

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

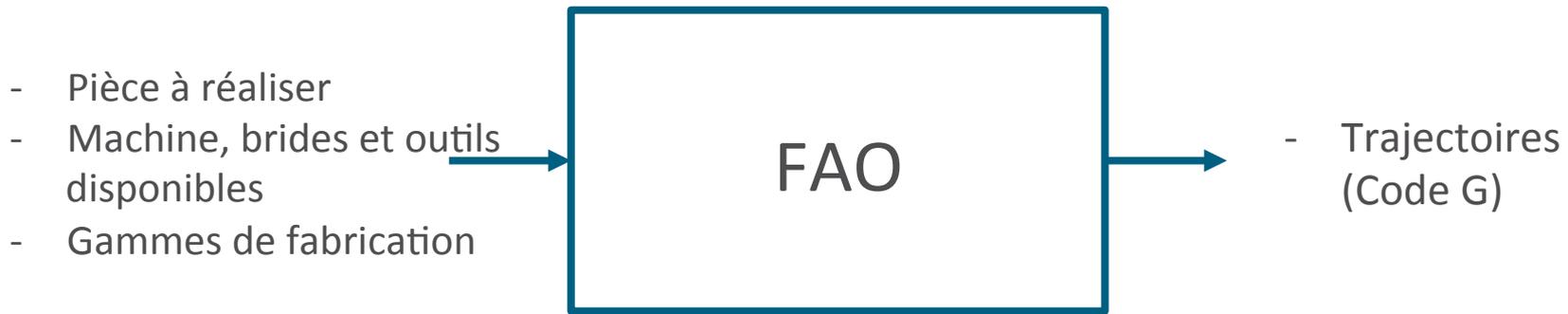
Fabrication Assistée par Ordinateur

5GMCIP - PRODU5

Thibaut Chaise – Nicolas Tardif – Alexandre Zelez

Objectifs du cours de FAO

- **Découverte des principes et problématiques de la Fabrication Assistée par Ordinateur**

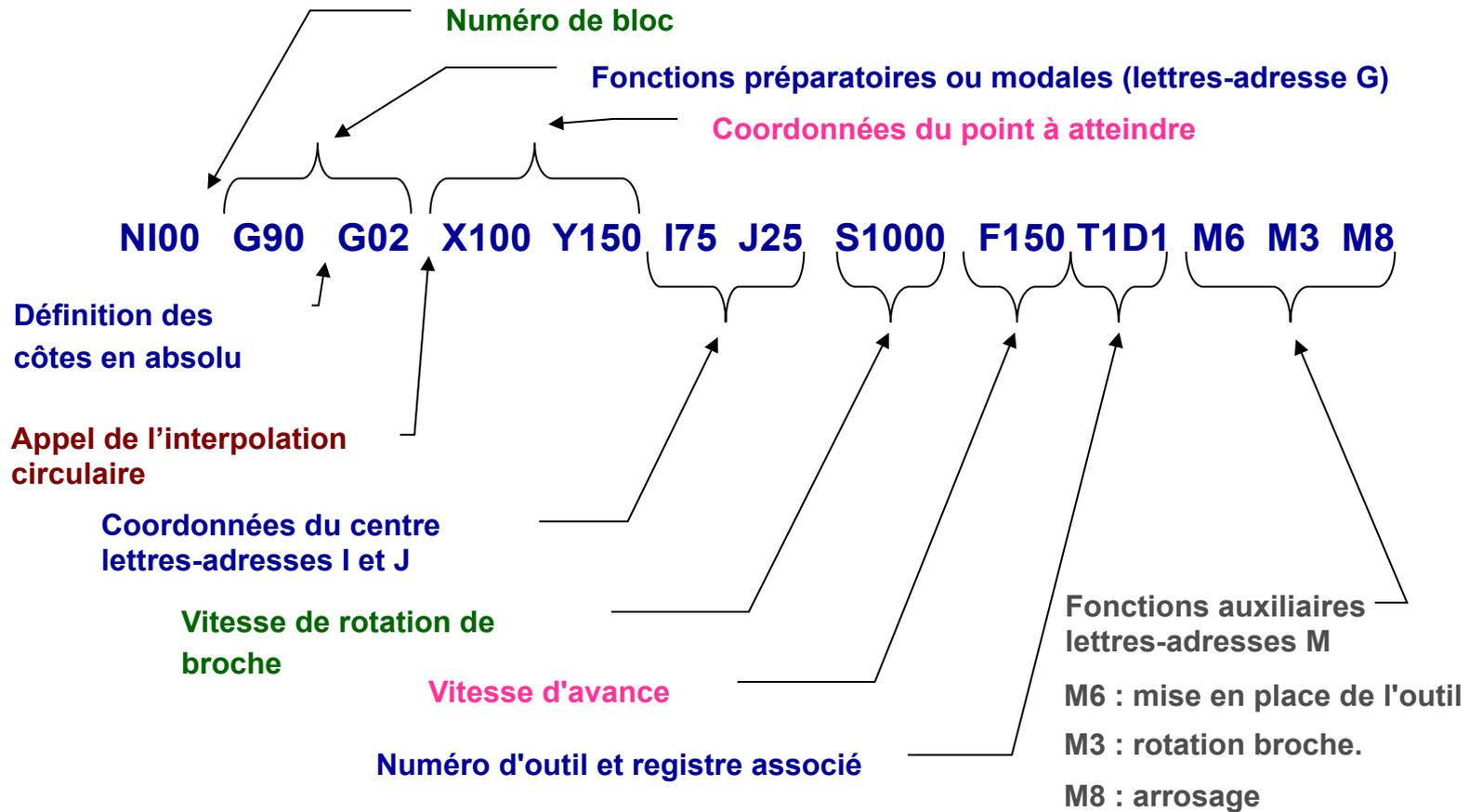


- **Intégration de la FAO dans la chaîne numérique**
- **Découverte d'un logiciel métier : Esprit**

Motivations

- **Pilotage des machines – code G (ISO)**

Commande de l'usinage d'un arc de cercle



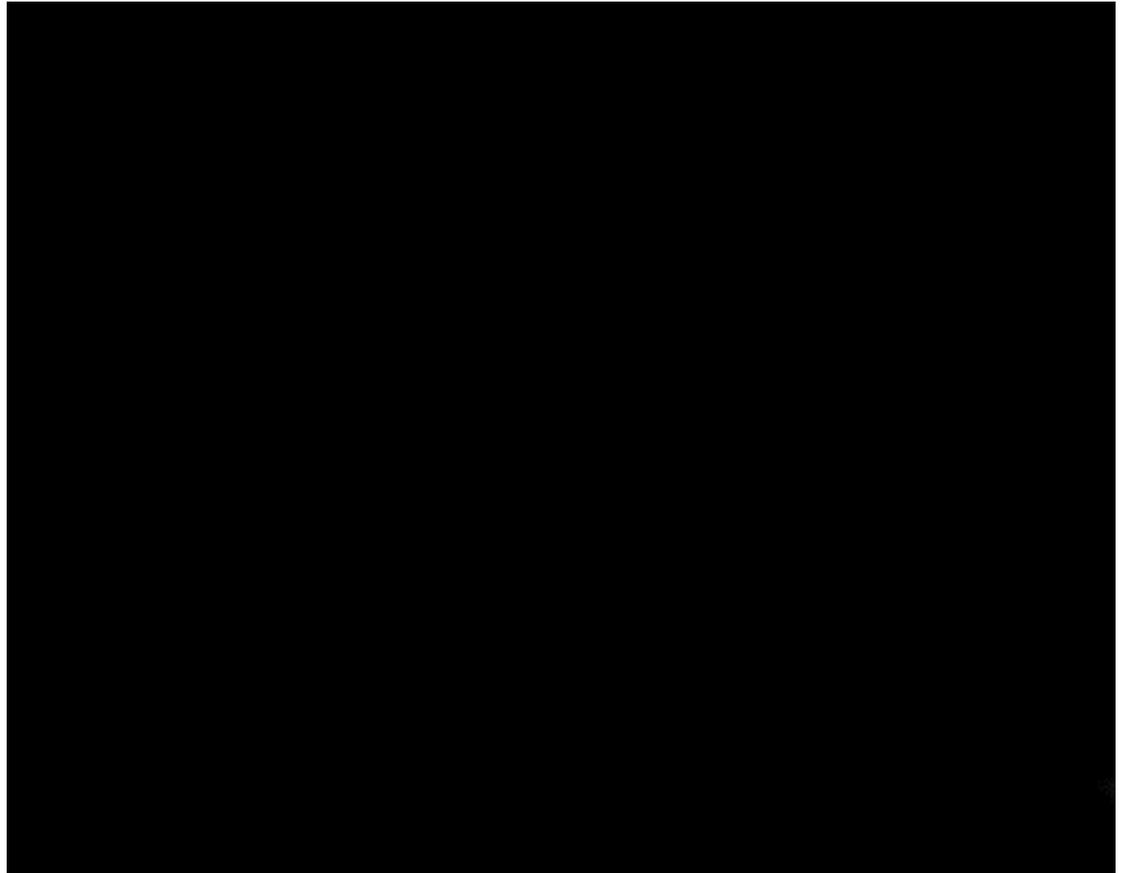
Motivations (suite)

- **Usinage d'une pièce complexe :**

Disque de turbine en IN718

A décrire par des :

- segments de droite (G01)
- Arcs de cercles (G02)
- Ou splines (G03)

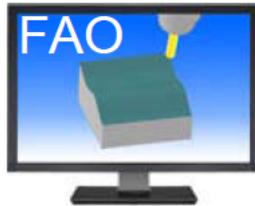


Processus de fabrications des pièces usinées

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



Pilotage des
axes machine

MOCN



Usinage



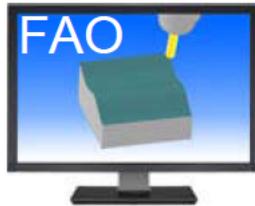
Source : Beudaert2013

Processus de fabrications des pièces usinées

Définition de la pièce à réaliser



Définition des trajectoires des outils



Définition des paramètres d'usinage

post-pro

Réalisation du code (norme ISO)

```

N210 G00 X-150
N220 G00 Z100
N230 G00 Z100
N240 (Temps de l'usinage : 1:22 mIn)
N250 (Temps total : 1:22 mIn)
N300 M02
N310 M03 S1000
N320 G00 X-150
N330 G00 Z100
N340 G01 Z-5 F100
N350 G01 X-100 Z-5 F100
N360 G01 X-50 Z-5 F100
N370 G01 X0 Z-5 F100
N380 G01 X50 Z-5 F100
N390 G01 X100 Z-5 F100
N400 G01 X150 Z-5 F100
N410 G00 Z100
N420 G00 X-150 Y12.957 Z5
N430 G01 Z-5 F100
N440 X0 Y12.954 F300
N450 G01 X11.419
N460 G01 X11.419 Y-9
N470 G01 X33.905
N480 G01 X9 Y29.905
N490 G01 Z28.39
N500 G01 X28.39 Y-9
N510 G01 X36.875
N520 G01 X9 Y26.875
N530 G00 Y45.36
N540 G01 X-102.404 Y12.957
N550 X-20.288 Y24.557
N560 X-9 Y33.949
N570 G00 Y62.211
N580 G01 X-37.183 Y36.148
N590 X-34.077 Y47.74
N600 X9 Y70.866
N610 G00 Y79.302
N620 G01 X-30.805 Y59.331
N630 X-7.805 Y70.922
N640 G01 X82.787
N650 G00 Y96.072
N660 G00 X-15 Y82.322
N670 G01 X-15 Y82.322
    
```

Pilotage des axes machine

MOCN



Usinage



Outils



Préparation Réglages



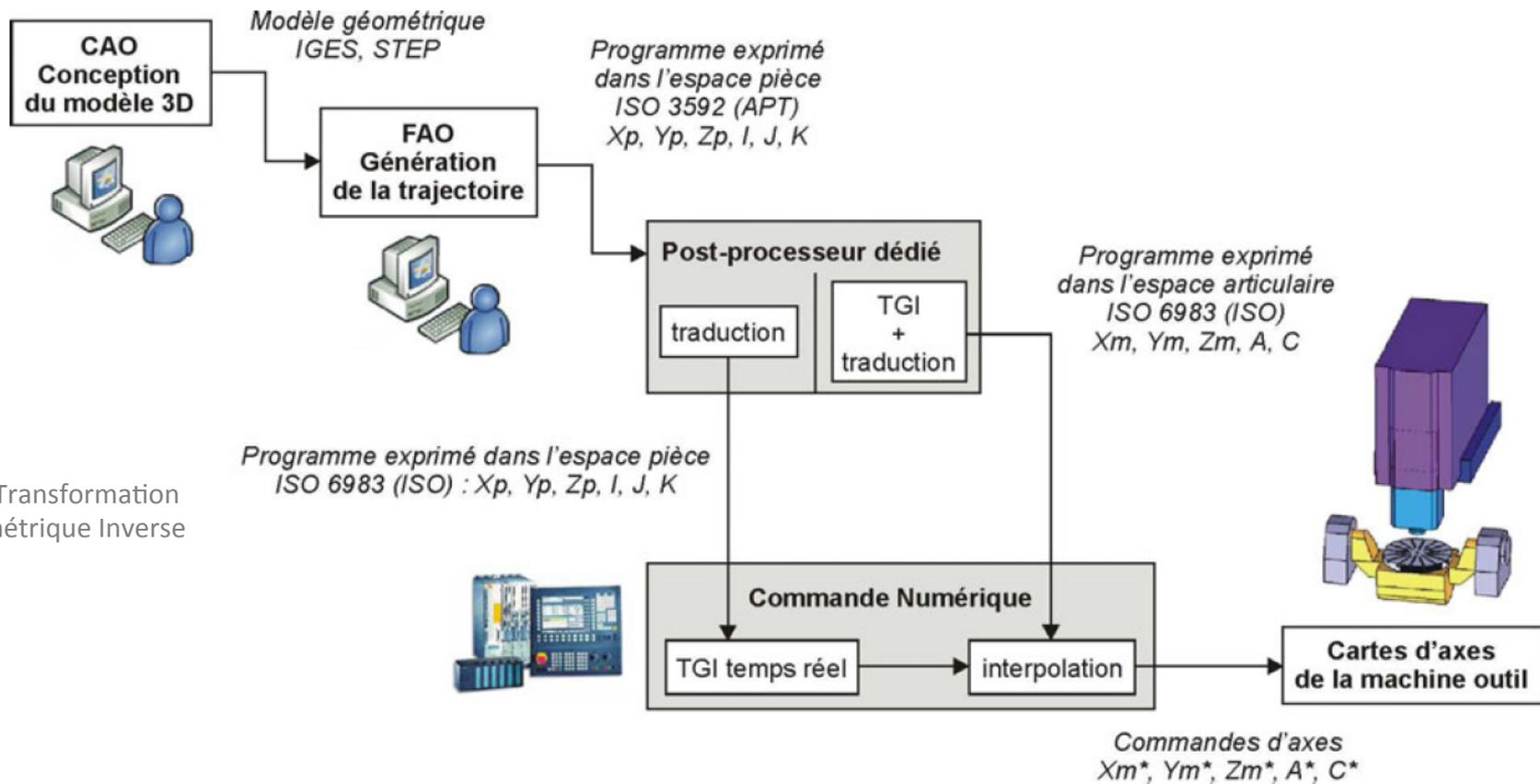
Source : Beudaert2013

C/FAO : Conception/
Fabrication Assistée par
Ordinateur
CNC : Computer Numerical
Command = DCN : Directeur
de Commande Numérique
MOCN : Machine Outil à
Commande Numérique

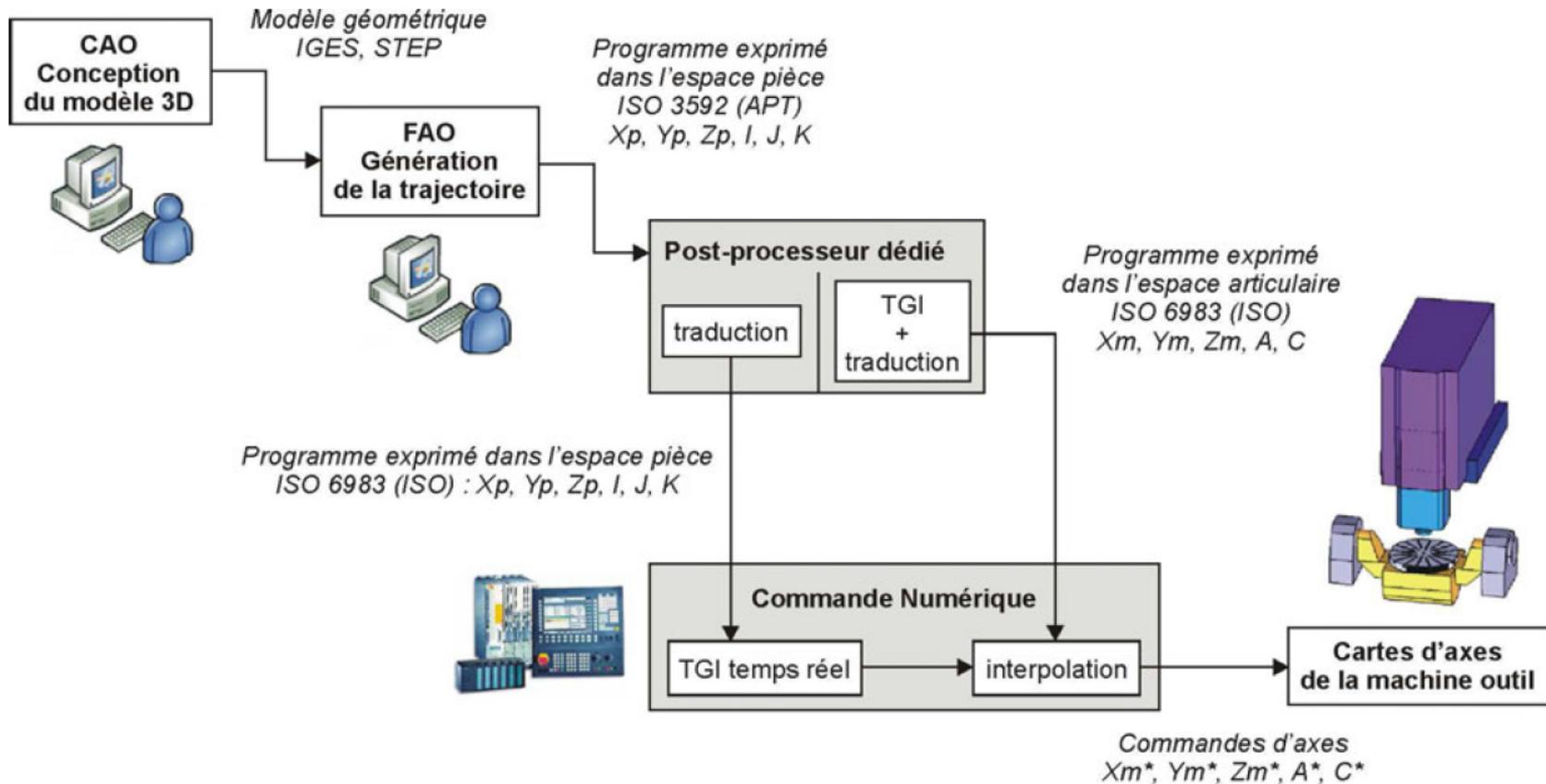
La chaîne numérique

- **Objectif :**

Réaliser de manière répétable une pièce la plus conforme possible à un dessin de définition en respectant le triptyque **Coût/Qualité/Délai**



