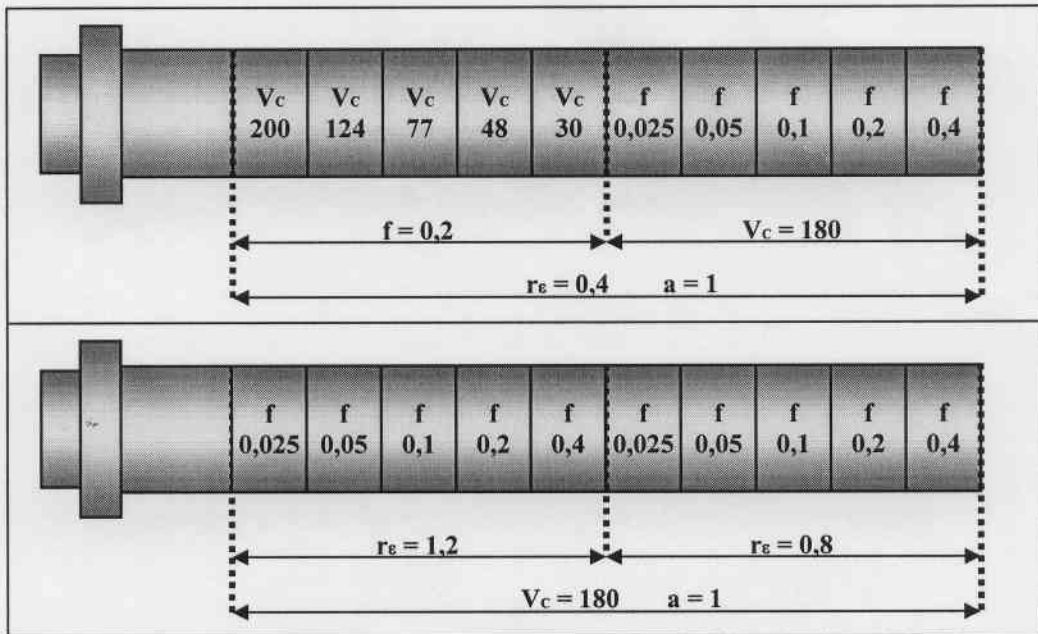


RUGOSITE

DES

SURFACES USINEES



Influence de la vitesse de coupe

$f = 0,20$ mm/tr

$a = 1,00$ mm

$r = 0,40$ mm

dia =

n° surf	Vc m/min	N tr/min	Génératrice 1		Génératrice 2		Génératrice 3		Rt th	Remarques
			Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz		

Influence de l'avance et du rayon d'outil

$V_c = 180$ m/min

$a = 1,00$ mm

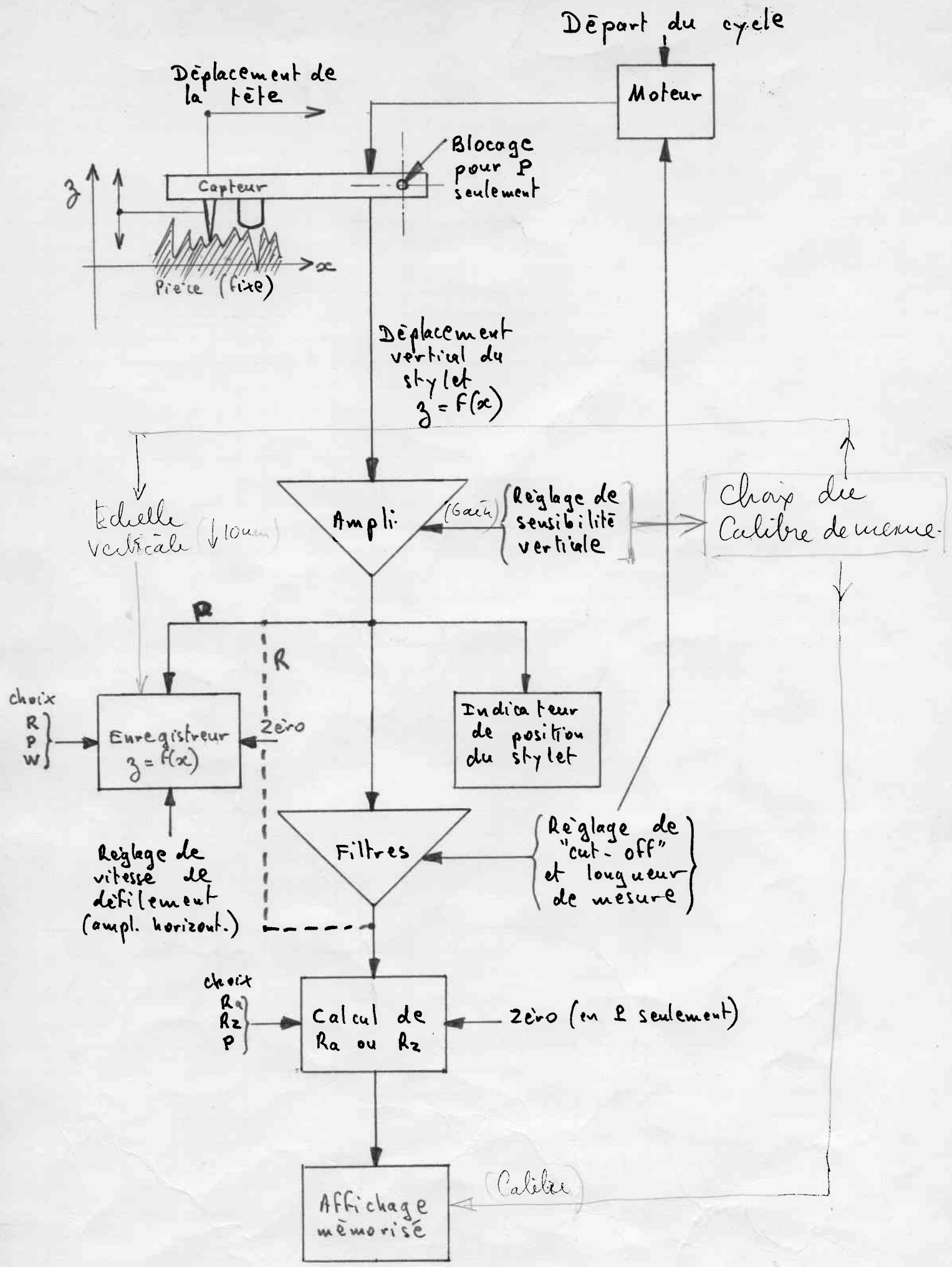
dia =

N =

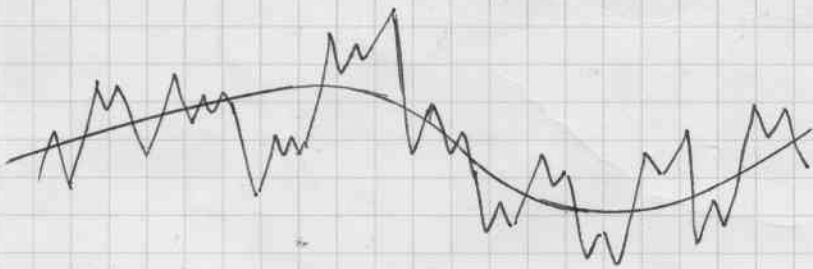
n° surf	r mm	f mm/tr	Génératrice 1		Génératrice 2		Génératrice 3		Rt th	Remarques
			Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz		
	0,4	0,4								
		0,2								
		0,1								
		0,05								
		0,025	0,64	3,05						

n° surf	r mm	f mm/tr	Génératrice 1		Génératrice 2		Génératrice 3		Rt th	Remarques
			Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz		
1	0,8	0,4	6,3	8,4	6,3	8,4			25	
2		0,2	0,85	2,1	0,9	2,1			6,25	
3		0,1	0,7	1,8	0,8	2,05			1,56	
4		0,05	0,4	1	0,7	1,9	0,4	0,1	0,39	
5		0,025	0,5	1	0,45	1			0,1	

n° surf	r mm	f mm/tr	Génératrice 1		Génératrice 2		Génératrice 3		Rt th	Remarques
			Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz		
1	1,2	0,4	5	6,8	4,5	6	4,5	6,1	16,7	
2		0,2	1,4	2,4	1,4	2,3			4,17	
3		0,1	1,5	2,05	1,5	2,1			1,04	
4		0,05	1,5	2,5	1	2,2	1	2,05	0,26	
5		0,025	0,9	2,2	0,9	2,05			0,065	



RUGOSITÉ



P Profil réel

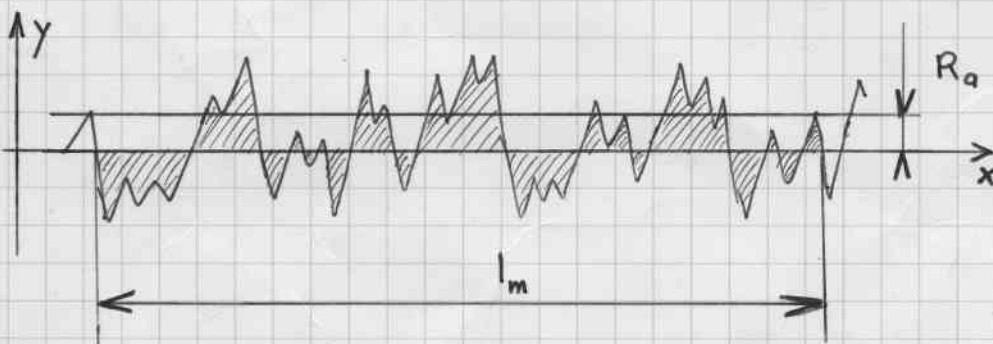


R Rugosité

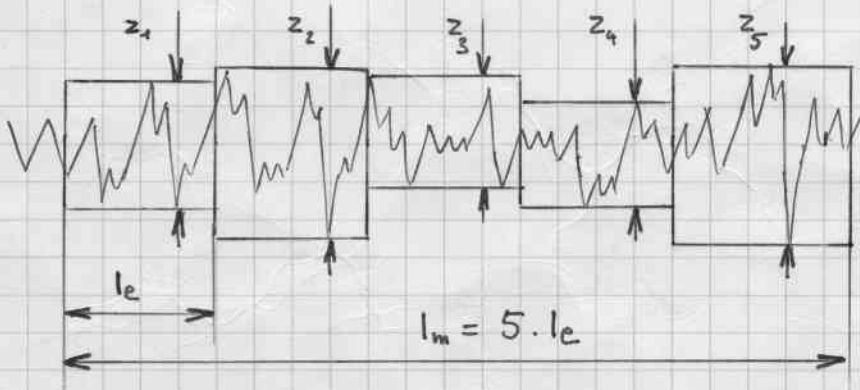


W Ondulation

Critères de rugosité:



$$R_a = \frac{1}{l_m} \cdot \int_0^{l_m} |y| \cdot dx$$



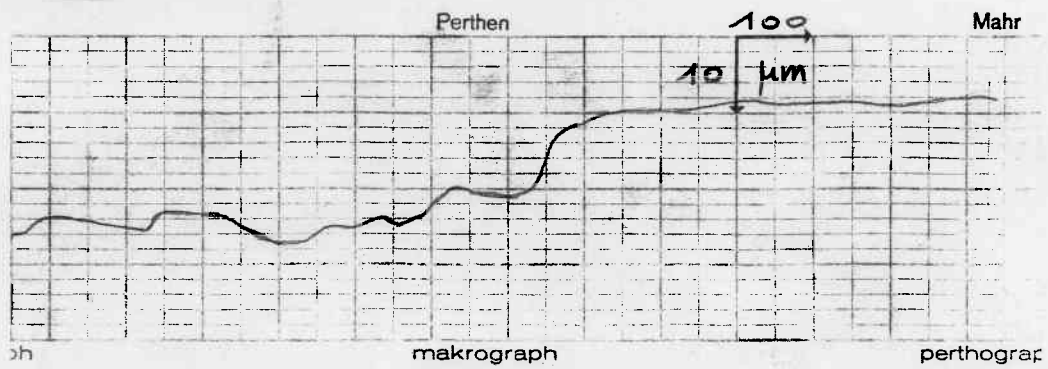
$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 z_i$$

EXEMPLE DE FILTRAGES

Profils enregistrés sur le même échantillon de surface plane (en première approximation).

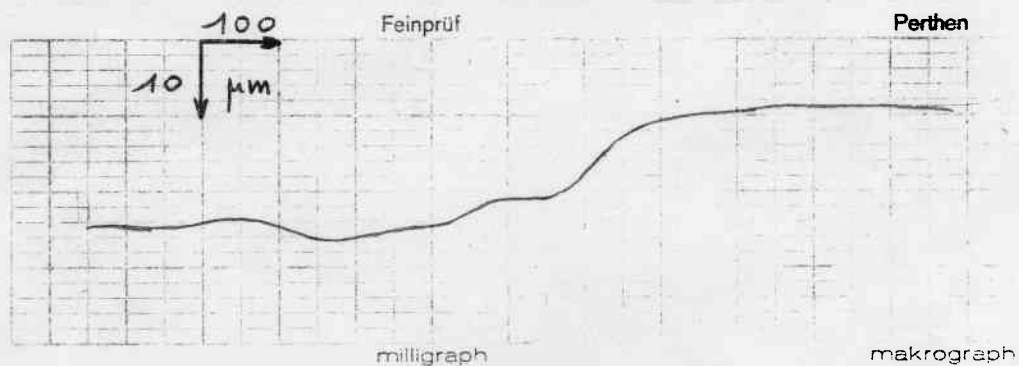
1 - Profil complet

- . Pas de filtrage
- . Obtenu sur la position P de l'enregistreur.



