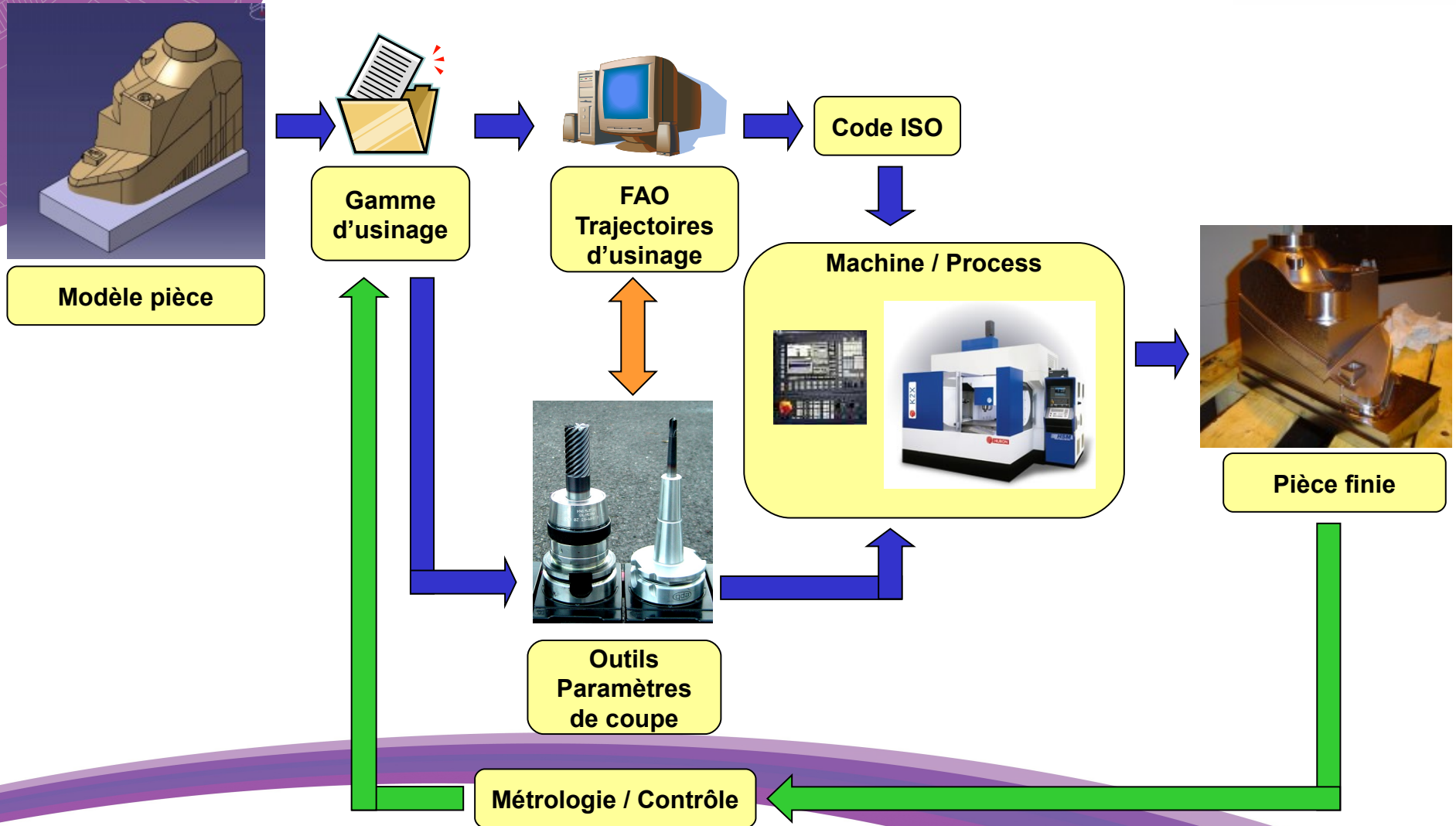




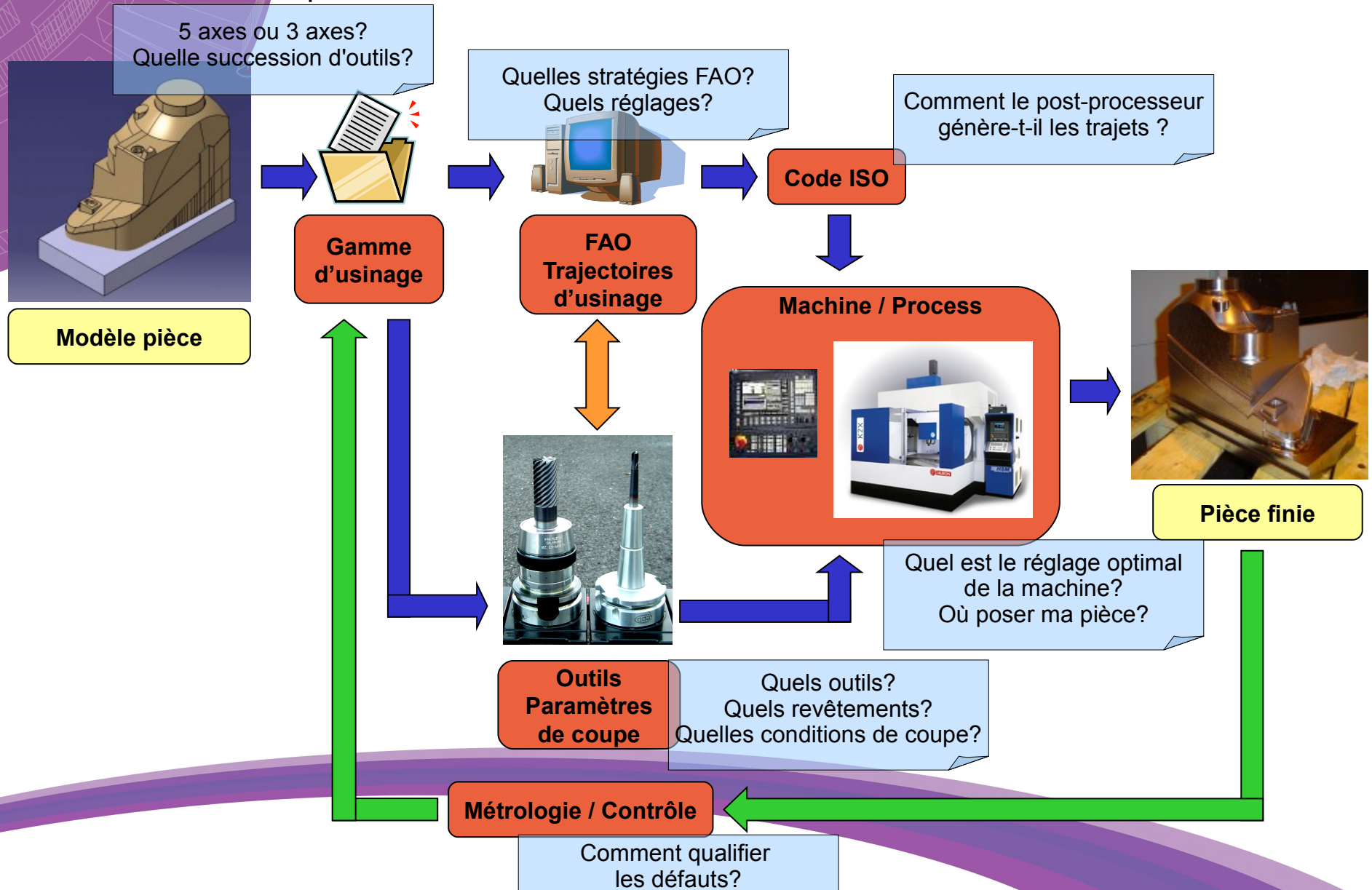
Stratégies et techniques d'usinage pour l'amélioration de l'état de surface

Processus de fabrication d'une pièce mécanique

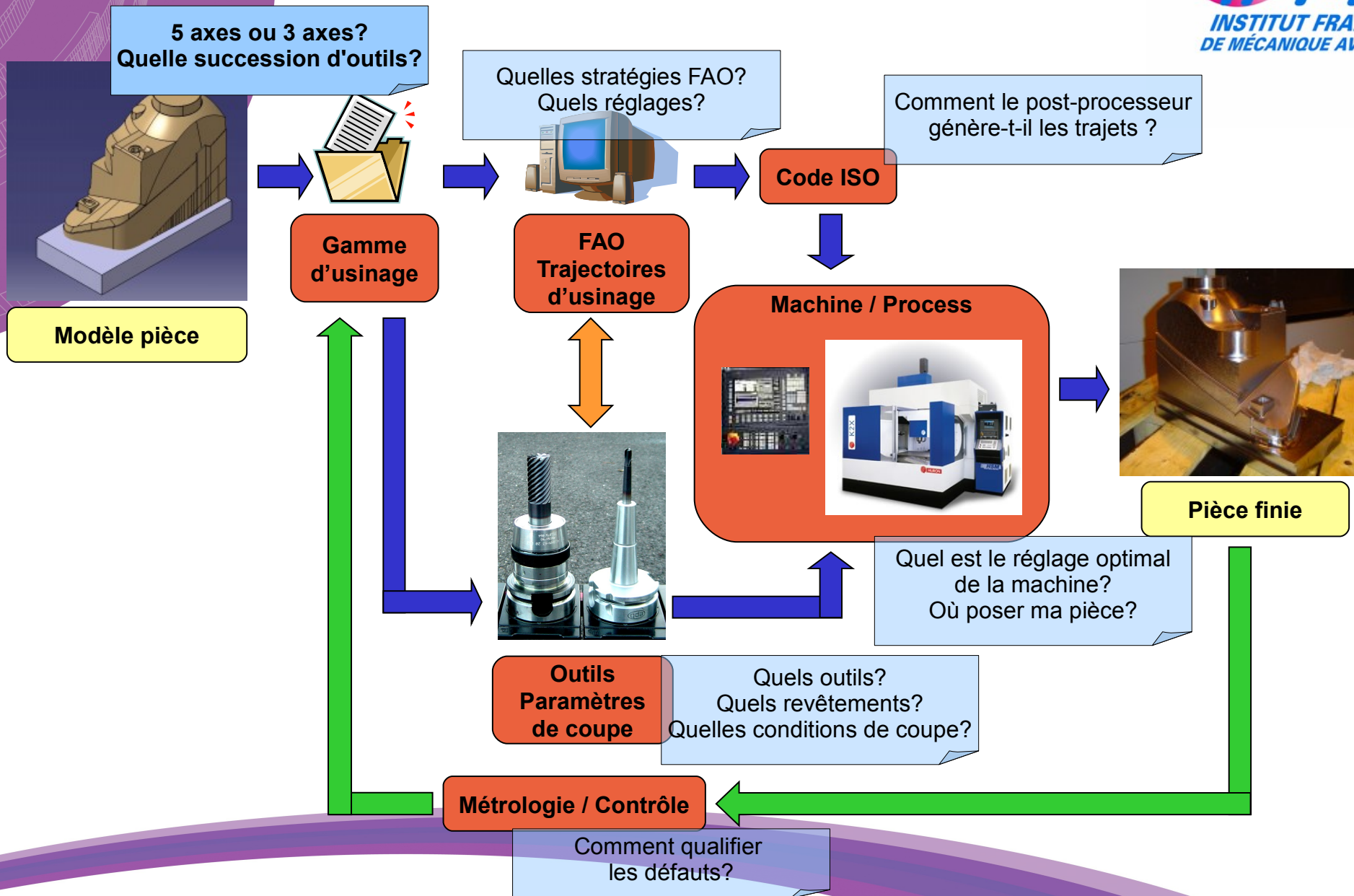


Où se poser la question de l'état de surface?

Quelles vont être dans ce processus complexe les points clefs qui vont permettre la maîtrise de l'état de surface de la pièce finie?



Où se poser la question de l'état de surface?

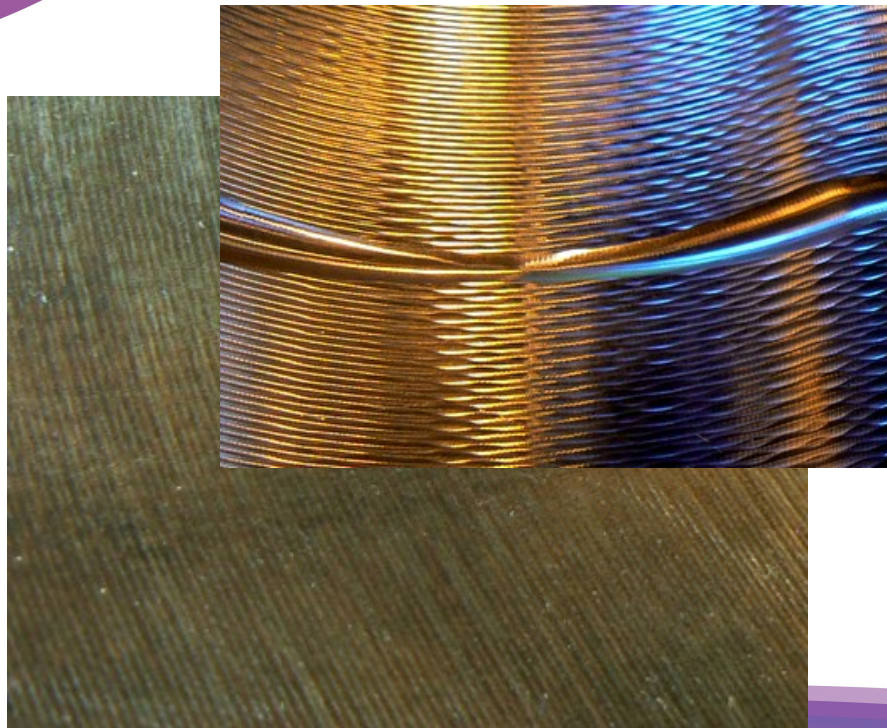


La gamme d'usinage

Deux points clefs sont à évaluer à ce stade: la pertinence de l'usinage multiaxes, et la succession des outils et leurs dimensions

Usinage 3 axes ou 5 axes?

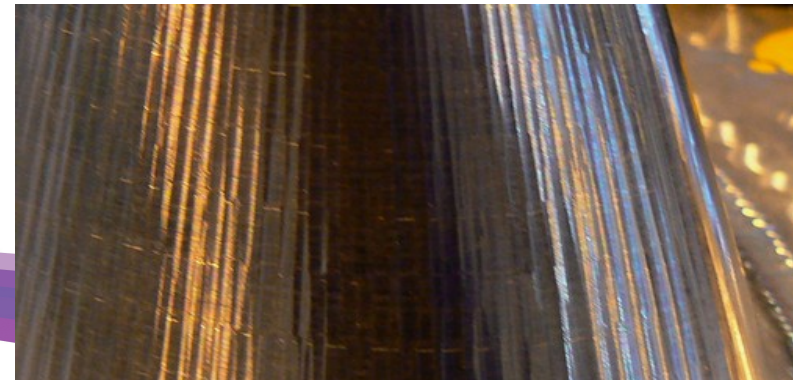
Deux stratégies distinctes existent en usinage 5 axes: l'usinage en bout et l'usinage en roulant qui vont générer des défauts de surface particuliers différents de ceux obtenus en balayage 3 axes. Le fait de passer en usinage multiaxes peut permettre de réduire la longueur des outils, donc de réduire les vibrations et d'augmenter la distance entre passes.