La chaîne numérique



- **CAO : Conception Assistée par Ordinateur**

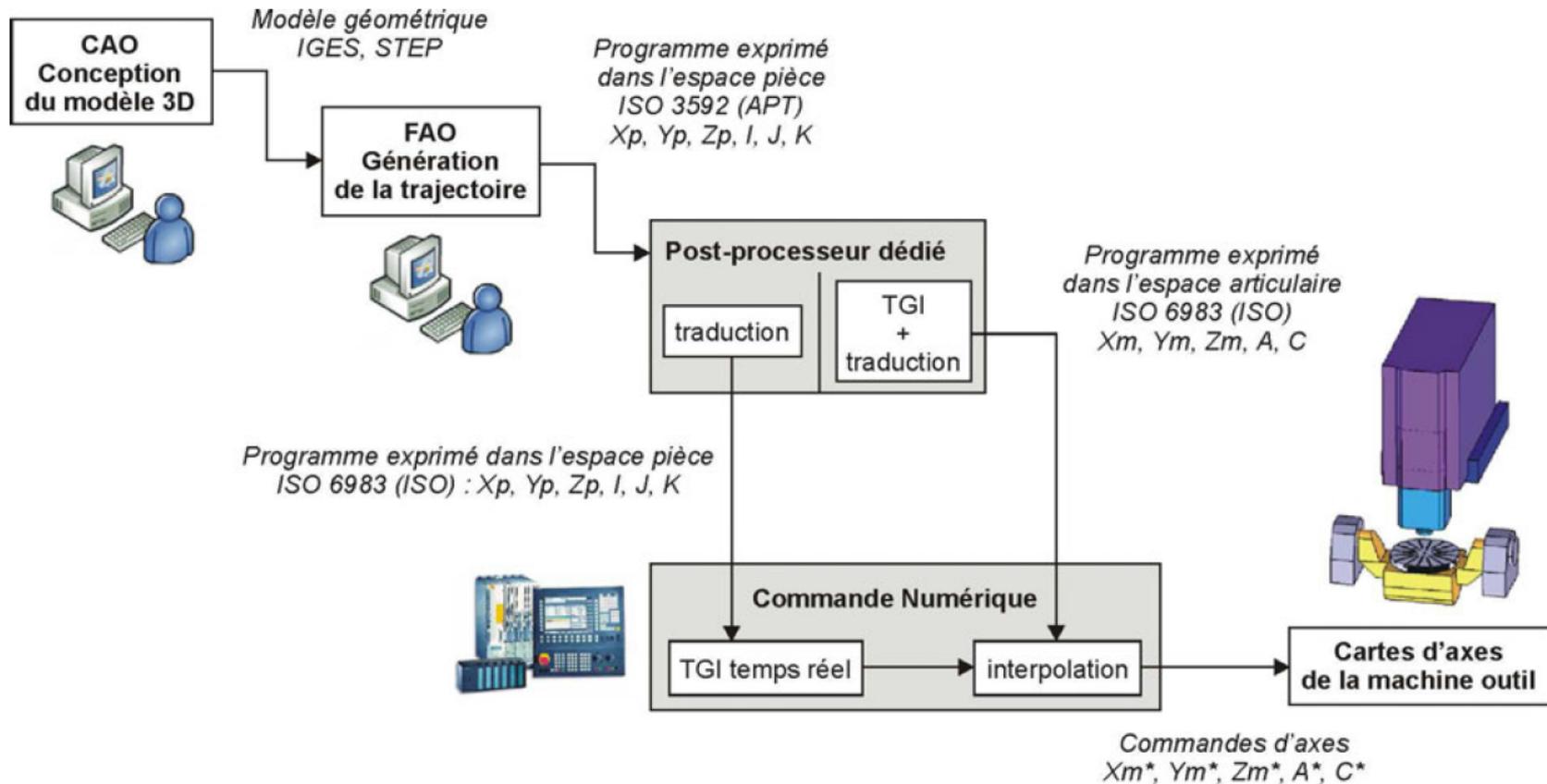
In : définition d'une pièce

Utilisation d'un modéleur géométrique surfacique et/ou volumique (SolidEdge, Catia...)

Out : Modèle surfacique/volumique de la pièce : fichier IGES, STEP, PAR....

Source : Beudaert2013

La chaîne numérique



- **FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur**

In : modèle CAO de la pièce

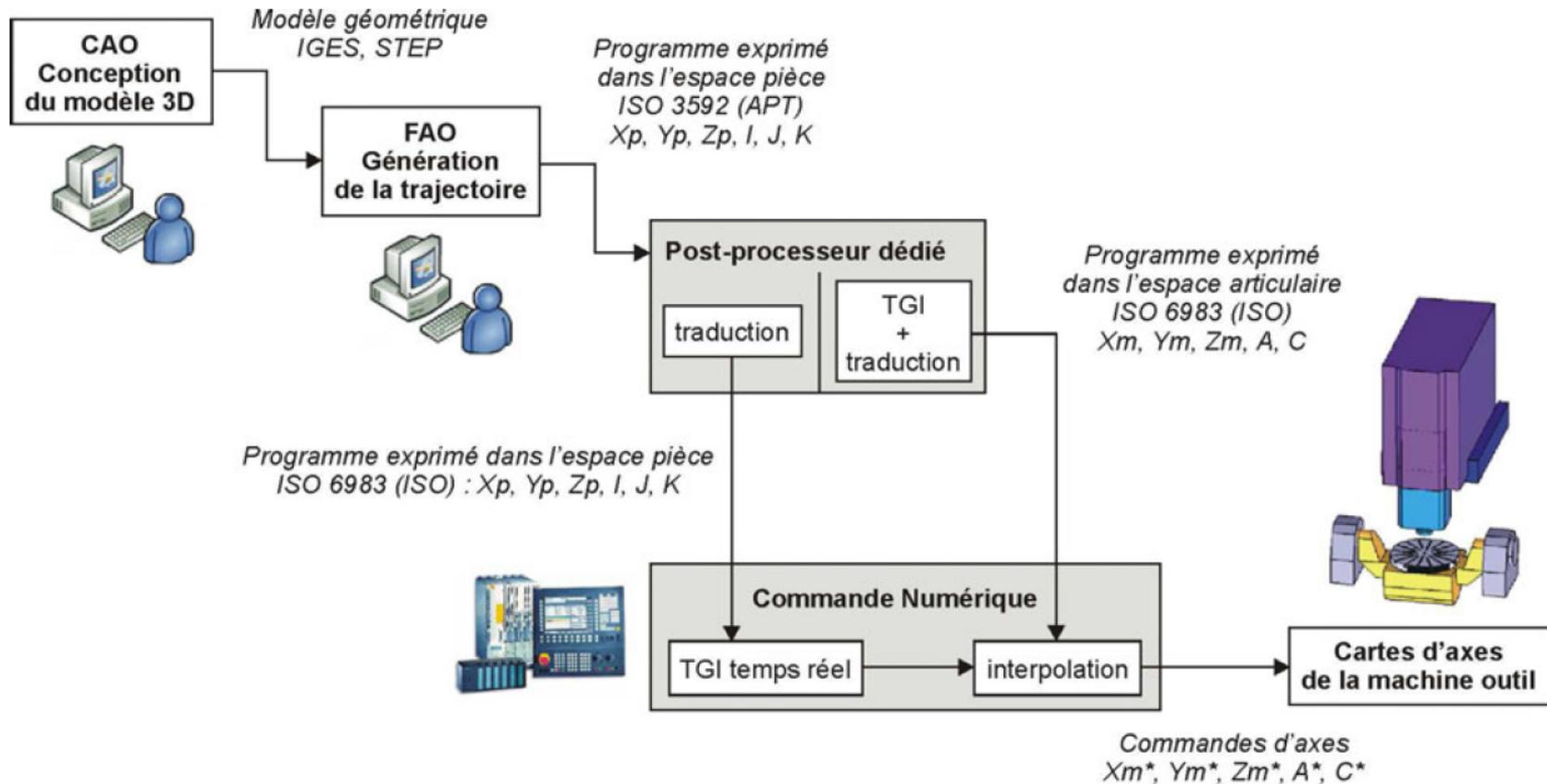
Génération des trajectoires d'usinage

Out : Trajectoire voulue de l'outil dans l'espace pièce

X, Y, Z : Coordonnées d'un point de contrôle de l'outil dans le repère lié à la pièce usinée

i, j, k : Orientations de l'outil dans ce même repère

La chaîne numérique



- **Nécessité :**

Conversion des coordonnées de l'outil dans l'espace pièce à l'espace articulaire

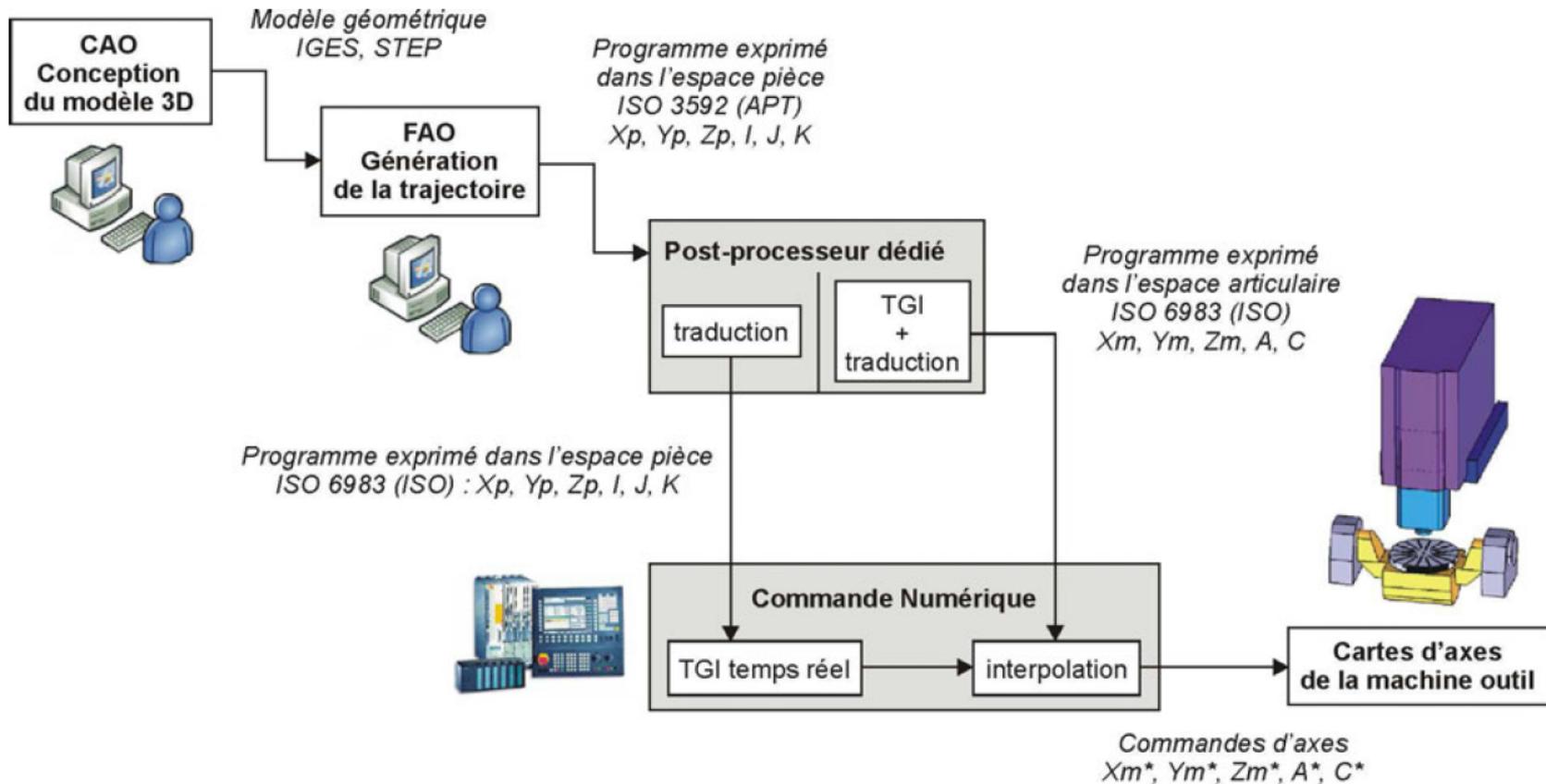
=> Application d'une Transformation Géométrique inverse permettant de convertir les positions de l'outil (XYZ ijk) en positions des axes de la machine-outil

Pour une machine 5 axes

X, Y, Z : Position des axes de translation X, Y, Z

A, C : Angle des axes pilotables en rotation

La chaîne numérique



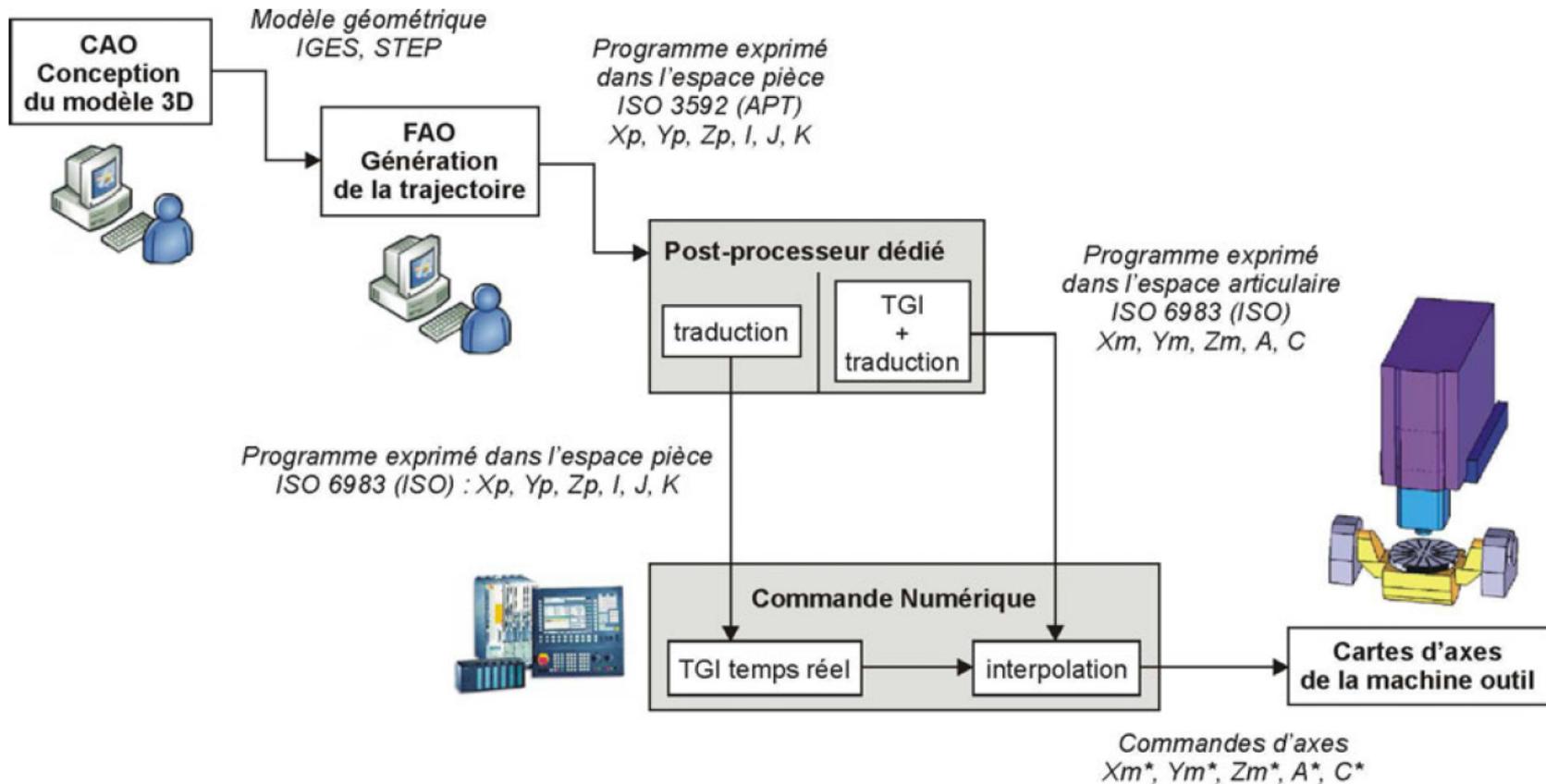
- **Deux possibilités :**

- 1) TGI réalisée par un fichier de postprocesseur, i.e. par le logiciel de FAO

⇒ Le code injecté à la machine contient déjà les commandes des axes

- 2) TGI réalisée par la commande numérique de la machine

La chaîne numérique



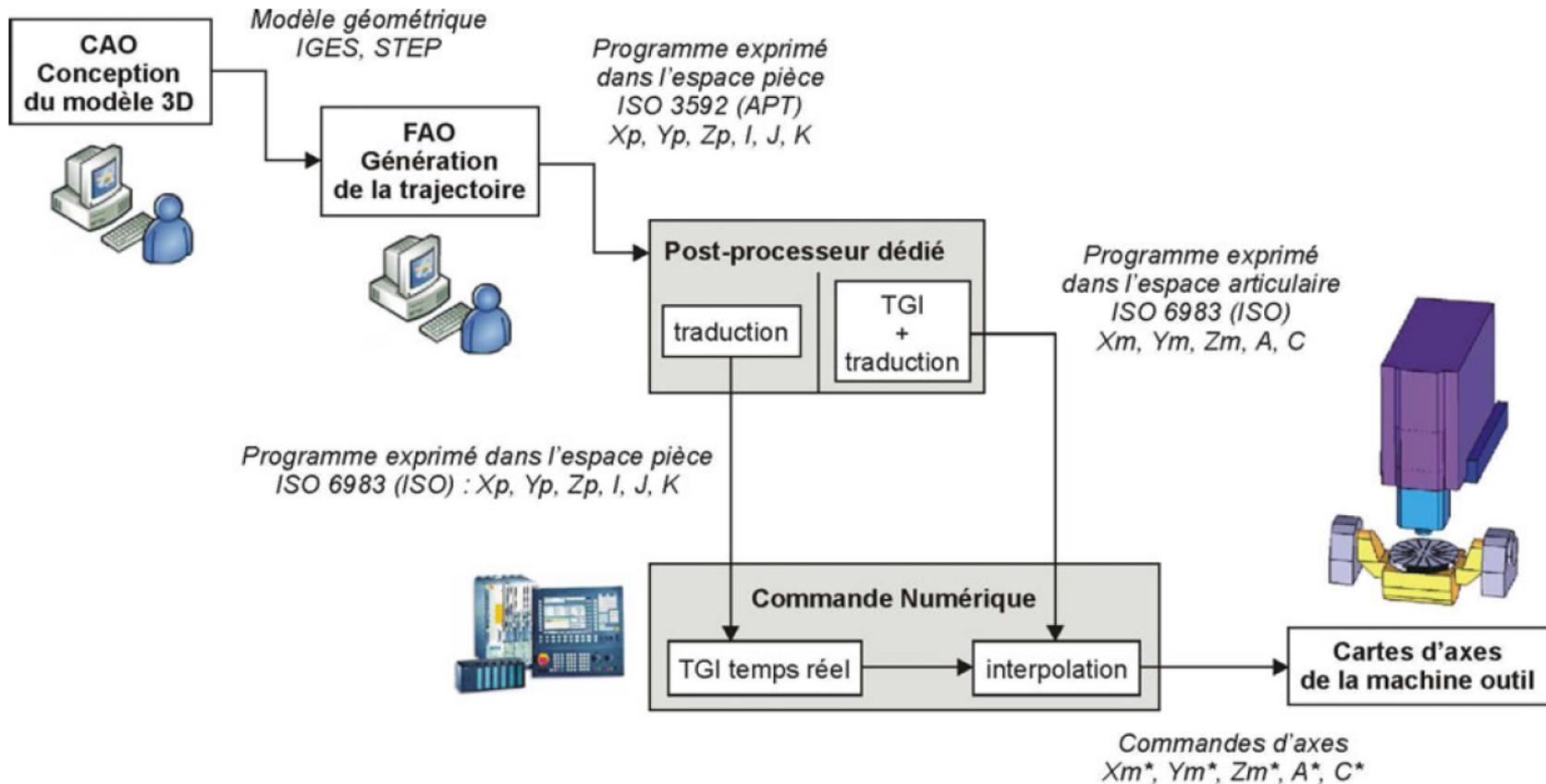
- **Commande numérique:**

Traitement et interprétation des trajectoires par la machine

+ Interpolations spatiale et temporelle : détermination des commandes de position, vitesse et accélération à piloter

...