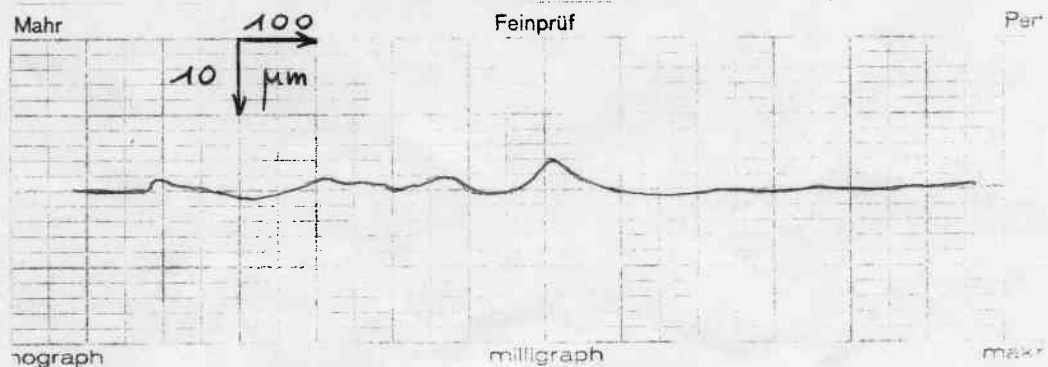
2 - Profil d'ondulation

- . Filtrage passe-bas : les composantes de grande longueur d'onde du signal sont conservées. (Longueur d'onde limite 0,25 mm).
- . Obtenu sur la position W de l'enregistreur.



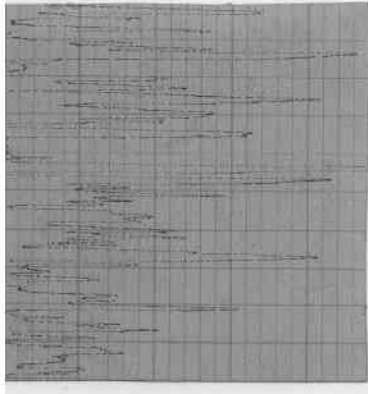
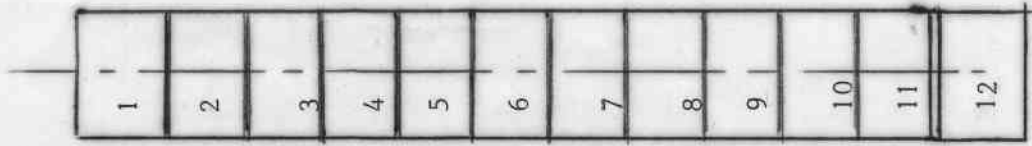
3 - Profil de rugosité

- . Filtrage passe-haut : les composantes de faible longueur d'onde du signal sont conservées. (Longueur d'onde limite identique au filtrage précédent : 0,25 mm).
- . Obtenu sur la position R de l'enregistreur.

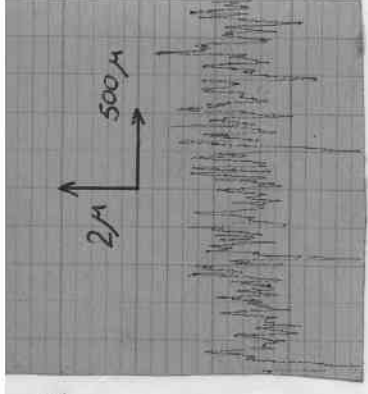


$\rightarrow V_c$ croissant
 (50; 100; 150; 200) 1
 $\rightarrow S$ croissant
 (0,075; 0,15; 0,2)

VALEURS DE
 REFERENCE DE LA
 RUGOSITE Ra



72 rus



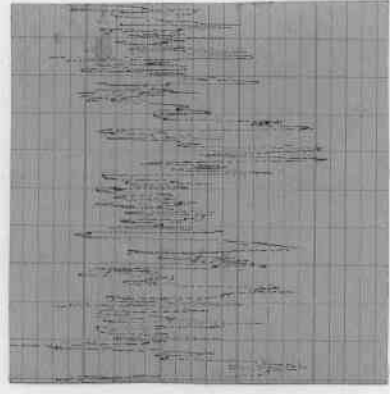
24 rus



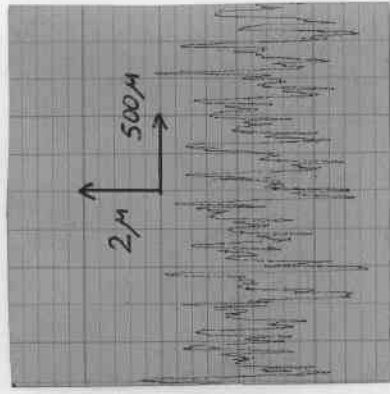
21 rus



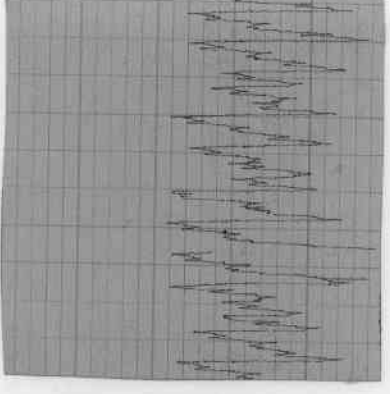
26 rus



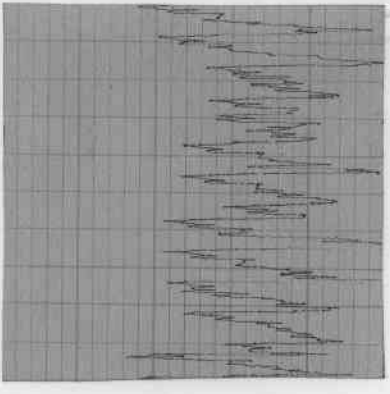
44 rus



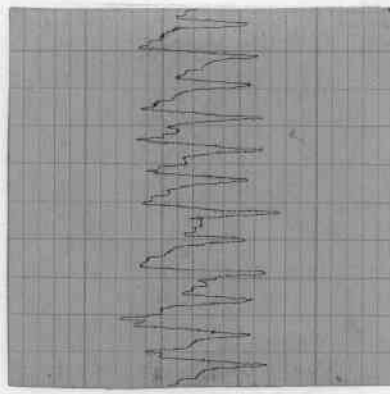
37 rus



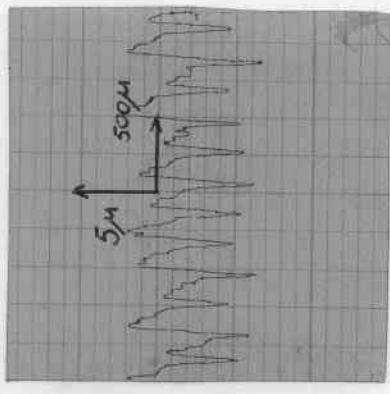
36 rus



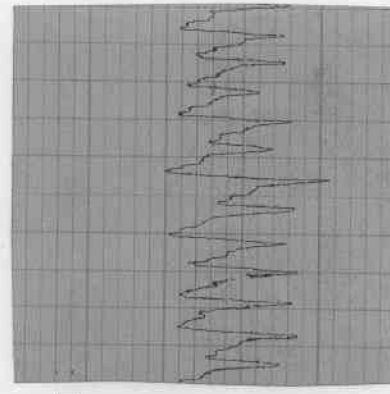
45 rus



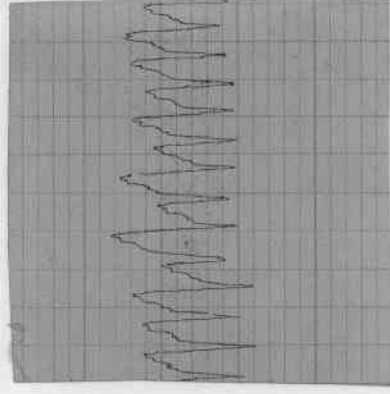
80 rus



68 rus



70 rus



66 rus

PIECE ETALON

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE

1.1. Définition des états de surface

L'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée dépend d'un ensemble de facteurs parmi lesquels les défauts de surface jouent un rôle important. Parmi ces défauts, certains sont de nature géométrique, autrement dit se traduisent par des écarts entre la géométrie de la pièce réalisée et celle représentée sur les dessins, d'autres sont de nature physico-chimique, autrement dit résultent des diverses caractéristiques de la couche superficielle du matériau usiné (structure et texture cristalline, etc.). Nous ne nous intéresserons ici qu'aux défauts géométriques de surface et à leur influence sur le comportement de la pièce en service.

a) *Principaux défauts de surface* (classement par nature)
Ils sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre par la norme NF 05-015 (cf. fig. 1 et tabl. I).

b) *Principaux critères d'états de surface*

La norme NF 05-015 en définit 18 et distingue :

- les critères physiques, obtenus généralement par évaluation graphique,
- les critères statistiques, obtenus principalement par évaluation électronique.

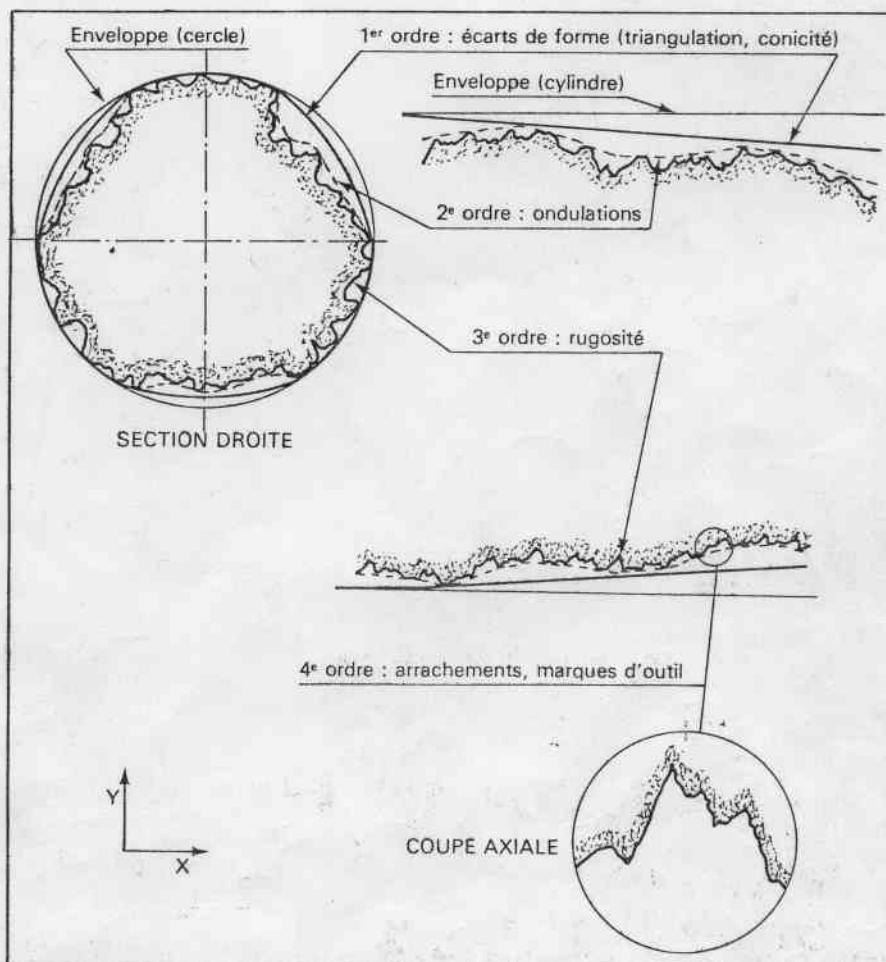


Fig. 1. Défauts de surface classés par nature. (D'après *Les techniques de l'ingénieur*, B 1620, série R).

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE

N° d'ordre	Désignation	Signification (*)	Origine des écarts (*)		Moyens d'évaluation (*)	
			Procédé d'usinage, matériau	Machine, installation	Surface	Profil
1	Ecart de forme et de position (rectitude, parallélisme).	<ul style="list-style-type: none"> Influent sur : <ul style="list-style-type: none"> frottement de glissement et de roulement. résistance au mâtage. étanchéité dynamique et statique. résultat des mesurages. etc. Créent : <ul style="list-style-type: none"> usure, grippage. 	<ul style="list-style-type: none"> Déformation de la pièce : <ul style="list-style-type: none"> pendant l'usinage, indépendamment du procédé, après l'usinage, dépendant du matériau (libération des tensions internes). 	<ul style="list-style-type: none"> Défaut de bridage. Flexion des éléments de la machine. Qualité du guidage des éléments coulisants. Usure des organes. 	<ul style="list-style-type: none"> Portée au marbre. Tampon. Bague. etc. 	<ul style="list-style-type: none"> « Palpage » en discontinu : <ul style="list-style-type: none"> lunette autocollimatrice. comparateur. machine à mesurer, etc. « Palpage » en continu : <ul style="list-style-type: none"> appareil électronique à capteur (palpeur-touche ou aiguille). boîte à lumière. etc.
		2	Ondulation (périodique)	<ul style="list-style-type: none"> Diminuent : <ul style="list-style-type: none"> durée de vie des organes, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Fraisage (pas de l'ondulation = avance par tour de fraise). Inclinaison de la fraise (en bout) : <ul style="list-style-type: none"> mauvais affûtage, mauvais réglage des dents (en bout, en roulant). Rectification : mauvais diamantage de la meule. 	<ul style="list-style-type: none"> Vibrations de basses fréquences : <ul style="list-style-type: none"> de la pièce, de l'outil, des deux, mauvais guidage et équilibrage des éléments de machine, et également à l'insuffisance de l'installation de l'isolation passive et active.
3	Rugosité	<ul style="list-style-type: none"> Influent sur : <ul style="list-style-type: none"> écoulement des fluides. étanchéité dynamique et statique. revêtement (peinture). dépôt électrolytique résistances aux efforts alternés. etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Procédé par enlèvement de copeaux : stries, sillons, dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil ; à l'avance par tour de la pièce ou de la meule, etc. Géométrie d'affûtage de l'outil : qualité de la meule Qualité d'affûtage de l'outil et du diamantage de la meule Hétérogénéité, plasticité du matériau usiné (fonte, aluminium à forte teneur en silicium). 	<ul style="list-style-type: none"> Vibrations de hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus). Installation de lubrification : <ul style="list-style-type: none"> lubrifiant : nature, qualité lubrifiante, action de refroidissement, stabilité dans le temps. mode d'arrosage. filtre : efficacité du système (entre autres, fréquences de nettoyage). 	<ul style="list-style-type: none"> Echantillon de comparaison visotactile : estimation de la rugosité. Rugosimètre : <ul style="list-style-type: none"> pneumatique. capacimétrique. Divers appareils optiques. Microscope stéréoscopique. Microscope électronique. 	<ul style="list-style-type: none"> Microscope à coupe optique. Microscope interférentiel. Appareil électronique à capteur : palpeur-aiguille.
Somme des écarts du 1 ^{er} au 4 ^e ordre	Profil total	Il ne sert à rien d'affiner la rugosité si l'écart de forme et l'ondulation ne sont pas réduits au niveau admissible pour une fonction donnée.	Origines diverses mentionnées ci-dessus. Leur identification (et évaluation) devra être accompagnée de mesures d'autres grandeurs physiques (température, vibration, vitesse, accélération, etc.) permettant l'analyse de la relation de cause à effet en cas de perturbations dans la réalisation d'état géométrique d'un produit donné.	Diverses méthodes chimiques permettant de déterminer la surface totale d'échantillons d'études.	Appareil électronique à capteur : palpeur-aiguille (longueur d'évaluation ≥ 25 mm).	

