

U. S. T. H. B.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
Département de Génie Mécanique



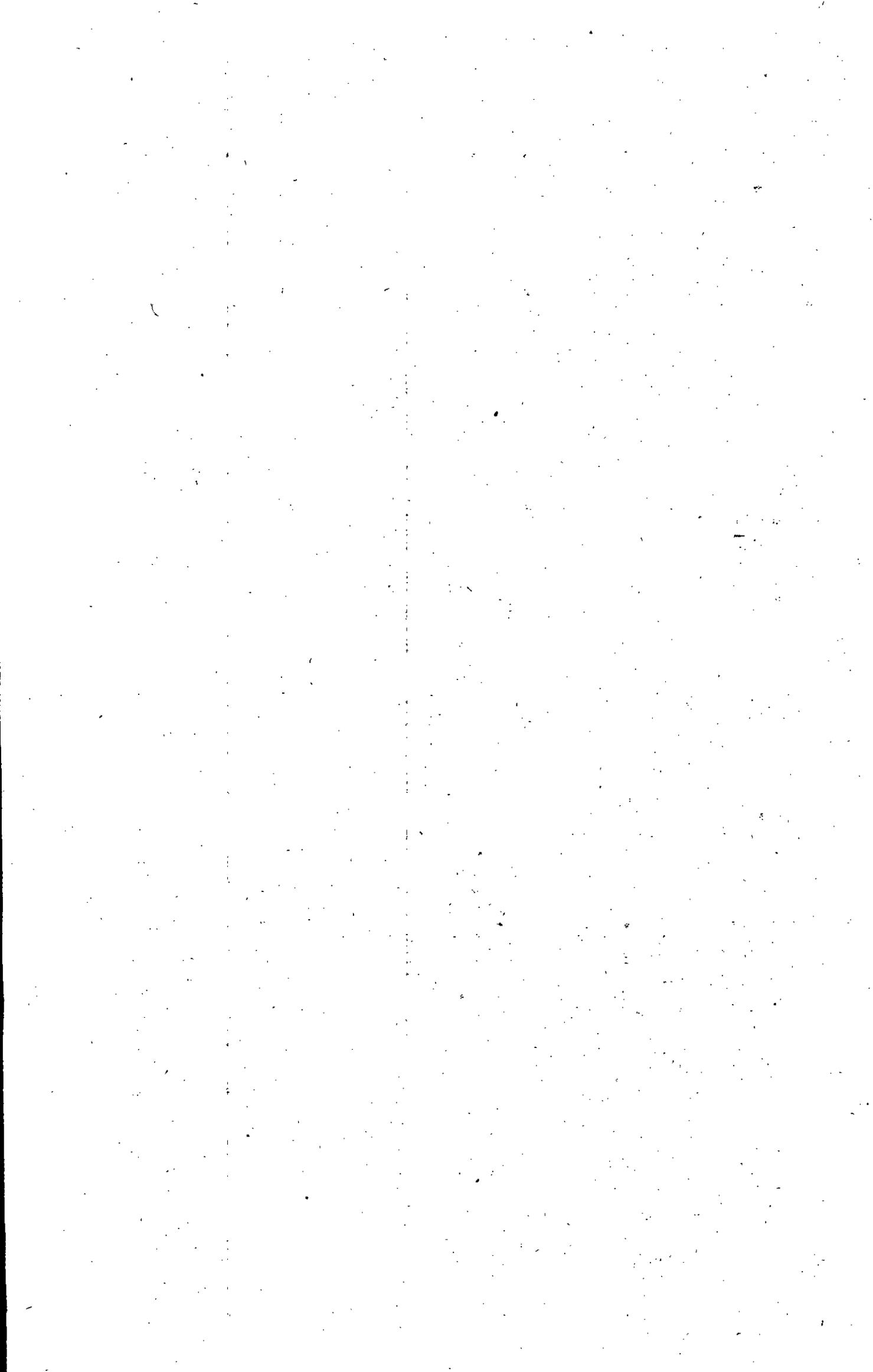
THESE DE FIN D'ETUDES

ANALYSE MATHÉMATIQUE DE L'ÉTAT
GÉOMÉTRIQUE DE SURFACES

Proposé par :
Marek BALAZINSKI
Maitre Assistant

Etudié par
A. SAMET

Juin 1982



U. S. T. H. B.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
Département de Génie Mécanique

THESE DE FIN D'ETUDES

ANALYSE MATHEMATIQUE DE L'ETAT
GEOMETRIQUE DE SURFACES

Proposé par :
Marek BALAZINSKI
Maitre Assistant

Etudié par
A. SAMET

Juin 1982

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

عَنْ رَسُولِ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ
رَوَاهُ أَبُو بَكْرٍ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

oOo D E D I C A C E oOo

=====

A la mémoire de ma chère mère qui a tant souhaité me voir
arriver à cette étape.

A mon père

A mes frères et soeurs

A tous mes amis

Amar SAMET

REMERCIEMENTS

==oOo==

Je tiens à remercier Monsieur Marek BALAZINSKI Docteur ès Science Technique, Maître Assistant à l'École Nationale Polytechnique d'Alger pour l'aide précieuse et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de mon travail et l'assure de ma profonde reconnaissance.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Que toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici, l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Je n'oublierai pas mon frère Djillali qui a réglé pour moi certains problèmes.

A. SAMET.

TABLE DES MATIERES

==oOo==

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I GENERALITES	
1- Etat géométrique de surfaces usinées.....	2
1-1 Irrégularités macroscopiques.....	2
1-2 Ondulations.....	3
1-3 Irrégularités microscopiques.....	3
2- Définitions et classification des rugosités.....	4
3- Influence de la rugosité sur des organes mécaniques en service et facteurs conditionnant le choix de rugosité.....	10
3-1 Résistance à l'usure.....	10
3-2 Résistance à la corrosion.....	11
3-3 Résistance à la fatigue.....	11
3-4 Conservation des côtes d'ajustements.....	11
4- Méthodes et appareils de contrôle de la microgéométrie de surfaces usinées.....	12
4-1 Méthodes de contrôle.....	12
4-2 Types d'appareils les plus utilisés pour le contrôle.....	13
CHAPITRE II- REPRESENTATION MATHEMATIQUE D'UN PROFIL D'ETAT DE SURFACE.	
1- Définition d'un profil.....	14
2- Représentations caractéristiques d'un profil.....	14
2-1 Courbe de fréquence - courbe de portance.....	14
2-2 Courbe de fréquence - courbe de tangentes.....	15
2-3 Courbe de fréquence - courbe de hauteurs.....	15

3-- Influence du type d'usinage sur l'Etat géométrique de surface d'une pièce.....	16
---	----

CHAPITRE III- NOTIONS DE BASE SUR LA THEORIE DES FONCTIONS
ALEATOIRES.

1- Caractéristiques des fonctions aléatoires.....	19
2- Détermination des caractéristiques numériques.....	19
3- Définitions et propriétés des caractéristiques de base des fonctions aléatoires.....	21

CHAPITRE IV - EXEMPLES D'ANALYSE DE SURFACES

1- Premier exemple (TOURNAGE).....	28
2- Deuxième exemple (HONING).....	51
3- Résultats et propositions.....	76

CONCLUSION.....	78
-----------------	----

BIBLIOGRAPHIE.....	79
--------------------	----

- 4 -

--- // N T R O D U C T I O N ---

Le progrès technique associé au rythme toujours plus pressant au développement industriel de la construction mécanique impose des conditions de plus en plus sévères sur la précision dimensionnelle des formes géométriques et les états de surfaces. Cette dernière notion a été pendant longtemps dans l'obscurité et ne paraissait pas claire. On se contentait d'imposer un usinage aussi parfait que possible pour les pièces de précision en marquant sur les tracés les points aux quels cette recommandation correspondait. Aujourd'hui on ne peut concevoir une réalisation sans tenir compte de la qualité des surfaces selon laquelle les pièces s'assemblent .

Le problème de rugosité est lié aux notions d'usure en service de corrosion de fatigue et de pertes d'ajustements suite au truchement des tolérances. L'expérience montre que la résistance à la fatigue est faible lorsque la surface présente des rayures ou stries même microscopiques. Ces défauts superficiels provoquent des concentrations de contraintes qui sont des sources permanents de fissures et d'amorce de rupture. Les surfaces de bonne qualité possèdent une bonne résistance à la corrosion par rapport aux surfaces rugueuses et la rugosité est considérée comme caractéristique déterminante pour apprécier la résistance à la fatigue.

Au cours de la deuxième décennie du XXe Siècle, il fallait concevoir une remise en état voire une réparation capitale, sur les automobiles ayant parcourues entre 10 000 et 30 000 Km à cause de l'usure ^{des} différentes pièces. De nos jours vu l'amélioration des matériaux et surtout la plus grande finesse des états de surfaces la remise en état ne sera effectuée qu'après 100 000 à Km .

L'état d'une surface est déterminé par plusieurs paramètres (Ra Rz - Rp) qui sont donnés par des appareils spéciaux ou rugosimètre . Ces paramètres déterminés comme moyennes sur des longueurs de références ne donnent pas des renseignements clairs sur la régularité d'une surface.

Dans notre étude, on va montrer qu'on peut associer à un profil de surface certaines fonctions mathématiques qui pourront donner des informations sur la régularité d'une surface et son état géométriques.

Cette technique nouvelle, qui utilise des notions de mathématiques basées sur l'analyse de corrélation est encore en cours de recherche.

- CHAPITRE -I- GENERALITES

Le développement du problème lié à la qualité des surfaces. Usiné par enlèvement de copeaux est marqué par trois étapes principales :

La première période correspond à l'étude des lois de formation des aspérités .

La deuxième était une période durant laquelle les recherches ont été axées vers la constitution d'un critère de hauteur des aspérités et d'orientation des ondulations (irrégularités) ainsi que l'influence de ces facteurs sur les caractéristiques fonctionnelles en service telles que résistance à l'usure, à la fatigue, à la corrosion etc ...) .

La troisième période introduisait l'étude de l'état plu de la couche superficielle à savoir l'étude des lois reliant la microdureté de la couche superficielle au mode et au régime de travail, l'étude de naissance de contraintes au sein de celle-ci suivant le procédé d'élaboration. etc

Il est pratiquement impossible de délimiter dans le temps ces trois phases de l'évolution scientifique du problème car les pays industrialisés conduisent beaucoup de recherches rattachés aux deux premières périodes .

En 1946, l'URSS se voyait octroyer le feu vert par IBC pour l'élaboration des matériaux nécessaires à la normalisation internationale des intérêts retenus par apprécier la rugosité des surfaces .

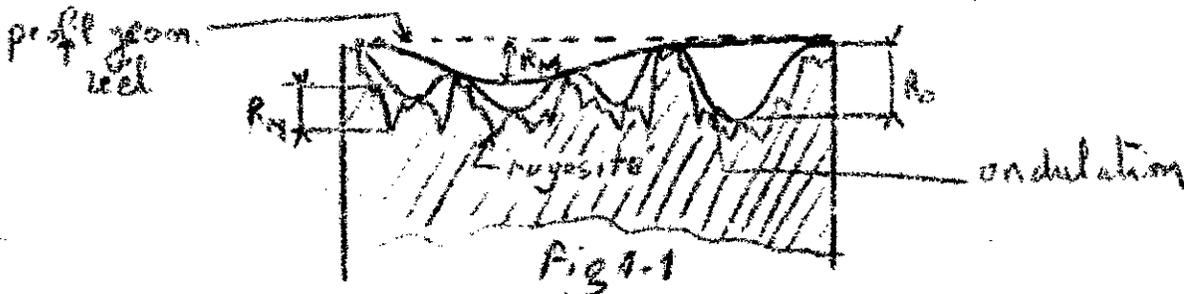
La rugosité des surfaces revêt un problème par le progrès techniques , ce qui a amené les pays industrialisé à entreprendre des recherche dans les domaines influence des facteurs principaux de coupe sur la qualité des surfaces, contrôle de rugosité influence de l'état physique de la couche superficielle etc

1-ETAT GEOMETRIQUE DES SURFACES USINEES

La coupe ou usinage par enlèvement de copeaux ne permet pas d'obtenir des surfaces idéalement précises et lisse (sans défauts) et c'est pour cela que l'aspect géométrique réel présente toujours des écarts dimensionnels plus ou moins grands par rapport au théorique .

Les écarts géométriques sont répartis en trois classes:
1-1 Irrégularités macroscopiques

Appelées aussi écarts macrogéométriques sont de faibles hauteurs R_m distribués suivant un pas très grand Fig 1-1



Pour les surfaces planes, elles représentent des défauts de planéité convexité ou concavité. Pour les surfaces cylindrique, il s'agira d'ovalisation, conicité, forme de tonneau d'hyperboloïde ect

Ces défauts sont dus à l'imprécision de l'appareillage technologique : machines outils, outils de coupe etc

En général, ces écarts macrogéométriques sont isolés sur une surface. Dans le cas où ils sont nombreux, de dimensions analogues et distribués uniformément suivant un pas pratiquement constant, on peut parler d'ondulation

1-2 LES ONDULATIONS

Ces défauts sont des écarts de faible hauteur R_0 qui se reproduisent périodiquement avec un pas moyen P . Elles sont dues au processus de coupe perturbé par les déformations plastiques de la zone travaillée, causé par les vibrations du complexe machines outil, pièce, outil de coupe et autres facteurs. Ces irrégularités cycliques ont un pas supérieur à l'avance relative outil-pièce.

1-3 IRREGULARITES MICROSCOPHIQUES

Appelées aussi écarts microgéométrique ou rugosité, ce sont des défauts de très faibles hauteurs R_m et avec un pas plus petit que celui des ondulations. Elles prennent naissance au cours du travail à cause de l'outil, des déformations élastiques et plastiques et de plusieurs paramètres définissant le régime de travail.

La rugosité peut être considérée dans une section longitudinale de la surface Fig 1-2-a (1.e suivant la direction du mouvement principal) et dans une section transversale (en direction du mouvement d'avance) voir Fig 1-2-b.

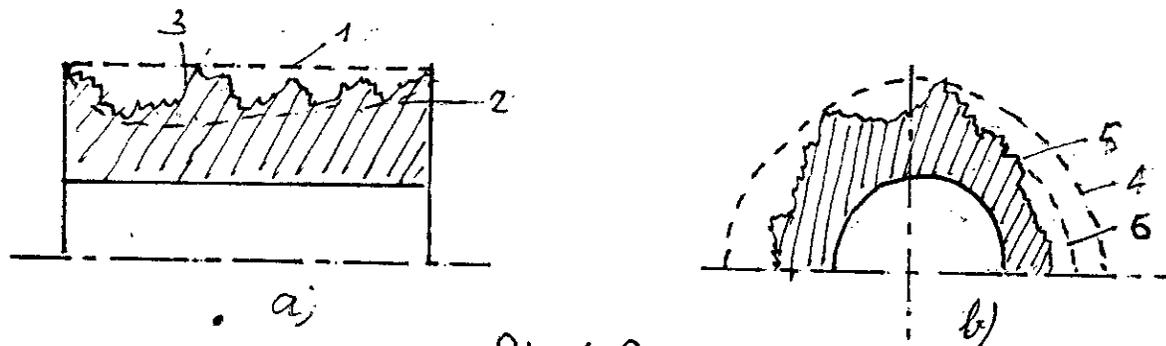


Fig 1-2

- 1- profil théorique en section longitudinale
- 2- profil théorique compte tenu des écarts macrogéométriques
- 3- rugosité en section longitudinale
- 4- profil théorique en section transversale
- 5- rugosité en section transversale
- 6- écart macrogéométrique en section transversale

En général, la rugosité transversale est plus accentuée que la rugosité longitudinale, ce qui conduit à prendre la première comme référence pour apprécier la qualité de surface. Toute fois, il pourrait y avoir des exceptions à cela dans le cas des surfaces usinées avec une très faible avance. Dans ce cas la rugosité longitudinale présente une distribution irrégulière et aléatoire alors que la rugosité transversale est régulière Fig 1-3.

Les trois aspects géométriques de la surface usinée se distinguent par la valeur du pas P des défauts. Soit R la hauteur des aspérités pour les trois types de défauts, le rapport P/R nous détermine le type de défaut.

Les défauts microgéométriques correspondent à $0 < P/R < 50$.

Les ondulations à $50 < P/R < 1000$ et les défauts macrogéométriques à $P/R > 1000$, la valeur R est sensiblement du même ordre pour les trois écarts caractéristiques.

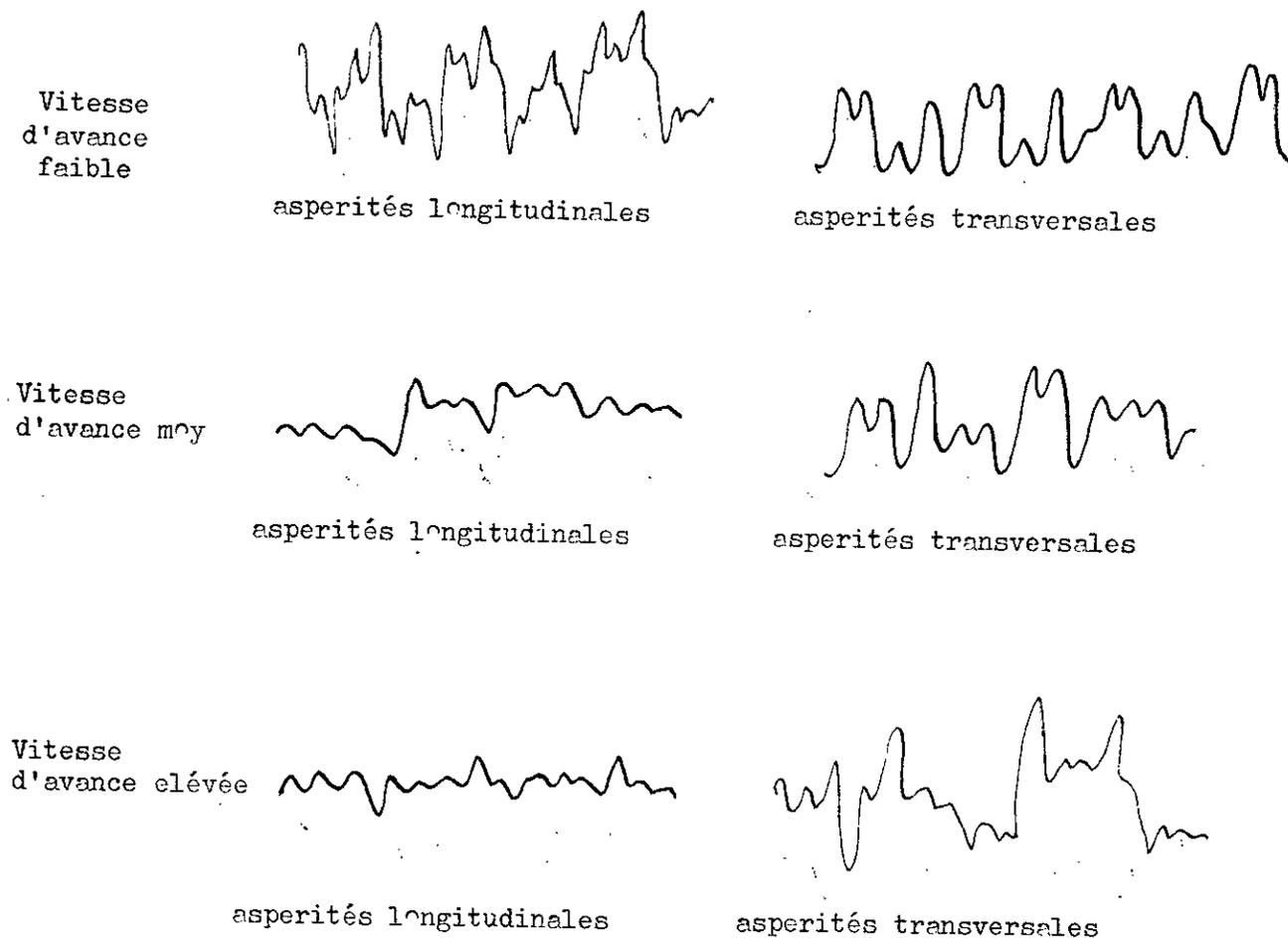


Fig 1-3

2 - DEFINITION ET CLASSIFICATION DES RUGOSITÉS DE SURFACES USINÉES .

La rugosité d'une surface usinée est représentée par l'ensemble des défauts microscopiques (asperités) dont le pas de distribution est relativement petit. Ces irrégularités sont relevées comme écarts de profils effectifs par rapport à une ligne de référence définie dans le domaine de prospection appelé aussi longueur de base .

Quantitativement la rugosité est définie par certains paramètres qui sont : R_a , R_z , R_q , R_p , R_{max} , L_c , T_c , A_w , A_r , W_t ,

Definition de ces variables

a) R_a = écart moyen arithmétique (R = rugosité ; a = moyenne arithmétique)
la designation R_a est valable pour les langues française, allemande , italienne , néerlandaise, danoise et d'autres mais n'a pas cours dans les pays de langue anglaise. Les anglais utilisent le sigle CLA qui est une abréviation de " center line Average " (moyenne sur la ligne centrale). Les américains utilisent le sigle " AA " qui est l'abréviation de " Arithmetical Average " d'où $R_a = CLA = AA$

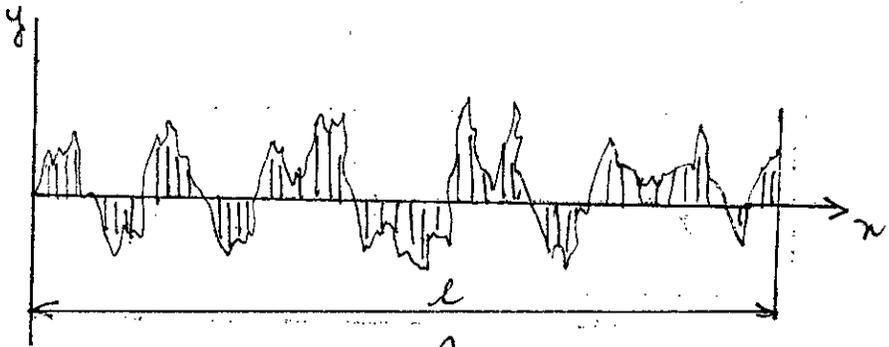


Fig 1-4

Ra est la moyenne des écarts du diagramme à partir de la ligne moyenne MG, sans tenir compte des signes des écarts intégrés sur la longueur de référence appelée aussi longueur de base.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1-1)$$

Cette formule pourrait s'écrire approximativement (pour $n \geq 8$)

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad [\mu m] \quad (1-2)$$

b) Rz . hauteur totale moyenne des irrégularités d'après dix points du champs, les cinq plus hauts et les cinq plus bas.

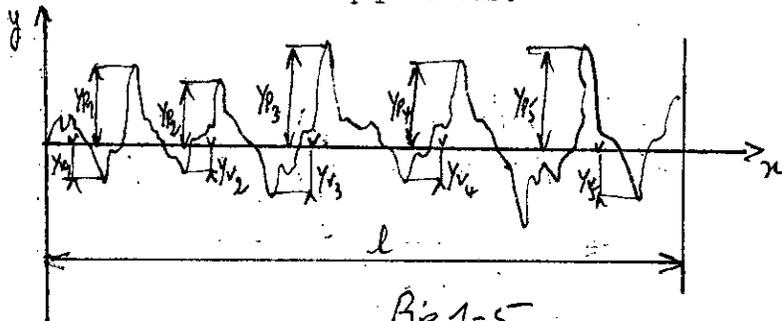


Fig 1-5

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{p_i} - \sum_{i=1}^5 y_{v_i} \right) \quad (1-3)$$

c) Rmax : hauteur maximale d'asperité qui est la distance entre deux lignes parallèles à la ligne de référence établie, dont l'une passe par la saillie la plus haute et l'autre par le creux le plus bas. Figure 14. Cette profondeur maximum de la rugosité est une valeur particulière prise dans l'échantillon de l mais caractérise la rugosité de façon insuffisante.

Entre les trois critères définis précédemment, l'expérience a montré l'existence d'une correspondance entre elles qui ne peut découler des définitions propres aux critères mais grâce aux statistiques.

$$\text{Log } R_z = 0,65 + 0,97 \text{ Log } R_a \quad (1-4)$$

$$\text{Log } R_{max} = 1,97 + 0,98 \text{ Log } R_a \quad (1-5)$$

$$R_{max} = (3 \div 6) R_a \quad (1-6)$$

pour la dernière formule donnant Rmax linéairement à Ra, les valeurs les plus faibles du coefficient de proportionnalité correspondent aux travaux d'ébauche et les plus forts aux travaux de finition.

d) Rq = la racine carrée de la moyenne des carrés du diagramme à partir de la ligne moyenne MG, intégrée sur la longueur de référence l. Pour les anglais et les américains Rq est noté RMS (Root - Mean - Square).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (1-7)$$

Cette formule pourrait s'écrire approximativement

$$Rq = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad [mm] \quad (1-8)$$

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

e) Rp = profondeur d'aplanissement égale à la moyenne de toutes les profondeurs " y " mesurées le long de l'axe des x. On l'obtient en divisant par l, l'aire comprise entre le diagramme et l'axe des x du diagramme.

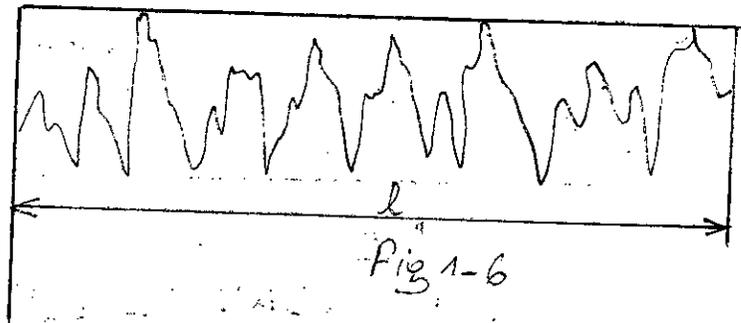


Fig 1-6

$$Rp = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \quad (1-9)$$

Une valeur approchée de Rp peut être calculée en prenant la moyenne d'un nombre suffisant " n " de profondeurs " y " mesurées à intervalles réguliers le long de l'axe des x.

$$Rp = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad [mm] \quad (1-10)$$

f) Lc : longueur portante à une profondeur C [%].

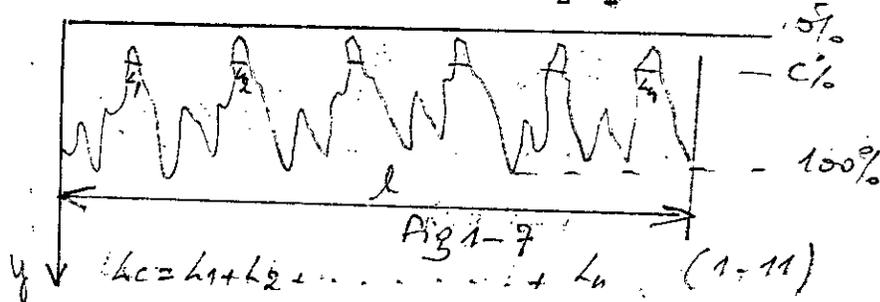


Fig 1-7

$$Lc = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (1-11)$$

g) t_c = portance relative à une profondeur donnée .

Elle est égale au rapport de la portance effective à une profondeur C sur la longueur de base .

$$t_c = \frac{Lc}{l} \quad (1 - 12)$$

$$t_c = \frac{L1 + L2 + \dots + Ln}{l} \quad (1-13)$$

h) W : profondeur moyenne d'ondulation .

