



## Mise en Œuvre et Procédés

### TP n° 1

## Découverte d'un procédé d'usinage





# 1. Table des matières

1.	Table des matières.....	4
2.	Tournage .....	5
2.1.	Cinématique de la machine. ....	5
2.1.1.	La vitesse de coupe. ....	6
2.1.2.	La vitesse d'avance :.....	6
2.2.	L'outil de coupe.....	7
2.3.	La mise en position de la pièce. ....	9
2.4.	Analyse des dispersions de mise en position. ....	9
2.5.	Analyse des spécifications obtenues sur la pièce.....	10
3.	Fraisage .....	12
3.1.	Cinématique de la machine. ....	12
3.1.1.	La vitesse de coupe : .....	13
3.1.2.	La vitesse d'avance :.....	13
3.2.	L'outil de coupe.....	15
3.3.	Les modes de travail en fraisage. ....	17
3.4.	La mise en position de la pièce. ....	17
3.5.	Analyse des dispersions de mise en position. ....	18
3.6.	Analyse des spécifications obtenues sur la pièce.....	19
4.	Annexe 1 : symbolisation des liaisons élémentaires .....	21
5.	Annexe 2 : ajustements normalisés.....	22

## 2. Tournage

Pour générer une surface avec un outil, il faut créer un mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce. Ce mouvement relatif est la combinaison de deux mouvements : un mouvement générateur (mouvement de coupe) et un mouvement directeur (mouvement d'avance).

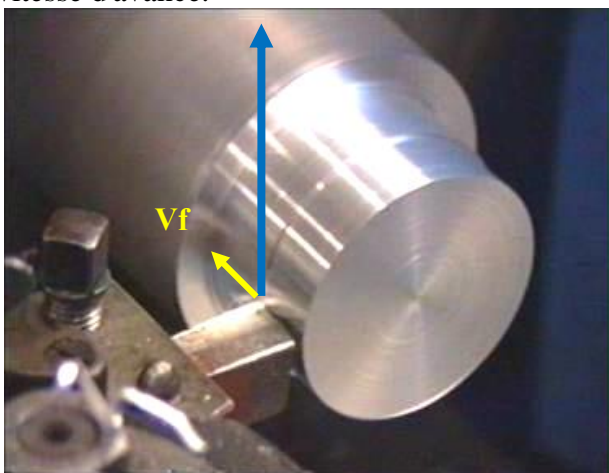


### 2.1. Cinématique de la machine.

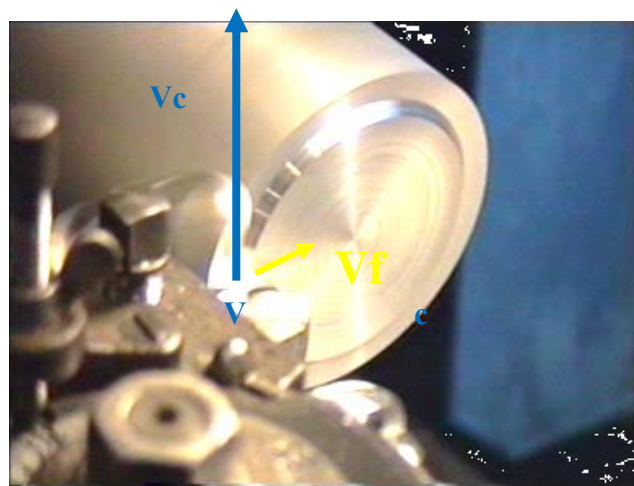
En tournage :

Le mouvement de coupe est donné à :	la pièce	l'outil
Le mouvement d'avance est donné à :	la pièce	l'outil

Sur les photos ci-dessous (opération de chariotage , opération de dressage) en considérant le mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce, tracer le vecteur vitesse de coupe et le vecteur vitesse d'avance.



*Opération de chariotage*



*Opération de dressage*

### 2.1.1. La vitesse de coupe.

La vitesse de coupe : pour une durée de vie donnée, la vitesse de coupe est fonction du matériau de la pièce et du matériau de l'outil. Sur un tour, cette vitesse résulte de la vitesse de rotation à laquelle la pièce tourne.

Soit  $\omega$  (rd/s) la vitesse angulaire de la pièce. Soit  $N$  (tr/min) la fréquence de rotation de la pièce.

Exprimer  $\omega$  en fonction  $N$

$$\omega = 2 \pi \frac{N}{60} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \omega \text{ (rd/s)} \\ N \text{ (tr/min)} \end{array}$$

Calculer alors la vitesse de coupe  $V_c$  en fonction de  $N$  lorsque l'outil usine un cylindre de diamètre  $D$ .

$$V_c = \omega \frac{D}{2}$$

$$V_c = \pi N \frac{D}{1000} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} V_c \text{ (m/min)} \\ N \text{ (tr/min)} \\ D \text{ (mm)} \end{array}$$

#### Application :

Opération de chanfreinage avec outil en ARS

$N$  réglé sur le tour : 420 tr/min

$D = 25 \text{ mm}$

$V_c = 33 \text{ m/s}$

Opération de chariotage avec outil carbure

$N$  réglé sur le tour : 1120 tr/min

$D = 30 \text{ mm}$

$V_c = 105 \text{ m/min}$

Opération de dressage avec outil en ARS :

$N$  réglé sur le tour : 280 tr/min

Pour  $D = 30 \text{ mm}$   $V_c = 26 \text{ m/min}$  pour  $D = 0$   $V_c = 0 \text{ m/min}$

La vitesse de coupe est-elle constante tout au long de l'opération ? Justifier.

*Durant l'opération de dressage, la vitesse de rotation de la broche étant constante, la vitesse de coupe qui en résulte varie d'une valeur maxi à l'extérieur jusqu'à 0 au centre*

### 2.1.2. La vitesse d'avance :

Sur le tour on règle l'avance  $f$  (mm/tr) que fait l'outil à chaque tour de pièce. Il en résulte, une vitesse  $V_f$  de l'outil par rapport à la pièce.  $V_f = f \cdot N$

Dans le cas de l'opération de chariotage comparer  $V_f$  et  $V_c$ .

