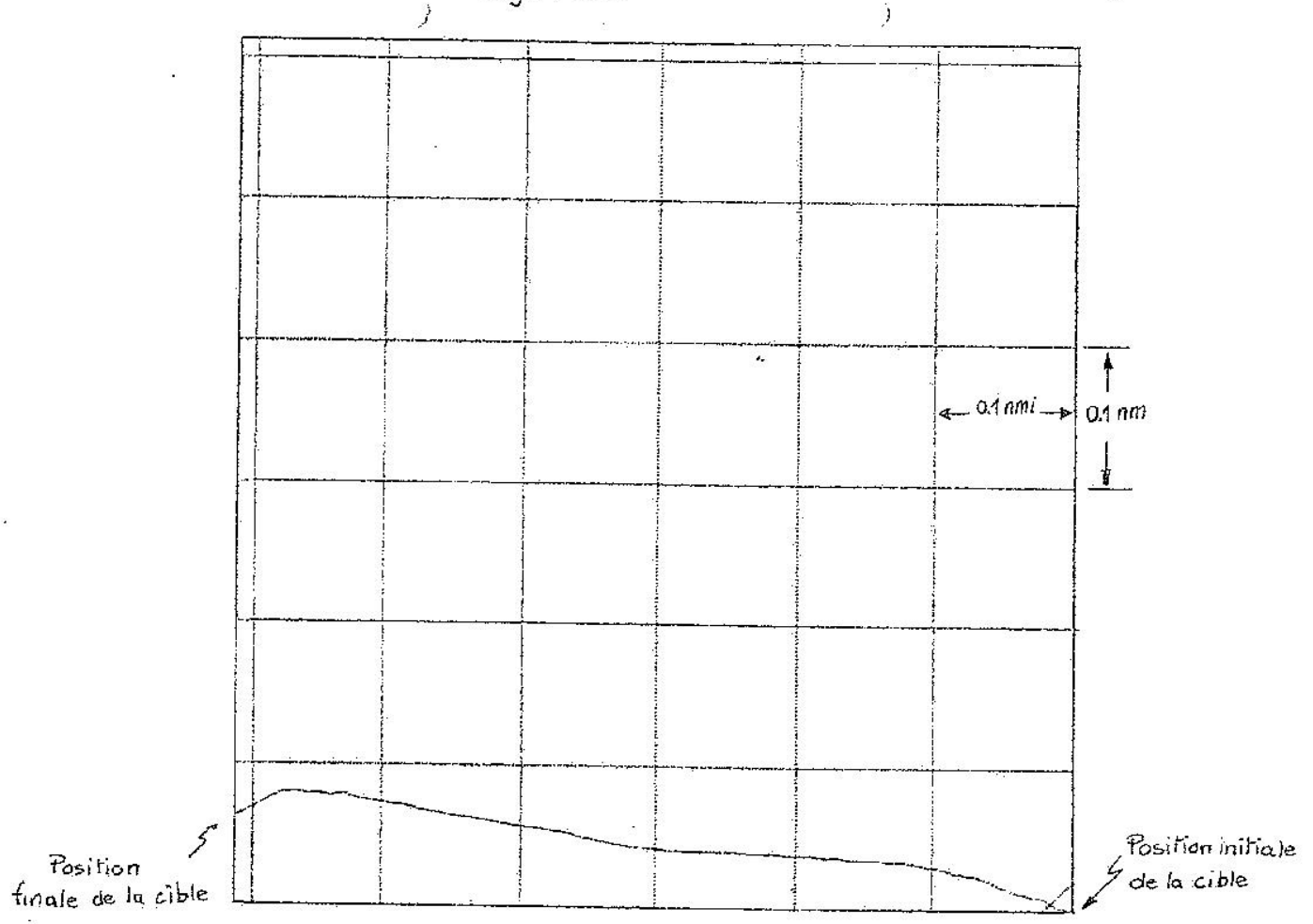
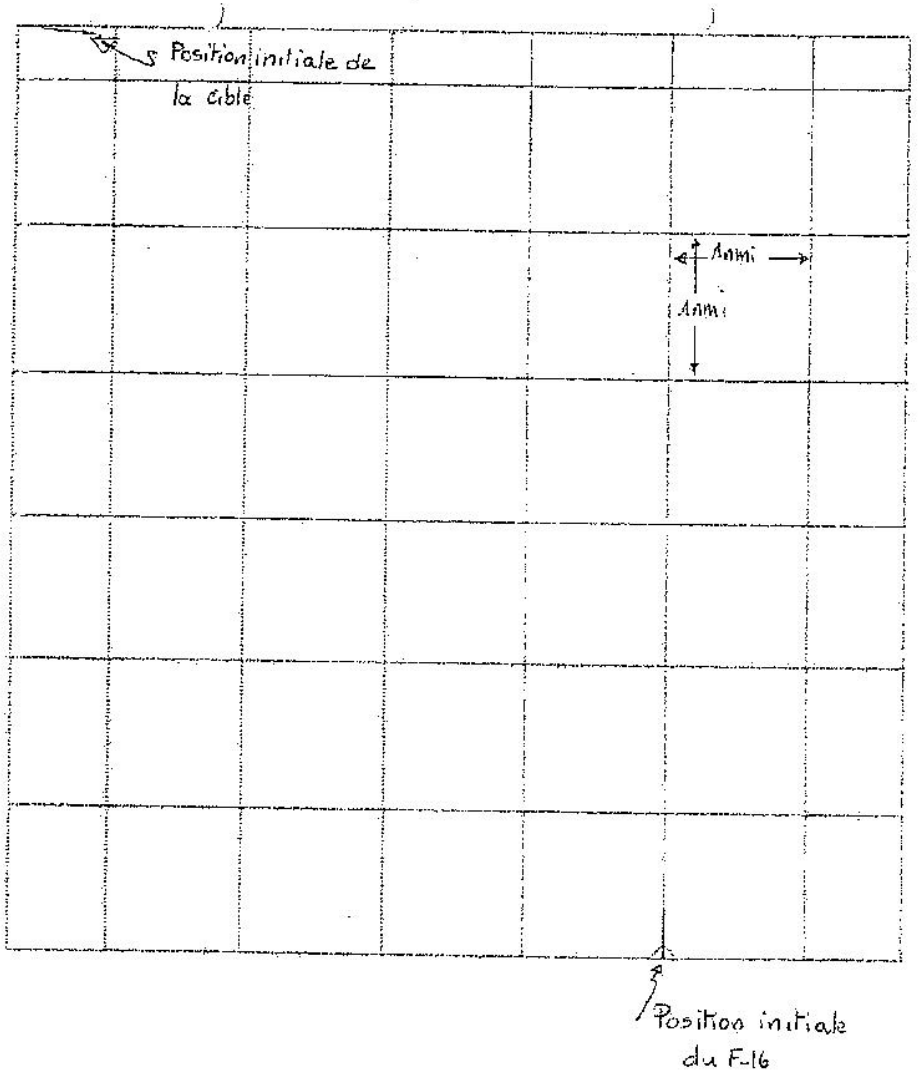

0.1 nmi
0.1 nm
Position finale de la cible
Position initiale de la cible

Figure D.7.2


Position initiale de la cible
Δxmi
Δymi
Position initiale du F-16

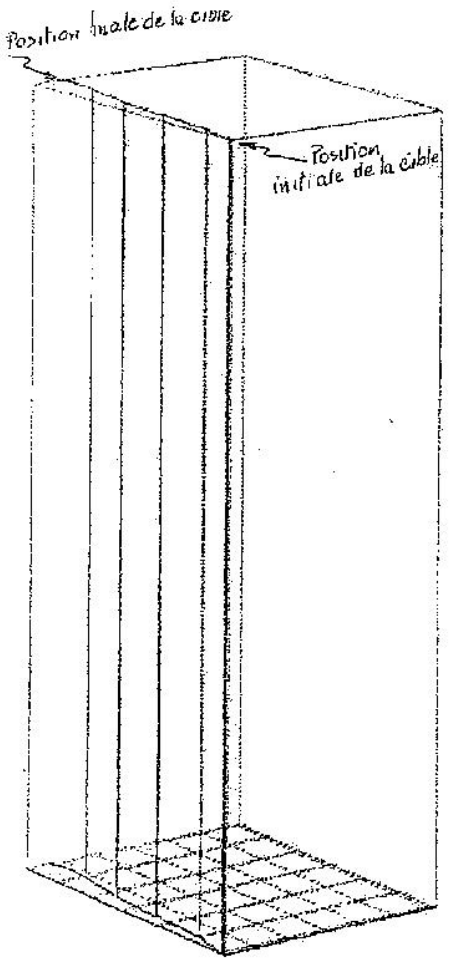
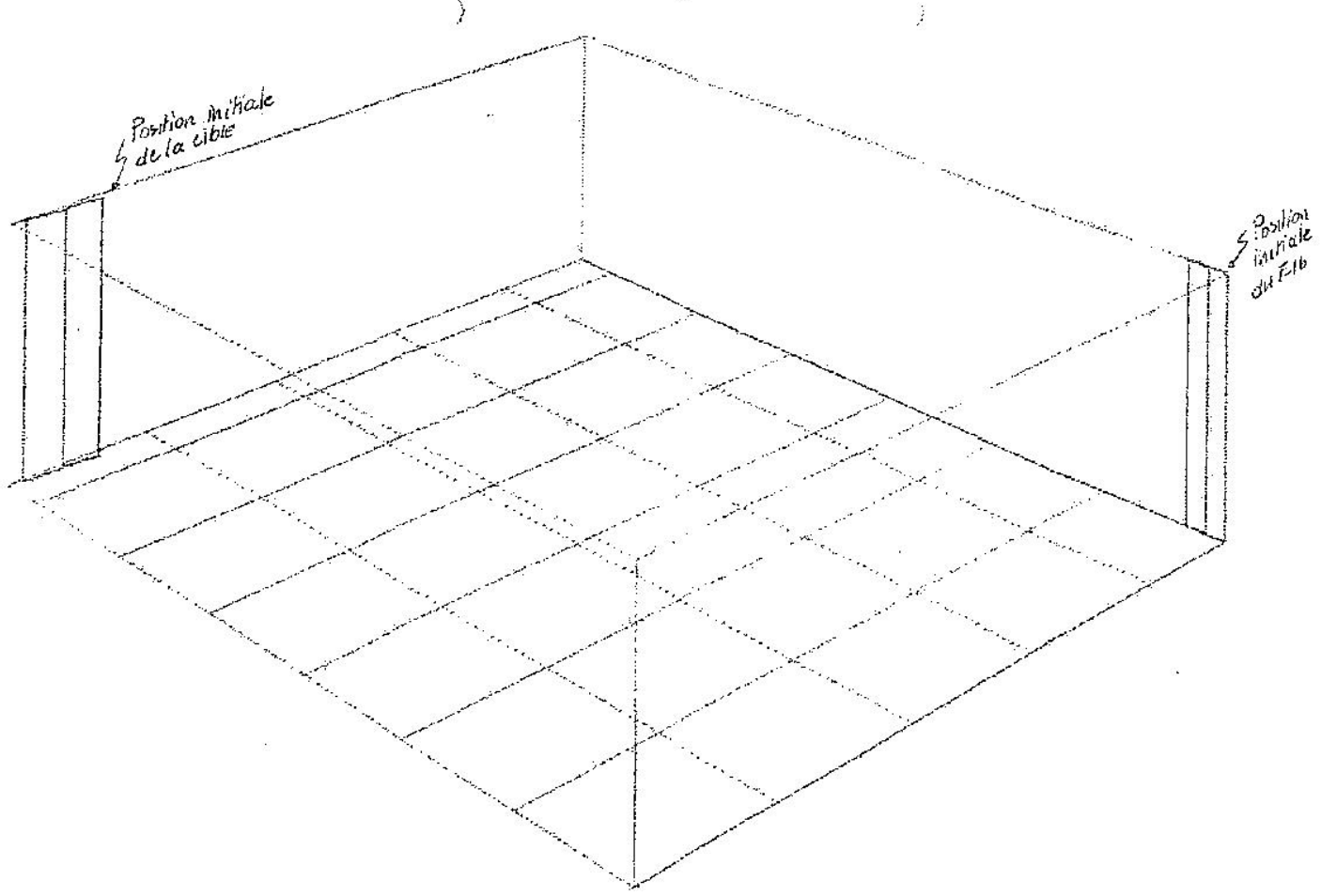

Position finale de la cible
Position initiale de la cible

Figure B.1.4



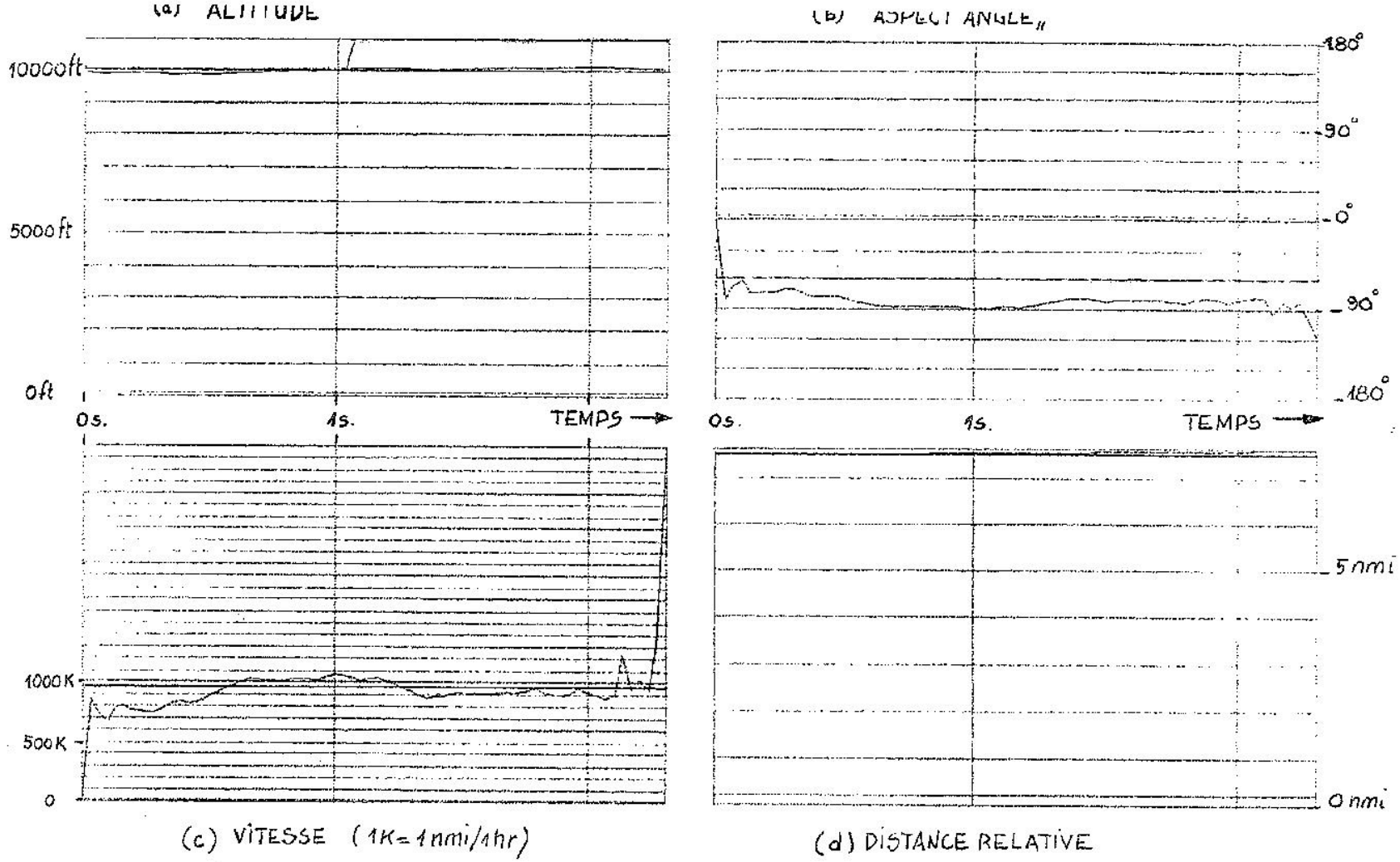
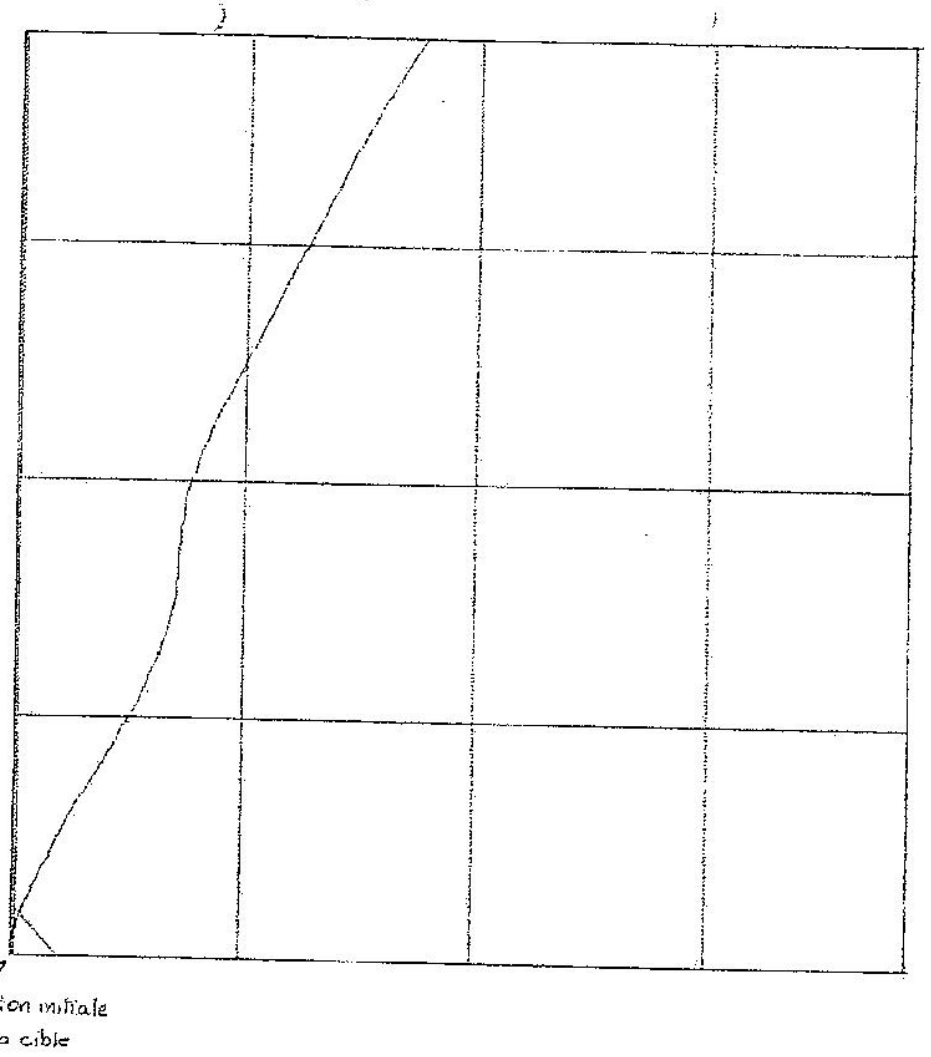

(a) ALTITUDE
10000ft
5000ft
0ft
0s.
1s.
TEMPS
(b) ASPECT ANGLE
180°
90°
0°
90°
180°
0s.
1s.
TEMPS
1000K
500K
0
5nmi
0nmi
(c) VITESSE (1K=1nmi/1hr)
(d) DISTANCE RELATIVE
VALEURS AFFICHEES PAR LE RADAR
RESULTATS DU MODELE

Figure D.8.1



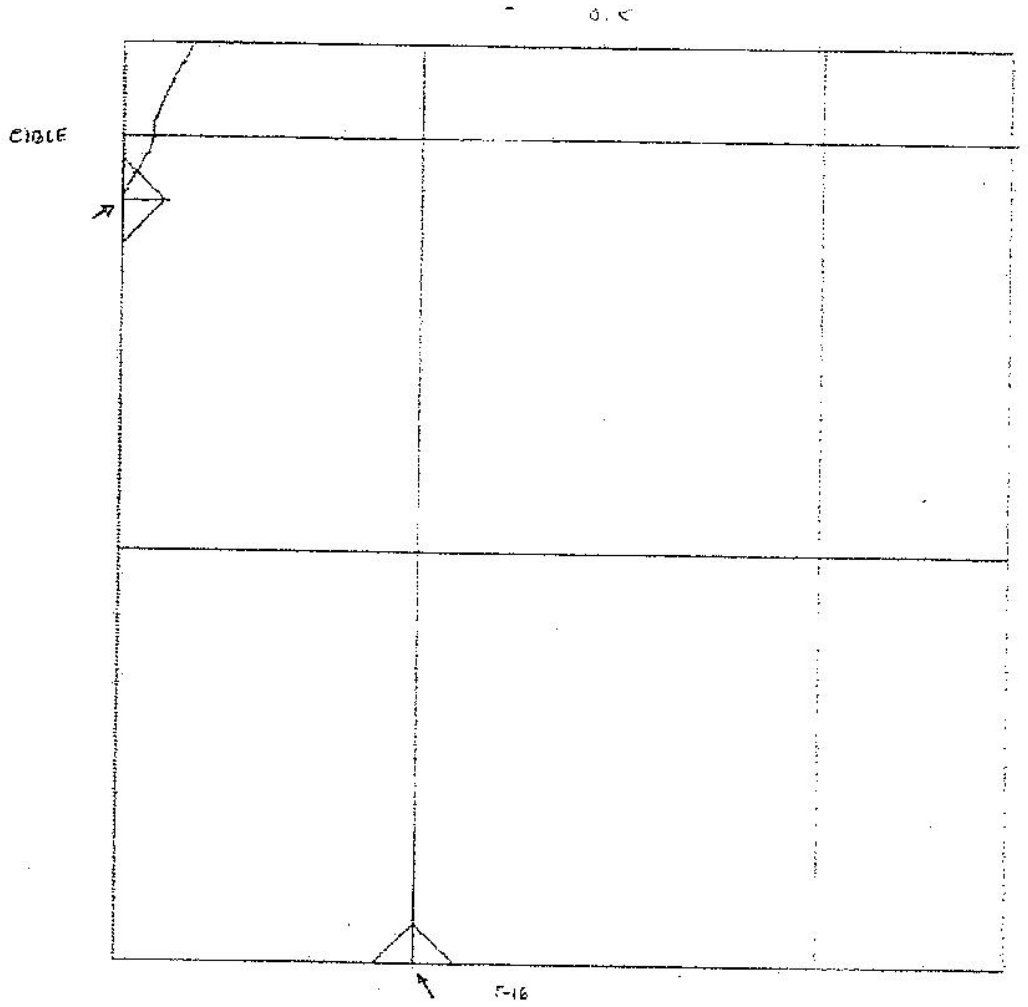
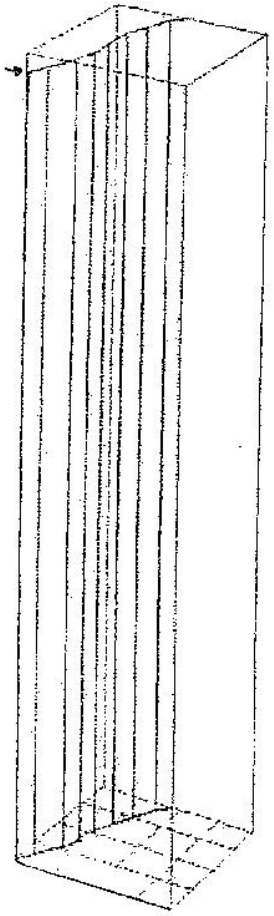

CIBLE
F-16

Figure B3.3



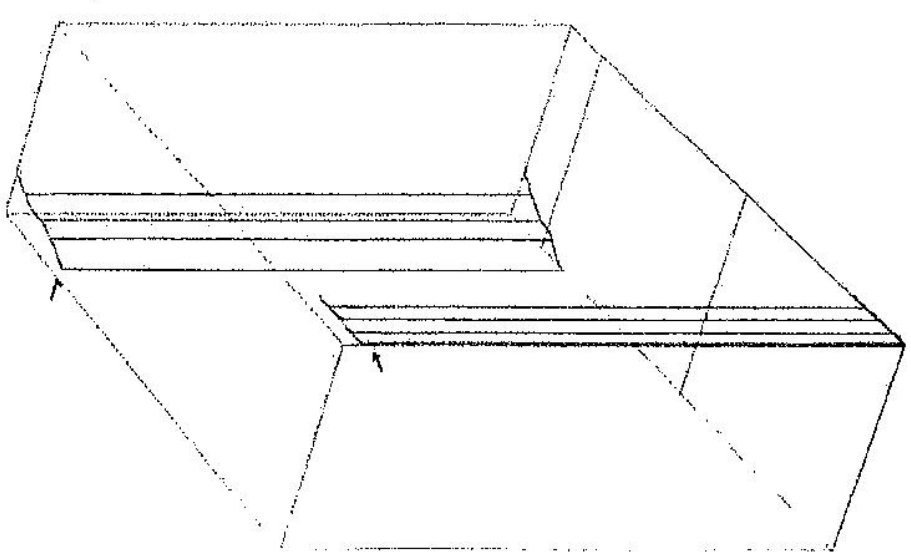
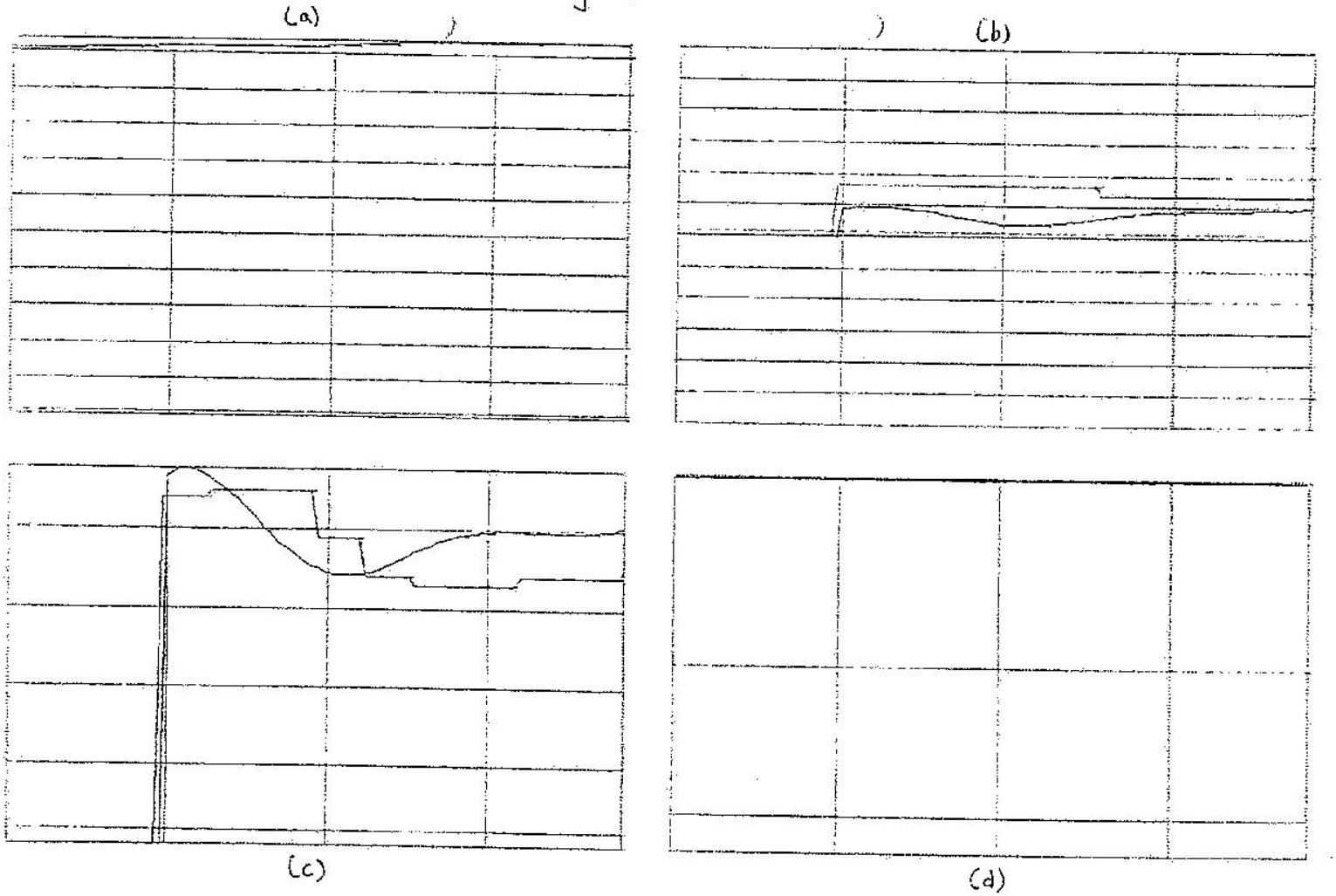