Défauts en balayage 3 axes à la fraise hémisphérique



Défaut en balayage 5 axes à la fraise torique en bout



Défaut en balayage 5 axes à la fraise torique en flanc

Usinage 5 axes / 3 axes en bout

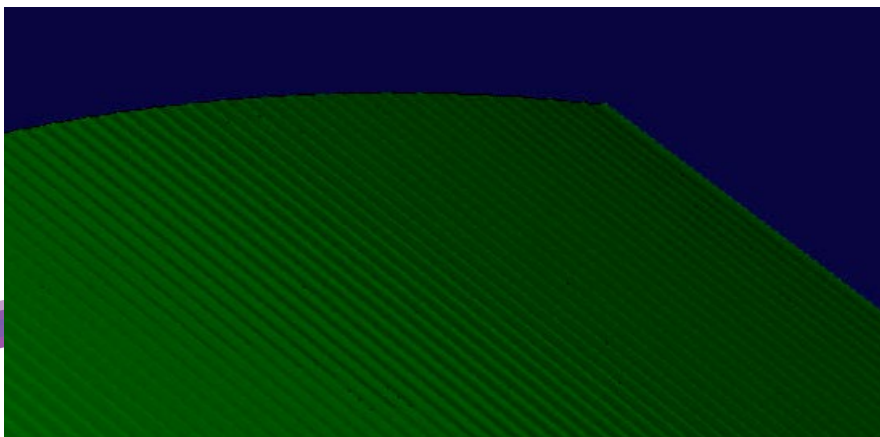
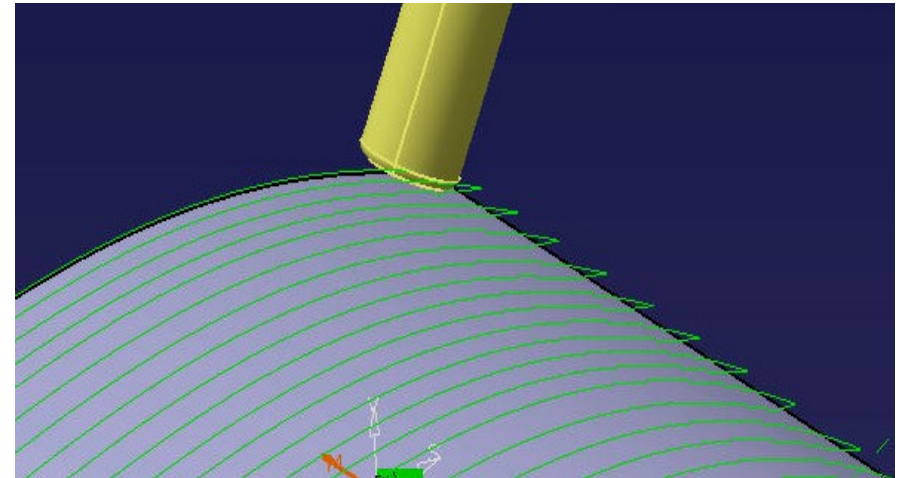
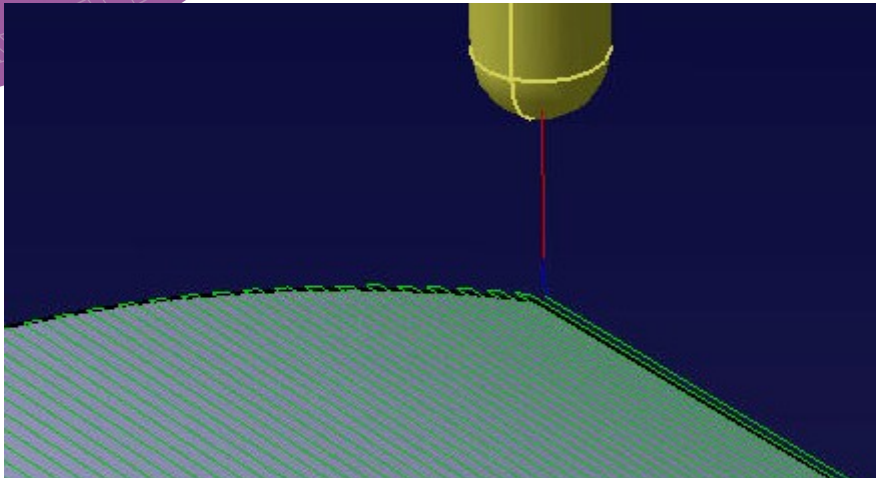
L'usinage en bout va être adapté à la finition de surfaces galbées avec des rayons de courbure importants. L'usinage multiaxe va générer des défauts de nature différente.

Finition avec outil diamètre 20mm
Hcrête 0,1mm – Tol usinage 0,01mm

Fraise hémisphérique diamètre 20mm
Temps FAO: 5min 16s

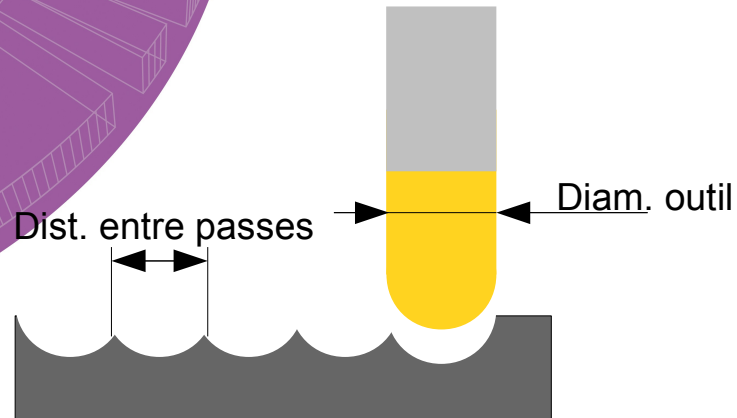
-62%

Fraise torique diamètre 20mm Rc 2mm
Temps FAO: 2min 1s



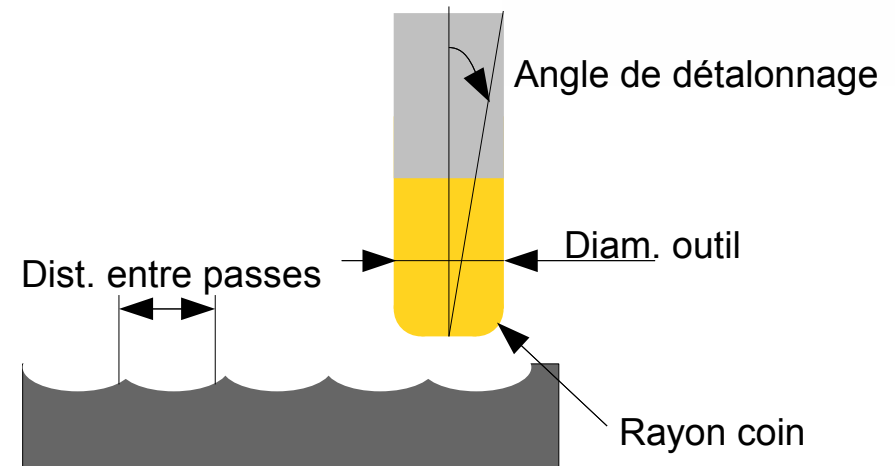
Usinage 5 axes / 3 axes en bout

Les motifs de l'état de surface vont être différents, mais aussi les paramètres qui vont influencer sur la hauteur de crête.



En balayage 3 axes, le profil est une suite d'arcs de cercle
Il dépend:

- du diamètre de l'outil
- de la distance entre passes
- du rayon de courbure du profil



En balayage 5 axes, le profil est une suite d'arcs d'ellipse
Il dépend:

- du diamètre de l'outil
- de la distance entre passes
- du rayon de courbure du profil
- du rayon de coin de l'outil
- de l'angle de détalonnage

Quelques valeurs de hauteur de crête théorique en mm pour une distance entre passes de 2mm

Courbure	Fr. Boule 20mm	Fr. Droite 20mm		
		Dét. 2°	Dét. 5°	Dét. 10°
100mm	0,055	0,007	0,009	0,014
500mm	0,051	0,003	0,005	0,010
1000mm	0,051	0,002	0,005	0,010

Usinage 5 axes / 3 axes en flanc

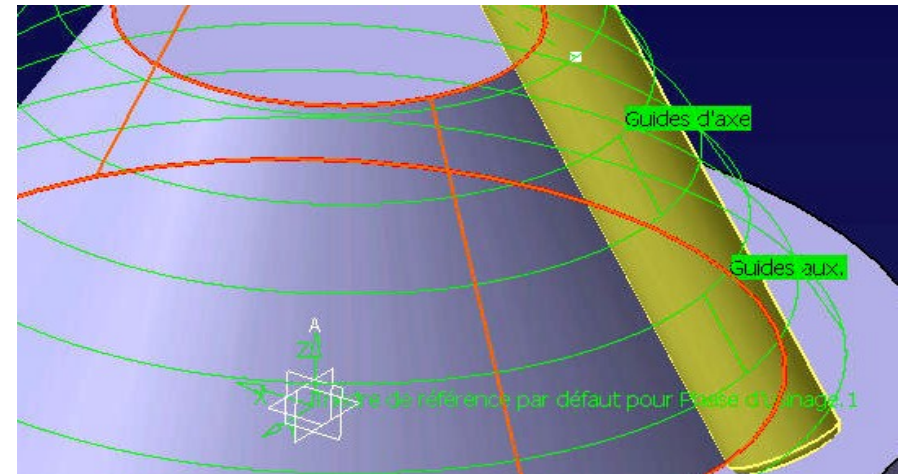
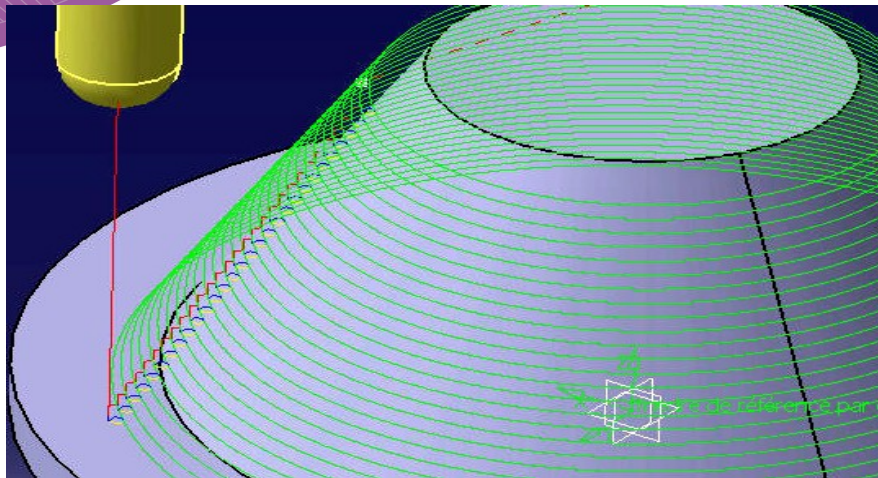
L'usinage en flanc va être adapté à la finition de surfaces réglées développables avec peu de raccordements. L'usinage multiaxe va générer, là encore, des défauts de nature différente: des cuvettes Selon la direction d'avance en 3 axes, des marques selon l'axe outil en 5 axes.

Finition avec outil diamètre 20mm
Hcrête 0,1mm – Tol usinage 0,01mm

Fraise hémisphérique diamètre 20mm
Temps FAO: 3min 57s

-77%

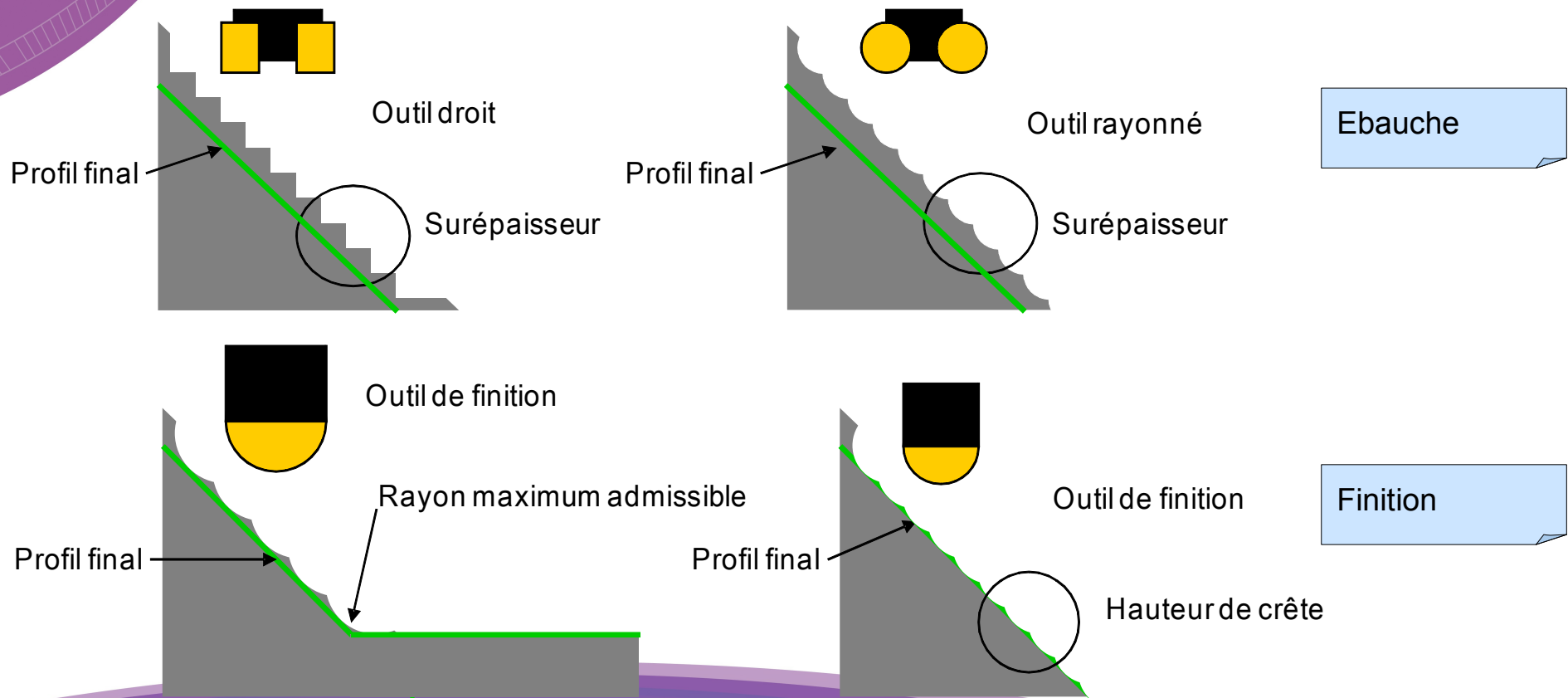
Fraise torique diamètre 20mm Rc 2mm
Temps FAO: 55s



Succession des outils

Le choix de l'outil d'ébauche ou de demi-finition va conditionner la surépaisseur laissée pour la finition. Plus le travail de l'outil de finition se fera à immersion constante plus l'état de surface sera Homogène.

Il faut préférer des outils toriques de diamètre important avec un petit rayon de coin à une fraise hémisphérique de petit diamètre, donc peu rigide.