C'est la moyenne des distances saillie creux des écarts de deuxième ordre.

$$W = \frac{W1 + W2 + \dots + Wn}{n} \quad \text{avec } n \geq 3 \quad (1-14)$$

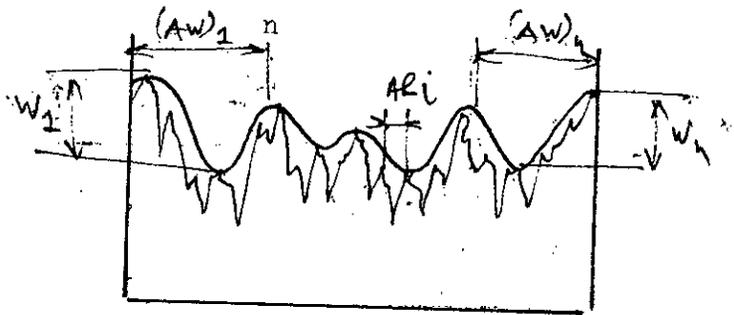


Fig. 1-8

i) pas de l'ondulation AW

C'est la moyenne des distances saillie - saillie des écarts du deuxième ordre .

$$(1-15)$$

$$AW = \frac{(AW)1 + \dots + (AW)n}{n} \quad \text{avec } n \geq 3$$

j) pas moyen de rugosité

C'est la moyenne des distances saillie des écarts du troisième et quatrième ordre.

$$AR = \frac{(AR)1 + \dots + (AR)n}{n} \quad \text{avec } n \geq 8 \quad (1-16)$$

Le pas moyen de rugosité est fonction de l'avance par tour de l'outil ou de la pièce .

Tous ces critères sont mesurés sur une longueur de base définie. Ils permettent de caractériser la rugosité par un nombre, leur définition semble théorique mais leurs valeurs sont mesurées avec facilité à l'aide d'appareils existant dans le commerce : les rugosimètres qui seront examinés dans un paragraphe à part.

Les critiques qu'on peut apporter à ces critères, c'est qu'ils ne peuvent déterminer avec exactitude l'état de surface .

On pourrait avoir des surfaces avec des mêmes paramètres de rugosité mais avec des états géométriques de surfaces très différents Fig 1-8 .

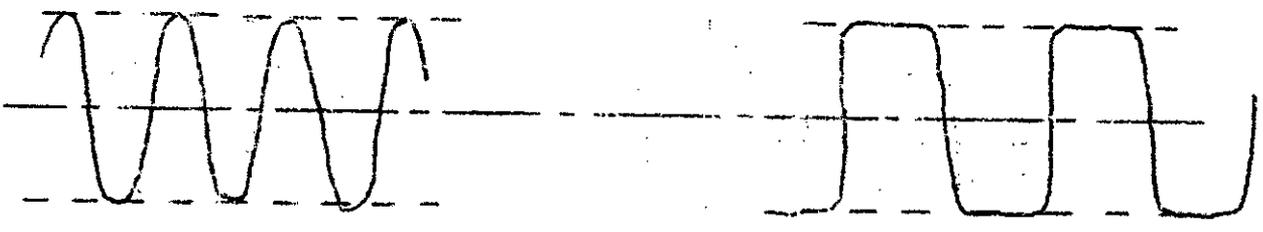


Fig 1-8

Le Fig 1-8 a) et b) présentent des surfaces ayant les mêmes paramètres de rugosité (Ra, Rz , Rmax ;) mais voit bien que c'est deux surfaces sont complètement différentes . D'nc il faut prendre en considération plusieurs paramètres relatifs à une surface à la fois et surtout ceux qui donnent des informations sur l'ecartement transversal des asperites comme Lc : etc

Les critères Ra , Rz et Rmax sont les plus utilisés pour les défauts microgéométriques . Le critère Ra est plus précis, il est utilisé pour les travaux de recherches au laboratoire sa détermination nécessite des appareils spéciaux ou des profilographes pour tracer le profilogramme le l'eplanimétré par la suite. Le critère Rz est moins précis que Ra alors que Rmax est utilisé pour les travaux de précision moindre.

La qualité de surface est divisée en quatorze classes établies par la norme soviétique GOST 2789 - 59 . Le tableau 1-1 donne la correspondance entre les classes de qualité des surfaces et les valeurs de Ra et Rz .

Sur les spécifications constructives , la rugosité sera explicitée sous la forme édictée par la norme roumaine STAS 612-66 , la valeur de Ra (u m) sera inscrite dans le symbole V . Pour tout autre critère utilisé, On verra sa valeur numérique précédée de son symbole ex Rz = 80 .

Le tableau 1-2 donne une correspondance approximative de la rugosité entre la norme roumaine STAS et GOST

Classe de Qualité GOST	Ra [u m]	Rz [u m]	Longueur de Base [m m] maximum
	maximum		
1	100	400	8
2	50	200	
3	25	100	
4	12,5	50	25
5	6,3	25	
6	3,2	12,5	0,8
7	1,60	8,0	
8	0,80	4,0	
9	0,40	2,0	0,25
10	0,20	1,0	
11	0,10	0,5	
12	0,05	0,25	
13	0,025	0,125	0,08
14	0,012	0,063	

TABEAU 1-1

STAS	GOST	GOST	GOST STAS
100 ✓	1	12	0,05 ✓
50 ✓	2	13	0,025 ✓
25 ✓	3	14	0,012 ✓
12,5 ✓	4		
6,3 ✓	5		
3,2 ✓	6		
1,6 ✓	7		
0,8 ✓	8		
0,4 ✓	9		
0,2 ✓	10		
0,1 ✓	11		

TABLEAU 1-2

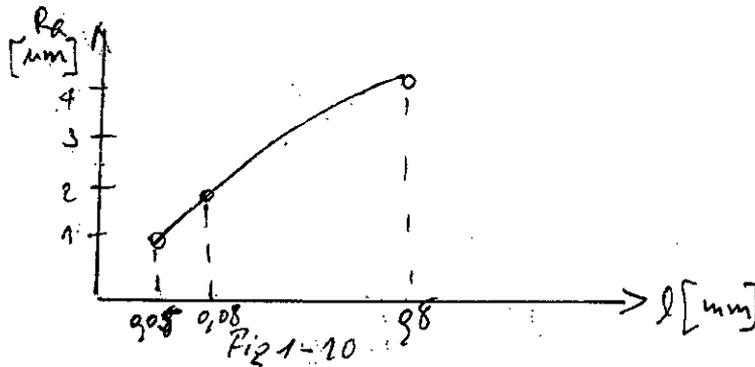
Symbole qualité STAS 612-49	Rugosité Ra STAS 612 - 66
	50 ✓
	12,5 ✓
	6,3 ✓
	3,2 ✓

TABLEAU 1-3

Le tableau 1-3 donne une correspondance entre les symboles d'état de surface classique suivant STAS 612-49 et la rugosité Ra suivant STAS 612-66 .

Un paramètre d'une grande importance qu'il ne faut pas négliger est la longueur de base l . Elle permet en effet, de séparer les défauts de rugosité proprement dite des ondulations et écarts de forme . la fig 1-9 montre une surface présentant une certaine rugosité gréffée sur une ondulation elle même distribuée sur un défaut de forme .

Isoler la rugosité parmi les deux autres familles d'irrégularités exige de travailler exclusivement sur une longueur l dite longueur de base. L'augmentation de la longueur de base fait croître la valeur des paramètres Ra et Rz comme l'indique la Fig 1-10 .



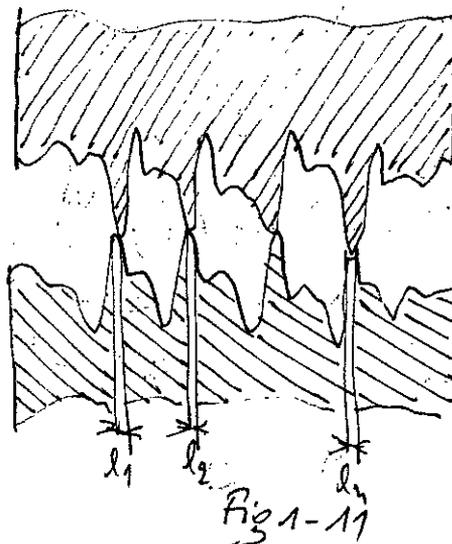
3- INFLUENCE DE LA RUGOSITE SUR DES ORGANES MECANIQUES EN SERVICE ET FACTEURS CONDITIONNANT LE CHOIX DE RUGOSITE .

La rugosité joue un grand rôle dans la durée de vie des organes mécaniques et des outils de coupe. A la base de cette influence interviennent les surfaces de contact et non les surfaces libres (sans contact). La rugosité doit être choisie de manière à assurer la marche correcte des pièces. Pour cela il faut tenir compte de certains aspects à savoir : résistance à l'usure, des surfaces en contact, résistance à la corrosion, résistance à la fatigue , conservation des côtes d'ajustement.

3-1 Résistance à l'usure

Pratiquement, on sait que le contact en portée de deux pièces assemblées n'a pas lieu suivant toute la longueur nominale théorique, mais seulement par plage au gré des aspérités. La surface effective de contact appelée aussi portée effective s'entrouve d'autant réduite, ce dont il faut tenir compte pour le calcul des pressions spécifiques et les essais de résistance à l'usure.

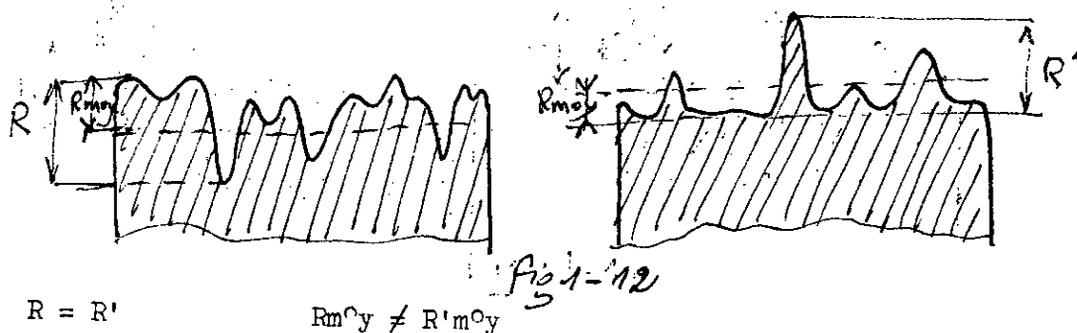
Plus la surface portante des pièces en contact est grande plus l'usure sera lente Fig 1-11



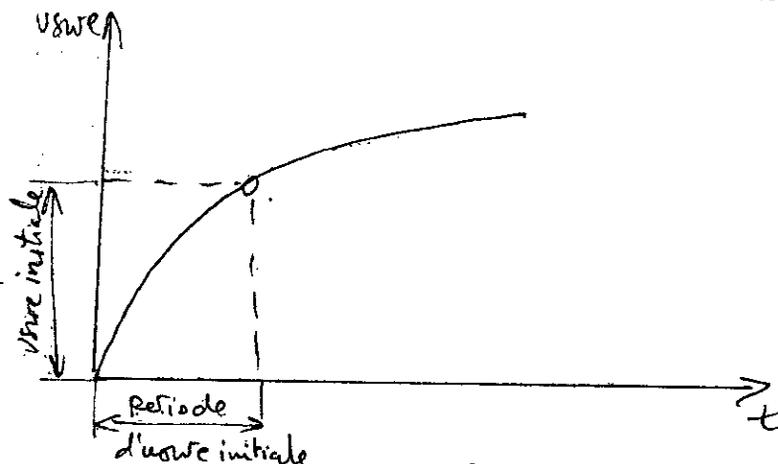
Surface portante = (l1 + l2 + + ln) l

La résistance à l'usure augmentera avec le degré "de remplissage " des couches superficielles .

La Fig 1-12 montre deux profils possédant des aspérités de même hauteur R , cependant la hauteur moyenne des aspérités R_{moy} est différente. R_{moy} est obtenue en aplatisant par la pensée le profil, les parties en relief venant remplir les creux.



Le graphe Fig 1-13 donne l'usure en fonction de la durée de service.



3-2 Résistance à la corrosion

Elle dépend notablement des dimensions des aspérités après finition. Les aspérités seront d'autant plus attaquées par la corrosion qu'elles sont plus grandes et effilées.

Ce phénomène a ceci de commun avec l'usure normales. Il est intense dans une période de fonctionnement primaire pour se stabiliser à des valeurs beaucoup plus réduites.

3-3 RESISTANCE A LA FATIGUE .

Les aspérités retiennent en générale les concentrations de contraintes d'autant plus grandes que les creux les séparant sont plus étroits. La surface métallique soumise aux charges dynamiques variables laisse apparaître des fissures très étroites au début (micro-fissures) qui se développent sous l'influence de facteurs favorables (défauts de structures , hétérogénéité du matériau, inclusion etc) s'élargissent, gagnent rapidement en profondeur pour amener parfois la destruction de la pièces .

3-4 CONSERVATION DES COTES D'AJUSTEMENT .

Chaque surface de contact exécutée à une cote donnée dans les tolérances prescrites peut encourir pendant la période initiale de fonctionnement une usure arasant plus de 50 % de la hauteur des aspérités .

Il en résulte un accroissement de la cote pour les alésages et une diminution pour les arbres, susceptibles de modifier l'ajustement prévu pour la construction pour la plupart des assemblages du même type. C'est la cause possible de fonctionnement défectueux au sein d'un mécanisme.

On pourra définir la rugosité d'une surface usinée en fonction de la précision dimensionnelle, il suffit pour cela de retenir les valeurs déterminées sur des surfaces de contact usuelles avec frottement.

- Dimension (diamètre) supérieur à 50 mm

$$Rz = (0,1 \text{ à } 0,15) T \quad [\mu m]$$

- 18 \varnothing 50

$$Rz = (0,15 \text{ à } 0,20) T \quad [\mu m]$$

- 1 \varnothing 18

$$Rz = (0,20 \text{ à } 0,25) T \quad [\mu m]$$

T représente la tolérance d'exécution de la pièce en μm , ces données ont été élaborés à partir de résultats expérimentaux obtenus sur des pièces de type, en fonte alliée de dureté 200 HB.

Actuellement, des essais sont en cours pour tenter de rendre plus systématique la détermination des états de surfaces à respecter en fonction de la qualité dimensionnelle.

4 - Quelques méthodes et appareils de contrôle de la microgéométrie des surfaces usinées.

Pour connaître au mieux les défauts d'une surface réelle, il faut tenir compte des paramètres tels que coefficient de portance, orientation des défauts, hauteur d'aplanissement, défauts microgéométrique, ondulations et défauts macrogéométriques. Un bon nombre d'appareils ont vu le jour au cours de ces vingt dernières années et délivrent de multiples paramètres parfois même simultanément.

4-1 METHODES DE CONTROLE

Pour le contrôle de la rugosité on dispose de deux méthodes : contrôle relatif et absolu.

4-1-1 CONTRÔLE RELATIF

Il consiste à comparer la rugosité d'une surface usinée et celle d'une surface étalon. On utilise pour cela le microscope comparateur, l'appareil allmend " Visoport " ainsi que le rugotest et d'autres.

4-1-2 CONTRÔLE ABSOLU

Il mesure des défauts microgéométriques, apprécie la rugosité par l'application d'un critère préalablement choisi que l'appareil traduira sous forme numérique. Les appareils permettant de faire ces mesures se répartissent en deux groupes selon le mode d'enregistrement qu'ils pratiquent.

4-1-2-1 PROFILOGRAPHES OPTICO-MECANIQUES.

Ils palpent la surface à l'aide d'une aiguille, l'enregistrement sortant sous forme de profilogramme.

4-1-2-2 PROFILOMETRES.

Ils palpent la surface suivant le même principe mais indiquent directement la hauteur des microasperités.

Les profilographes ont l'avantage de relever sur des pièces de dimensions quelconques des profilogrammes qui servent aux recherches dans les laboratoires. Ils ne peuvent donner une valeur numérique sur les dénivellations mais cela pourrait s'obtenir en travaillant sur l'enregistrement relevé. Les profilomètres ont l'avantages d'apprécier rapidement le degré de propreté d'une surface, de fournir les résultats correspondant aux critères de rugosité recherchés. On peut trouver des appareils travaillant en profilographe et en profilomètre.

6-2 TYPES D'APPAREILS LES PLUS UTILISES POUR LE CONTROLE DES SURFACE USINEES.

Type d'appareil	Champ (classe) d'application	Valeur de Rz u m
1 - Profilographe LEVIN	2 : 13	200 : 0,125
2 - Profilographe Ammon	4 : 12	50 : 0,25
3 - Profilomètre Kisselev	1 : 11	400 : 0,5
4 - " Tchaman converti inductif	4 : 14	40 : 0,063
5 - " IPCH convert.elastique	4 : 12	50 : 0,25
6 - Profilographe profilomètre construit par l'usine " KALIBR " (VRSS) comme profilomètre " profilographe	6 : 12 5 : 14	12,5 : 0,25 25 : 0,063
7 - Profilomètre Microtest sigma à convert. piézo électrique.	6 : 14	50 : 0,063
8 - Profilomètre -profilographe " PERTH O Meter (RFA)	6 : 14	50 : 0,063
9 - Profilomètre - profflographe Faly surf. (G.B)	4 : 14	50 : 0,063
10 - Profilomètre - profflographe Monnel Tester (RFA)	4 : 13	50 : 0,125

- REPRESENTATION MATHEMATIQUE DES ETATS DE SURFACE -

II-1- Définition d'un profil

Un profil représente l'état géométrique d'une surface. Il est obtenu à grande échelle à l'aide d'un profilographe sous forme de profilogramme. La discrétisation du profil permet de le remplacer par une chaîne de valeur $(z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$ qu'on peut introduire facilement dans un Ordinateur. Les z_i sont les ordonnées prises à partir d'un axe de référence passant par le creux le plus bas.

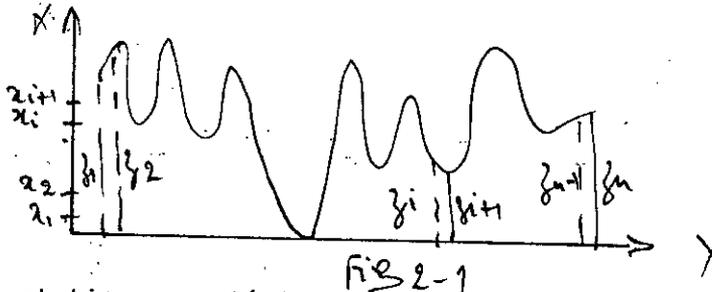


Fig 2-1

II-2 Représentation caractéristique d'un profil

Un profil peut être représenté par certaines fonctions mathématiques qui mettent en évidence quelques unes de ses caractéristiques. On citera quelques une de ces représentations.

2-2-1 représentation par la courbe de fréquence et courbe de portance

Un profil peut être caractérisé par une courbe de fréquence en courbe de distribution des ordonnées (on verra par la suite que cette courbe sera appelée densité de probabilité) fig 2-2-a).

Dans la figure 2-1, on tracera la droite parallèle à l'axe y et d'équation $X=x_i$. On comptera tous les points de la courbe dont les ordonnées sont inférieures ou égales à x_i . On suppose que le nombre de ces points est m_i . Ainsi, pour x_1 on aura m_1 points, pour x_2 on aura m_2 points, etc..... On peut écrire que le nombre d'observation total est $N = \sum_{i=1}^n m_i$.

Le nombre $\frac{m_i}{N}$ n'est rien d'autre que la fréquence (ou la probabilité statistique) de l'événement $x = x_i$, cette fréquence est distinguée par un nombre p_i dans le cas de variables aléatoires discrètes. Ce p_i n'est rien d'autre que $f(x) dx$, l'élément de probabilité pour les variables aléatoires continues.

La courbe de portance donne la longueur de portance (voir chapitre 1-4) en fonction du pourcentage de profondeur Fig 2-2-b).

2-2-2 représentation par courbe de fréquence et courbe de tangente.

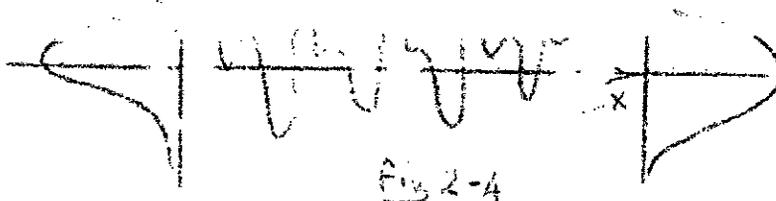
Un profil peut aussi représenté par sa courbe de fréquence et sa courbe de tangente. Cette dernière permet donner des informations sur l'inclinaison du profil .

Fig 2 - 3 .

- a) courbe de fréquence (densité de probabilité)
- b) profil
- c) courbe de distribution des tangentes

2-2-3 représentation par courbe de fréquence et courbe de distribution des hauteurs.

La troisième représentation qu'on donne est celle où le profil est caractérisé par sa courbe de fréquence Fig 2-4-a comme précédemment et la courbe donnant la distribution des hauteurs et profondeurs du profil Fig 2-4-c



Toutes les fonctions introduites précédemment, donnent des informations sur les hauteurs d'aspérités c'est à dire suivant l'axe y (Fig 2-4). Il nous manque alors des informations suivant l'axe X. Ces informations sont obtenues suivant le mode d'usinage adopté pour le travail de la pièce.

Le processus d'usinage dépend de plusieurs paramètres ou variables qu'on peut noter (x_1 , x_2 , ... x_n) et qui le présentent la vitesse de coupe, température de coupe, nature du matériau de l'outil et de la pièce à usiner etc...

Ces paramètres sont en liaison fonctionnelle entre eux .
Exemple : la vitesse de coupe est en liaison avec le matériau

à usiner . On peut parler alors de liaison stochastique entre les différentes variables du processus de coupe, pour l'obtention d'un état de surface quelconque . Pour étudier un état de surface , il faut étudier le processus de coupe, et pour *étudier ce dernier , il faut faire appel aux liaisons stochastiques . Pour étudier une liaison stochastique , on utilise deux méthodes différentes ; la regression et la corrélation .

La regression : se caractérise par un échantillonnage dirigé où l'expérimentateur est maître de certains paramètres et fait varier les autres . Cela veut dire que parmi les variables existantes , il y'en a des variables indépendantes et des variables dépendantes .

La Corrélation : ne distingue pas de variables indépendantes et dépendantes. Toutes les variables sont aléatoires .

N.B.

variable indépendante veut dire, ne dépend pas de l'expérience.

C'est cette dernière à savoir l'analyse de corrélation qui est la mieux adaptée pour l'étude des états de surface . Le fait de considérer toutes les variables comme aléatoires est plus proche de la réalité car dans le travail de coupe , on ne peut maîtriser certaines variables .

A l'aide de cette analyse, et en utilisant les fonctions d'auto-corrélation et d'intercorrélation , on peut voir facilement la différence existante entre l'état géométrique de surfaces ayant à peu près même valeur de rugosité Ra mais obtenues avec des types d'usinage différents .

2-3 Influence du type d'usage sur l'état géométrique de surface d'une pièce

On présente dans la figure 2-5 , un exemple donnant l'état de surface de quatre pièces obtenue par différents mode d'usinage . Pour chaque pièce , on présente le profil avec la valeur de rugosité , la courbe de fréquence et la fonction d'autocorrélation $R_x ()$

La fig 2-5-1 présente le profil d'une pièce obtenue par rabotage avec $R_a = 16 \mu m$. Quant à la 2è pièce de la fig 2-5 elle est obtenue par tournage (ébauche) . Alors que la troisième et quatrième pièce de la fig 2-5 elles sont obtenues respectivement, t par rectification et super finition .

D'après les quatre exemples de la fig 2-5 , on voit que les courbes de fréquences (ou densité de probabilité) ne peuvent montrer les différences qui existent entre les profils . Elles sont presque les mêmes pour les quatre types de profils et surtout pour les trois derniers. Comme conclusion , on peut dire que les courbes de fréquences , ne peuvent donner des informations très nettes sur les états de surface . Par contre, on voit que les fonctions d'autocorrélation nous montrent clairement la différence qui existe entre les différents profils . Dans chaque cas et malgré que les profils sont presque semblables , on voit une nette différence entre leur fonction d'autocorrélation .

La fig 2-5-1-C donne le type de fonction d'autocorrélation relative aux profils réguliers .

La fig 2-5-2-C donne le type de fonction d'autocorrélation relative aux profils plus réguliers que aléatoires .

La fig 2-5-3-C donne le type de fonction d'autocorrélation relative aux profils plus aléatoires que réguliers .

Et enfin la fig 2-5-4-C présente le type de fonction d'autocorrélation relative aux profils aléatoires .

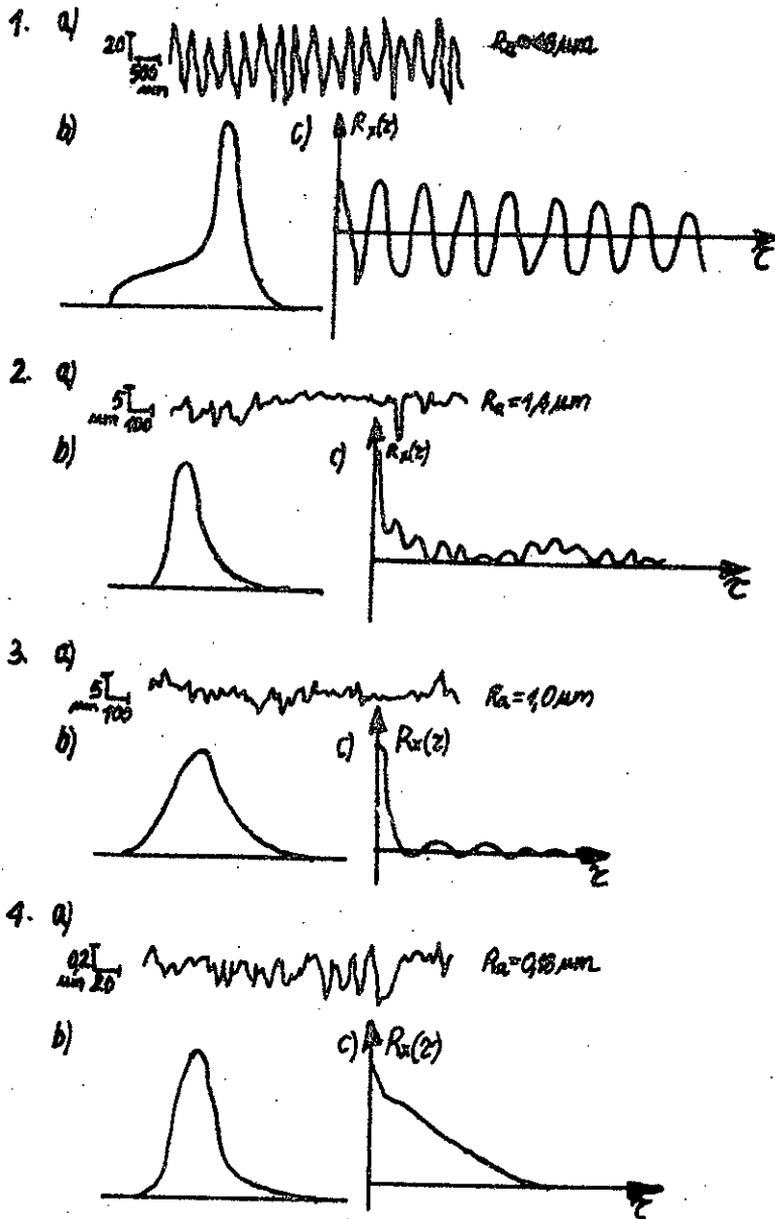


Fig 2-5 Différents profils avec leur densité de probabilité (b) et leur fonction d'autocorrélation (c)

(X)

Ils existent plusieurs livres de mathématiques qui traitent les fonctions aléatoires et les fonctions d'autocorrelation . Mais il n'existe pas de livre qui explique l'application de ces fonctions à l'étude des états de surfaces. L'explication est que dans chaque cas on suppose le profil de la surface comme aléatoire (le profil régulier est un cas particulier). C'est pour cela qu'on fait l'introduction des fonctions aléatoires à l'étude des états géométriques des surfaces.