Figure 15.3



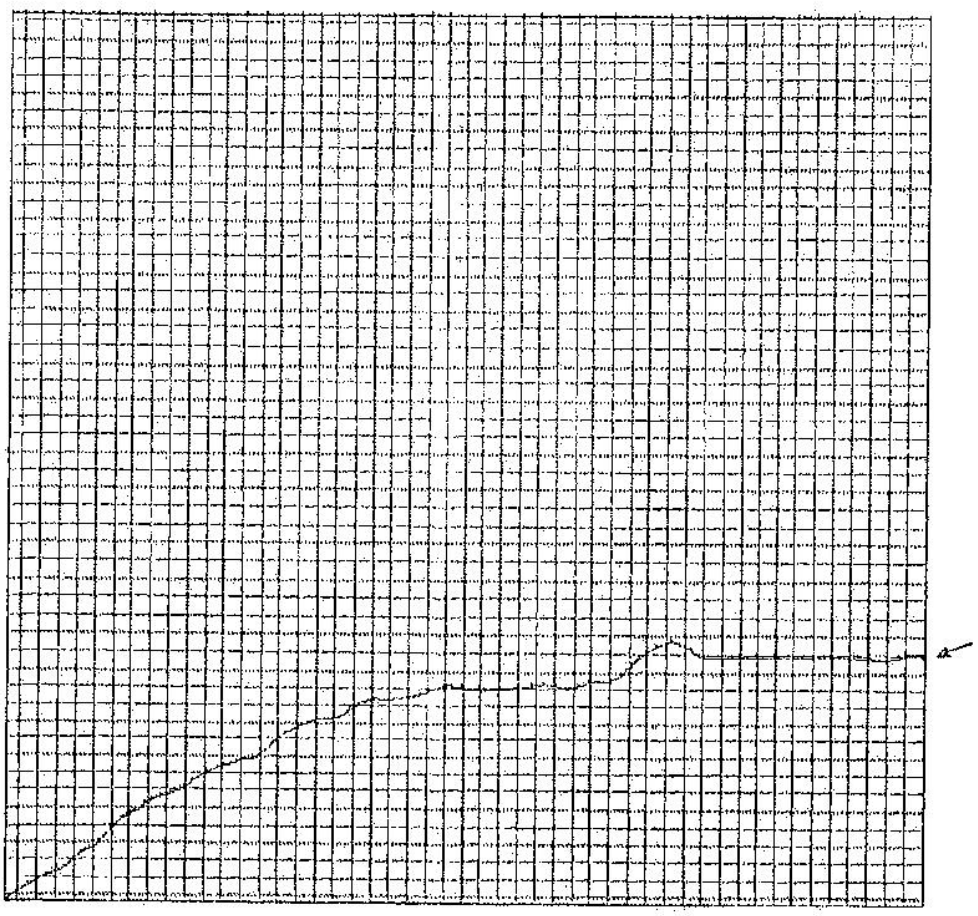
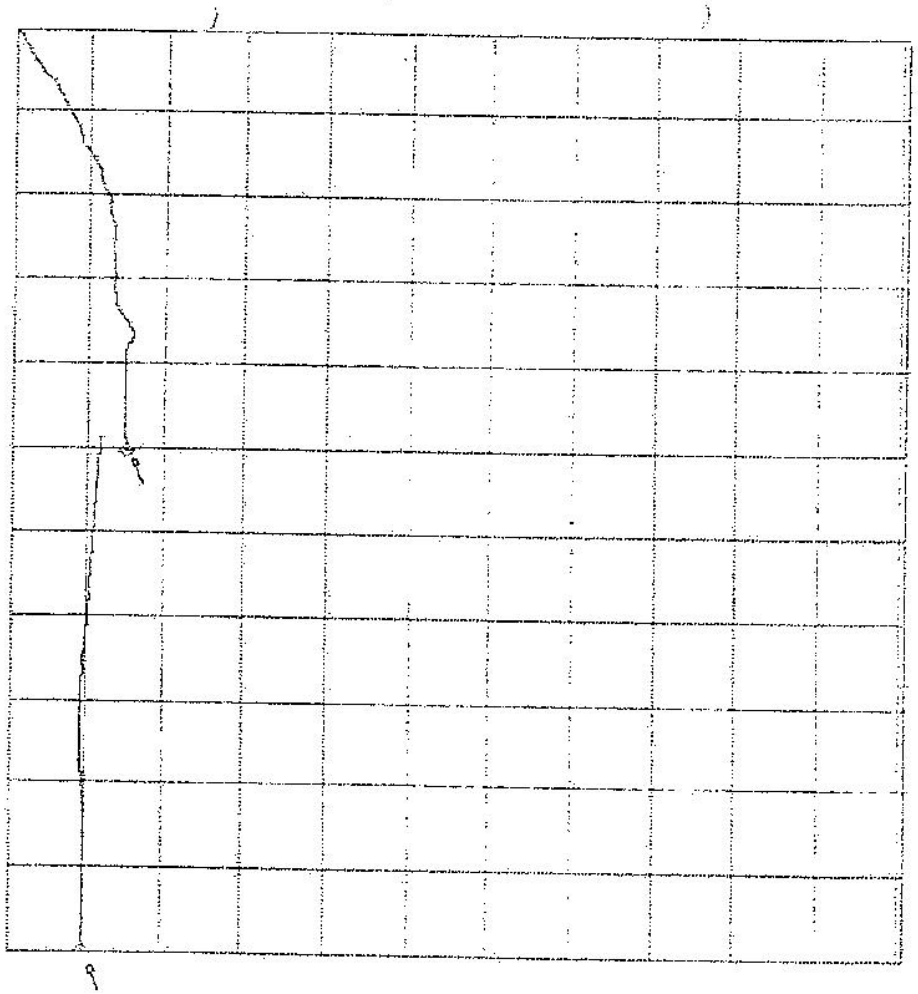


Figure B.92



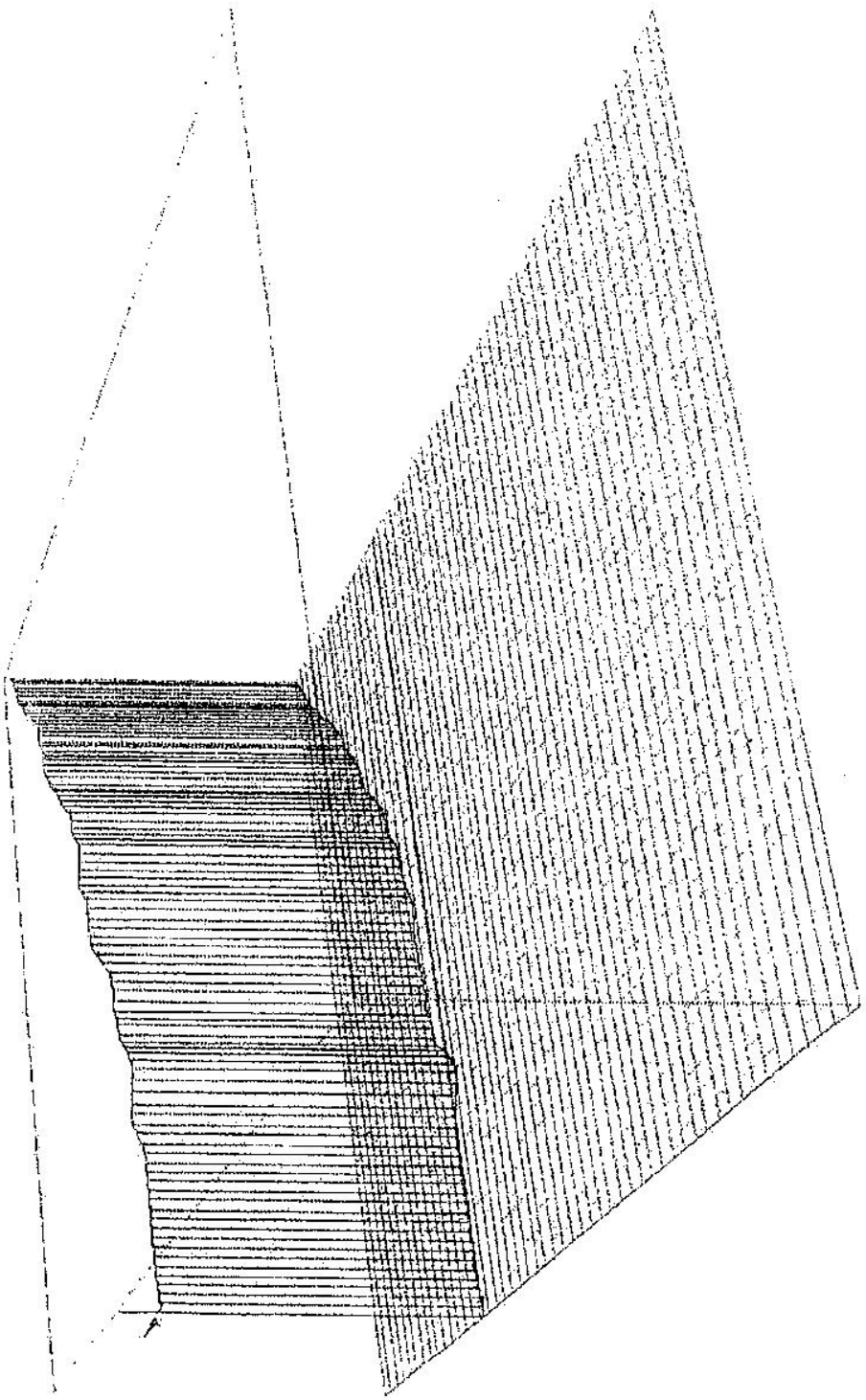
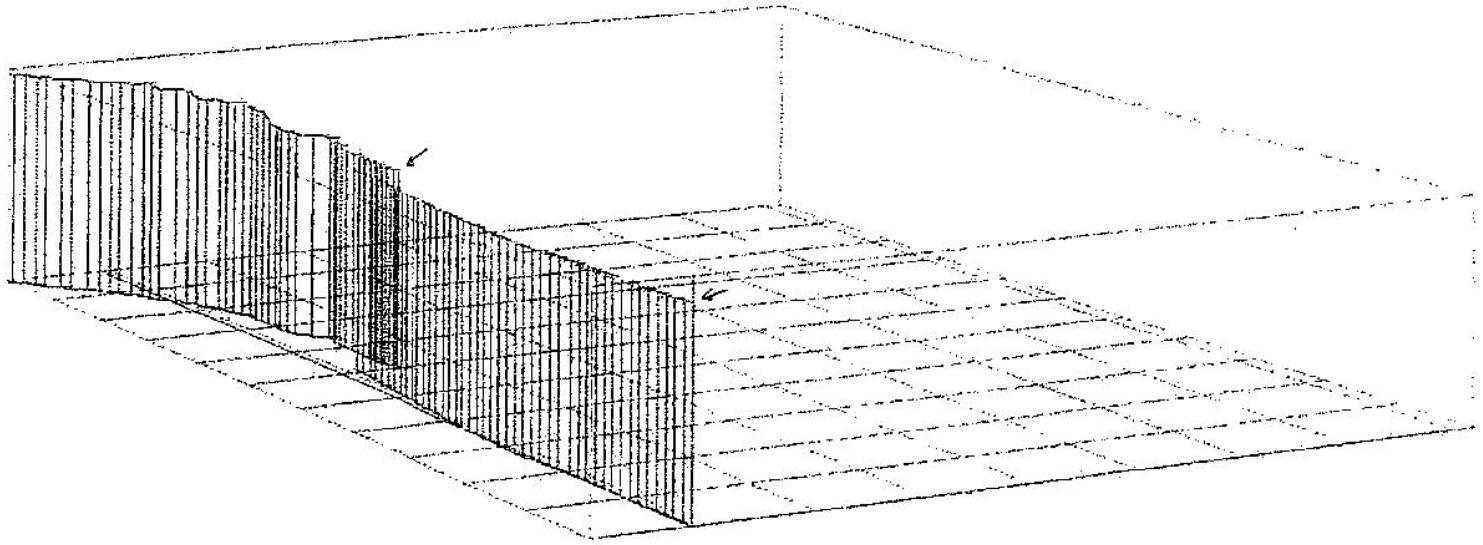
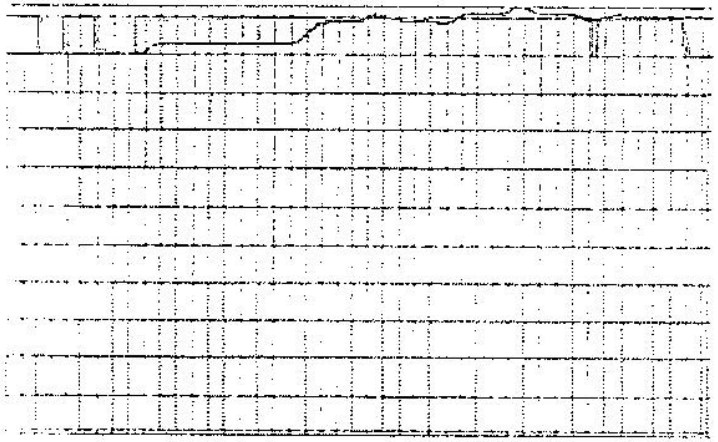


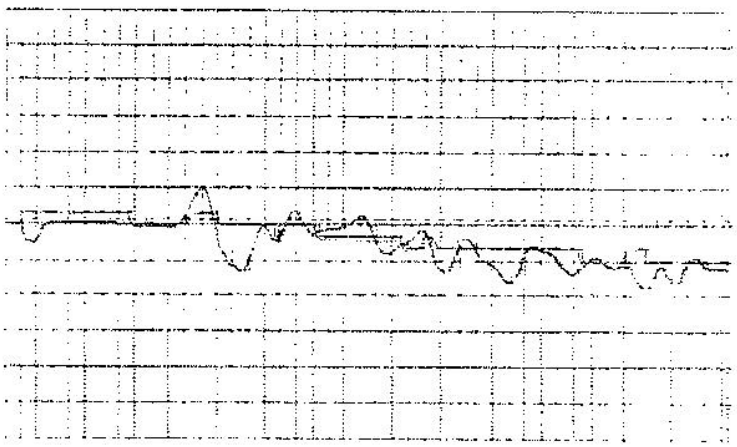
Figure B-4

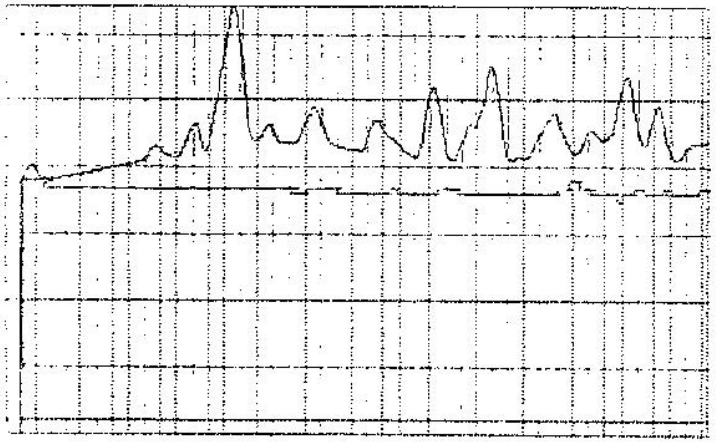


(a)

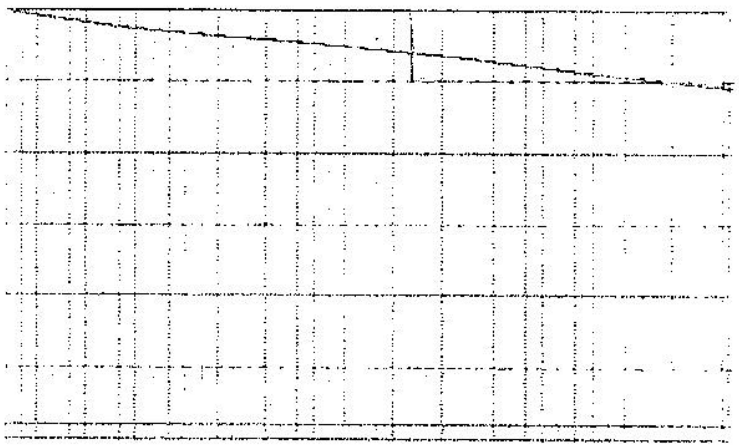


(b)



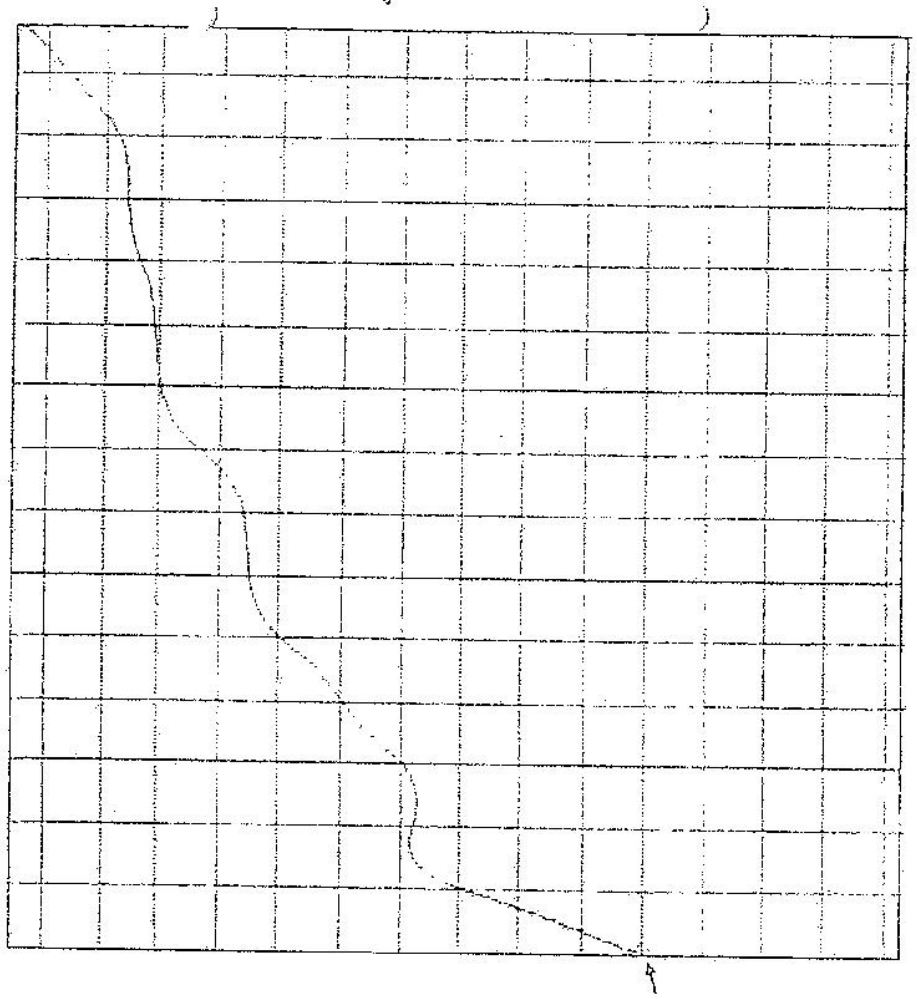


(c)



(d)

Figure 6.70.1



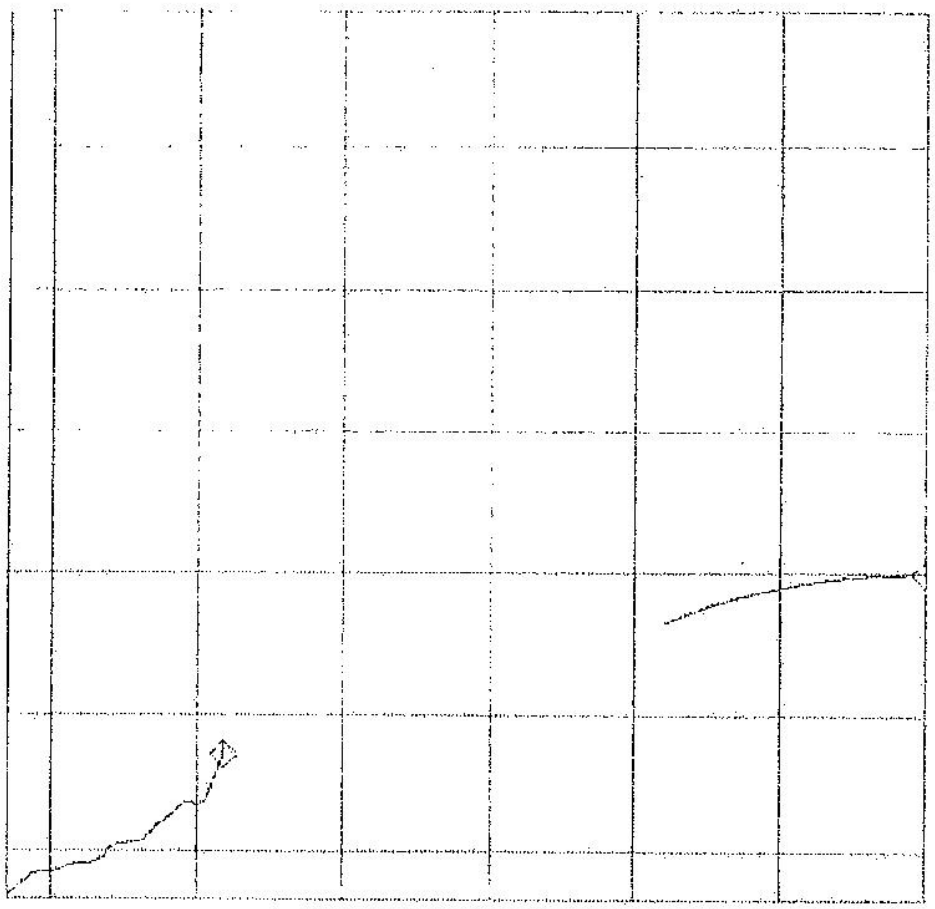
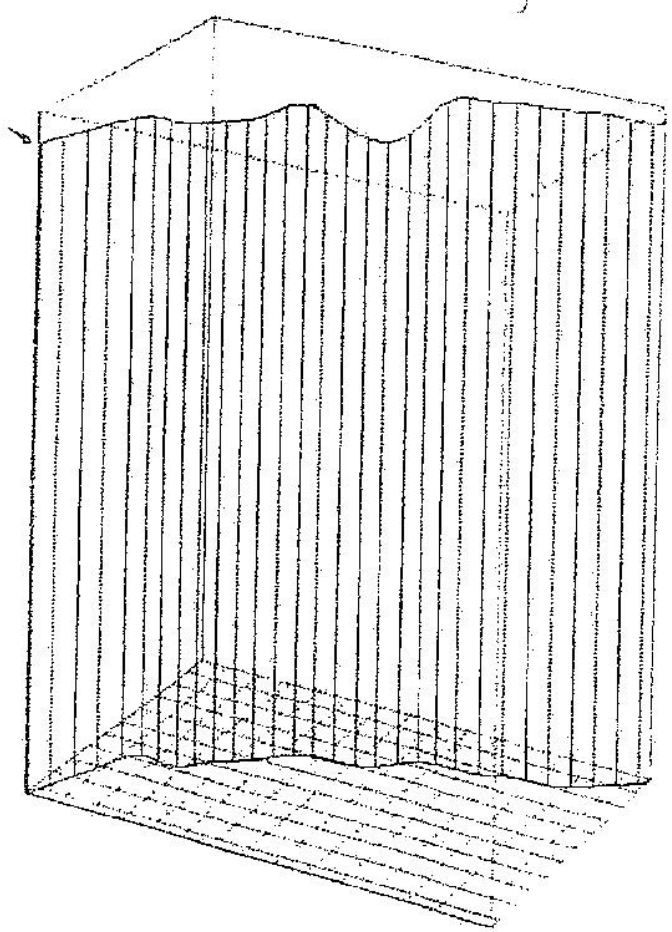


Figure B 10.3



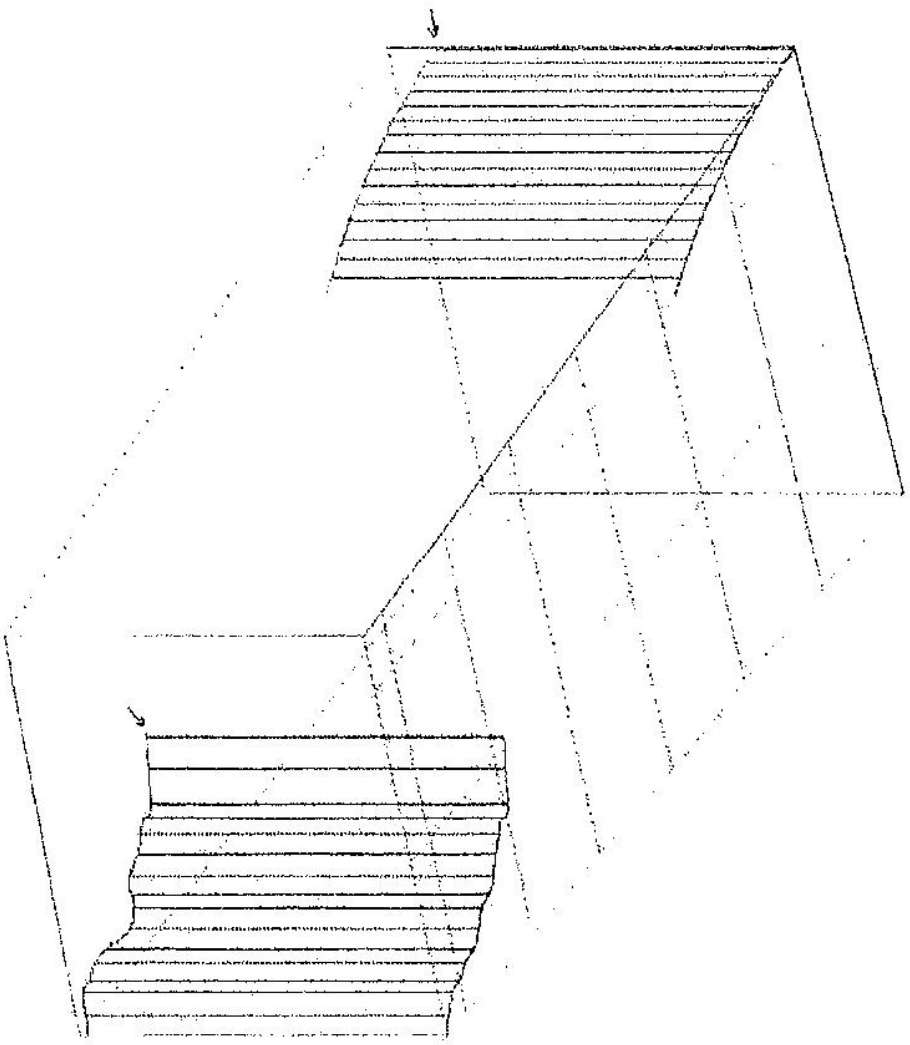
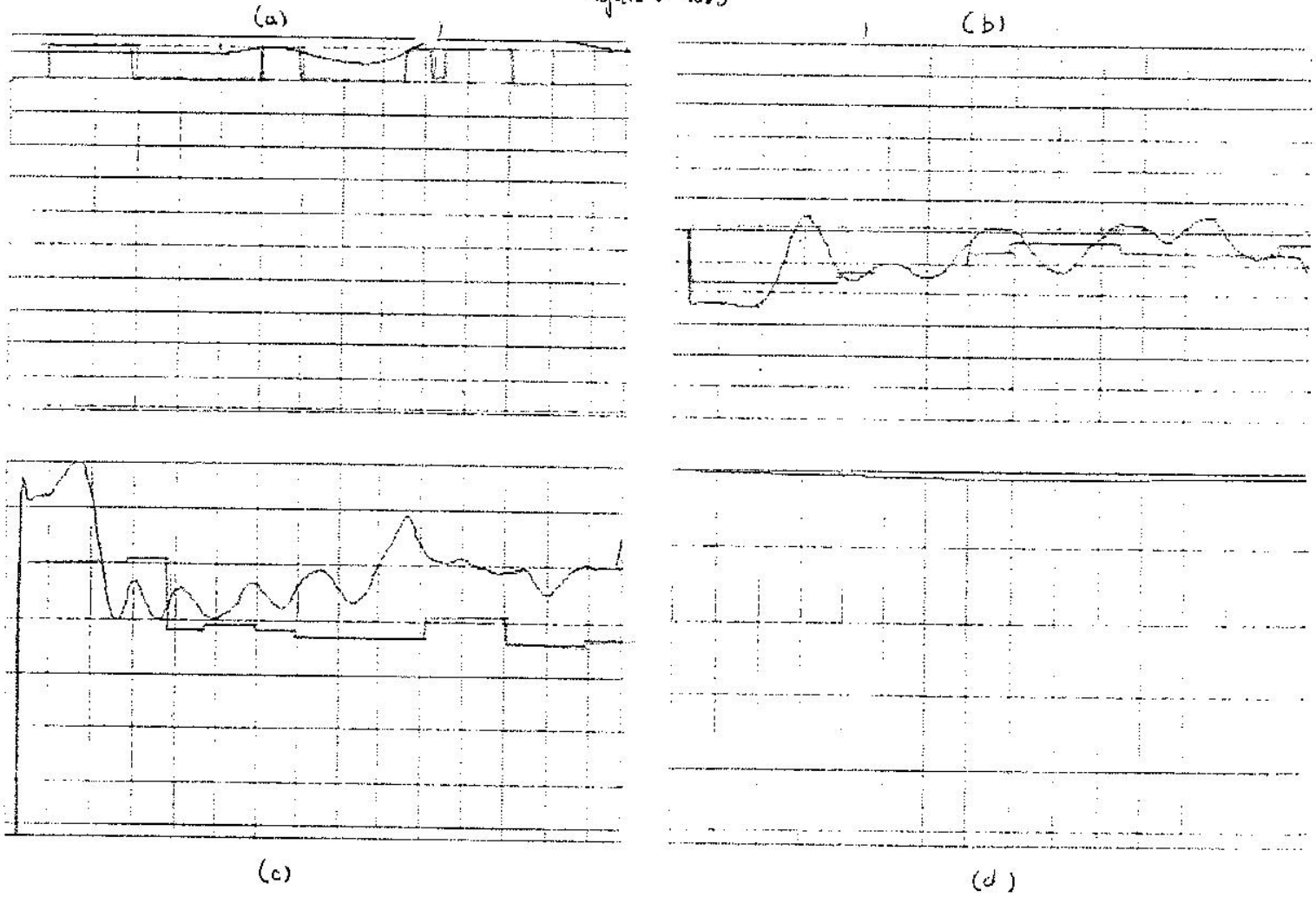