(*) Cette énumération n'est pas limitative : elle est donnée à titre d'exemple.

TABLEAU I. Classement des principaux défauts de surface, selon la norme NF 05-015

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE

En ce qui concerne les critères de rugosité (ordres 3 et 4 de la norme et du tableau I), les plus connus (cf. fig. 2) sont les suivants :

• Critères physiques :

R_t = profondeur totale ou écart total de la rugosité (distance entre le point le plus haut et le point le plus bas)

R = profondeur moyenne ou amplitude moyenne de la rugosité

R = moyenne des $R(x)$.

• Critères statistiques :

R_a = écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne de la rugosité (en anglais CLA).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |h(x)| dx$$

Rappelons que le critère américain RMS, fréquemment rencontré n'est pas normalisé en France. Il représente l'écart moyen géométrique par rapport à la ligne moyenne et s'écrit :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L h^2(x) dx}$$

c) Relations pratiques :

$40 \mu\text{in} = 1 \mu\text{m}$ $RMS \approx R \times 1,11$ $R_t \approx R_a \times \begin{cases} 5 \\ \text{à} \\ 10 \end{cases}$
--

Remarques :

• La valeur du coefficient reliant R_a et R_t dépend du mode d'usinage et de la qualité de la surface. En règle générale, on admet :

— pour $R_a > 10 \mu\text{m}$: $R_t \approx R_a \times 5$

— pour $R_a < 1 \mu\text{m}$: $R_t \approx R_a \times 10$

• La liaison entre R et R_a (ou R_t) est difficile à établir, comme le montre la figure 3.

Dans la suite de cette série d'articles, les critères utilisés seront R_a et R_t .

1.2. Fonctions et états de surface

La prescription d'une qualité de surface par l'agent du bureau d'études doit tenir compte de la fonction que la surface est appelée à remplir (assemblage, frottement, étanchéité...). En dehors de quelques règles issues de l'expérience et des résultats de quelques recherches portant sur des domaines limités, il n'existe pratiquement pas de relations entre la topologie des surfaces et la fonction des pièces.

Pour combler cette lacune, il faudrait pouvoir, sur un très grand nombre de pièces industrielles :

- caractériser entièrement les états de surfaces,
- étudier les relations entre ces mesures et les performances des pièces en utilisation.

Les indications que nous donnons ci-après sont extraites de la littérature technique internationale.

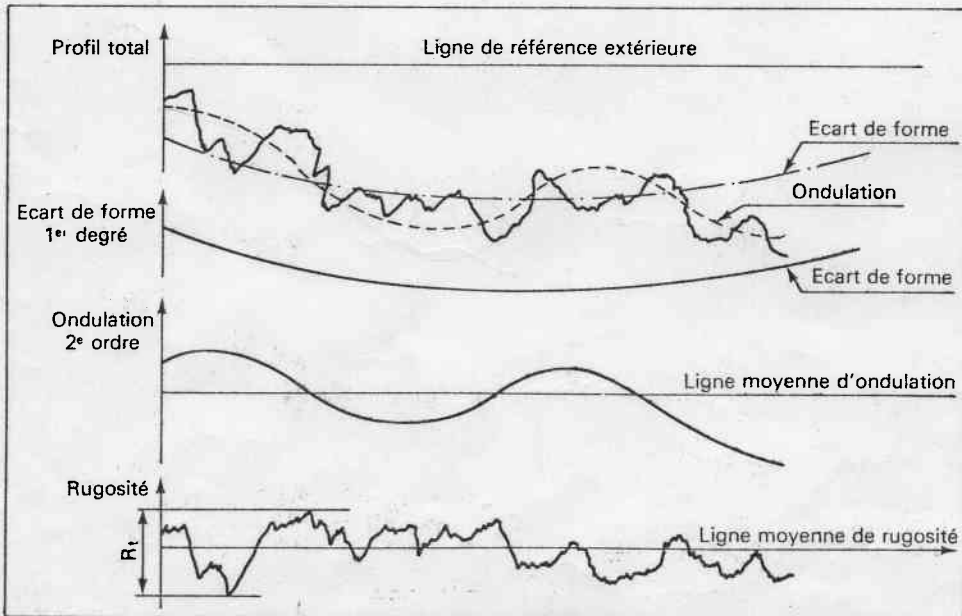


Fig. 2.

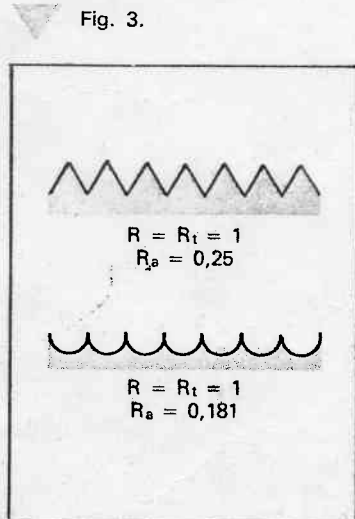


Fig. 3.

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE

1.2.1. Tolérances et états de surface

En règle générale, on recommande pour la rugosité totale les valeurs suivantes :

- pour les tolérances supérieures à $10 \mu\text{m}$: $R_t \approx \frac{\text{tolérance}}{2}$
- pour les tolérances inférieures à $10 \mu\text{m}$: $R_t \approx \frac{\text{tolérance}}{4}$

Le tableau II donne les valeurs d'états de surface conseillées, en fonction de la qualité dimensionnelle spécifiée.

1.2.2. Exemples de fonctions et d'états de surface requis

Le tableau III donne les valeurs d'états de surface requis selon les fonctions auxquelles sont destinées les pièces.

1.2.3. Spécification des états de surface sur les dessins

La norme NF E 05-016 supprime les signes de façonnage (∇ , $\nabla\nabla$, ..., voir tabl. IV) et les remplace par un signe où figurent :

- la fonction de la surface,
- le (ou les) symbole(s) et valeur(s) numérique(s) du (ou des) critère(s) choisi(s),
- le procédé d'élaboration,
- éventuellement des spécifications complémentaires.

Toutes les indications ne sont pas obligatoires.

Le tableau V présente un résumé de cette norme.

Diamètre nominal \varnothing (mm)	Qualité ISO				
	5-6 (*)	6-7 (*)	7-8 (*)	8-9 (*)	9-10 (*)
1-3	0,20-0,32	0,32-0,63	0,50-0,80	0,63-1,00	1,25-2,00
3-6	0,25-0,40	0,40-0,63	0,63-1,00	0,80-1,25	1,6 -2,5
6-10	0,32-0,50	0,50-0,80	0,80-1,25	1,00-1,0	2,0 -3,2
10-18	0,40-0,63	0,63-1,00	1,00-1,60	1,25-2,0	2,5 -4,0
18-30	0,40-0,80	0,80-1,25	1,25-2,00	1,6 -2,5	3,2 -5,0
30-50	0,50-0,80	1,00-1,60	1,25-2,00	1,6 -2,5	4,0 -5,0
50-80	0,63-1,00	1,00-1,60	1,6 -2,5	2,0 -3,2	4,0 -6,3
80-120	0,63-1,00	1,25-2,00	2,0 -3,2	2,5 -4,0	5,0 -6,3
120-180	0,80-1,25	1,25-2,00	2,5 -3,2	2,5 -4,0	6,3 -8,0
180-260	1,00-1,60	1,6 -2,5	2,5 -4,0	3,2 -5,0	6,3 -10
260-360	1,00-1,60	1,6 -2,5	3,2 -5,0	3,2 -5,0	8,0 -12,5
360-500	1,25-2,00	2,0 -3,2	3,2 -5,0	4,0 -6,3	10,0-12,5

(*) Le premier nombre correspond à la qualité des arbres, le deuxième à la qualité des alésages.

TABLEAU II. Rugosité R_a (μm) recommandée pour les surfaces de contact en fonction des dimensions et de la précision dimensionnelle. (D'après S. Enache. — La qualité des surfaces usinées, Dunod 1972).

Remarque : Dans le cas des faibles diamètres, la rugosité moyenne conseillée dans le tableau est inférieure au μm (exemple 10 h 6). Dans la pratique, la rugosité demandée par les bureaux d'études et couramment réalisée est supérieure à cette valeur.

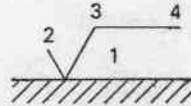
Industrie : pièce et fonction	Rugosité demandée	Inconvénients techniques liés à un état de surface trop fin
Automobile : tôles pour carrosseries	$R_a = 0,9$ à $1,3 \mu\text{m}$ (aspect, adhérence peinture)	$R_a < 0,5 \mu\text{m}$: soudure à froid des tôles
Paliers de moteurs électriques	$R_a = 0,3$ à $0,5 \mu\text{m}$	$R_a < 0,3 \mu\text{m}$: mauvaise lubrification et usure
Contacteurs électriques	$R_a \approx 0,3 \mu\text{m}$ Si $R_a > 0,3$, usure rapide (brûlure)	$R_a < 0,3 \mu\text{m}$: l'adaptation des deux surfaces du contacteur ne peut se faire (usure initiale)
Alimentation — Cylindres échangeurs de chaleur — Joints d'étanchéité carbure	$R_a = 0,2 \mu\text{m}$ + chromage + lustrage — éviter les collages — résister à l'abrasion des racleurs $R_a = 0,3 \mu\text{m}$	
Mesure : — Palpeurs à air (buse) — Glissières à cousin d'air — Cales	$R_a = 0,8 \mu\text{m}$: une rugosité supérieure introduit une erreur de mesure $R_a = 0,025$ à $0,05 \mu\text{m}$ $R_a = 0,0075$ à $0,0125 \mu\text{m}$	
Médecine : — Pompes pour respirateur de couveuse — Pistons avec joint teflon	$R_a = 0,1$ à $0,2 \mu\text{m}$ $R_a > 0,2 \mu\text{m}$: usure rapide du joint	$R_a < 0,1 \mu\text{m}$: frottement entre le joint et le cylindre, échauffement, soudure

TABLEAU III. Exemples de fonctions et d'états de surface requis.

Signe de façonnage	Valeur de R_a (μm)
∇	$> 12,5$
$\nabla\nabla$	6,3 à 12,5
$\nabla\nabla\nabla$	1,6 à 6,3
$\nabla\nabla\nabla\nabla$	$< 1,6$

TABLEAU IV. Correspondance des anciens signes de façonnage avec les valeurs de rugosité R_a (valeurs approximatives).

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE



- 1) Abréviations des fonctions.
- 2) Symboles et valeurs numériques du ou des critères choisis (R_a , R_p , R_t , etc.).
- 3) Abréviations du procédé d'élaboration.
- 4) Spécification complémentaire donnant lieu à des notes repères.

Abréviations des différentes fonctions

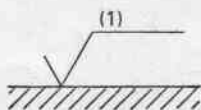
Surface	Avec déplacements relatifs					Avec assemblage fixe			Sans contrainte			Avec contraintes	
Fonction	Frottement de glissement	Frottement de roulement	Résistance au matage	Frottement fluide	Étanchéité dynamique	Étanchéité statique	Ajustement fixe avec contraintes	Adhérence (collage)	Revêtement (peinture)	Dépôt électrolytique	Mesure	Résistance aux efforts alternés	Outils coupants (arête)
Abréviations	FG	FR	RM	FF	ED	ES	AC	AD	RE	DE	ME	EA	OC

Abréviations des procédés d'élaboration

Procédé d'élaboration	Alésage	Brochage	Fraisage		Lamage	Perçage	Pierrage	Rabotage	Rectification		Rodage	Tournage	Étincelage	Electro-érosion	Polissage	Superfinition	Sablage	
			en bout	en roulant					plane	cylindrique							à sec	humide
Abréviations	al	br	frb	frr	lm	pe	pi	rb	rcp	rcc	rd	to	éi	ée	po	sf	sas	sah

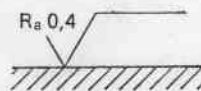
Procédé d'élaboration	Dressage	Grattage	Meulage	Sciage	Découpage	Electro-formage	Electro-polissage	Grenail-lage		Estampage	Étirage	Filetage	Forgeage	Galetage	Laminage		Moulage		Matricage
								sphérique	angulaire						à froid	à chaud	sable	coquille	
Abréviations	dr	gr	me	sc	de	ef	ep	gns	gna	es	et	fl	fo	ga	laf	lac	mos	moc	ma

Exemples :

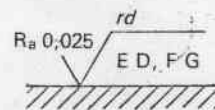


Cas simple sans exigence particulière.