CHAPITRE III

NOTIONS DE BASE SUR LA THEORIE DES FONCTIONS ALEATOIRES

Une fonction aléatoire est une fonction pouvant dans l'expérience adopter une forme quelconque inconnue d'avance. Chaque réalisation $X(t)$ est une fonction non aléatoire. Une fonction aléatoire possède en même temps les propriétés d'une variable aléatoire et d'une fonction. Si l'on fixe la valeur de l'argument t , elle devient une variable aléatoire habituelle.

3-1 Caractéristiques des fonctions aléatoires .

On sait qu'une fonction aléatoire peut se comporter comme variable aléatoire (pour t fixe) et comme une fonction pour t quelconque. C'est pour cela qu'on étudie les caractéristiques numériques relatives aux variables aléatoires et les caractéristiques de base qui sont les fonctions .

a) Caractéristiques de base :

- 1- Valeur moyenne quadratique
- 2- Fonction de répartition
- 3- Fonction densité de probabilité
- 4- Fonction d'autocorrelation (appelée aussi fonction de corrélation ou covariance).

5- Fonction densité spectrale

b) caractéristiques numériques

- 1- Le moment du 1er ordre ou valeur moyenne \bar{Y}
- 2- Ecart moyen quadratique (R_a)
- 3- Variance ou moment du 2è ordre S_y^2
- 4- Ecart type S_y
- 5- Coefficient de variation V
- 6- Coefficient d'asymétrie g_1
- 7- Coefficient d'éplatissement g_2

3-2 Détermination des caractéristiques numériques

3-2-1 Ligne moyenne de profil

Son équation est de la forme $y = Ax + B$. Cette droite est déterminée par la méthode des moindres carrés, on trouve pour les coefficients A et B .

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

(3-1)

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3-2)$$

3-2-2 Détermination du paramètre Ra

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - (Ax_i - B)] \quad (3-3)$$

3-2-3 Valeur moyenne \bar{Y}

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3-4)$$

3-2-4 variance S_y^2 ou moment de 2e ordre

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n-1} \quad (3-5)$$

3-2-5 écart type S_y

$$S_y = \sqrt{S_y^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (3-6)$$

3-2-6 coefficient de variation V

$$V = \frac{S_y}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3-7)$$

Si $V < 15\%$ ou a une bonne homogénéité de l'échantillon.

3-2-7 Coefficient d'asymétrie g_1

$$g_1 = \frac{M_3}{S_3} = \frac{n \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^3}{(n-1)(n-2) S_y^3} \quad (3-8)$$

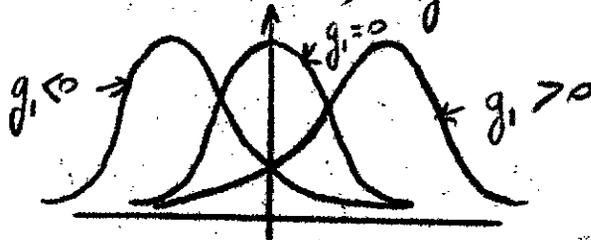
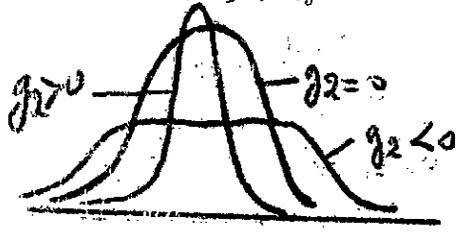


Fig 3-1

M3 : moment d'ordre 3
 S : ecart type

3-2-8 Coefficient d'aplatissement de la courbe

$$g_2 = \frac{M_4}{S^4} - 3 = \frac{(n+1) n \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^4}{(n-1)(n-2)(n-3) S_y^4} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (3-9)$$



3-3 Définition et propriétés des caractéristiques de base des fonctions aléatoires.

Dans notre étude des états de surfaces, on assimile le profil d'une surface à une fonction ou signal aléatoire.

3-3-1 Définition de la valeur moyenne quadratique.

En faisant une analogie profil-signal ; la valeur moyenne quadratique donne la notion d'intensité du signal aléatoire. Elle est notée par Ψ_y^2

$$\Psi_y^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt \quad (3-10)$$

Tout signal est décomposable en une composante statistique et une composante dynamique σ_y^2

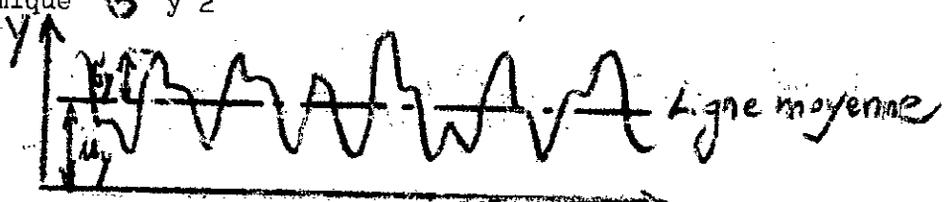


Fig 3-2

La composante statistique $\mu_y = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt$ (3-11)
 La composante dynamique est donnée par :

$$\sigma_y^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [y(t) - \mu_y]^2 dt \quad (3-12)$$

L'écart type est égal à la racine carrée de la variance

$$\sigma_y^2 = \Psi_y^2 - \mu_y^2 \quad (3-13)$$

3-3-2 Fonction de répartition et densité des probabilité

Soit une variable aléatoire X défini dans un espace prababililisable. On appelle fonction de répartition ou fonction cumultative, l'application notée $F_x : R \rightarrow [0, 1]$ tel que

$$x \mapsto F_x(x) = P[X \leq x]$$

F_x est une fonction croissante ; $F_x(+\infty) = 1$, $F_x(-\infty) = 0$ et F_x peut avoir des discontinuités.

On appelle densité de probabilité, toute application positive réelle telle que $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < x + \Delta x) - P(x < x)}{\Delta x} \quad (3-14)$$

Si la fonction de répartition d'une variable aléatoire est dérivable, alors $f(x) = F'_x(x) > 0$

Ces deux fonctions permettent de donner dans le cas de leur application à l'étude des états de surfaces, des informations sur le caractère de dispersion des ordonnées. Prenons le profil de la fig 3-3, on voit que dans ce profil,

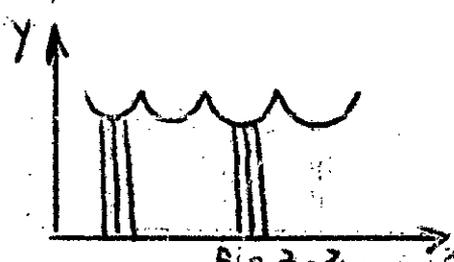


Fig 3-3

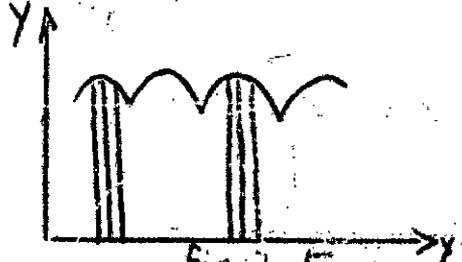


Fig 3-5

on a une grande probabilité d'avoir des ordonnées petites que des ordonnées grandes. La densité de probabilité et la fonction de répartition de ce profil sont représentées dans la fig 3-4

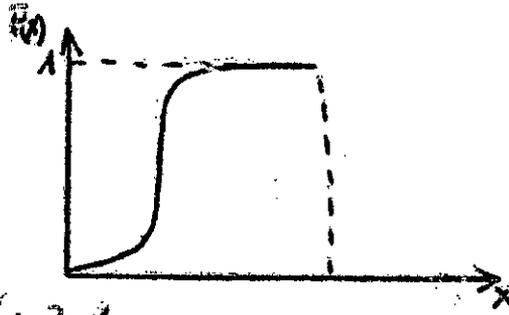
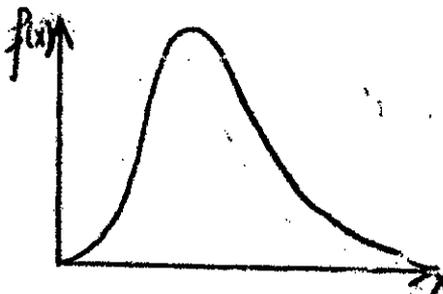


Fig 3-4

Pour le profil de la fig 3-5, on voit qu'on a une grande probabilité d'avoir des ordonnées grandes que des ordonnées petites.

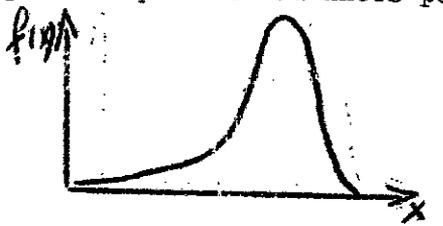
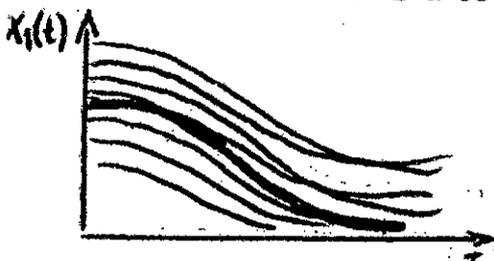


Fig 3-6

On représente dans la fig 3-6, la densité de probabilité et la fonction de répartition relatives à ce profil.



3-3-3 Fonction d'autocorrelation

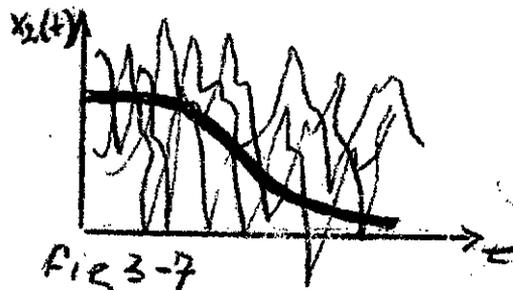


Fig 3-7

Deux fonctions aléatoires $X_1(t)$ et $X_2(t)$ peuvent avoir les mêmes espérances mathématiques et les mêmes variances tout en étant totalement différentes.

On voit dans la fig 3-7 que les deux fonctions ($X_1(t)$ et $X_2(t)$) ont les mêmes espérances mathématiques et les mêmes variances, cependant, leur structure est tout à fait différente. Donc on peut dire que cette dernière n'apparaît ni dans leur espérance mathématique ni dans variance. Ainsi, il ya lieu d'introduire une caractéristique spéciale appelée fonction d'autocorrelation (ou covariance). Cette fonction d'autocorrelation caractérise le degré de dépendance entre les sections d'une fonction aléatoire pour les différentes valeurs de l'argument t .

Dans l'analyse des états de surfaces, on peut dire qu'on a affaire aux fonctions aléatoires du type stationnaires. Lors de l'étude d'un processus stationnaire, le choix du moment initial importe peu. Les caractéristiques d'un processus aléatoire stationnaire sont les mêmes quelque soit l'intervalle de temps qu'on choisit pour étudier le processus, et ses propriétés statistiques sont invariantes dans tout changement de l'origine des temps.

La fonction d'autocorrelation est notée par $R(t, t')$, où t et t' sont deux instant successifs séparés par un intervalle de temps τ . On a $t' = t + \tau$.

$$R(t, t') = E X(t) X(t') \quad (3-15)$$

Dans le cas de fonction aléatoire stationnaire on a

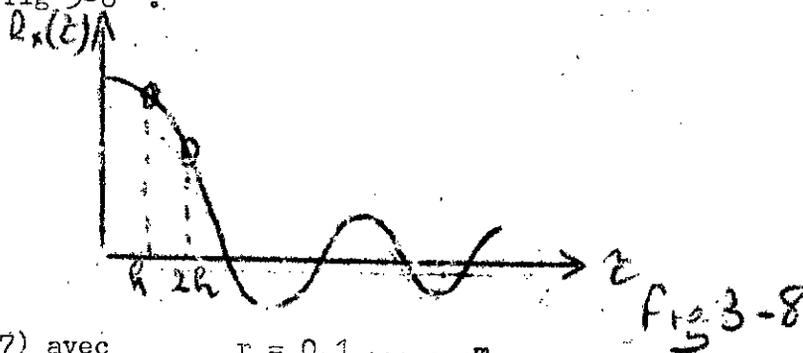
$$R(t, t') = R_x(\tau)$$

cela veut dire que la fonction d'autocorrelation est indépendante de l'origine des temps choisie. Cette fonction $R_x(\tau)$ est paire.

$$R_x(\tau) = R_x(-\tau)$$

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) X(t + \tau) dt \quad 3-16$$

Pour déterminer la fonction d'autocorrelation, on remplace l'intégrale par une somme finie et en divisant l'intervalle d'observation en m parties égales de longueur h Fig 3-8.



$$\tau = r h \quad (3-17) \quad \text{avec} \quad r = 0, 1, \dots, m$$

on estime alors la fonction d'autocorrelation par :

$$R_r = R_x(rh) = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m X_n \quad (3-18)$$

Dans le cas où on considère n expériences sur un système de m variables aléatoires .

On a l'estimation de l'espérance mathématique

$$\tilde{m}_x(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i(t_k)}{n} \quad (3-19)$$

celle de la variance

$$\tilde{D}_x(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i(t_k) - \tilde{m}_x(t_k)]^2}{n-1} \quad (3-20)$$

et enfin l'estimation de la covariance

$$R_x(t_k, t_l) = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i(t_k) - \tilde{m}_x(t_k)][x_i(t_l) - \tilde{m}_x(t_l)]}{n-1} \quad (3-21)$$

Dans la pratique , on utilise couramment au lieu de la fonction d'autocorrélation $R_x(\tau)$, la fonction d'autocorrelation normée $\rho_x(x)$.

$$\rho_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)} = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)} \quad (3-22)$$

où D_x variance $D_x = R_x(0)$

Cette fonction $\rho_x(\tau)$ n'est rien d'autre que le coefficient de corrélation entre les sections de la fonction aléatoire , séparées par un laps de temps τ . On voit que $\rho_x(0) = 1$

Notion d'ergodicité :

Dans le cas où la valeur moyenne d'une réalisation prise au hasard est égale à la moyenne d'ensemble des réalisations , on dit que la fonction aléatoire est douée de la propriété d'ergodicité ou d'erdodisme .

La forme de la fonction de corrélation permet de juger directement si un processus aléatoire est ergodique ou non .

Dans la pratique, on ne peut pas étudier le processus aléatoire et sa fonction de corrélation durant un temps infini ; le domaine des valeurs de τ est toujours limité. Si la fonction de corrélation d'un processus aléatoire stationnaire ne décroît pas quand τ augmente, mais à partir d'une certaine valeur de τ reste à peu près constante, ceci signifie que le processus n'est pas ergodique. Au contraire, si la fonction de corrélation tend vers zéro pour t tendant vers l'infini ceci témoigne de l'ergodicité du processus.

3-3-5 Densité spectrale

Cette fonction donne la courbe représentant la densité de la répartition des probabilités de la variance suivant les fréquences.

La fonction densité spectrale $S_x(\omega)$ est obtenue à partir de la fonction d'autocorrélation et vis-à-vis à l'aide des transformations de Fourier

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (3-23)$$

$$R_x(\tau) = \int_0^{\infty} S_x(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (3-24)$$

L'estimation de la densité spectrale est donnée par

$$\hat{G}_x(f) = 2K \left[\hat{R}_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} \hat{R}_r \cos \frac{\pi r f}{f_g} + \hat{R}_m \cos \frac{\pi m f}{f_g} \right] \quad (3-25)$$

K = pas de discrétisation

\hat{R}_r : estimation de la fonction d'autocorrélation pour l'ordre r ($0 \leq r \leq m$)

$f_g = \frac{1}{2h}$ fréquence maximale

La densité de probabilité est une fonction toujours positive. En pratique on utilise souvent au lieu de la densité spectrale $S_x(\omega)$ la densité spectrale normée :

$$p_x(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{D_x} \quad (3-26)$$

où D_x est la variance de la fonction aléatoire :

Il est facile de voir que la fonction de corrélation normée $p_x(\omega)$ et la densité spectrale normée $p_x(\tau)$ sont liées entre elles par les mêmes transformations de Fourier.

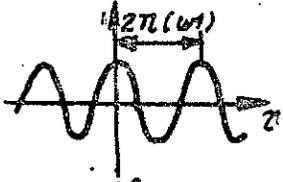
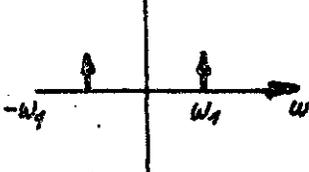
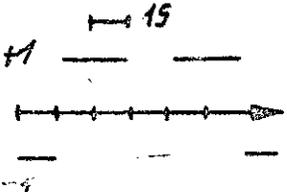
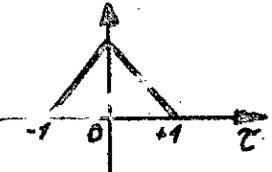
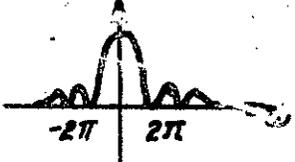
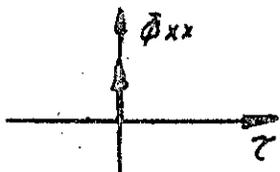
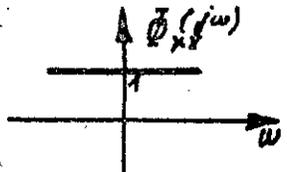
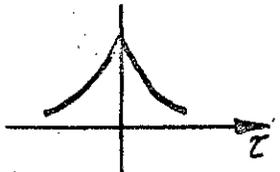
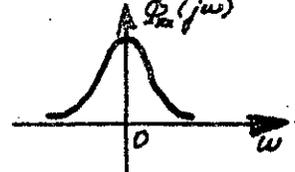
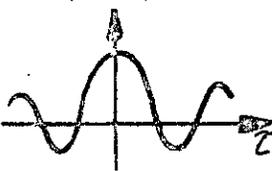
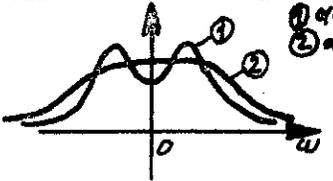
$$J_x(z) = \int_0^{\infty} P_x(\omega) \cos \omega z \, d\omega \quad 3-27$$

$$P_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} J_x(z) \cos \omega z \, dz \quad 3-28$$

En posant $z = 0$ dans la première égalité et compte tenu de $J_x(0) = 1$ on a

$$\int_0^{\infty} P_x(\omega) \, d\omega = 1 \quad 3-29$$

Ce qui traduit le fait que l'aire limitée par la courbe de la densité spectrale normée est égale à l'unité .

N°	Fonction $x(t)$	Fonction d'autocorrelation $\bar{\Phi}_{xx}(\tau)$	densité spectrale $\bar{\Phi}_{xx}(j\omega)$
1	 <p>$x = A = \text{const}$</p>		 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(j\omega) = 2\pi A^2 \delta(\omega)$</p>
2	 <p>$x = A \sin(\omega_1 t + \varphi)$ $\varphi = \text{const.}$</p>	 <p>$\bar{\Phi}_{xx} = \frac{A^2}{2} \cos \omega_1 \tau$</p>	 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(j\omega) = \frac{\pi A^2}{2} \delta(\omega_1 - \omega)$</p>
3	 <p>bruit binaire</p>		 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(j\omega) = (\sin \frac{\omega}{2})^2 / (\frac{\omega}{2})^2$</p>
4	 <p>bruit blanc</p>	 <p>$\bar{\Phi}_{xx} = \delta^2 \delta(\tau)$</p>	 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(j\omega) = 1$</p>
5		 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(\tau) = D e^{-\alpha \tau }$</p>	 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(j\omega) = \frac{D \cdot \alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)}$</p>
6		 <p>$\bar{\Phi}_{xx} = e^{-\alpha \tau } \cdot \cos \beta \tau$</p>	 <p>$\bar{\Phi}_{xx}(j\omega) = \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \beta)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \beta)^2} \right] \frac{1}{2}$</p> <p>① $\alpha < \beta$ ② $\alpha > \beta$</p>

Quelques exemples de fonctions avec leur fonction de corrélation et leur densité spectrale

CHAPITRE IV /

EXEMPLES D'ANALYSE DE SURFACE

==0o0==

Dans ce chapitre, on va traiter quelques exemples d'analyse de surfaces usinées. Le premier exemple traite trois pièces usinées en tournage. Dans le deuxième exemple, on va analyser l'évolution de l'état de surface d'une pièce cylindrique percée, puis soumise à polissage à la pierre (honing) : après 2 minutes, 12 minutes et 28 minutes.

4-1 Premier exemple

On dispose de trois pièces identiques numérotées 1, 2 et 3 fig.4-1

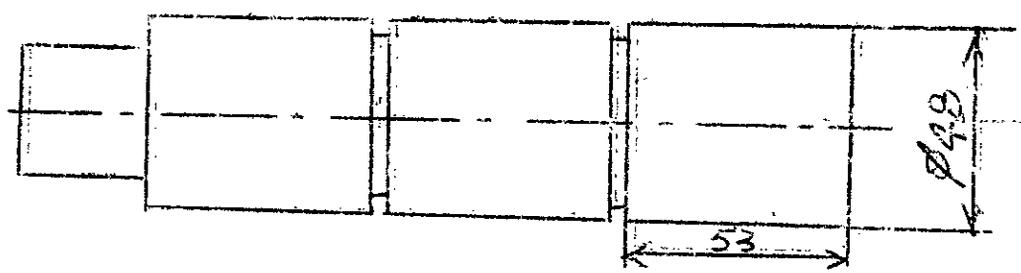
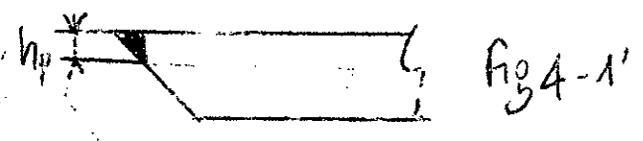


Fig 4-1 pièces 1, 2, 3 (i=1,2,3)

On usine les parties A, B, C de chaque pièce respectivement par les avances $P_A = 0,34\text{mm/tr}$, $P_b = 0,17\text{mm/tr}$, $P_c = 0,08\text{mm/tr}$

On usine la pièce 1 avec un outil d'une usure faible $h_p < 0,1\text{mm}$ on use cet outil jusqu'a $h_p = 0,4\text{mm}$ pour usiner la pièce 2. Et on l'use jusqu'a $h_p = 1,2\text{mm}$ pour usiner la pièce 3. L'outil est en carbure métallique et la pièce en acier mi-dur (st3).



On sait que l'état de surface d'une pièce tournée est conditionné par certains facteurs qui sont :

- a) Propriétés physico-mécaniques du matériau
- b) Paramètres définissant le régime de coupe
- c) Paramètres géométriques liés à la partie active de l'outil
- d) Microgéométrie et usure de l'outil
- e) Fluide de refroidissement et de lubrification.

Dans notre exemple, on ne touche qu'à deux facteurs b) et d) et les autres sont maintenus constants. Dans le premier facteur b) qui englobe les paramètres définissant le régime de coupe à savoir vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, on ne touche qu'à l'avance seulement. Pour le deuxième facteur d) qui donne la microgéométrie et l'usure de l'outil, on fait varier cette dernière seulement.

Paramètres	A1	A2	A3	Variation du paramètre en fonction de A1, A2, A3
Ra	5,2834	5,5182	6,3752	
Rz	19,41	21,91	22,52	
 Moyenne	8,6549	11,3288	11,1849	
Sy ² Variance	38,8945	44,0771	54,7123	
Sy Ecart..Type	6,1883	6,6391	7,3968	
Coef.d'asy- métrie g1	0,5936	0,2215	0,5566	
Coef.d'apla- tissement g2	0,7970	0,8069	0,8451	
Coef. de variation	72,2514	58,6035	66,1320	

Tableau 4 -1 Paramètres relatifs à A1, A2, A3.

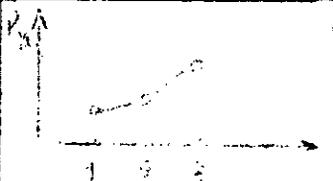
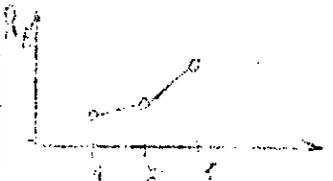
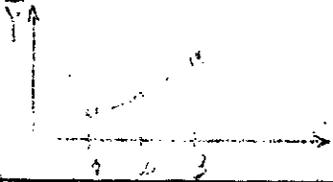
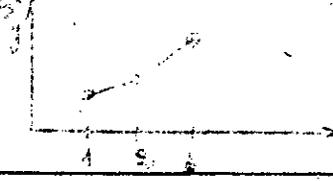
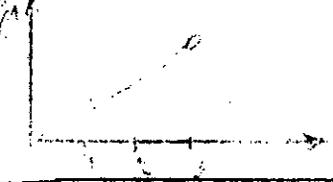
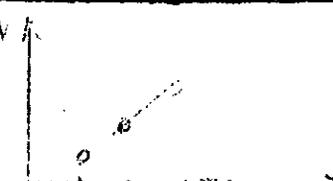
Paramètre	C1	C2	C3	Variation du paramètre en fonction de C1,C2,C3
Ra (nm)	0,8935	1,3845	9,3752	
Rz (nm)	3,92	9,85	20,90	
Moyenne \bar{y} (nm)	3,5953	3,9945	20,0477	
Variance Sy^2 (nm ²)	1,2480	3,0720	141,3219	
Coefficient d'asymétrie g_1	0,0449	0,4199	1,0736	
Coefficient d'aplatissement g_2	0,0239	0,2550	1,0241	
Coefficient Variation V	31,0728	43,8772	59,2980	

Tableau 4-2 Paramètres relatifs à C1,C2,C3

A/ ETUDE DES PORTIONS DE PIÈCES TYPE A.

On appellera A1, A2, A3 les parties des pièces 1, 2 et 3, usinées avec une même avance et un outil avec une usure $hp \leq 0,1$ mm, $hp = 0,4$ mm et $hp = 1,2$ mm

L'étude de l'état de surface peut être faite, soit par l'analyse des paramètres Ra, Rz, etc.....soit par l'analyse mathématique.

A - 1 Analyse à l'aide des paramètres.

En analysant l'état de surface par ces paramètres, on voit qu'on n'est pas beaucoup avancé. On ne peut déduire des lois générales liant ces paramètres à l'usure de l'outil. On remarque que Ra, Rz et Sy^2 augmentent avec l'usure de l'outil. Cela veut dire que la rugosité augmente aussi. Le coefficient d'asymétrie gl diminue puis augmente. Le coefficient d'aplatissement diminue, et, est négatif dans les trois cas. Le coefficient de variation diminue.

L'étude de ces paramètres ne nous donne pas des renseignements suffisants pour connaître tous le profil. Ces informations peuvent être qualifiées de fictives du moment qu'elles ne sont en général que des moyennes prises sur des ensembles d'observations.

A - 2 Analyse mathématique de l'état de surface.

a) Profil.