La chaîne numérique



- **Commande numérique:**

...

+ Boucle d'asservissement des axes

⇒ Mouvement de la machine et réalisation de l'usinage

Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



Pilotage des
axes machine

MOCN



Usinage



Problématiques rencontrées

- **Aspects physiques/pratiques :**

- Machine(s)

- Outils

- Mise en Position, Maintien en Position**

- Repérage

- Physique de l'usinage

- **Aspects numériques :**

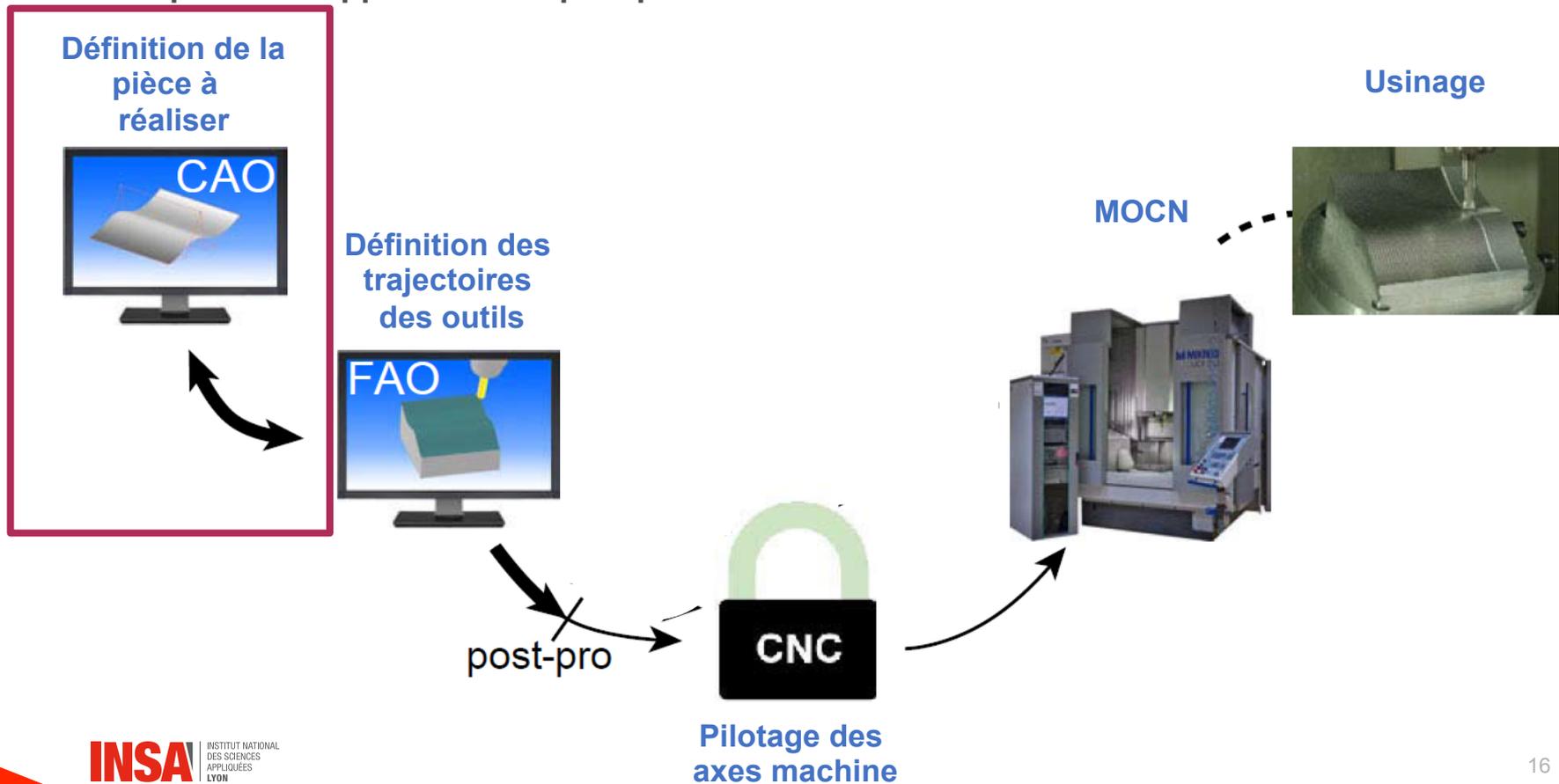
- Conversion entre formats de fichiers

- Interpolation spatiale et temporelle

- ...

Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie



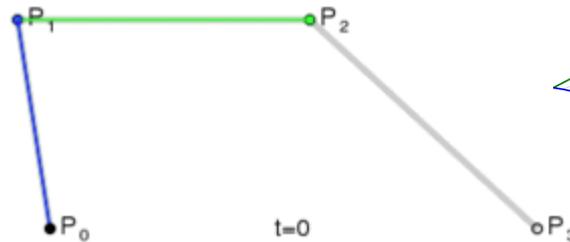
Problématiques – Rôle de la CAO



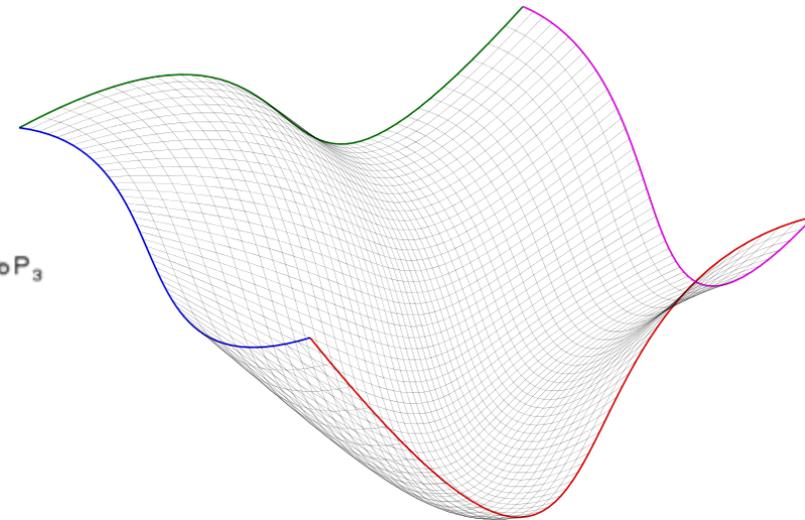
- **Définition géométriques de surfaces complexes :**

Techniques d'interpolation et d'approximations

- Coons
- Bézier
- Spline
- B-spline
- NURBS



Tracé d'une courbe de Bézier



- ***Cf cours de Conception***

- **Entrée : pièce/fonction à réaliser**

- **Sortie : fichier volumique ou surfacique, facétisé ou non, information simple (lignes, surface, volumes) ou complexe (fonctions CAO, historique...)**

Problématiques – Rôle de la CAO

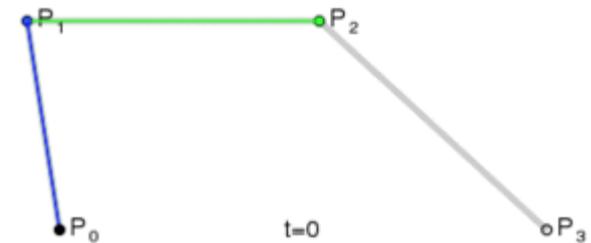


- **Un exemple : les courbes et carreaux de Bézier**

Créés par Pierre Bézier, ingénieur chez Renault, vers 1962

Objectif :

- Définition d'une surface avec un nombre minimal de point caractéristiques
- Modification facile de toute la surface par le déplacement d'un nombre minimal de points



Tracé d'une courbe de Bézier

Idée directrice :

Points de contrôle P_i : barycentre d'un certain nombre de points affectés de coefficient dépendant d'une variable t . Construction de la courbe à partir de la base de polynômes de Bernstein à l'ordre n

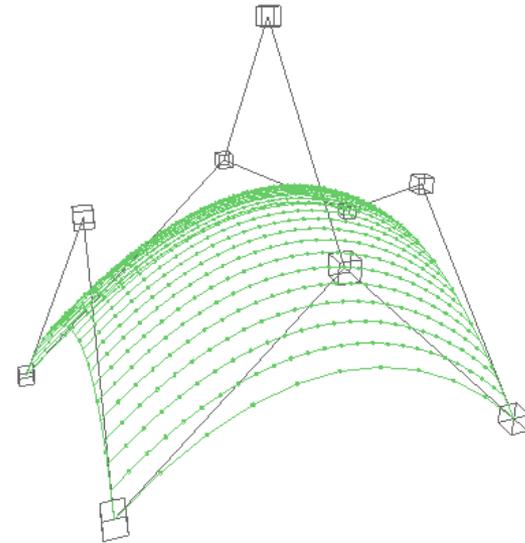
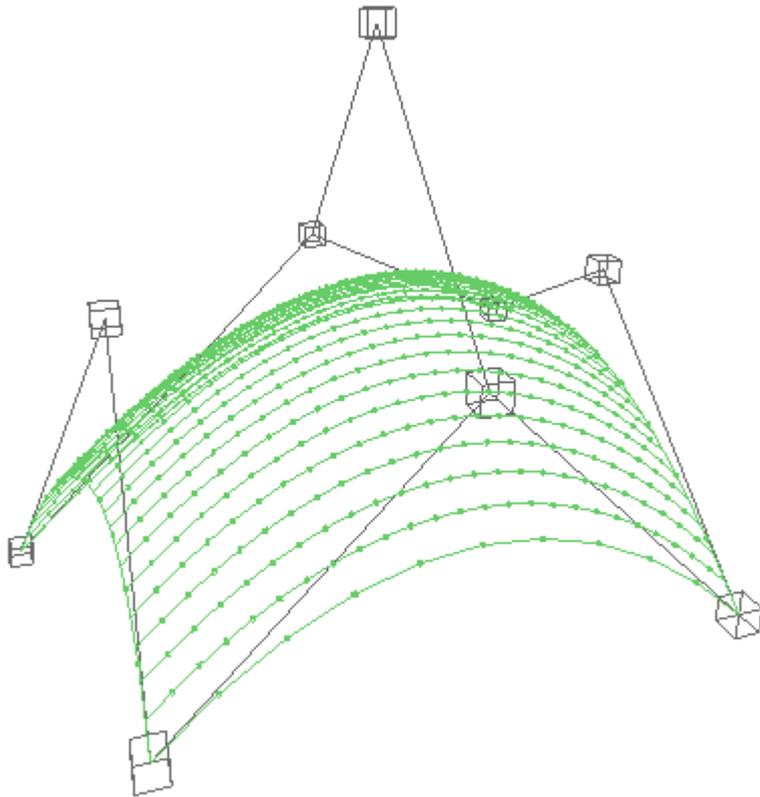
$$\sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t), \quad t \in [0,1] \text{ avec } B_i^n(t) = c_n^i t^i (1-t)^{n-i}$$

Problématiques – Rôle de la CAO



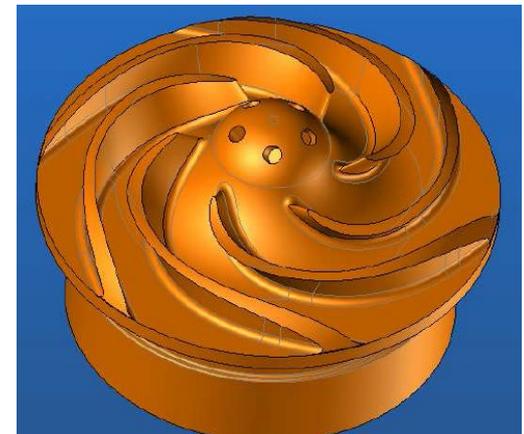
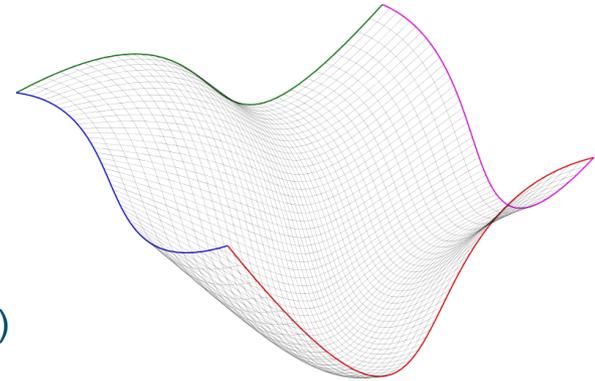
- **Extension à des surfaces :**

Modification d'une surface par modification du point de contrôle central



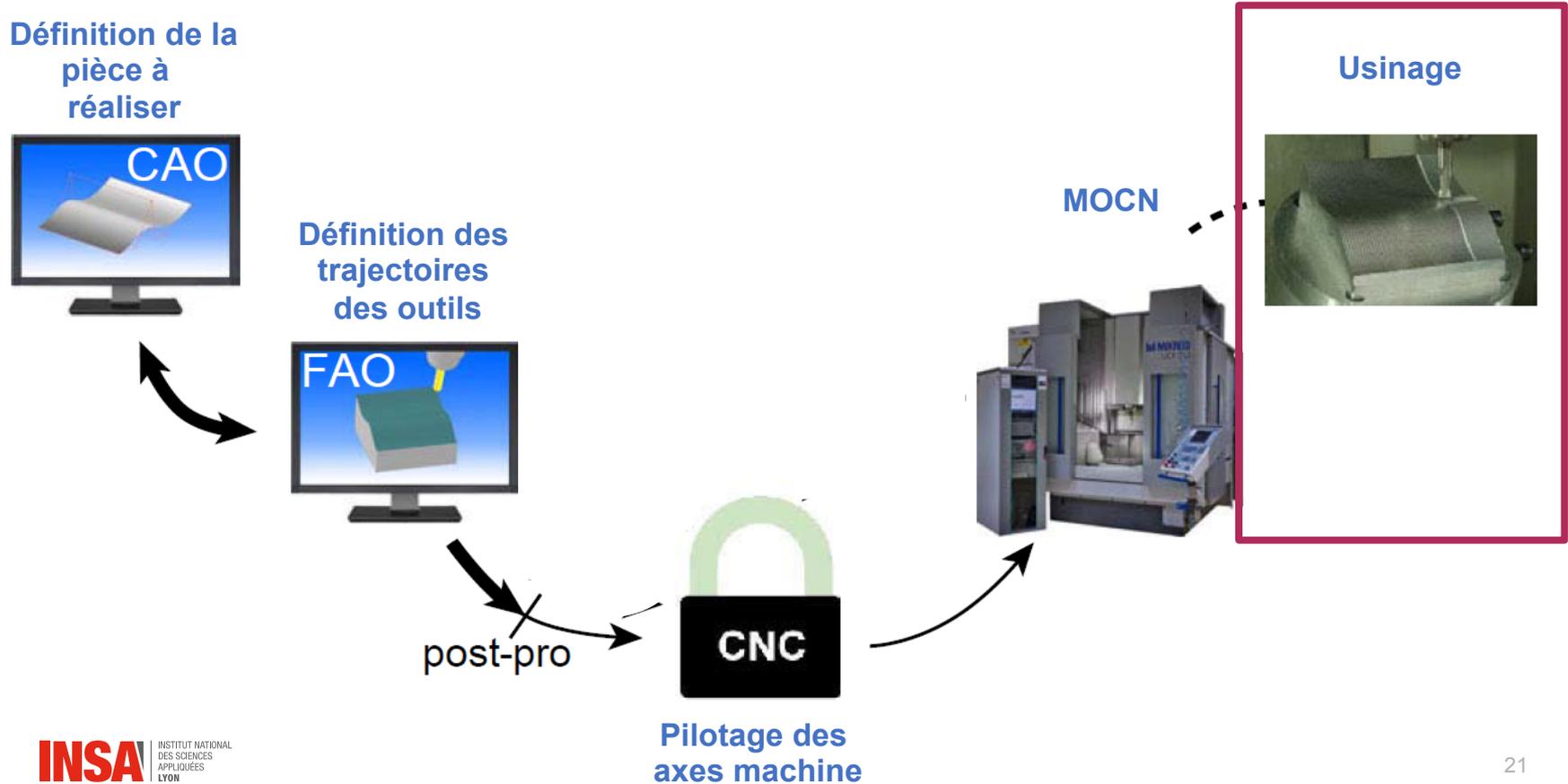
Problématiques – Rôle de la CAO

- **Entrée : pièce/fonction à réaliser**
- **Différents types de modélisation possibles :**
 - Filaire (entités représenté par (ligne, courbe, etc.)
 - Surfacique (peau du modèle → entité creuse)
 - Solide (géométrie volumique : extrusion, opération booléenne, etc.)
- **Sortie :**
 - fichier volumique ou surfacique
 - facétisé ou non
 - information simple (lignes, surface, volumes) ou complexe/riche (fonctions CAO, historique...)



Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie



Problématiques - Usinage



- **Diverses problématiques liées à la physique de l'usinage :**

Voir cours d'Usinage par Outil Coupant : GMCIP-3-PRODTP1

- **Définition et choix des paramètres de coupe**

Vitesse de coupe V_c , avance f et profondeur(s) de passe a_p et a_e

- **Et de pilotage de la machine qui en découlent**

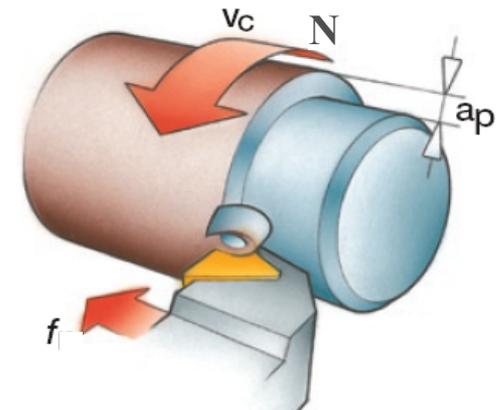
Vitesse de rotation de la broche N , vitesse d'avance V_f

- **Efforts et puissance nécessaires à la coupe**

⇒ Choix des machines

- **Rappel important :**

Le torseur des vitesse de l'outil par rapport à la pièce contiendra deux composantes : la vitesse de coupe V_c qui permet l'usinage et la vitesse d'avance $V_f \ll V_c$, négligeable à l'échelle de l'enlèvement de la matière mais qui donne la forme de la pièce usinée et que l'on doit piloter !