$N$  réglé sur le tour : 1120 tr/min

$f$  réglé sur le tour : 0,1 mm/tr

$D = 30 \text{ mm}$

$V_c = 105 \text{ m/min}$

$V_f = 112 \text{ mm/min} = 0,112 \text{ m/min}$

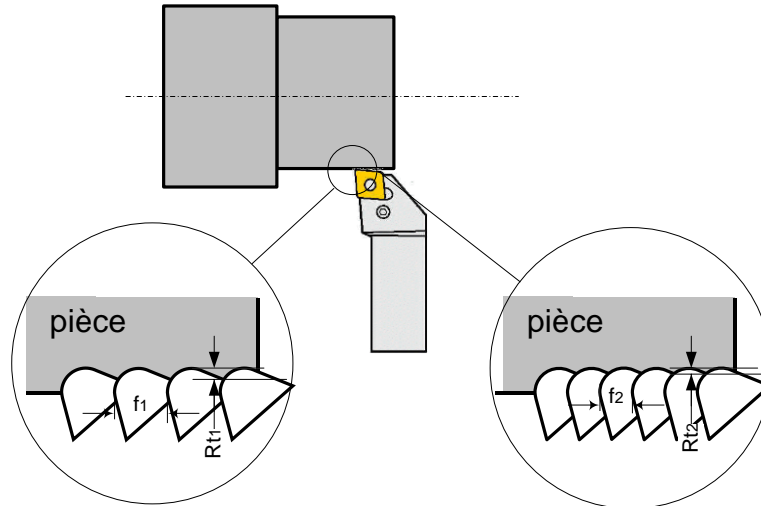
*Il y a sensiblement un rapport de 1000 entre  $V_c$  et  $V_f$  !*

En considérant la combinaison de ce mouvement de coupe et de ce mouvement d'avance, quelle est la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce lors d'une opération de chariotage ?

C'est un mouvement hélicoïdal (avec un pas très petit) .

Le choix de la vitesse d'avance a une incidence directe sur l'état de surface (la rugosité) de la surface usinée.

On peut caractériser la rugosité par la hauteur  $R_t$  des stries laissées par l'outil sur la surface usinée



*La rugosité est une fonction croissante ~~ou décroissante~~ (barrer le qualificatif inutile) de l'avance de l'outil par rapport à la pièce.*

## 2.2. L'outil de coupe.

Un outil de coupe est composé d'un corps (partie par laquelle on positionne l'outil sur le porte-outil) et d'une partie active

Cette partie active peut être en acier rapide supérieur (ARS) et être soudé sur le corps pour constituer un outil monobloc. Lorsqu'un outil de cette nature est utilisé, il peut être affûté.

Cette partie active peut aussi être en carbure métallique. On parle alors de plaquette qui est positionnée et fixée sur le corps d'outil appelé porte-plaquette. Une plaquette comporte en général plusieurs arêtes de coupe (2, 3 ou 4 selon la géométrie). Lorsque toutes les arêtes sont usées la plaquette est jetée.



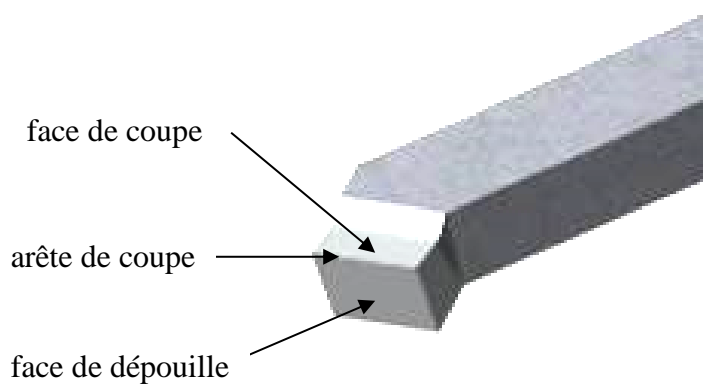
*Outil en acier rapide supérieur (ARS)*



*Outil avec plaquette en carbure métallique*

La partie active comporte trois parties essentielles :

- la face de coupe sur laquelle se déroule le copeau ;
- la face de dépouille qui est en regard de la surface qui vient d'être usinée ;
- l'arête de coupe, partie coupante qui est l'intersection de la face de coupe et de dépouille.

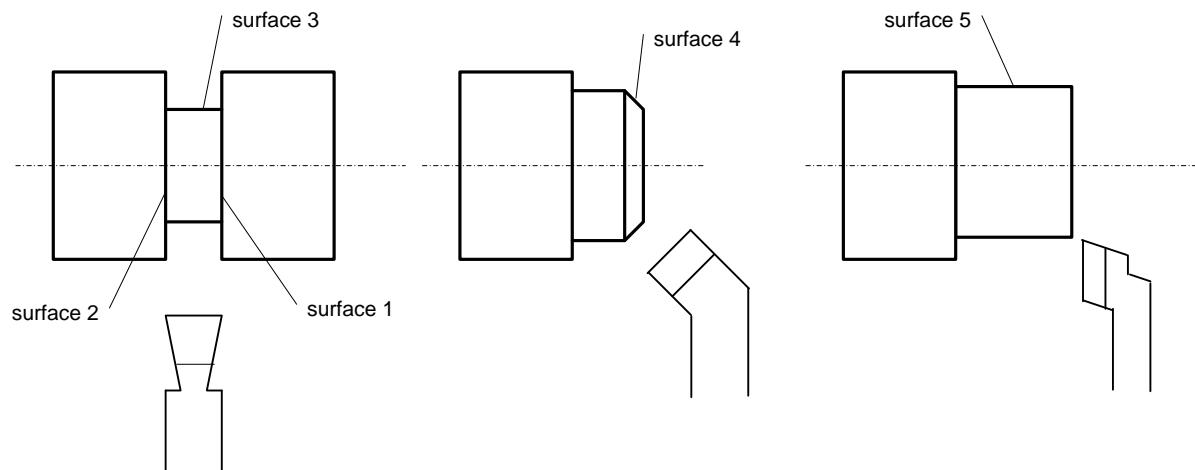


En tournage l'outil de coupe est unique. La surface usinée peut être réalisée par un travail d'enveloppe ou par un travail de forme.

Travail d'enveloppe : la surface usinée est l'enveloppe des positions de la pointe active de l'outil dans son mouvement relatif par rapport à la pièce.

Travail de forme : la forme de l'arête de coupe est reproduite sur la surface usinée est la pièce.