On voit que le profil A1 est régulier et présente une période presque constante. Néanmoins, ils existent certaines petites irrégularités notamment aux creux. Le profil de A2 est aussi régulier, mais moins que celui de A1. Quant au profil de A3, il est régulier que les deux autres.

b) Densité de probabilité et fonction de répartition.

Ces courbes donnent des informations sur la dispersion des ordonnées

A travers ces courbes, on remarque que A1, A2 et A3 n'ont pas une grande différence dans la profondeur de leur profil. Cela pourrait être expliqué, par le fait qu'on a travaillé avec une grande avance.

c) Fonction d'autocorrelation / FIG. 4-5 /

Elle permet de donner la corrélation du profil avec lui même et de trancher sur sa régularité. Dans la pratique, on travaille surtout avec la fonction d'autocorrelation normée. Cette dernière nous donne en chaque point, le coefficient de corrélation.

On voit au point Q, que le coefficient est égal à 1 ce qui est évident. Au fur et à mesure qu'on avance vers les Z supérieurs, ce coefficient diminue, s'annule et devient négatif. La notion de coefficient de corrélation négatif veut dire, qu'il n'y a aucune corrélation entre les points et qu'un point situé dans un creux, se trouve situé dans une crête.

Pour notre cas, on voit que cette fonction est périodique pour A1, A2, A3. Après une période, la corrélation est de 0,9 pour A1 (i-e 90% de retrouver le même point) alors que pour A2 et A3 elle est inférieure à cette valeur. Le coefficient de corrélation diminue de période en période et cela suite aux perturbations qui peuvent exister (vibrations, usure de l'outil au cours du travail ect.....)

On peut dire que ces trois pièces ont des profil réguliers et surtout pour A1 et A2.

d) Densité spectrale / FIG 4- 7 /

Pour cette fonction, on fait appelle aussi à la fonction densité spectrale normée fig. 4 - 8.

Elle permet de décrire certaines caractéristiques du profil et donner la répartition des discontinuités (ou irrégularités dans le phénomène d'usinage en fonction de la fréquence. Ces discontinuités sont dues à plusieurs phénomènes qui apparaissent pendant le travail tels que vibrations intrinsèques ou extrinsèques, usure de l'outil etc.....) Les maximums périodiques, sont dus à l'inexactitude de l'estimation faite pour le calcul de la fonction. Ceux qu'on voit à des fréquences non périodiques ou fréquences étrangères, sont des perturbations dues à des vibrations à l'intérieur de la machine (engrenage cassé, perte d'ajustement, etc....) où à coté de la machine (travaux avec chocs).

On remarque pour A1, A2 et A3, des maximums distribués des fréquences périodiques ($f = 15 \text{ Hz}$; $\frac{1}{T} = 0,003 \text{ nm}^{-1}$) et correspondent à l'effet de l'avance et l'inexactitude de l'estimateur utilisé pour le calcul de cette fonction. Pour la fréquence $0,002 \text{ nm}^{-1}$ (10 Hz), on a une perturbation non périodique. Cette fréquence est appelée : fréquence étrangère et n'apparait que pour A3 . On peut dire que pour A3, le mauvais état de l'outil crée des vibrations assez grandes qui apparaissent à cette fréquence. On remarque aussi, pour A3, une perturbation à une fréquence voisine de zéro. On peut penser à un défaut de forme car ce défaut correspond à une grande période T.

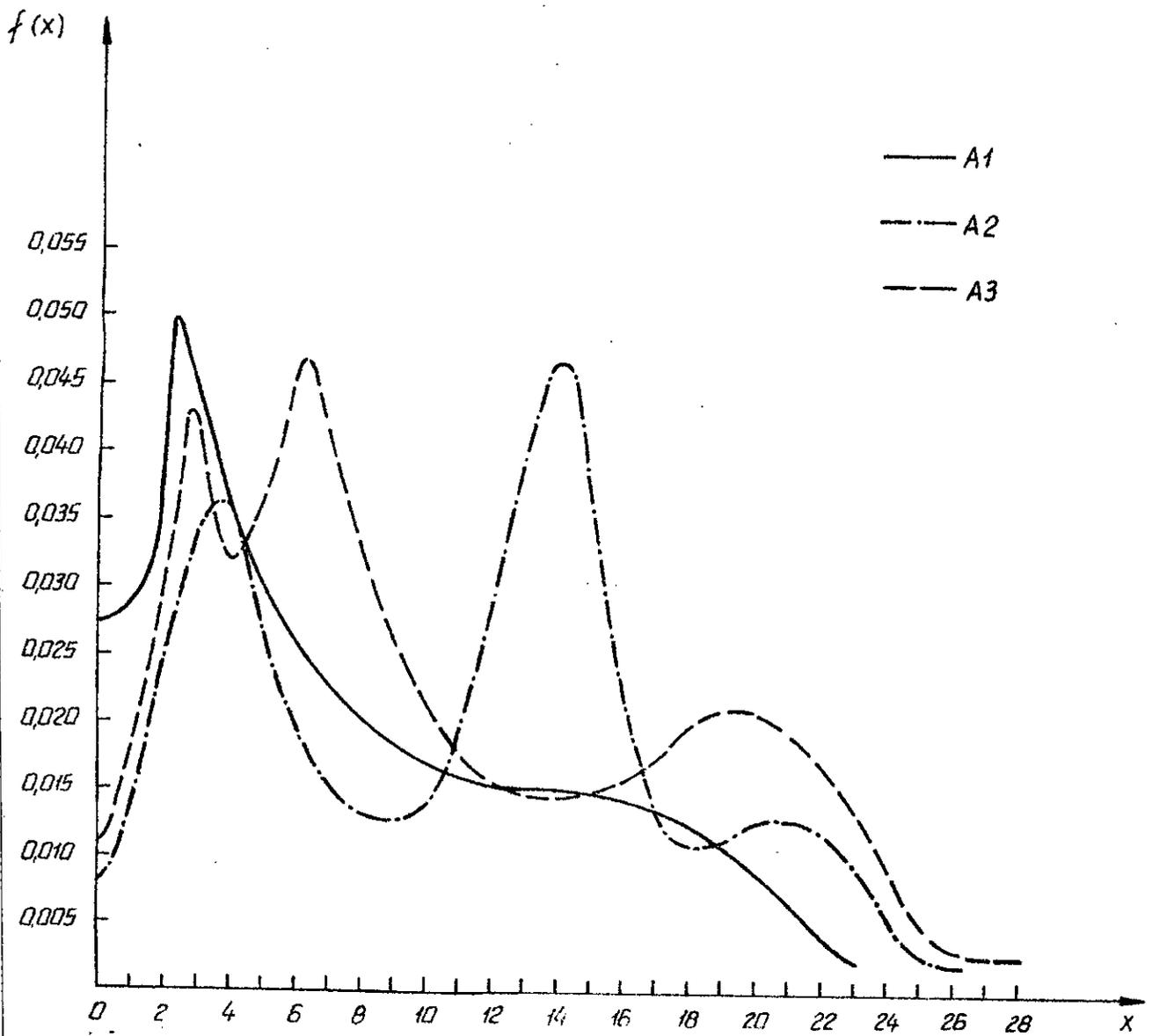


Fig4-3 Fonction densité de probabilité

[μm]

- $V = 2,12 \text{ [m/s]}$
- $p = 0,34 \text{ [mm/obr]}$
- $g = 3 \text{ [mm]}$
- $A1 - h_p \leq 0,1 \text{ [mm]}$
- $A2 - h_p = 0,4 \text{ [mm]}$

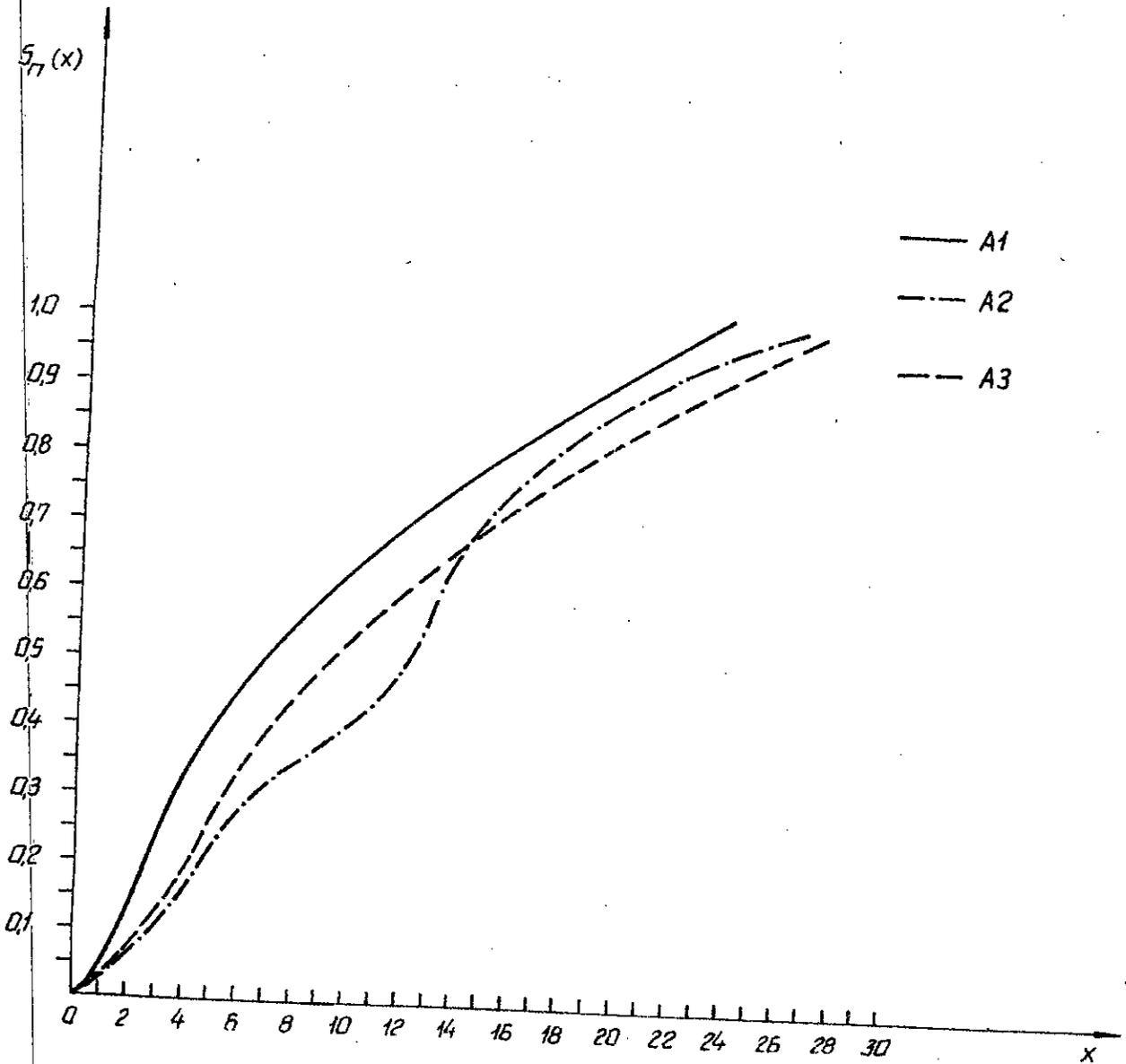


Fig4-4. Fonction de répartition $[\mu m]$

$$V = 2,12 [m/s]$$

$$\rho = 0,34 [mm/abr]$$

$$g = 3 [mm]$$

$$A1 - h_p \leq 0,1 [mm]$$

$$A2 - h_p = 0,4 [mm]$$

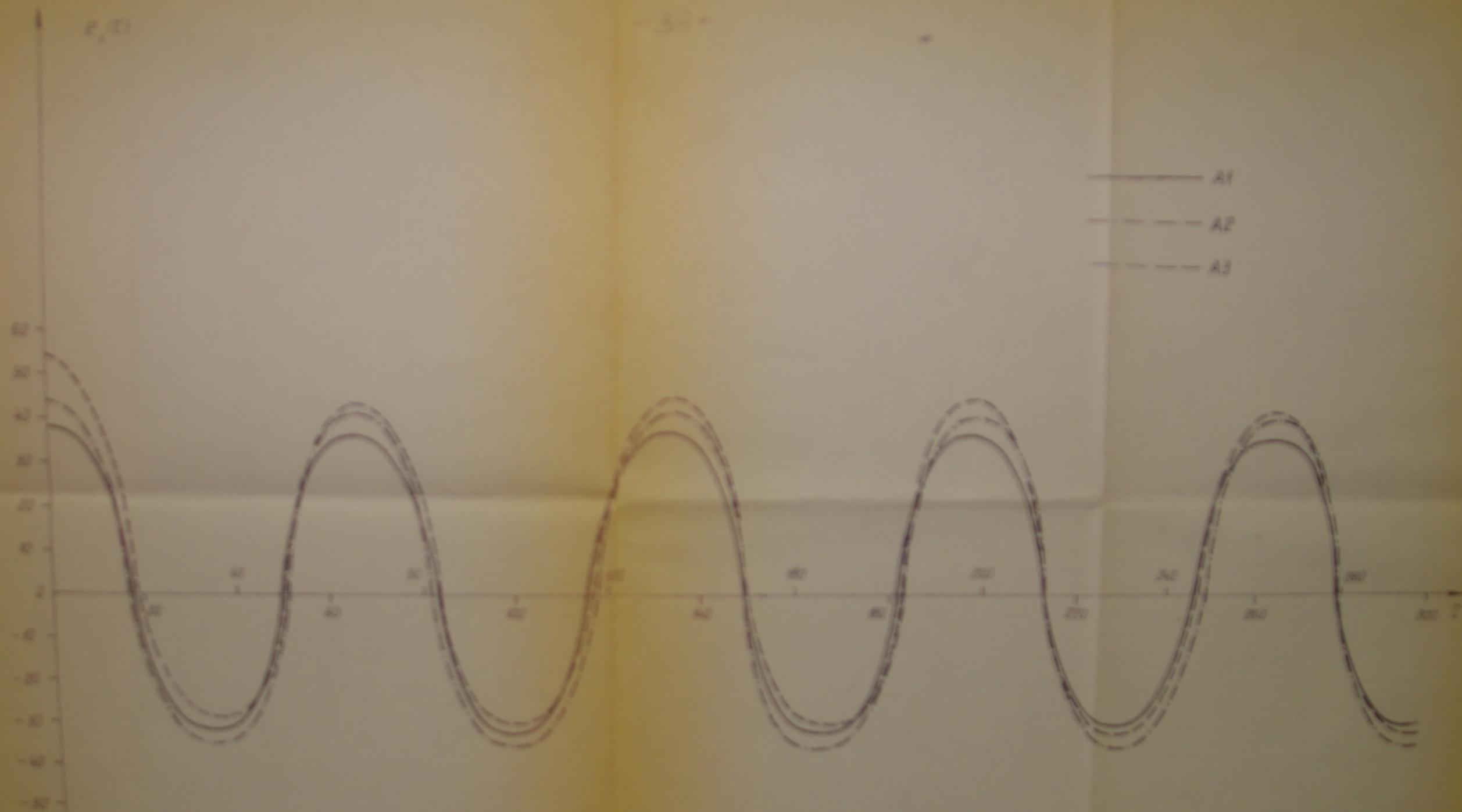


Fig. 2. Fonction d'autocorrélation

$v = 20 \text{ [m/s]}$

$p = 0.4 \text{ [mm]} \times$

$g = 30 \text{ [mm]}$

$A1 - h_p = 0.1 \text{ [mm]}$

$A2 - h_p = 0.4 \text{ [mm]}$

$A3 - h_p = 0.8 \text{ [mm]}$

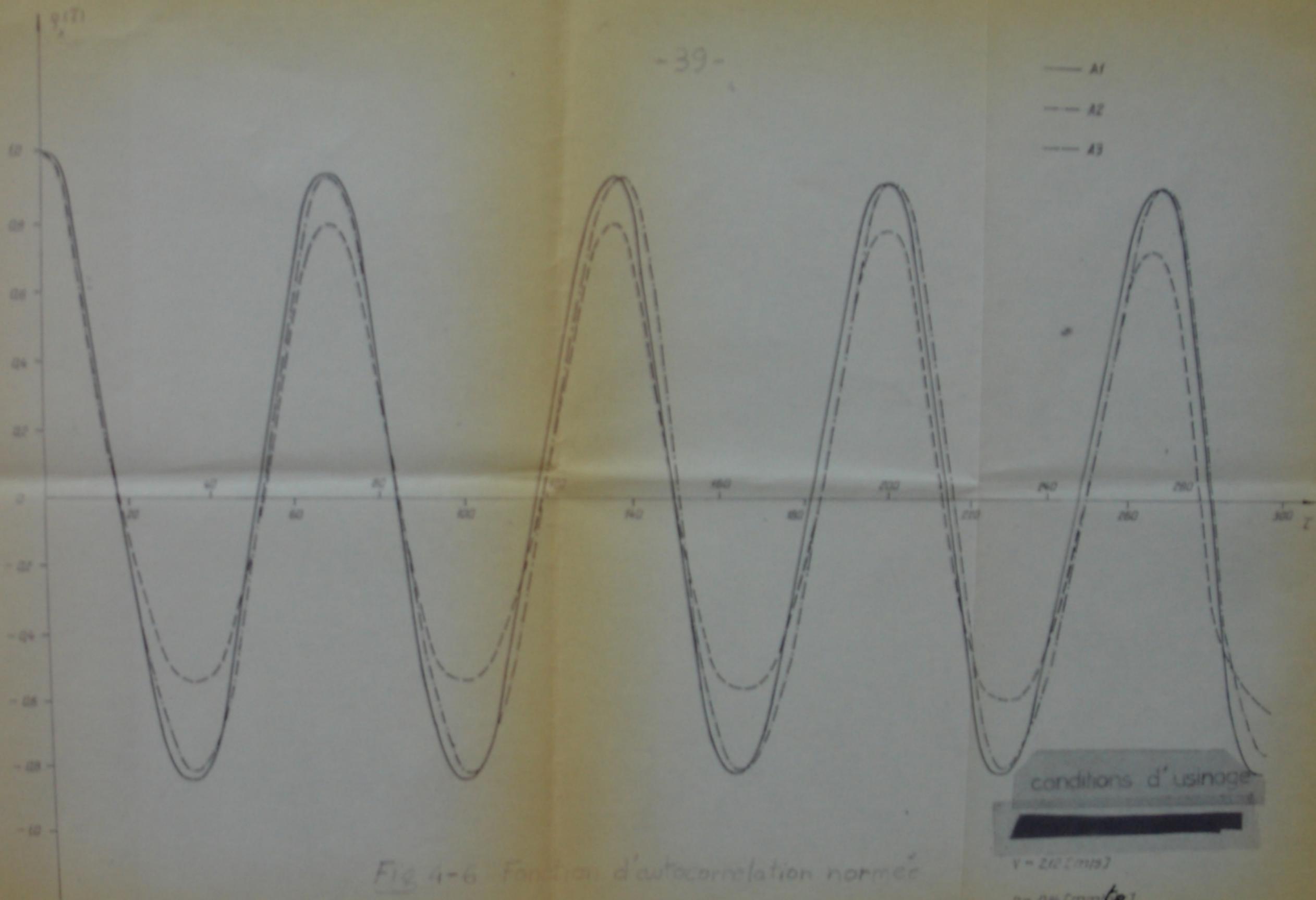
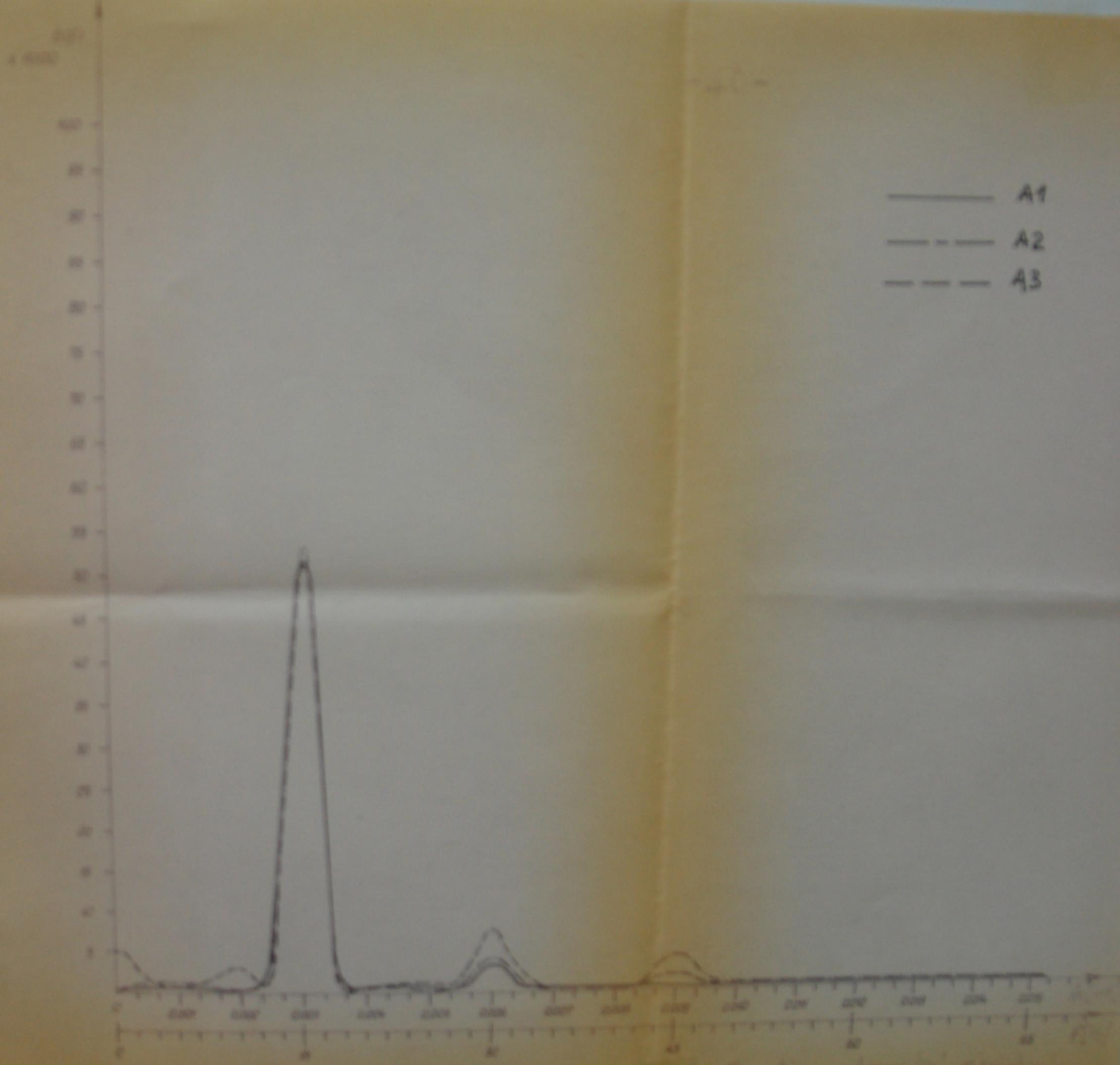


Fig 4-6 Fonction d'autocorrelation normée

conditions d'usinage
v = 260 [m/min]
p = 0.8 [mm] ϕ
q = 10 [mm]
A1 - $h_p = 0$ [mm]
A2 - $h_p = 94$ [mm]
A3 - $h_p = 12$ [mm]



F. 2. 1. Fraction de méthyle spirale

— C1
- - C2
- - - C3

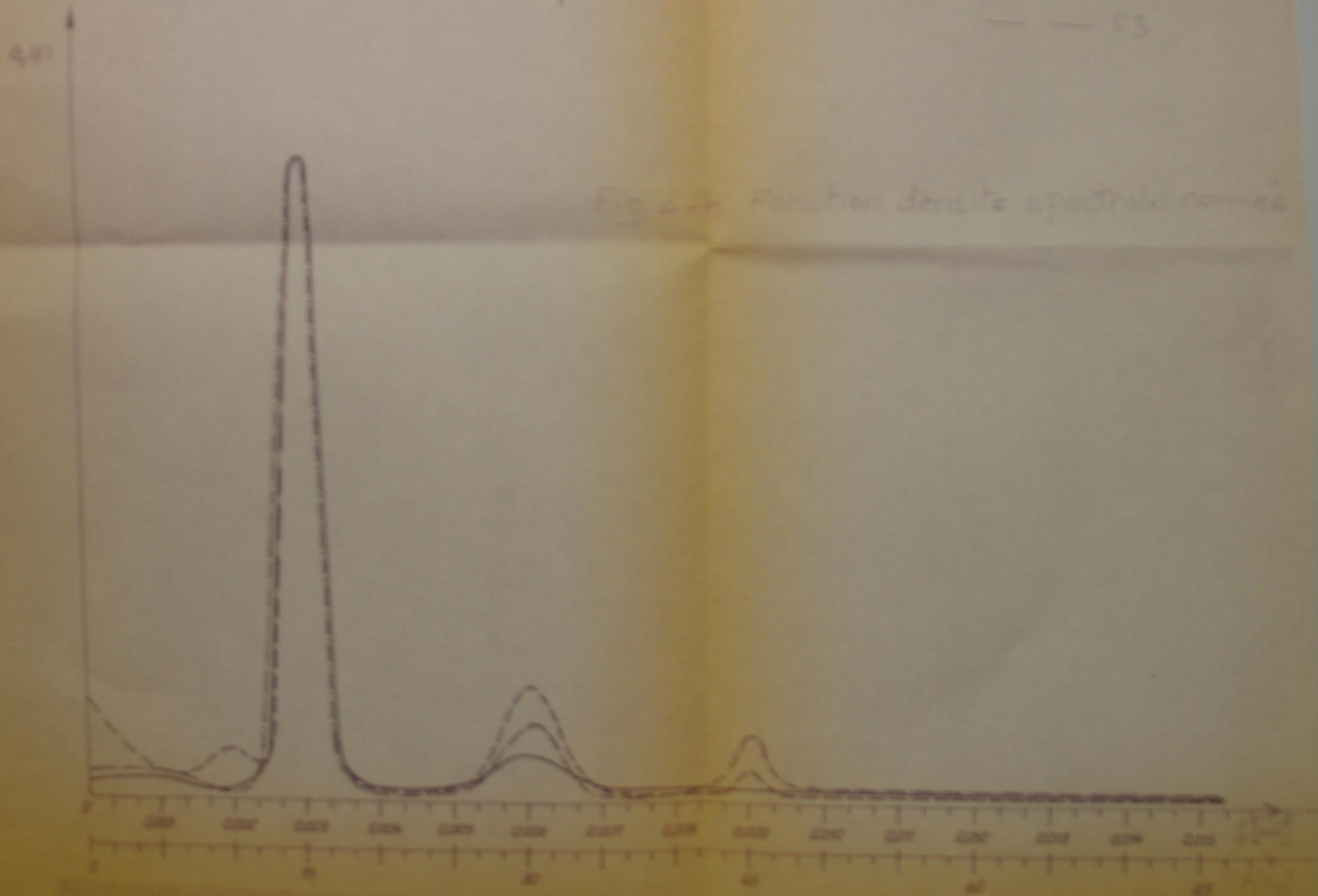


Fig 4-26 Fonction densité spectrale normalisée

B/ - ETUDE DES PORTIONS DE PIÈCES TYPE C.

On appellera C1, C2, C3 les parties des pièces 1,2 et 3, usinées avec une même avance $P = 0,08$ mm/tr et un outil à différentes étapes d'usure

B- 1 Analyse à l'aide des paramètres.