Figure 5 10.5



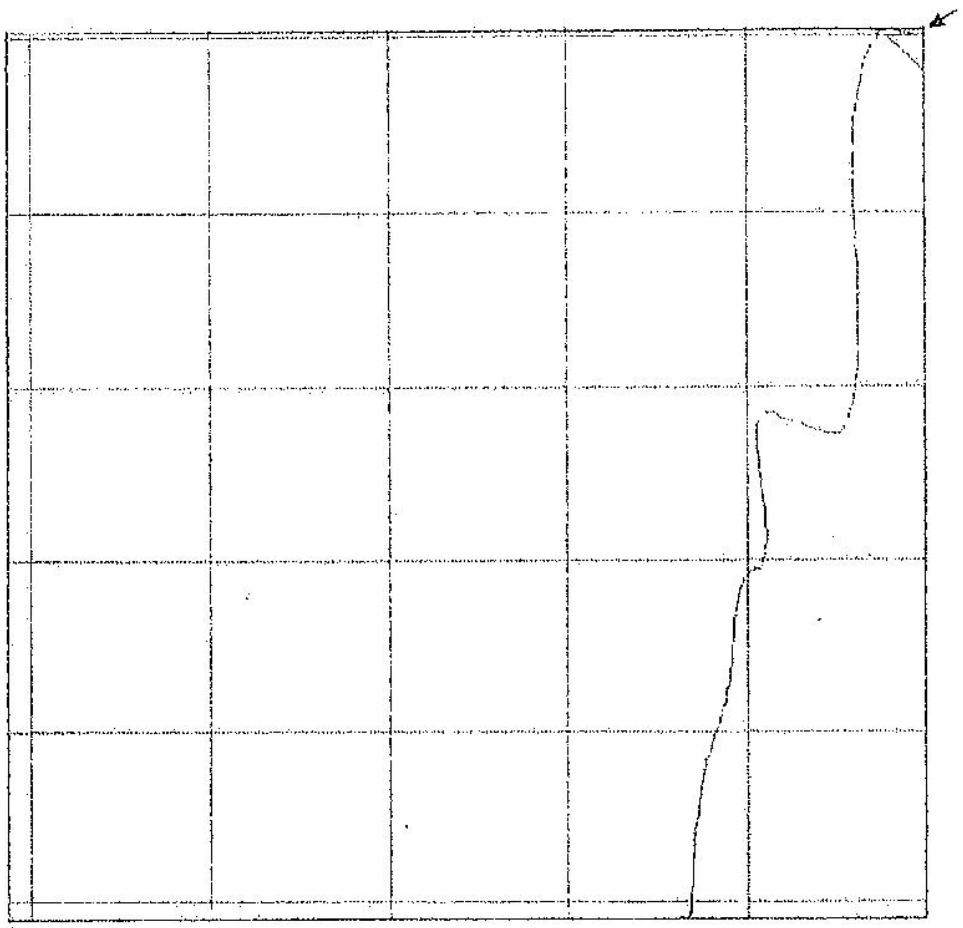


Figure B 2.2

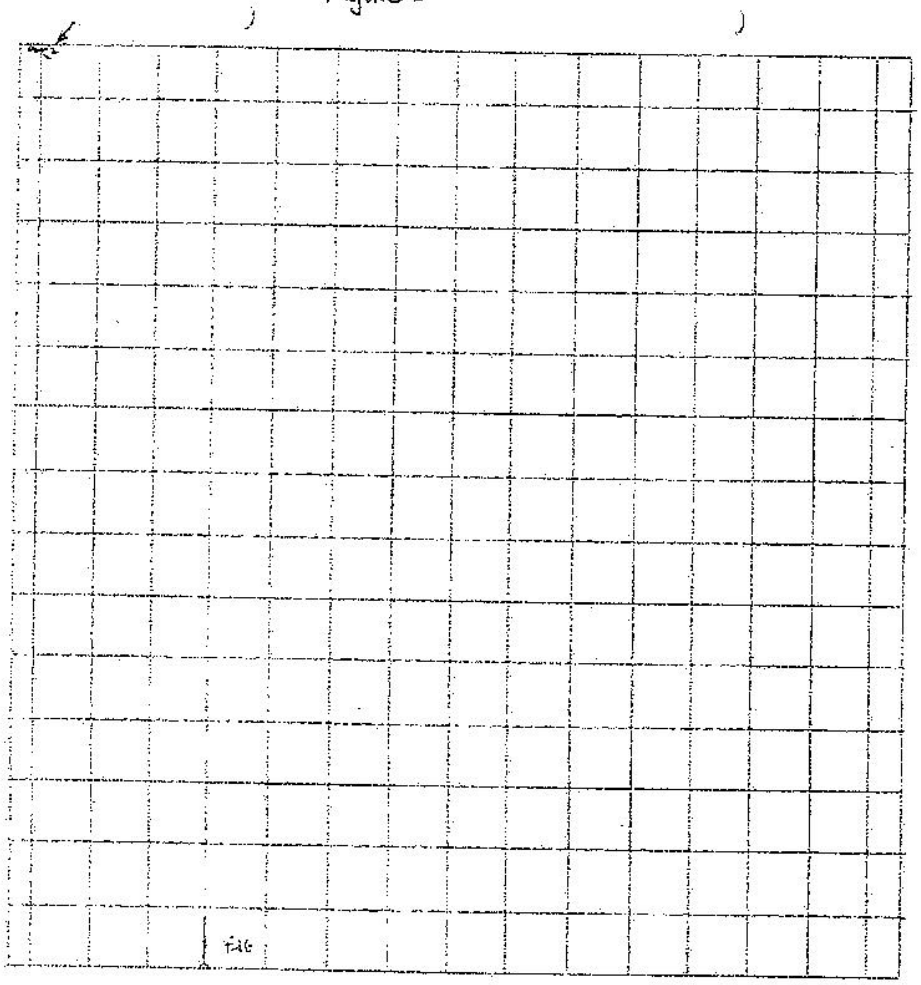


Figure B.2.3

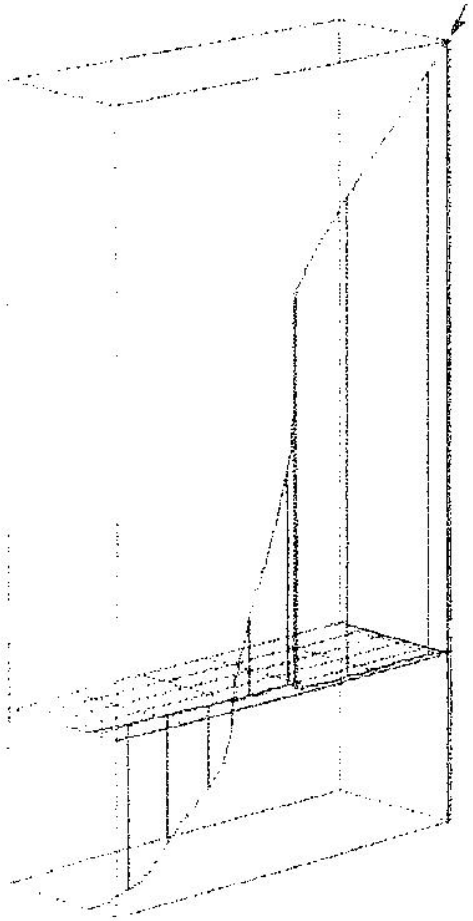


Figure B.2.4

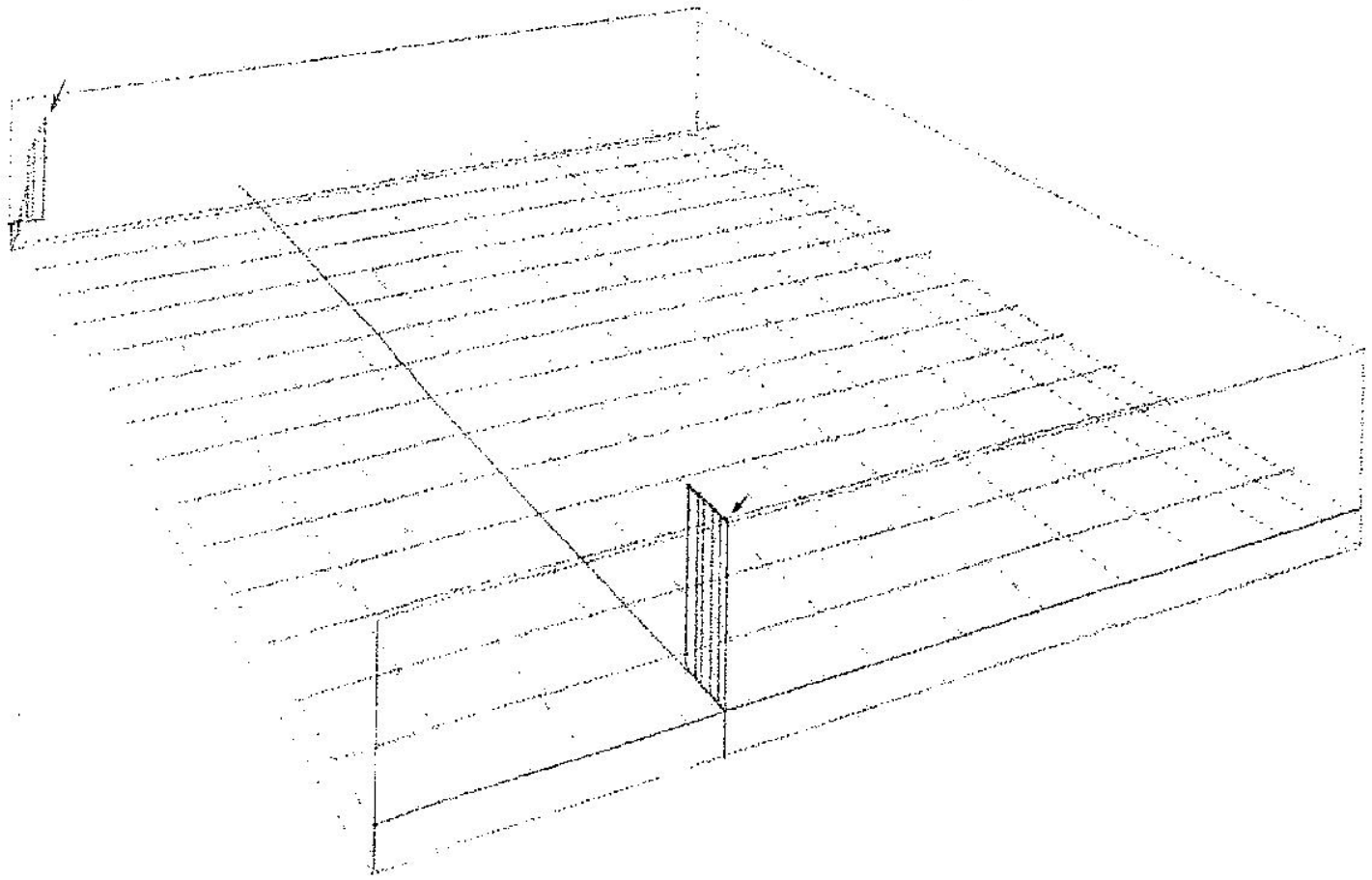


Figure B.2.5

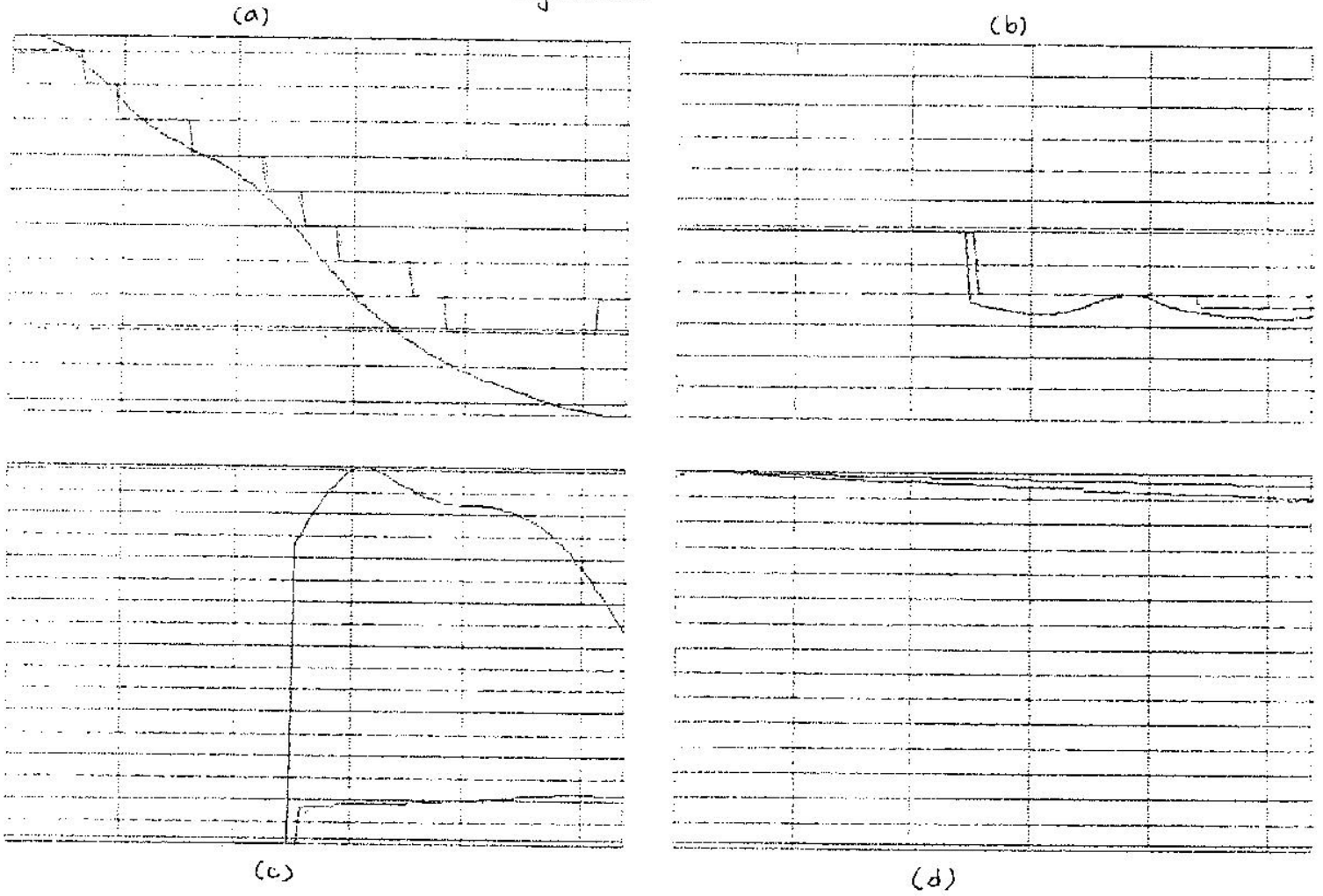


Figure 2.2.1

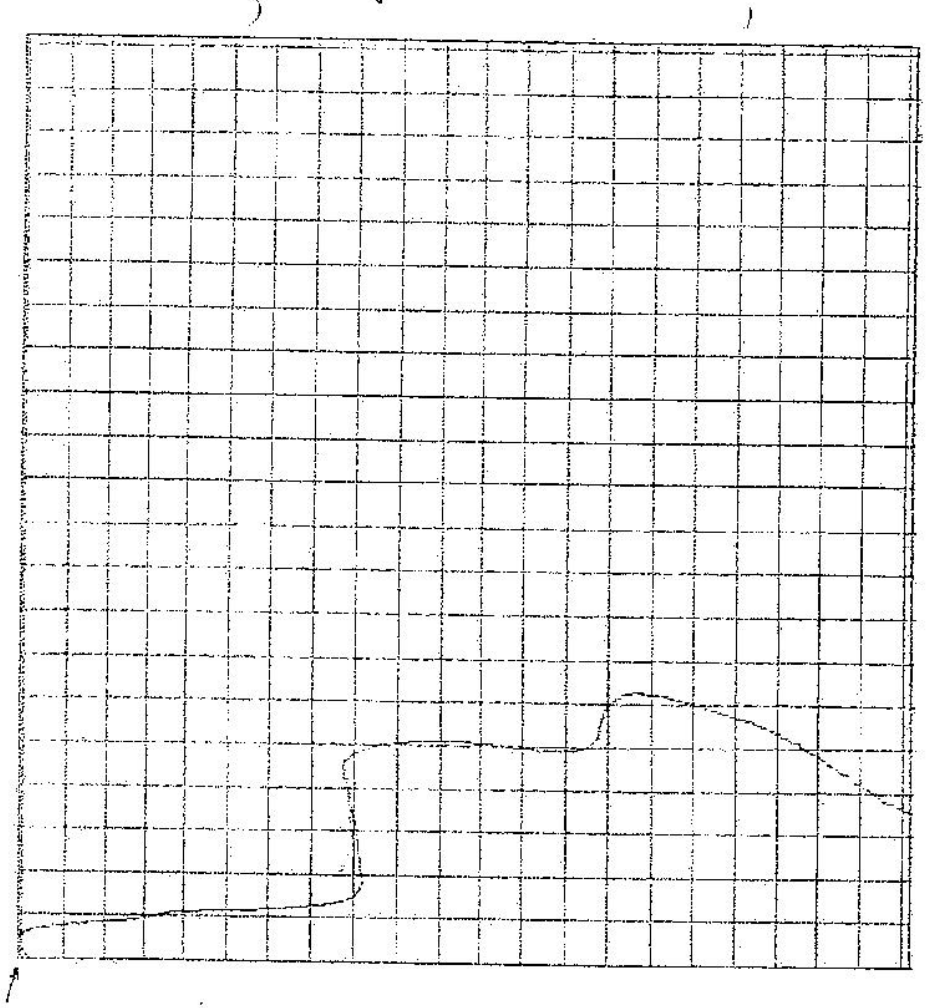


Figure 3.3.2

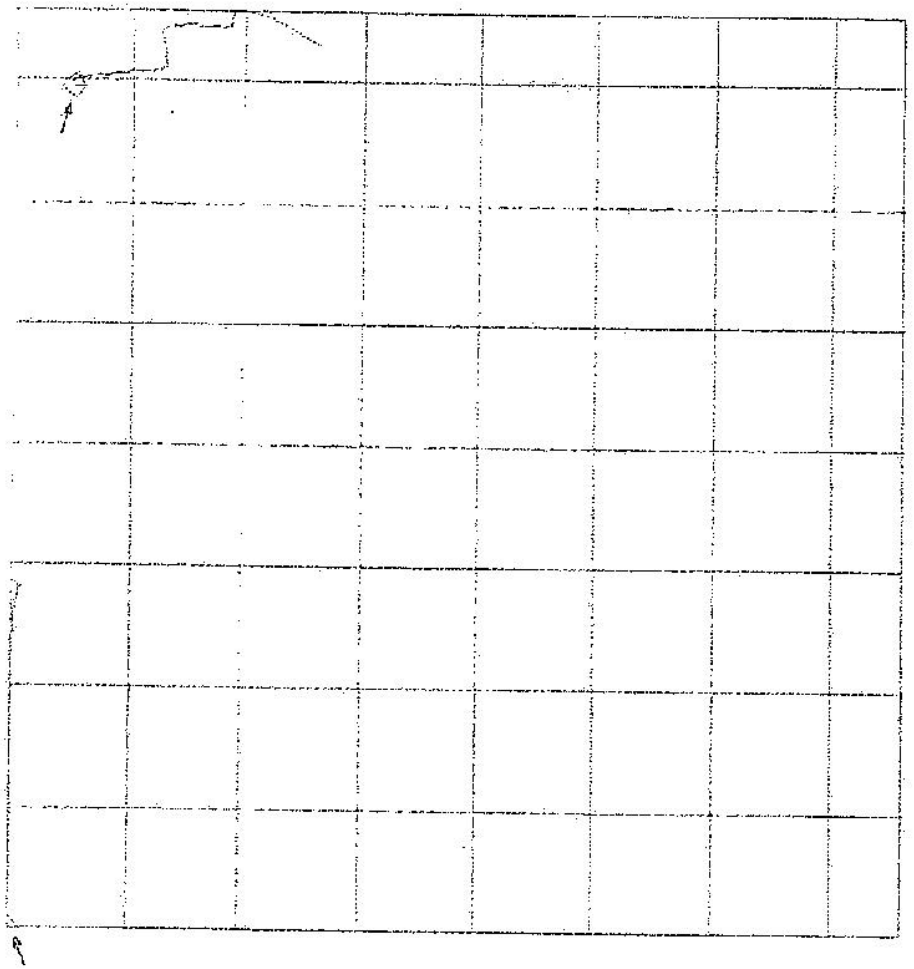


Figure 2.b...

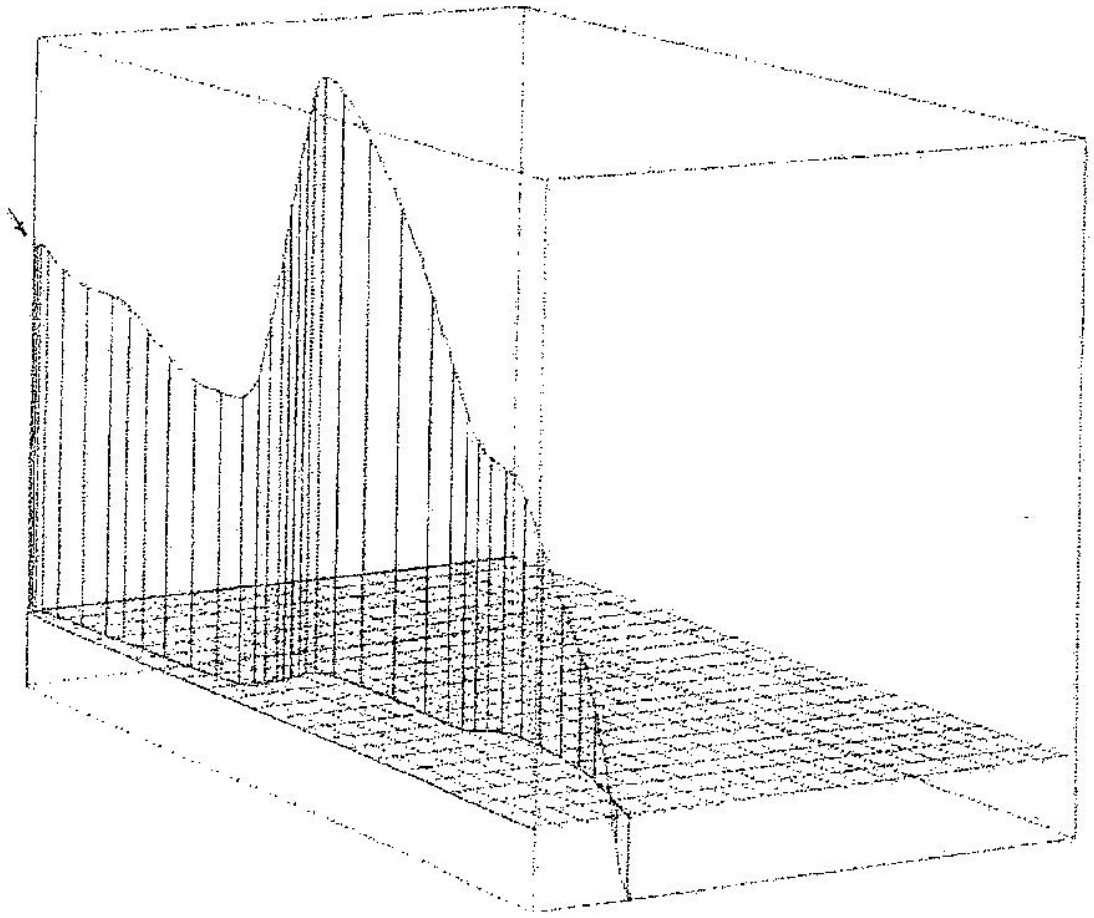
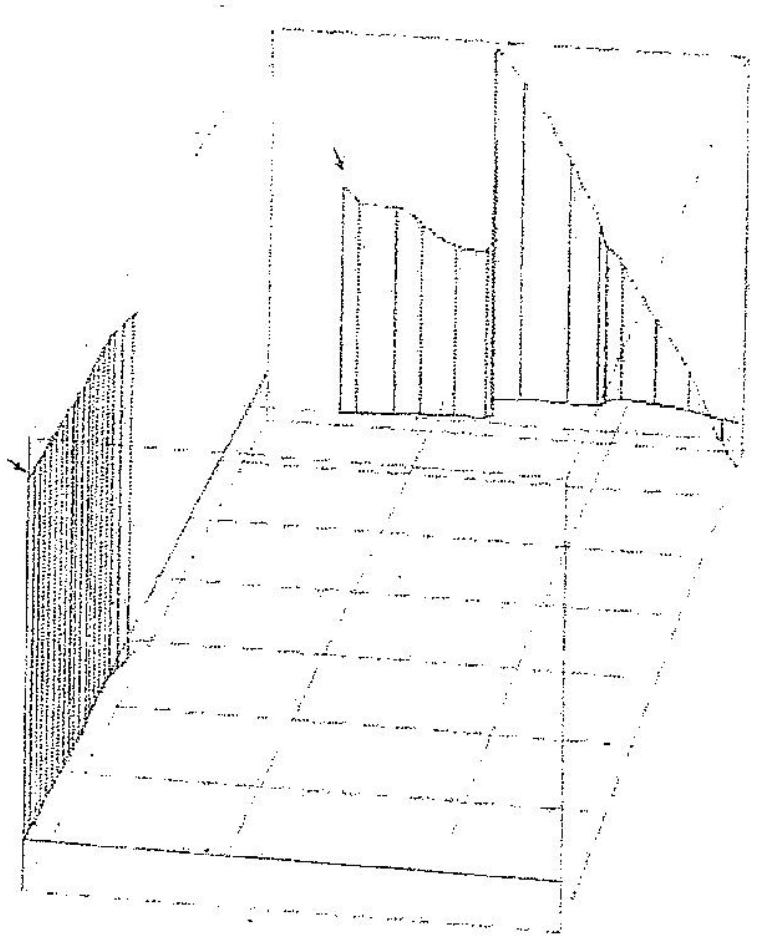