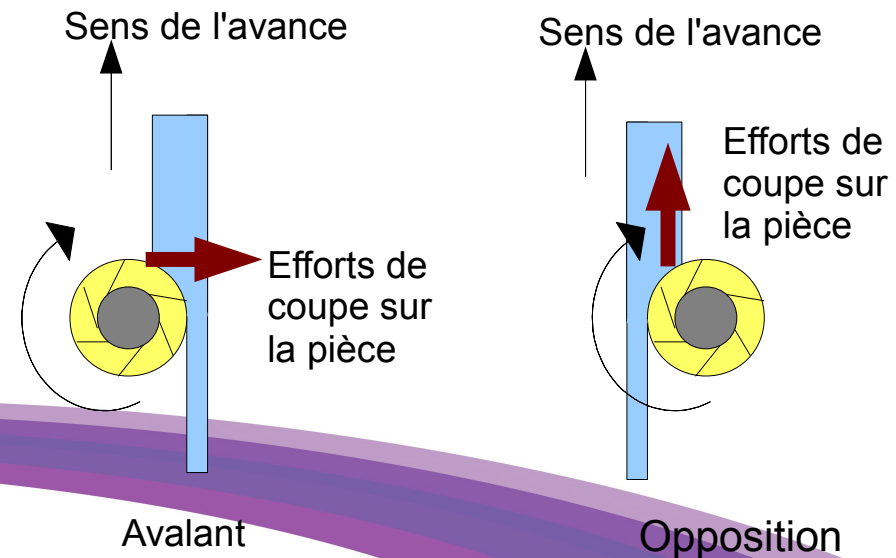
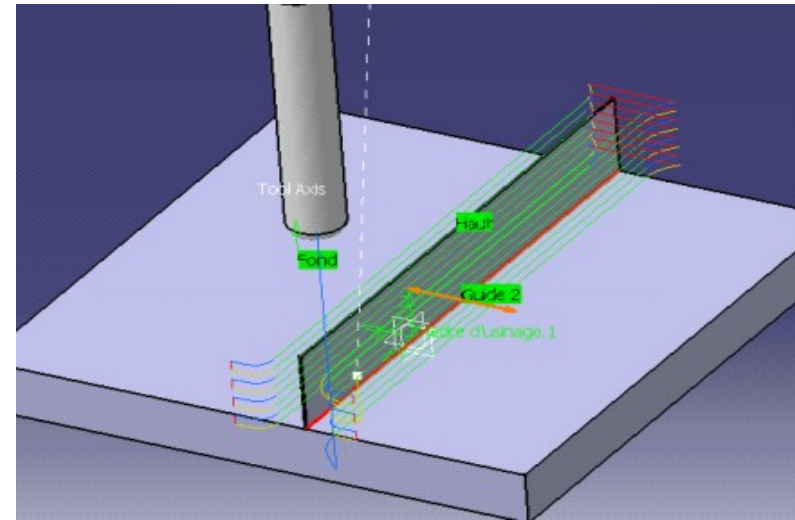


Cas particulier de l'usinage de voiles minces

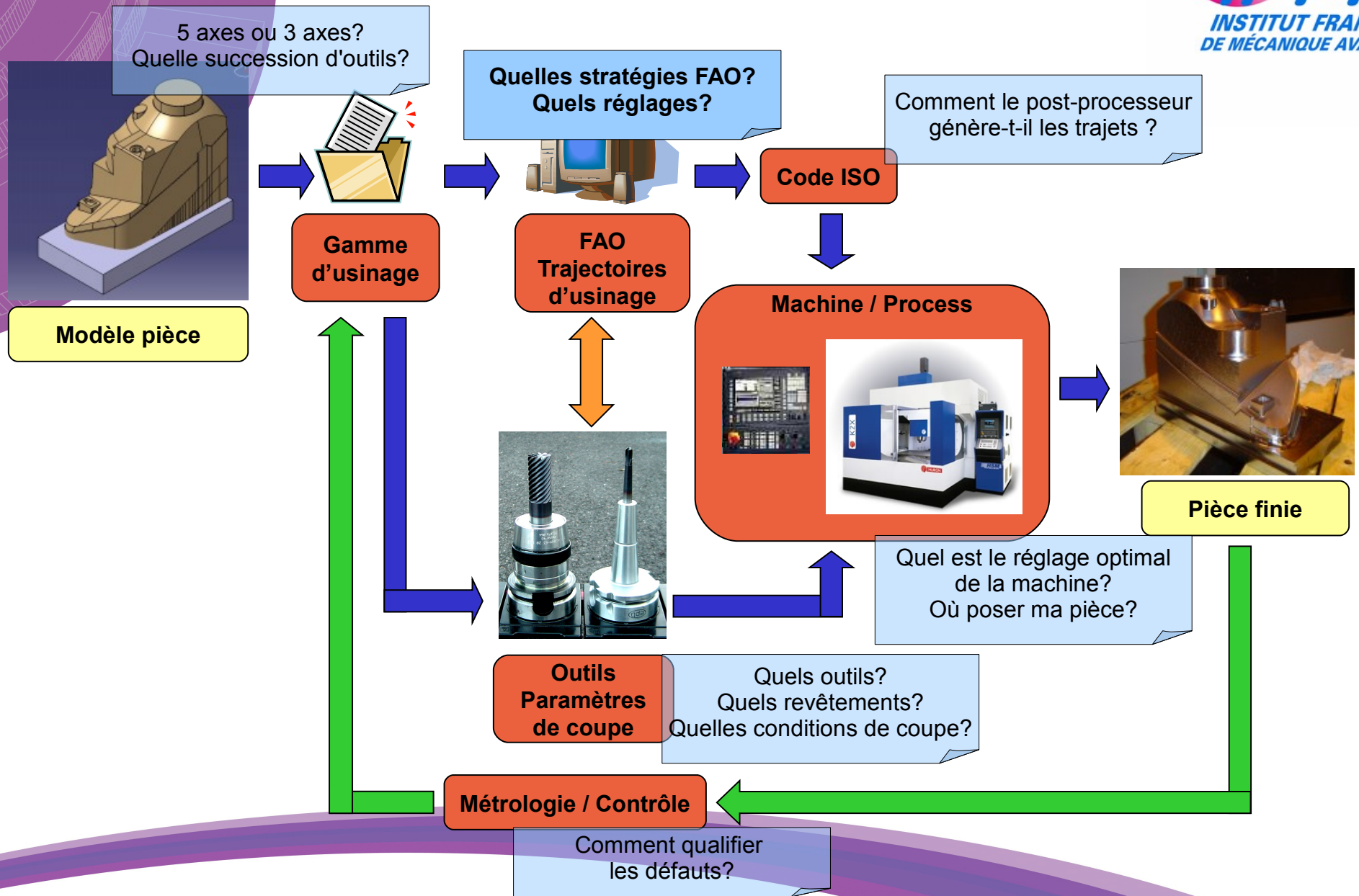
Certaines géométries spécifiques réclament une attention particulière pour obtenir un état de surface correct. Par exemple l'usinage de voiles minces qui ont une forte tendance à vibrer, et donc, dont les faces latérales sont souvent détériorées.

Quelques règles de base

- Trajectoires à Z constant le long du voile
Ébauche et finition à chaque niveau
- Usinage en opposition dans le sens de rigidité du voile
- Entrées en matière à la même profondeur avec approche en tangence suivant un arc de cercle défini
- Sortie en tangence suivant un arc de cercle
- Optimisation des distances de dégagement et de retrait pour minimiser les parcours hors matière



Où se poser la question de l'état de surface?



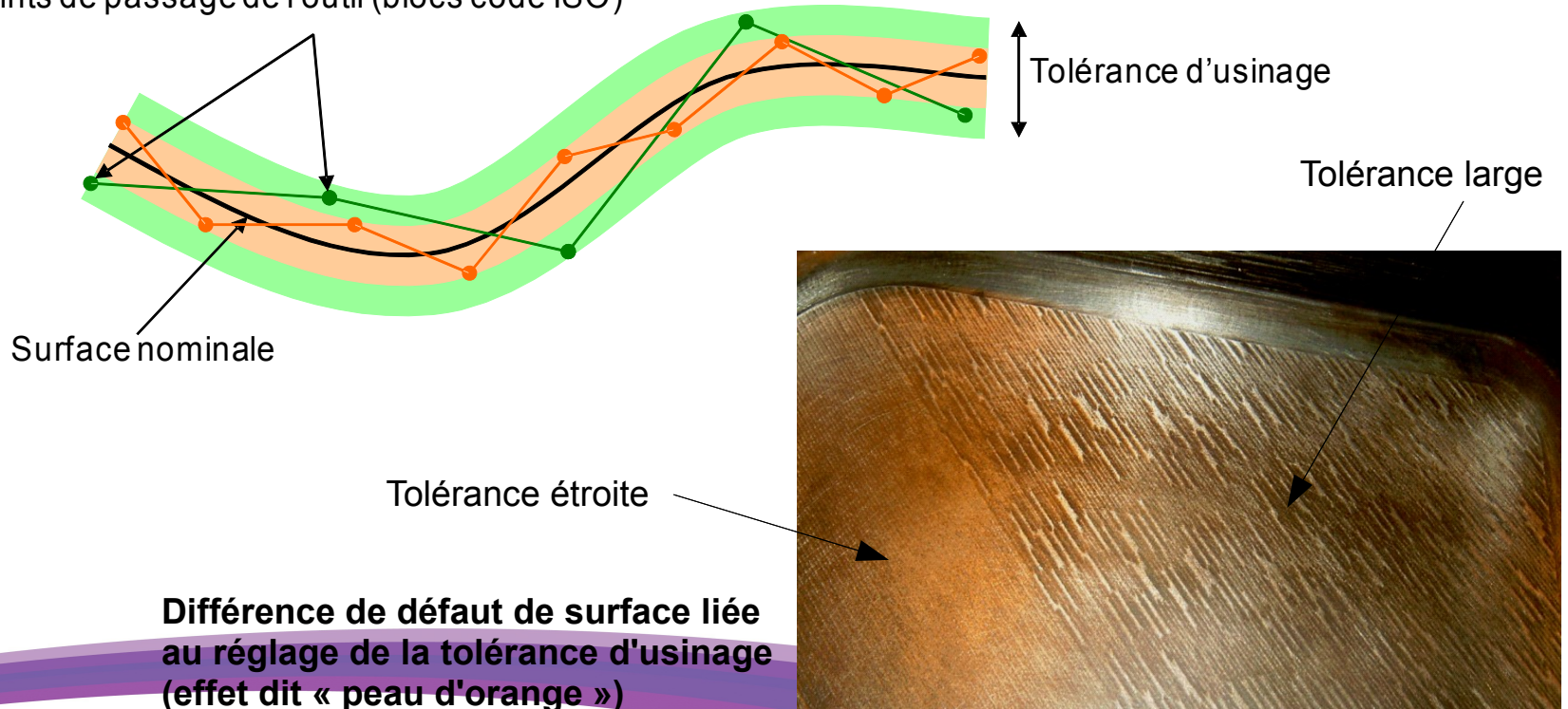
La programmation FAO

Deux paramètres FAO particulièrement influents sont à ajuster
Au moment de la programmation des trajets FAO pour maîtriser
l'état de surface: les tolérances et la direction des trajets pour les
opérations de balayage.

La tolérance d'usinage

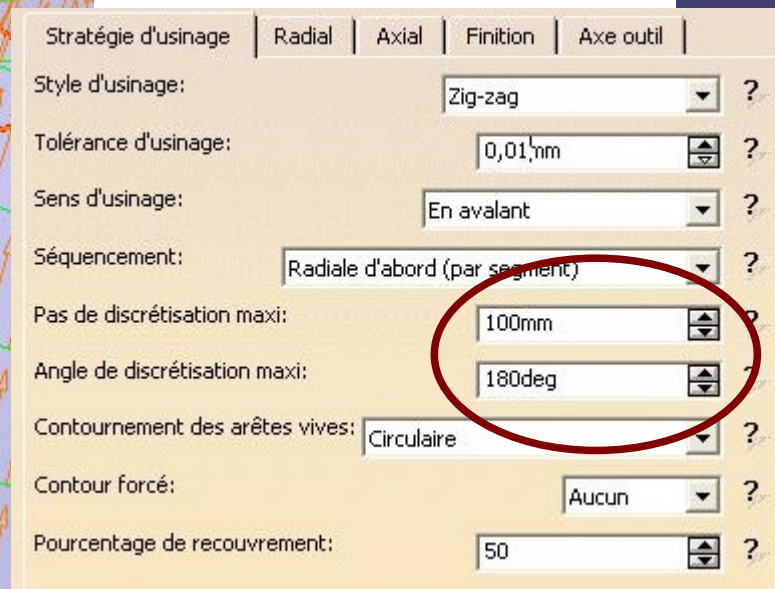
Elle devra être suffisamment étroite pour éviter les phénomènes de facettisation et pas
trop étroite pour ne pas ralentir la machine. Précision et vitesse sont antinomiques et
leur choix est forcément le résultat d'un compromis.

Points de passage de l'outil (blocs code ISO)



La tolérance d'orientation d'outil

En usinage 5 axes continu, une autre tolérance devra être réglée en FAO: la tolérance de l'orientation de l'axe de l'outil. Un mauvais réglage entrainera des réorientations saccadées, mais garantira une vitesse de parcours élevée: là encore, tout est histoire de compromis.

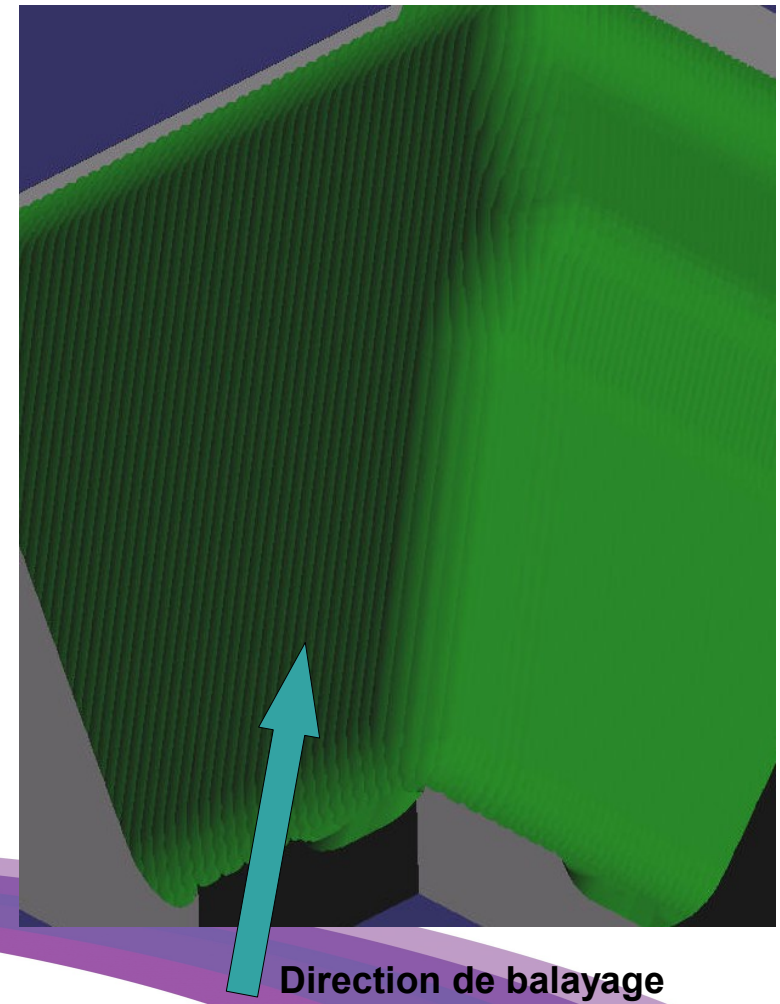
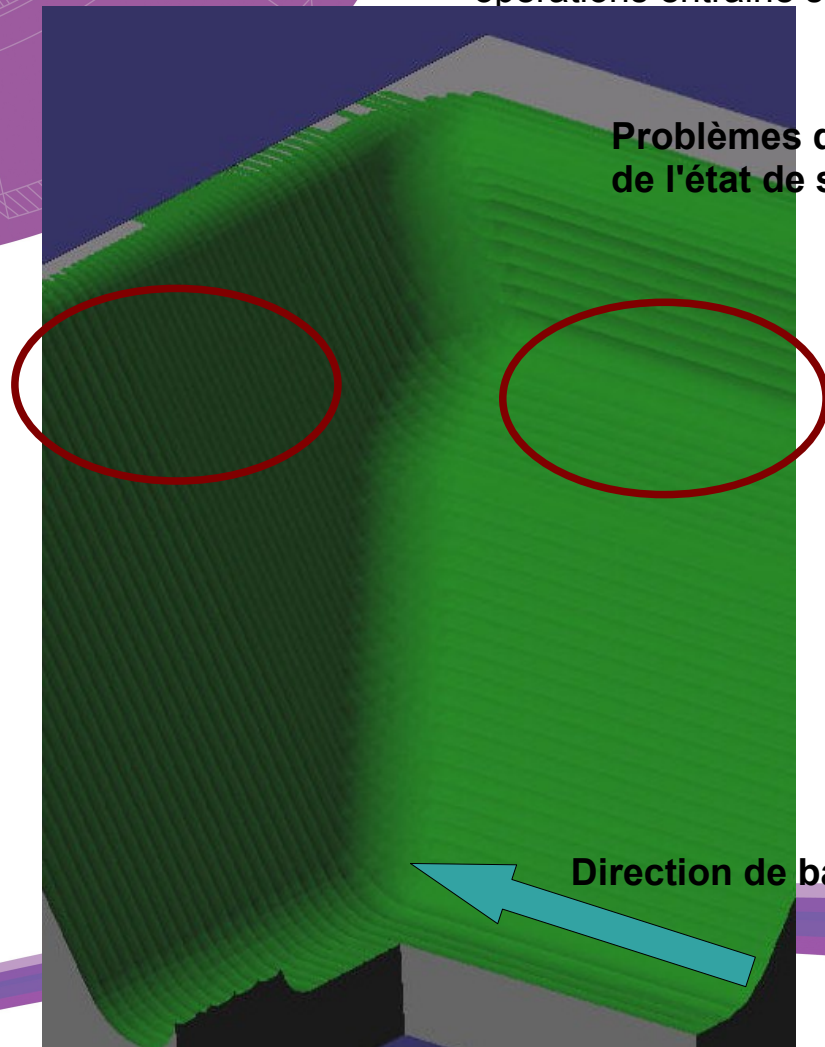