Dans les différents cas schématisés ci-après, préciser si les surfaces sont obtenues en travail d'enveloppe ou en travail de forme.



opérations		Travail de forme	Travail d'enveloppe
rainurage	surface 1		X
	surface 2		X
	surface 3	X	
chanfreinage	surface 4	X	
chariotage	surface 5		X

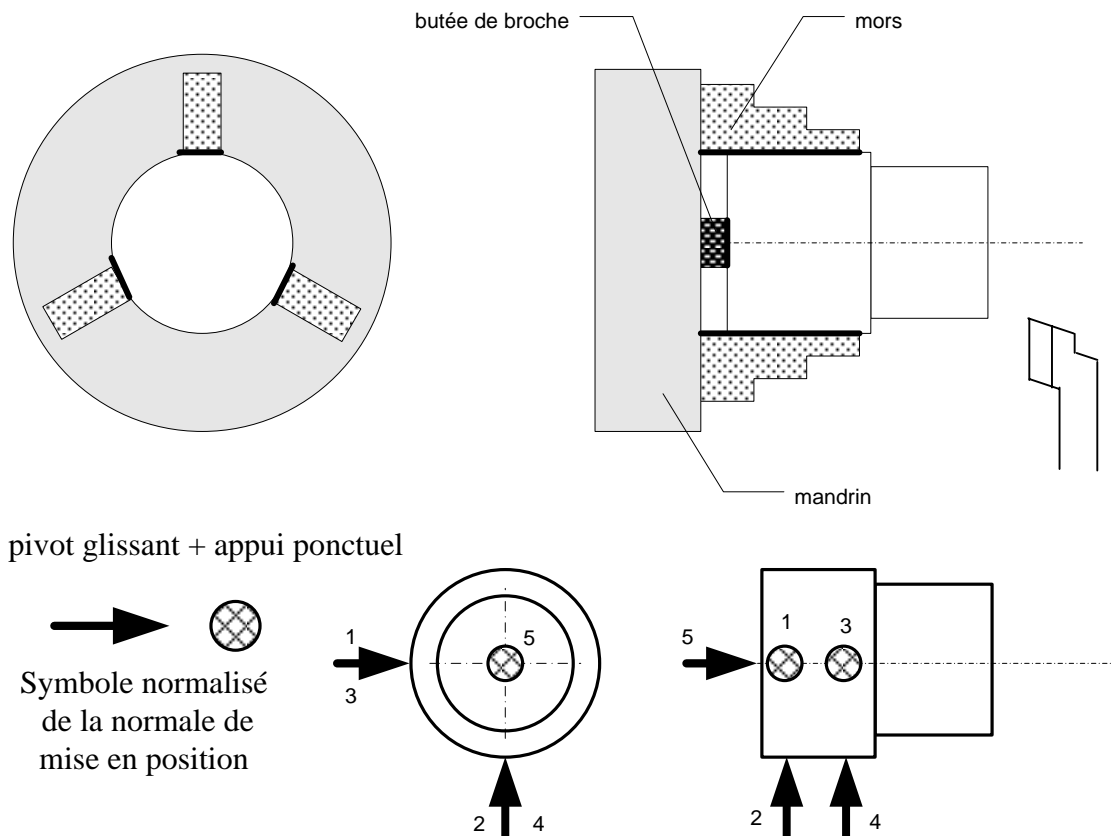
	Travail de forme	Travail d'enveloppe
Avantages	<i>Reproduit exactement la forme de l'arête</i> <i>Possibilité d'obtenir des géométries complexes</i>	<i>La qualité de la surface générée dépend de la (bonne) précision géométrique de la machine</i>
Inconvénients	<i>Reproduit exactement la forme de l'arête (y compris les défauts)</i> <i>Efforts de coupe importants</i>	<i>Rugosité fonction du rayon de bec de l'outil et de l'avance f</i>



### 2.3. La mise en position de la pièce.

Le porte pièce utilisée ici est un mandrin trois mors à serrage concentrique auquel on a joint également une butée de broche.

Sur le schéma ci-dessous indiquer quelles sont les surfaces qui participent à la mise en position de la pièce. Indiquer quelles sont les liaisons réalisées par chacune de ces surfaces. Schématiser cette mise en position en utilisant les normales de repérage.



### 2.4. Analyse des dispersions de mise en position.

Lors de la mesure effectuée avec le comparateur après l'opération de chariotage, quel est l'écart lu sur le comparateur lorsque que vous vous faites tourner la pièce.

Que pouvez-vous conclure quant à la position de la surface tournée par rapport à l'axe de rotation la machine.

*La surface usinée est coaxiale à l'axe de rotation*

Si plusieurs surfaces cylindriques sont usinées sans démontage de pièce, que pouvez-vous dire de leur position relative ?

Toutes ces surfaces usinées sans démontage seront coaxiales entre elles

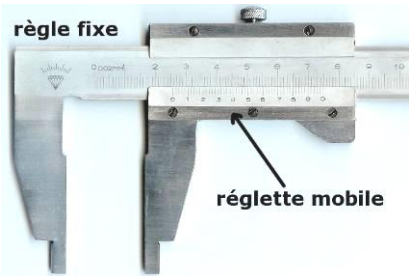
La qualité géométrique du tour permet de garantir que le mouvement du chariot transversal s'effectue dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation et ce avec une très bonne précision. Que pouvez-vous dire de l'orientation d'une surface dressée par rapport à une surface chariotée, sans démontage de la pièce.

*La surface dressée sera perpendiculaire à la surface chariotée.*

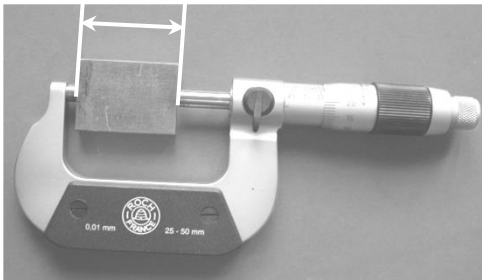
Lorsque vous faites cette même mesure au comparateur après un démontage et un remontage de la pièce, quel est l'écart lu sur le comparateur lorsque que vous faites tourner la pièce.  
 Quelles sont les causes de cet écart.

*L'écart mesuré est dû essentiellement à la dispersion de remise en position sur les mors durs du mandrins.*

### 2.5. Analyse des spécifications obtenues sur la pièce



Pied à coulisse



Micromètre



Comparateur

Tableau de mesures

	Ø 25	lg 28	lg 49	Ø 20	Ø 12	//
Mesure au pied à coulisse	25,04					
Mesure au micromètre	25,03					
Mesure au comparateur						

La pièce usinée est elle conforme au modèle qui est représenté sur le schéma ?

.....  
 .....

Que manque t-il sur le modèle (schéma de la pièce) pour en faire un dessin de définition ?