Figure B.3.4



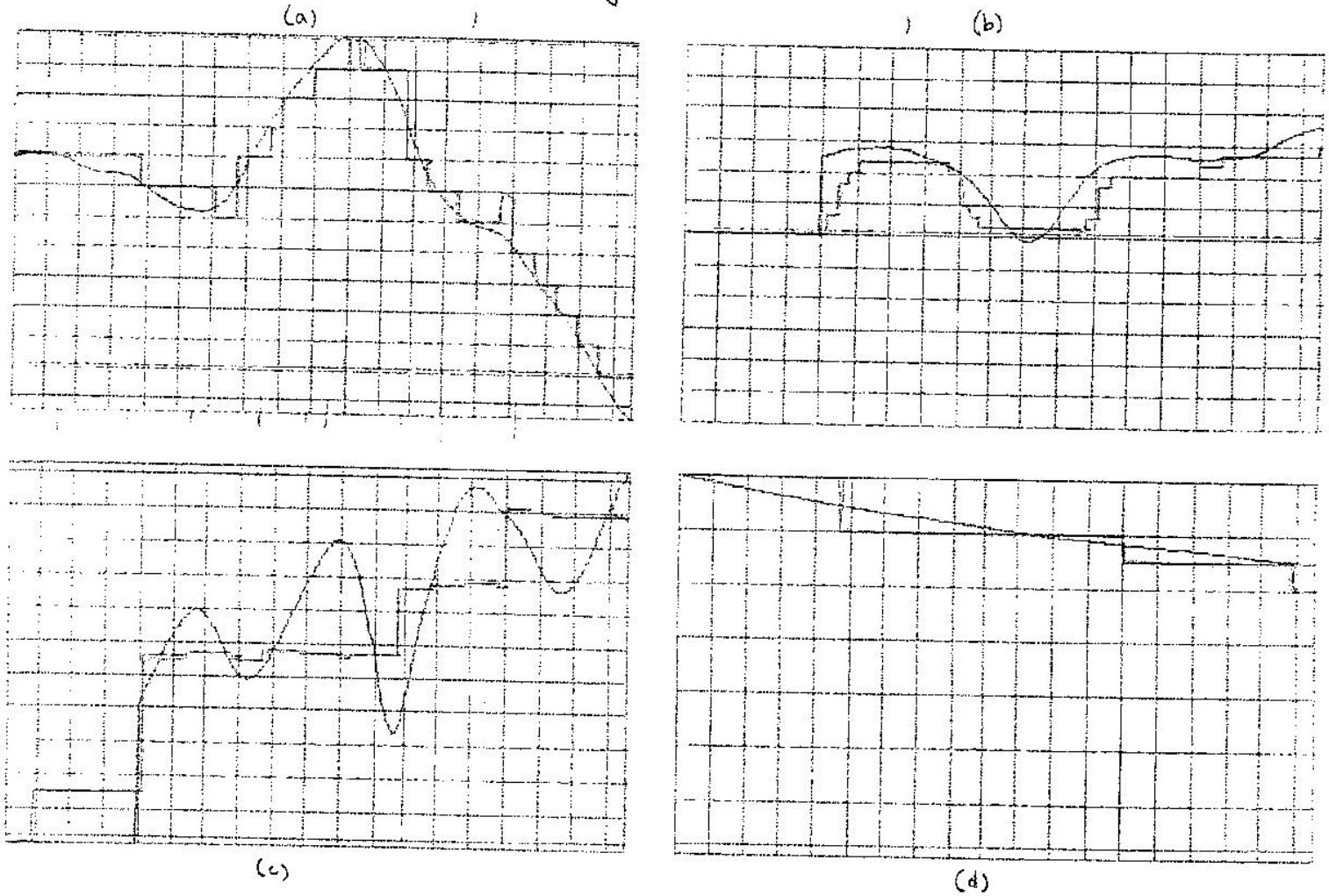

(a)
(b)
(c)
(d)

Figure B.4.1

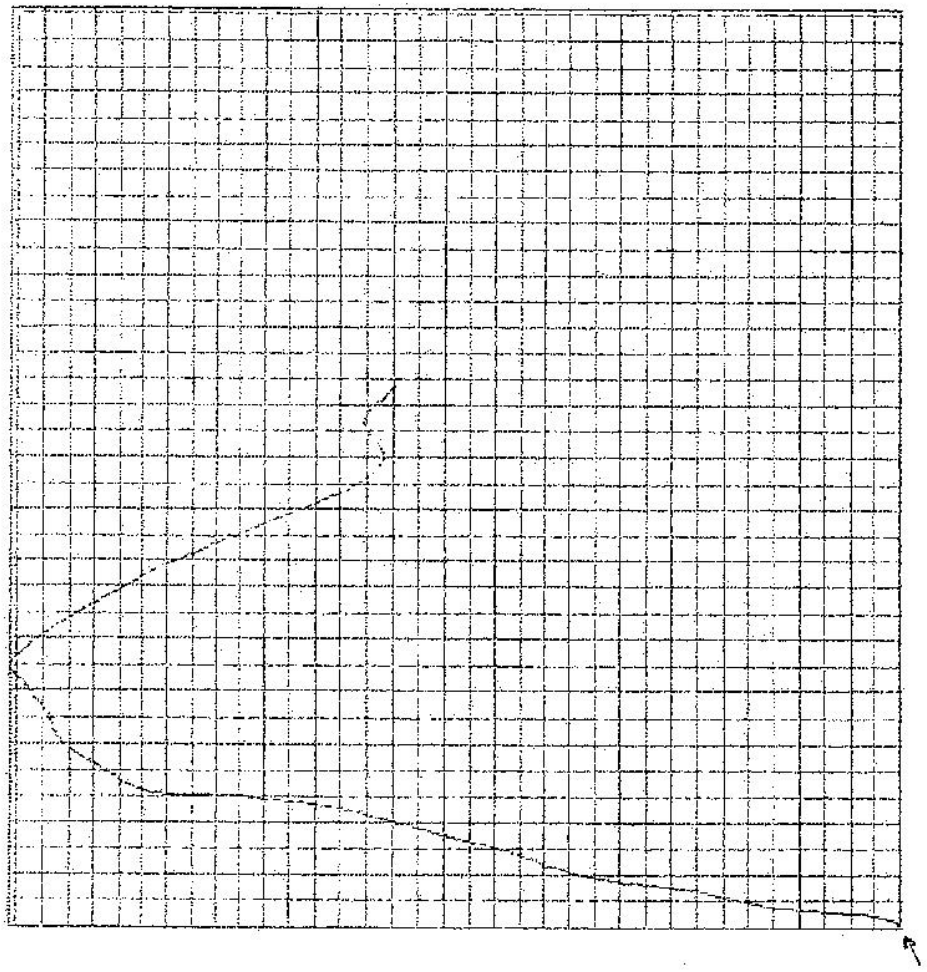


Figure 6A.2

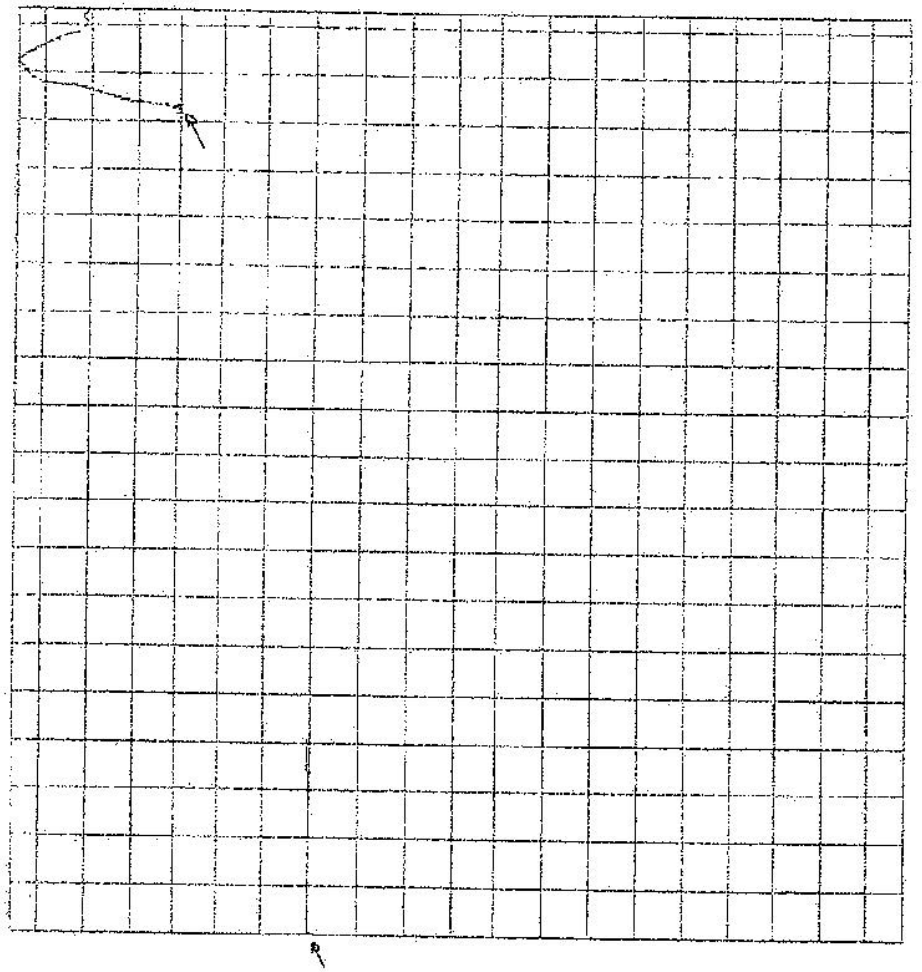


Figure B.4.3

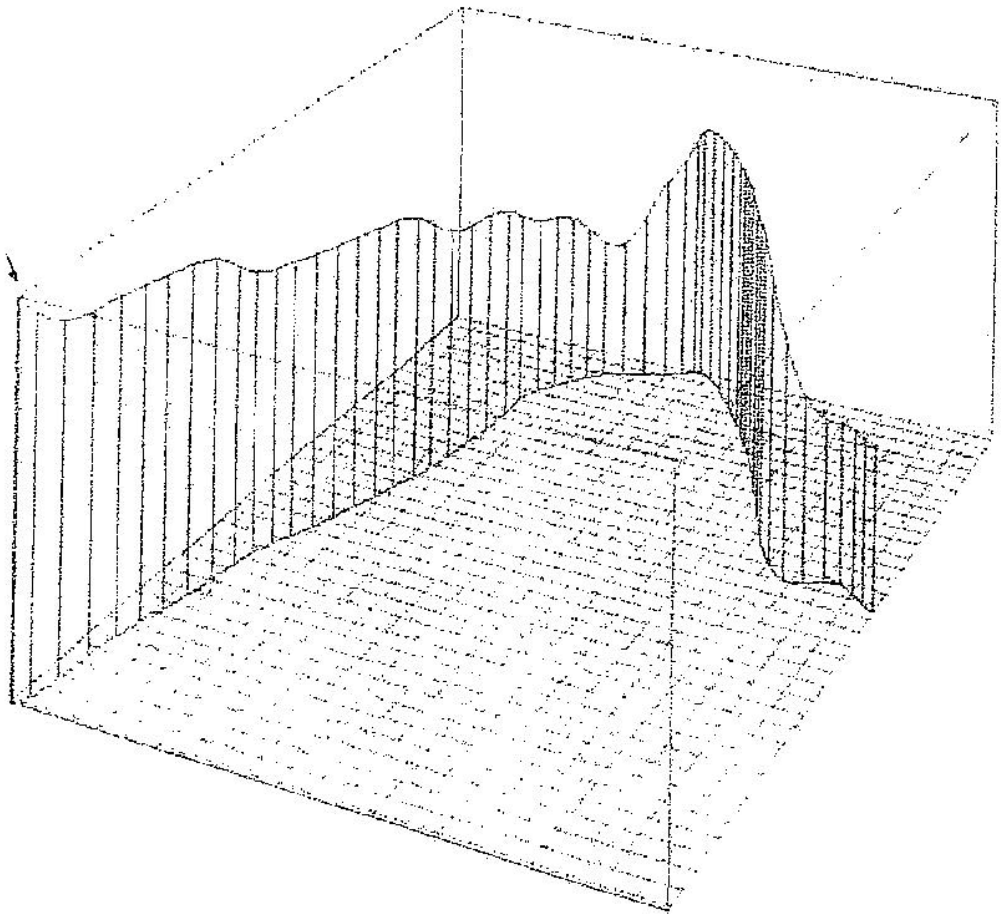


Figure B.4.4

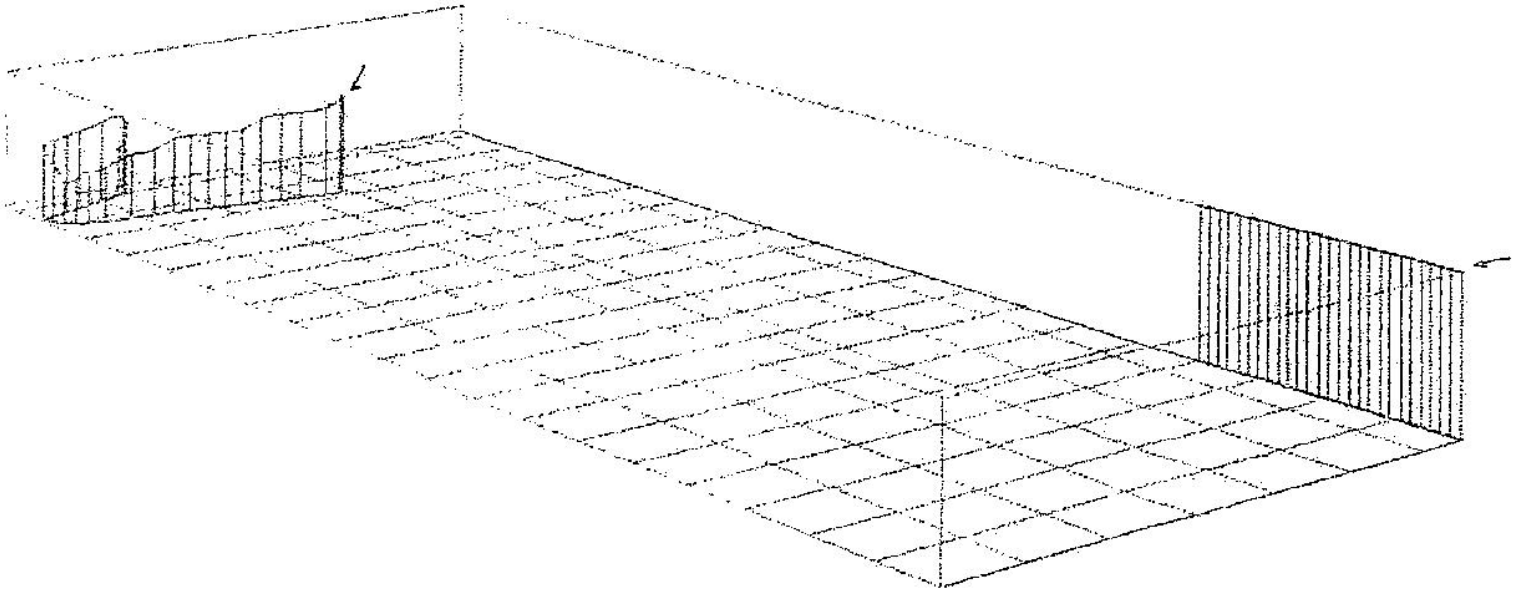
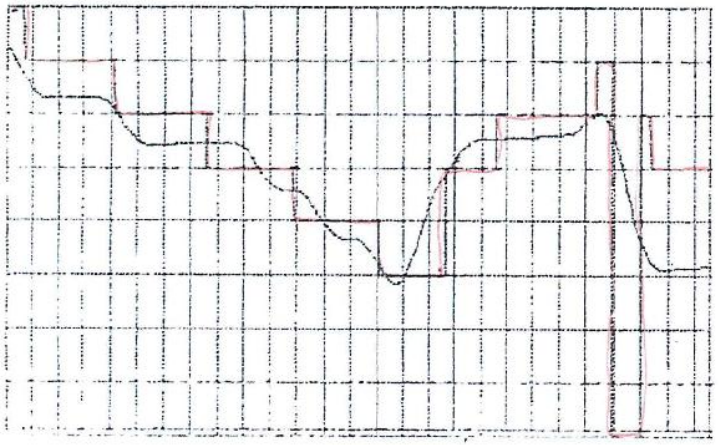
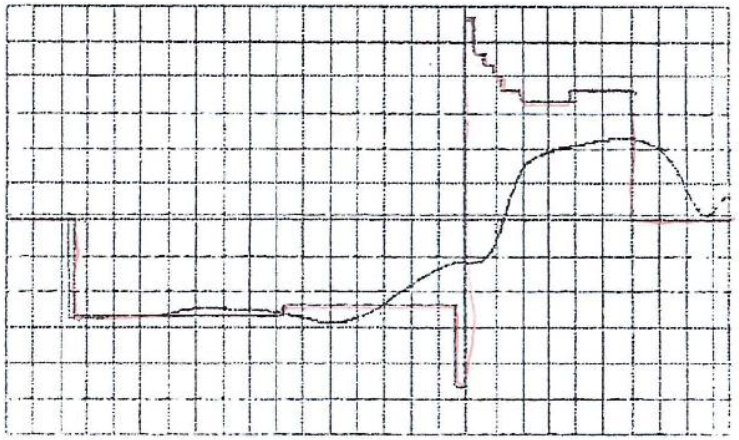


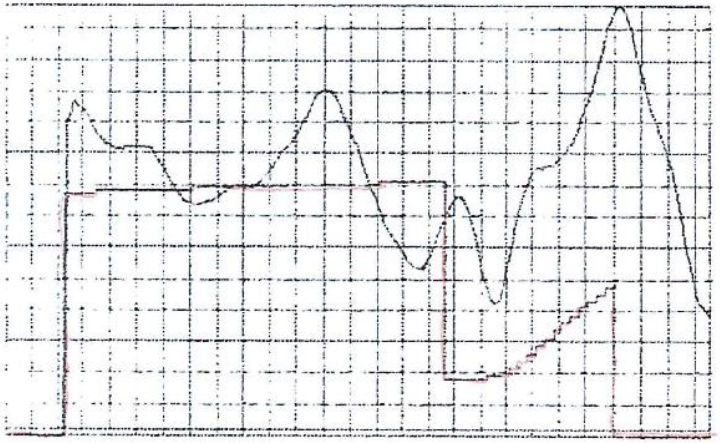
Figure B.4.5

(a)

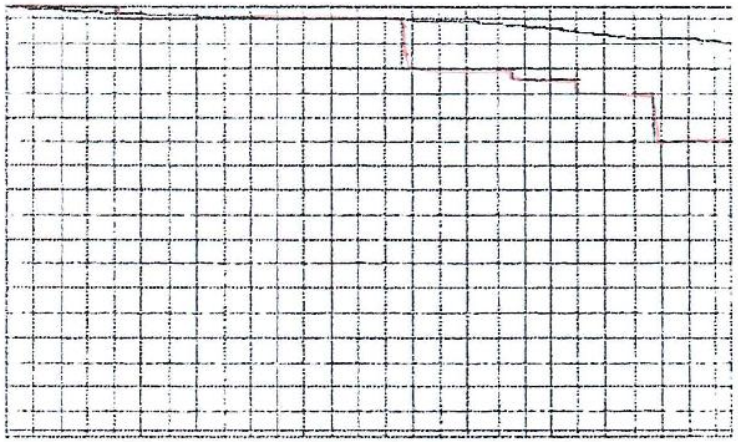


(b)





(c)



(d)