Stratégie d'usinage	Radial	Axial	Finition	Axe outil
Style d'usinage:	Zig-zag			
Tolérance d'usinage:	0,01mm			
Sens d'usinage:	En avalant			
Séquencement:	Radiale d'abord (par segment)			
Pas de discrétisation maxi:	100mm			
Angle de discrétisation maxi:	180deg			
Contournement des arêtes vives:	Circulaire			
Contour forcé:	Aucun			
Pourcentage de recouvrement:	50			

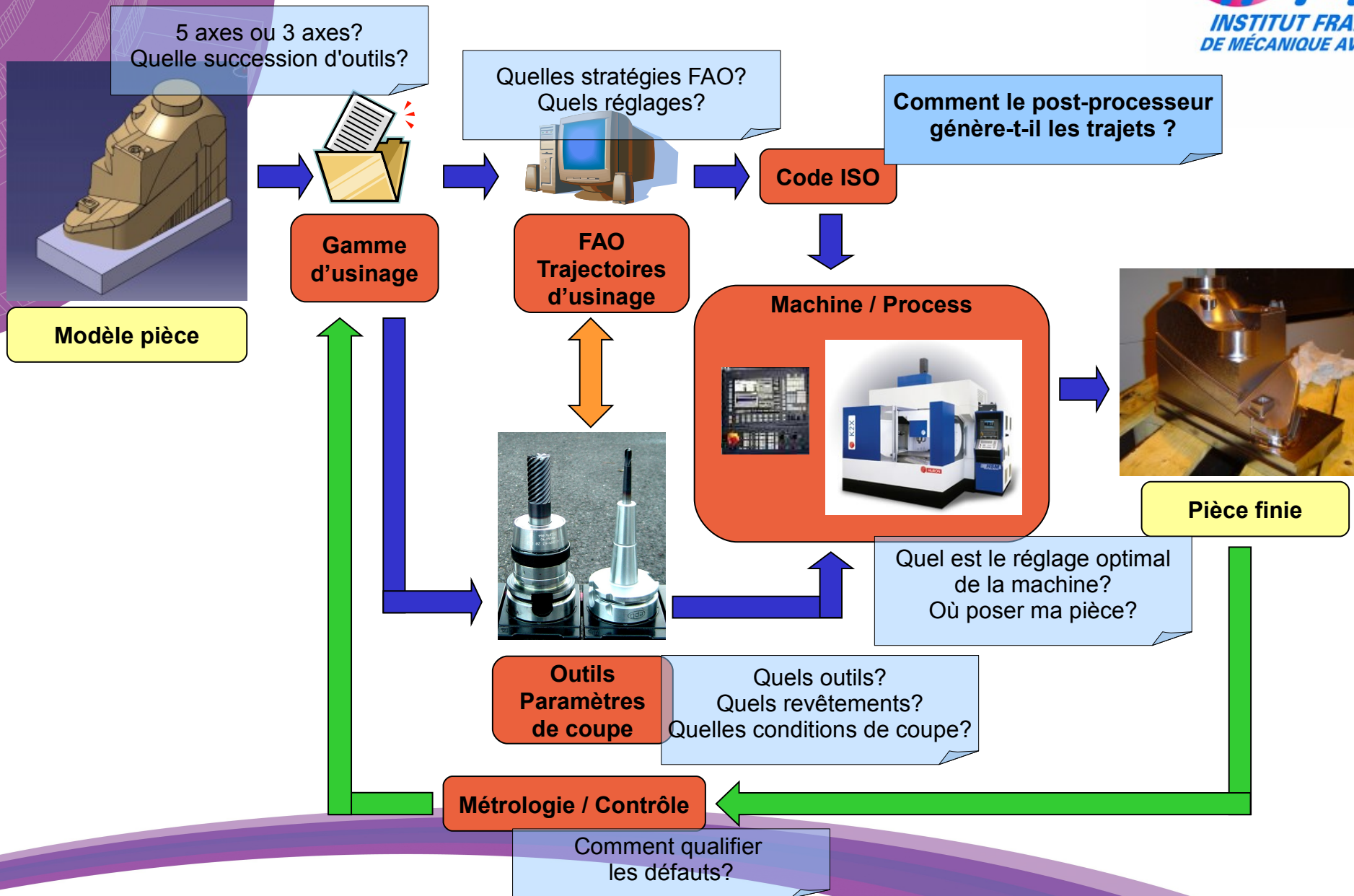
Diminution du pas et / ou de l'angle de discrétisation

La direction de balayage

Pour une finition par balayage, le choix de la direction de balayage va affecter directement l'état de surface final sur la pièce. Dans la cas d'une géométrie complexe avec des angles de dépouille différents, on essaiera de calculer au mieux la distance entre passes et de l'imposer ou à défaut, on attaquera frontalement les zones de plus grande pente pour obtenir en une seule opération un motif homogène sur la surface. Scinder en différentes opérations entraine souvent des marquages dans les zones de raccordements entre surfaces



Où se poser la question de l'état de surface?



Le rôle du post-processeur

Le post-processeur est le programme assurant la transformation des trajectoires générées par la FAO en code ISO interprétable par la commande numérique de la machine. Deux précautions principales doivent être prises pour assurer un bon état de surface.

En 3 axes et 5 axes

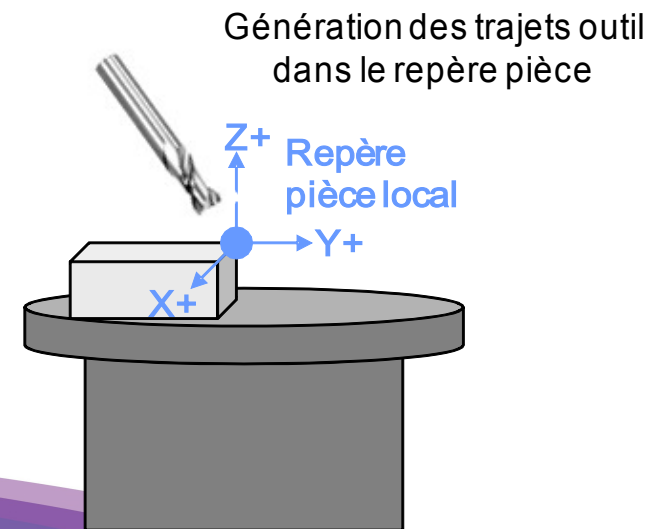
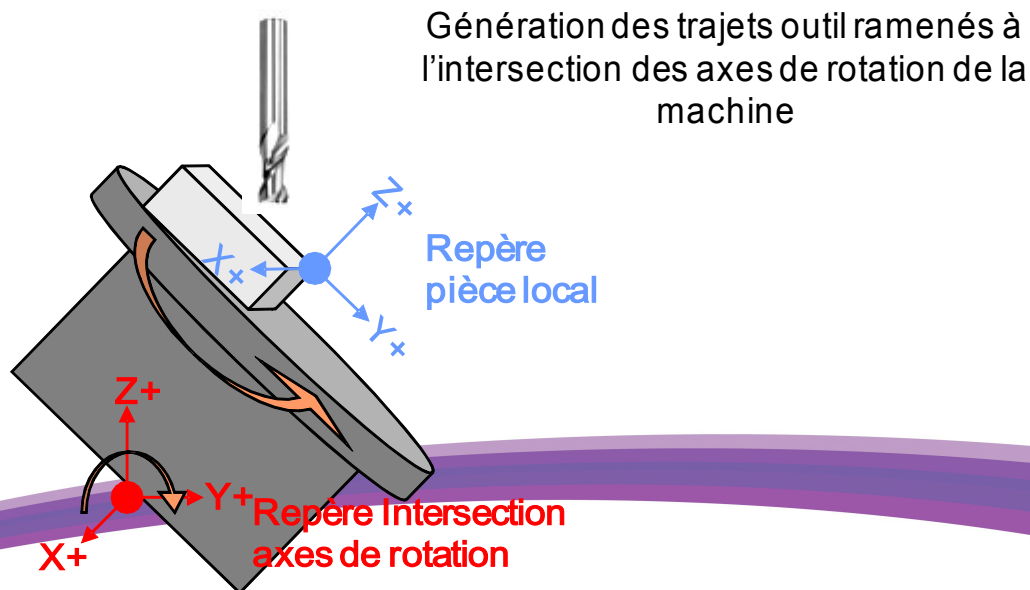
Générer des trajectoires au moins continues en tangence.

En 5 axes

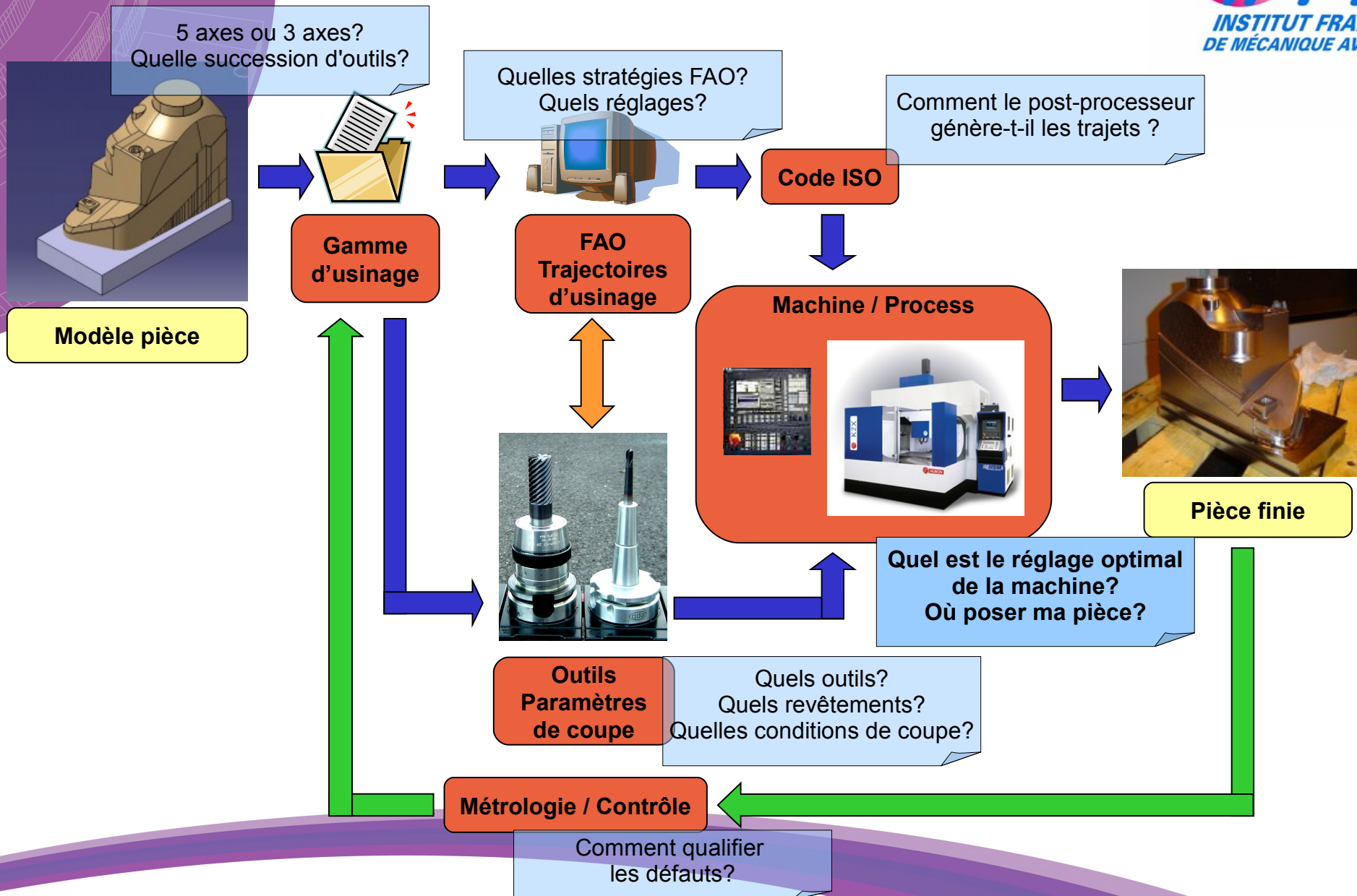
Utiliser un mode de programmation RTCP (Rotate Tool Center point) pour garantir des vitesses relatives outil/pièce les plus proches possibles de la consigne.

Mode standard: le post-processeur fait la transformation géométrique

Mode RTCP: la commande numérique fait la transformation géométrique



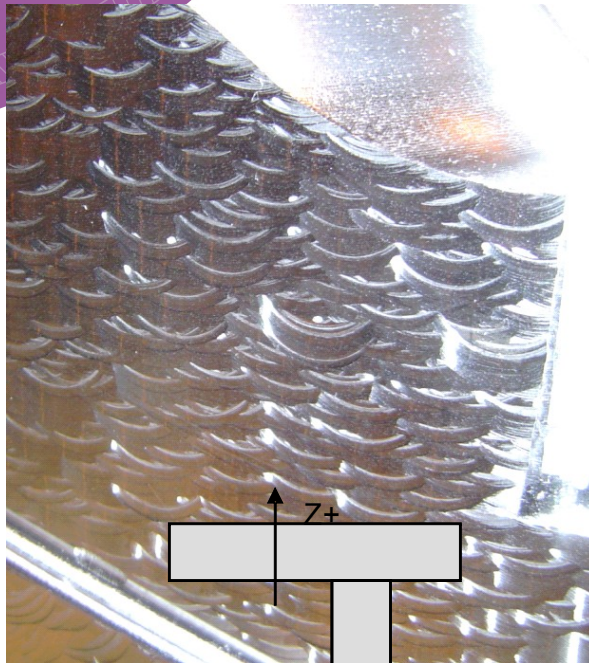
Où se poser la question de l'état de surface?