. *Il manque les tolérances dimensionnelles et les spécifications géométriques.*

Les spécifications qui figurent sur un dessin de définition définissent la valeur nominale de la spécification mais également l’intervalle de tolérance.  
 Ces spécifications sont définies à partir des exigences fonctionnelles qui doivent être respectées sur la pièce pour qu’elle puisse remplir sa fonction dans le mécanisme où elle va s’insérer.  
 En fabrication mécanique il faut choisir un procédé (machine + outil) et une méthodologie qui permettent de respecter ces spécifications.

Sur le tour utilisé, avec les moyens disponibles, quelle précision réaliste est-il possible de respecter sur le diamètre Ø 25 ? Justifier.

*Les graduations sur le tambour du mouvement transversal étant de 0.05 mm au diamètre, il n'est pas possible de réaliser un diamètre avec une précision inférieure à 50 µm.*

En mécanique, on préfère parler de qualité que de précision de manière absolue. La qualité est désigné par un chiffre (0, 1, ...15, 16). Elle correspond à un intervalle de tolérance en regard d'une dimension nominale. La position de cet intervalle de tolérance par rapport à la dimension nominale est définie par une lettre (minuscule pour les formes males et majuscule pour les formes creuses)  
Définir l'intervalle admissible pour un arbre Ø 25 g9. (cf. annexe 2)

Ø 25 g9      Ø 25  $\begin{smallmatrix} -7 \\ 59 \end{smallmatrix}$  (tolérance en µm)      Ø ∈ [24,941 ; 24,993] en mm

.....

### 3. Fraisage

Pour générer une surface avec un outil, il faut créer un mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce. Ce mouvement relatif est la combinaison de deux mouvements : un mouvement générateur (mouvement de coupe) et un mouvement directeur (mouvement d'avance).

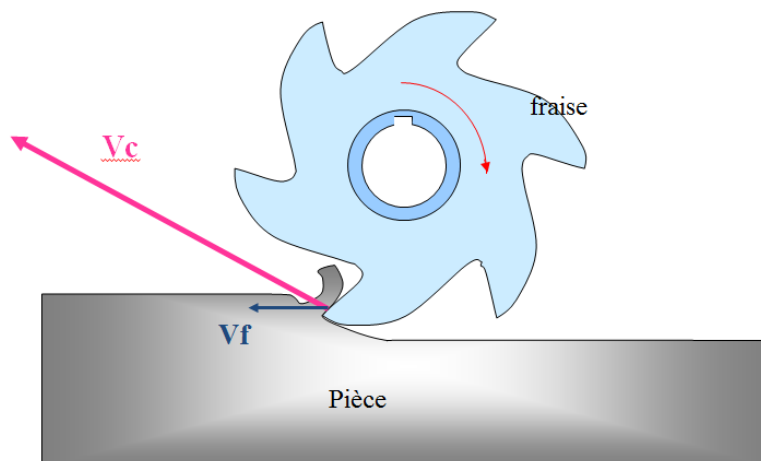


#### 3.1. Cinématique de la machine.

En fraisage :

Le mouvement de coupe est donné à :	<del>la pièce</del>	l'outil
Le mouvement d'avance est donné à :	la pièce	<del>l'outil</del>

Sur le schéma ci-dessous (opération de dressage) en considérant le mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce, tracer le vecteur vitesse de coupe et le vecteur vitesse d'avance.



### 3.1.1. La vitesse de coupe :

La vitesse de coupe : pour une durée de vie donnée, la vitesse de coupe est fonction du matériau de la pièce et du matériau de l'outil. Sur une fraiseuse, cette vitesse résulte de la fréquence de rotation à laquelle l'outil tourne.

Soit  $\omega$  (rd/s) la vitesse angulaire de l'outil « fraise ». Soit  $N$  (tr/min) la fréquence de rotation de la fraise.

Exprimer  $\omega$  en fonction de  $N$

$\omega = 2 \pi \frac{N}{60}$	avec $\omega$ (rd/s) $N$ (tr/min)
-------------------------------	--------------------------------------

Calculer alors la vitesse de coupe  $V_c$  en fonction de  $N$  lorsque la fraise a un diamètre  $D$ .

$$V_c = \omega \frac{D}{2} \quad V_c = \pi N \frac{D}{1000} \quad \text{avec } V_c \text{ (m/min)}$$

$N$  (tr/min)  
 $D$  (mm)

Application

Opération de surfacage avec outil à plaquettes en carbures métalliques  $\varnothing = 50$  mm

$N$  réglé sur la fraiseuse : 800 tr/min

$V_c = 126$  m/min

Opération de dressage avec outil en ARS  $\varnothing = 30$  mm

$N$  réglé sur le tour : 200 tr/min

$V_c = 19$  m/min

Comparer la vitesse de coupe dans le cas d'utilisation d'un outil à plaquettes en carbure métallique par rapport à la vitesse de coupe utilisée avec un outil en ARS.

$$V_c \text{ avec outil en carbure métallique} \approx 7 \cdot V_c \text{ avec outil en ARS}$$

### 3.1.2. La vitesse d'avance :

Sur la fraiseuse on règle la vitesse d'avance  $V_f$  (mm/min). En fonction du nombre de dents  $Z$  de la fraise et de la vitesse de rotation, le choix de la vitesse  $V_f$  implique une avance  $f$  à chaque tour et pour chaque dent de la fraise, telle que.  $V_f = f \cdot Z \cdot N$  avec  $f$  (mm/tr/dent)