Problématiques - Usinage

- L'opération de coupe entraîne différents phénomènes qui impactent la qualité du résultat

⇒ Etat de surface de la pièce usinée, i.e. rugosité

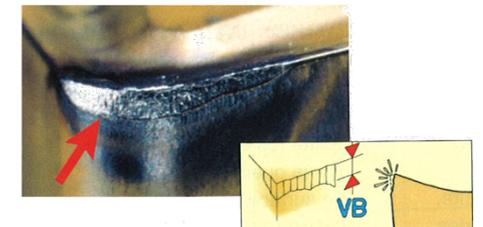
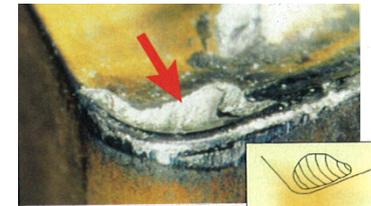
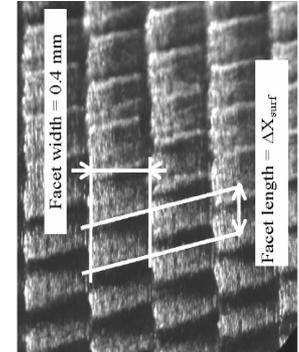
Voir TP d'usinage par outil coupant GMC-3-PROTP1

⇒ Efforts sur les pièces, avec sollicitations à grande vitesses d'avance et de rotation

⇒ Déformation des pièces, perte de qualité géométrique

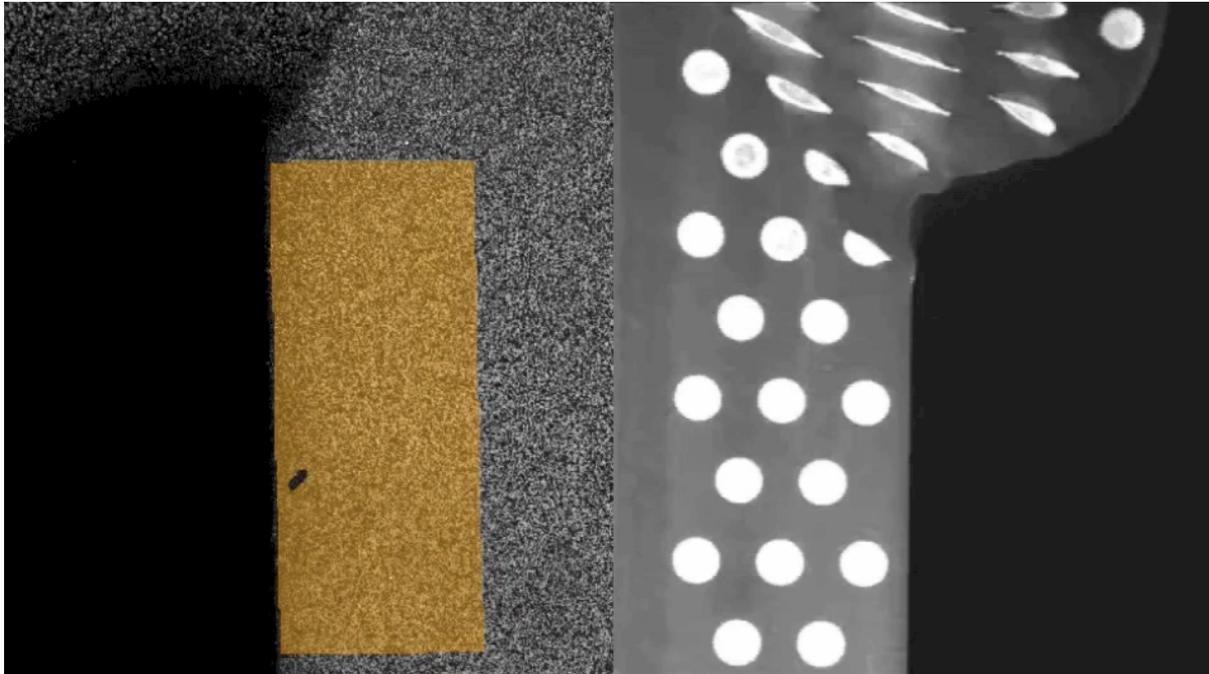
⇒ Vibrations des pièce et de la structure, surtout pour l'usinage de voiles minces

⇒ Echauffements d'où modification de l'état de surface de la pièce, dégradation et usure des outils



Un (tout petit) peu de physique de la coupe

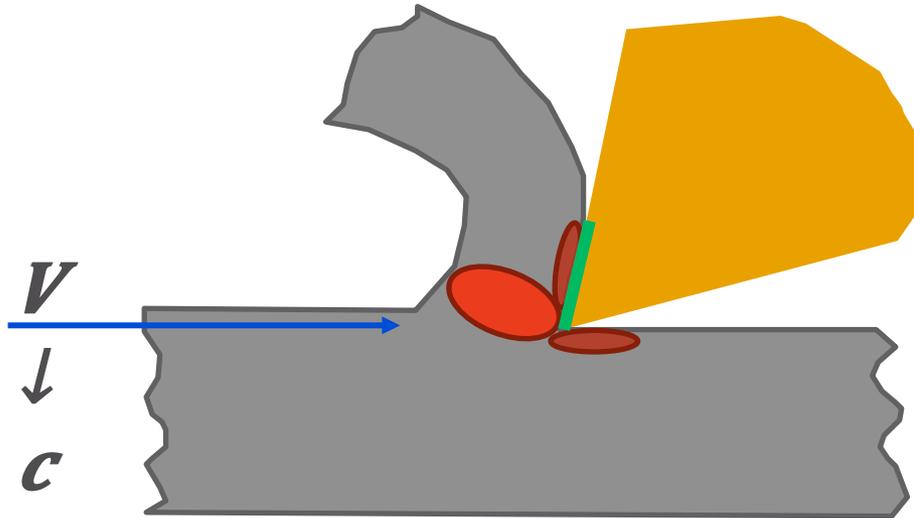
- **Constatations expérimentales sur un usinage *conventionnel***



- **Cisaillement de la matière, déformation plastique/irréversible**
Cf Pliage en PC2A

Un (tout petit) peu plus de physique de la coupe

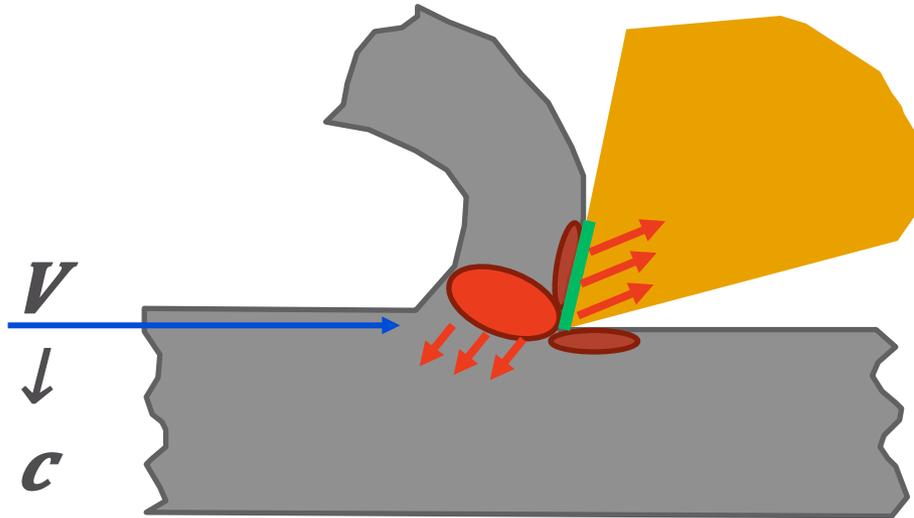
- Que subit la matière ?



- Zones de cisaillement **primaire (secondaire et tertiaire)**
 - ⇒ Déformations plastiques/irréversibles
 - ⇒ Décohésion de la matière, génération du copeau
 - Déformation plastiques : ~90% de l'énergie dissipée se transforme en chaleur
- **Zone de contact**, glissement à grande vitesse

Un (tout petit) peu plus de physique de la coupe

- Que subit la matière ?



- Zone de contact + frottement, glissement à grande vitesse
- Génération et diffusion de chaleur
 - ⇒ Échauffement de la matière (jusqu'à 10^6 °C/s), augmentation de la ductilité, trempe superficielle du matériau.
 - ⇒ Diffusion de chaleur dans l'outil, d'où **usure**

Et si on accélère ?

WHAT IF WE TRIED MORE POWER?

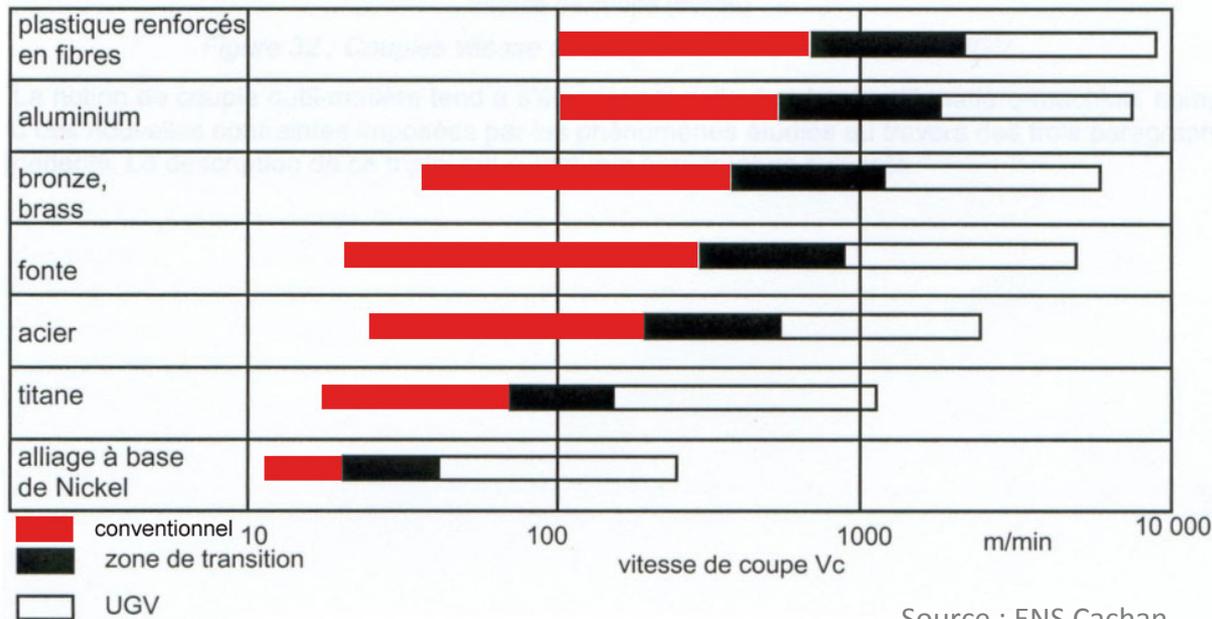


Source : whatif.kcd.com

- **Que veut dire usinage conventionnel ?**

Les améliorations technologiques des machines ont permis d'augmenter fortement les vitesses de rotation des broches et donc les vitesses de coupe

- **Plages de vitesse de coupe de quelques métaux et alliages**

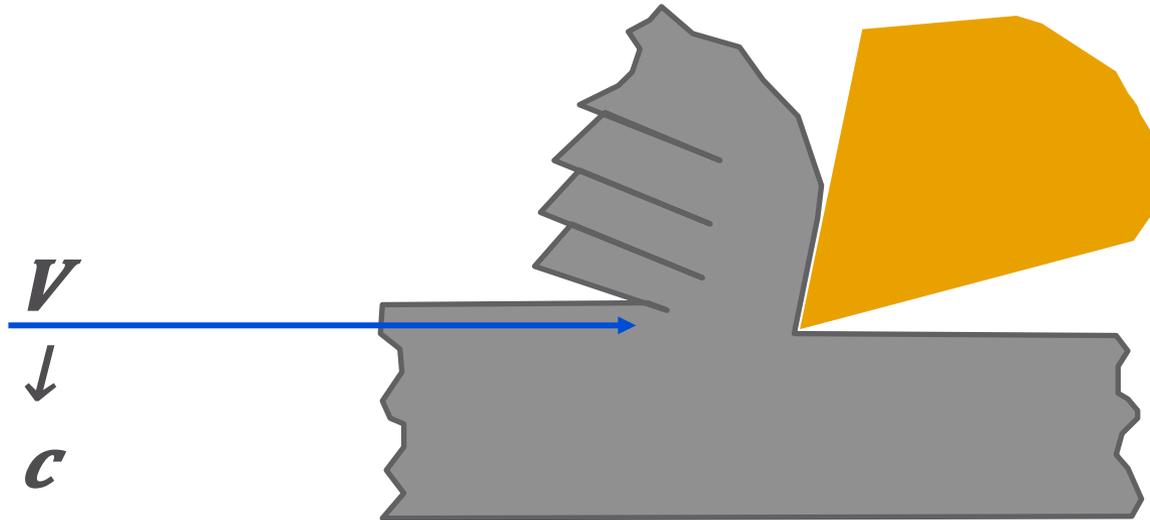


Vallée de la mort

Source : Wikipédia

Un peu de physique de coupe... de l'UGV

- Et si la vitesse de coupe augmente ?



- **Création du copeau par rupture du matériau et non plus par cisaillement**

Fortes vitesses de déformation donc phénomène physique différent

Les transferts thermiques n'ont pas le temps de s'établir.

⇒ La pièce reste quasiment à température ambiante

⇒ 80% de l'énergie de coupe s'évacue dans les copeaux

Un peu de physique de coupe... de l'UGV

- **Quelques avantages de l'UGV :**
 - Efforts de coupe réduits par rapport à usinage conventionnel
 - ⇒ Précision des pièce usinée supérieure car moins de déformations lors de l'usinage
 - Calories dissipées par la coupe évacuées par les copeaux et n'affectent pas thermiquement la pièce
 - ⇒ Meilleure stabilité dimensionnelle

 - Plus grande facilité à usiner des pièces minces
 - Meilleur état de surface des pièces
 - Gain de temps à l'usinage : typiquement d'un facteur 3 à 10
 - Pour certains types de matériaux, possibilité d'usiner sans fluide de coupe (pas de lubrification)

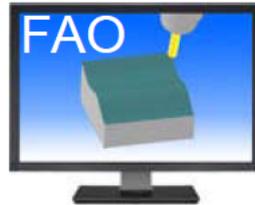
- **Mais contraintes nettement plus importantes sur l'architecture et le pilotage des machines !**

Processus de fabrications des pièces usinées

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



Pilotage des
axes machine



Usinage



- **Architecture et capacités des Machines Outils à Commande Numérique**

Besoin de générer des formes et donc des trajectoires complexes, à des vitesse importantes, de manière fiable et répétable

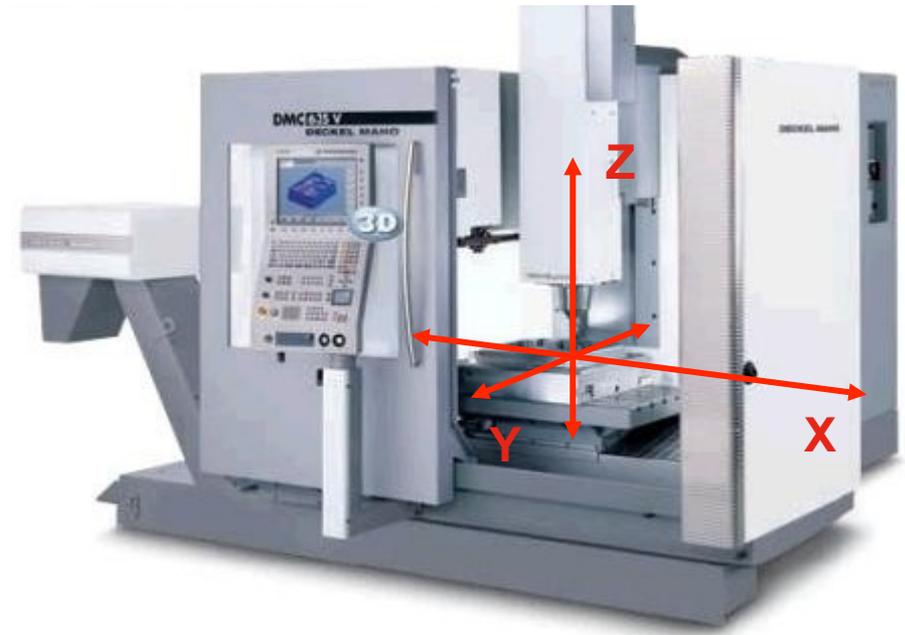
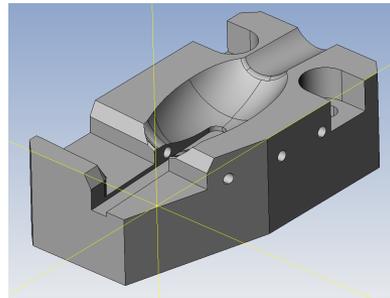
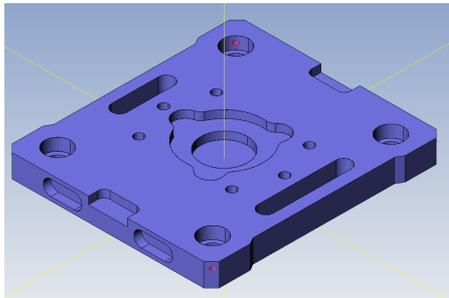
⇒ Nombreuses évolutions récentes issues du domaine de la robotique

Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique

- **Architectures**

Machines 3 axes : fraiseuse *classique*

Réalisation de surfaces classiques
ou gauches sans dépouille



+ Simplicité de pilotage et de mise en œuvre

+ Coût

- Limité aux pièces sans dépouille ou à via de multiples mises en positions (=> dispersions...)