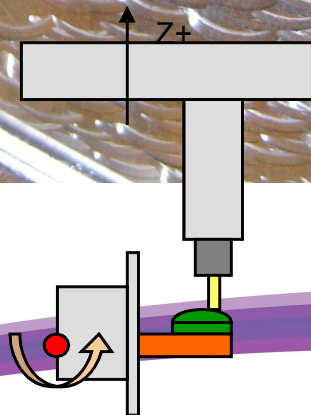
Le posage de la pièce

Dans une machine d'usinage 3 axes cartésienne « classique » le posage de la pièce dans l'espace de travail a peu d'impact sur la qualité de l'état de surface. Pour des machines dont le comportement et la précision dans l'espace de travail sont hétérogènes (robots, machines parallèles ou hybrides, machines 5 axes...), le posage sera déterminant.

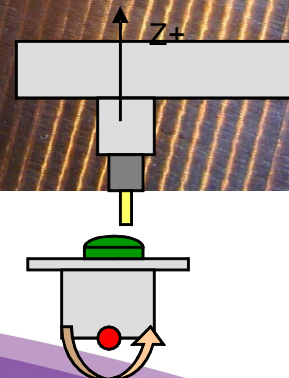
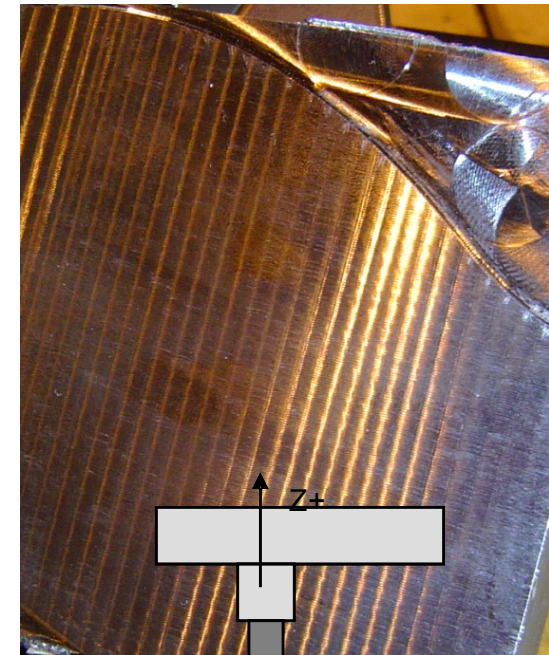
Exemple d'une pièce usinée avec deux posages différents dans une même machine, avec le même programme ISO. C'est la précision angulaire de la machine couplée au bras de levier qui donnera la précision de l'outil sur la pièce.



Posage avec bras de levier faible sur les axes rotatifs



Posage avec bras de levier important sur les axes rotatifs



Le posage de la pièce

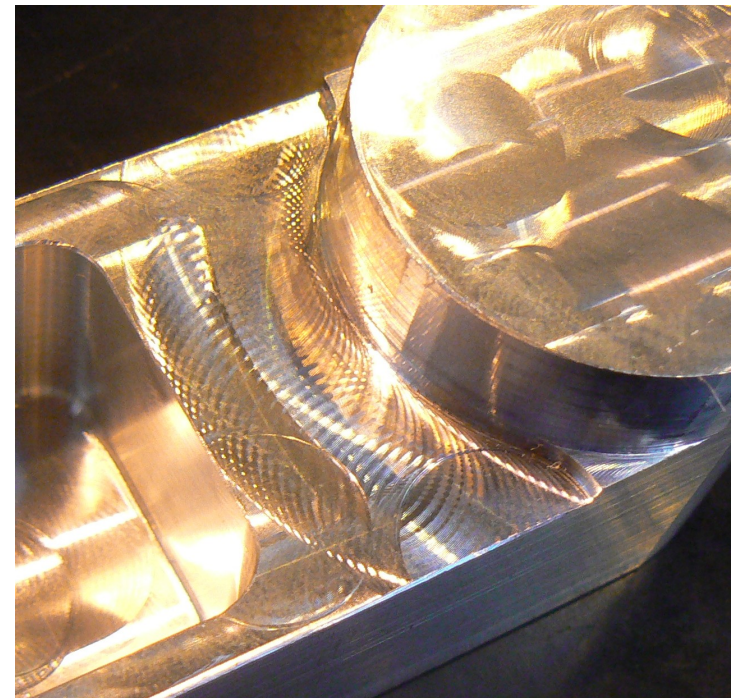
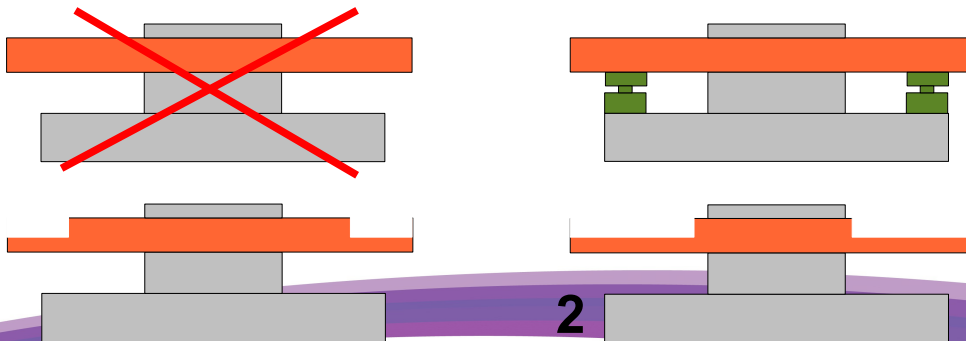
Un défaut de rigidité de la pièce ou de son montage peuvent entraîner des vibrations qui dégraderont elles aussi l'état de surface.

- Symptômes:
- ▶ Bruit strident discontinu augmentant en allant vers la partie libre de la pièce
 - ▶ Marquage de la pièce important
 - ▶ Défauts géométriques importants
 - ▶ Usure accélérée de l'arête de coupe

Problèmes de rigidité du montage

Un travail sur le montage de la pièce et éventuellement sur la gamme d'usinage doit être fait pour conserver le plus de rigidité possible tout au long de l'usinage:

- mettre des plots de soutien avec amortisseurs sous les parties libres
- ne pas usiner les parties libres en dernier mais en premier pour garder la rigidité du reste de la pièce



Le réglage de la commande numérique

C'est l'un des facteurs sur lesquels les programmeurs jouent le moins, et pourtant c'est l'un des plus influents pour la qualité de la pièce obtenue et l'optimisation de la productivité.

Paramètres de réglage de la commande numérique

Contrôle du déplacement

■ Arrêt précis

■ Déplacement tangentiel

■ Anticipation de trajectoire

■ Suivi de contour

Gestion de l'accélération

■ Réglage de JERK

■ Mode d'accélération

Gestion du trainage

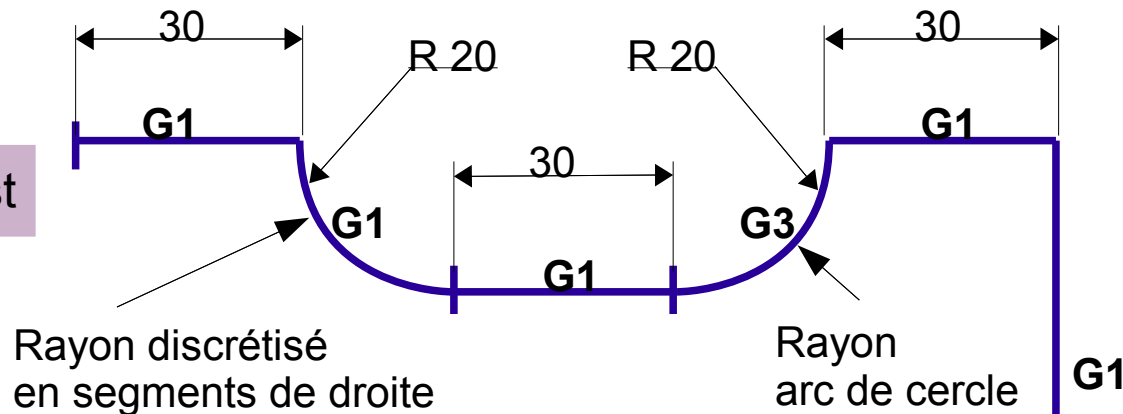
Gestion de la tolérance d'usinage

Gestion de la trajectoire

■ Compactage Spline

■ Interpolation Spline

Trajectoire de test

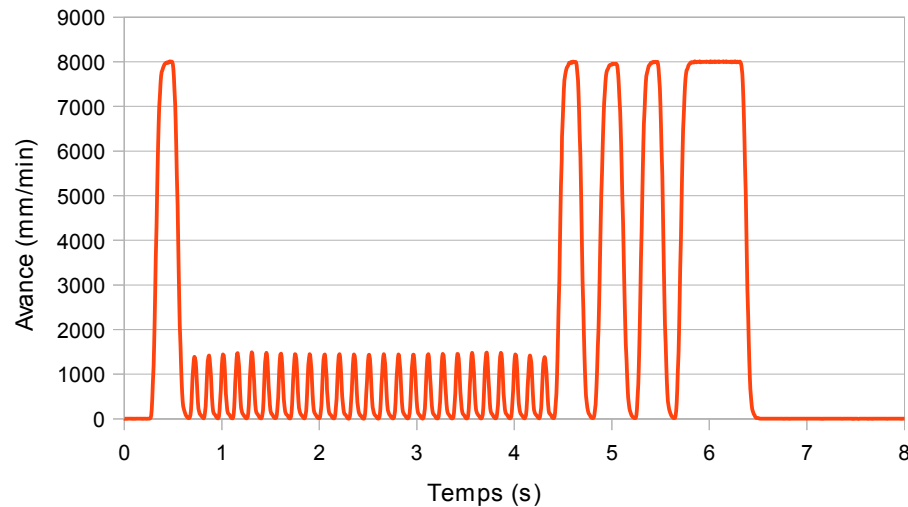


Le contrôle du déplacement

Deux manières de contrôler le déplacement

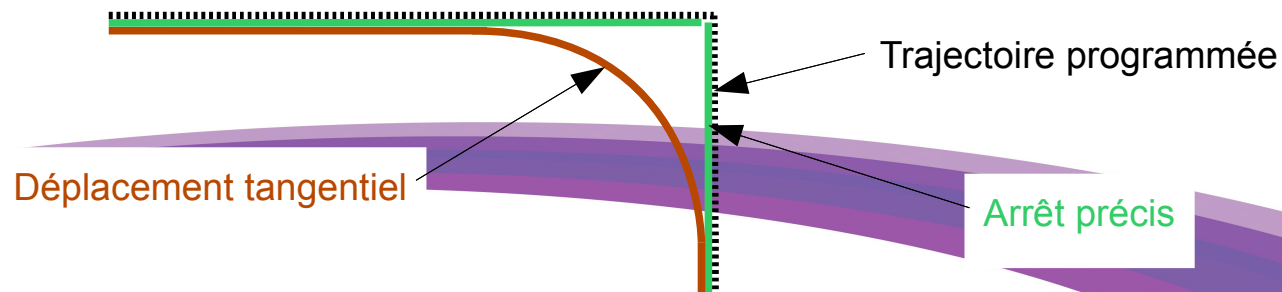
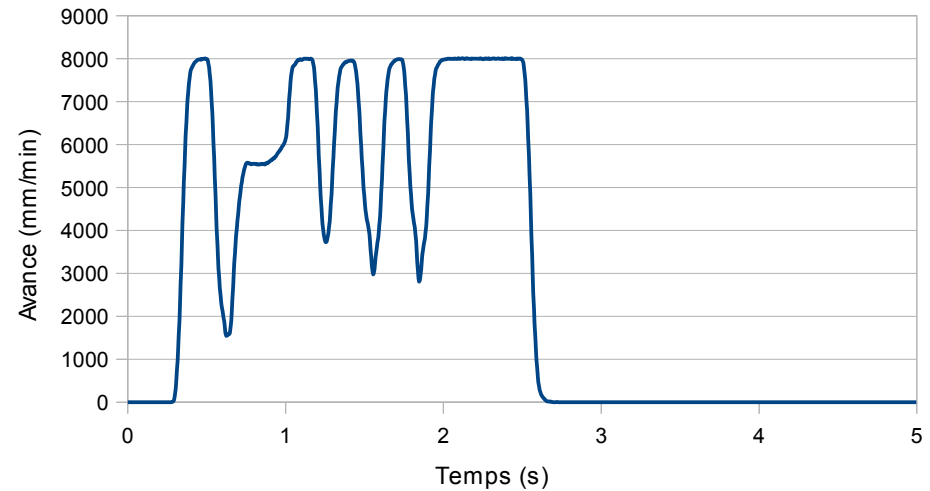
■ Arrêt précis

- ▶ Passage par chacun des points des blocs de programmation ISO en freinant et arrêtant brièvement le déplacement



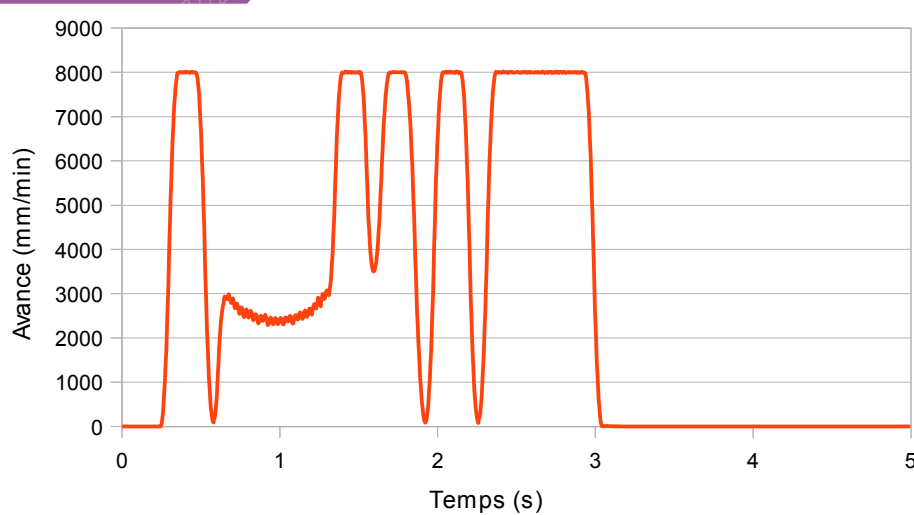
■ Déplacement tangentiel ou lissage d'angles

- ▶ Passage à proximité des points des blocs de programmation ISO en gardant la vitesse la plus constante possible
- ▶ Exemples : Ebauche, finition de surfaces en balayage...