Dans le cas des deux opérations précédentes calculer  $f$

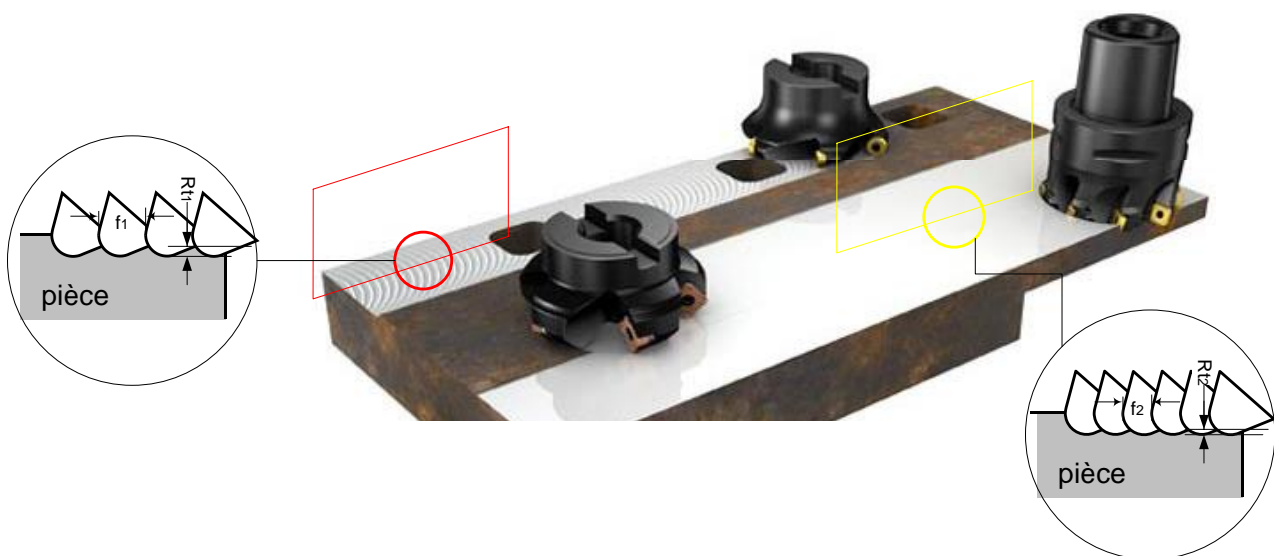
Dans le cas des deux opérations précédentes comparer  $V_f$  et  $V_c$ .

	Opération de surfacage	Opération de dressage
<b>Diamètre de la fraise Ø</b>	50 mm	30 mm
<b>Nombre de dents Z</b>	5	5
<b>N (tr/mn)</b>	800	200
<b>V<sub>c</sub> (m/min)</b>	126	19
<b>V<sub>f</sub> (mm/min)</b>	125	50
<b>f (mm/tr/dent)</b>	0,03	0,05
<b>V<sub>f</sub>/V<sub>c</sub></b>	$\approx \frac{1}{1000}$	$\approx \frac{2,6}{1000}$

Le choix de la vitesse d'avance va avoir une incidence directe sur l'état de surface (la rugosité) de la surface usinée.

On peut caractériser la rugosité par la hauteur  $R_t$  des stries laissées par l'outil sur la surface usinée

*La rugosité est une fonction croissante ~~ou décroissante~~ (barrer le qualificatif inutile) de l'avance de l'outil par rapport à la pièce.*



### 3.2. L'outil de coupe.

En fraisage l'outil de coupe est à arête multiple.

La fraise peut être un outil monobloc en acier rapide supérieur (ARS). Lorsqu'un outil de cette nature est usé, il peut être affuté.

Les parties actives de la fraise peuvent aussi être en carbure métallique. On parle alors de plaquettes qui sont positionnées et fixées sur le corps porte-plaquette. Une plaquette comporte en général plusieurs arêtes de coupe (2, 3 ou 4 selon la géométrie). Lorsque toutes les arêtes sont usées la plaquette est jetée.



*Fraise en acier rapide*



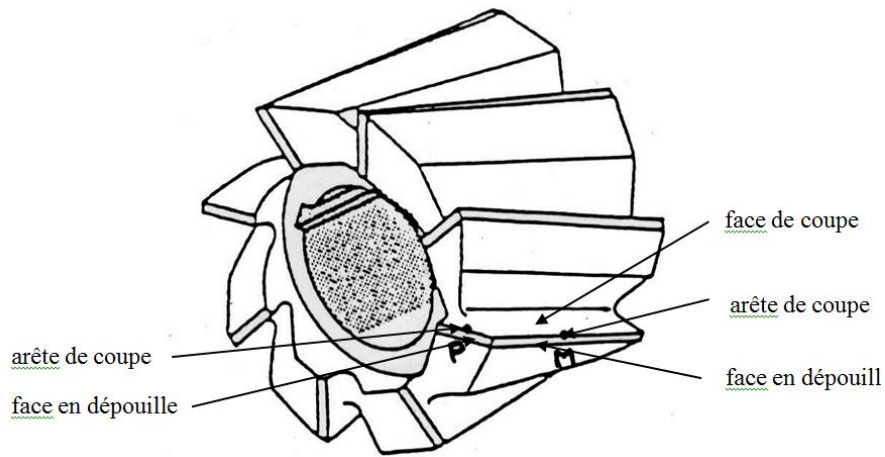
*Fraise avec plaquettes en carbure métalliques*

La fraise est montée sur un porte-outil qui permet de le monter sur la fraiseuse.

La partie active comporte trois parties essentielles :

- la face de coupe sur laquelle se déroule le copeau ;
- la face de dépouille qui est en regard de la surface qui vient d'être usinée ;
- l'arête de coupe, partie coupante qui est l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille.

Indiquer sur la figure ci-après les faces de coupe et de dépouille, ainsi que l'arête de coupe.

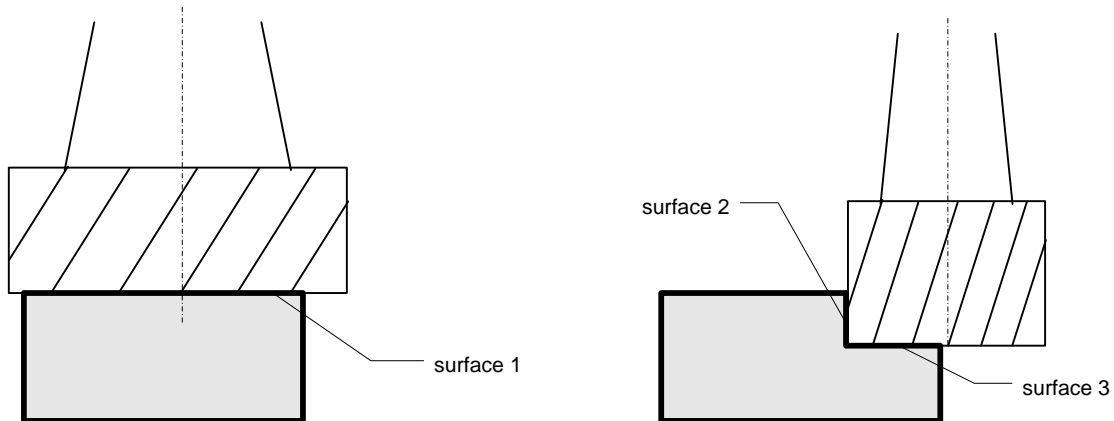


La surface usinée peut être réalisée par un travail d'enveloppe ou par un travail de forme.

Travail d'enveloppe : la surface usinée est l'enveloppe des positions de la pointe active de l'outil dans son mouvement relatif par rapport à la pièce.