Pour une avance par tour faible ($P = 0,08$ mm/tr), on voit que tous les paramètres augmentent quand l'usure de l'outil augmente. La rugosité augmente en passant d'un outil non usé à un outil usé. Ces paramètres ne nous donnent pas des informations suffisantes pour déterminer l'état géométrique de notre surface.

B- 2 Analyse mathématique de l'état de surface.

a) Profil.

Le profil de C1 possède un degré moyen de régularité qui est supérieur à celui de C2, lui même supérieur à celui de C3. On peut dire que la régularité diminue quand l'usure de l'outil augmente. On remarque que A1 a une régularité supérieure à celle de C1 pour avoir une bonne régularité il faut augmenter l'avance.

b) Densité de probabilité et fonction de répartition.

D'après les courbes, fig. 4-9 et fig. 4-10 on voit que C1 et C2 ont presque les mêmes profondeurs de profil. L'ordonnée maximale pour C1 est 6nm et pour C2, 10 nm. En revanche, le profil de C3 est plus profond et peut atteindre des ordonnées de 56 nm. La probabilité pour C3 d'avoir des ordonnées supérieures à 12 nm est grande, de l'ordre de 70 %.

c) Fonction d'autocorrelation /FIG. 4-11/

Comme convenu, on utilise toujours la fonction d'autocorrelation normée fig. 4-12. Pour $C = 0$, le coefficient de corrélation est égal à 1 pour les trois échantillons. Ce coefficient varie suivant une fonction périodique pour C1 et C2. Après une période, on voit que la corrélation n'est que de 0,55 pour C2 ^{et 0,2 pour C1. On déduit que le profil de C2} est plus régulier que celui de C1 et cela malgré que C2 a été usinée par un outil plus usé que celui de C1. Pour C3, le coefficient de corrélation est presque toujours négatif. Cela veut dire, qu'il n'y a presque pas de corrélation et le profil est irrégulier. Cela pourrait être dû à un outil qui s'est cassé pendant le travail. On remarque aussi pour C3, que $S_x(z)$ est constante dans l'intervalle $140 \leq z \leq 180$, ce qui implique l'existence d'irrégularités dans les creux du profil. Cela nous permet de conclure que le profil de C3 est plus aléatoire que régulier.

d) Densité spectrale /FIG. 4-13/

En analysant la densité spectrale normée Fig. 4-14, on remarque que C1 et C2 présentent à une fréquence périodique, des maximums dûs à l'effet de l'avance et de l'estimateur de la fonction. Ce qui n'est pas le cas pour C3 qui a un maximum décalé vers une fréquence plus petite. On pourrait dire que, l'outil étant usé (ou même cassé d'après l'hypothèse faite précédemment), les vibrations sont tellement intenses que leurs effets englobent l'effet de l'avance. C1, C2, C3 présentent plusieurs fréquences étrangères pour lesquelles on a des défauts.

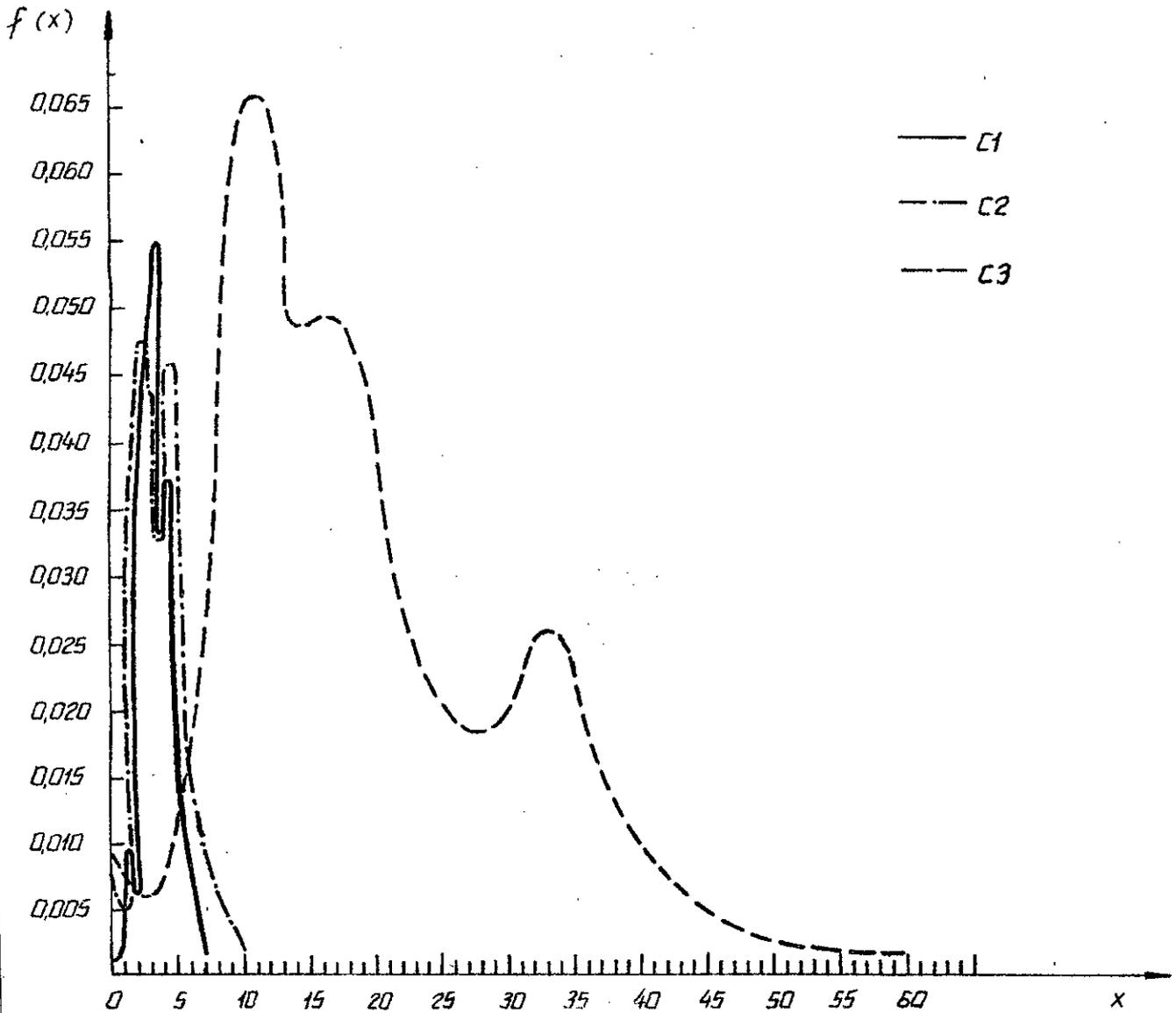


Fig 4-9 Fonction densité de probabilité [μm]

2

$$V = 2,12 \text{ [m/s]}$$

$$p = 0,08 \text{ [mm/obr]}$$

$$g = 3 \text{ [mm]}$$

$$[C1 - h_p \leq 0,1 \text{ [mm]}]$$

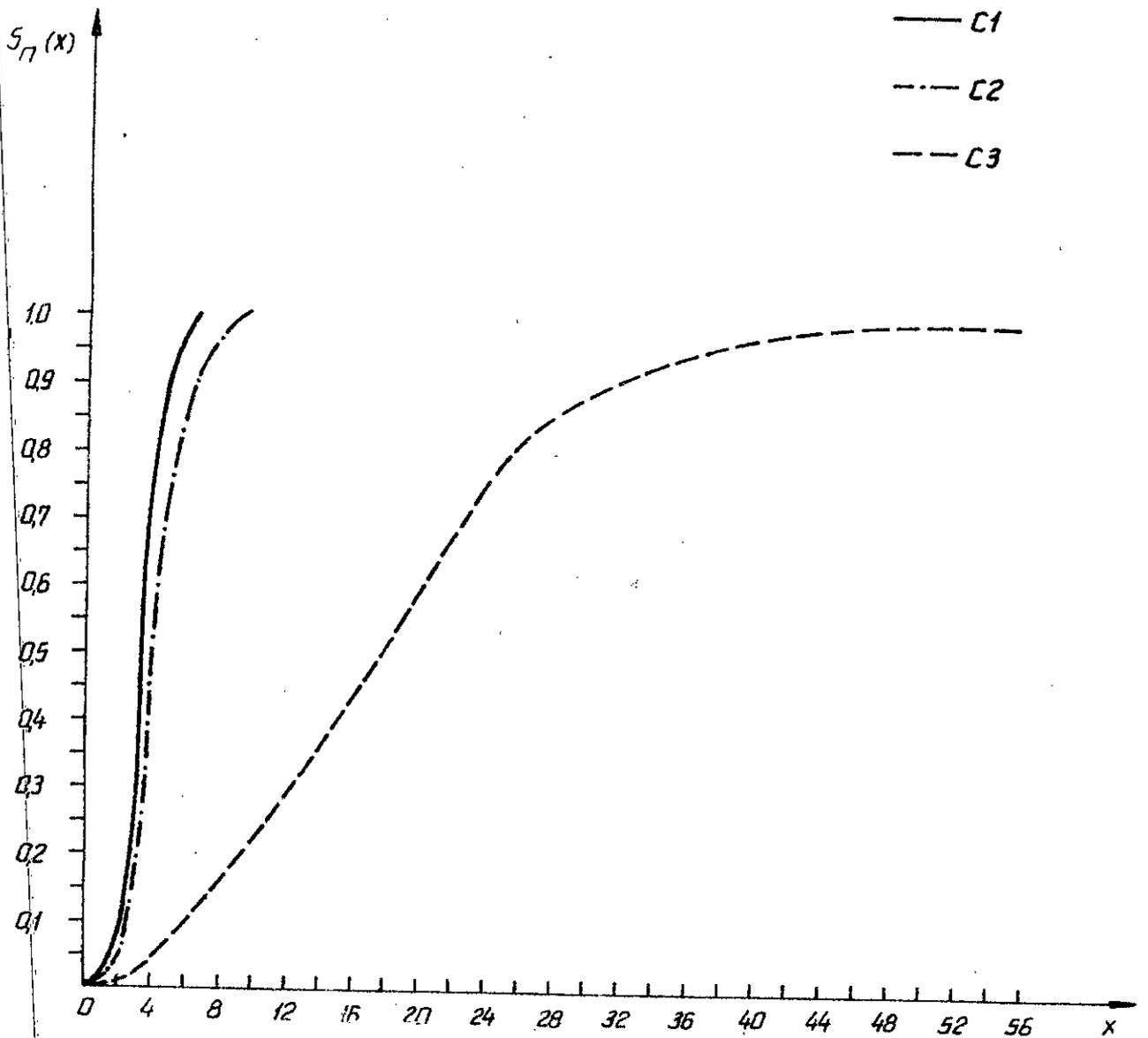


Fig 4-10 Fonction de répartition [μm]

$$V = 2,12 \text{ [m/s]}$$

$$\rho = 0,08 \text{ [mm/obr]}$$

$$g = 3 \text{ [mm]}$$

$$C1 - h_p \leq 0,1 \text{ [mm]}$$

$$C2 - h_p = 0,4 \text{ [mm]}$$

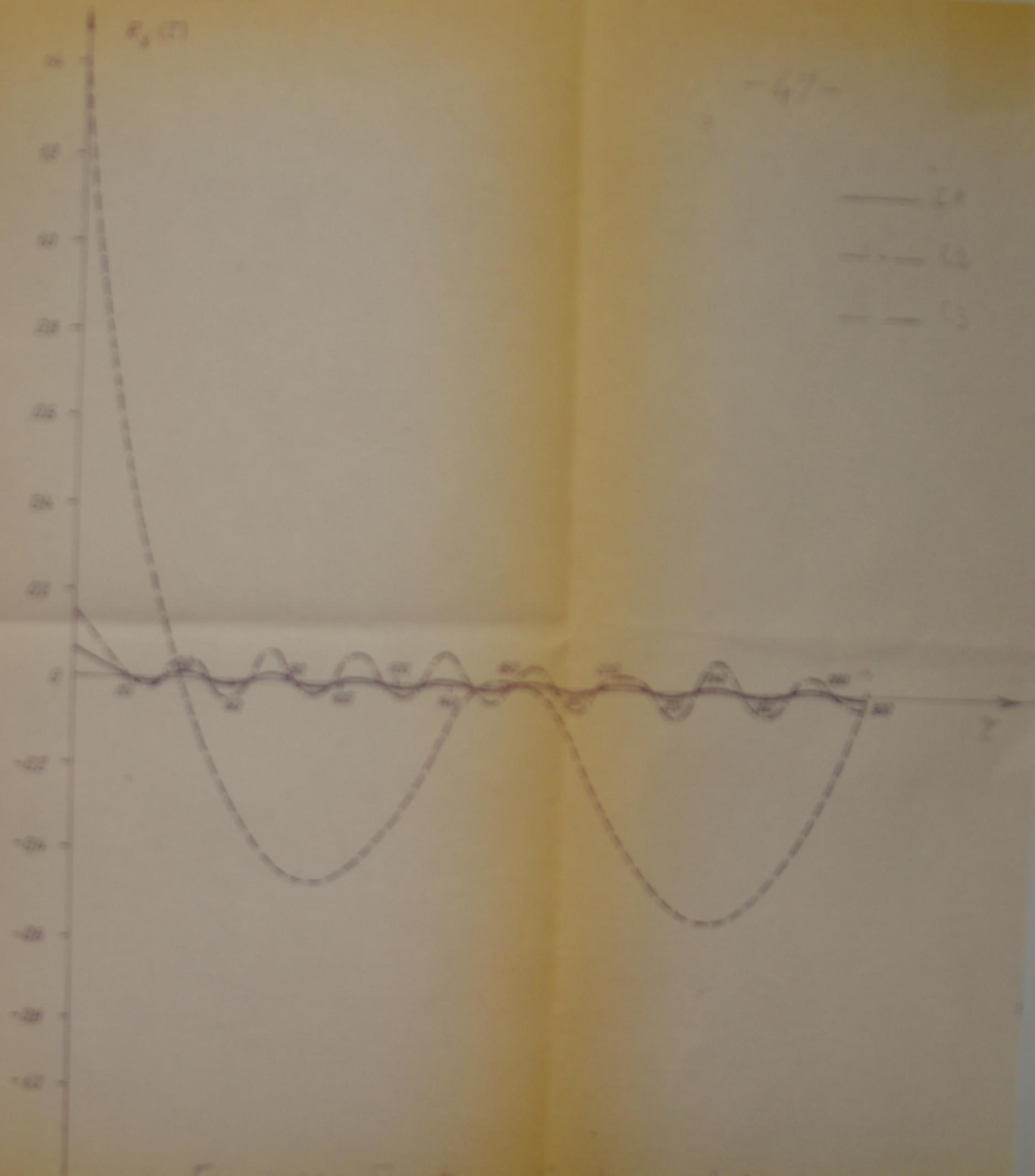


Fig 4.11 Fraction of autocorrelation

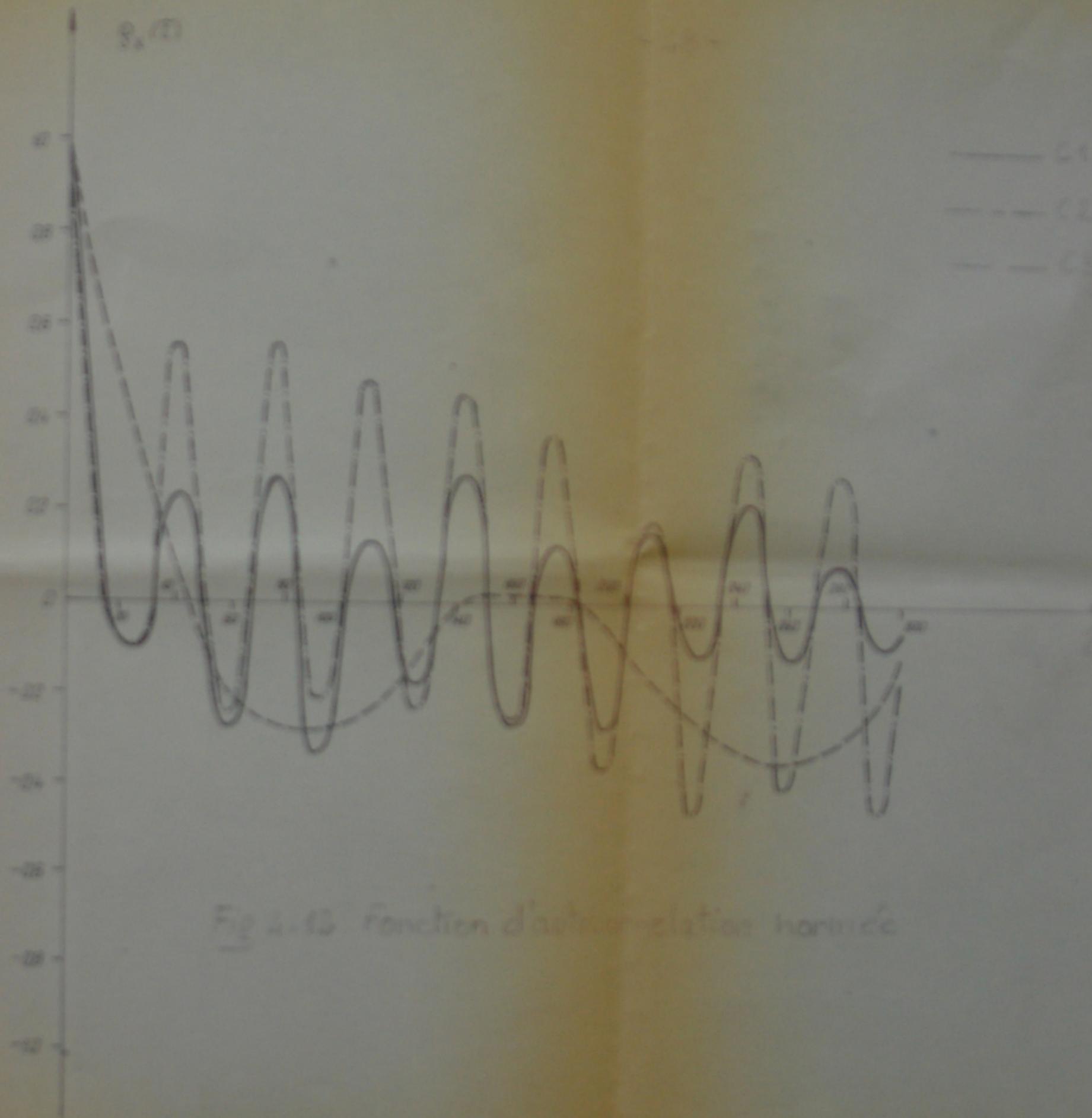
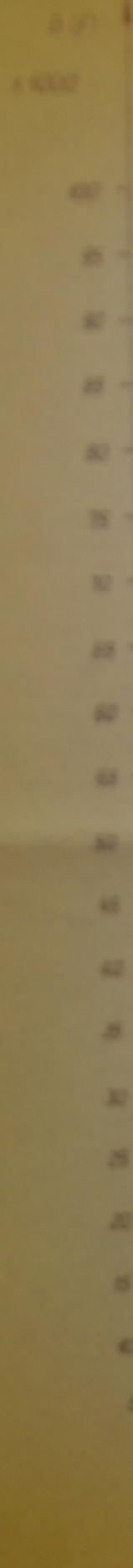


Fig 4.13 fonction d'autocorrelation normalisée

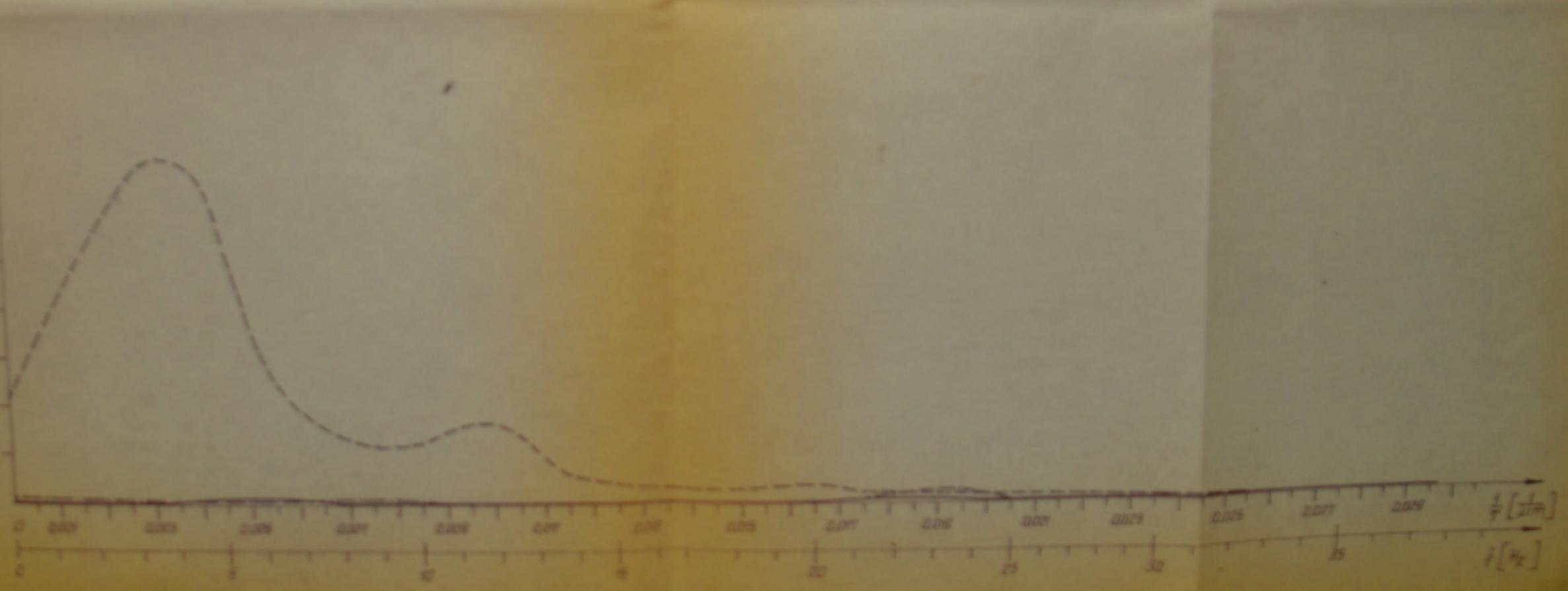
-49-



- C1
- - - C2
- - - C3

CONDITIONS OF USAGE

- $V = 1.0 \text{ [m/s]}$
- $p = 0.08 \text{ [mm]} \text{ (exp)}$
- $q = 3 \text{ [mm]}$
- C1 - $h_p < 0.1 \text{ [mm]}$
- C2 - $h_p = 0.4 \text{ [mm]}$
- C3 - $h_p = 1.2 \text{ [mm]}$



Handwritten text at the bottom of the page, possibly a title or description of the graph.

4-2 Deuxième exemple.

Cet exemple consiste en l'étude de l'état de surface d'un cylindre pour piston. Ce cylindre est percé puis soumis à un honing ou polissage à la pierre.

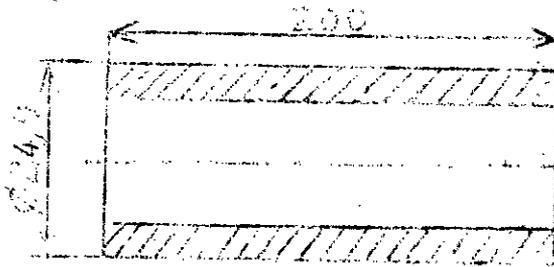


Fig. 4-15

Conditions de perçage :

diamètre du forêt 24,9 mm
nombre de tour de la broche $n = 560$ tr/mn
avance par minute $P = 25$ mm/mn
avance par tout $P_t = 0,045$ mm/tr

Condition de honing :

abrasif électrocoround
nombre d'abrasif 5/240/
dureté : 0
pression : 9Kg/cm^2
nombre de tour de la broche $n = 180$ tr/mn
avance $P_t = 12,5$ m/mn
l'angle $\beta = 10^\circ$
liquide de lubrification : Nafter
temps global de travail : 60 minutes

On ne fera que l'analyse mathématique de surface.

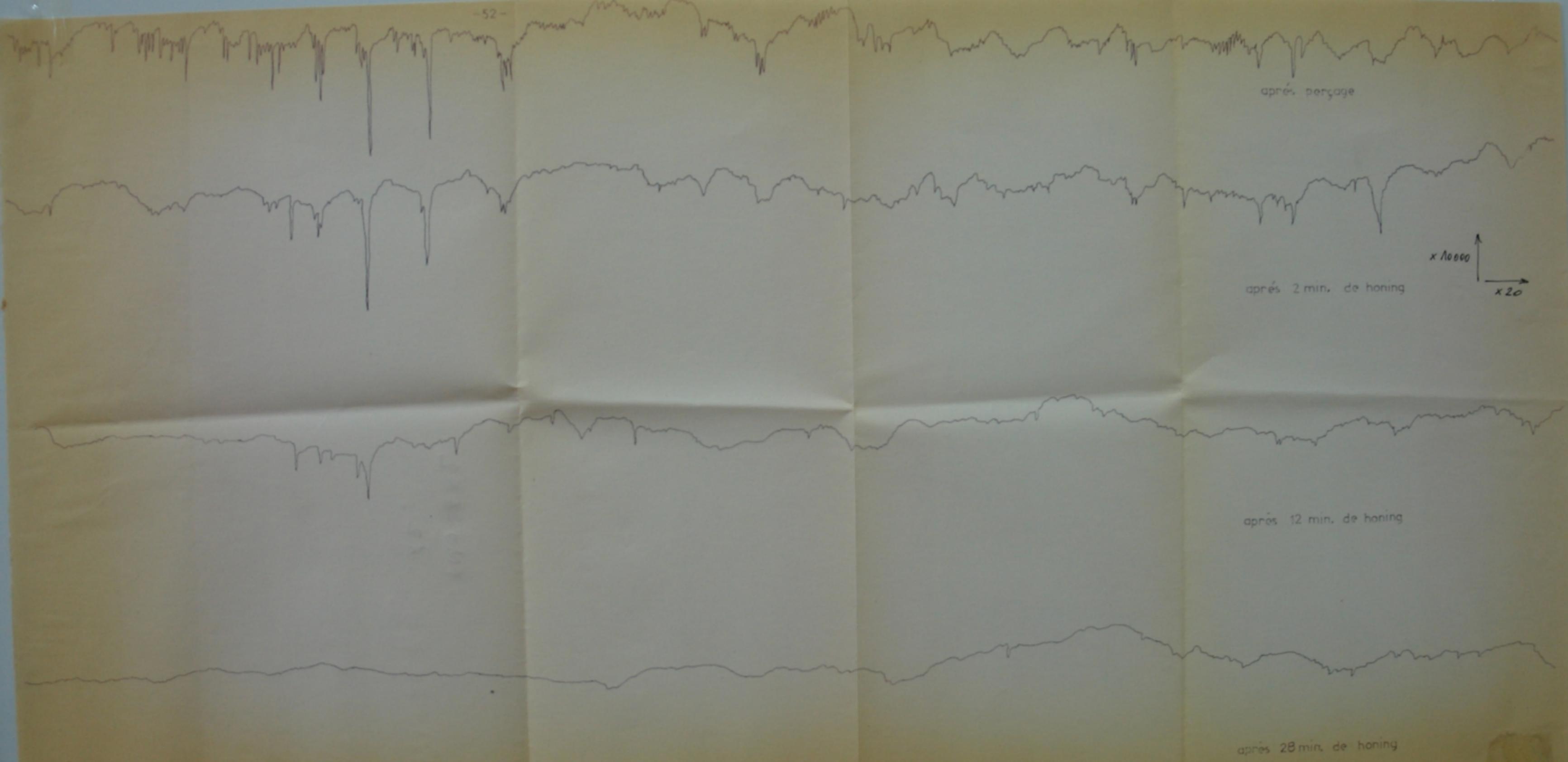


Fig 4-16 PROFILOGRAMMES

A/ ANALYSE DE LA SURFACE APRES PERCAGE.

a) Profil / FIG. 4-16 /

Le profil présente un très grand nombre de pics de différentes profondeurs. Plusieurs pics sont profonds. On remarque l'existence de grandes périodes et des petites périodes. Cette surface n'est pas régulière et présente une rugosité importante.

b) Densité de probabilité et fonction de répartition.