(1) nota : brut de fonderie etc.



Critère d'état de surface R_a .



Critère d'état de surface R_a .

Fonctions : — étanchéité dynamique,
— frottement de glissement

Usinage : rodage.

TABLEAU V. Spécification de l'état de surface sur les dessins (d'après NF E06-016).

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE

1.3. Choix du procédé d'usinage en fonction de l'état de surface exigé

Il est indispensable, lors du choix d'un état de surface, de définir la qualité techniquement nécessaire et suffisante et d'éviter de demander une qualité supérieure inutile. En effet, le coût d'obtention d'un état de surface s'accroît lorsque le degré de finition exigé augmente.

La figure 4 montre l'évolution des temps de production en fonction de la rugosité demandée. Le tableau VI présente, en fonction du mode de production, les états de surface généralement obtenus.

TABEAU VI.
Techniques de fabrication et états de surface.

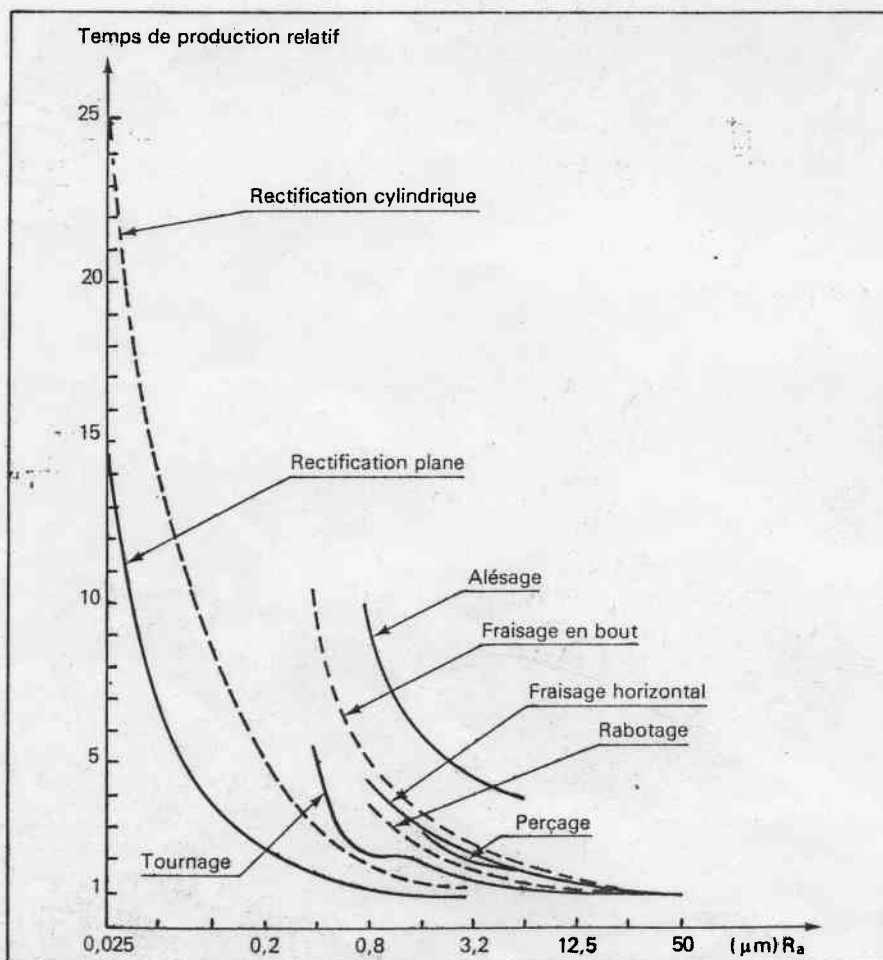


Fig. 4. Temps relatifs d'obtention des états de surface en fonction du mode d'usinage et de la qualité exigée (D'après M. P. Rubert. — Comparator scales aid surface finish selection and control, *Metalworking Production*, 10 juin 1964).

1. LES ÉTATS DE SURFACE EN MÉCANIQUE

Méthode d'usinage		Profondeur de rugosité R _r (µm)																					
Groupe	Désignation	0.1	0.18	0.25	0.4	0.6	1	1.8	2.5	4	6.3	10	16	25	40	63	100	180	250	400	630	1000	
Fonderie	Fonte au sable																						
	Fonte en coquille																						
	Fonte fine																						
Forgeage	Forge libre																						
	Estampage																						
	Forge de précision																						
Laminage	Laminage à chaud																						
	Laminage à froid																						
Tréfilage	Tréfilage normal																						
	Tréfilage de précision																						
Emboutissage	Compression																						
	Matricage																						
Galetage	Galetage																						
	Roulage																						
Limage	Ebauche																						
	Finition																						
	Superfinition																						
Rabotage	Dégrossissage																						
	Ebauche																						
	Finition																						
Tournage (extérieur et intérieur)	Tournage dégrossissage																						
	Tournage d'ébauche																						
	Tournage de finition																						
	Tournage de précision avec carbure																						
	Tournage de haute précision avec diamant																						
Chambrage	Chambrage																						
Alésage par alésoir	Alésage normal																						
	Alésage de précision																						
	Alésage de haute précision																						
Fraisage	Fraisage d'ébauche																						
	Fraisage de finition																						
	Fraisage de précision																						
	Fraisage de haute précision																						
Brochage	Brochage normal																						
	Brochage de précision																						
Grattage	Grattage 1 à 3 point/cm ²																						
	Grattage 3 à 5 points/cm ²																						
Rectification	Rectification d'ébauche																						
	Rectification normale																						
	Rectification de précision																						
	Rectification de haute précision																						
Honing	Honing																						
	Honing de précision																						
	Honing de haute précision																						
Rodage	Rodage d'ébauche																						
	Rodage de finition																						
	Rodage de haute précision																						
	Rodage de très haute précision																						
Polissage	Polissage par polissoir à chiffon																						
	Polissage normal																						
Sablage	Sablage à gros grain																						
	Sablage à grain moyen																						
	Sablage à grain fin																						
Nettoyage à billes	Nettoyage par billes soufflées																						

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Sommaire

2. Influence des principaux paramètres de coupe.
3. Choix des conditions de coupe.

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISÉES

- a profondeur de passe (mm)
 f avance par tour (mm/tr)
 v_c vitesse de coupe (m/mn)
 R_a rugosité moyenne arithmétique (μm)
 R_t profondeur totale de la rugosité (μm)
 γ_n angle de coupe normal ($^\circ$)
 γ_p angle de coupe vers l'arrière ($^\circ$)
 γ_f angle de coupe latéral ($^\circ$)
 α_n angle de dépouille normal ($^\circ$)
 κ_r angle de direction d'arête ($^\circ$)
 κ'_r angle de direction d'arête complémentaire ($^\circ$)
 λ_s angle d'inclinaison d'arête ($^\circ$)
 R_n rayon de bec (mm)

Remarque : Certaines informations rassemblées dans ce chapitre ne s'appliquent pas uniquement au tournage mais à l'ensemble des opérations d'usinage par coupe.

2.1. Influence du matériau usiné

- Exemples de résultats (fig. 5 et tabl. VII)
- Conclusions

La qualité de surface obtenue sera en général d'autant meilleure que :

- la résistance à la rupture est élevée,
- l'allongement A % est faible,
- la sensibilité à l'érouissage est faible.

Dans le cas des matériaux sensibles à l'érouissage, il est nécessaire de :

- donner à l'outil un angle de coupe maximal (compatible avec sa ténacité),
- utiliser des vitesses de coupe élevées (la limite est donnée par l'usure des outils),
- prendre une profondeur de passe suffisante pour ne pas travailler dans la zone érouie par la passe précédente.

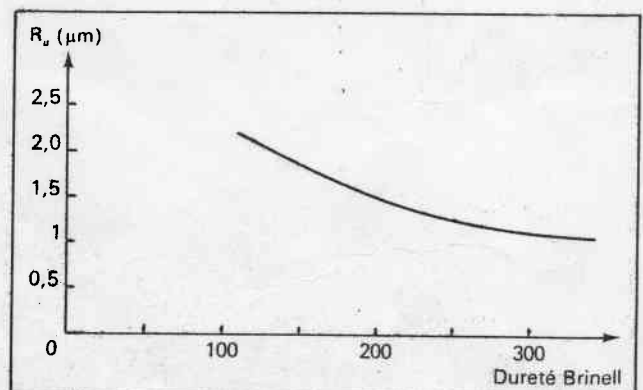


Fig. 5. Evolution de la rugosité en fonction de la dureté du matériau usiné, d'après [3].
 Acier XC 45, carbure P 10 ($v_c = 200$ m/mn, $R_n = 1$ mm, $\alpha_n = 3^\circ$, $\gamma_n = 10^\circ$, $\kappa_r = 60^\circ$, $\lambda_s = 5^\circ$).

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

TABLEAU VII. États de surface obtenus après usinage de différents matériaux.

Matériaux		Tournage fin, fraisage fin	Tournage de forme, taillage de dentures	Filetage, alésage, brochage	Remarques
Aciers à teneur moyenne en carbone	Ferrite et perlite lamellaire	moyen mauvais	bon moyen	bon très bon	Utiliser des outils bien affûtés.
	Perlite globulaire ou punctiforme	très bon bon	moyen mauvais	mauvais	
	Sorbite de faible dureté	très bon bon	moyen mauvais	mauvais	
	Sorbite de grande dureté, troostosorbite	très bon	bon	bon très bon	
Aciers à faible teneur en carbone	Ferrite et perlite lamellaire	bon moyen	mauvais	mauvais	Utiliser des outils bien affûtés.
	Perlite sorbitique et ferrite (après trempe)	bon moyen	moyen mauvais	bon	
Aciers à forte teneur en carbone	Perlite lamellaire	bon moyen	moyen	bon très bon	
	Perlite globulaire	bon très bon	bon	moyen mauvais	
Aciers inoxydables	— Martensitiques	Traité	bon	bon moyen	Utiliser des outils bien affûtés.
		Recuit	bon moyen	moyen	
	— Ferritiques	moyen mauvais	mauvais	mauvais	
	— Austénitiques	moyen mauvais	mauvais	mauvais	
Alliages réfractaires base Ni, Fe, Co		moyen mauvais	mauvais	moyen mauvais	Usure rapide des outils, matériaux très abrasifs.
Alliages légers aluminium, magnésium		bon très bon	bon très bon	bon très bon	Outils à grand angle de coupe (polis) — diamants.
Alliages cuivreux	Structure simple (copeaux longs)	bon très bon	bon	bon	Polir la face d'attaque, angle de coupe important : $\gamma_n = 10$ à 30° — diamants
	Structure double ou complexe (copeaux courts)	bon très bon	bon	bon	
Alliages de titane		très bon	bon	bon	Usure rapide des outils
Fontes		bon très bon	bon moyen	bon très bon	

PROFONDEUR DES SILLONS EN FONCTION DE L'AVANCE ET DU RAYON OUTIL	RAYON	0.40	0.80	1.20
AVANCE	0.05	0.78	0.39	0.26
	0.10	3.14	1.56	1.04
	0.15	7.09	3.52	2.35
	0.20	12.70	6.27	4.17
	0.25	20.03	9.83	6.53
	0.30	29.19	14.19	9.41
	0.35	40.31	19.38	12.83
	0.40	53.59	25.40	16.78
	0.45	69.28	32.29	21.28
	0.50	87.75	40.07	26.33

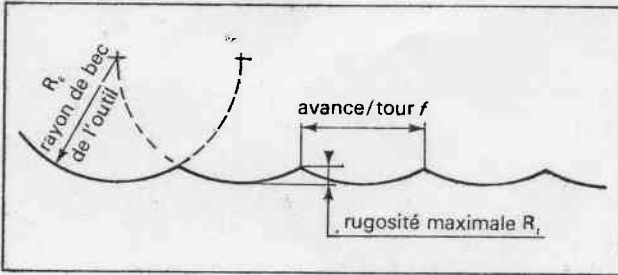


Fig. 6. Etat de surface obtenu en tournage.

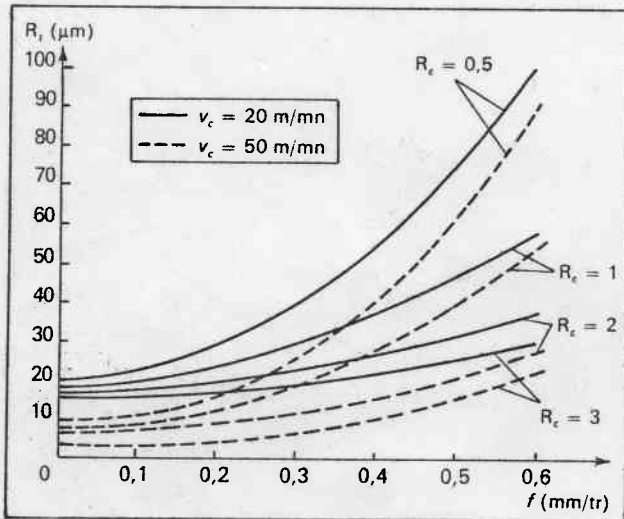
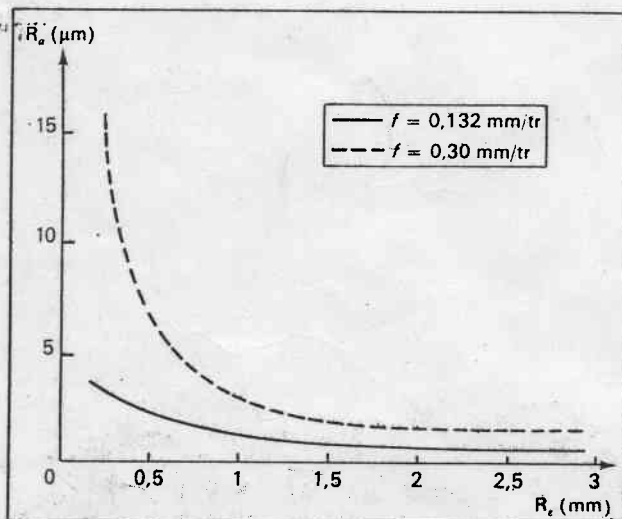


Fig. 7. Influence de l'avance sur la rugosité, d'après [1]. Acier XC 25.