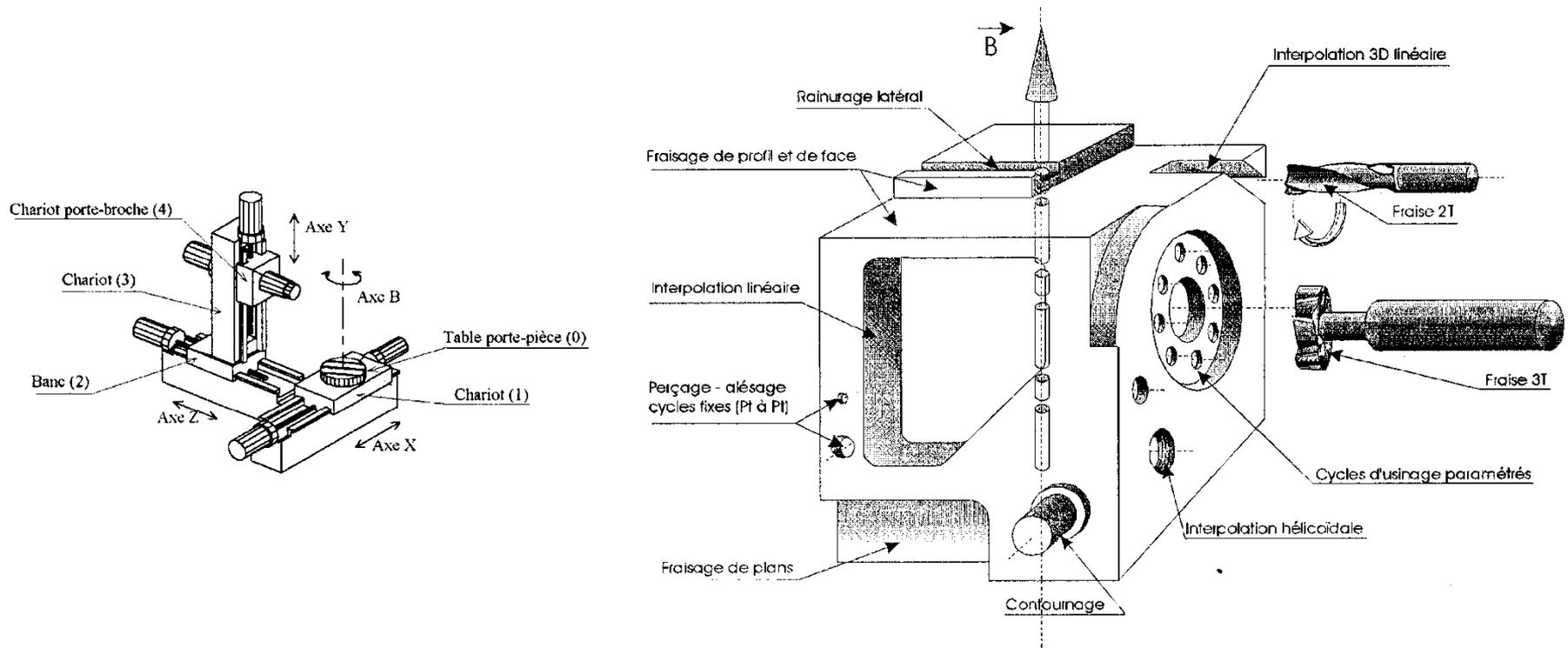
Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- Architectures

Fraiseuse 4 axes BXYZ (1 rotation, 3 translations) : très répandue dans l'industrie

Facilités de poseage : accès à toutes les surfaces latérales de la pièce



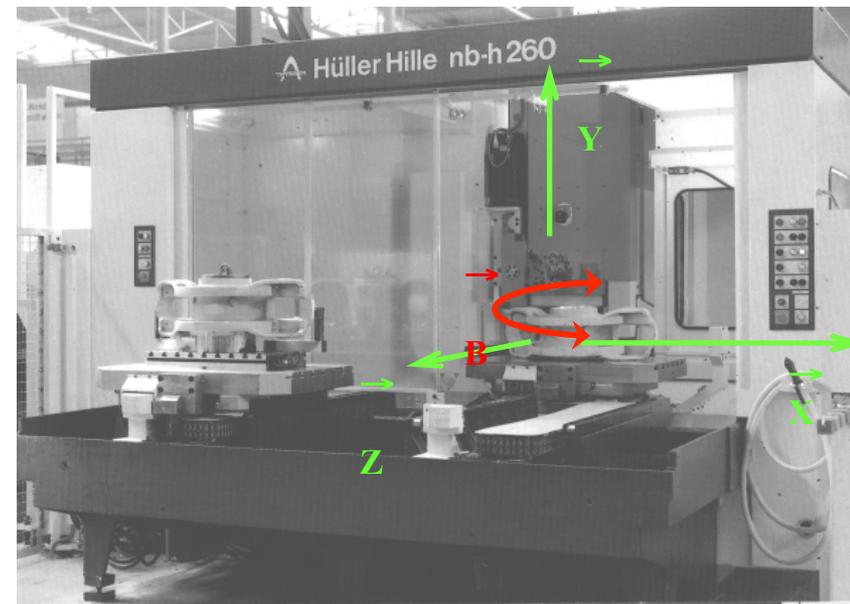
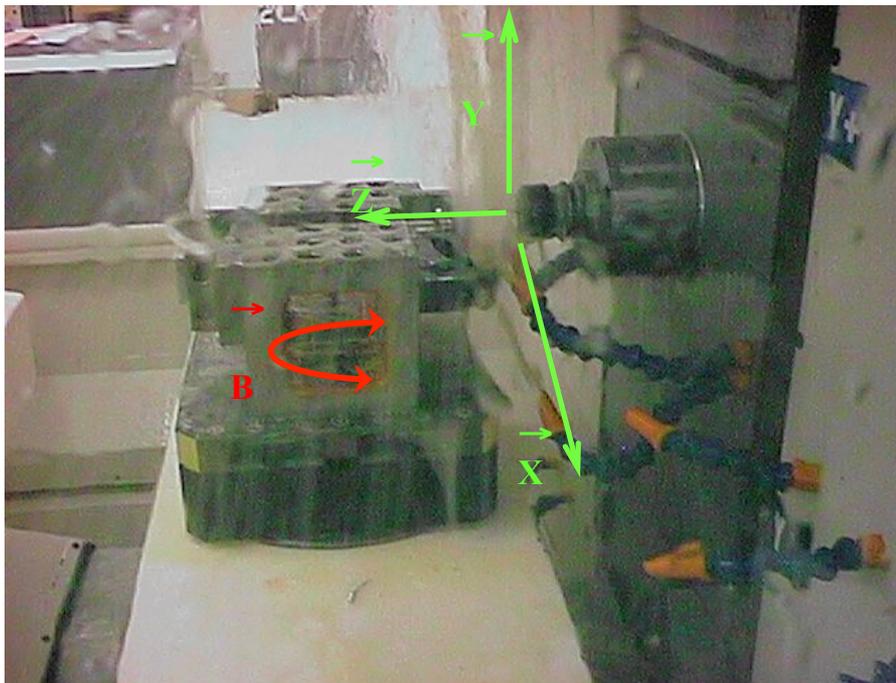
Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- **Architectures**

Fraiseuse 4 axes **BXYZ** (1 **rotation**, 3 **translations**) : très répandue dans l'industrie

Facilités de posage : accès à toutes les surfaces latérales de la pièce



Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- **Architectures machines 5 axes :**

Besoin : usinage de pièces type :

- Aube : constituées de surfaces réglées, développables ou non
- Poche 5 axes : enchaînement de surfaces réglées développables
- Complexes : constituées d'un enchaînement de surfaces quelconques



⇒ **Orientation de l'outil en plus de son positionnement dans l'espace**

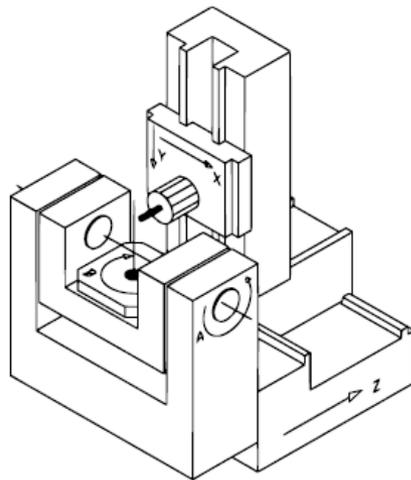
Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



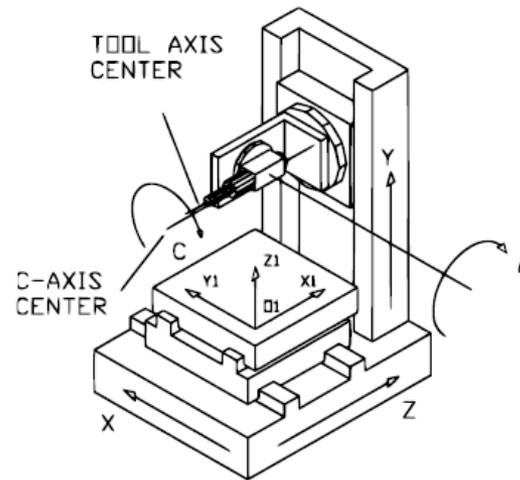
- **Architectures machines 5 axes :**

Plusieurs architectures de machines possibles :

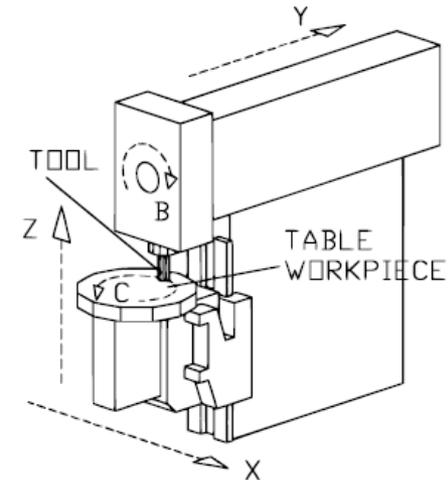
- R'R' : 2 axes de rotations pour orienter la table
- RR : 2 axes de rotations pour orienter l'outil
- R'R : 1 axe de rotation pour orienter la table et un autre pour l'outil



(a) machine R'R'



(b) machine RR



(c) machine R'R

Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- **Architectures machines 5 axes :**

Plusieurs architectures de machines possibles :

- R'R' : 2 axes de rotations pour orienter la table

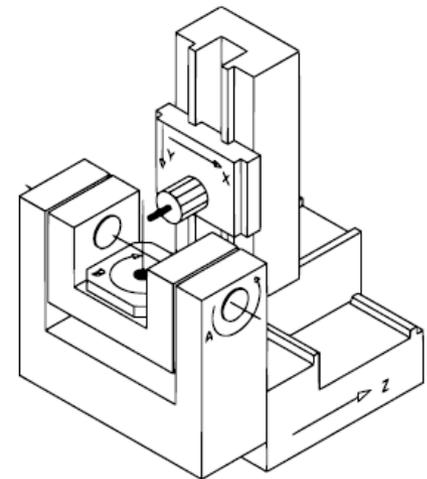
- ⇒ Rigides

- ⇒ Usinage de pièces de tailles modérées

- ⇒ Recalcul des trajectoires si mouvement de la pièce sur la table

- RR : 2 axes de rotations pour orienter l'outil

- R'R : 1 axe de rotation pour orienter la table et un autre pour l'outil



(a) machine R'R'

Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique

- **Architectures machines 5 axes :**

Plusieurs architectures de machines possibles :

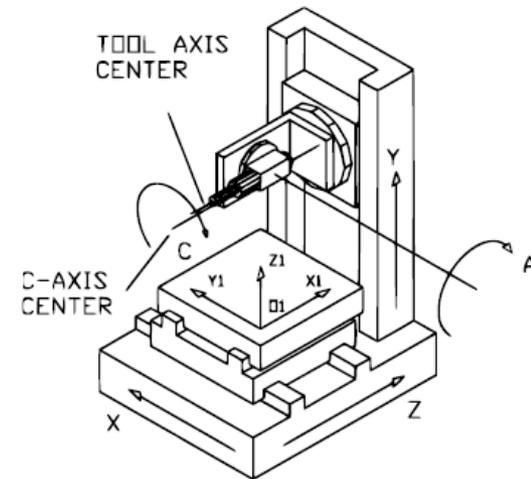
- R'R' : 2 axes de rotations pour orienter la table

- RR : 2 axes de rotations pour orienter l'outil

⇒ Usinage de grandes pièces

⇒ Pas de recalcul des trajectoires en cas de changement de position

- R'R : 1 axe de rotation pour orienter la table et un autre pour l'outil

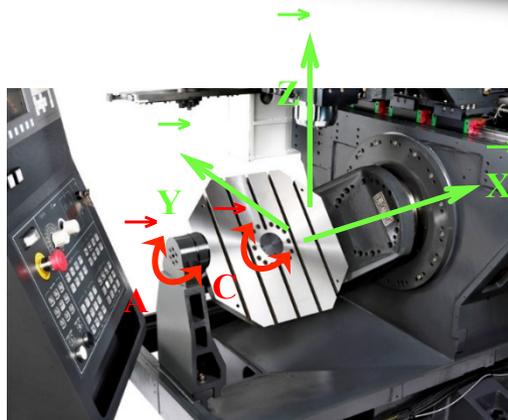
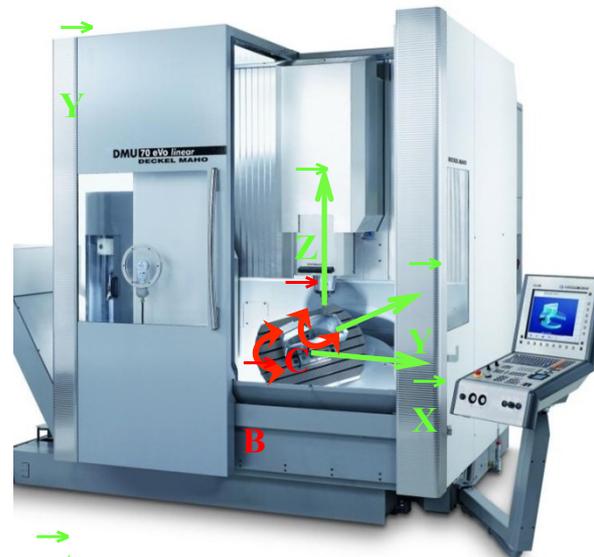
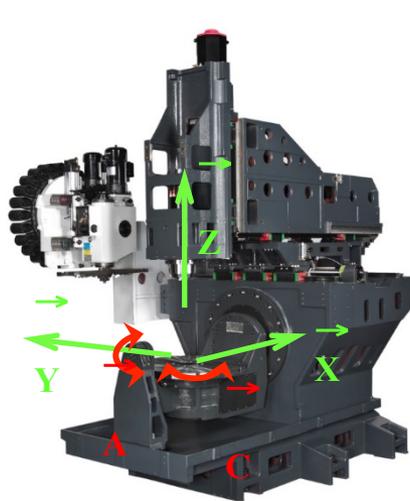


(b) machine RR

Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique

- Architectures

Machines 5 axes **ACXYZ** ou **BCXYZ**



Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- Architectures

Machine INSA GMC : Huron Kx8-five : ACXVZ, R'R'

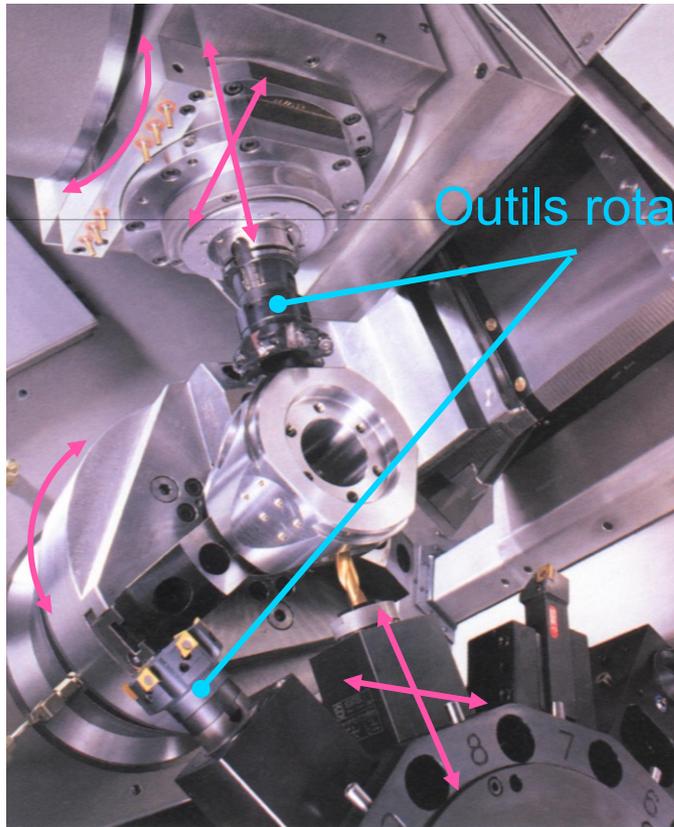
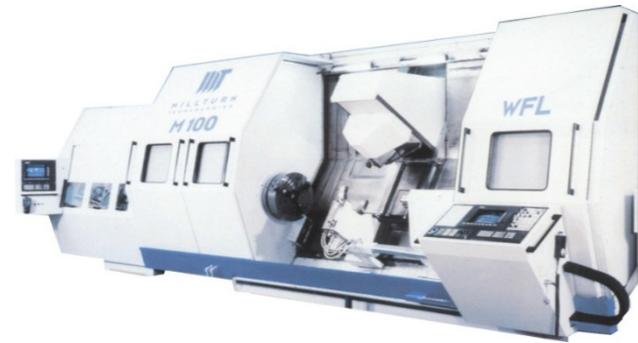
Exemple d'usinage sur machine UGV 5 axes R'R :



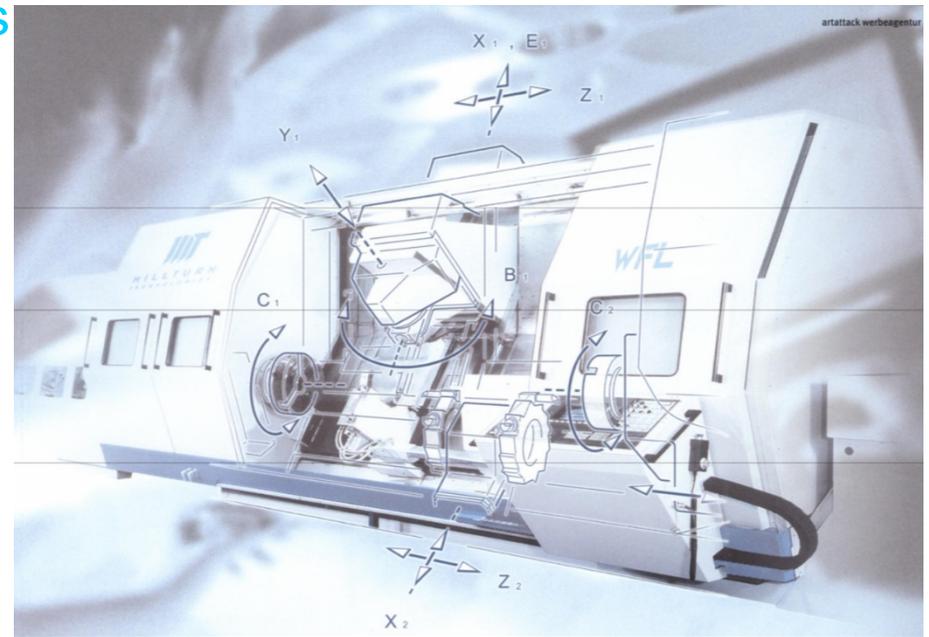
Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique

- Architectures :

Tour bi-broche multi-axes (9) : tournage + fraisage sans manipulation de l'opérateur



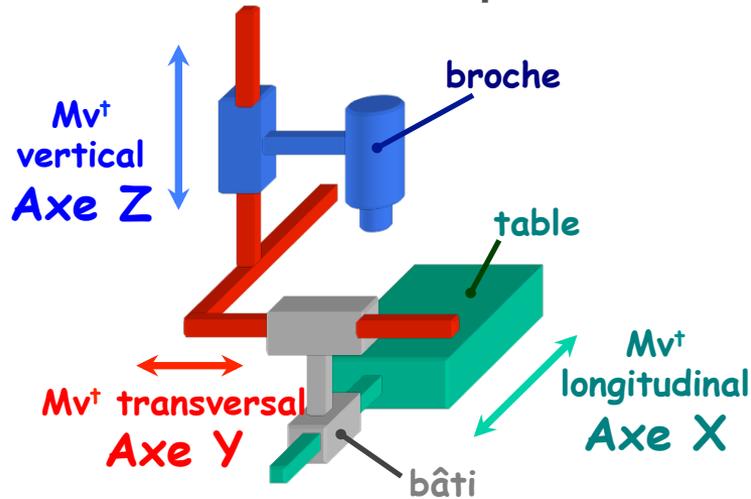
Multiples outils rotatifs (=> axes supplémentaires)



Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- Architectures : série vs. parallèle



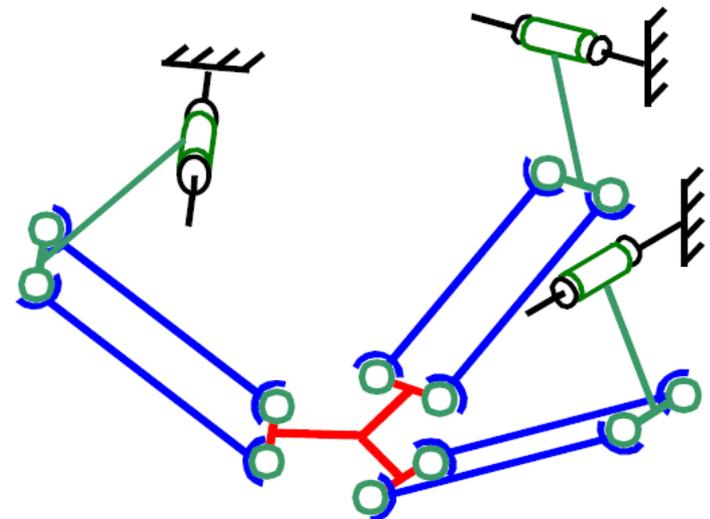
Série : machines conventionnelles

- + Volume accessible, simplicité de pilotage
- Vitesse, précision

Parallèle : hexapode, hexaglide...