Travail de forme : la forme de l'arête de coupe est reproduite sur la surface usinée de la pièce.

Dans les différents cas schématisés ci-après, préciser si les surfaces sont obtenues en travail d'enveloppe ou en travail de forme.



opérations		Travail de forme	Travail d'enveloppe
surfaçage	surface 1		X
réalisation d'un épaulement	surface 2	X	
	surface 3		X

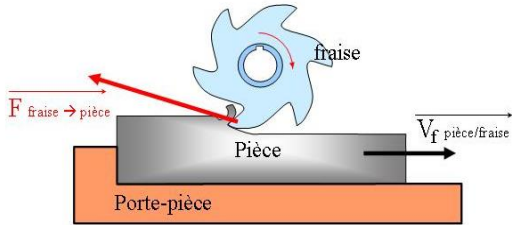
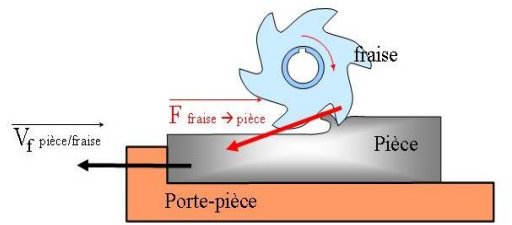
	Travail de forme	Travail d'enveloppe
Avantages	Reproduit exactement la forme de l'arête Possibilité d'obtenir des géométries complexes	La qualité de la surface générée dépend de la (bonne) précision géométrique de la machine
Inconvénients	Reproduit exactement la forme de l'arête (y compris les défauts) Efforts de coupe importants	Rugosité fonction du rayon de bec de l'outil et de l'avance $f$

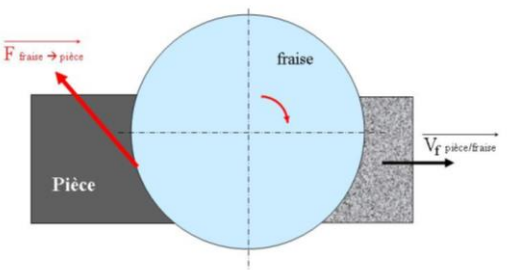
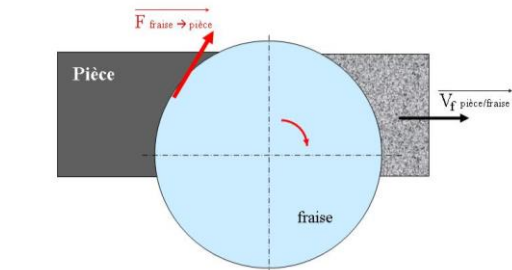


### 3.3. Les modes de travail en fraisage.

Au niveau des différents mouvements de translation, c'est un dispositif vis-écrou qui permet la transformation du mouvement de rotation (généré par le moteur) en mouvement de translation. Ce dispositif possède un jeu interne. Pour éviter qu'il y ait un brusque rattrapage de ce jeu lors de l'usinage, il faut veiller à ce que l'effort exercé par la fraise sur la pièce soit opposé à la vitesse d'avance de la pièce par rapport à la fraise. On dit qu'il faut travailler en « opposition » et pas en « concordance ».

Dans les quatre cas schématisés ci-dessous indiquer quel est le mode de travail : opposition ou concordance ?

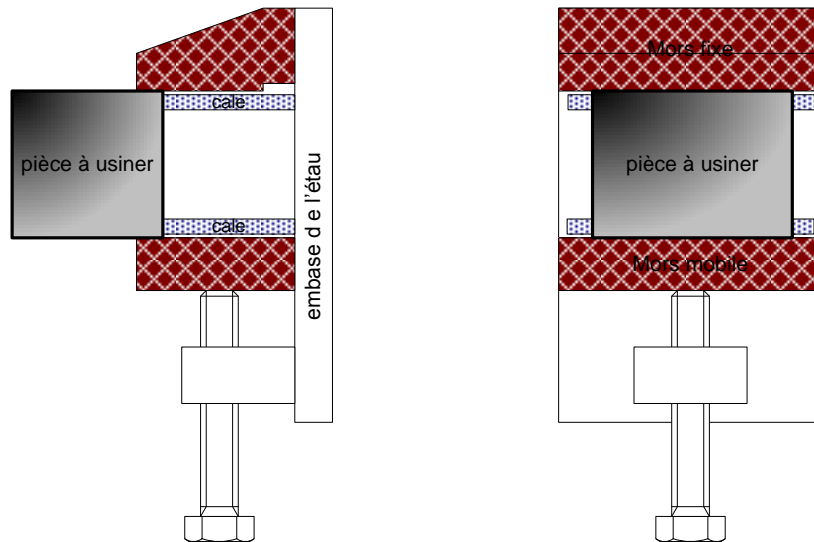
<b>Travail de profil</b>		
<b>Mode de fraisage</b>	<i>Travail en opposition</i>	<i>Travail en concordance</i>

<b>Travail de face</b>		
<b>Mode de fraisage</b>	<i>Travail en opposition</i>	<i>Travail en concordance</i>

### 3.4. La mise en position de la pièce.

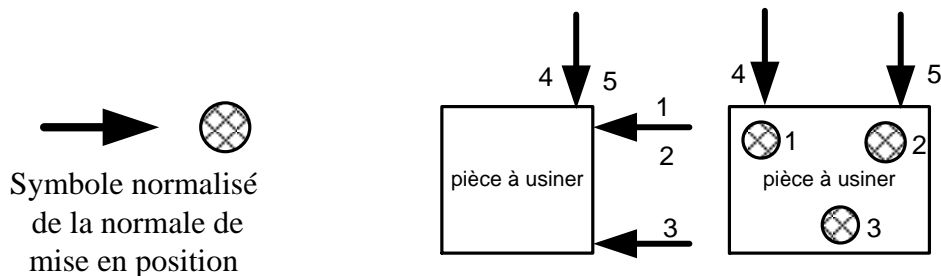
Le porte pièce utilisée ici est un étau à mors parallèle.

Sur le schéma ci-dessous indiquer quelles sont les surfaces qui participent à la mise en position de la pièce. Indiquer quelles sont les liaisons réalisées par chacune de ces surfaces. Schématiser cette mise en position en utilisant les normales de repérage.