2.2. Influence de l'avance et de la géométrie de la pointe de l'outil

(rayon de bec ou plat)

a) Outils avec rayon de bec

• Généralités

Théoriquement l'état de surface obtenu en tournage avec un outil de tour à rayon de bec est une succession d'arcs de cercle, comme le montre la figure 6.

Par le calcul, on obtient :

$$R_t = \frac{f^2}{8 R_c}$$

$$R_a = \frac{1}{18 \sqrt{3}} \cdot \frac{f^2}{8 R_c} \text{ d'après [2]}$$

Par exemple, pour $f = 0,1 \text{ mm/tr}$ et $R_c = 0,8 \text{ mm}$;
on aurait : $R_t = 1,56 \mu\text{m}$ et $R_a = 0,39 \mu\text{m}$.

• Exemples de résultats (fig. 7 et 8)

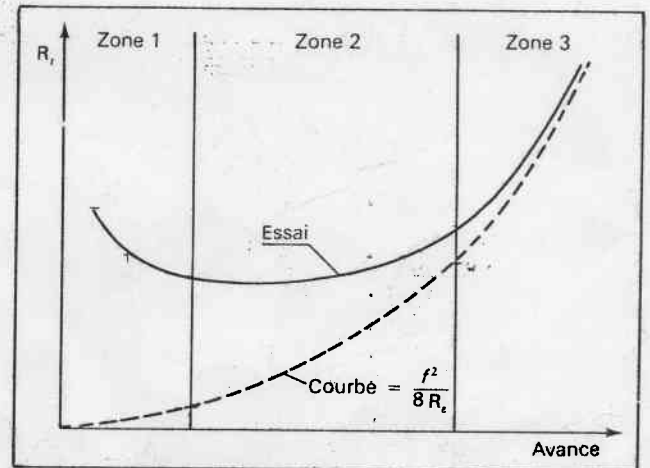


Fig. 9. Allure générale de la courbe de rugosité.

Fig. 8. Influence du rayon de bec sur la rugosité, d'après [3].

Acier XC 45, outil carbure P 10 ($v_c = 200 \text{ m/mn}$, $\gamma_n = 10^\circ$, $\alpha_n = 3^\circ$, $\kappa_r = 60^\circ$, $\lambda_s = 5^\circ$).

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE
Influence des principaux paramètres de coupe

• Conclusions

L'allure générale des courbes de rugosité en fonction de l'avance est donnée figure 9. Trois zones peuvent être observées :

- Zone 1 : dans certains cas, une diminution de l'avance entraîne la dégradation de la rugosité obtenue ;
- Zone 2 : la rugosité réelle est supérieure à la rugosité théorique, stabilisation de la rugosité réelle ;
- Zone 3 : la rugosité obtenue est identique à la rugosité théorique, la rugosité augmente.

Des phénomènes analogues peuvent être trouvés en faisant varier le rayon de bec.

Explication. Lorsque l'avance diminue :

- l'épaisseur coupée devient faible, il y a refus de coupe de l'outil ; on voit apparaître les phénomènes liés au copeau minimum ;
- les irrégularités dues à la coupe (arrachement, etc.) ainsi que les marques d'usure de l'outil deviennent du même ordre de grandeur, puis supérieures à la rugosité théorique.

Le seuil d'apparition des zones 2 et 3, est fonction de nombreux paramètres dont :

- l'aptitude à l'écroissage du matériau usiné,
- la qualité géométrique de l'arête de l'outil (affûtage, usure),
- la vitesse de coupe.

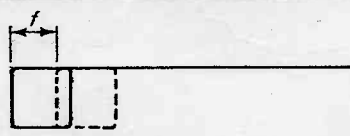
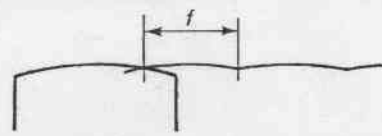
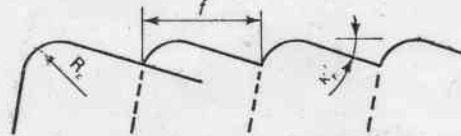
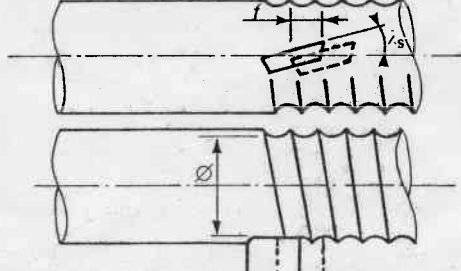
b) Cas des outils de planage

• Généralités

L'extrémité de l'outil présente un plat important ou un rayon $R_c \approx 500$ mm.

L'outil travaille à faible profondeur de passe et avance élevée.

Différentes configurations géométriques peuvent être utilisées (tabl. VIII).

Schéma	Principe	Rugosité théorique
	Plat parallèle à l'avance	$R_t = 0$
	Outil à grand rayon (500 à 1 000 mm)	$R_t \approx \frac{f^2}{8 R_c}$
	Outil incliné d'un angle ($\kappa'_r = 1$ à 5°)	$R_t \approx \text{tg } \kappa'_r (f - R_c \sqrt{\cos \kappa'_r + \cos^2 \kappa'_r}) - R_c \left(\frac{1}{\cos \kappa'_r} - 1 \right)$
	Arête rectiligne inclinée d'un angle i_s	$R_t \approx \frac{f^2 \text{tg}^2 i_s}{4 \varnothing}$

TABEAU VIII. — Outil de planage : configurations géométriques pouvant être utilisées.

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

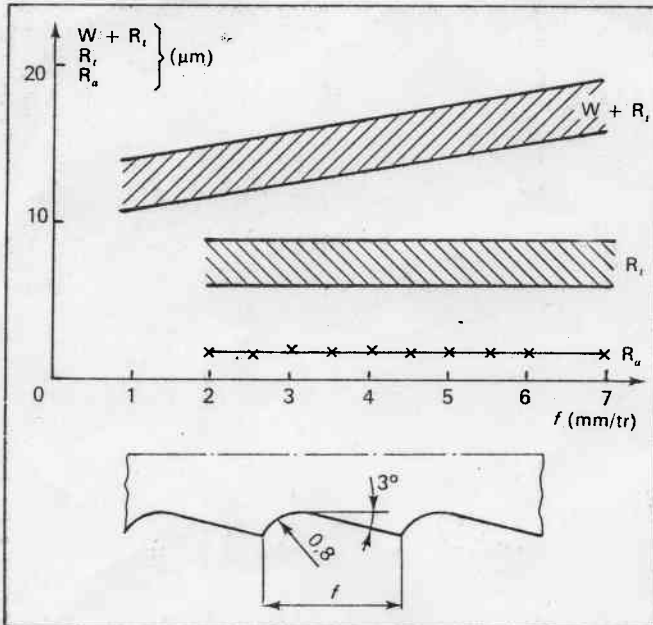


Fig. 10. Influence de l'avance sur la rugosité, d'après [4]. ($\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 5^\circ$).

Avance f (mm/tr)	Largeur du plat (mm)	R_a (μm) début d'essai	R_a (μm) avec outil usé
0,05	1,2 12	0,35 0,22	—
0,1	1,2 12	0,35 0,22	—
0,2	1,2 5 12	0,4 0,35 0,20	1,05 —
0,4	1,2 5	0,34 0,55	0,9 0,9
0,55	1,2	0,8	—
0,8	1,2 2,4	0,8 0,25 0,28	— 0,8

TABEAU IX. — Outils de planage : exemples de résultats. Acier XC 35, Carbures : P 10 et P 20, plat parallèle à la face usinée ($v_c = 350$ m/mn, $a = 0,3$ mm, $\gamma_p = 0^\circ$).

• Exemples de résultats (fig. 10 et tabl. IX)

• Conclusions

D'excellents états de surface peuvent être obtenus avec les outils de planage.

Les problèmes posés par ces outils sont : efforts de coupe importants et usure rapide de l'arête.

2.3. Influence de la géométrie de l'outil

a) Angle de coupe

• Généralités

Les angles de coupe à prendre en considération sont les angles sur le bec de l'outil et non sur l'arête principale (voir fig. 11).

Dans le cas des outils à face d'attaque plane, l'angle de coupe à la pointe est égal à l'angle de coupe vers l'arrière (γ_p) le long de l'arête principale.

Pour les outils à brise copeaux frittés la valeur de l'angle de coupe sur le bec peut être très différente de l'angle de coupe γ_p le long de l'arête principale (voir fig. 12).

• Exemples de résultats (fig. 13 à 15)

• Conclusions

— L'état de surface est amélioré par une augmentation de l'angle de coupe. Ce phénomène est surtout marqué pour les faibles vitesses de coupe (fig. 14).

— La rugosité décroît quand l'angle de dépouille diminue.

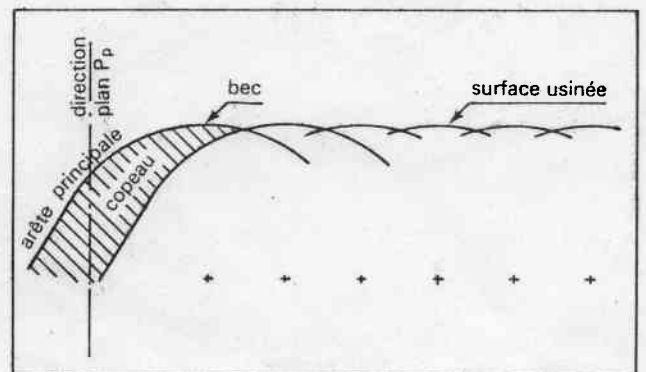


Fig. 11. Angle de coupe sur le bec de l'outil.

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE
Influence des principaux paramètres de coupe

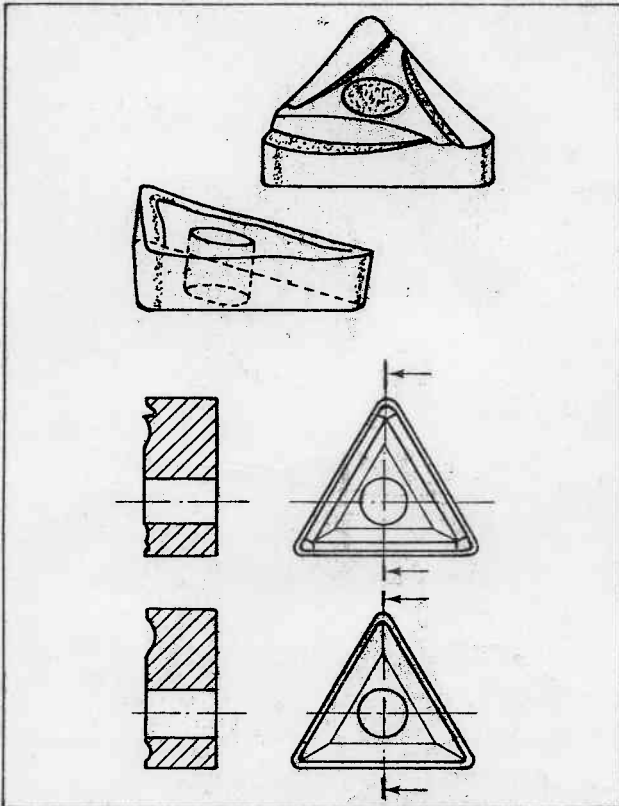


Fig. 12. Exemples de plaquettes avec brise copeaux frittés.

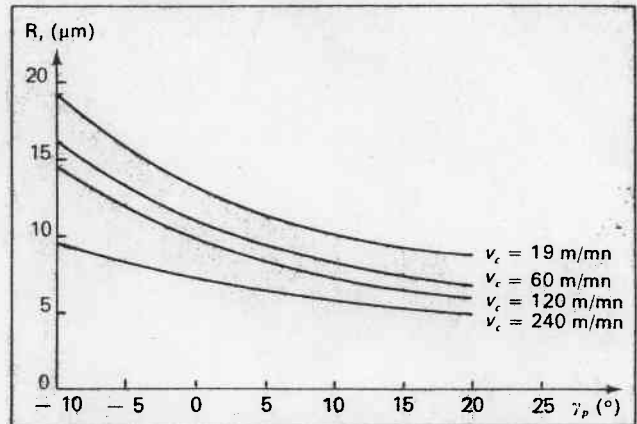


Fig. 14. Rugosité R_t en fonction de l'angle de coupe, d'après [1].
Acier XC 60 ($\kappa_r = 45^\circ$, $f = 0,15$ mm/tr, $a = 0,3$ mm, $R_x = 2$ mm).

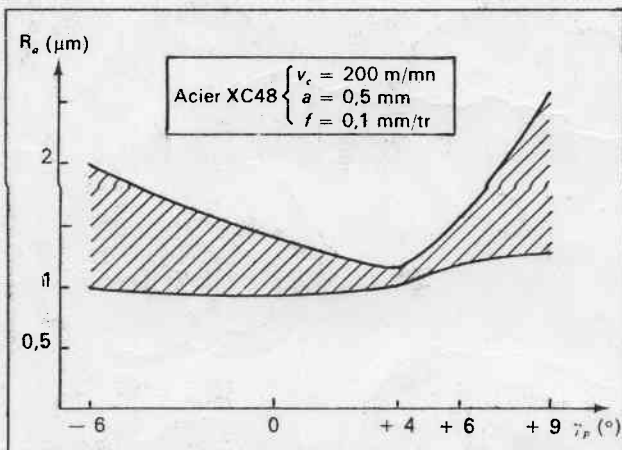


Fig. 13. Comparaison des résultats obtenus avec différentes plaquettes carbures à brise copeaux frittés (résultats CETIM).