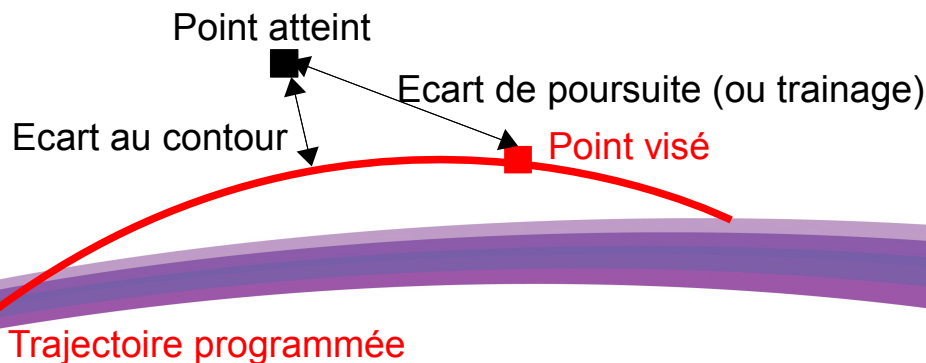
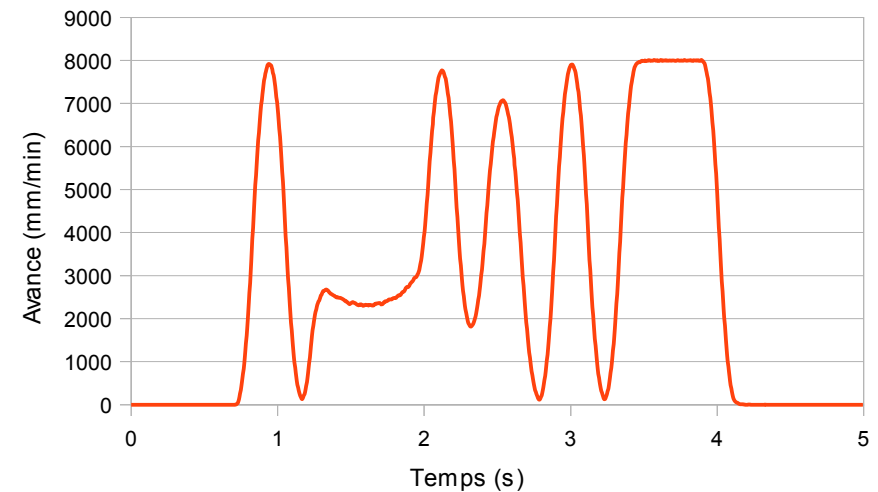
■ Anticipation de trajectoire

- La commande anticipatrice ramène à zéro la distance de poursuite en fonction de la vitesse ou de l'accélération (Siemens FFWON)



■ Réglage de JERK

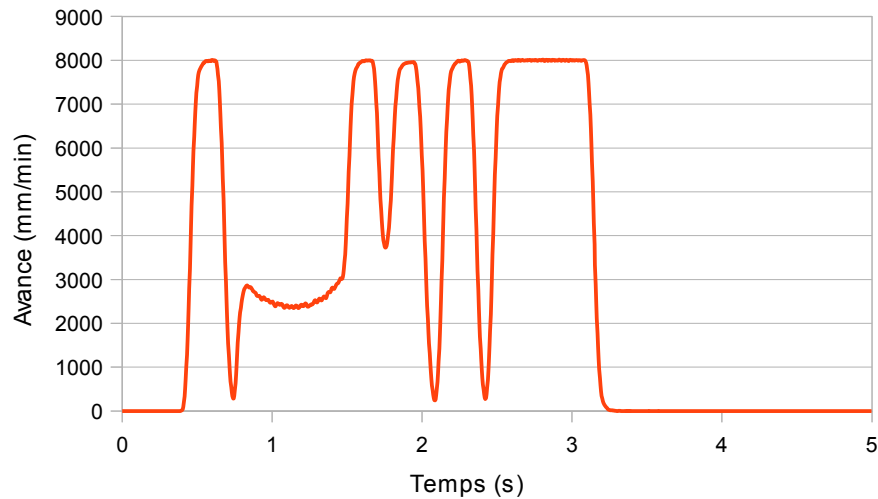
- Modification de l'à-coup maximal autorisé en % de l'à-coup maximal (paramètre machine) (Siemens JERK, JERKLIMA)



■ Réglage de tolérance d'usinage

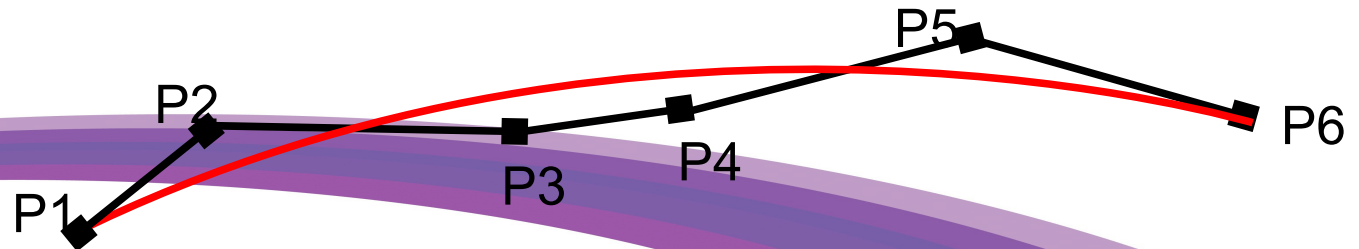
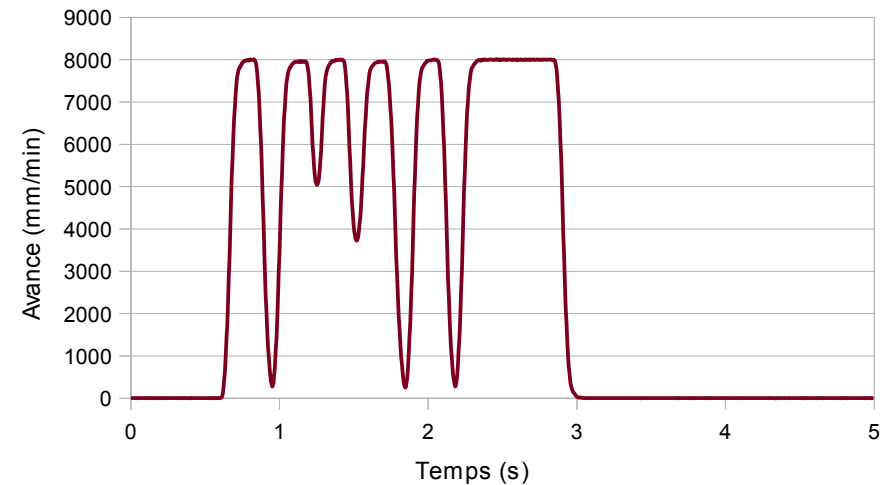
► Cet ajustement se fera en fonction du résultat attendu, mais aussi de la tolérance utilisée en FAO (tol. CN > tol. FAO).

Usage: tol.CN = 1,2 à 1,5 x tol.FAO



■ Compactage de type Spline

► Cette option permet de reconstruire à partir d'une série de blocs en G1, sur les portions critiques de la trajectoire, une courbe polynomiale continue de type B Spline avec une tolérance définie par un paramètre machine (Compcad, Compcurv)

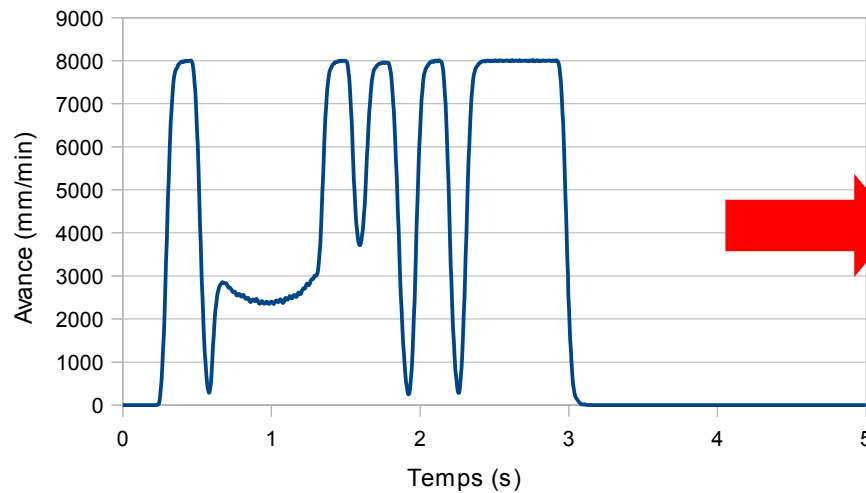


Réglage spécifique à l'amélioration de l'état de surface

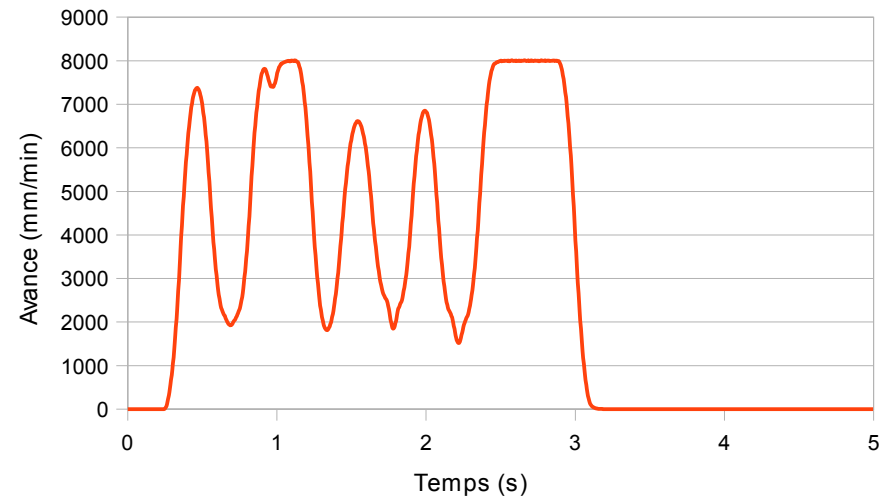
- Recherche de la continuité des trajectoires lors des balayages de surfaces. Précision et vitesse sont moins importantes que cette continuité.

Paramètres CN conseillés:

Contrôle du déplacement: Déplacement tangentiel avec tolérance axiale différenciée
Gestion du trainage: Pas d'anticipation de trajectoire
Gestion de l'accélération: Jerk réglé souple (inférieur à 50%)
Gestion de la tolérance d'usinage: Tolérance moyenne (y compris pour les trajets FAO)
Compactage activé

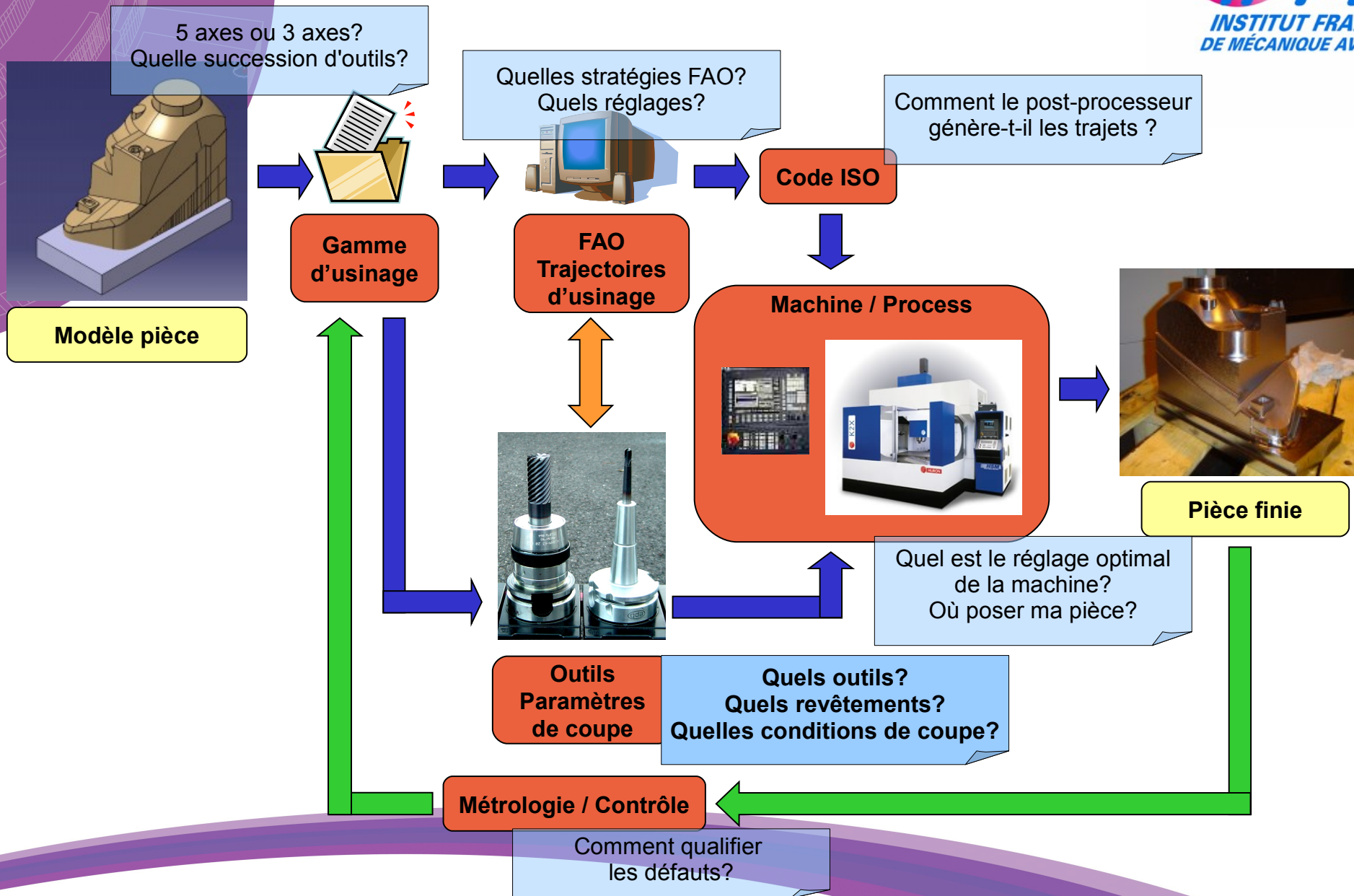


Temps parcouru : 2760 ms
Rayon coin moyen estimé : 0,16 mm



Temps parcouru : 2788 ms (+1%)
Rayon coin moyen estimé : 1,92 mm

Où se poser la question de l'état de surface?



Les vibrations en usinage

L'apparition de vibrations pendant l'usinage est une des causes de dégradation de l'état de surface les plus courantes.

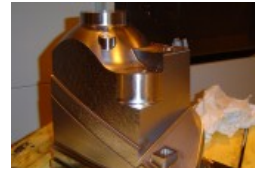
Qu'est-ce qui vibre?



La machine ?

Comment ça vibre?

- Vibrations continues ?
- Vibrations pour certaines vitesses ?
- Chocs aux changements de direction ?
- ...



La pièce ?

Comment ça vibre?

- Pièce mince ?
- Pièce longue avec porte à faux ?
- ...



L'outil ?

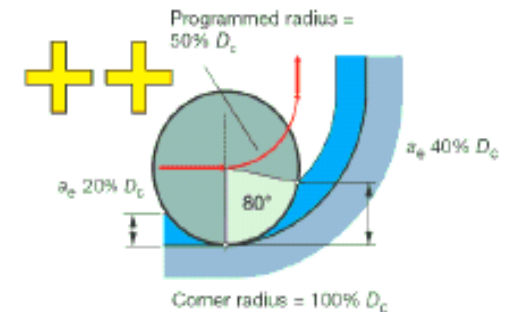
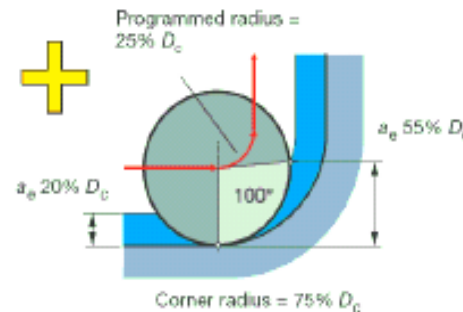
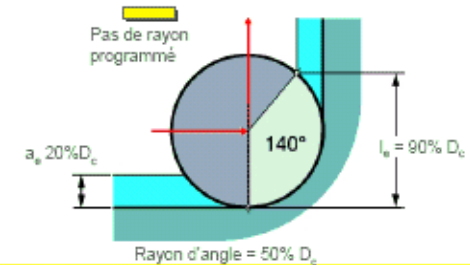
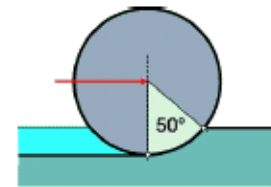
Comment ça vibre?

- Broutement ?
- Bitangence ?
- Variation des paramètres de coupe ?
- ...

- Symptômes:
- ▶ Bruit strident uniquement à certains endroits (passage d'angles, changement de direction...)
 - ▶ Marquage de la pièce important dans ces zones uniquement
 - ▶ Usure accélérée de l'arête de coupe

Problèmes de stratégie d'usinage

Il faut, au moment de la définition de la gamme, envisager les conditions d'engagement / dégagement et d'immersion de l'outil tout au long de son parcours et pas seulement sur les trajets rectilignes « nominaux ». On peut utiliser des engagements / dégagements en arc de cercle, ou des trajectoires en trochoïde.