Appui plan : 1 – 2 – 3

linéaire rectiligne : 4 - 5



### 3.5. Analyse des dispersions de mise en position.

Lors de la mesure effectuée avec le comparateur après l'opération de surfacage (étape 4 et 5 du TP), quel est l'écart lu sur le comparateur lorsque que vous déplacez la pièce.

Que pouvez-vous conclure quant à la qualité (planéité) et l'orientation de la surface fraisée par rapport au plan XY de déplacement de la table.

*La surface fraisée a un très faible écart de planéité. Elle est aussi parallèle au plan XY de déplacement de la table*

Si plusieurs surfaces planes sont usinées sans démontage de pièce, que pouvez-vous dire de leur position relative ?

*Les spécifications de position relatives entre ces surfaces ne dépendent alors que de la « précision » de la machine ; elles sont donc réalisées très précisément.*

La tête de la fraiseuse peut être réglée de manière à ce que l'axe de rotation de la broche soit perpendiculaire au plan XY de déplacement de la table.

Que pouvez-vous dire de l'orientation d'une surface fraisée de face par rapport à une surface fraisée de profil, sans démontage de la pièce.

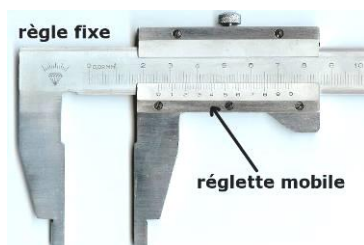
*Dans ces conditions les surfaces sont perpendiculaires, avec un écart qui est dû essentiellement à la qualité géométrique de la fraise ; il peut donc être très faible*

Lorsque vous faites cette même mesure au comparateur après un démontage et un remontage de la pièce, quel est l'écart lu sur le comparateur lorsque que vous déplacez le comparateur sur la surface usinée.

Quelles sont les causes de cet écart.

*L'écart est dû aux dispersions de remise en position.*

### 3.6. Analyse des spécifications obtenues sur la pièce



*Pied à coulisse*



*Micromètre*



*Comparateur*



*Pied de profondeur*

Tableau de mesures

	lg 78,5	lg 38	lg 35	lg 11	lg 76	Ø10,5	⊥ 1/4	⊥ 1/4
Mesure au pied à coulisse								
Mesure au pied de profondeur								
Mesure au micromètre								
Mesure au comparateur								

La pièce usinée est elle conforme au modèle qui est représenté sur le schéma ?

.....

Que manque t-il sur le modèle pour en faire un dessin de définition ?

*Il manque les tolérances dimensionnelles et les spécifications géométriques.*

Les spécifications qui figurent sur un dessin de définition définissent la valeur nominale de la spécification mais également l'intervalle de tolérance.

Ces spécifications sont définies à partir des exigences fonctionnelles qui doivent être respectées sur la pièce pour qu'elle puisse remplir sa fonction dans le mécanisme où elle va s'insérer.

En fabrication mécanique il faut choisir un procédé (machine + outil) et une méthodologie qui permettent de respecter ces spécifications.

Sur fraiseuse utilisée, avec les moyens disponibles, quelle précision réaliste est-il possible de respecter sur la longueur 35 ? Sur la longueur 76 ? Justifier.

*La longueur 76 mm est obtenue entre 2 surfaces usinées, avec un démontage, mais avec une reprise sur une surface usinée. Il n'est pas possible de réaliser une précision inférieure à 0,1 mm*

*La longueur 35 mm est obtenue entre une surface brute et une surface usinée. La précision sur cette dimension est très largement fonction de la qualité du brut. Dans notre cas on peut raisonnablement espérer une précision de l'ordre de 0,3 mm*

En mécanique, on préfère parler de qualité que de précision de manière absolue. La qualité est désigné par un chiffre (0, 1, ...15, 16). Elle correspond à un intervalle de tolérance en regard d'une dimension nominale. La position de cet intervalle de tolérance par rapport à la dimension nominale est définie par une lettre (minuscule pour les formes males et majuscule pour les formes creuses)

Définir l'intervalle admissible une dimension 35 g11. (cf. annexe 2)

35 g11	$35 \begin{smallmatrix} - \\ 9 \end{smallmatrix}_{169}$ (en $\mu\text{m}$ )	dimension $\in [34,831 ; 34,991]$ (en mm)
--------	---	---

.....

.....

## 4. Annexe 1 : symbolisation des liaisons élémentaires

Nom de liaison	Degrés de liberté éliminés	Représentation à l'aide normales	Exemples pratiques
Liaison ponctuelle	1		
Liaison linéaire rectiligne	2		
Liaison linéaire annulaire	2		
Liaison appui-plan	3		
Liaison rotule	3		
Liaison pivot glissant	4		
Liaison pivot	5		
Liaison pivot	5		
Liaison glissière hélicoïdale	5		

## 5. Annexe 2 : ajustements normalisés.

<b>Principales qualités ou tolérances (IT) ISO</b> <i>(IT en micromètre : <math>1\mu\text{m} = 0.001\text{ mm}</math>)</i>													
dimensions nominales en mm													
au-delà de $\longrightarrow$	1	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400
à (inclus) $\longrightarrow$	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500
<b>IT5</b>	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
<b>IT6</b>	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
<b>IT7</b>	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
<b>IT8</b>	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
<b>IT9</b>	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
<b>IT10</b>	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
<b>IT11</b>	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
<b>IT12</b>	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
<b>IT13</b>	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970