figure 15.5.1

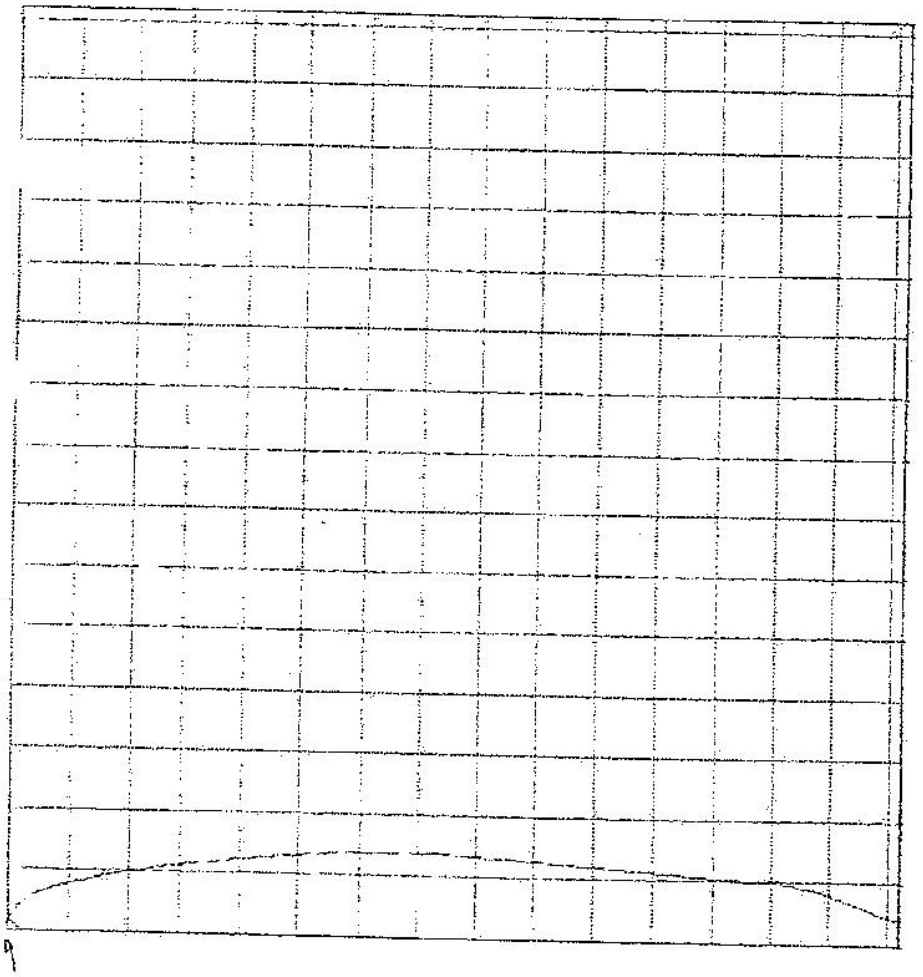


Figure B.5.2

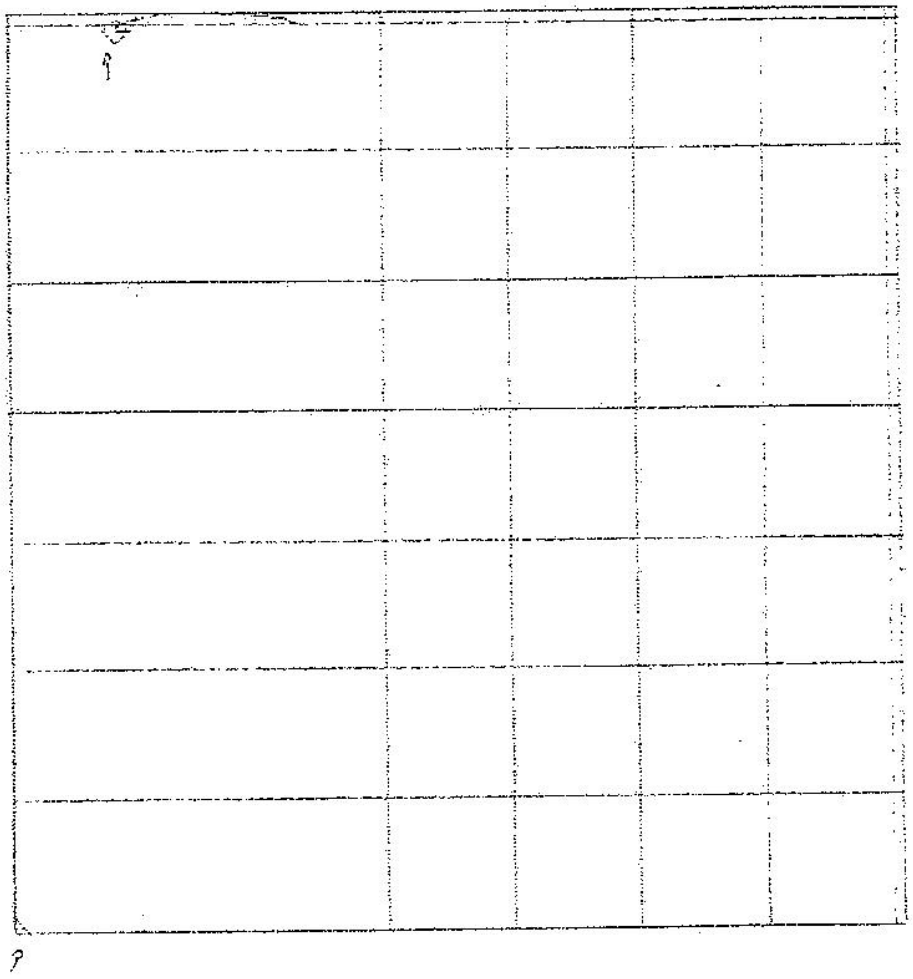


Figure B.5.3

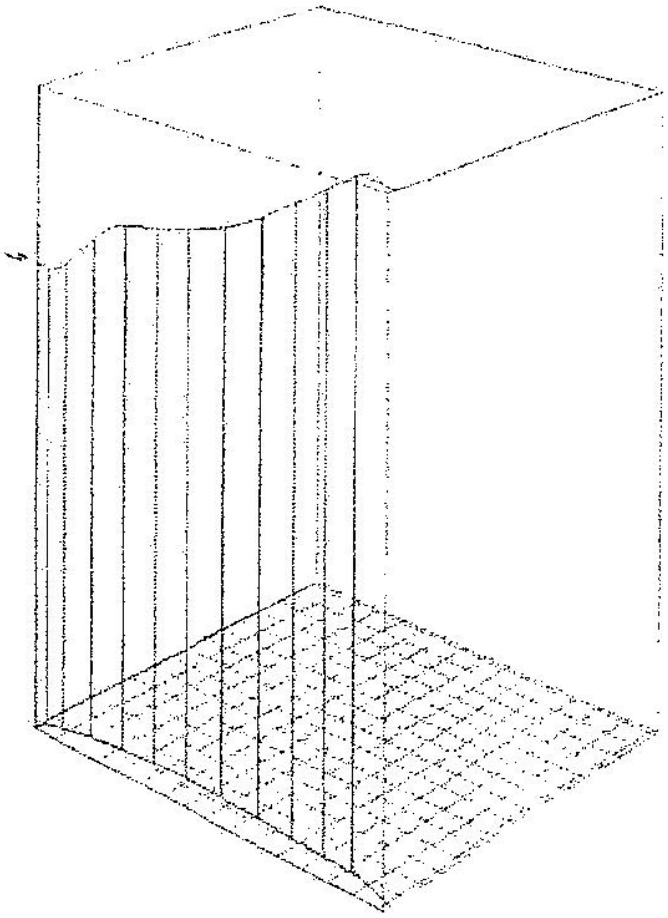


Figure B.5.4

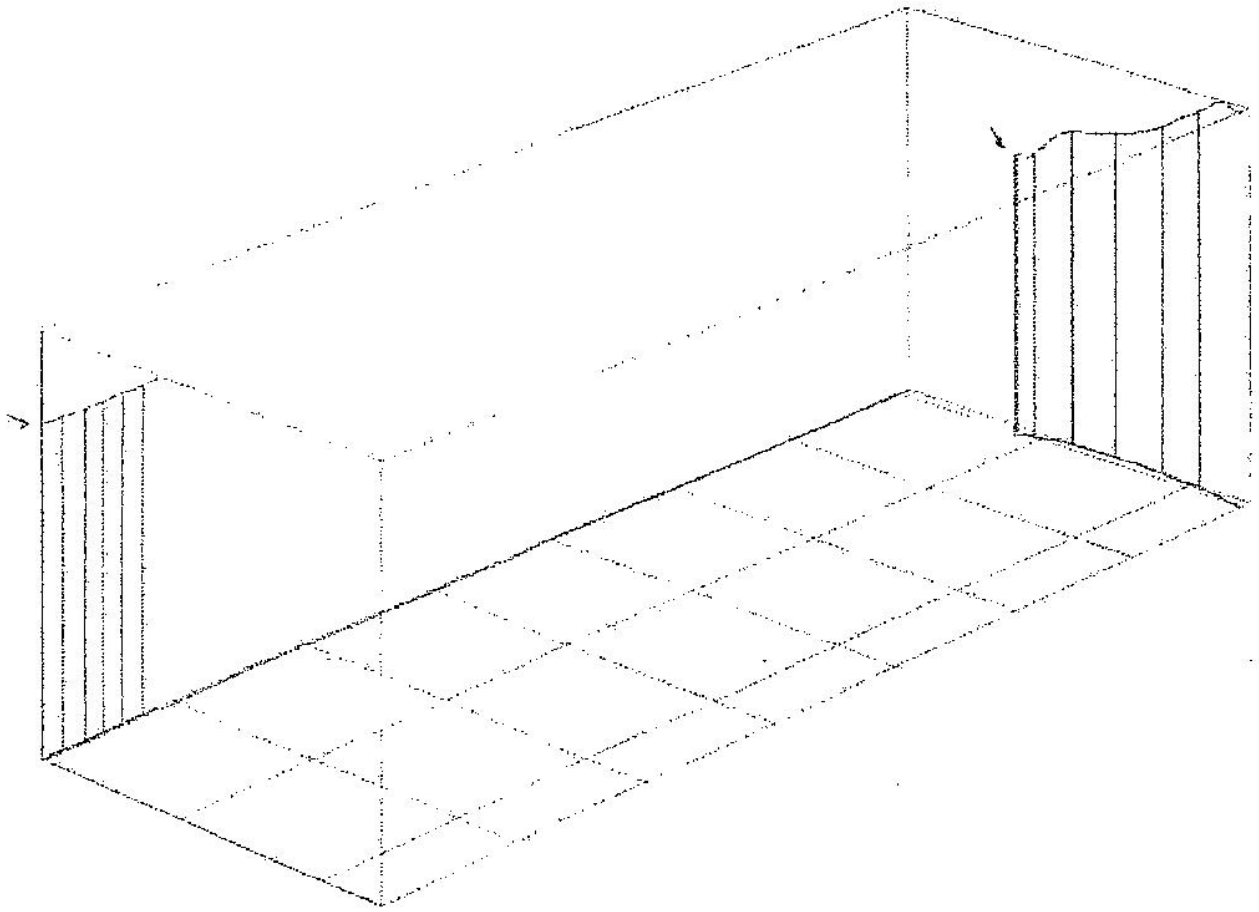


Figure B.5.5

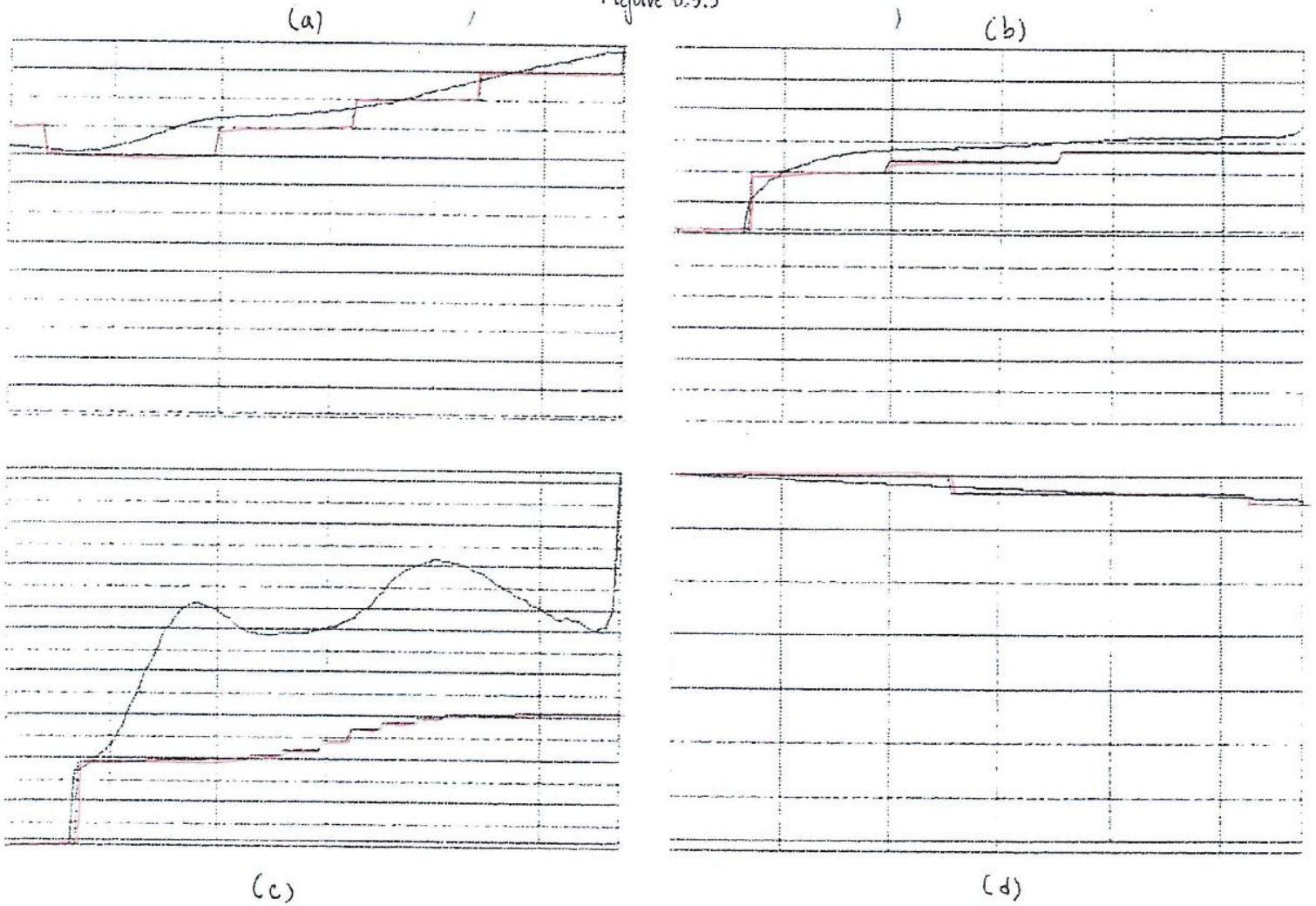


Figure B.6.1

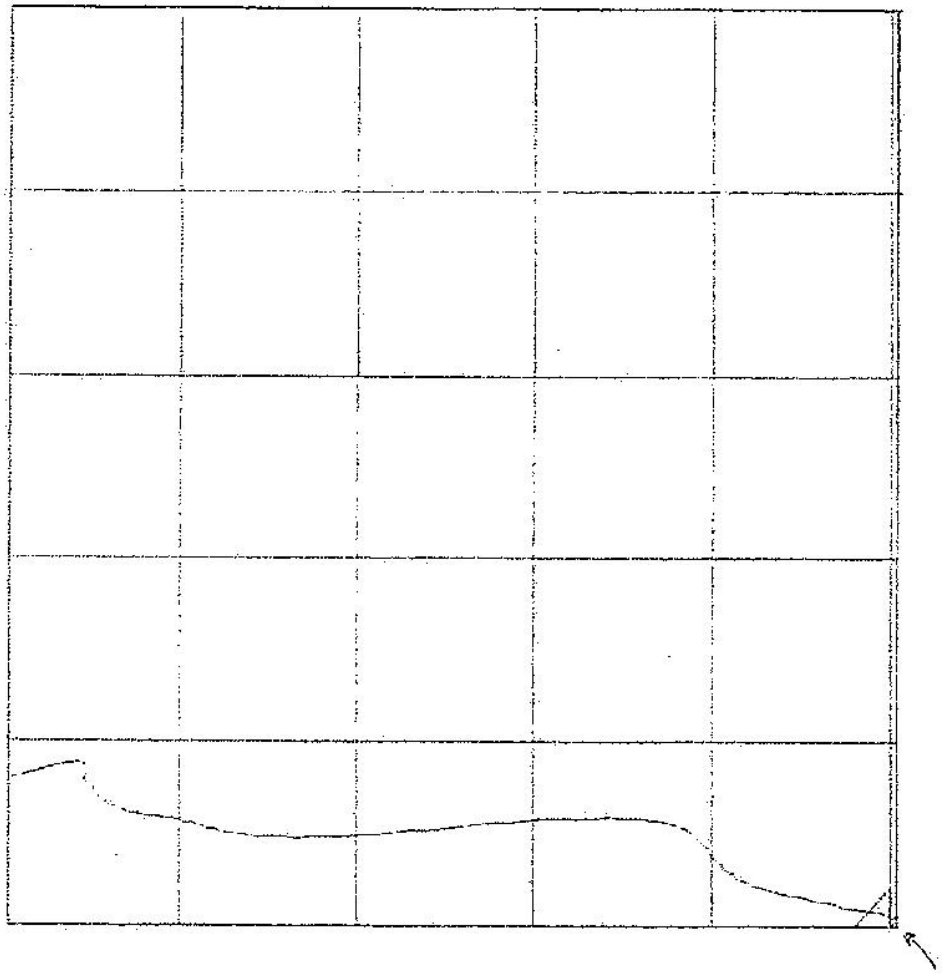


Figure B.6.2

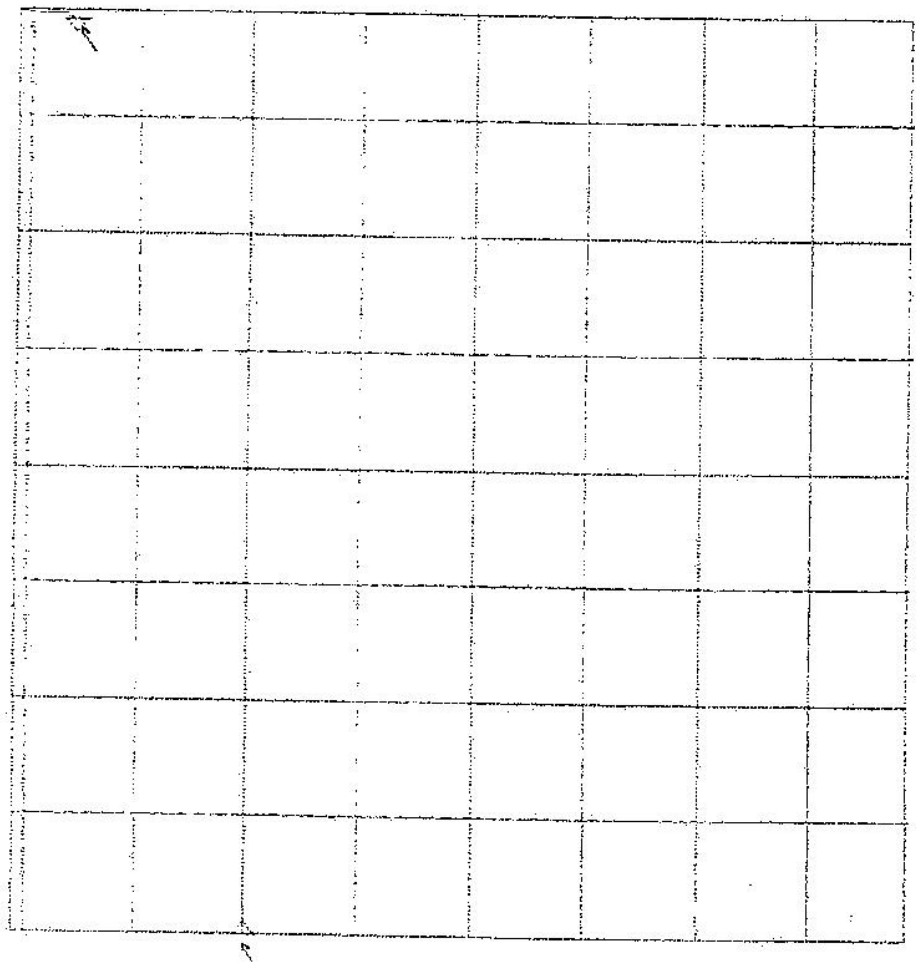


Figure B.6.3

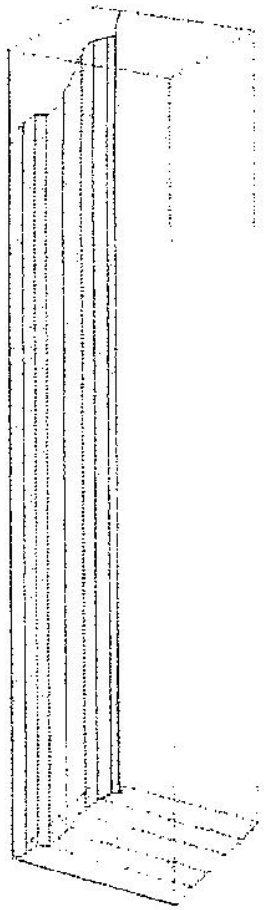


Figure B.6.4

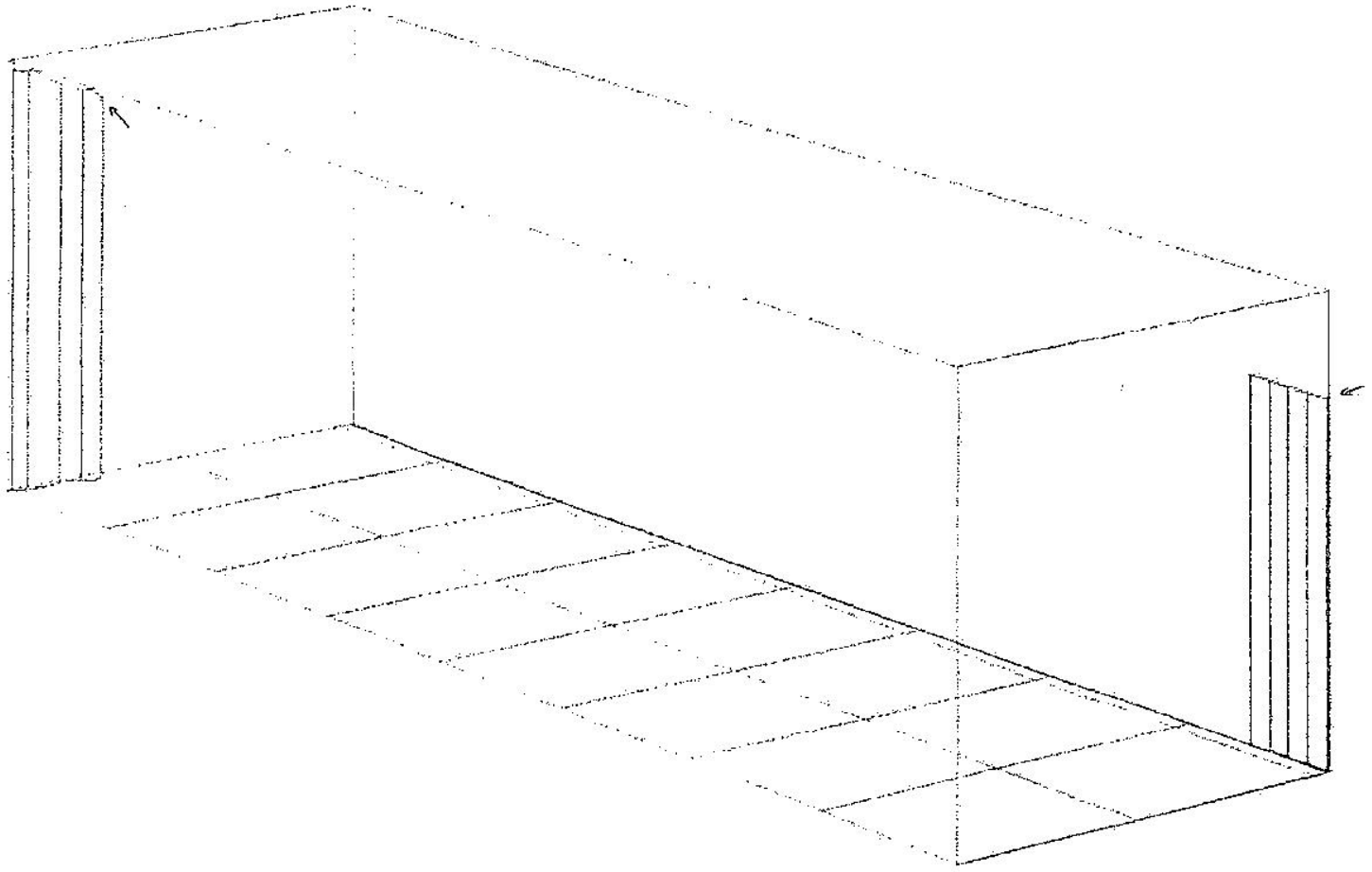


Figure B.6.3

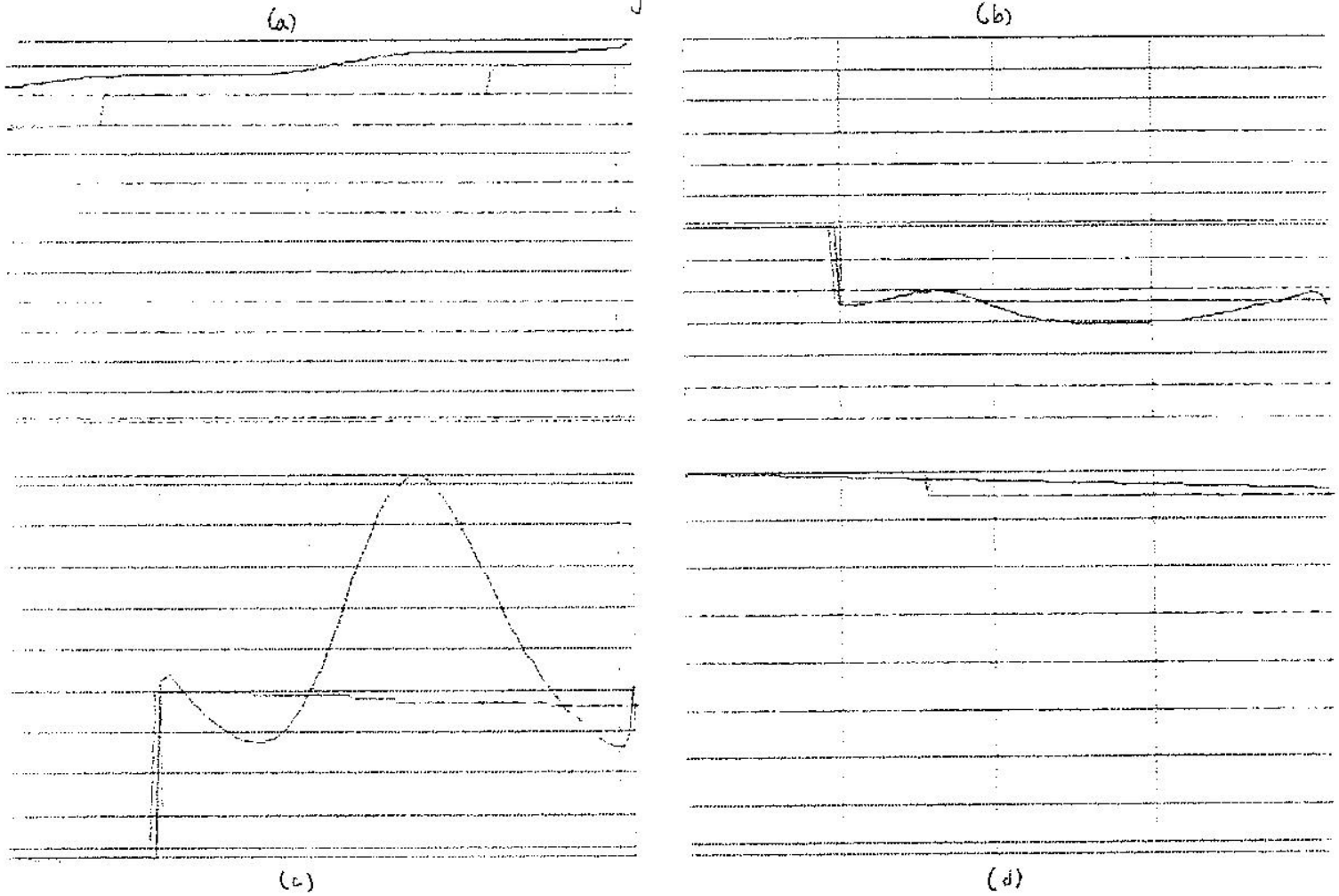


Figure B.7.1