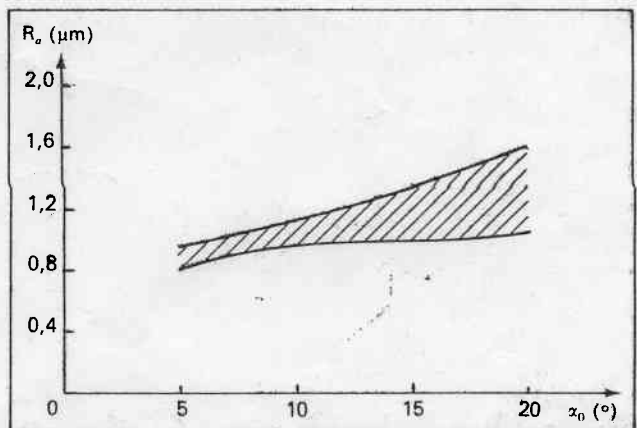
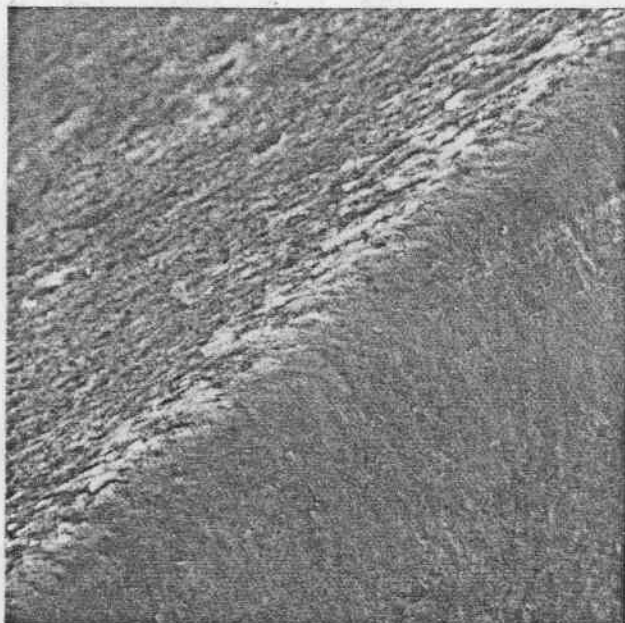


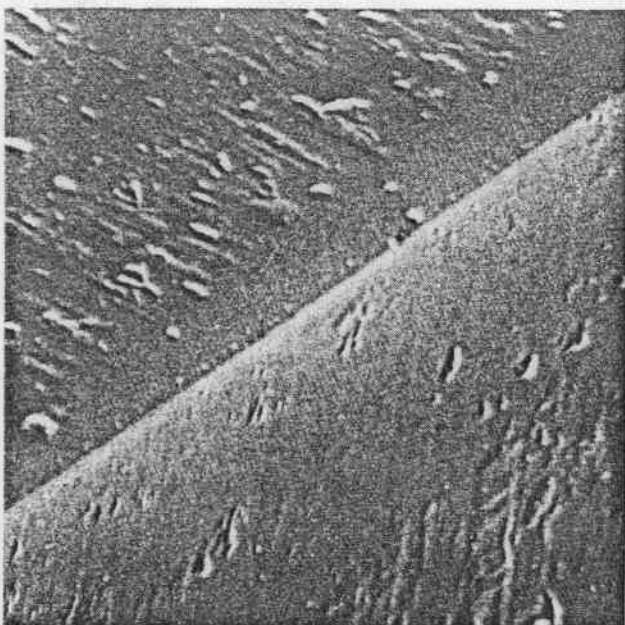
Fig. 15. Rugosité R_a pour divers angles de dépouille, d'après [5].
Acier allié, outil carbure ($v_c = 200$ m/mn, $f = 0,04$ mm/tr, $a = 0,1$ mm).

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe



(a)



(b)

Fig. 16. Exemples d'acuité de l'arête de coupe : outils carbure et diamant.

- a) Arête de coupe carbure plaquette brute de frittage, $\times 150$.
 b) Arête de coupe diamant, d'après [7], $\times 10\,000$

b) Microgéométrie de l'arête

(états de surface des faces d'attaque et de dépouille, rayon de l'arrondi de l'arête, chanfreins...).

• Généralités

L'acuité de l'arête de coupe n'est pas parfaite (fig. 16). Les faces d'attaque et de dépouille possèdent leur propre rugosité. La rugosité de l'arête de coupe est de 4 à 10 fois supérieure à la rugosité des faces d'attaque et de dépouille. Ces défauts peuvent être la conséquence de l'usure de l'outil.

• Exemples de résultats (fig. 17)

• Conclusions

La microgéométrie de l'arête a une grande influence sur les phénomènes de coupe. Lorsque l'acuité de l'arête est améliorée :

- l'épaisseur du copeau minimum diminue,
- les risques de formation de l'arête rapportée diminuent,
- la qualité de surface est améliorée (surtout aux vitesses de coupe élevées).

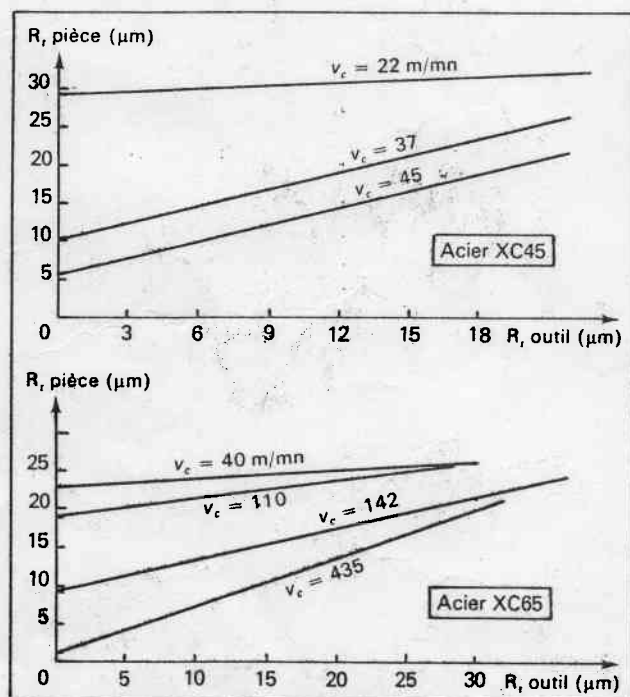


Fig. 17. Influence de la rugosité d'arête de l'outil sur celle de la pièce, d'après [1].

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

2.4. Influence de la vitesse de coupe

• Exemples de résultats (fig. 18 et 19)

• Conclusions (fig. 20)

— L'état de surface s'améliore puis tend à se stabiliser lorsque la vitesse de coupe croît : la diminution de la rugosité est due à la disparition de l'arête rapportée.

— Lorsque la vitesse coupe est trop élevée, l'usure rapide de l'outil entraîne une dégradation de la surface usinée.

— Dans le cas de matériaux très difficiles à usiner, il est parfois difficile de travailler à une vitesse de coupe donnant un état de surface de bonne qualité (exemple : alliage réfractaire base nickel N-C 15-Fe).

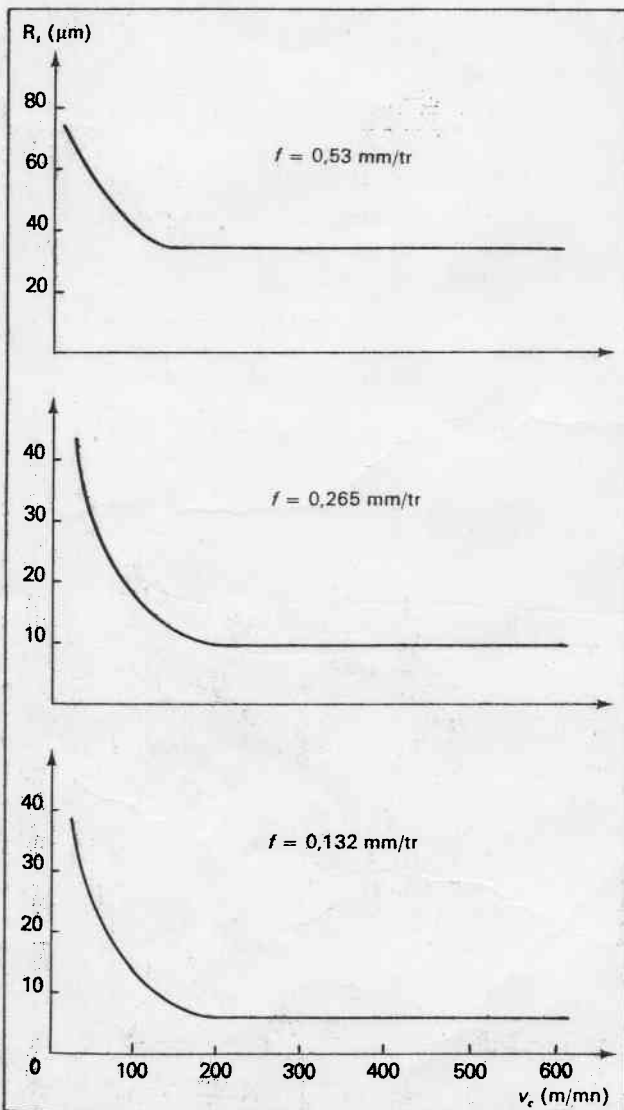


Fig. 18. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité, d'après [3].
Acier XC 45, carbure P 10 ($R_c = 1,35 \text{ mm}$, $\alpha_n = 2^\circ$, $\gamma_n = 10^\circ$, $\kappa_r = 60^\circ$, $\lambda_s = 4^\circ$).

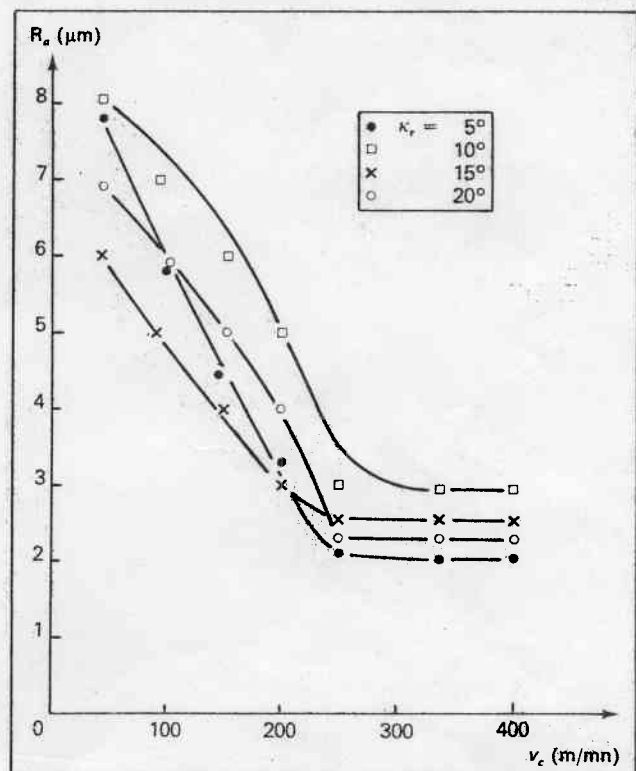


Fig. 19. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité, d'après [6].
Alliage A-U4SG ($f = 0,1 \text{ mm/tr}$, $a = 1 \text{ mm}$).

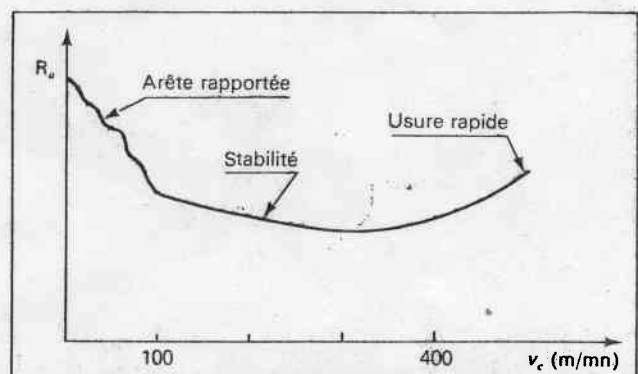


Fig. 20. Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité : allure générale.

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

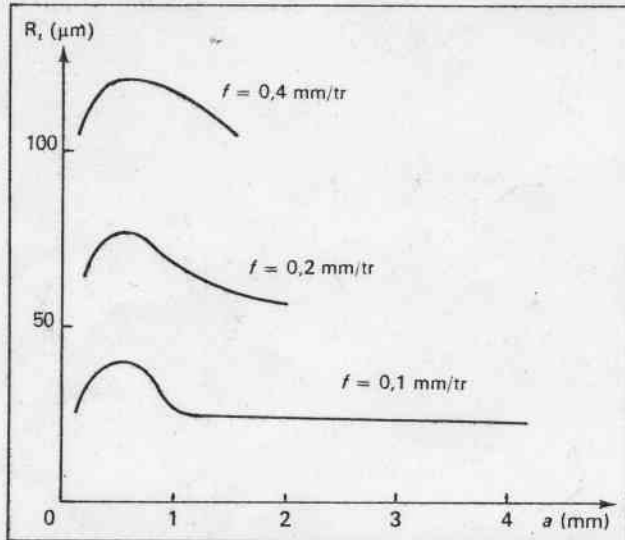


Fig. 21. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité, d'après [3].
($v_c = 40$ m/mn, $R_a = 0$).

2.5. Influence de la profondeur de passe

• Exemples de résultats (fig. 21 à 23)

• Conclusions

La profondeur de passe n'a pratiquement pas d'influence sur la rugosité. Cependant, si la section de copeau est trop faible ($a \cdot f < 0,05$ mm²) les efforts sont faibles et les jeux de fonctionnement de la machine (glissières, broches) ne sont pas rattrapés ; des vibrations peuvent apparaître.

Sur un tour de rigidité moyenne, une profondeur de passe minimale de 0,3 mm semble conseillée.