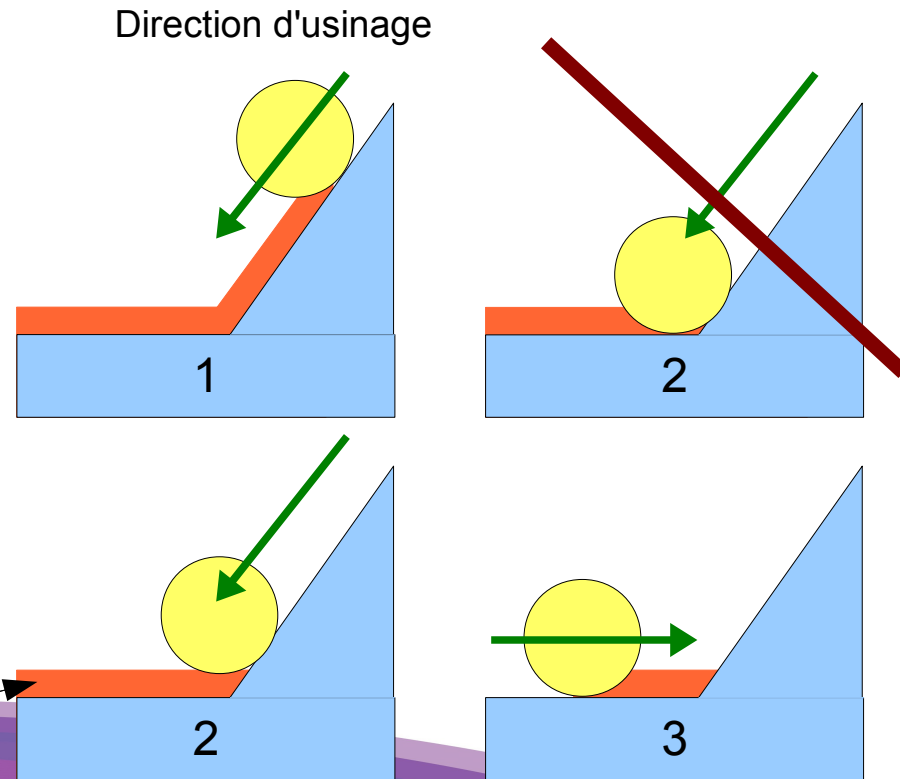
Source: Sandvik Coromant

- Symptômes:
- ▶ Bruit strident uniquement à certains endroits (passage d'angles, changement de direction)
 - ▶ Marquage de la pièce important dans ces zones uniquement
 - ▶ Usure accélérée de l'arête de coupe

Problèmes de trajectoires FAO

L'usinage successif des fonds et des flans en laissant des surépaisseurs peut permettre d'éviter, ou au moins limiter les passages en bitangence, et de les réduire à la dernière passe avec la surépaisseur la plus faible à enlever. Une stratégie adaptée peut diminuer fortement le marquage dû aux vibrations lors des reprises de rayons.

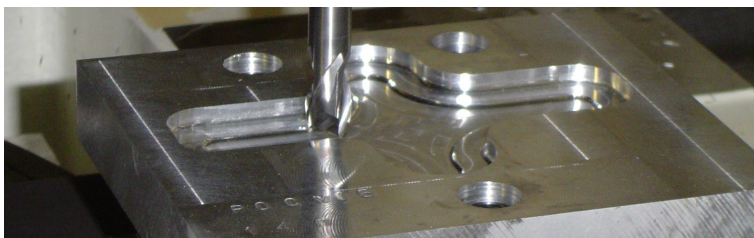
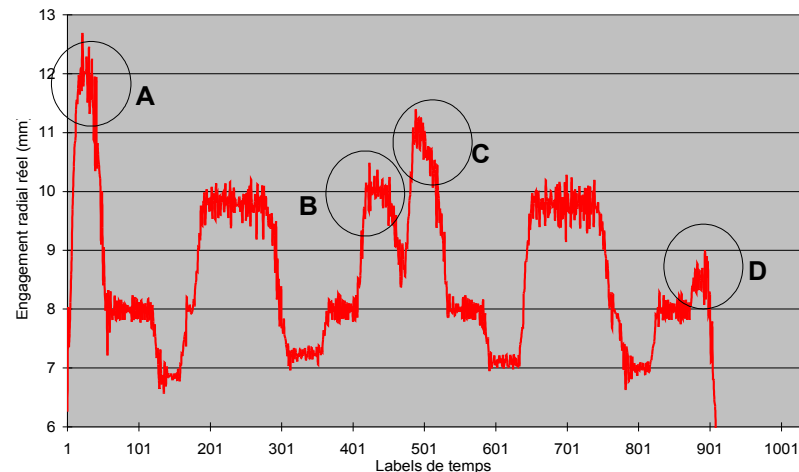
Surépaisseur



- Symptômes:
- ▶ Bruit strident uniquement à certains endroits (passage d'angles, changement de direction)
 - ▶ Marquage de la pièce important dans ces zones uniquement
 - ▶ Usure accélérée de l'arête de coupe

Variation de l'engagement radial réel

La variation de l'engagement radial réel, dû la plupart du temps à la FAO, est aussi une cause importante d'apparition de vibrations dans certaines zones. Seule une reprise de la programmation dans ces zones particulière en réduisant la consigne permet de faire disparaître les vibrations.



Rayon A : 8 mm
Ae réel : 12 mm

Rayon B : 14 mm
Ae réel : 10 mm

Rayon C : 12 mm
Ae réel : 11 mm

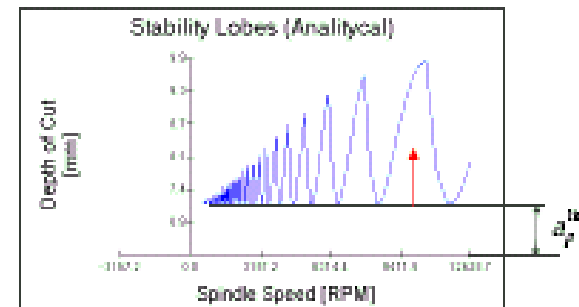
Rayon D : 10 mm
Ae réel : 8.5 mm

Le phénomène de broutement

- Symptômes:
- ▶ Bruit strident continu très important
 - ▶ Marquage de la pièce très important
 - ▶ Usure accélérée de l'arête de coupe voire bris d'outil
 - ▶ Usure accélérée de certains organes de la machine

Outils avec un long porte à faux

L'entrée en résonance de l'outil sous l'excitation des efforts de coupe le fait vibrer dans des proportions très importantes. Une des premières solutions consiste à mettre en place des dispositifs amortisseurs ou des pastilles qui vont permettre de décaler la fréquence de résonance de l'outil et stopper la vibration.



$$a_p^{\text{lim}} = \frac{2k\zeta}{K_f} = \frac{-1}{2K_f G_{\text{min}}}$$

K_f Cutting coefficient [N/mm²]
(-700 in aluminium
-1400 in low alloy steel
-2000 in Ti6Al4V)

k Stiffness of the tool assembly [N/mm]

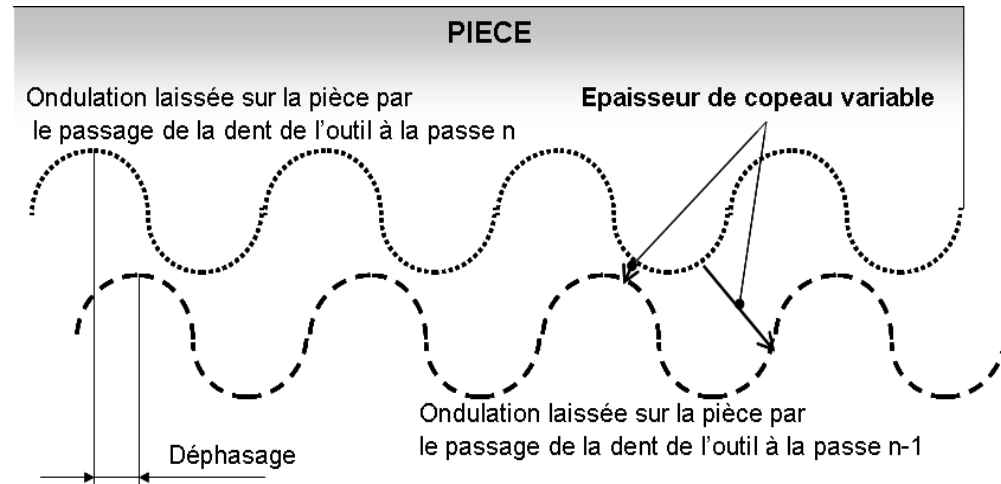
ζ Damping of the tool assembly

G_{min} Minimum real part of frequency response function [mm/N]

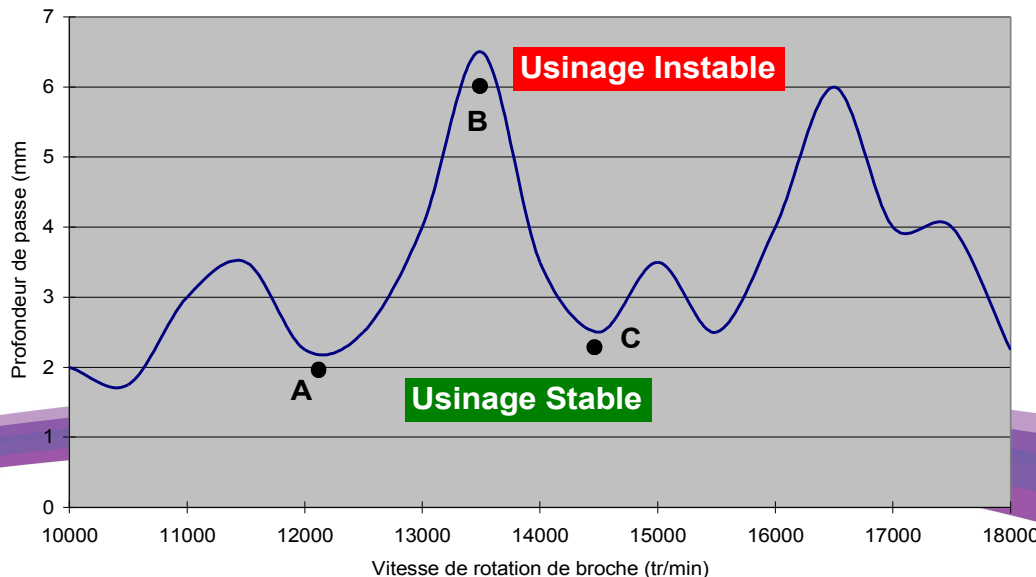
Lobes de stabilité

Dans la cas d'ensembles outil / porte-outil longs, on peut utiliser les lobes de stabilité afin de sortir de la vibration et / ou d'améliorer considérablement la productivité. Issu d'un constat expérimental, ce principe peut être facilement mis en oeuvre au pied de la machine par deux méthodes:

1. Sonnage et prédiction du comportement
2. Analyse sonore et correction de la vibration



Phénomène créant la vibration:
variation de l'épaisseur du copeau



Gains de productivité :

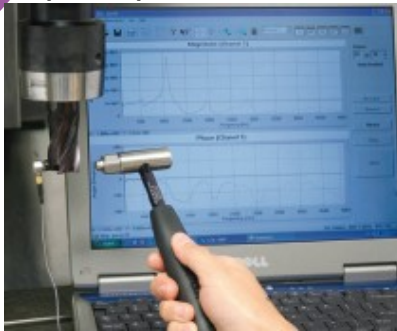
Point A:
 $Q_c = 46 \text{ cm}^3/\text{min}$

Point B:
 $Q_c = 157 \text{ cm}^3/\text{min}$

Point C:
 $Q_c = 63 \text{ cm}^3/\text{min}$

Le phénomène de broutement

La méthode de correction par sonnage permet, avant l'usinage, d'identifier les zones de stabilité pour l'usinage. On colle un accéléromètre en bout d'outil, on donne quelques chocs au marteau d'impact et on récupère la Fonction de Transfert avec les valeurs des fréquences propres principales.



Calcul des harmoniques de rotation de broche correspondants aux modes de vibrations