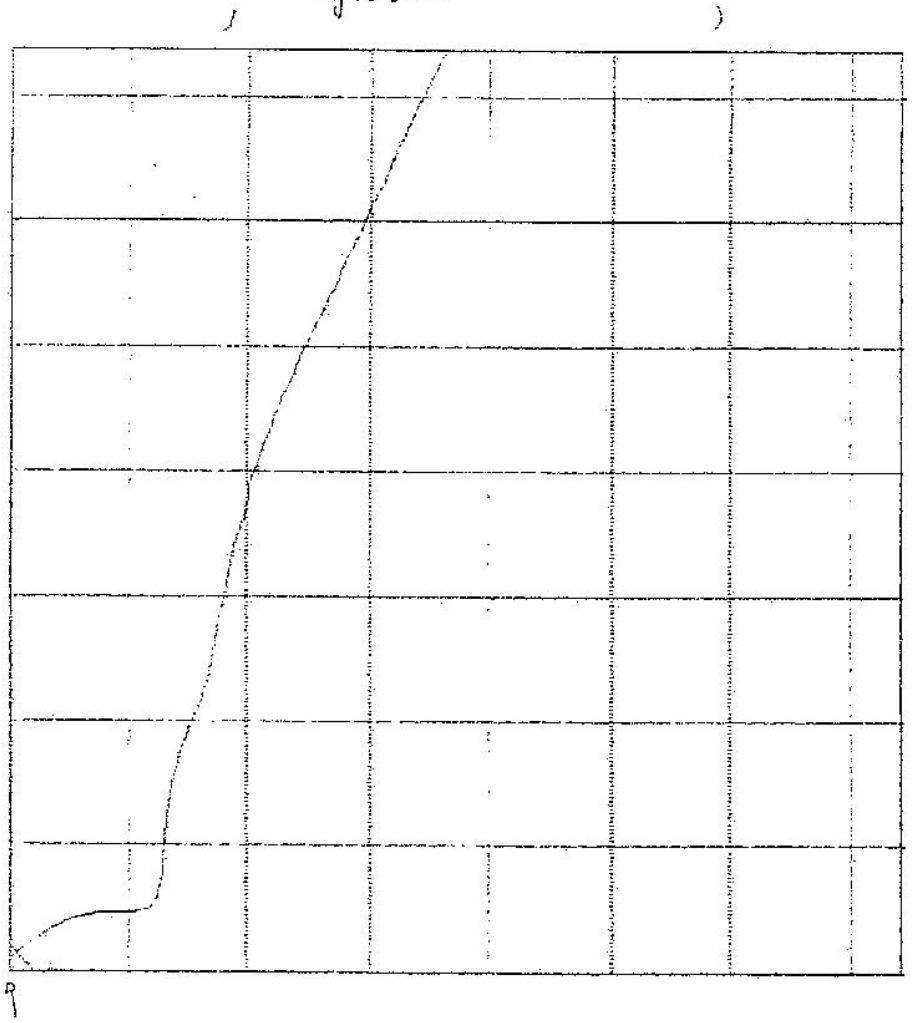


Figure B.7.2

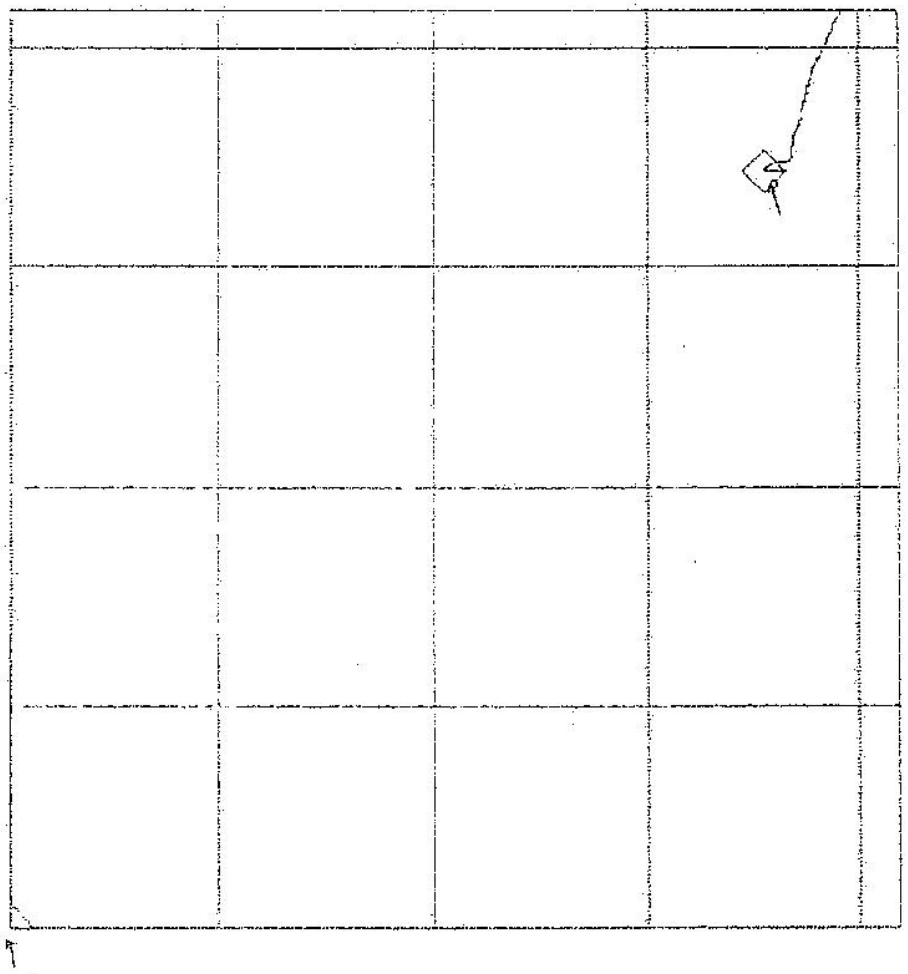


Figure 8.7.3

Figure B.7.4

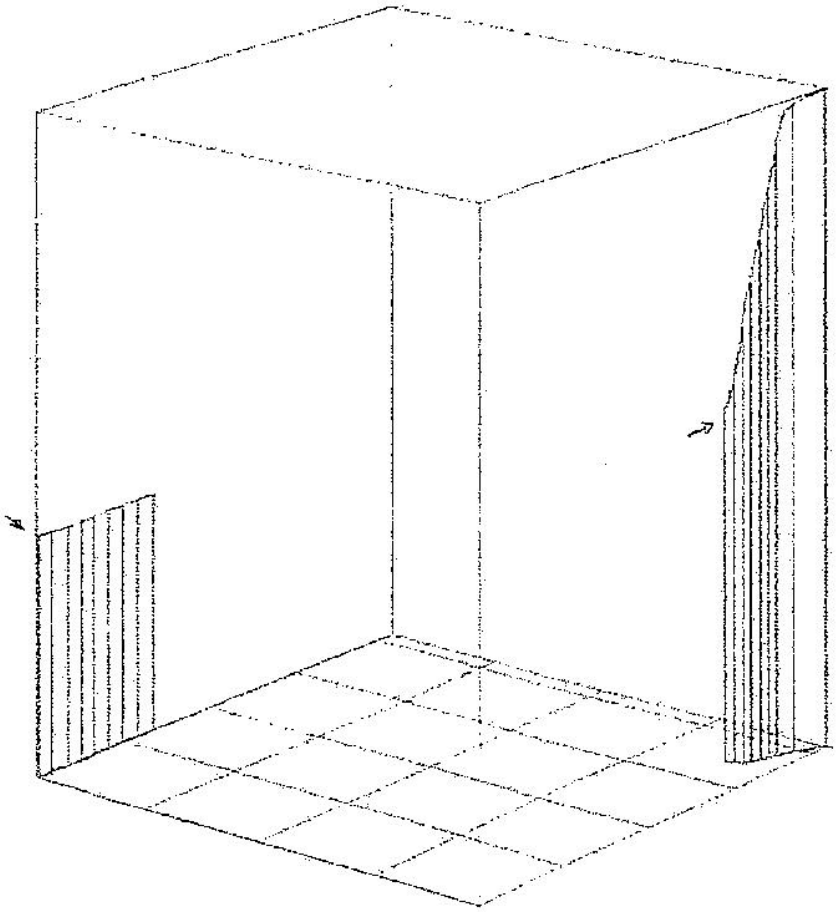


Figure B.7.5

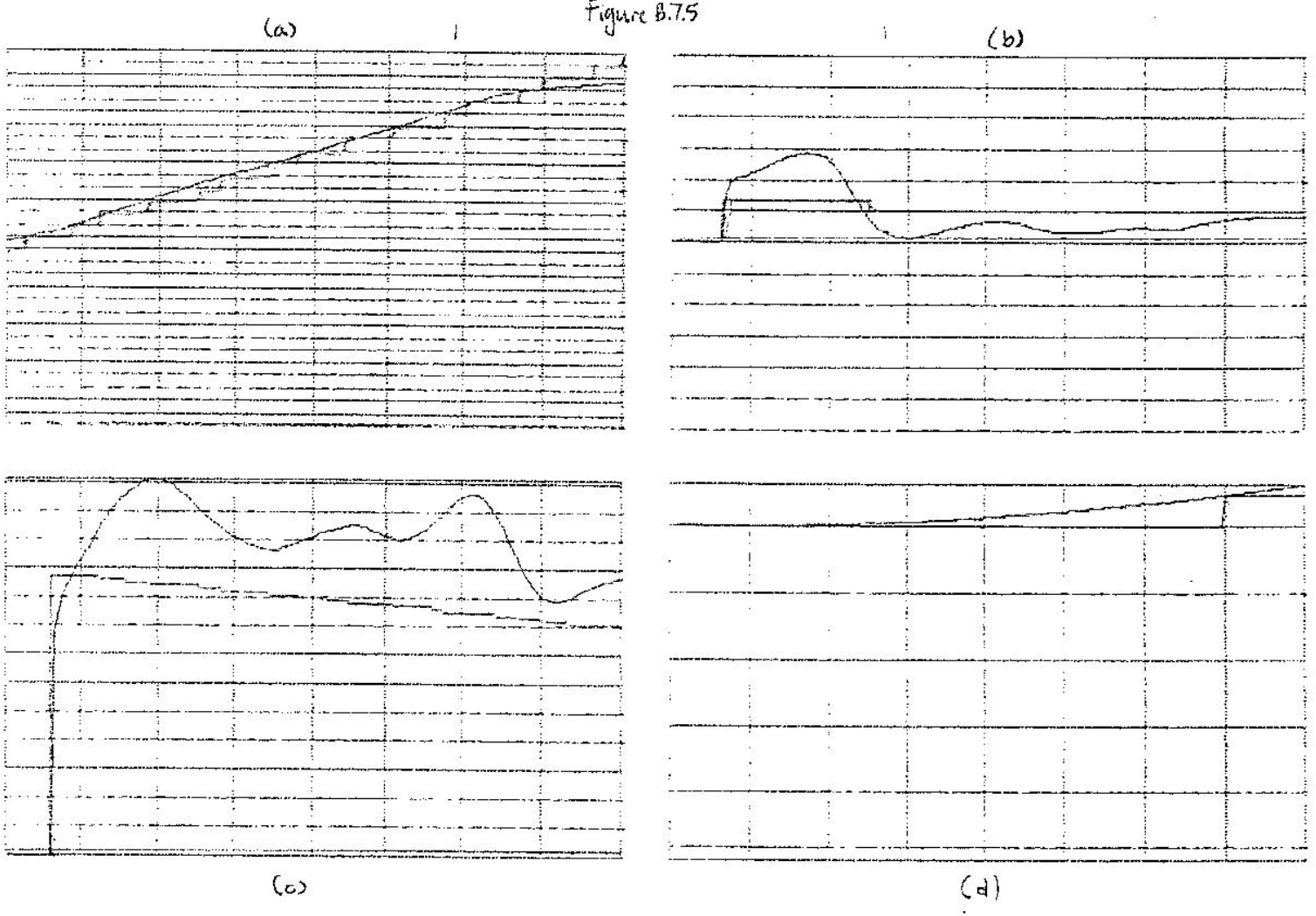


Figure D.11.1

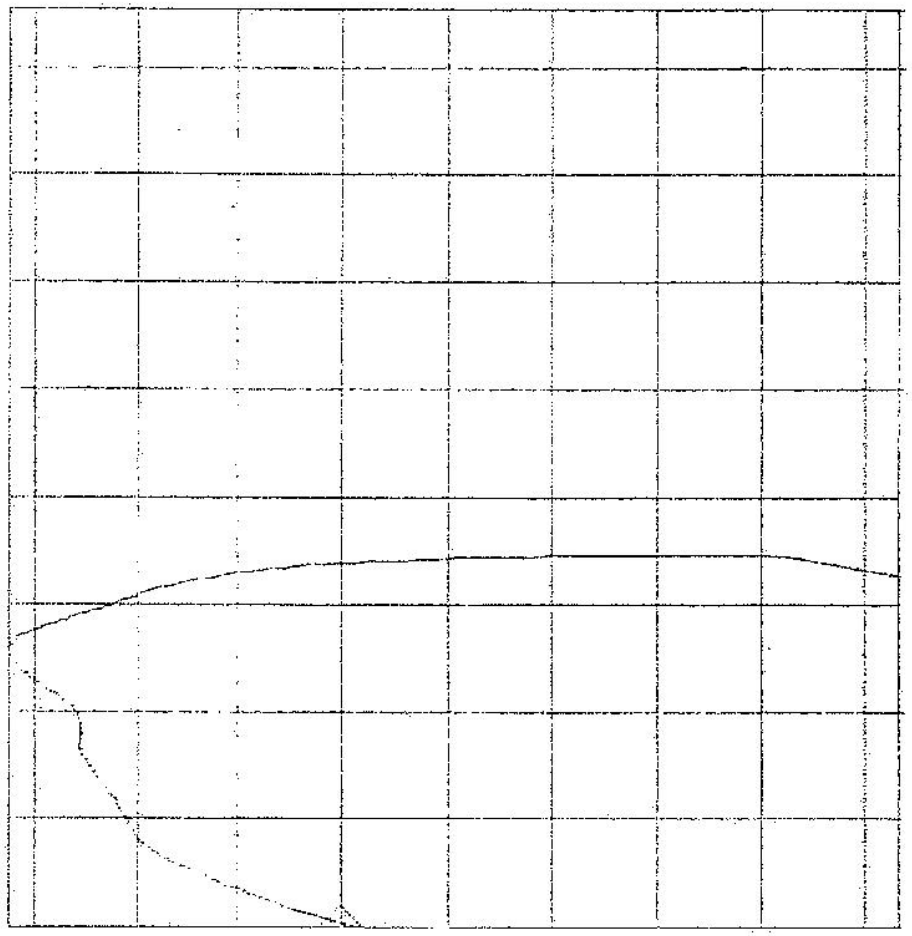


Figure B.11.2

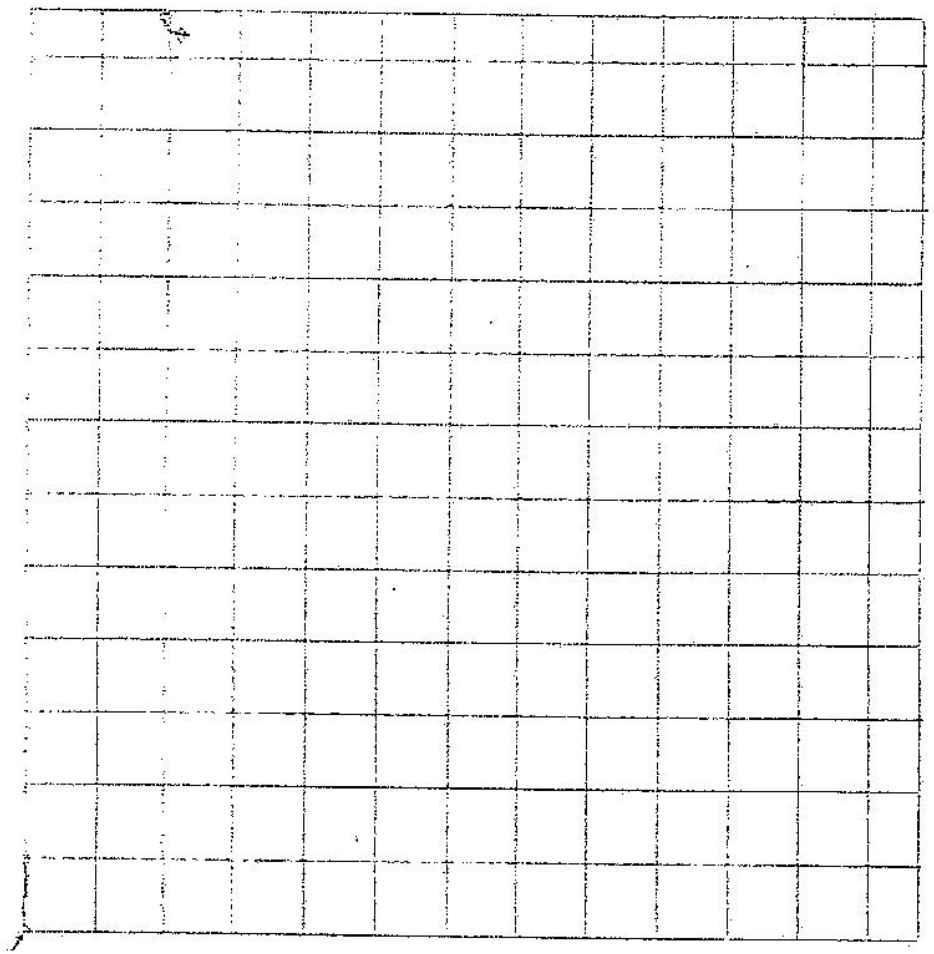


Figure B.11.3

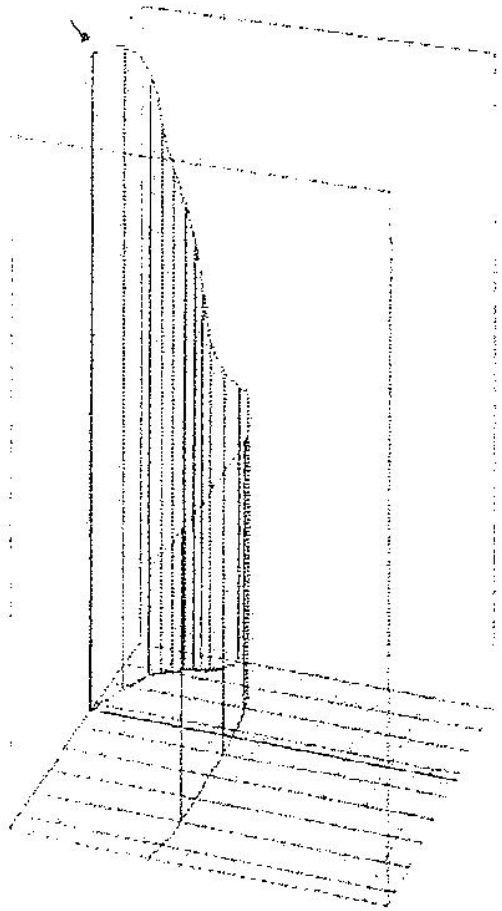


Figure B.11.4

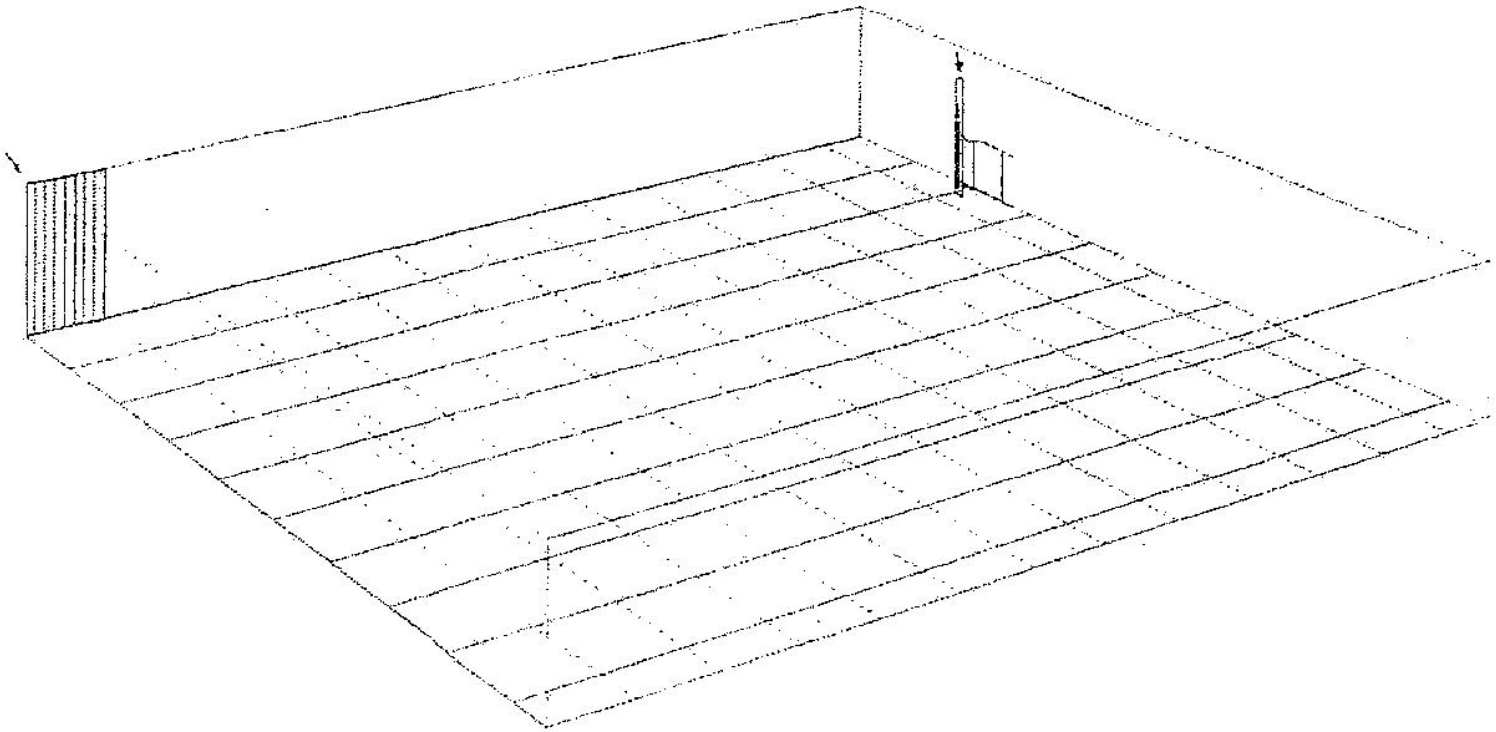


figure B.11.5

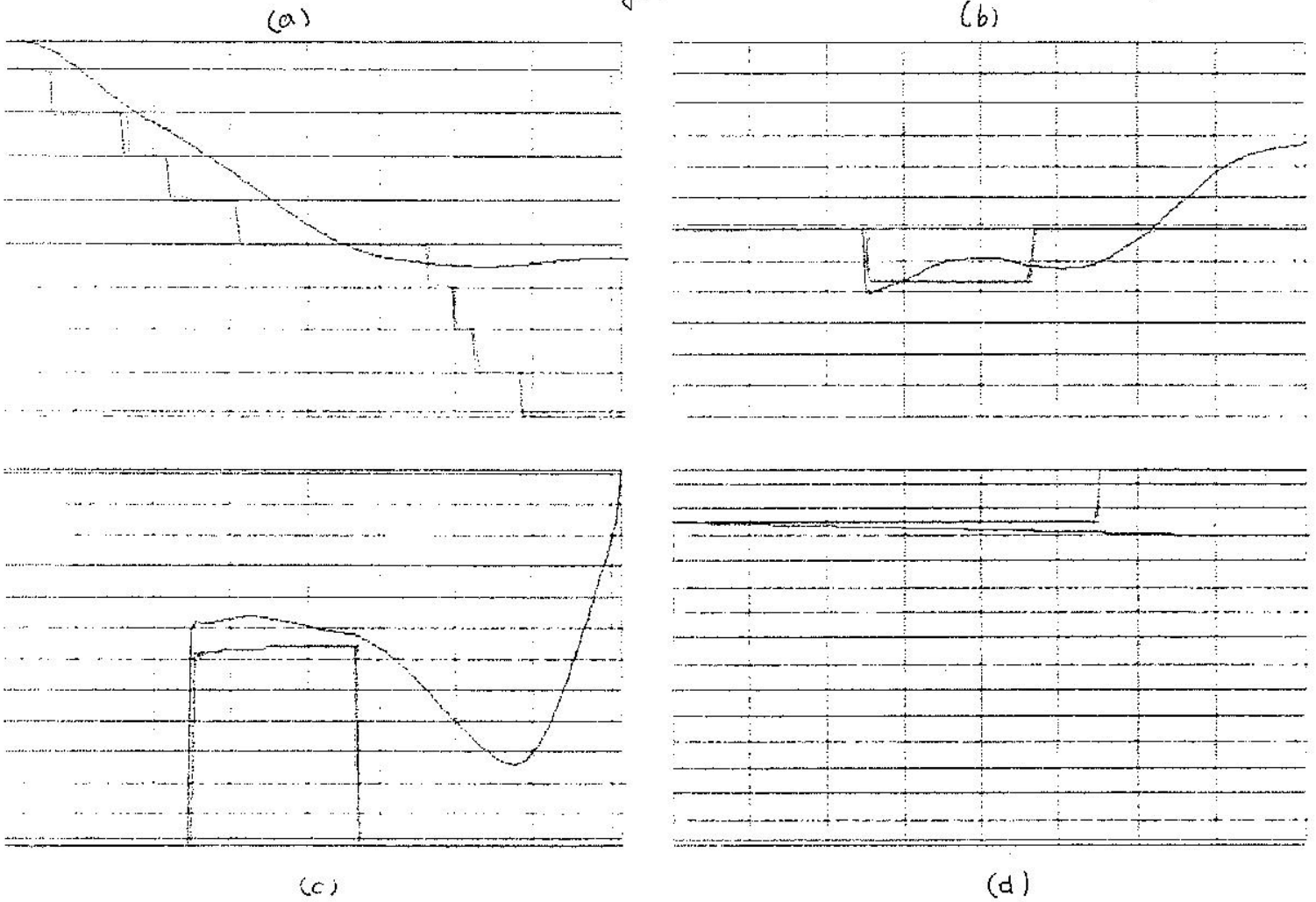


Figure B.12.1

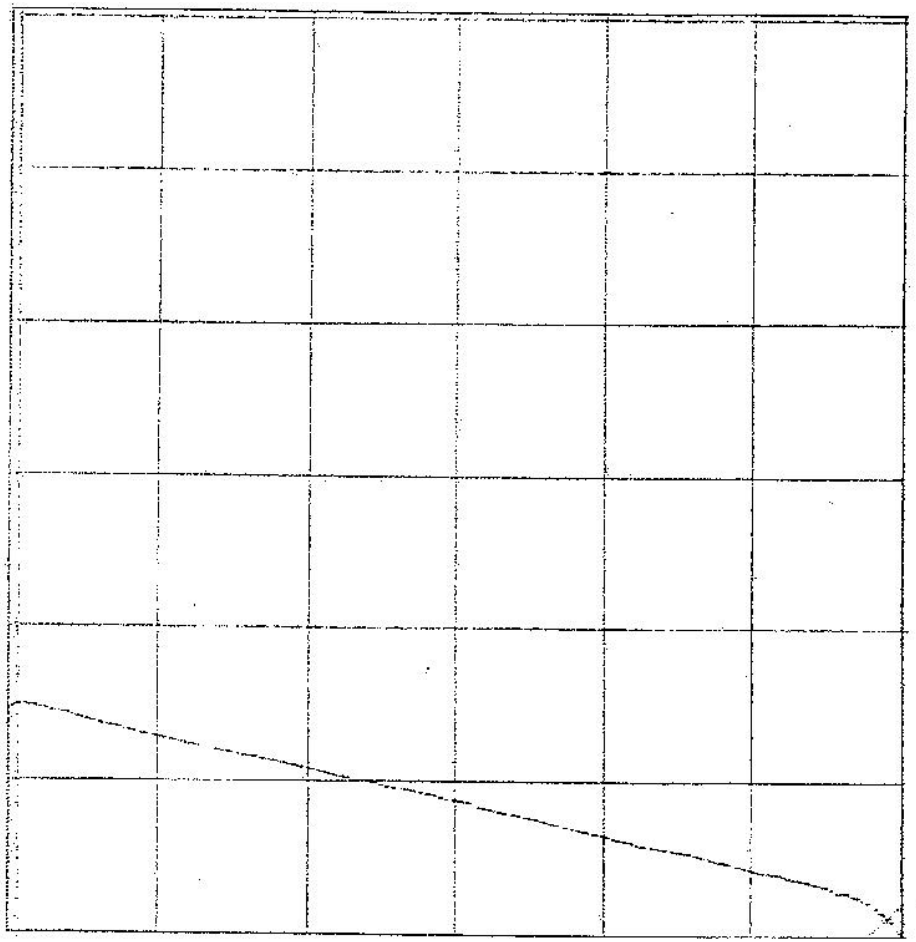


Figure B.12.2

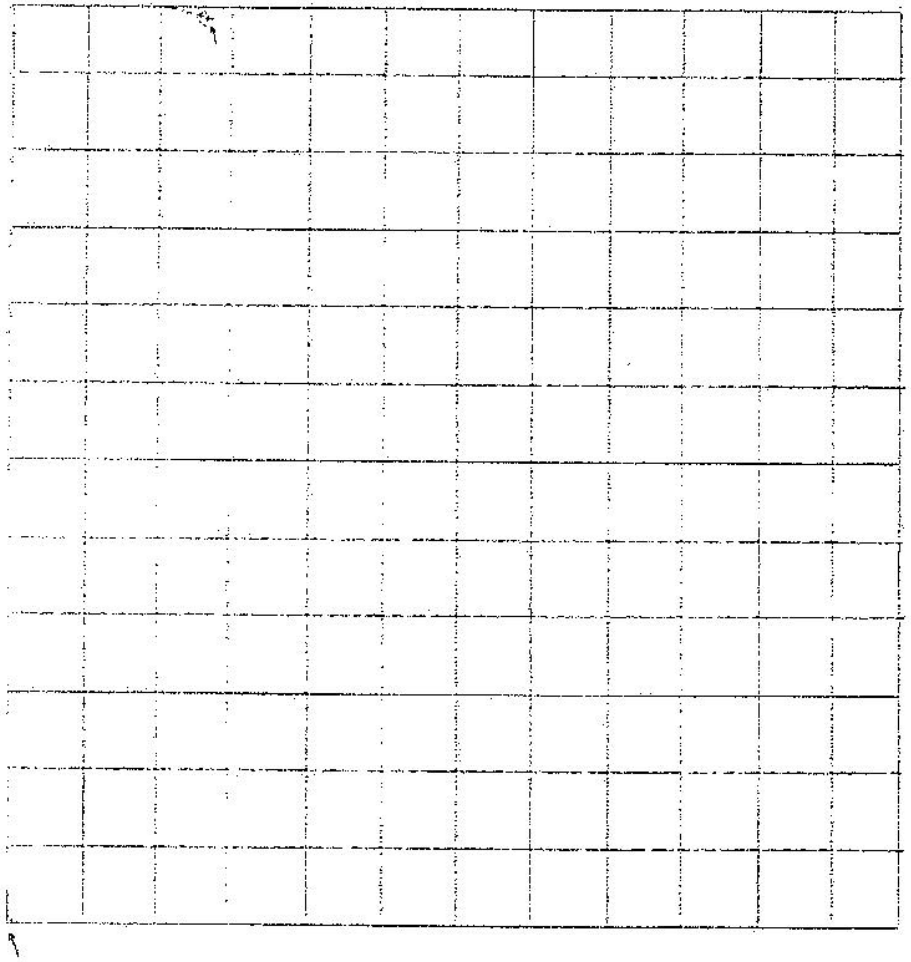