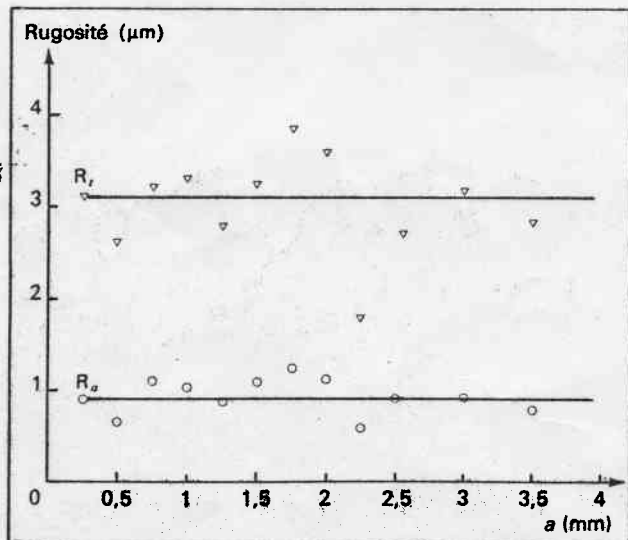


Fig. 22. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité, d'après [3].
Acier XC 48, outil P 10 ($v_c = 200$ m/mn, $f = 0,132$ mm/tr, $R_a = 1,35$ mm, $\alpha_0 = 2^\circ$, $\gamma_0 = 10^\circ$, $\kappa_r = 60^\circ$, $\lambda_s = 4^\circ$).

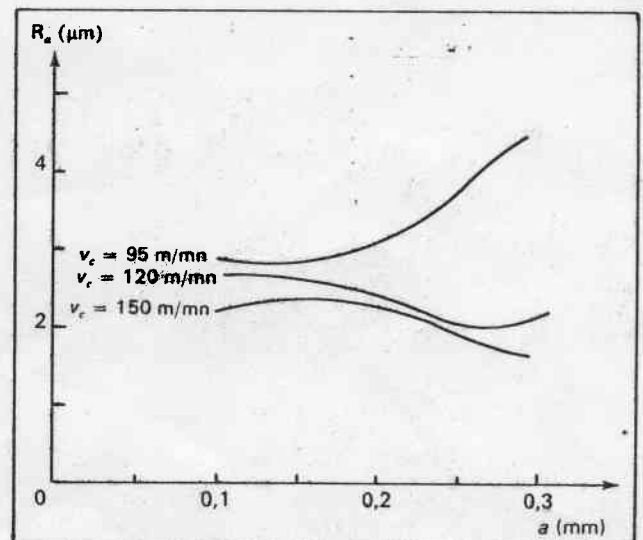


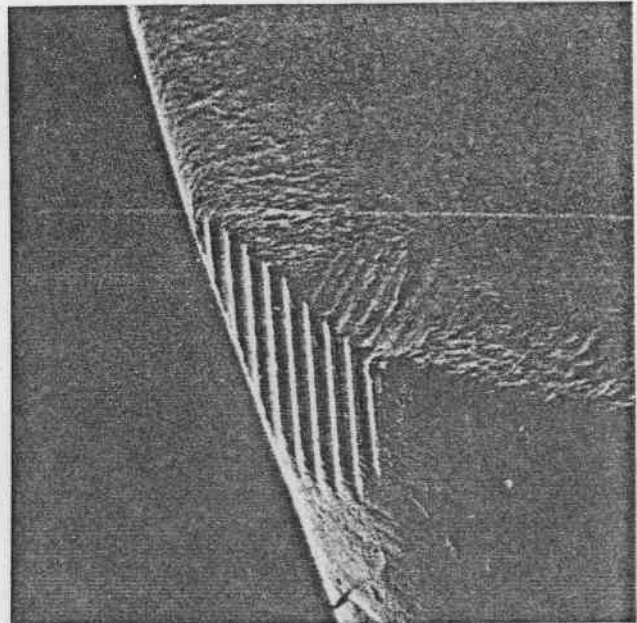
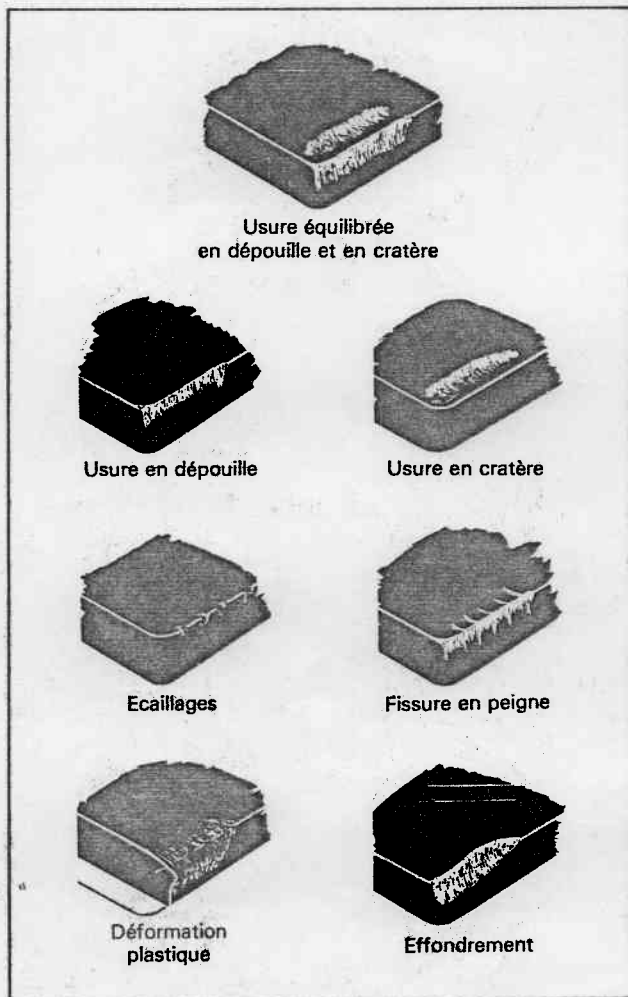
Fig. 23. Influence de la profondeur de passe sur la rugosité, d'après [14].
Acier XC 48 ($f = 0,06$ mm/tr, $R_a = 0,4$ mm).

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE
Influence des principaux paramètres de coupe

2.6. L'usure de l'outil

• Généralités (fig. 24 et 25)

Pour les opérations d'ébauche, c'est l'usure de l'outil qui conditionne sa durée de vie. Pour les opérations de finition, par contre, c'est la dégradation de l'état de surface qui entre en ligne de compte.



(a)

(b)

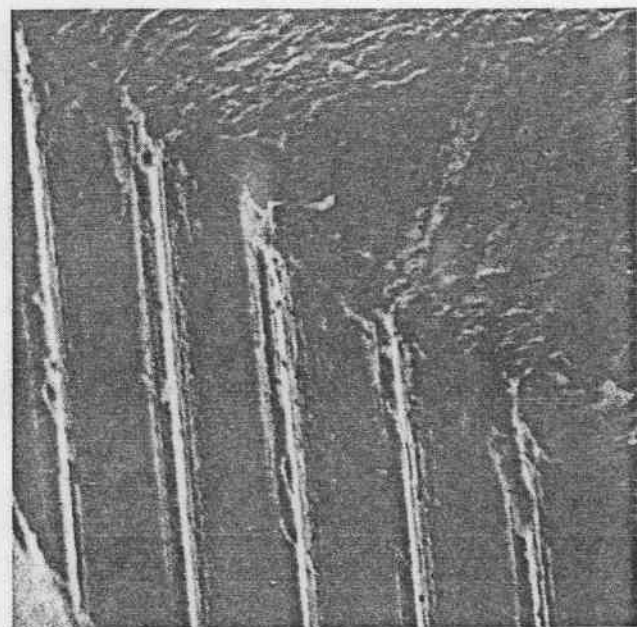


Fig. 25. Exemple d'outil utilisé en finition, d'après [7].

a) $\times 135$
b) $\times 680$

Fig. 24. Principales formes d'usures. Des sillons se forment sur la face en dépouille, en particulier à la pointe de l'outil.

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

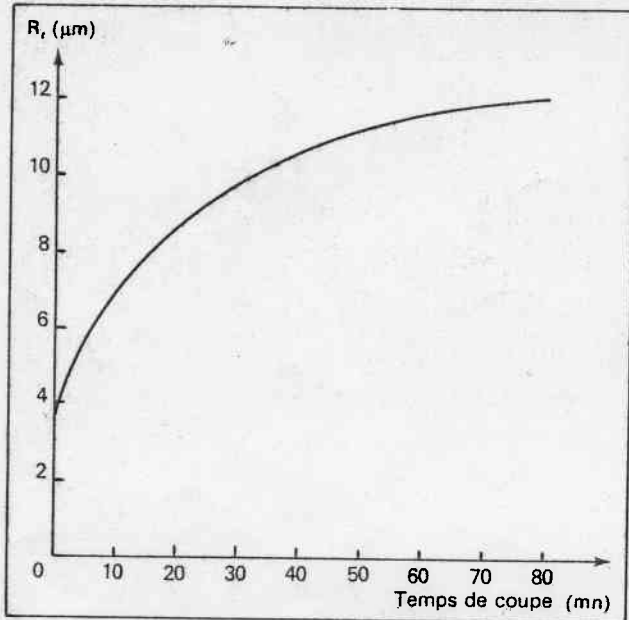


Fig. 26. Evolution de la rugosité en fonction du temps de coupe, d'après [1].
Acier XC 45, carbure P 10 ($\alpha = 6^\circ$, $\gamma = 6^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\kappa_r = 70^\circ$,
 $R_c = 0,8$ mm, $v_c = 200$ m/mn, $f = 0,1$ mm/tr, $a = 0,4$ mm).

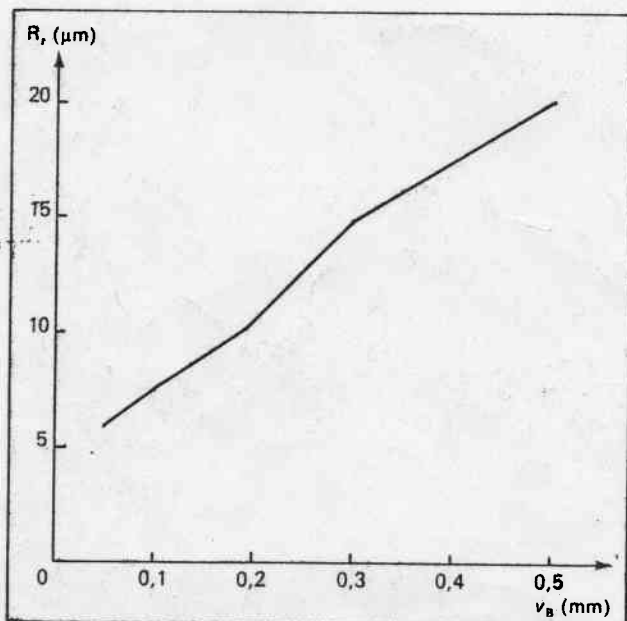


Fig. 27. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépose, d'après [3].
Acier XC 45, outil céramique ($v_c = 530$ m/mn,
 $f = 0,08$ mm/tr, $R_c = 0,66$ mm).

• Exemples de résultats (fig. 26 à 28)

Généralement la rugosité croît en fonction du temps de coupe (fig. 26 et 27). Dans certains cas, l'évolution de la rugosité est irrégulière (fig. 28).

• Conclusions (fig. 29)

- En règle générale, l'état de surface se dégrade en fonction du temps de coupe.
- La profondeur d'écaillage de la surface usinée augmente lorsque l'outil s'use en dépose.

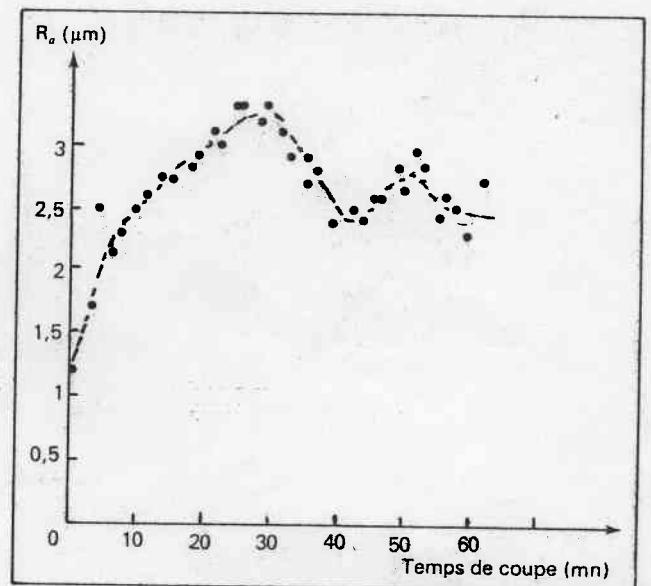
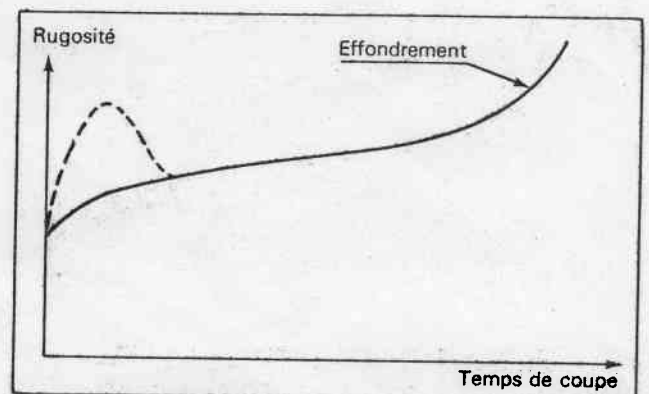


Fig. 28. Exemple d'évolution irrégulière de la rugosité, d'après [8].
Acier XC 48, outil carbure P 10 ($v_c = 200$ m/mn,
 $f = 0,1$ mm/tr, $a = 0,5$ mm, $R_c = 0,8$ mm).