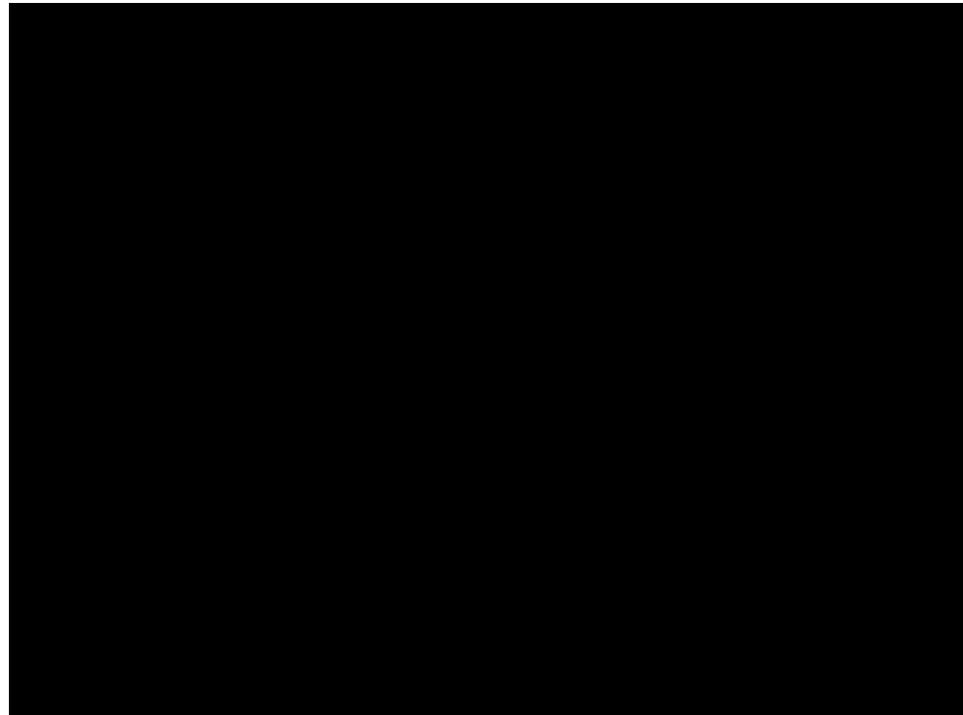
- + Vitesse, précision
- Volume accessible, pilotage

- Mauvais ratio « empreinte au sol »/« volume de travail »
- DCN peinent à les piloter
- Etalonnage complexe
- Multiples degrés de liberté



Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique

- Machine d'usinage 5 axes à structure parallèle



Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- **Contraintes matérielles :**
 - Vitesse de rotation de la broche
 - Puissance
 - Couple
- **Courses des axes => volume de travail potentiel**
- **Vitesses maximum des axes : en déplacement rapide V_{rapide} et en travail V_f**
- **Accélérations**
- **Jerk : dérivée de l'accélération**

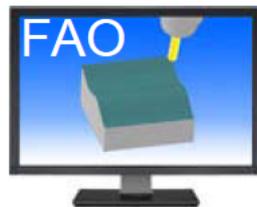
Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



Pilotage des
axes machine

MOCN



Usinage



Outils et leur utilisation !



Problématiques – Outils



- Outils

Fraise droite 2T : outil le plus classique en usinage, travail sur 3 axes simultanés si coupe au centre. Outil fragile



Fraise torique : moins fragile car rayonné (efforts de coupes répartis de manière plus homogène)



Fraise hémisphérique : utile pour les opérations de balayage (surfaces gauches) et reprises de rayon. Outil fragile, *faible* profondeur de passe.



Problématiques – Outils



- Usinage en flanc vs. en bout



	Usinage en bout	Usinage par flanc
Mode d'usinage		
Temps	Explosion du temps d'usinage ⇒ grand nombre de passes	Réduction du nombre de passes ⇒ du temps d'usinage
Coût	Coûteux car temps de production très long et nécessite des opérations de polissage	Réduction des coûts
Qualité	Surface festonnée à cause du rayon de bout d'outil	Qualité de surface améliorée ⇒ réduction des opérations de polissage

Problématiques – Outils



- **Outils**

Ravageuse ou fraise d'ébauche : efficace pour les opérations d'ébauche (peu précise), forte profondeur de passe. Fraise hérisson (g.) permettent un important débit de copeau



Fraise boule : utiles pour les opérations de balayage et les reprises de rayon. Très fragiles et limitées en profondeur de passe. Utilisées surtout pour balayer certaines faces en contre dépouille



Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



Pilotage des
axes machine

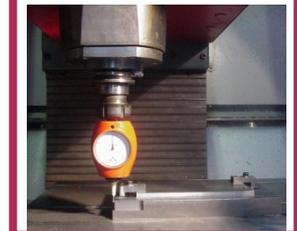
MOCN



Usinage



Réglage



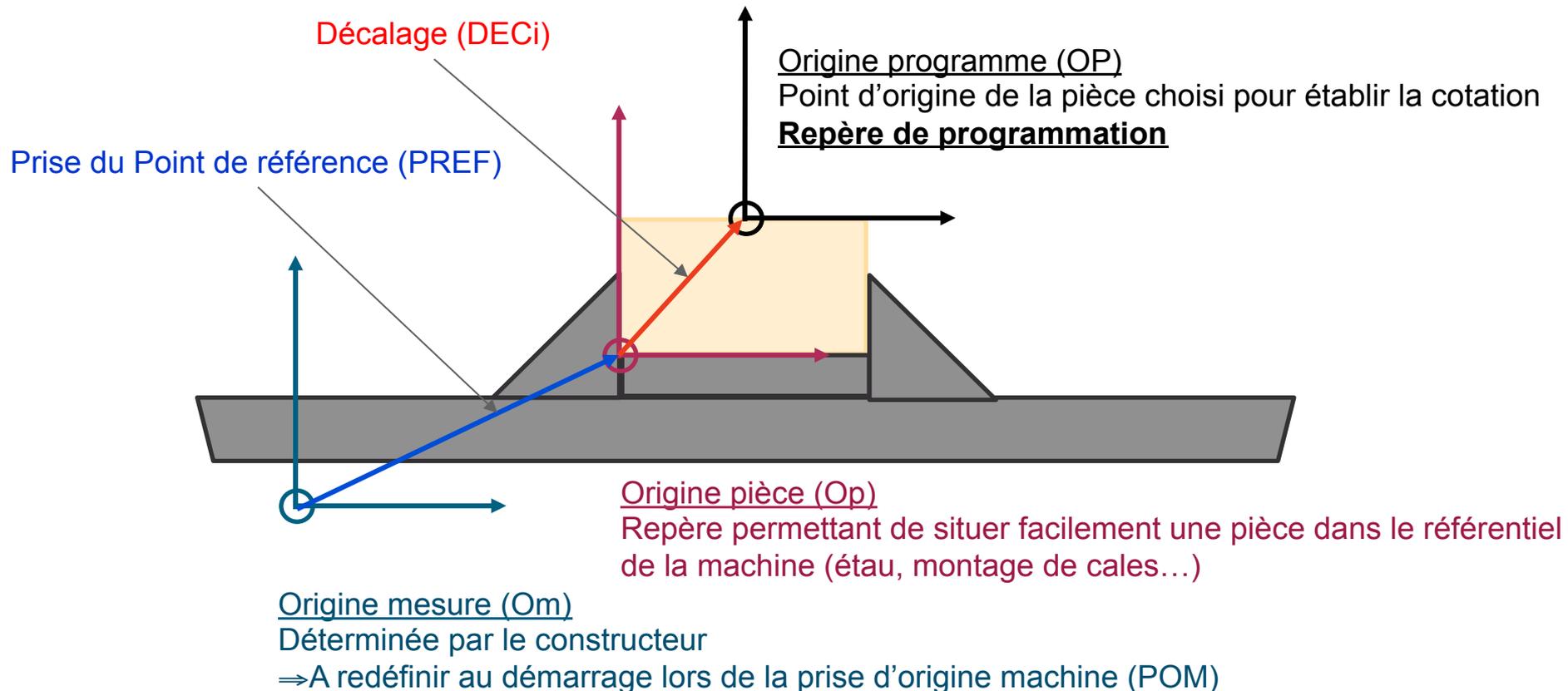
Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- **Posage – MiP MaP**

Cf Cours de Bureau des Méthodes 3-PRODU2

- **Repérage : 3 origines programmées dans une MOCN**



Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



MOCN



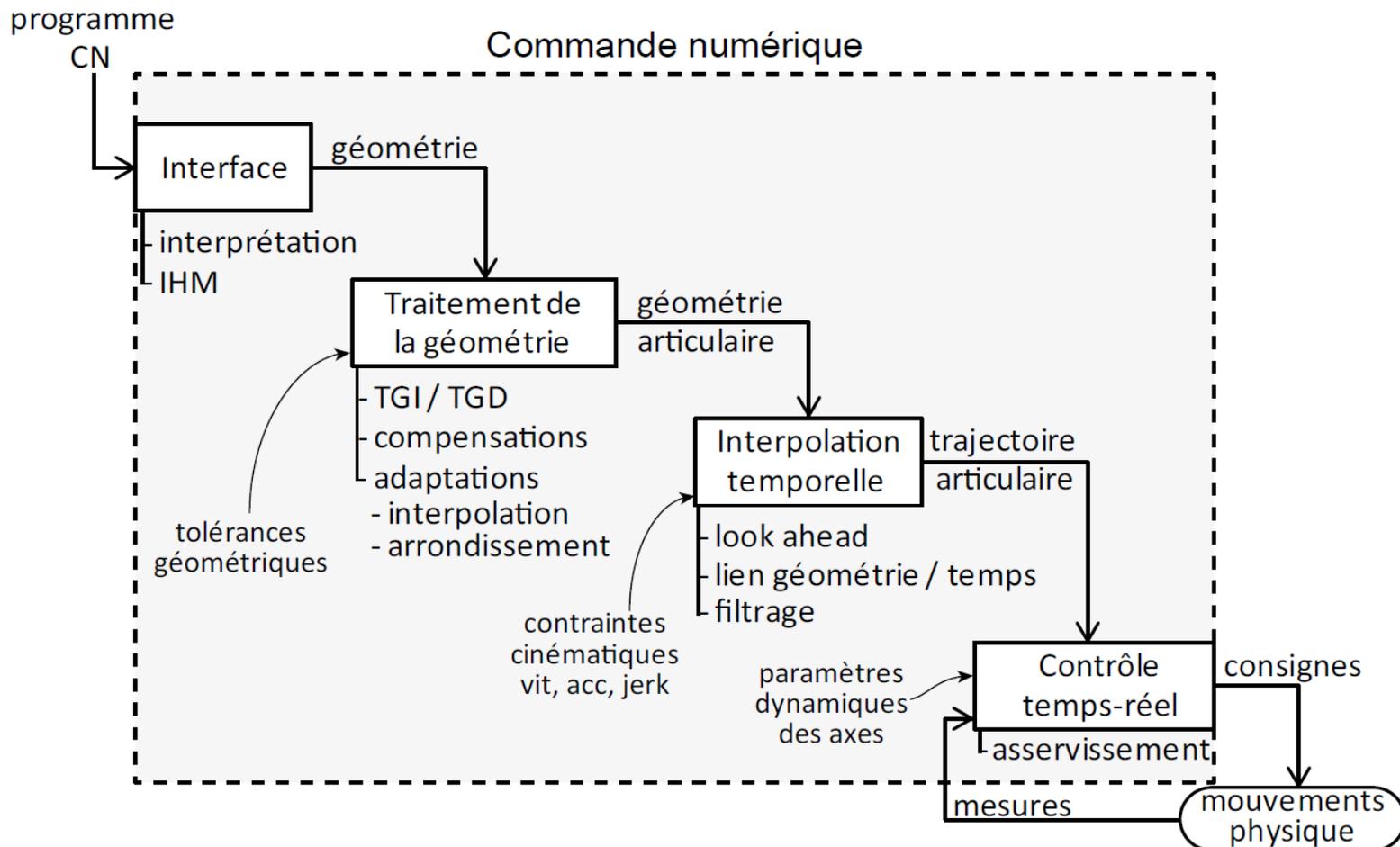
Usinage



Problématiques – Rôle du DCN



- Le Directeur de Commande Numérique est l'organe de contrôle de la machine-outil



TGI : Transformation Géométrique Inverse
TGD : Transformation Géométrique Directe
IHM : Interface Homme Machine
Jerk : dérivée de l'accélération

Problématiques – Rôle du DCN

- Fonctionnement du DCN

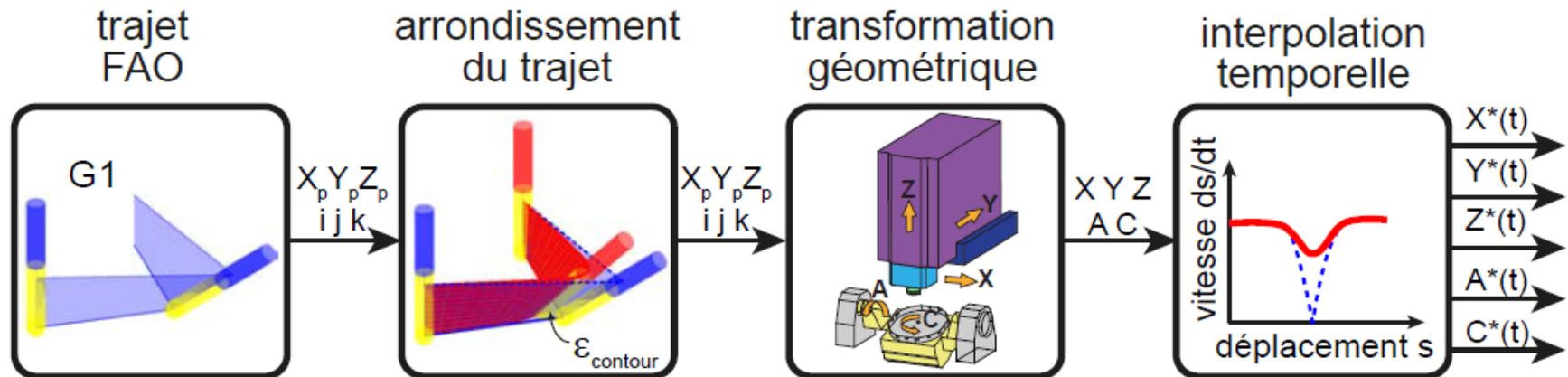
Analogie : pilote de course



Directeur de commande numérique	Pilote
Trajectoire d'usinage (code G) <i>Ex : Successions de segments G01</i>	Circuit
Interpolation spatiale <i>Détermination du trajet optimal pour respecter la trajectoire d'usinage</i>	Choix de la route à suivre <i>... pour éviter les sorties de route</i> <i>Ex : serrer dans les virages</i>
Interpolation temporelle <i>Détermination des consignes de vitesses des axes</i>	Choix des moments où accélérer et freiner
Asservissement	Pilotage en fonction des capacités du véhicule
Effet de l'usinage	Réaction de la route

Problématiques – Rôle du DCN

- Interpolation – Résumé



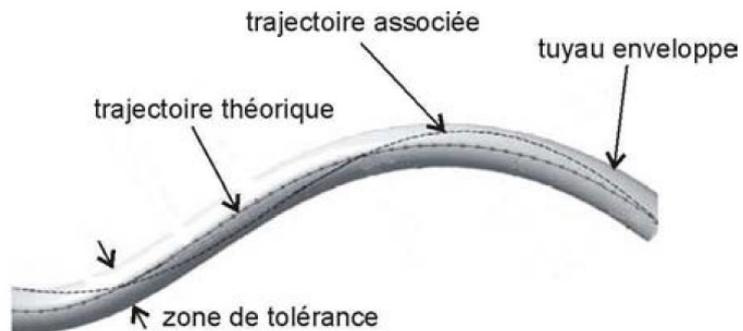
- Détermination du trajet : *route à suivre*
- et de la trajectoire : *pilotage sur le trajet choisi*
- Optimaux !

Problématiques – Rôle du DCN

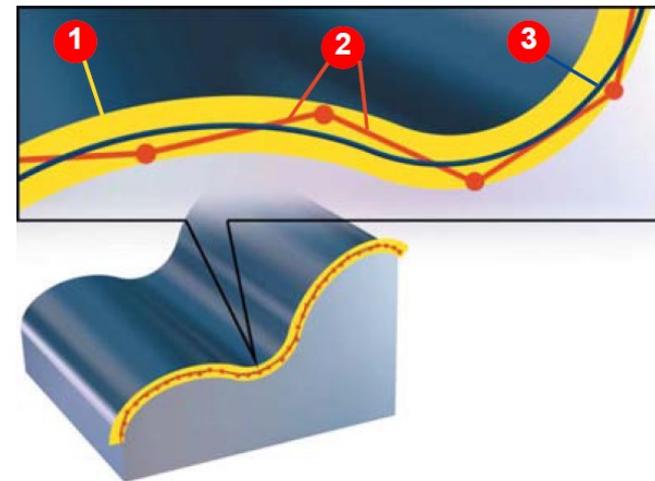


- **Interpolation spatiale**

1 - Détermination de la trajectoire idéale à imposer aux axes à partir des données de trajectoire issues de la CAO



Selon la bande de tolérance qui a été réglée **1** le compresseur regroupe une séquence d'instructions G1 **2** et comprime ces dernières en une spline **3**, qui est directement exécutable par la commande.



⇒ Perte d'information entre la FAO et les trajectoires machine

⇒ Influence sur la surface usinée : état de surface....

Problématiques – Rôle du DCN

- Transformation géométrique inverse :

Conversion des positions de l'outil de l'espace pièce

i.e. coordonnées X, Y, Z d'un point connu de l'outil et orientations i, j, k de son axe dans le repère lié à la pièce

À l'espace articulaire

i.e. positions des axes de la machine : axes de translation X, Y, Z et de rotation A, (B,) C

⇒ Problème non bijectif selon les architectures machines : existence de multiples solutions et de points critiques !