La densité de probabilité FIG 4-17 présente une asymétrie négative. D'après les deux courbes Fig. 4-17 et fig. 4-18, on peut déduire que le profil présente des ordonnées relativement grandes. L'ordonnée maximale est de l'ordre de 7 nm et la probabilité d'avoir des ordonnées supérieures à 3,5nm est de 85%...

c) Fonction d'autocorrelation / FIG. 4-19 /

En analysant la fonction d'autocorrelation normée, on constate qu'elle est pseudo-périodique avec l'existence de grandes pseudo-périodes et des petites.

D'après l'allure, on peut dire qu'on a affaire à un profil plus régulier que aléatoire (combinaison).

d) Fonction densité spectrale / FIG. 4-21 /

On remarque l'existence de deux fréquences (les deux premiers pics sont assimilés à une fréquence). La première fréquence correspond au profil régulier qui est prédominant et la deuxième fréquence correspond au profil aléatoire.

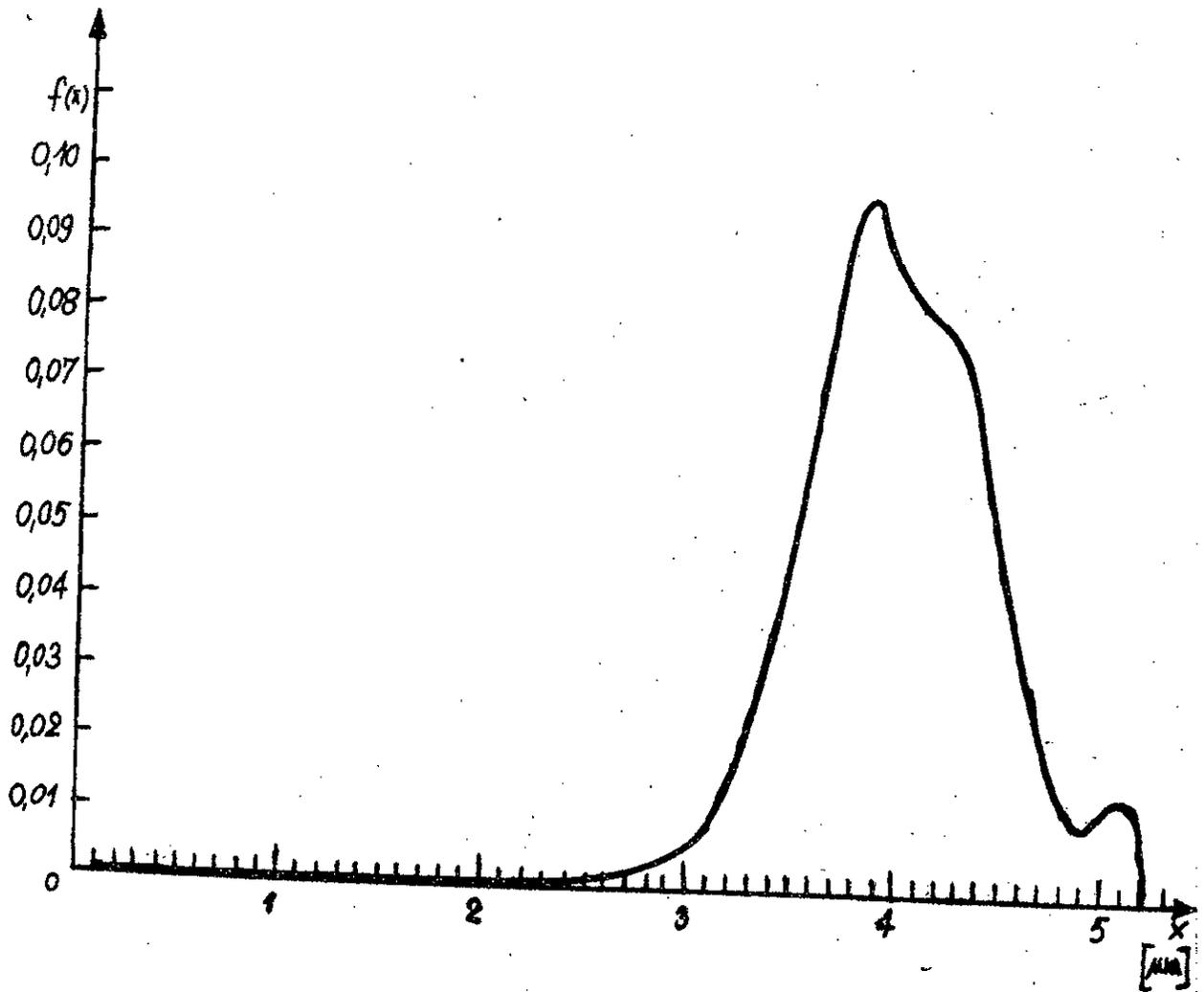


Fig4-17 Fonction densité de probabilité
après perçage

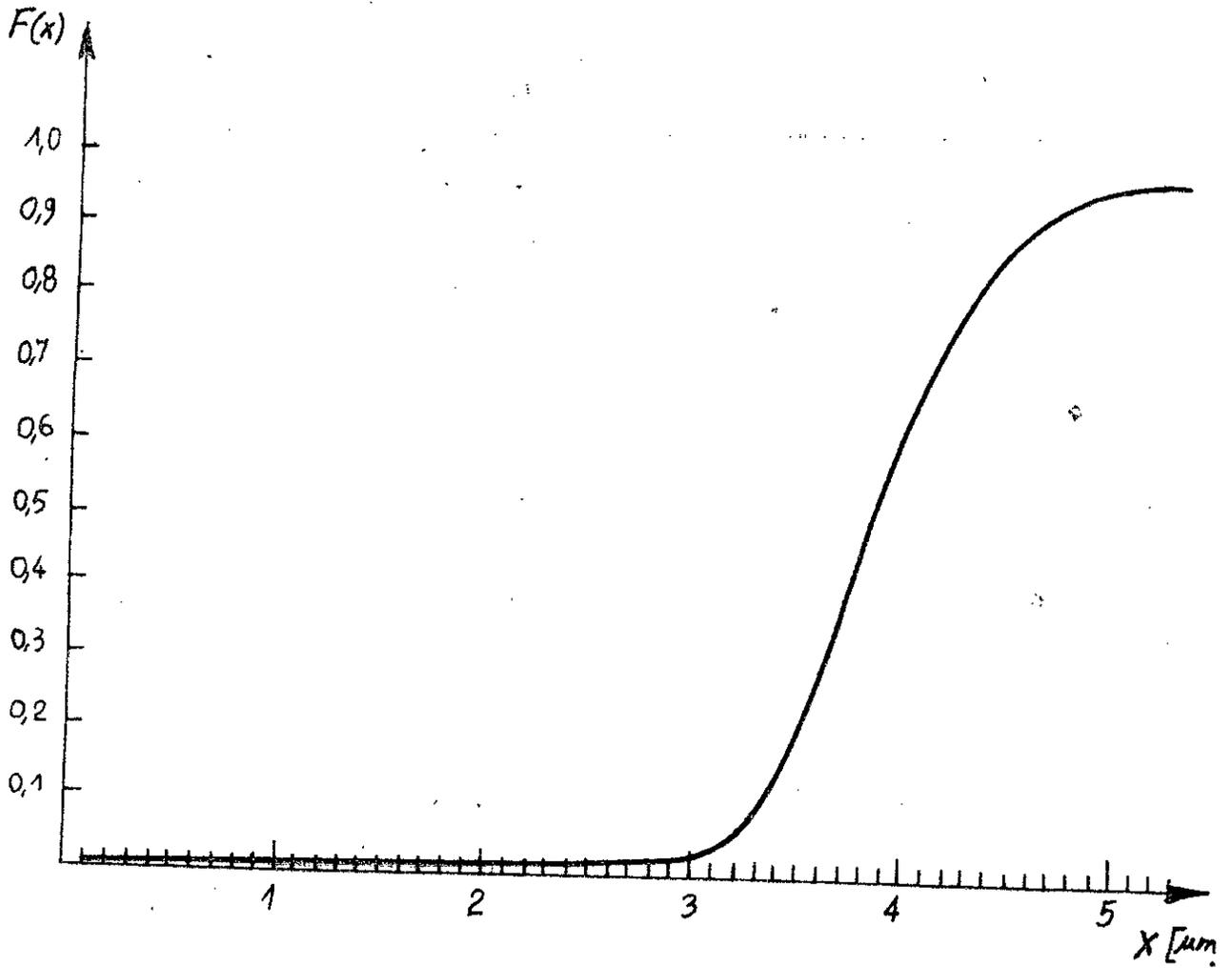


Fig4-18 Fonction de répartition
(après perçage)

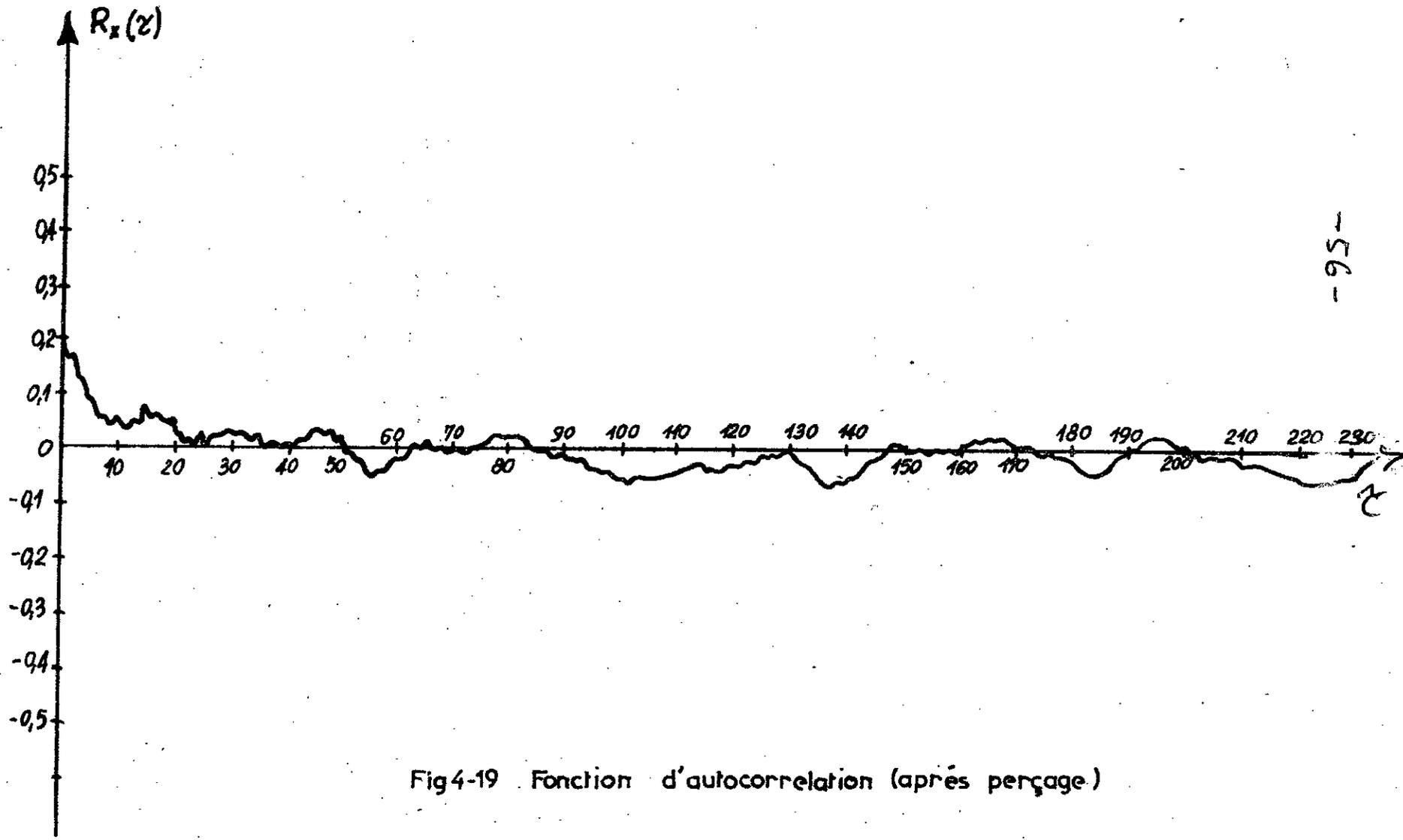


Fig 4-19 Fonction d'autocorrelation (après perçage)

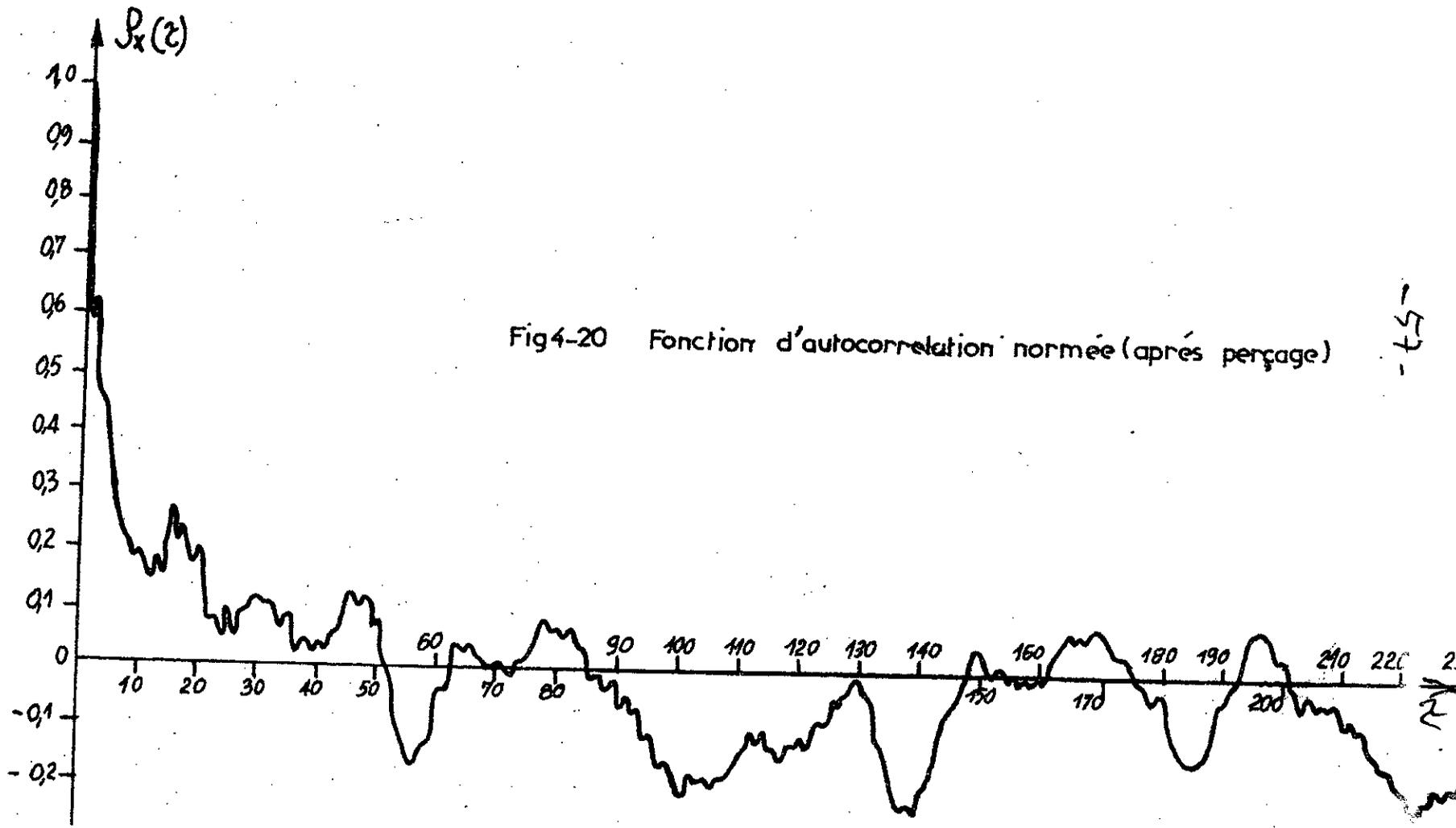


Fig 4-20 Fonction d'autocorrelation normée (après perçage)

-57-

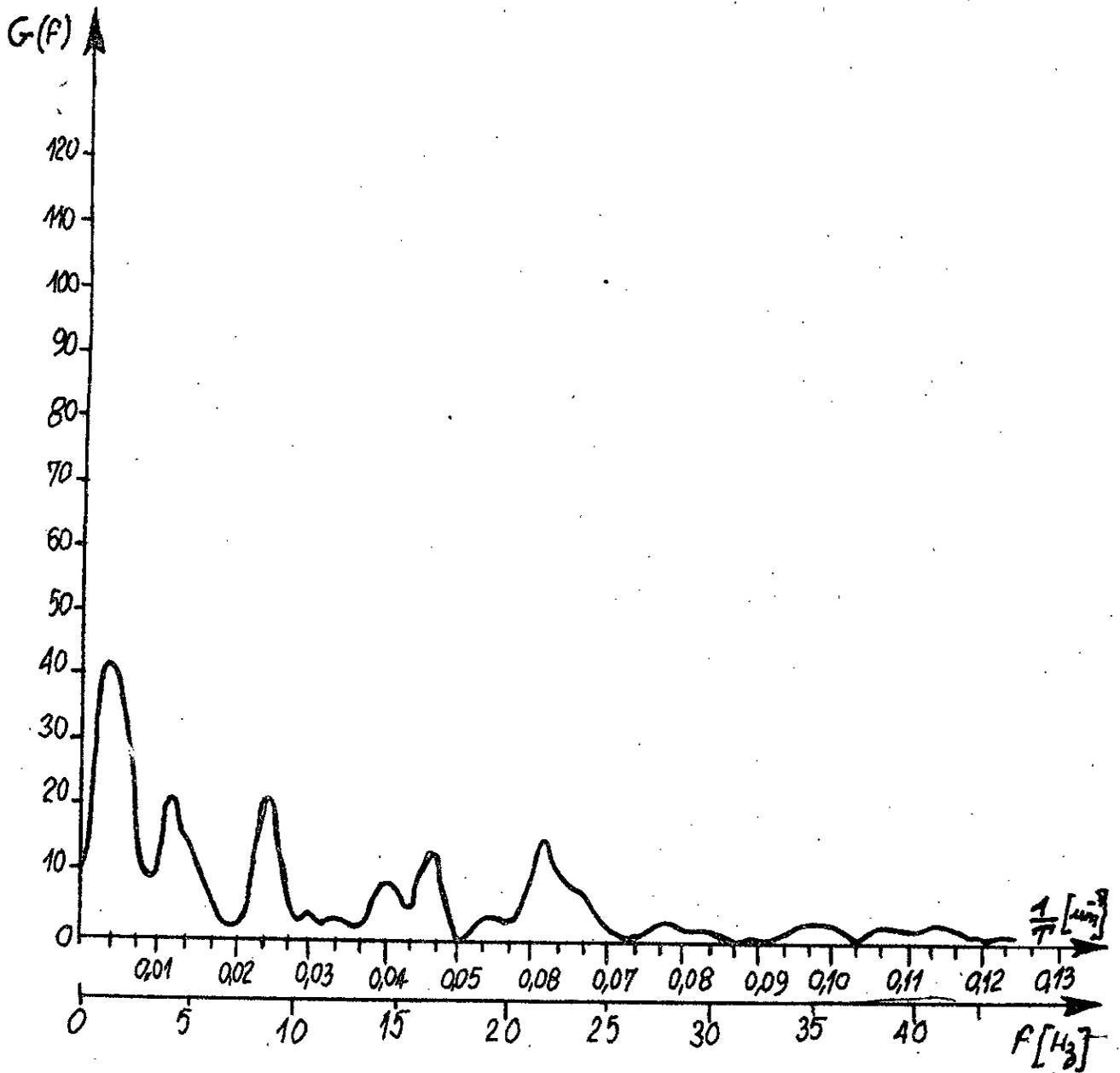


Fig 4-21 Fonction densité spectrale

(après perçage)

B/ ANALYSE MATHÉMATIQUE DE LA SURFACE APRES UN HONING DE 2 MINUTES

a) Profil / FIG. 4-16 /

On voit que les nombreux pics qui existaient après le perçage ont presque disparus, néanmoins, ils restent quelques pics assez profonds et concentrés dans certaines zones.

b) Densité de probabilité / FIG 4-22 /

Cette courbe présente une dissymétrie négative comme celle du perçage. Son maximum se situe pour $X = 0,9$ nm avec $f(x) = 0,11$.

c) Fonction de répartition / FIG.4-23 /

On peut dire qu'on a des ordonnées moins grandes que celles obtenues après perçage. La probabilité pour qu'une ordonnée soit supérieure à 3,5mm est de 80%.

d) Fonction d'autocorrelation normée / FIG. 4-25 /

Cette fonction présente deux pseudo-périodes. La première assez grande due à la grande avance du honing et la seconde petite due au processus de perçage dont les défauts persistent encore. Cette fonction est la somme de trois types de fonctions, une correspondant à un processus aléatoire et deux correspond à deux processus réguliers-aléatoires.

e) Densité spectrale / FIG. 4-26 /

On remarque l'existence de cinq fréquences. La première présentant une grande amplitude correspond à un profil régulier. Les quatre autres fréquences correspondent à deux profils réguliers et deux profils aléatoires.

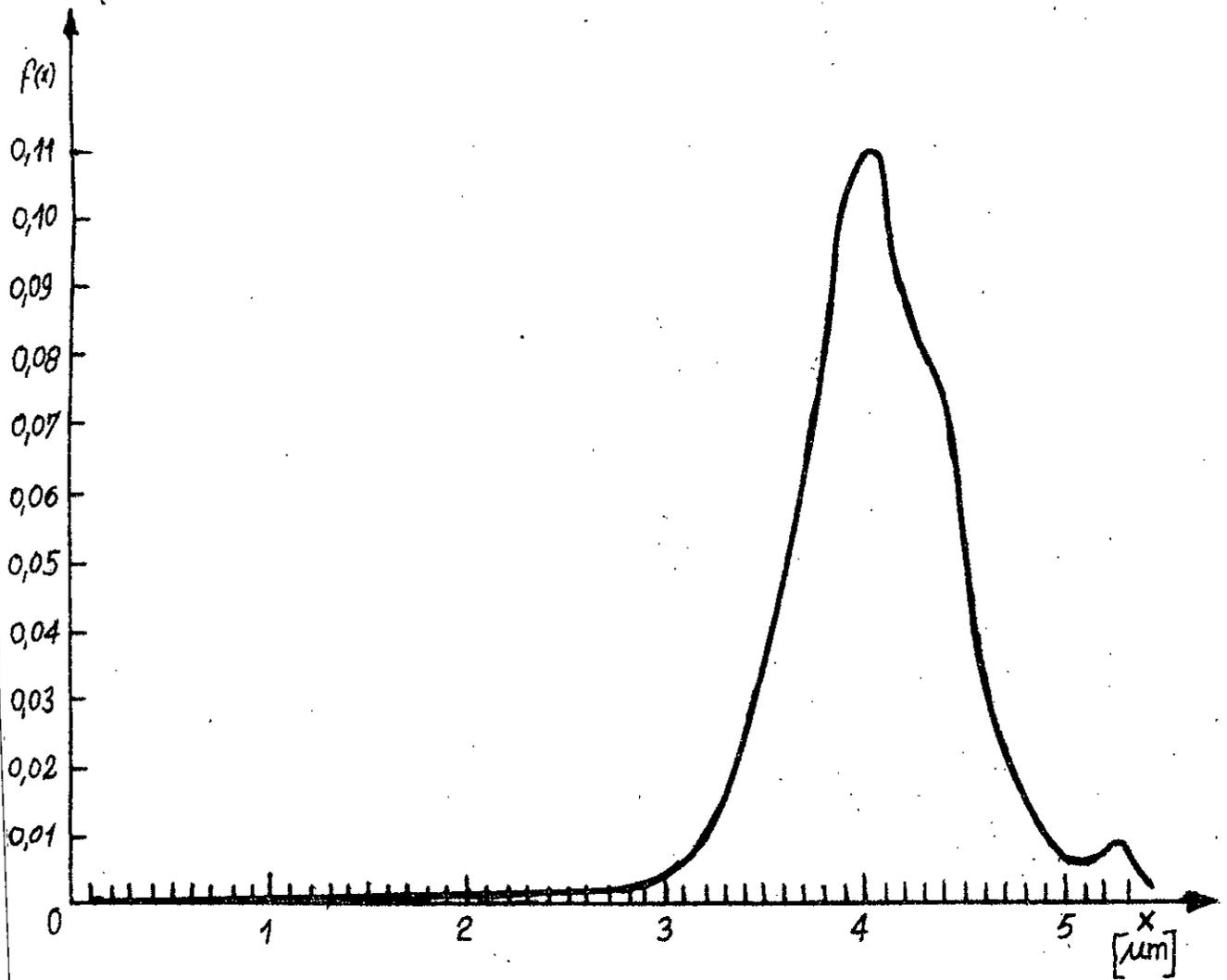


Fig 4-22 Fonction densité de probabilité
après 2 minutes de honing

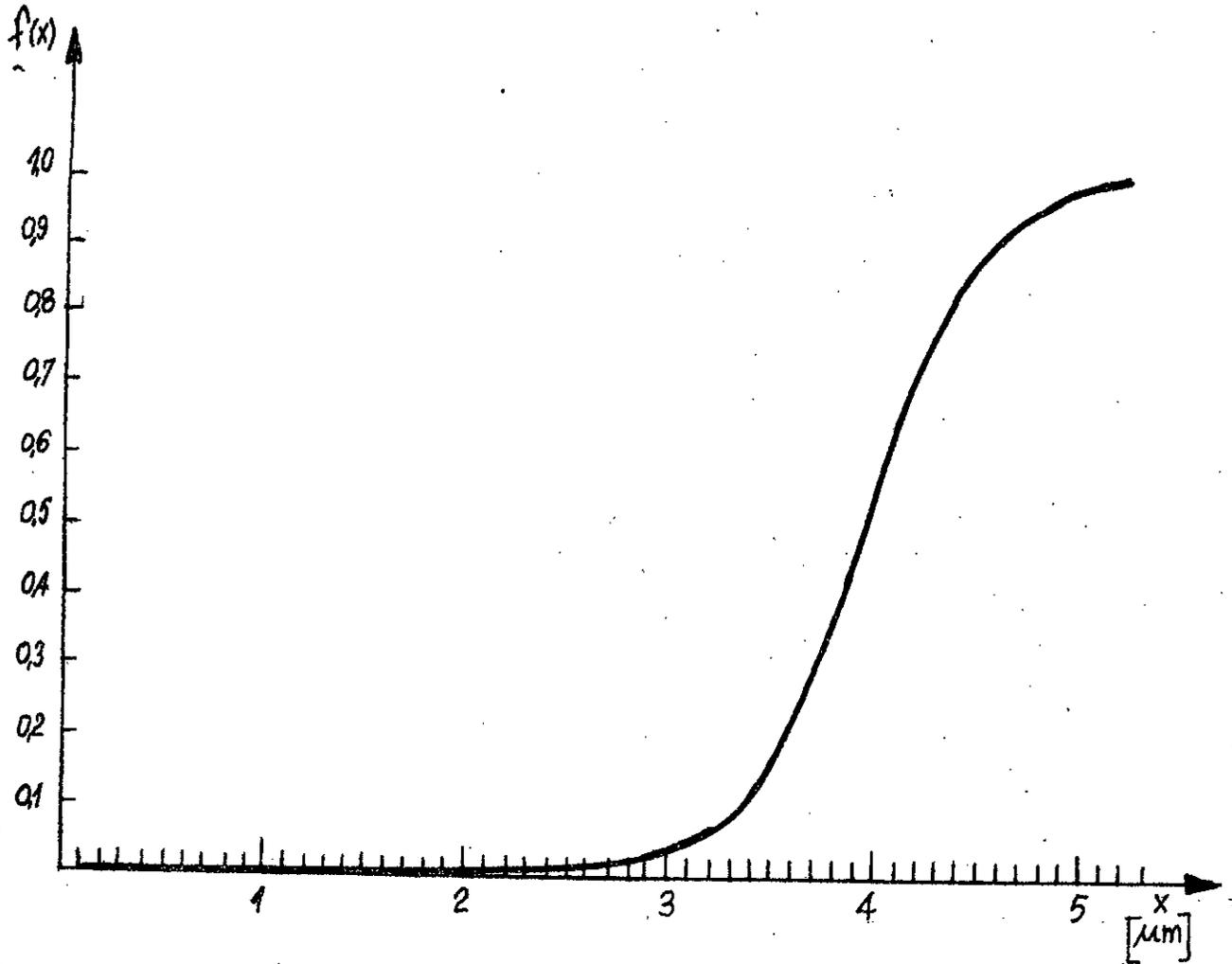


Fig 4-23 Fonction de répartition
(2 min de honing)