Figure B.12.3

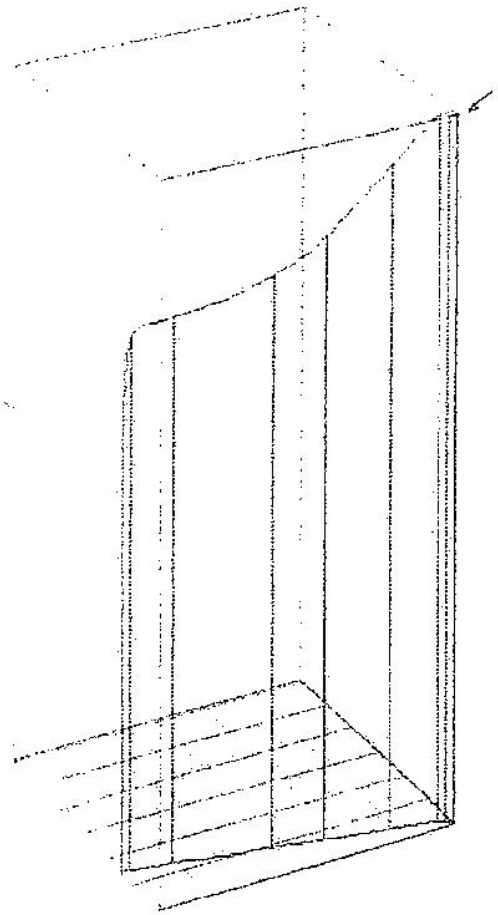


Figure B.12.4

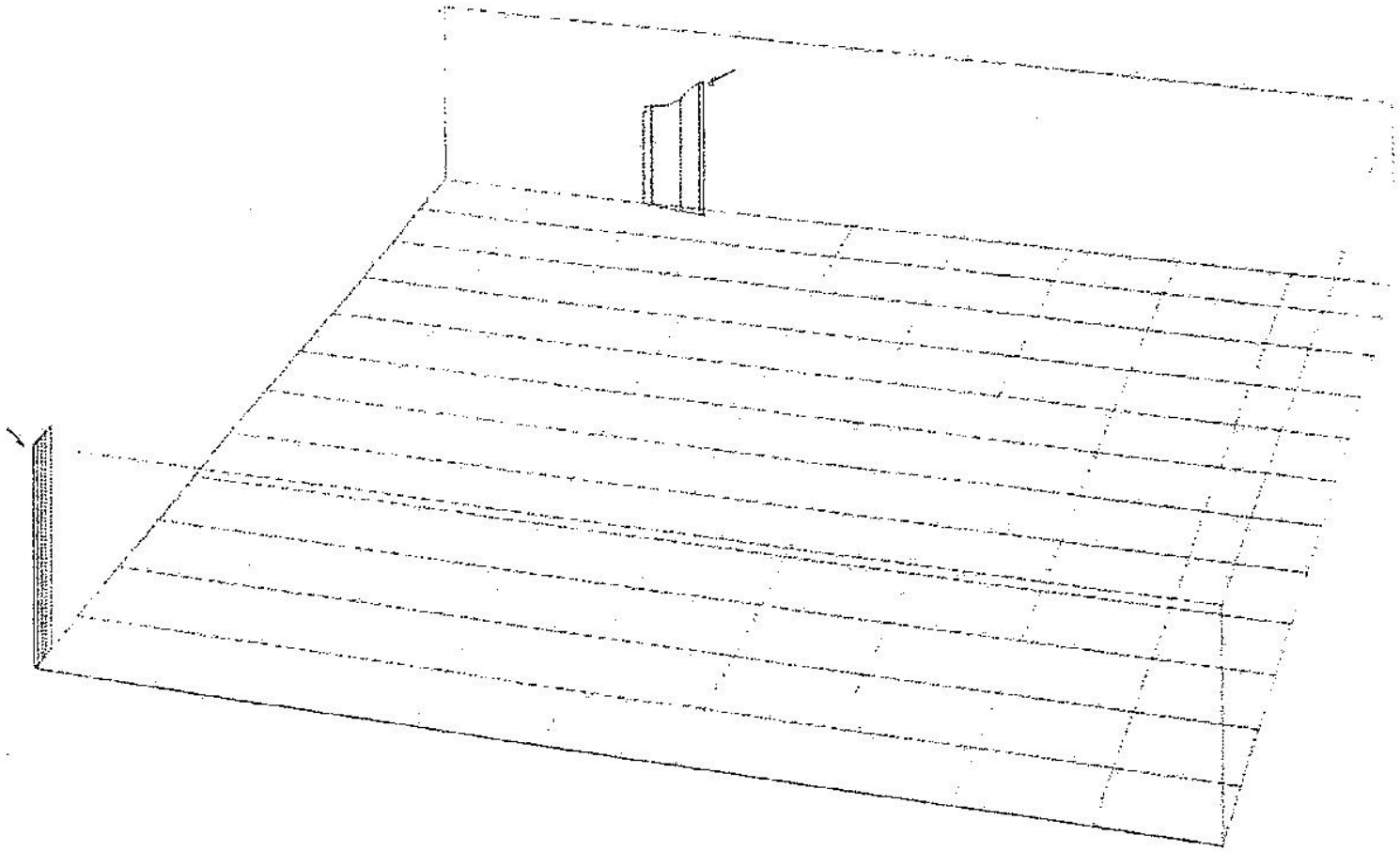


Figure B.12.5

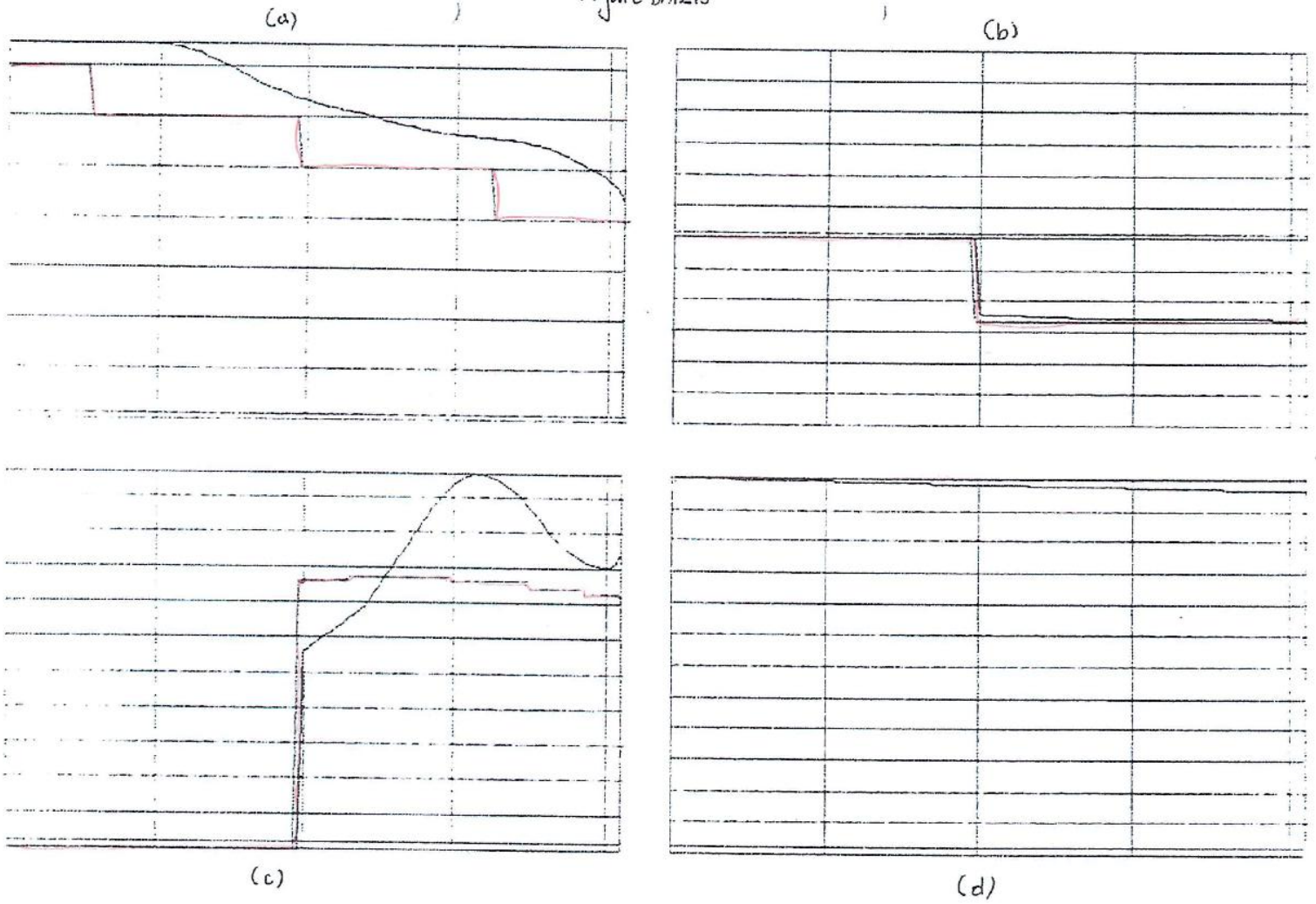


Figure 13.1

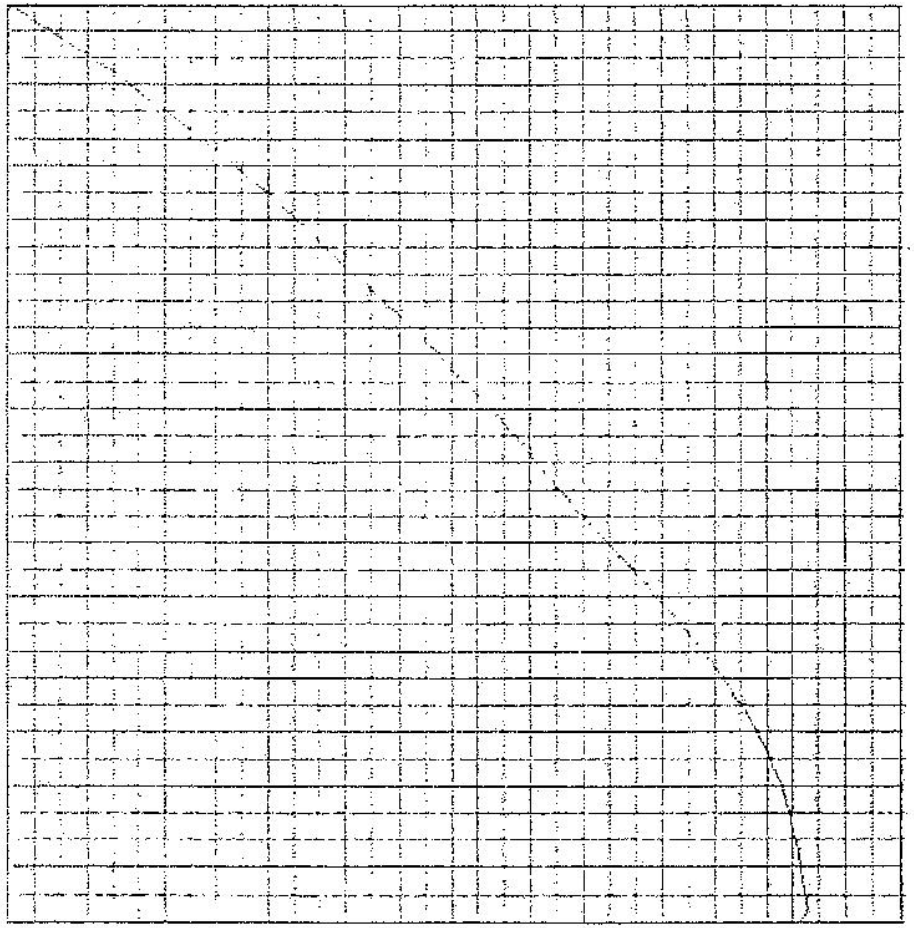


Figure 13.2

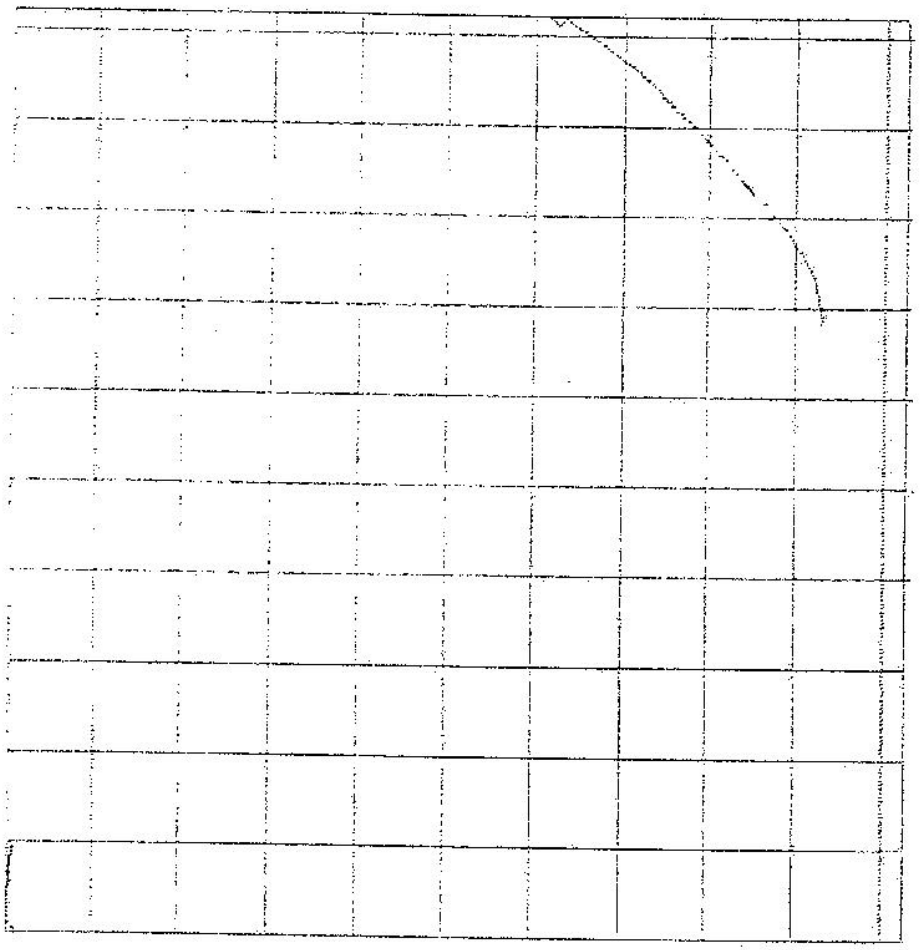


Figure 13.3

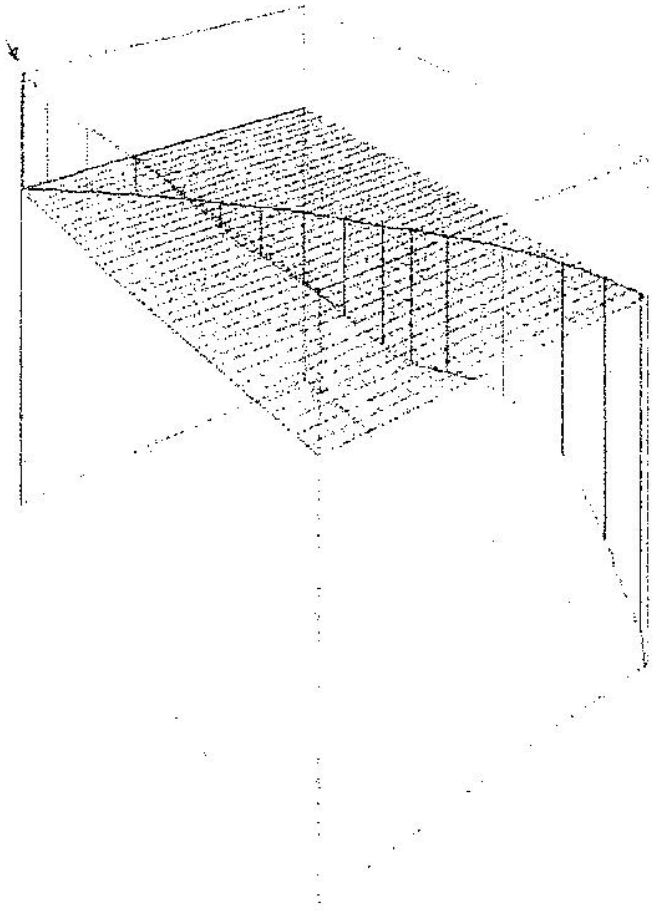


Figure 13.4

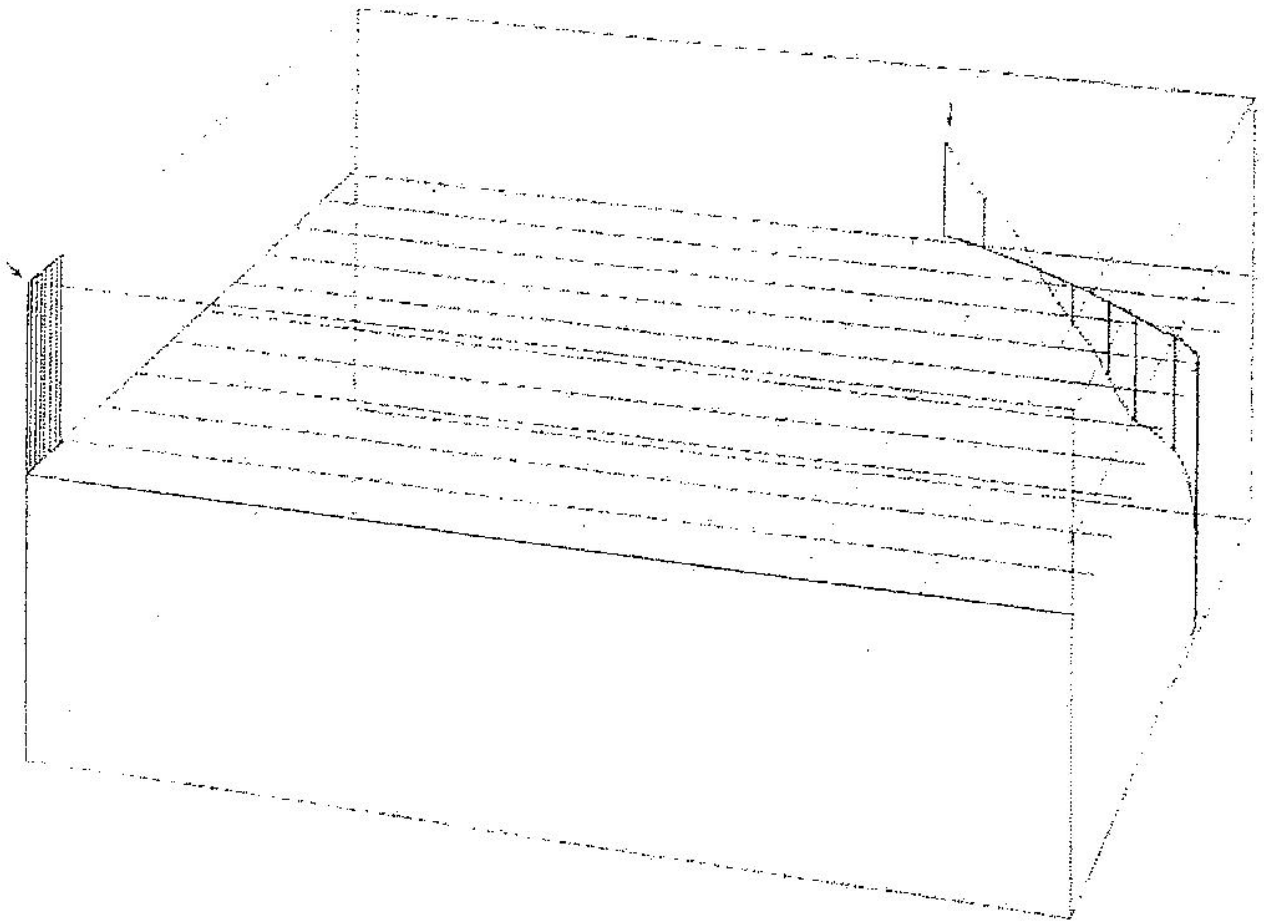
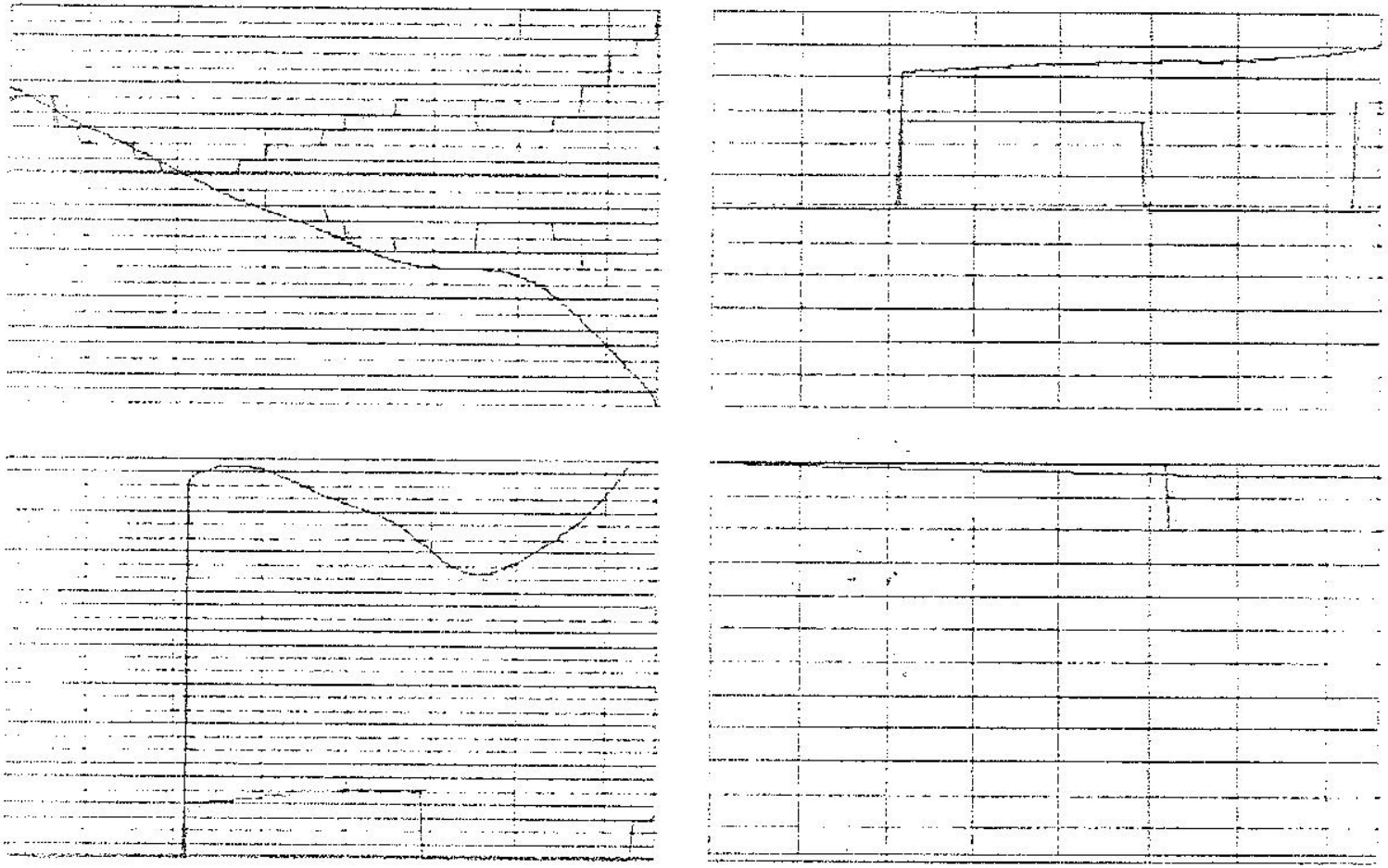
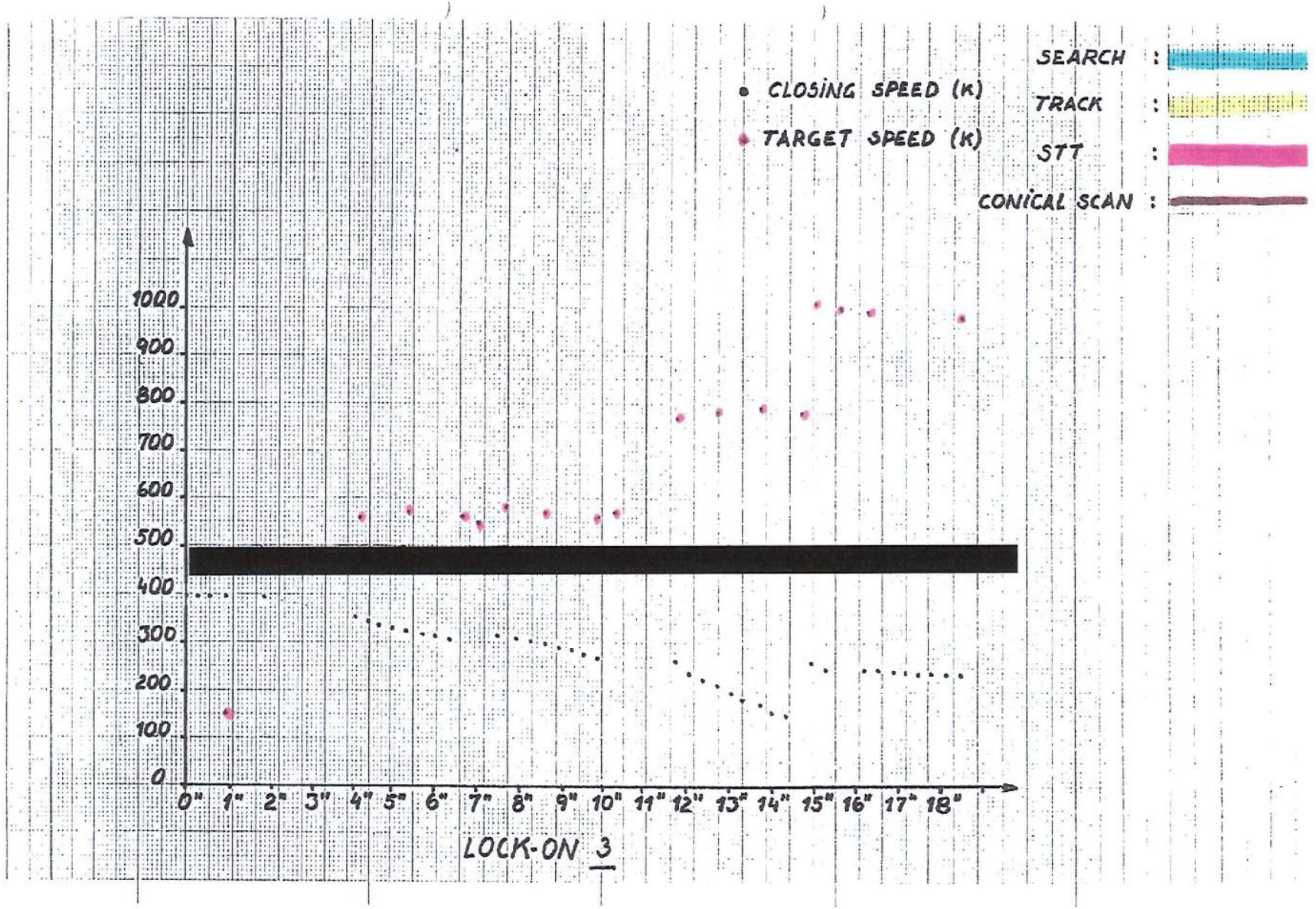


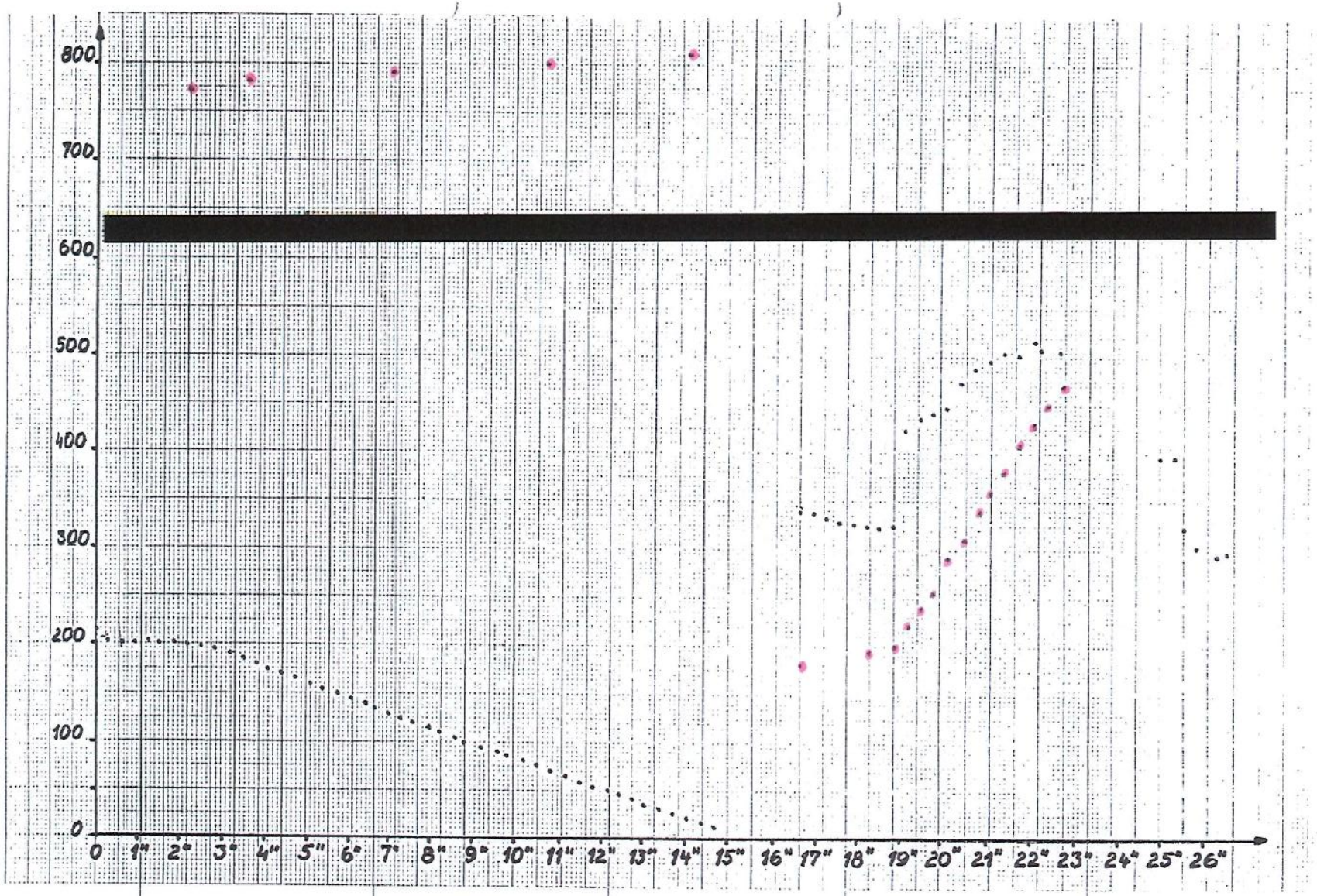
Figure B.13.5



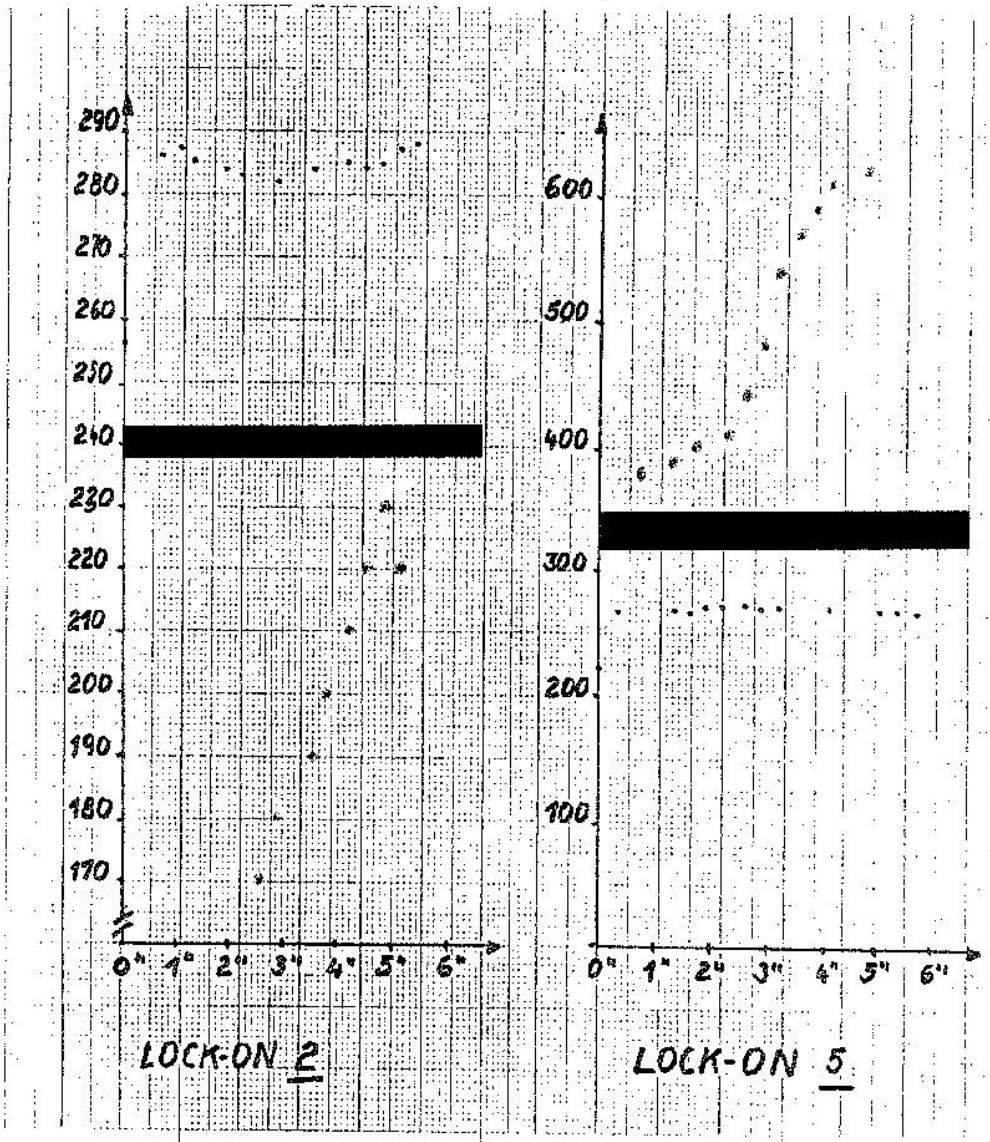
ANNEXE C :