Ex : TGI des orientations i,j,k dans le repère pièce à l'espace articulaire d'une machine ACXYZ

	$i < 0$	$i = 0$	$i > 0$
$j < 0$	$A_1 = \arccos(k) \quad C_1 = -\arctan\left(\frac{i}{j}\right)$		
	$A_2 = -\arccos(k) \quad C_2 = -\arctan\left(\frac{i}{j}\right) + \pi$		
$j = 0$	$A_1 = \arccos(k) \quad C_1 = -\frac{\pi}{2}$	$A = 0$	$A_1 = \arccos(k) \quad C_1 = \frac{\pi}{2}$
	$A_2 = \arccos(k) \quad C_2 = \frac{\pi}{2}$	C non défini	$A_2 = \arccos(k) \quad C_2 = -\frac{\pi}{2}$
$j > 0$	$A_1 = \arccos(k) \quad C_1 = -\arctan\left(\frac{i}{j}\right) + \pi$		
	$A_2 = -\arccos(k) \quad C_2 = -\arctan\left(\frac{i}{j}\right)$		

Problématiques – Rôle du DCN

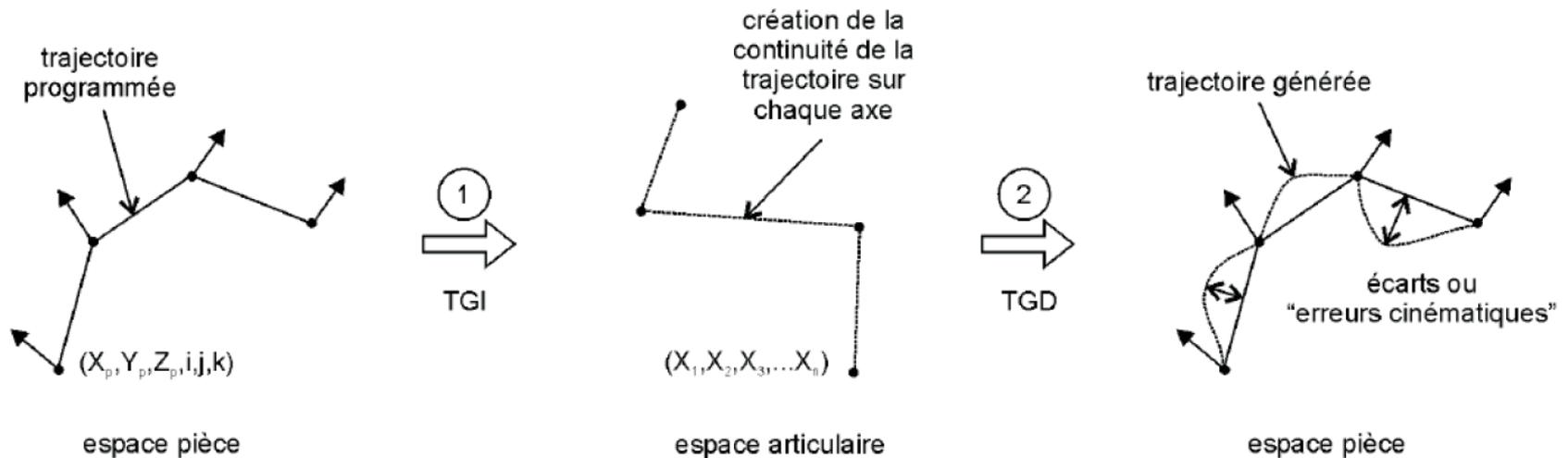


- **Interpolations spatiales et temporelles**

Le code ISO/G fourni à la machine correspond à une succession de points de l'espace reliés par des segments

⇒ Quelles vitesses faut-il imposer aux axes pour respecter le passage par ces positions ?

⇒ Risques d'écarts par rapport à la surface initialement définie



⇒ Le DCN réinterprète les trajectoires entre les points définis (interpolation spatiale) et détermine les vitesses de passage par ces points (interpolation temporelle)

Problématiques – Rôle du DCN



- L'interpolation peut-être réalisée à différents niveaux de la chaîne numérique, entraînant différentes qualités de résultats :

CAO	FAO	Post-pro.	CN	
			interpolation linéaire	Cas le plus répandu
surface NURBS	interpolation linéaire	interpolation linéaire	interpolation polynomiale	Interpolation à la volée par la CN
	interpolation polynomiale	interpolation polynomiale	interpolation polynomiale	Courbe native postprocesseur
		interpolation polynomiale	interpolation polynomiale	Courbe native FAO

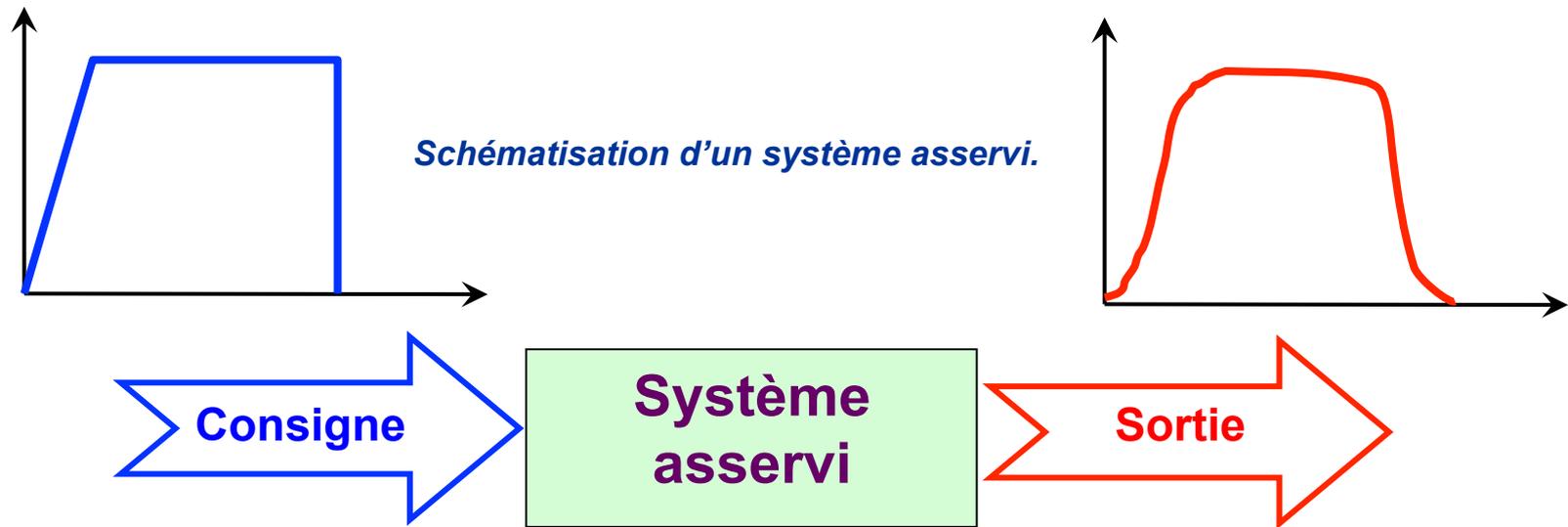
Problématiques – Rôle du DCN



- **Interpolation temporelle et asservissement**

Contrôle et limitation des vitesses/accélération/jerk

Système d'asservissement => effet retour de la réaction des axes (inertie...)



Problématiques – Rôle du DCN



- **Interpolation temporelle et asservissement**

Contrôle et limitation des vitesses/accélération/jerk

Système d'asservissement => effet retour de la réaction des axes (inertie...)

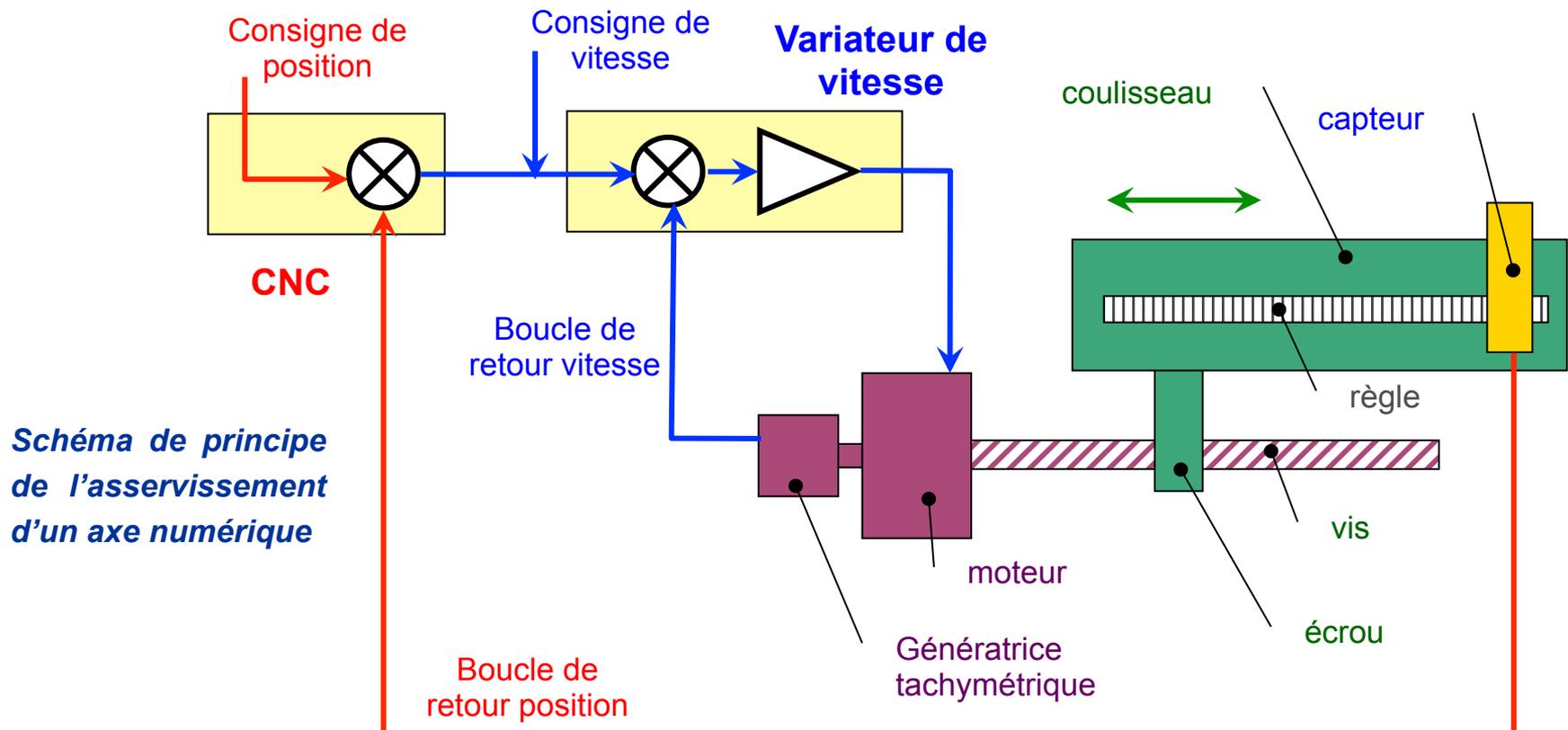


Schéma de principe de l'asservissement d'un axe numérique

Problématiques – Rôle du DCN



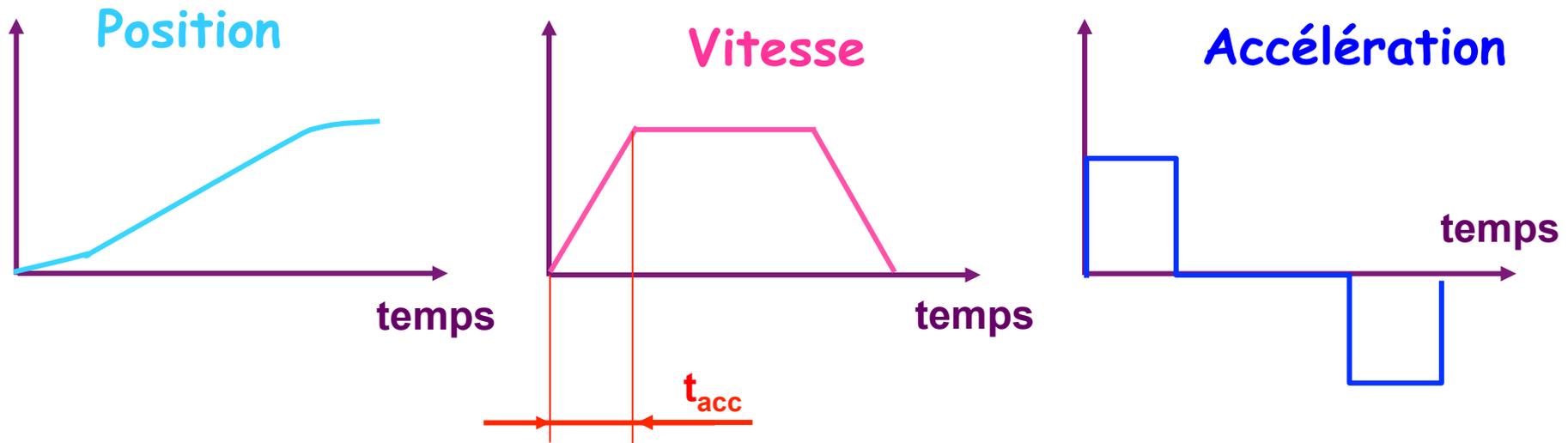
- **Interpolation temporelle et asservissement**

Contrôle et limitation des vitesses/accélération/jerk

Système d'asservissement => effet retour de la réaction des axes (inertie...)

Ex : loi de conduite fixant la vitesse maximum atteinte (V_f) et le temps d'accélération/décélération

=> Discontinuité des accélérations donc des efforts mis en jeu dans la commande de l'articulation de la machine



Problématiques – Rôle du DCN



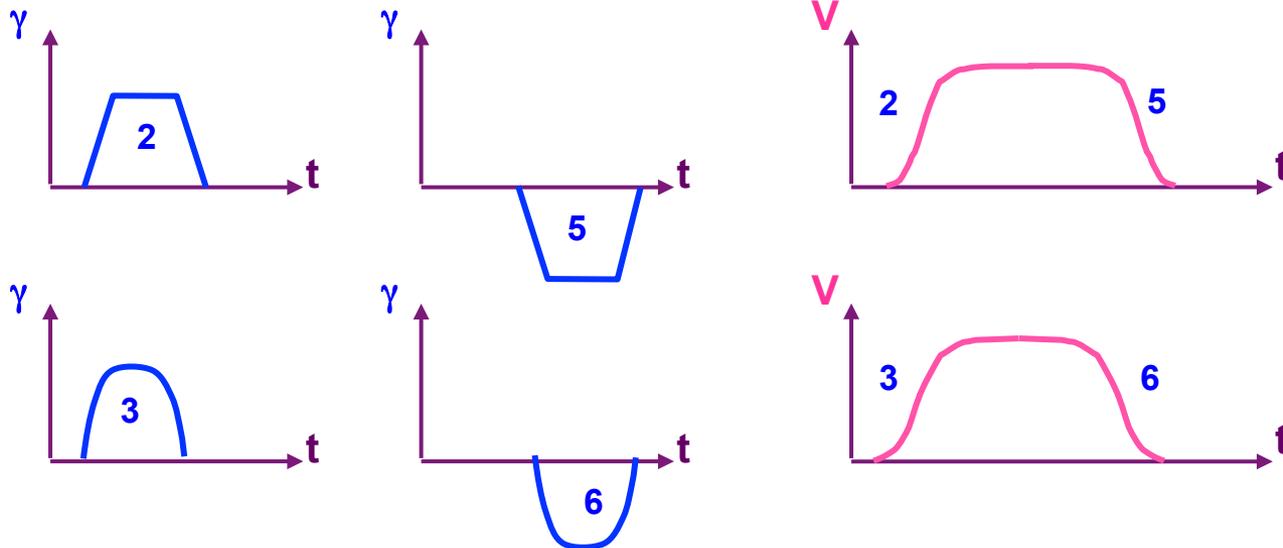
- **Interpolation temporelle et asservissement**

Contrôle et limitation des vitesses/accélération/jerk

Système d'asservissement => effet retour de la réaction des axes (inertie...)

Une loi en trapèze (profils 2,5) atténue ces effets tout en assurant une rapidité d'exécution.

Une loi en sinus (profils 3,6) offre la meilleure fiabilité mais avec une perte de rapidité

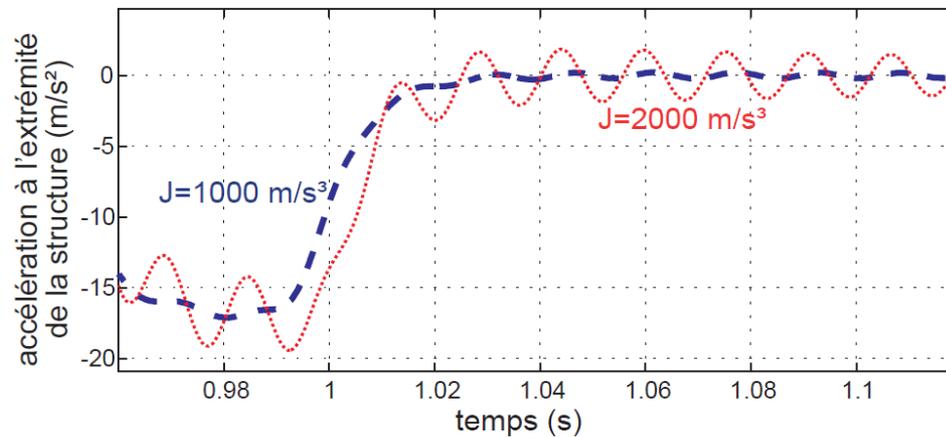
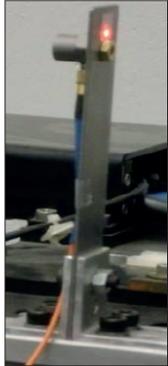


Problématiques – Machines Outils à Commande Numérique



- Exemple : effet de la limitation en jerk sur la vibration d'une structure usinée

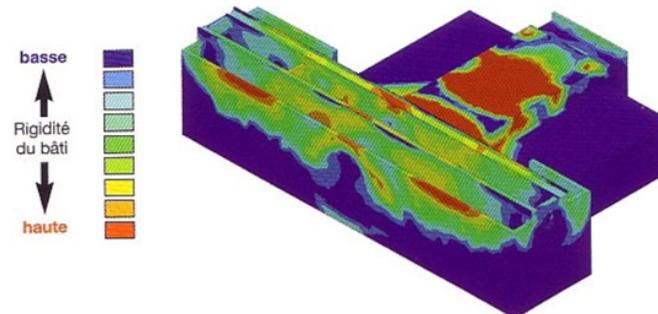
structure flexible



Source : Beudaert2013

Champ de rigidité du bâti d'une machine d'Usinage à Grande Vitesse

Source : <http://www.si.ens-cachan.fr>



Processus de fabrications des pièces usinées

- Plusieurs phénomènes viennent dégrader le lien entre la pièce définie (CAO) et la pièce usinée
- ⇒ Optimiser le processus d'usinage consiste à permettre de fabriquer, de manière répétable, une pièce se rapprochant au plus près de la CAO définie

Définition de la
pièce à
réaliser



Définition des
trajectoires
des outils



post-pro



Pilotage des
axes machine

MOCN



Usinage

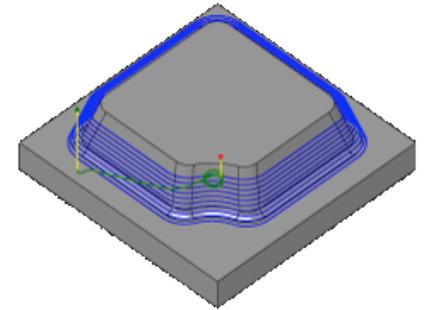
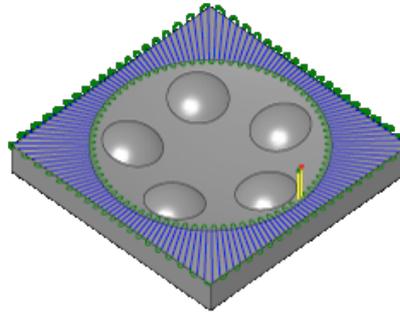
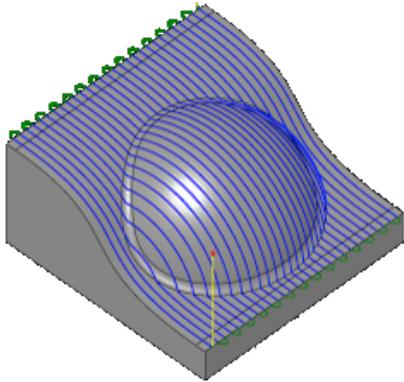


Objectifs de la FAO

- **Point de départ : définition (CAO) de la pièce.**
Hypothèse : réalisation de séries
⇒ Génération rapide des trajectoires outil
- **Vérification des trajectoires / aux contraintes.**
Temps de fabrication, état de surface, collisions, entrées/sorties...
- **Travail indépendant du centre d'usinage utilisé.**
- **Action humaine nécessaire : IA quasi nulle**
- **Grande variété de logiciels disponibles :**
Esprit / Powermill / NXCam / CATIA / TopCam ... Large panel
Prix, capacités, ergonomie...
- **Entrées**
géométrie finale, brut, architecture et description des MOCN, outils disponibles.
- **Sorties**
trajectoires, estimation du temps d'usinage et de la qualité de la surface.