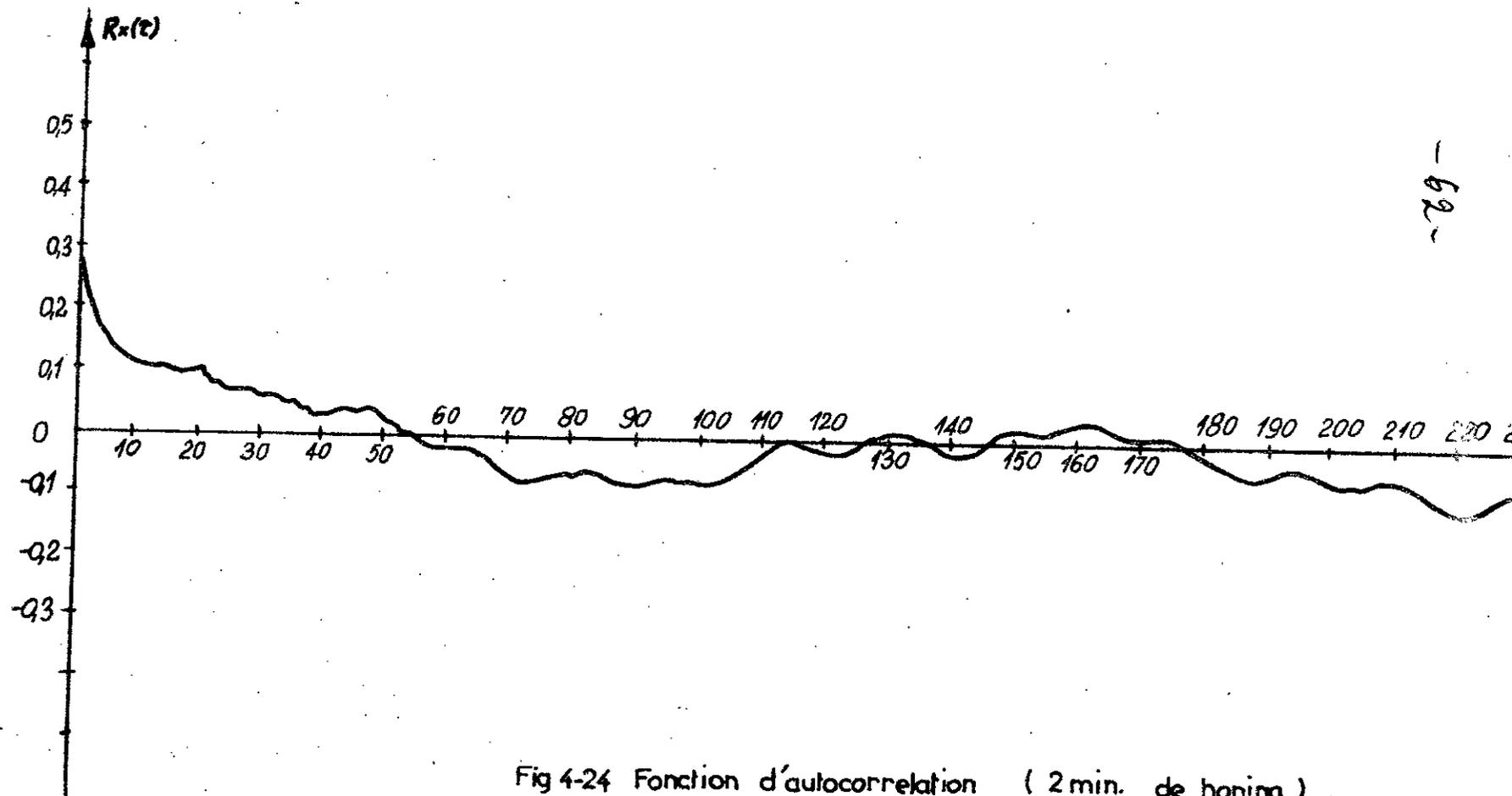


Fig 4-24 Fonction d'autocorrelation (2 min. de honing)

-62-

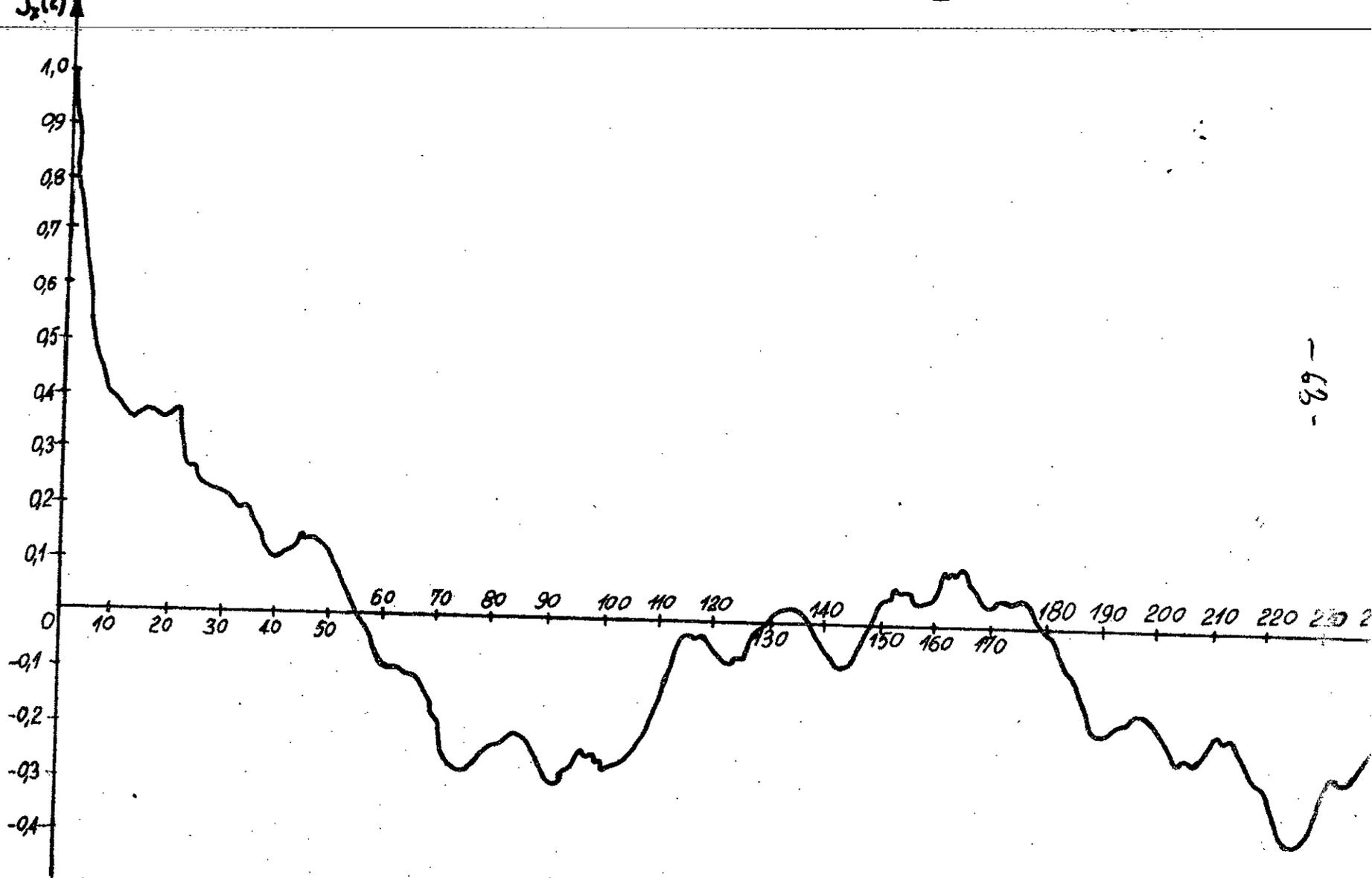


Fig 4-25 Fonction d'autocorrelation normée (2 min. de honing)

-69-

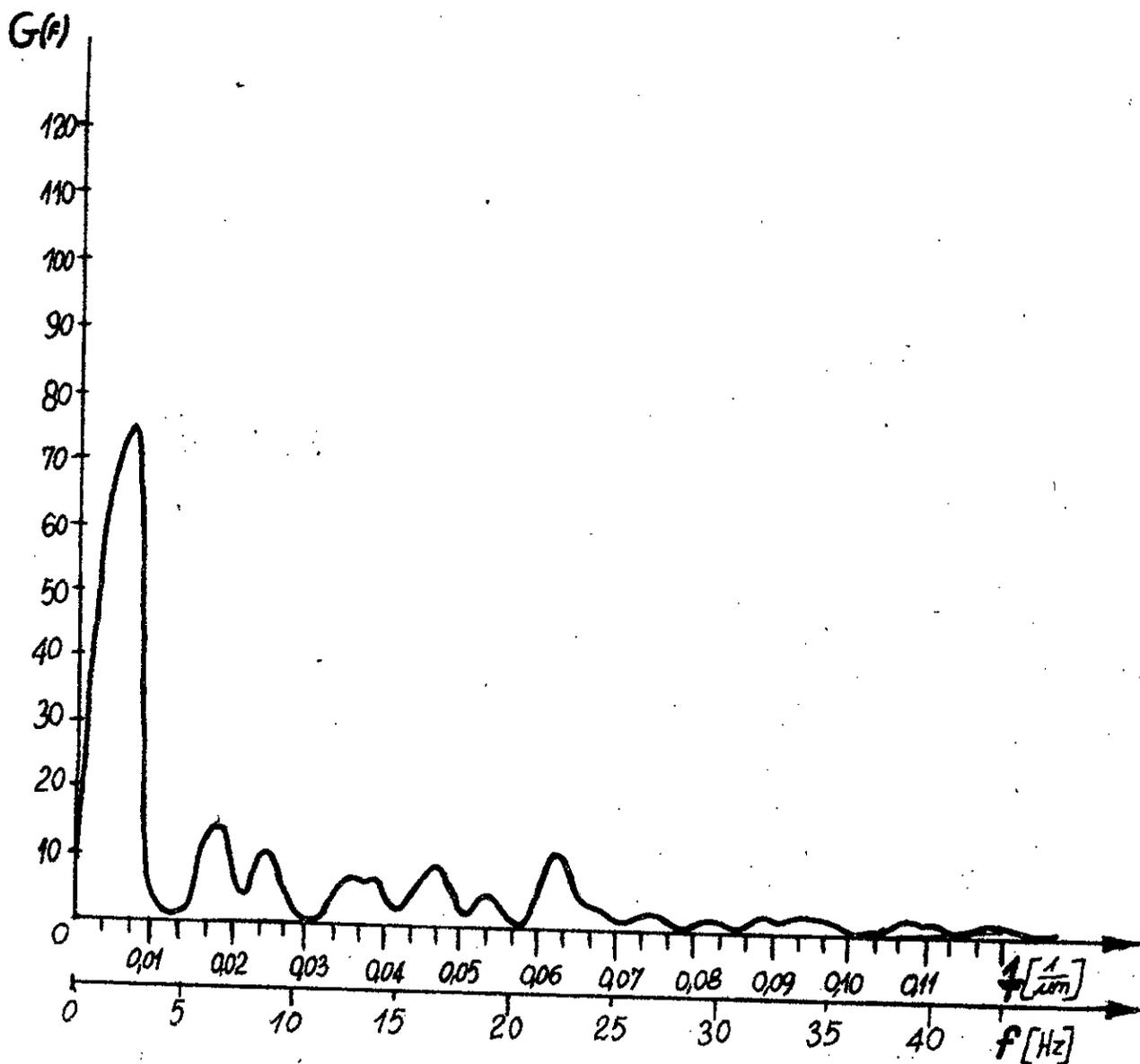


Fig 4-26 Fonction densité spectrale (2 min. de honing)

C/ ANALYSE DE LA SURFACE APRES 12 MINUTES DE HONING.

a) Profil / FIG. 4-16 /

Les pics profonds ont pratiquement disparus. Ils existent quelques pics peu nombreux et peu profonds.

b) Densité de probabilité / FIG. 4-27 /

Cette courbe présente une faible disymétrie, presque nulle. Son maximum se présente pour $X = 2, 3$ nm et $f(X) = 0,095$

c) Fonction de répartition / FIG. 4-28 /

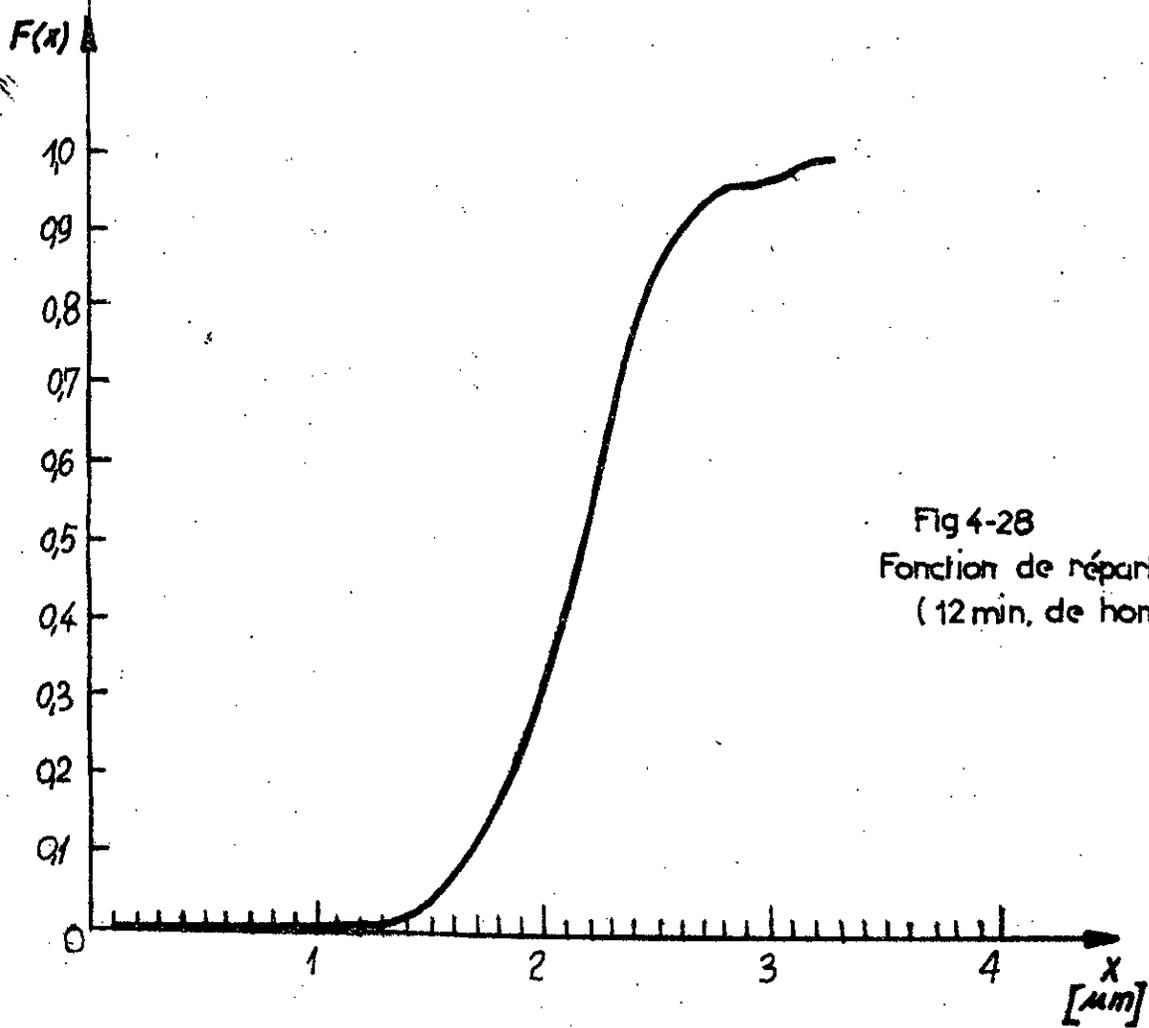
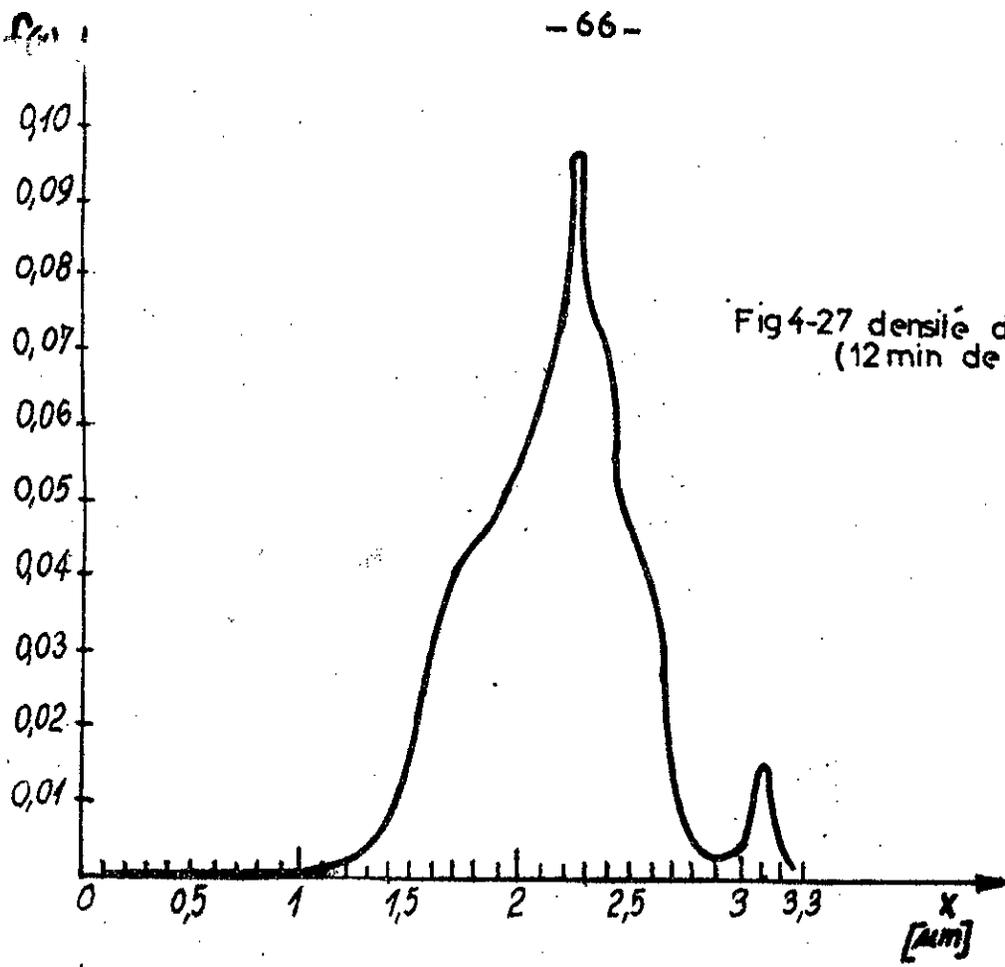
On voit qu'on a des ordonnées plus petites que dans les premiers cas. La probabilités d'avoir des ordonnées inférieures à 3,5 nm est pratiquement égale à 1. Après 12 minutes de honing, le profil n'est plus profond comme il a été auparavant et sa profondeur n'excède pas 3,5 nm!

d) Fonction d'autocorrelation normée / FIG. 4-30 /

Elle présente toujours une grande période due au honing. Les petites périodes dues au perçage commence à disparaître et sont moins nombreuses que dans les cas précédents. L'allure de la fonction d'autocorrelation FIG. 4-29, nous montre le caractère plus aléatoire que régulier de la surface.

e) Densité spectrale / FIG. 4-31 /

On distingue trois fréquences seulement. La première fréquence donnant une grande amplitude à la fonction correspond au caractère aléatoire prédominant dû au honing. La deuxième et troisième fréquences correspondent respectivement aux caractères aléatoire et régulier du profil suite au perçage.



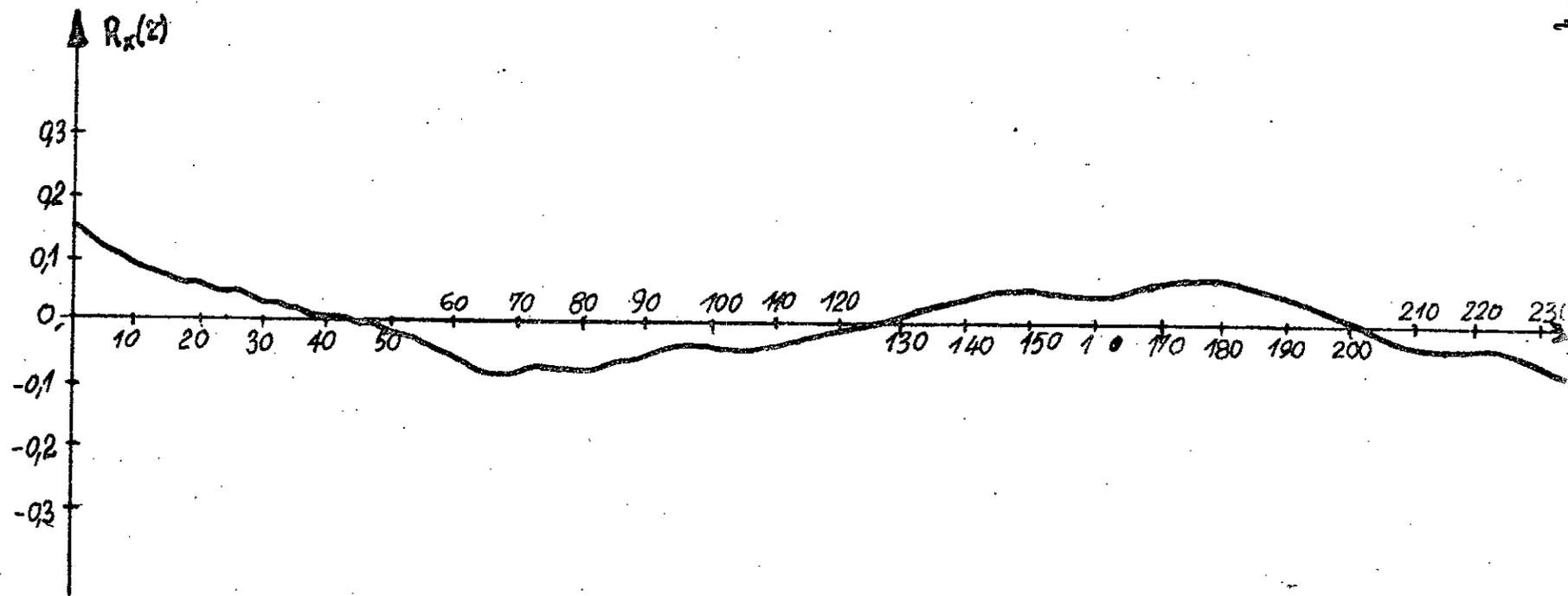


Fig 4-29 Fonction d'autocorrelation (12 min de honing)