$$N = F_p \times 60 / Z / C_{\text{harm}}$$

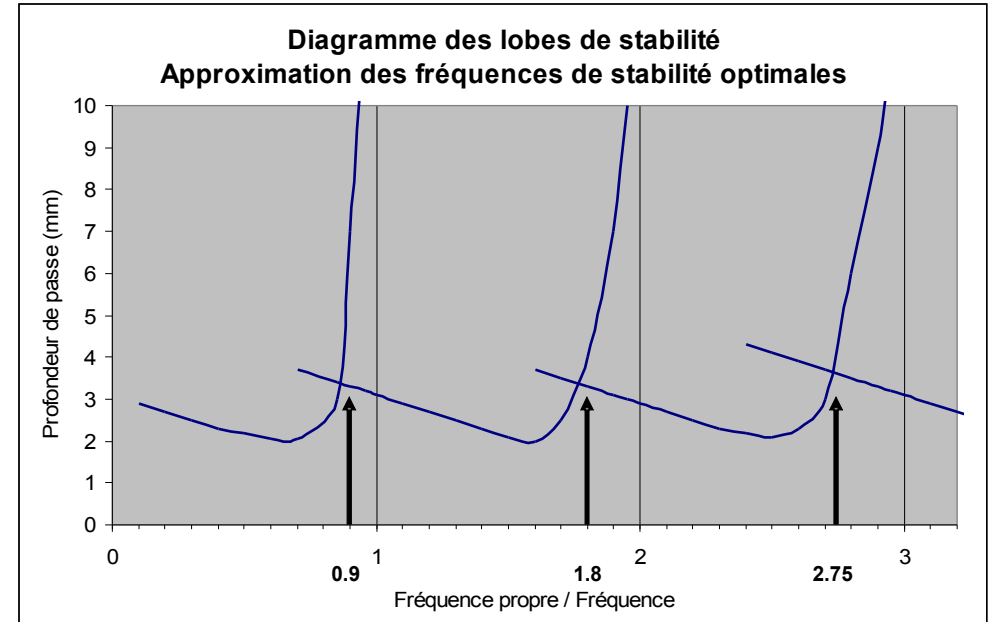
Avec

N: vitesse de broche en tr/min

F_p: fréquence du pic de vibration

Z: nombre de dents de l'outil

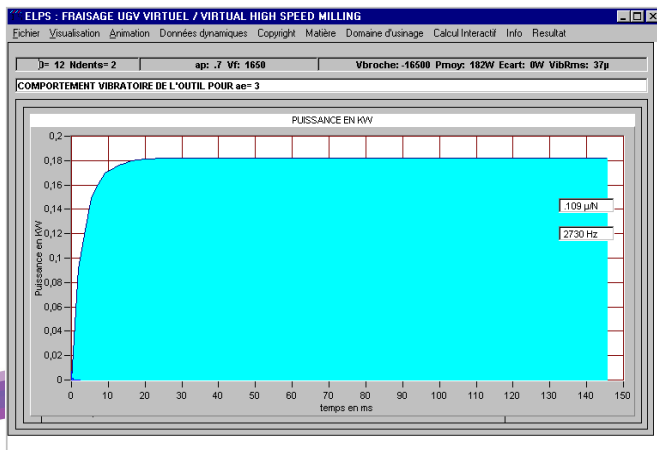
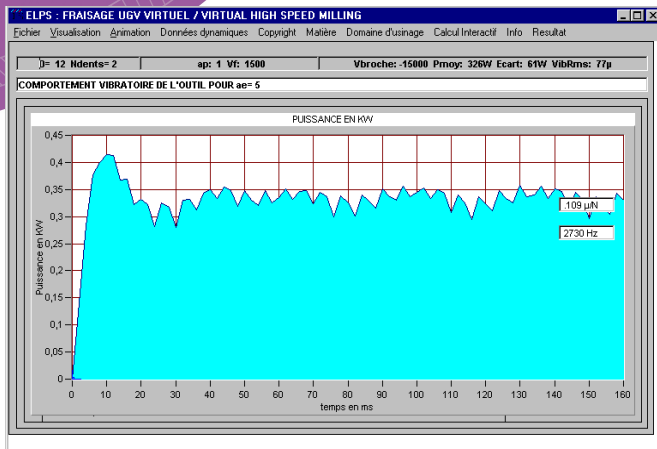
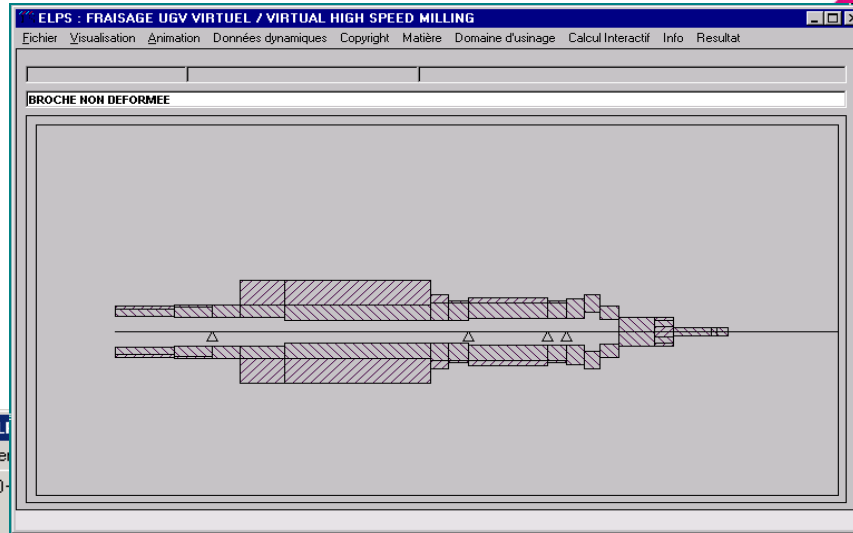
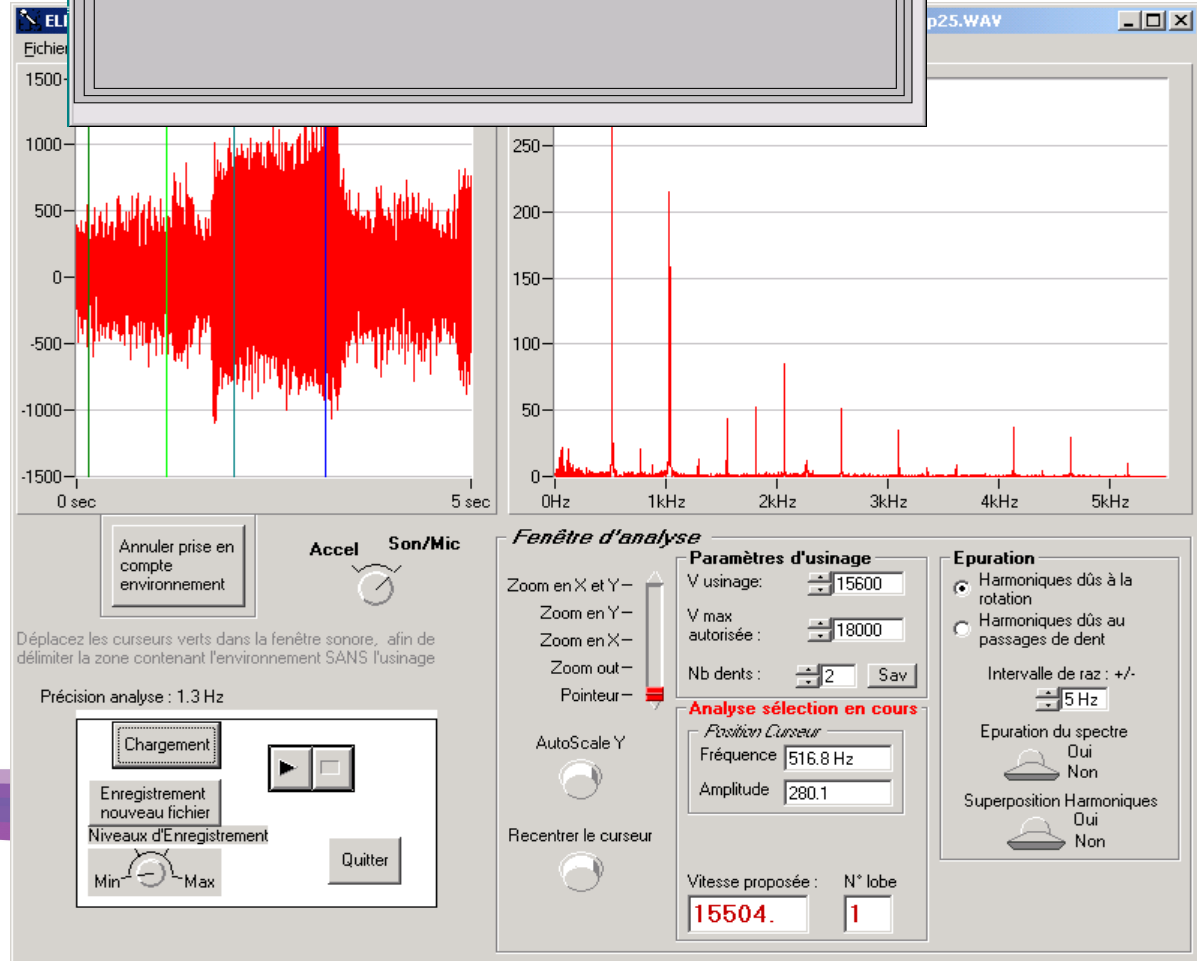
C_{harm}: coefficient de l'harmonique



N° harmonique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C _{harm}	0.9	1.8	2.75	3.75	4.75	5.75	6.75	7.75	8.75	9.75

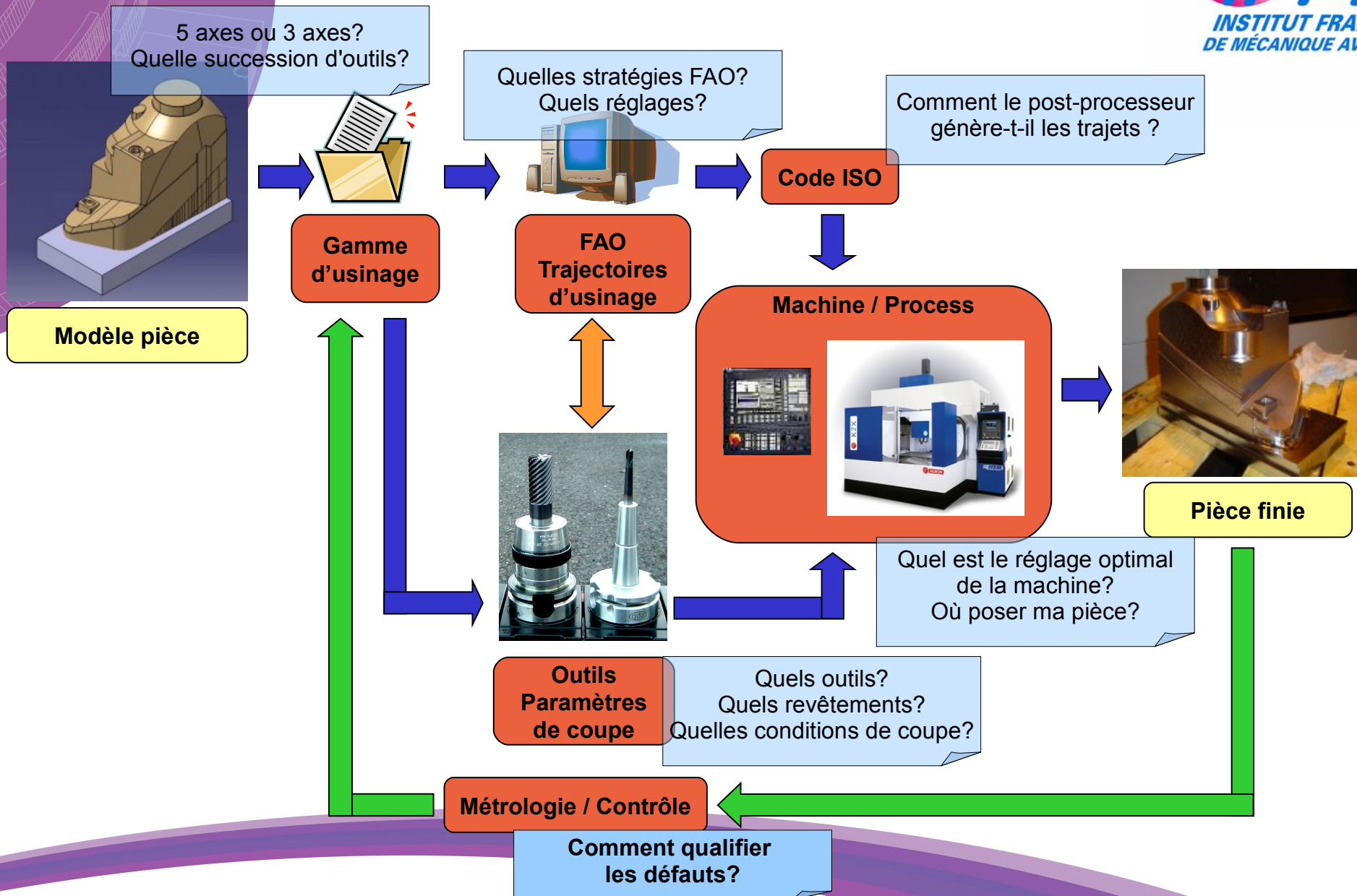
Le phénomène de broutement

Une fois les valeurs de vitesses de rotation stables calculées, on peut soit faire quelques essais pour déterminer la profondeur de passe maxi, soit utiliser des modèles simples de broche et d'outil pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de cette profondeur de passe limite. Cette prédiction sera validée par une mesure acoustique en usinage.

ELPS : FRAISAGE UGV VIRTUEL / VIRTUAL HIGH SPEED MILLING
 Fichier Visualisation Animation Données dynamiques Copyright Matière Domaine d'usinage Calcul Interactif Info Resultat
 p25.WAV
 1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
0 sec 5 sec
 250
200
150
100
50
0
0Hz 1kHz 2kHz 3kHz 4kHz 5kHz
 Annuler prise en compte environnement
 Accel Son/Mic
 Déplacez les curseurs verts dans la fenêtre sonore, afin de délimiter la zone contenant l'environnement SANS l'usinage
 Précision analyse : 1.3 Hz
 Fenêtre d'analyse
 Zoom en X et Y
 Zoom en Y
 Zoom en X
 Zoom out
 Pointeur
 AutoScale Y
 Recentrer le curseur
 Paramètres d'usinage
 V usinage: 15600
 V max autorisée: 18000
 Nb dents: 2 Sav
 Analyse sélection en cours
 Position Curseur
 Fréquence 516.8 Hz
 Amplitude 280.1
 Vitesse proposée: 15504 N° lobe 1
 Epuration
 Harmoniques dus à la rotation
 Harmoniques dus au passages de dent
 Intervalle de raz: +/- 5 Hz
 Epuration du spectre
 Oui Non
 Superposition Harmoniques
 Oui Non
 Chargement
 Enregistrement nouveau fichier
 Niveaux d'Enregistrement
 Min Max
 Quitter

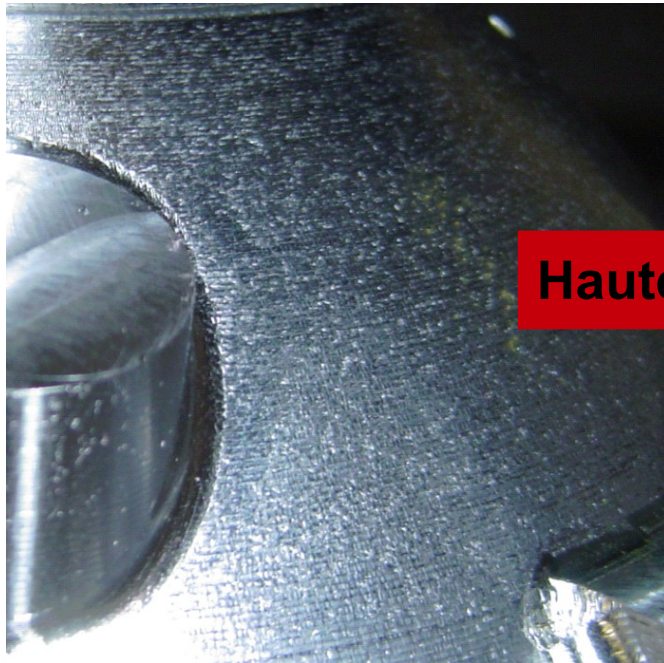
Où se poser la question de l'état de surface?



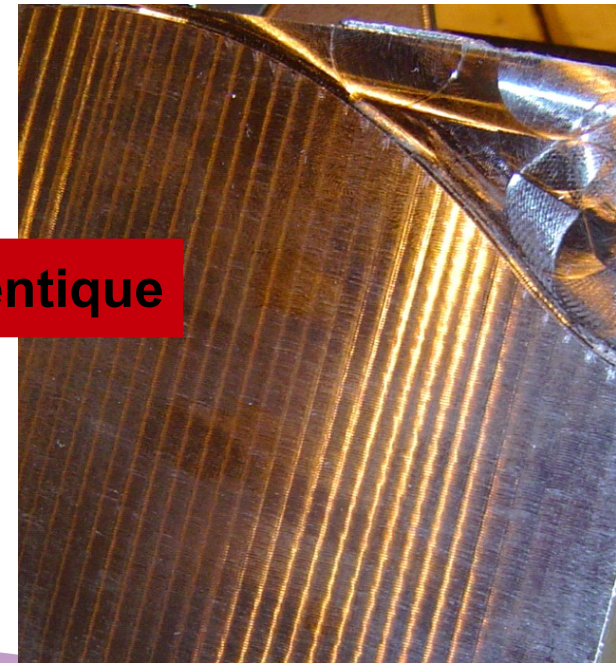
Evaluation de l'état de surface

Certains critères rendent compte qualitativement de l'état de surface (R_a , R_t ...) mais ils ne sont pas forcément toujours adaptés. Ainsi, de plus en plus, ce sont des critères subjectifs qui priment en fonction des opérations de parachèvement qui interviennent après l'opération d'usinage: polissage, anodisation, sablage, accroche peinture. De plus, l'usinage 5 axes et l'usinage 3 axes ne présentent pas la même nature de défauts.

Usinage 3 axes
Défaut de rugosité d'ordre
de grandeur de 0,001mm



Usinage 5 axes
Défaut d'ondulation d'ordre
de grandeur de 0,01mm



Hauteur de crête identique

Conclusion

C'est tout au long du procédé de fabrication, y compris au moment de la conception, que doit se poser la question de l'état de surface:



- Au moment de la construction de la gamme d'usinage avec le choix des outils, mais aussi des stratégies et du moyen de production
- Au moment de générer les trajectoires FAO en réglant correctement les tolérances d'usinage et d'orientation et en choisissant judicieusement les directions de balayage
- En validant le fonctionnement du post-processeur
- En s'assurant du choix du posage de la pièce dans le cas de moyens de production à comportement/précision hétérogènes dans l'espace de travail
- En réglant correctement les paramètres de la commande numérique
- En choisissant judicieusement l'outil et les conditions de coupe (cf Conf. Sandvik)
- En essayant d'éviter ou au moins de maîtriser l'apparition de phénomènes vibratoires et leur impact sur la surface finie



**Merci de votre attention,
des questions?**