Arbres	Jusqu'à 3 inclus	3 à 6 inclus	6 à 10	10 à 18	18 à 30	30 à 50	50 à 80	80 à 120	120 à 180	180 à 250	250 à 315	315 à 400	400 à 500
a 11	- 270 - 330	- 270 - 345	- 280 - 370	- 290 - 400	- 300 - 430	- 320 - 470	- 360 - 530	- 410 - 600	- 580 - 710	- 820 - 950	- 1 050 - 1 240	- 1 350 - 1 560	- 1 650 - 1 900
c 11	- 60 - 120	- 70 - 145	- 80 - 170	- 95 - 205	- 110 - 240	- 130 - 280	- 150 - 330	- 180 - 390	- 230 - 450	- 280 - 530	- 330 - 620	- 400 - 720	- 480 - 840
d 9	- 20 - 45	- 30 - 60	- 40 - 75	- 50 - 93	- 65 - 117	- 80 - 142	- 100 - 174	- 120 - 207	- 145 - 245	- 170 - 285	- 190 - 320	- 210 - 350	- 230 - 385
d 10	- 20 - 60	- 30 - 78	- 40 - 98	- 50 - 120	- 65 - 149	- 80 - 180	- 100 - 220	- 120 - 250	- 145 - 305	- 170 - 355	- 190 - 400	- 210 - 440	- 230 - 480
d 11	- 20 - 80	- 30 - 105	- 40 - 130	- 50 - 160	- 65 - 195	- 80 - 240	- 100 - 290	- 120 - 340	- 145 - 395	- 170 - 460	- 190 - 510	- 210 - 570	- 230 - 630
e 7	- 14 - 24	- 20 - 32	- 25 - 40	- 32 - 50	- 40 - 61	- 50 - 75	- 60 - 90	- 72 - 107	- 85 - 125	- 100 - 146	- 110 - 162	- 125 - 182	- 135 - 198
e 8	- 14 - 28	- 20 - 38	- 25 - 47	- 32 - 59	- 40 - 73	- 50 - 89	- 60 - 106	- 72 - 126	- 85 - 148	- 100 - 172	- 110 - 191	- 125 - 214	- 135 - 232
e 9	- 14 - 39	- 20 - 50	- 25 - 61	- 32 - 75	- 40 - 92	- 50 - 112	- 60 - 134	- 72 - 159	- 85 - 185	- 100 - 215	- 110 - 240	- 125 - 265	- 135 - 290
f 6	- 6 - 12	- 10 - 18	- 13 - 22	- 16 - 27	- 20 - 33	- 25 - 41	- 30 - 49	- 36 - 58	- 43 - 68	- 50 - 79	- 56 - 88	- 62 - 98	- 68 - 108
f 7	- 6 - 16	- 10 - 22	- 13 - 28	- 16 - 34	- 20 - 41	- 25 - 50	- 30 - 60	- 36 - 71	- 43 - 83	- 50 - 96	- 56 - 106	- 62 - 119	- 68 - 131
f 8	- 6 - 20	- 10 - 28	- 13 - 35	- 16 - 43	- 20 - 53	- 25 - 64	- 30 - 76	- 36 - 90	- 43 - 106	- 50 - 122	- 56 - 137	- 62 - 151	- 68 - 165
g 5	- 2 - 6	- 4 - 9	- 5 - 11	- 6 - 14	- 7 - 16	- 9 - 20	- 10 - 23	- 12 - 27	- 14 - 32	- 15 - 35	- 17 - 40	- 18 - 43	- 20 - 47
g 6	- 2 - 8	- 4 - 12	- 5 - 14	- 6 - 17	- 7 - 20	- 9 - 25	- 10 - 29	- 12 - 34	- 14 - 39	- 15 - 44	- 17 - 49	- 18 - 54	- 20 - 60
h 5	0 - 4	0 - 5	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 15	0 - 18	0 - 20	0 - 23	0 - 25	0 - 27
h 6	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 16	0 - 19	0 - 22	0 - 25	0 - 29	0 - 32	0 - 36	0 - 40
h 7	0 - 10	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25	0 - 30	0 - 35	0 - 40	0 - 46	0 - 52	0 - 57	0 - 63
h 8	0 - 14	0 - 18	0 - 22	0 - 27	0 - 33	0 - 39	0 - 46	0 - 54	0 - 63	0 - 72	0 - 81	0 - 89	0 - 97
h 9	0 - 25	0 - 30	0 - 36	0 - 43	0 - 52	0 - 62	0 - 74	0 - 87	0 - 100	0 - 115	0 - 130	0 - 140	0 - 155
h 10	0 - 40	0 - 48	0 - 58	0 - 70	0 - 84	0 - 100	0 - 120	0 - 140	0 - 160	0 - 185	0 - 210	0 - 230	0 - 250
h 11	0 - 60	0 - 75	0 - 90	0 - 110	0 - 130	0 - 160	0 - 190	0 - 220	0 - 250	0 - 290	0 - 320	0 - 360	0 - 400
h 13	0 - 140	0 - 180	0 - 220	0 - 270	0 - 330	0 - 390	0 - 460	0 - 540	0 - 630	0 - 720	0 - 810	0 - 890	0 - 970
j 6	+ 4 - 2	+ 6 - 2	+ 7 - 2	+ 8 - 3	+ 9 - 4	+ 11 - 5	+ 12 - 7	+ 13 - 9	+ 14 - 11	+ 16 - 13	+ 16 - 16	+ 18 - 18	+ 20 - 20
js 5	± 2	± 2,5	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 7,5	± 9	± 10	± 11,5	± 12,5	± 13,5
js 6	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 8	± 9,5	± 11	± 12,5	± 14,5	± 16	± 18	± 20
js 9	± 12	± 15	± 18	± 21	± 26	± 31	± 37	± 43	± 50	± 57	± 65	± 70	± 77
js 11	± 30	± 37	± 45	± 55	± 65	± 80	± 95	± 110	± 125	± 145	± 160	± 180	± 200
k 5	+ 4 0	+ 6 + 1	+ 7 + 1	+ 9 + 1	+ 11 + 2	+ 13 + 2	+ 15 + 2	+ 18 + 3	+ 21 + 3	+ 24 + 4	+ 27 + 4	+ 29 + 4	+ 32 + 5
k 6	+ 6 0	+ 9 + 1	+ 10 + 1	+ 12 + 1	+ 15 + 2	+ 18 + 2	+ 21 + 2	+ 25 + 3	+ 28 + 3	+ 33 + 4	+ 36 + 4	+ 40 + 4	+ 45 + 5
m 5	+ 6 + 2	+ 9 + 4	+ 12 + 6	+ 15 + 7	+ 17 + 8	+ 20 + 9	+ 24 + 11	+ 28 + 13	+ 33 + 15	+ 37 + 17	+ 43 + 20	+ 46 + 21	+ 50 + 23
m 6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 15 + 6	+ 18 + 7	+ 21 + 8	+ 25 + 9	+ 30 + 11	+ 35 + 13	+ 40 + 15	+ 46 + 17	+ 52 + 20	+ 57 + 21	+ 63 + 23
n 6	+ 10 + 4	+ 16 + 8	+ 19 + 10	+ 23 + 12	+ 28 + 15	+ 33 + 17	+ 39 + 20	+ 45 + 23	+ 52 + 27	+ 60 + 31	+ 66 + 34	+ 73 + 37	+ 80 + 40
p 6	+ 12 + 6	+ 20 + 12	+ 24 + 15	+ 29 + 18	+ 35 + 22	+ 42 + 26	+ 51 + 32	+ 59 + 37	+ 68 + 43	+ 79 + 50	+ 88 + 56	+ 98 + 62	+ 108 + 68