-67-

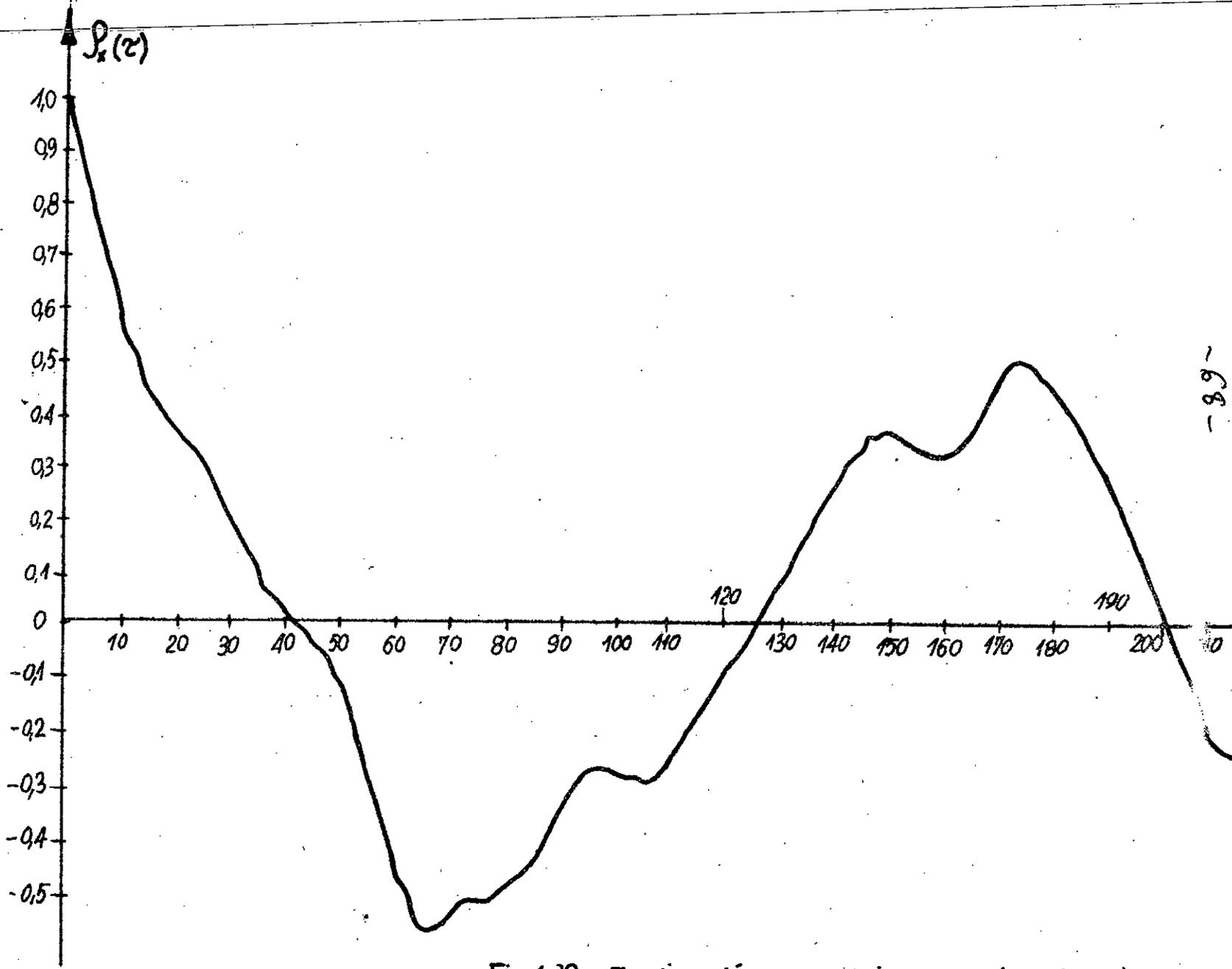


Fig 4-30 Fonction d'autocorrelation normée (12 min de hor

-88-

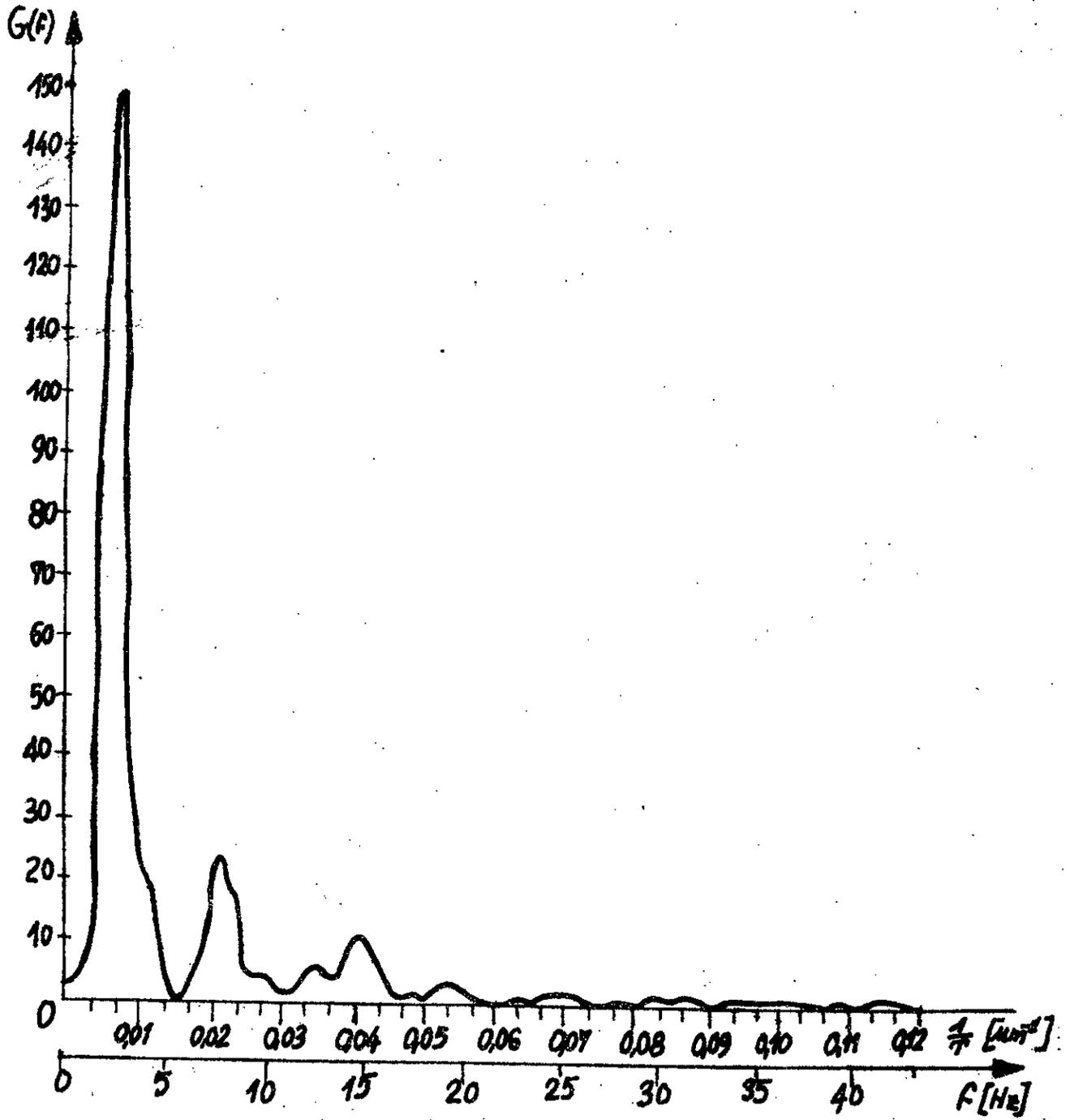


Fig 4-31 Fonction densité spectrale (12 min de honing)

D/ ANALYSE DE LA SURFACE APRES 28 MINUTES DE HONING.

a) Profil / FIG. 4-16 /

Les pics ont presque tous disparu. Le profil est parfaitement sans fissures profondes.

b) Densité de probabilité / FIG. 4-32 /

La courbe présente une disymétrie positive. Les ordonnées sont très petites par rapport aux cas précédents. L'ordonnée maximale ne dépasse pas 2,2 nm . On a un maximum de la courbe pour $y = 0,8$ nm et $f(x) = 0,88$.

c) Fonction de répartition / FIG. 4-33 /

Les ordonnées sont très petites. On a une probabilité voisine de 1 de trouver des ordonnées inférieures à 2 nm. On voit qu'après 28 Minutes de honing tous les pics ont disparu.

d) Fonction d'autocorrelation / FIG. 4-34 /

Notre fonction chevauche presque l'axe des τ . C'est le type de fonction représentant le caractère aléatoire d'un profil. D'autre part, on voit que les petites périodes ont presque disparu, cela veut dire que les traces du perçage n'existent presque pas. Les grandes périodes ont aussi disparu, il n'y a qu'une seule. Le profil n'est presque pas régulier, il est aléatoire.

e) Densité spectrale / FIG. 4-36 /

On remarque une seule fréquence pour laquelle l'amplitude est très grande, cela correspond au caractère aléatoire du profil. Une deuxième fréquence présente une amplitude faible peut être due au petit caractère de régularité qui persiste.

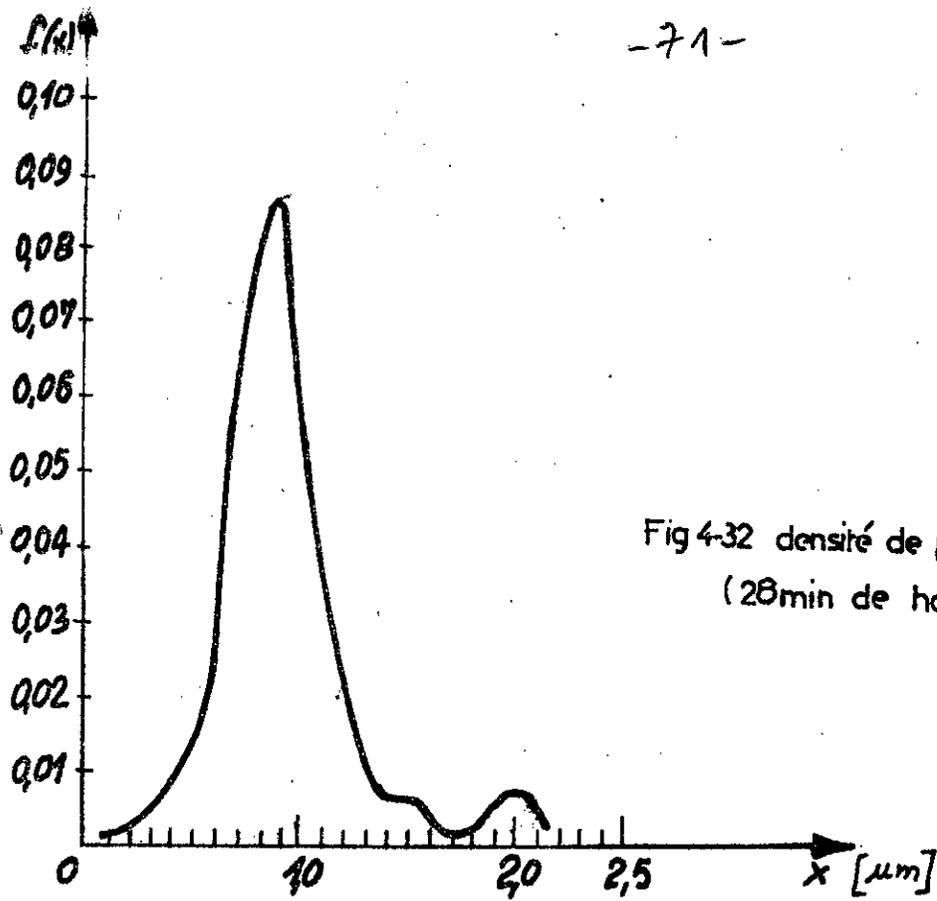


Fig 4-32 densité de probabilité
(28min de honing)

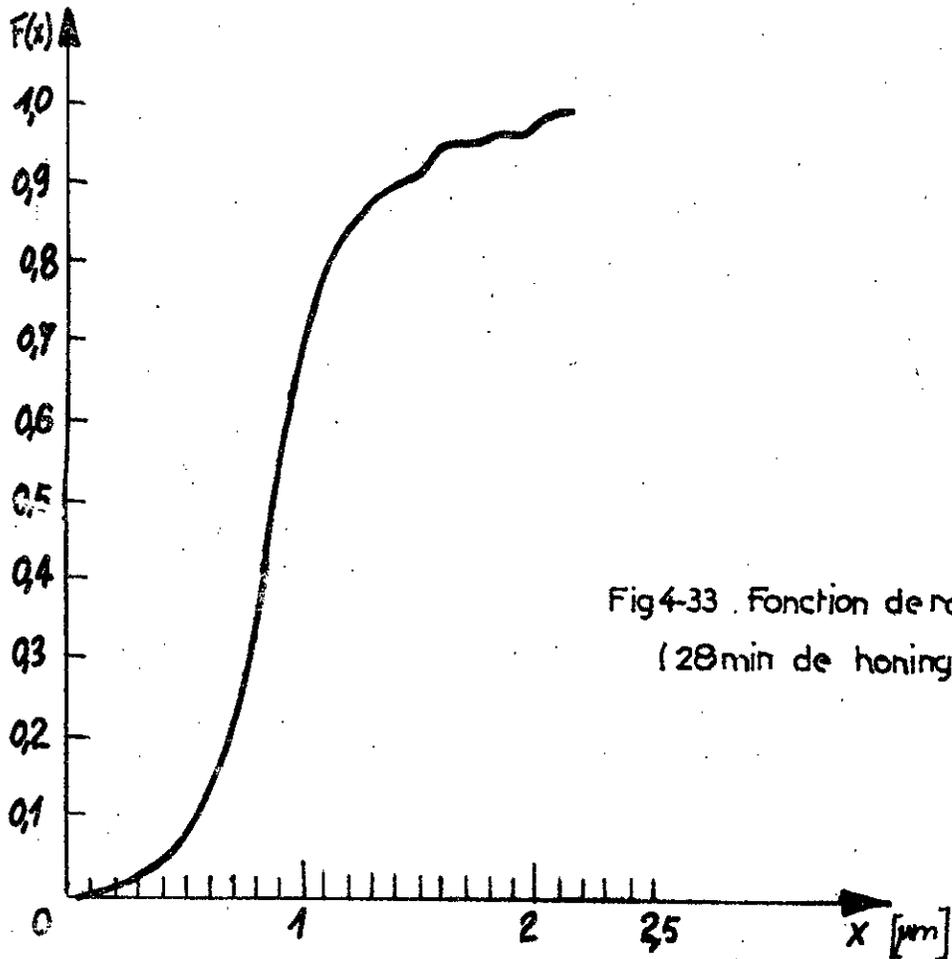


Fig 4-33 . Fonction de répartition
(28min de honing)

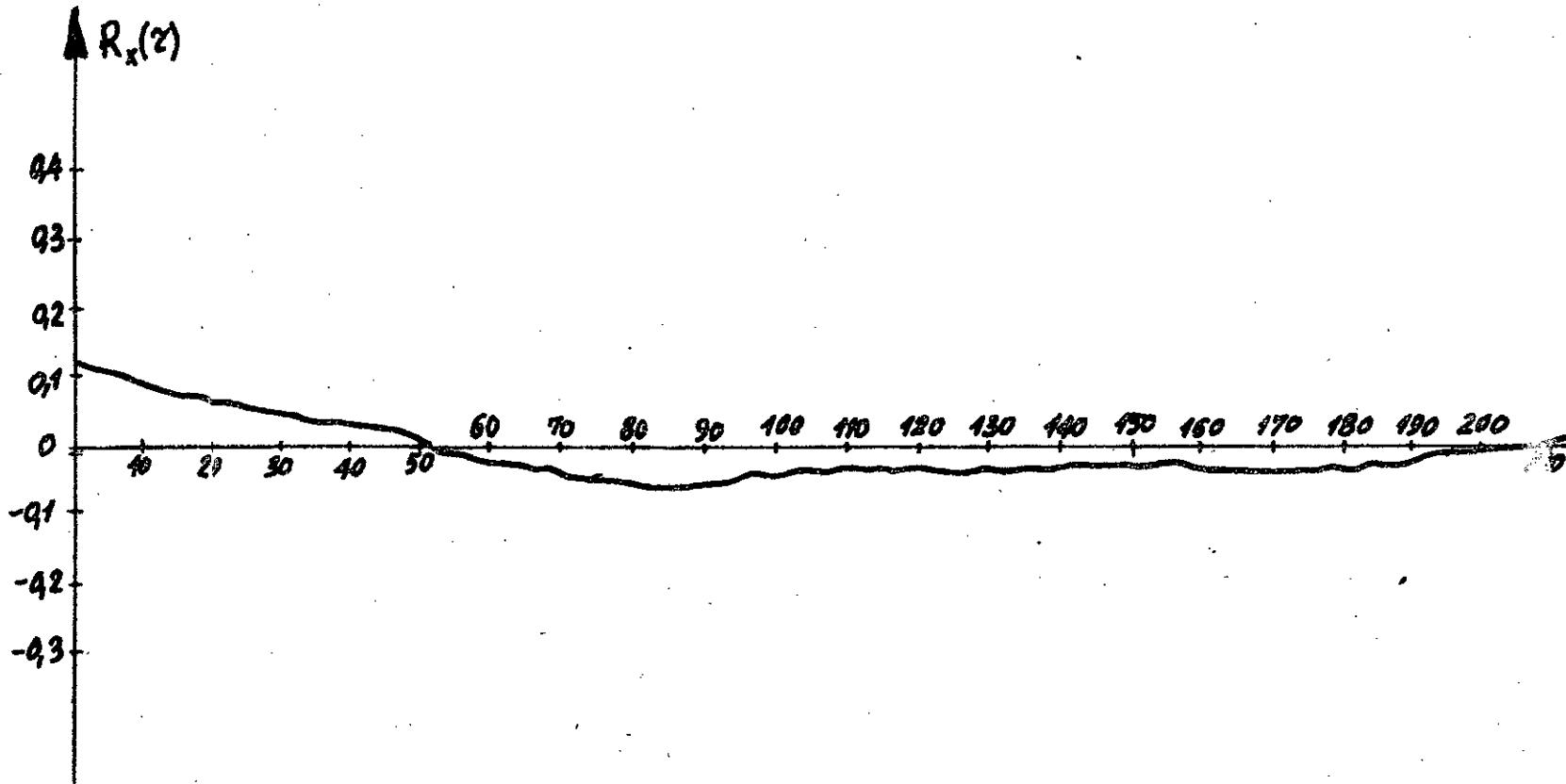
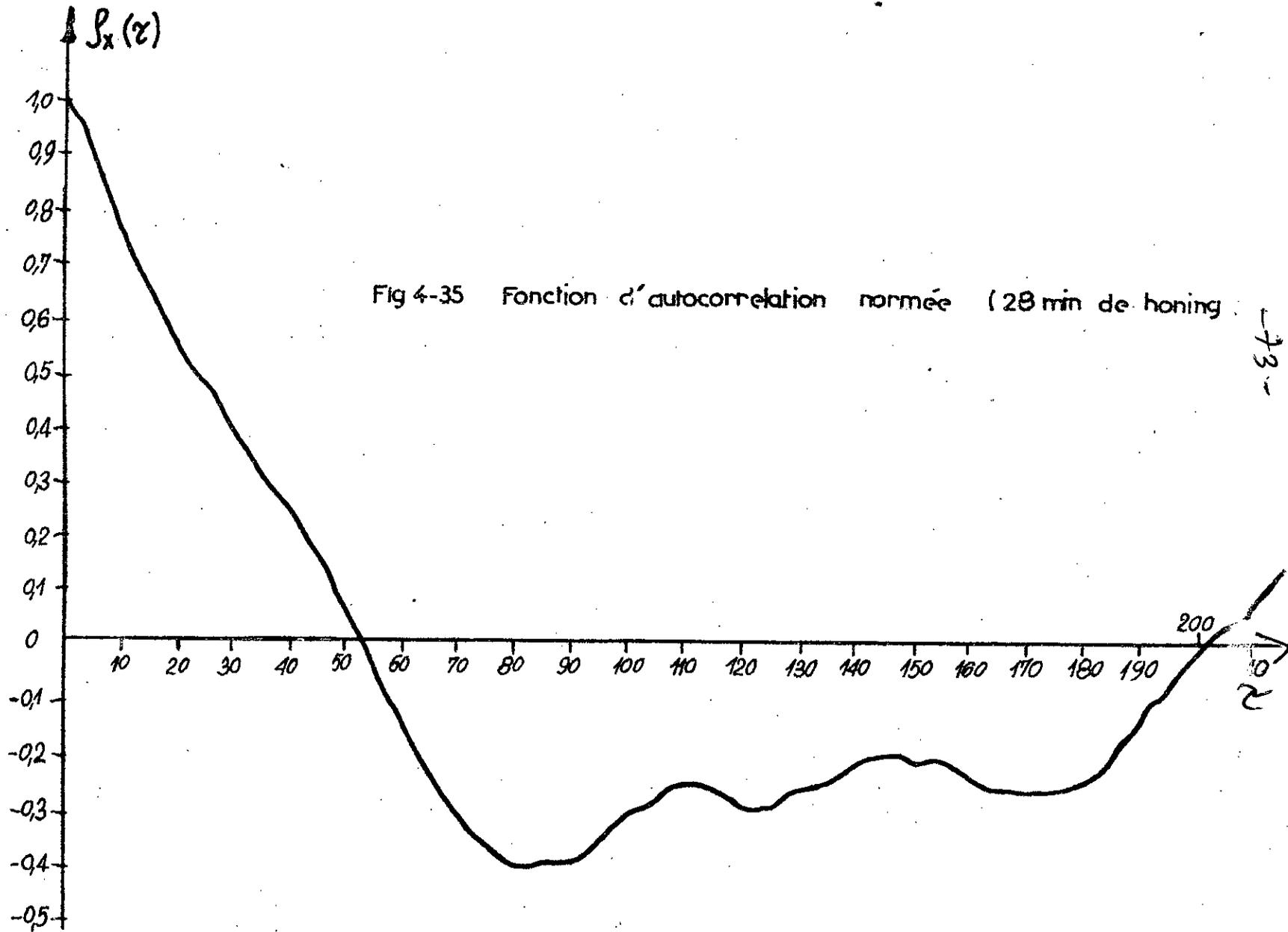


Fig 4-34 Fonction d'autocorrelation (28min de honing)



-74-

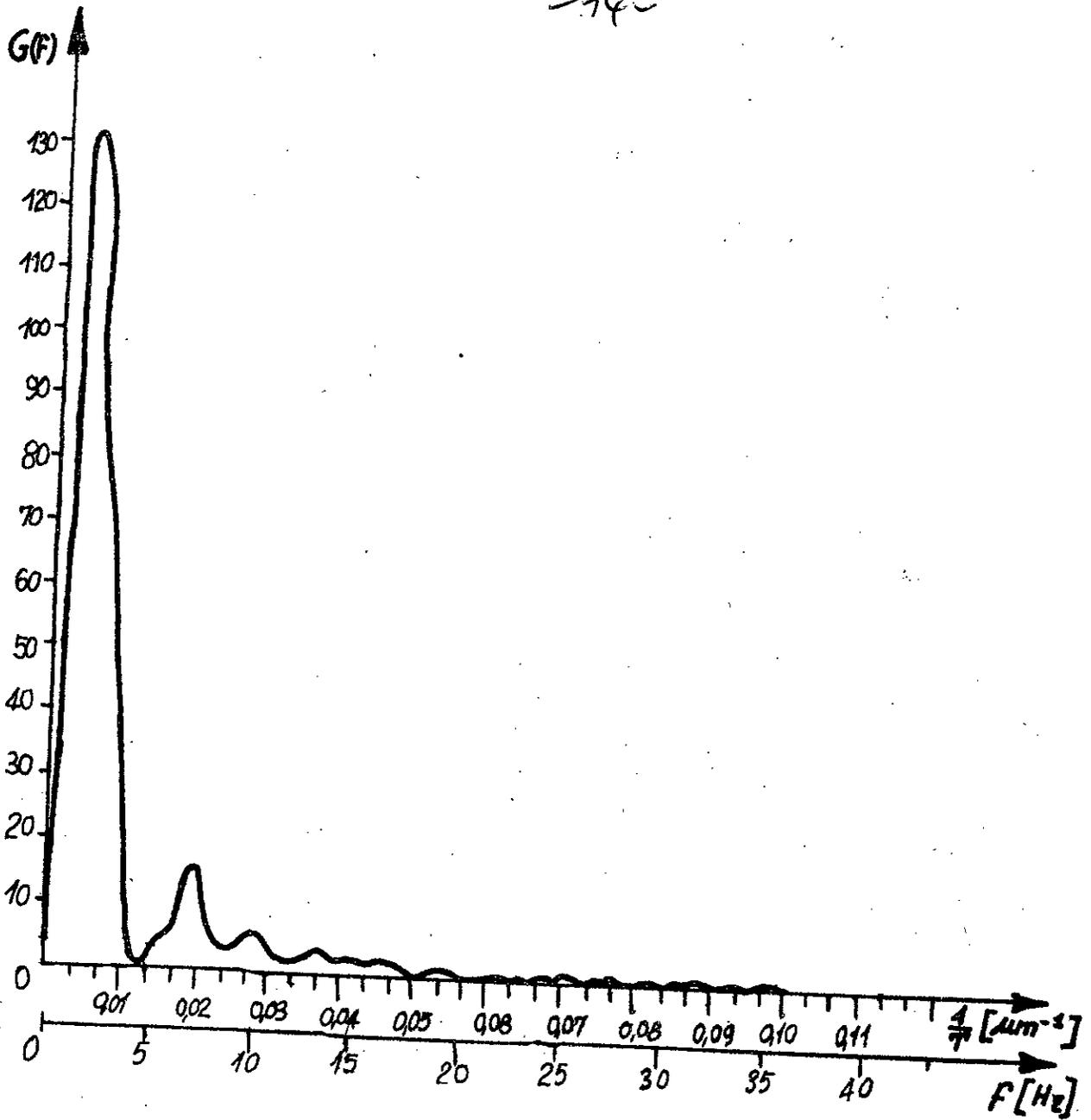


Fig 4-36 Fonction densité spectrale (28 min de honing)

4-3 Résultats et propositions.

L'étude d'un état de surface à l'aide des critères classiques (R_a , R_z , R_p , etc....) ne nous donne pas des renseignements suffisants sur un profil. Ils ne rendent pas compte des variations locales de hauteur de la surface, et ne donnent aucune indication sur la répartition spatiale des irrégularités topographiques.

L'utilisation de l'analyse mathématique de l'état géométrique de surface permet de donner avec des proportions bien appréciées, le caractère régulier ou aléatoire d'une surface. Grâce à elle, on peut voir que, dans un profil même aléatoire, il peut exister une certaine régularité et vis-versa.

On peut utiliser cette analyse mathématique des états de surfaces pour la détermination des vibrations dans une machine. Pour cela, on peut quand la machine est neuve, usiner une pièce qu'on appellera pièce de référence. Cette pièce étant usinée avec une machine neuve, n'a été soumise qu'à un minimum de vibrations. Quand on veut faire une révision à la machine ou un examen d'entretien, on usinera une pièce du même type que notre pièce de référence avec les mêmes conditions d'usinage. L'analyse des deux fonctions densité spectrales, nous donnera des informations sur les vibrations qui peuvent exister.

Dans le cas d'un lot de pièces, on pourra aussi utiliser cette analyse pour le choix des pièces ayant un état de surface acceptable et les pièces qu'il faut rejeter. Pour cela, on se fixera une pièce de référence ou pièce étalon. Toutes les pièces du lot seront comparées à cette pièce. On introduit les données de la pièce étalon dans un ordinateur où elles seront comparées aux données de chaque pièce du lot en se fixant évidemment un certain coefficient de corrélation minimum admissible. On utilisera pour

cela les fonctions d'intercorrelations, pour compléter cette méthode, a été développé à l'I.R.S.I.D (Institut de Recherche de la Sidérurgie Française) un nouveau type de traitement de données topographiques, basé sur l'utilisation de la Morphologie Mathématique, et mise en oeuvre au moyen d'un analyseur de textures.

Une caractérisation tridimensionnelle de la surface est possible par analyse morphologique de coupes horizontales successives : extractions des sommets et des fonds, des zones du plan de pentes donnée,....suivie d'une caractérisation quantitative de leur répartition spatiale.

C O N C L U S I O N

==o'o==

Ce modeste travail illustre les grandes lignes d'une méthode utilisée pour l'analyse de surfaces qui est l'analyse mathématique. L'étude complète demanderait beaucoup de temps, et c'est pour cela que j'ai été amené à ne pas rentrer trop dans les détails. Néanmoins, je pense que mon travail constituera une base de départ pour les futurs étudiants qui auront à se pencher sur le problème des états de surfaces qui est encore peu connu.

Je souhaite qu'une étude soit faite sur l'application de la Morphologie Mathématique à l'analyse des états de surfaces.

B I B L I O G R A P H I E

==oOo==

- M. BALAZINSKI . Praca Doktorska A.G.H. 1977 (Thèse Doctrorat)
KRAKOWIE POLOGNE
- J. BASS Eléments de calcul des Probabilités.
2e et 3e 2dition PARIS, MASSON
- BLANC LAPIERRE Modèle Statistique pour l'Etude de Phénomènes
(André) de Fluctuations
PARIS , MASSON Cie 1963
- St.ENACHE La qualité des surfaces usinées
DUNOD, PARIS 1972
- Z.GADEK Praca Dyplomowa (thèse d'ingénieur)
KRAKOWIE 1979 POLOGNE
- J.KREHEL Praca Dyplomowa (thèse d'ingénieur)
KRAKOWIE 1981 POLOGNE
- D.JEULIN Caractérisation microgéométrique des
P.JEULIN surfaces rugueuses au moyen de l'analyseur
de texture - I.R.S.I.D (FRANCE)
MES.RE 85/ Novembre 1981
Prospectus Hommelwerke
- JULIUS S. BENDAT Méthody analizy ipomiaru
ALLAN G. PIERSOL Sygnałow losowych P.W.N WARSZAWA 1976 r.