INFLUENCE DU FILTRE DE KALMAN

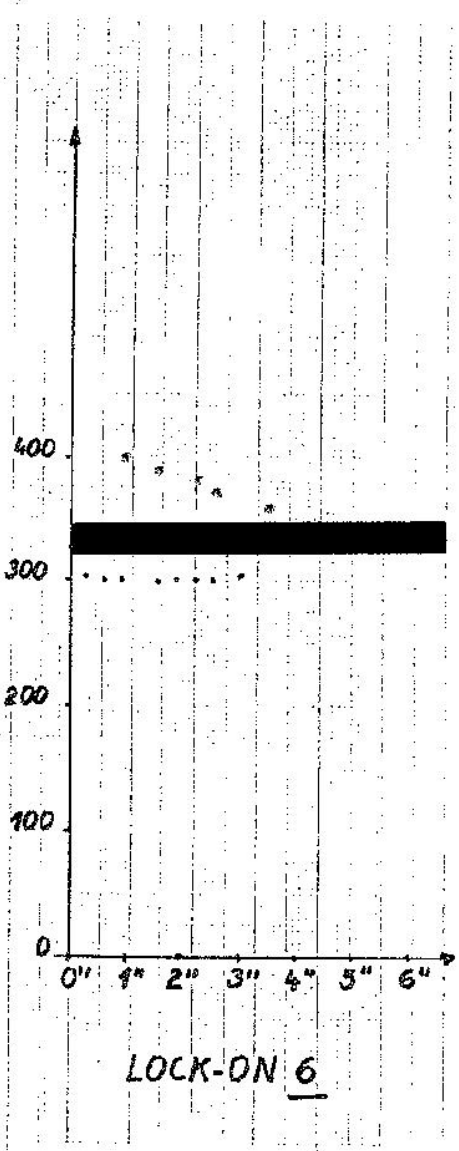

SEARCH :
TRACK :
STT :
CONICAL SCAN :
CLOSING SPEED (K)
TARGET SPEED (K)
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0" 1" 2" 3" 4" 5" 6" 7" 8" 9" 10" 11" 12" 13" 14" 15" 16" 17" 18"
LOCK-ON 3

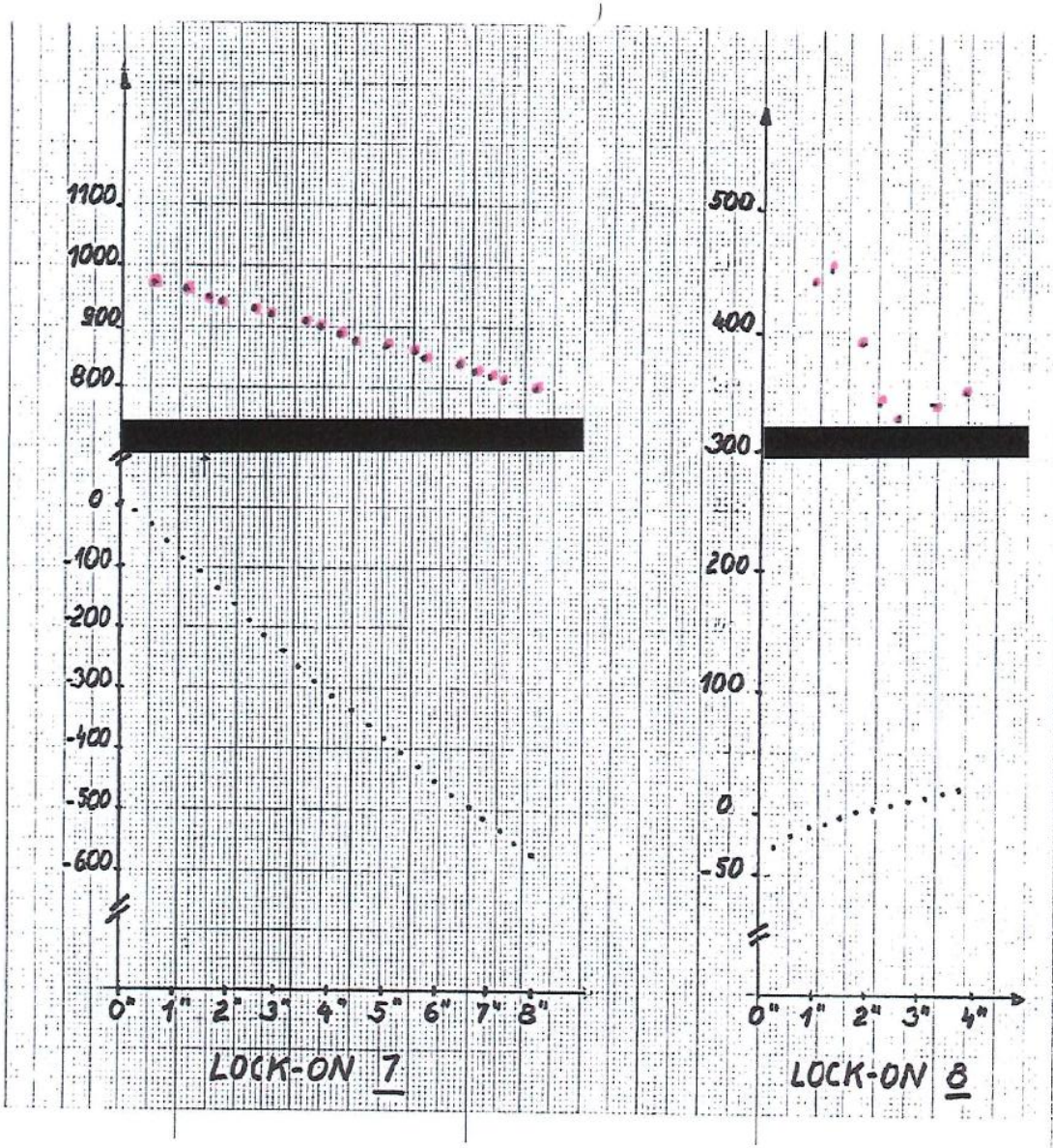

800
700
600
500
400
300
200
100
0
0 1" 2" 3" 4" 5" 6" 7" 8" 9" 10" 11" 12" 13" 14" 15" 16" 17" 18" 19" 20" 21" 22" 23" 24" 25" 26"

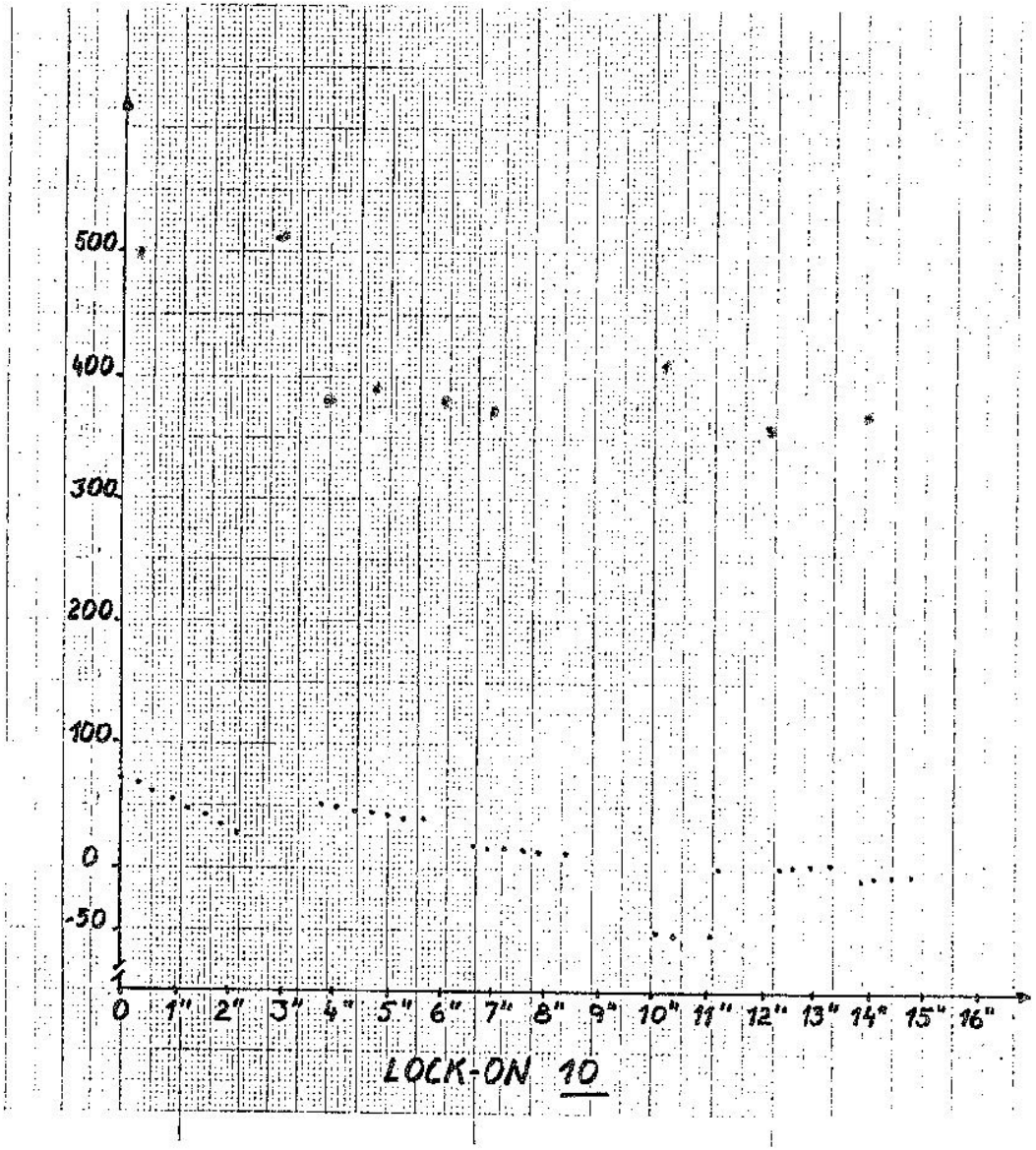
LOCK-ON 4


290
280
270
260
250
240
230
220
210
200
190
180
170
0" 1" 2" 3" 4" 5" 6"
LOCK-ON 2

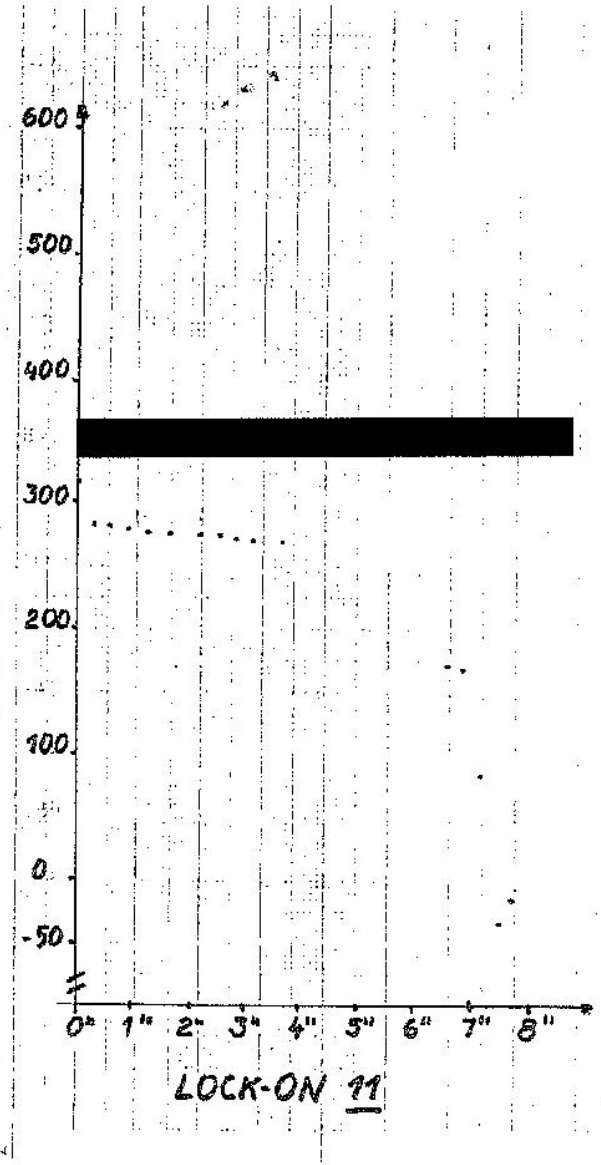
600
500
400
300
200
100
0" 1" 2" 3" 4" 5" 6"
LOCK-ON 5


400
300
200
100
0
0" 1" 2" 3" 4" 5" 6"
LOCK-ON 6

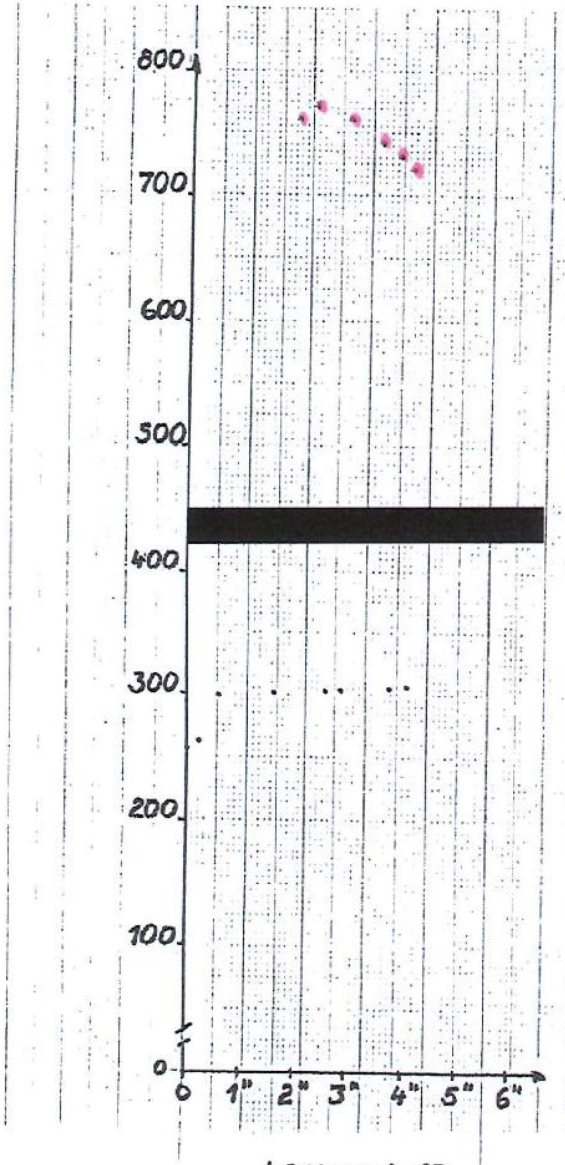

1100
1000
900
800
0
-100
-200
-300
-400
-500
-600
0" 1" 2" 3" 4" 5" 6" 7" 8"
LOCK-ON 7
500
400
300
200
100
0
-50
0" 1" 2" 3" 4"
LOCK-ON 8



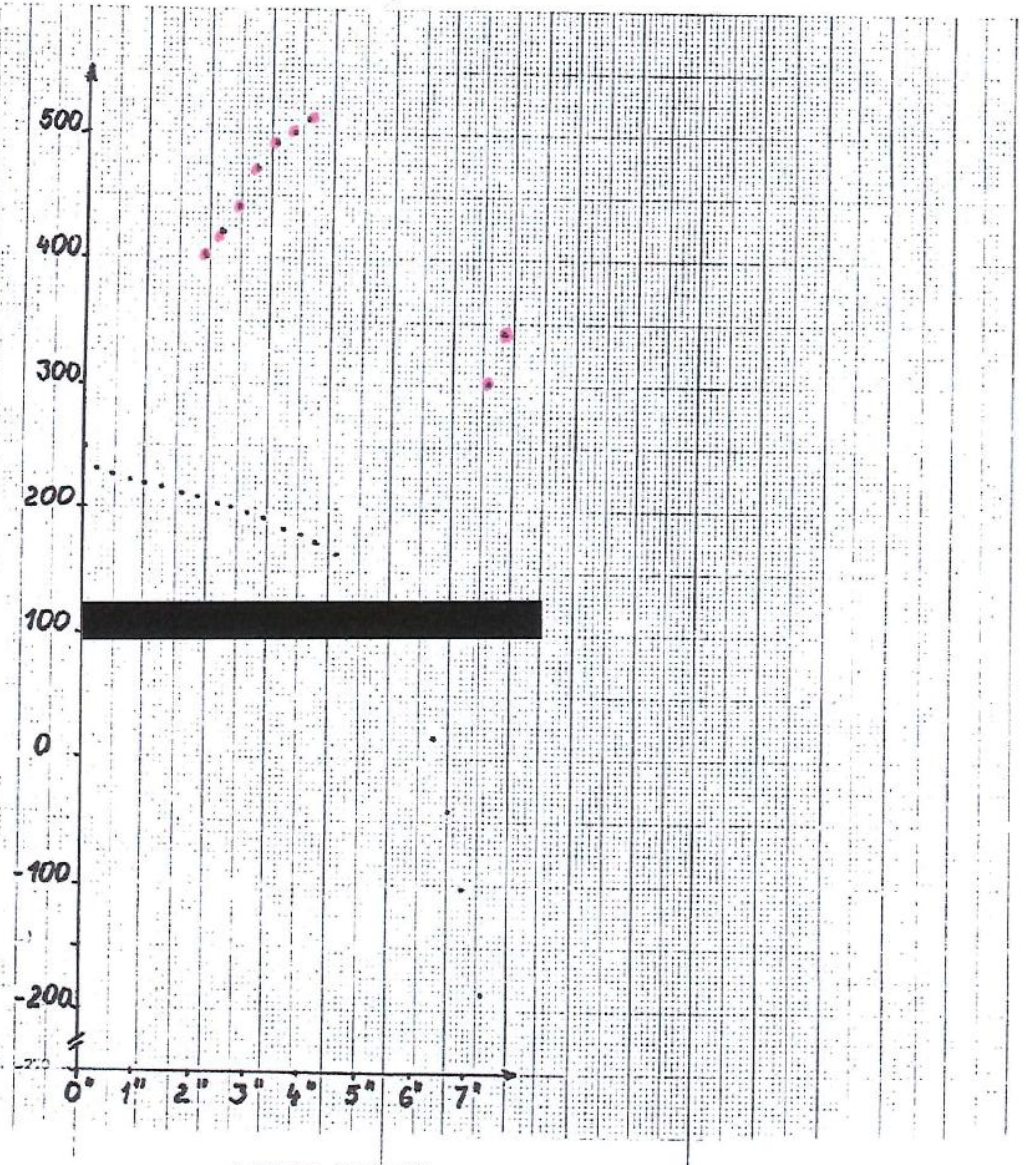
LOCK-ON 10



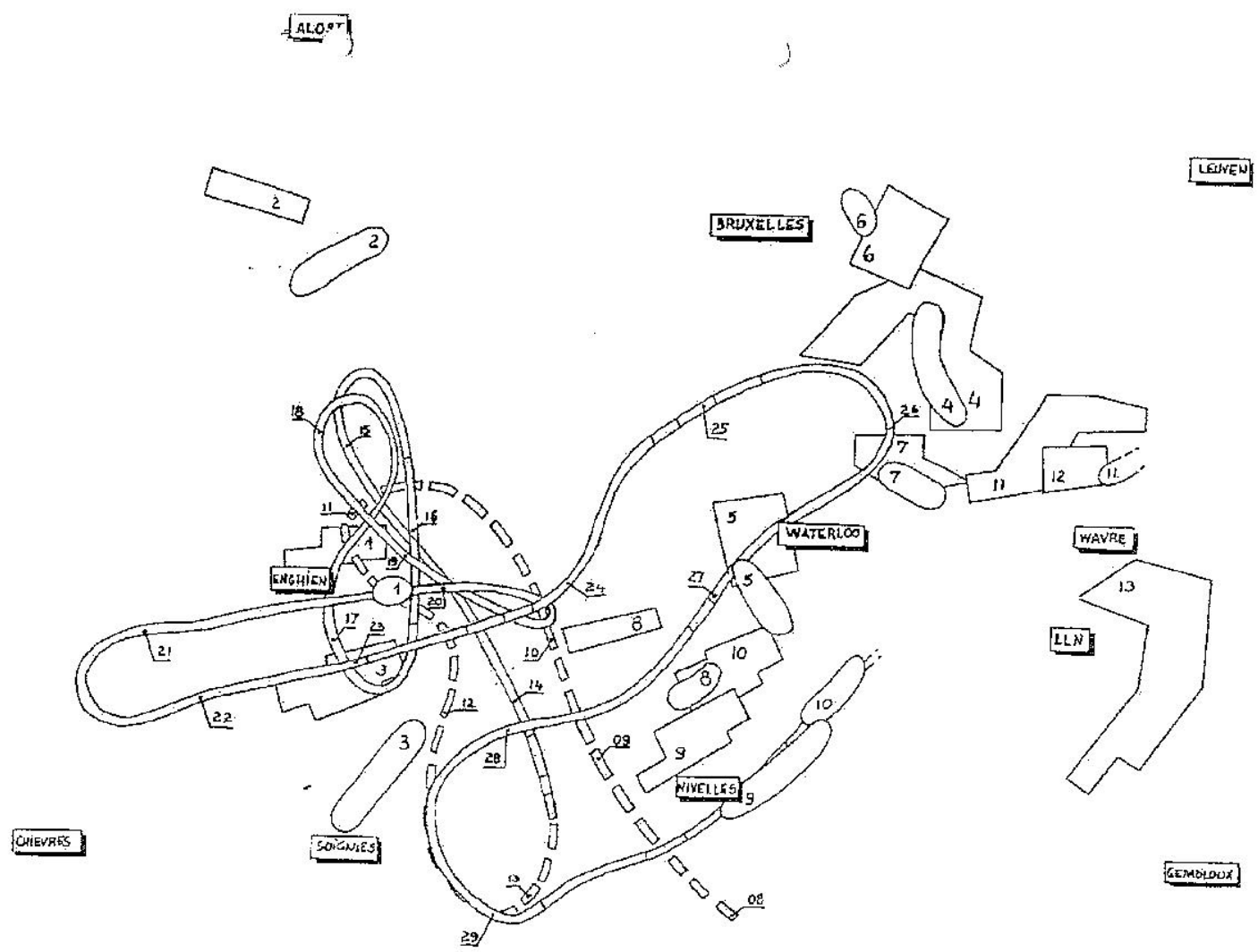
LOCK-ON 11

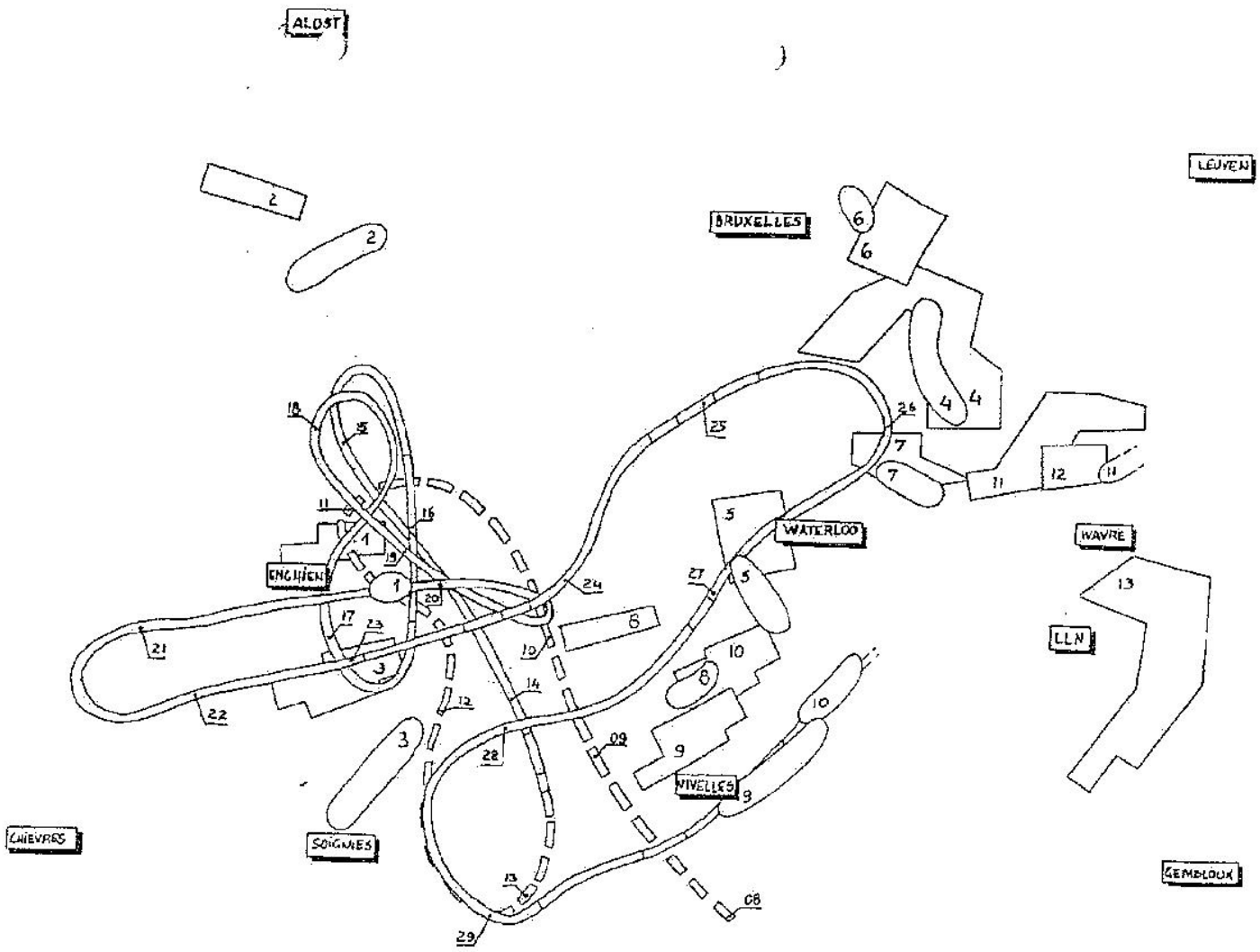


LOCK-ON 12



LOCK-ON 13


SEMMERZAKE
ALOST
LEUVEN
BRUXELLES
WATERLOO
WAVRE
ENGHIEN
LLN
NIVELLES
SOIGNIES
CHIEVRES
GEMBLOUX


SEMMERZAKE
ALOST
LEUVEN
BRUXELLES
WATERLOO
WAVRE
LLN
ENGHIEN
CHIEVRES
SOIGNIES
VIVELLES
GEMBLOUX