2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

2.7. Influence de la lubrification

• Exemples de résultats (fig. 30)

• Conclusions

- la lubrification amène une amélioration de l'état de surface obtenu pour les faibles vitesses de coupe inférieure à 60 m/mn). Cette action à basse vitesse s'explique principalement par la disparition de l'arête rapportée ;
- pour des vitesses supérieures, l'efficacité des fluides de coupe est faible.

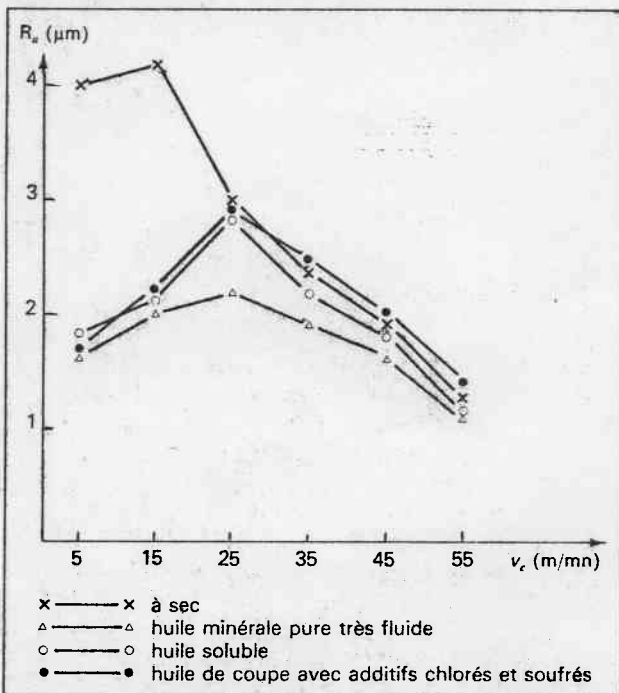


Fig. 30. Influence du lubrifiant sur la rugosité, d'après [5]. Acier C 35, trempé (structure sorbitique).

Fig. 29. Allure générale de la rugosité : le pic en pointillé correspond au phénomène d'adaptation de l'outil. Dans certains cas, au cours des premiers instants de coupe, la microgéométrie de l'arête s'adapte au dégagement du copeau et l'on observe une amélioration relative de l'état de surface.

2.8. Influence des vibrations

a) Cas général

• Exemples de résultats (fig. 31)

• Conclusions

- les vibrations entraînent une dégradation de la qualité de surface : dans tous les cas, il y aura intérêt à rechercher la rigidité maximale de l'ensemble machine-pièce-outil.
- pour des efforts de coupe très faibles, les jeux de fonctionnement de la machine ne sont pas rattrapés. La rigidité apparente de la machine est alors très faible.

Le tableau X (page suivante) résume les principaux moyens proposés pour résoudre les problèmes de vibrations.

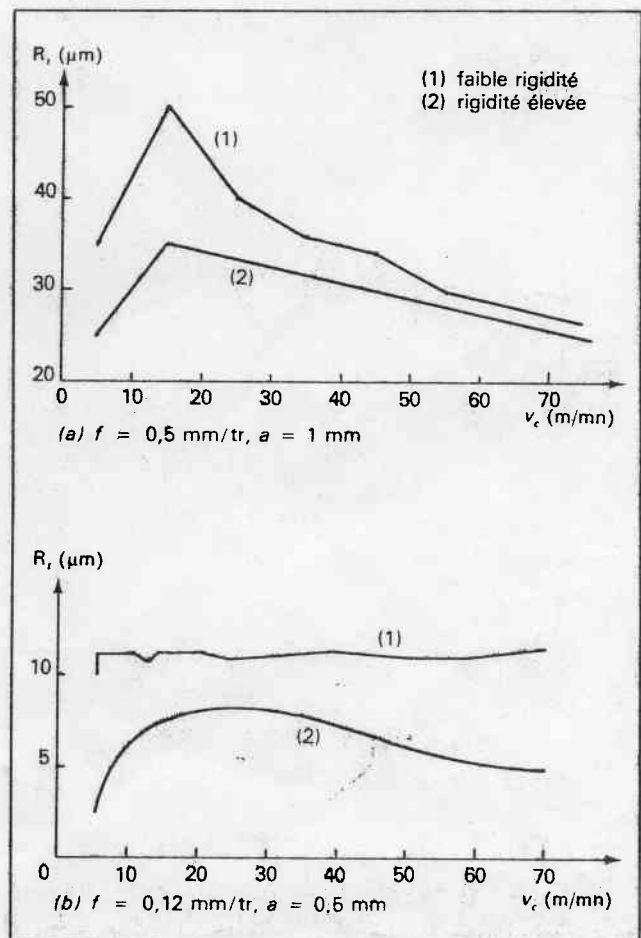


Fig. 31. Influence de la rigidité de la machine-outil sur la rugosité de la surface usinée, d'après [1].

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

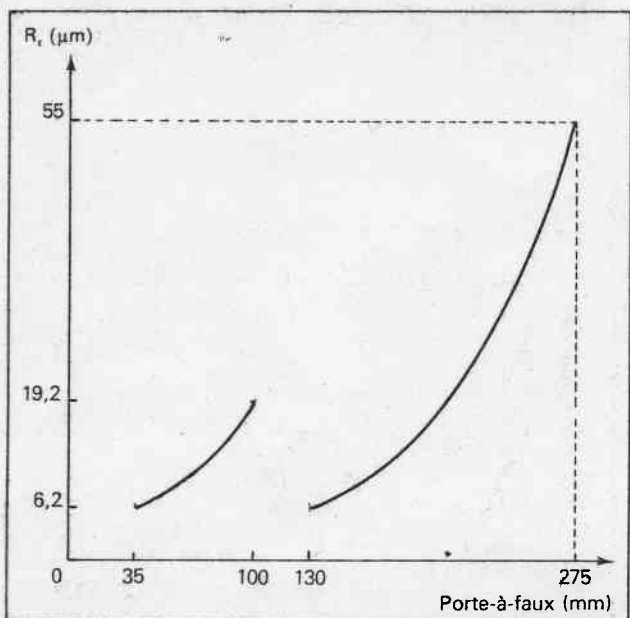


Fig. 32. Influence du porte-à-faux d'une barre d'alésage sur la rugosité, d'après [9].
Barre Ø 25 en acier XC 48, outil carbure P 10 ($v_c = 160$ m/mn, $a = 0,5$ mm, $f = 0,05$ mm/tr, $R_z = 0,4$ mm).

b) Alésage

Dans ce type d'opération, les problèmes de vibrations sont prépondérants (fig. 32). Le porte-à-faux de la barre est en effet un paramètre important.

• Conclusions

Afin d'obtenir le meilleur état de surface, il est conseillé de :

- réduire la longueur d'arête en prise (rayon de bec $R_z = 0,4$ ou même $0,2$ mm).
- travailler en coupe positive,
- lubrifier efficacement pour évacuer les copeaux (barre avec canal d'amenée du lubrifiant),
- utiliser une barre d'alésage de diamètre maximal (cf. fig. 33) et anti-vibratoire (avec amortisseur ou en matériau à module d'élasticité élevé),
- réduire le porte-à-faux et les jeux au minimum.

A conditions de coupe égales, il est plus difficile d'obtenir un état de surface correct en alésage qu'en tournage extérieur.

2.9. Tableau récapitulatif

L'influence des principaux paramètres de coupe sur la rugosité en tournage est précisée dans le tableau XI (page suivante).

Mode d'action Action sur	S'éloigner de la fréquence de résonance	Augmenter la rigidité	Augmenter l'amortissement	Diminuer les efforts de coupe (semi finition)
Conditions de coupe	Modifier la vitesse de coupe	Augmenter la profondeur de passe ou l'avance (*)		Diminuer avance et profondeur de passe
Outil	Fraise antivibratoire (à pas décalé)	Augmenter la section du porte-outil Réduire les porte-à-faux Utiliser des matériaux à module d'élasticité élevé	Barres d'alésage antivibratoires Réduire l'angle de dépouille Mettre un élément amortisseur entre l'outil et son support	Rayon de bec faible (voir tabl. XI) Angle de direction 90° Coupe positive
Pièce		Améliorer la fixation Soutenir les parties flexibles	Élément amortisseur sur la pièce	Améliorer la qualité de la pièce brute (surépaisseurs régulières)
Machine	Volant d'inertie	Raidisseur Diminuer les jeux fonctionnels	Amortisseur	
(*) Les vibrations sont dues aux jeux fonctionnels.				

TABLEAU X. Solutions aux problèmes de vibrations : finition sur tour et fraiseuse.

2. LES ÉTATS DE SURFACE EN TOURNAGE

Influence des principaux paramètres de coupe

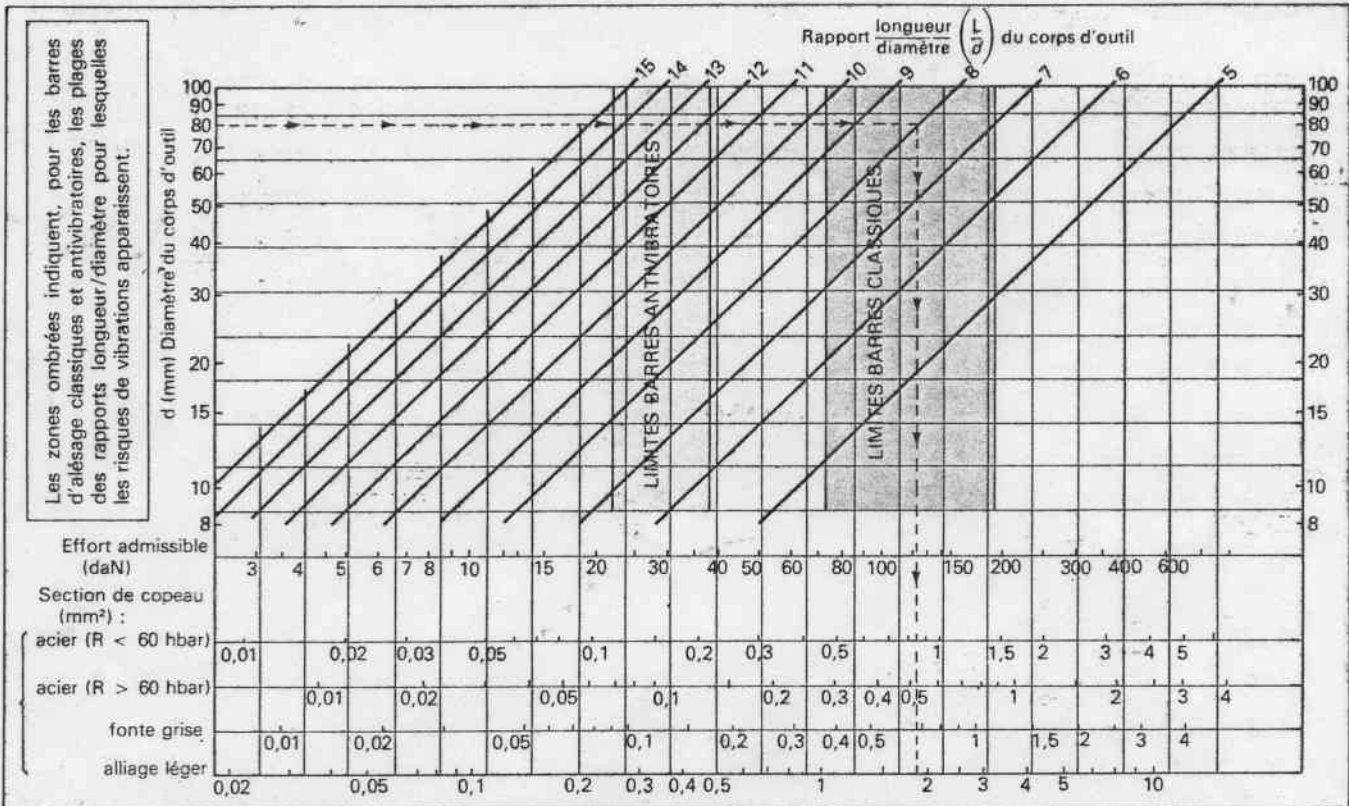


Fig. 33. Efforts et sections de copeau en fonction du diamètre et du porte-à-faux de l'outil.

Exemple d'application.

- Données : ϕ barre = 80 mm ; porte-à-faux L = 640 mm.
- Résultats :
 - effort admissible : 120 daN
 - section de copeau :
 - acier (R < 60 hbar) : 0,85 mm²
 - acier (R > 60 hbar) : 0,5 mm²
 - fonte grise : 0,7 mm²
 - alliage léger : 2 mm²
 - risques de vibrations en cas d'utilisation de barre d'alésage classique.

Paramètre considéré	Influence		Remarques
Matériau usiné	Dureté ↗	Rugosité ↘	Difficultés surtout avec les matériaux écrouissables.
Avance et rayon de bec	Avance ↗ Rayon ↗	Rugosité ↗ Rugosité ↘	Surtout pour $R_a > 2 \mu\text{m}$. En dessous de cette valeur, phénomène du copeau minimum.
Géométrie de l'outil	Angle de coupe ↗ Micro-géométrie ↗	Acuité de l'arête ↗ Rugosité ↘ Rugosité ↘	
Vitesse de coupe	Vitesse ↗	Rugosité ↘	Au-delà de 200 m/mn stabilisation de la rugosité.
Profondeur de passe	Pratiquement nulle		Eviter les profondeurs de passe trop faibles (vibrations).
Usure de l'outil	En général usure ↗	Rugosité ↗	
Lubrification	Lubrification ↗	Rugosité ↘	Amélioration sensible pour $v_c < 60$ m/mn - faible pour $v_c > 100$ m/mn
Vibrations	Amplitude vibrations ↗	Rugosité ↗	

TABLEAU XI. Influence des principaux paramètres de coupe sur la rugosité en tournage.