Objectifs de la FAO

- Détermination des stratégies d'usinage...



Cycles traditionnels : poches, contournage, surfaçage....

Cycles 3D (*freeform sous Esprit*) : formes complexes, surfaces gauches, optimisation pour l'UGV

- **A choisir selon**

Le type de surface à réaliser

L'orientation de la rugosité voulue sur la pièce finale

Le temps d'usinage

La limitation des vibrations

....

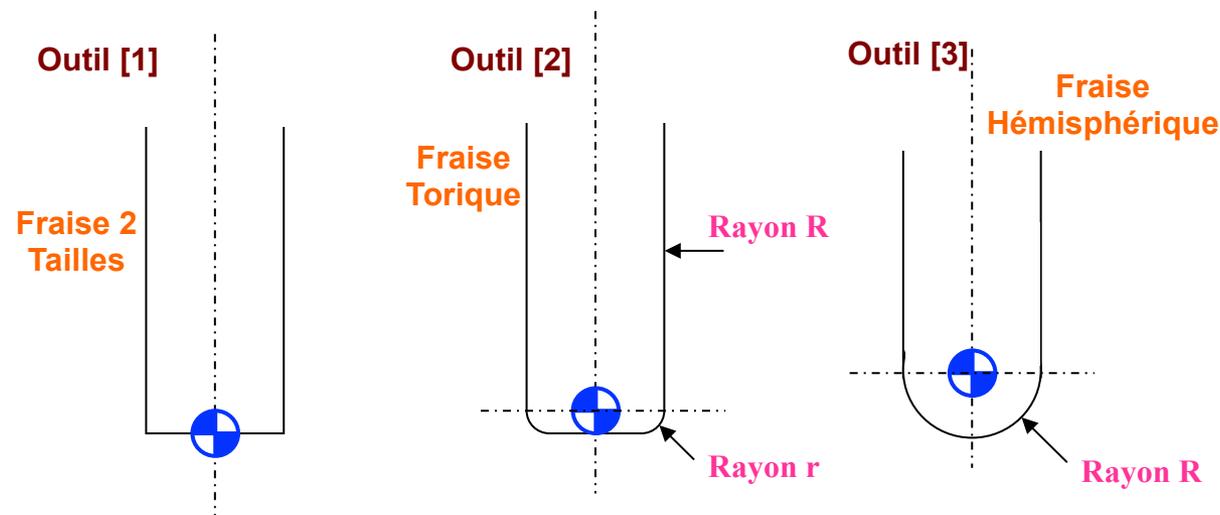
Objectifs de la FAO

- ... en prenant en compte l'interaction outil/pièce

Point de pilotage des outils

⇒ Pris en compte par le logiciel : nécessité de renseigner les dimensions des outils. Les compensations machines et usure de l'outil peuvent être ajustées par le DCN.

⇒ Problématique : point piloté \neq Point de contact outil/matière !



Point programmé. La jauge en longueur de l'outil sera définie en ce point.

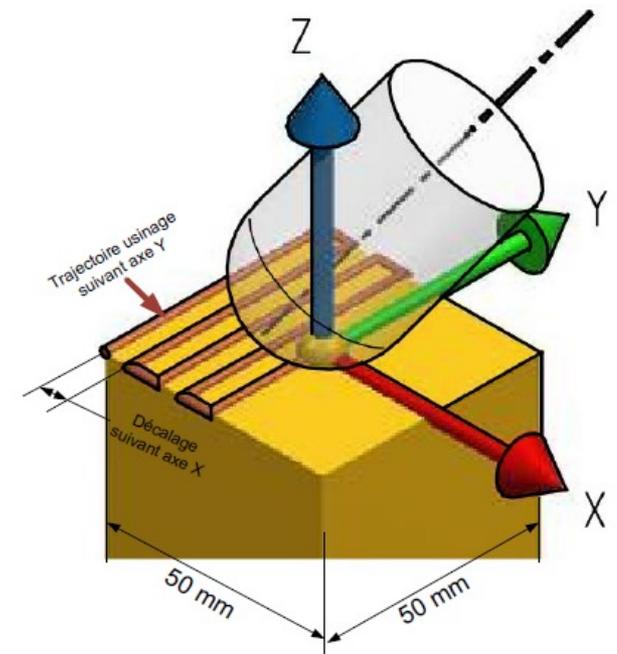
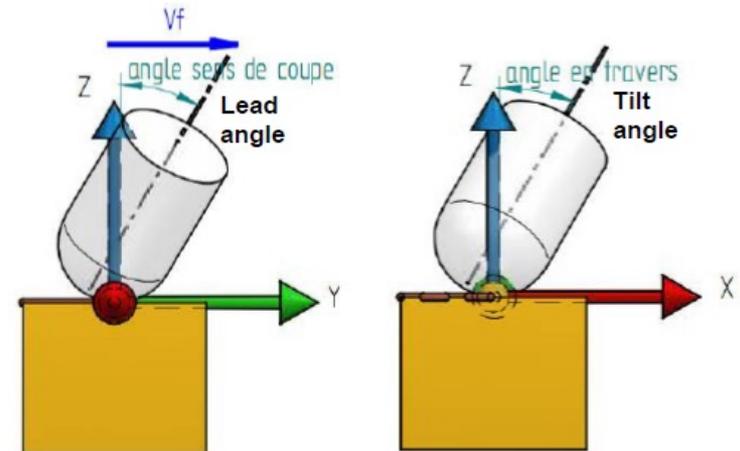
Influence du point de pilotage : un exemple

- **Usinage d'un plan en 5 axes avec une fraise boule :**

Exemple académique

Deux points de l'outil à prendre en compte :

- **Tool Center Point** : point piloté par la machine dont la position est connue
 - Point de contact outil-matière : + délicat à connaître *a priori* mais dont la trajectoire finale est celle que l'on souhaite imposer
 - Deux angles d'orientation de l'outil *tilt* et *lead* pour garantir de bonnes conditions d'usinage
- ⇒ Trajectoire finale du TCP (Esprit) dans repère pièce + mouvements machine



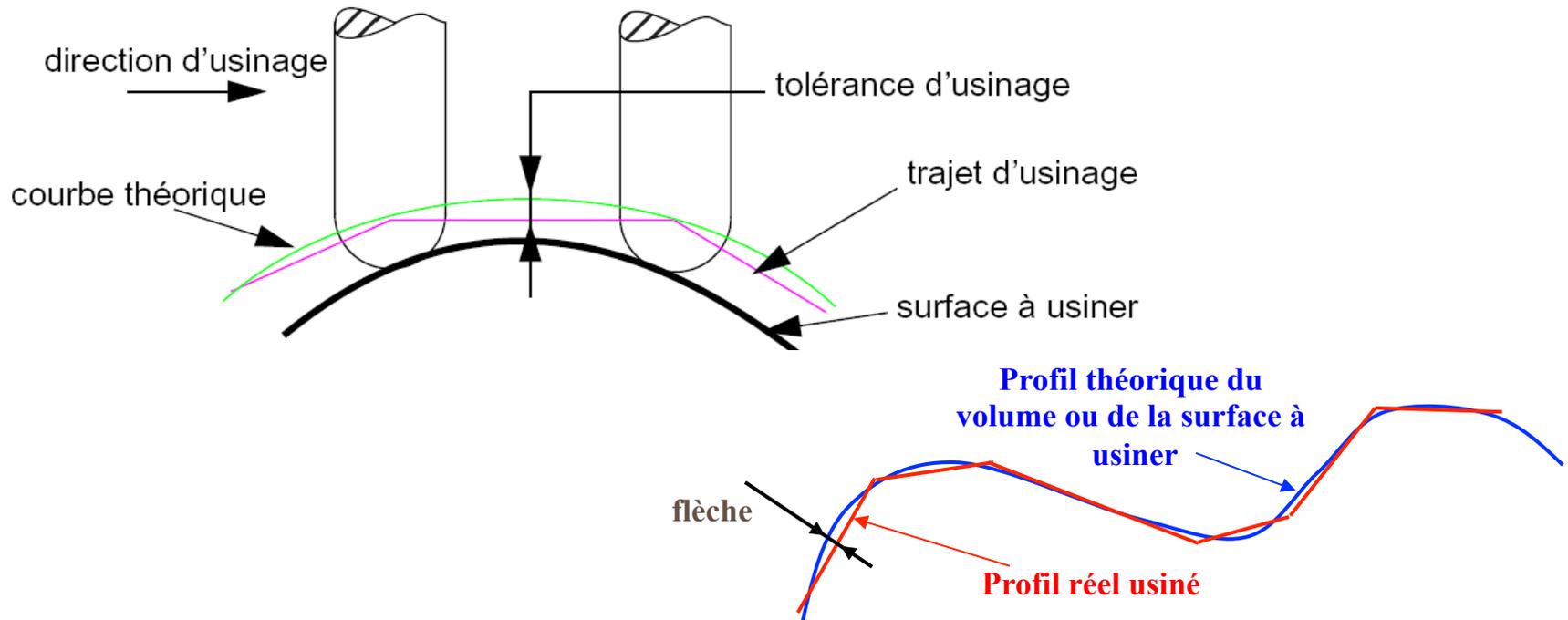
Objectifs de la FAO

- ... en prenant en compte l'interaction outil/pièce

Trajectoire réelle de l'outil en fonction des tolérances imposées

Tolérance à imposer entre la trajectoire théorique (*parfaite* et définie par une infinité de points) et la trajectoire qui sera envoyée à la machine (*trajet d'usinage*)

⇒ Renseigner la tolérance souhaitée lors du calcul des trajectoires !



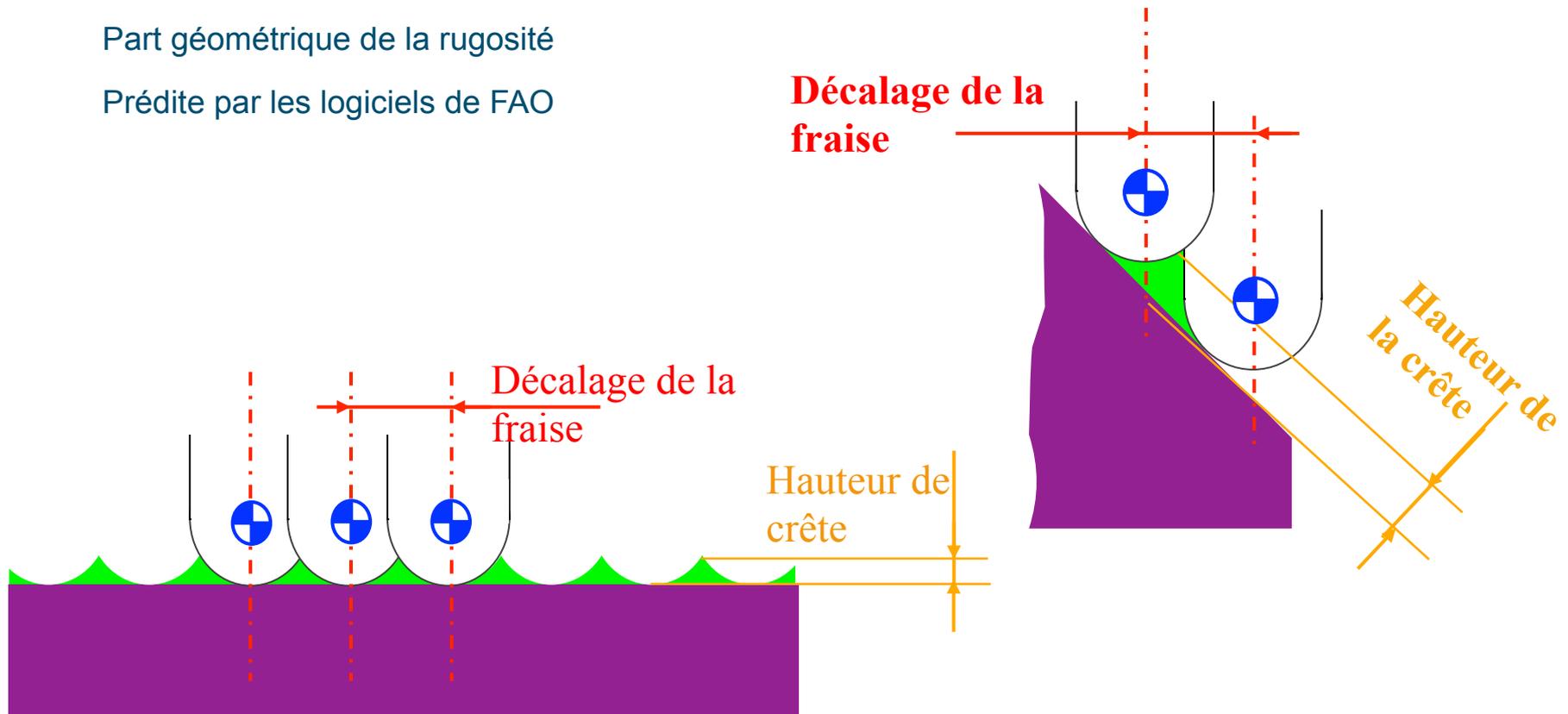
Objectifs de la FAO

- ... en prenant en compte l'interaction outil/pièce

Hauteurs de crêtes imposées

Part géométrique de la rugosité

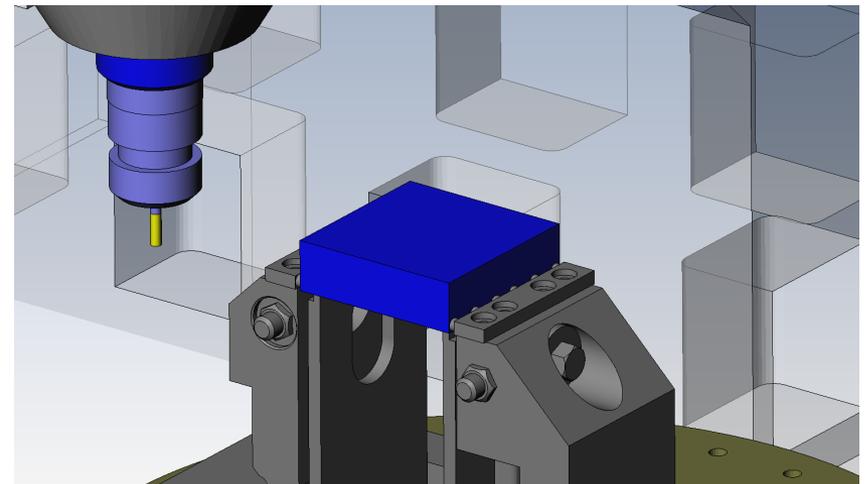
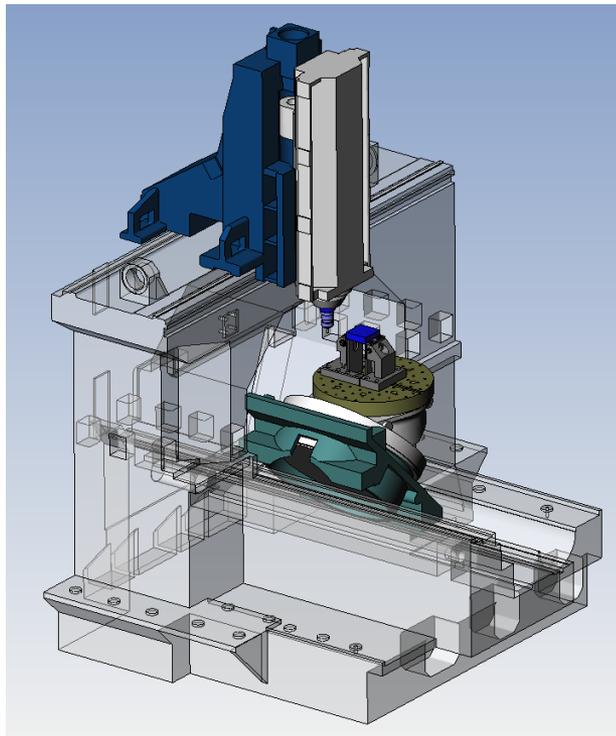
Prédite par les logiciels de FAO



FAO – Quelques exemples

- **Sur Esprit :**

Définition de l'environnement machine :

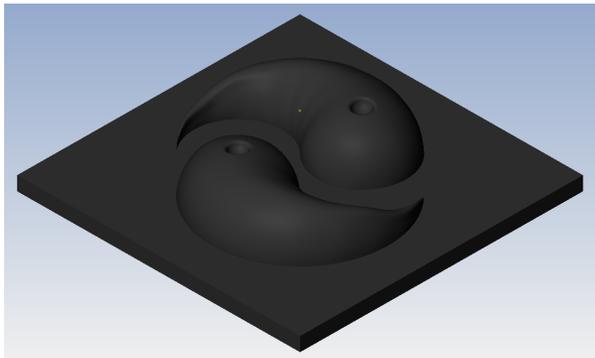


Choix des stratégies ! => cf. TD en autonomie

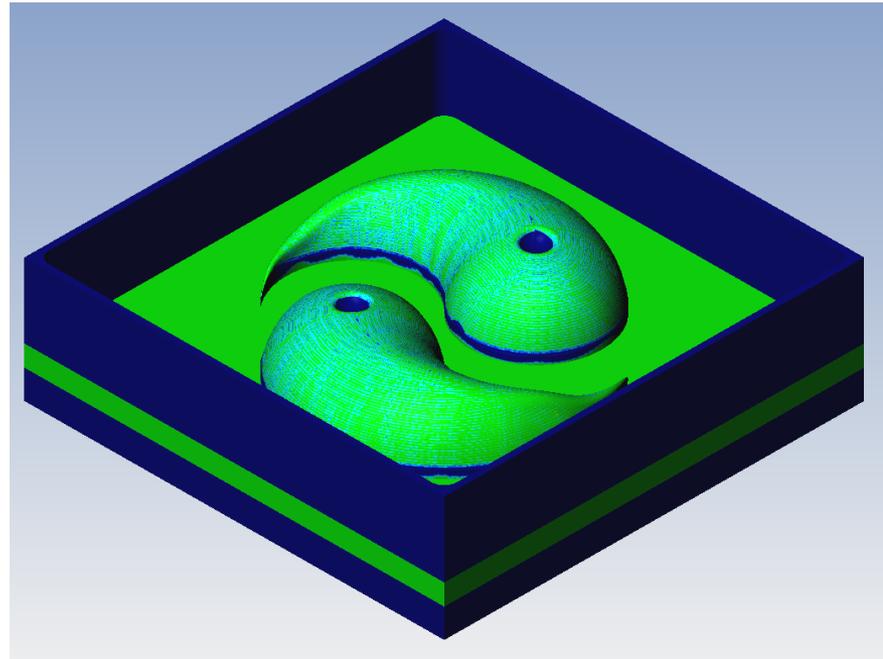
FAO – Quelques exemples

- **Sur Esprit :**

Simulation de l'usinage (calcul des trajectoires détection des collisions, estimation du temps, calcul du résultat de l'usinage)



⇒ Choix des stratégies

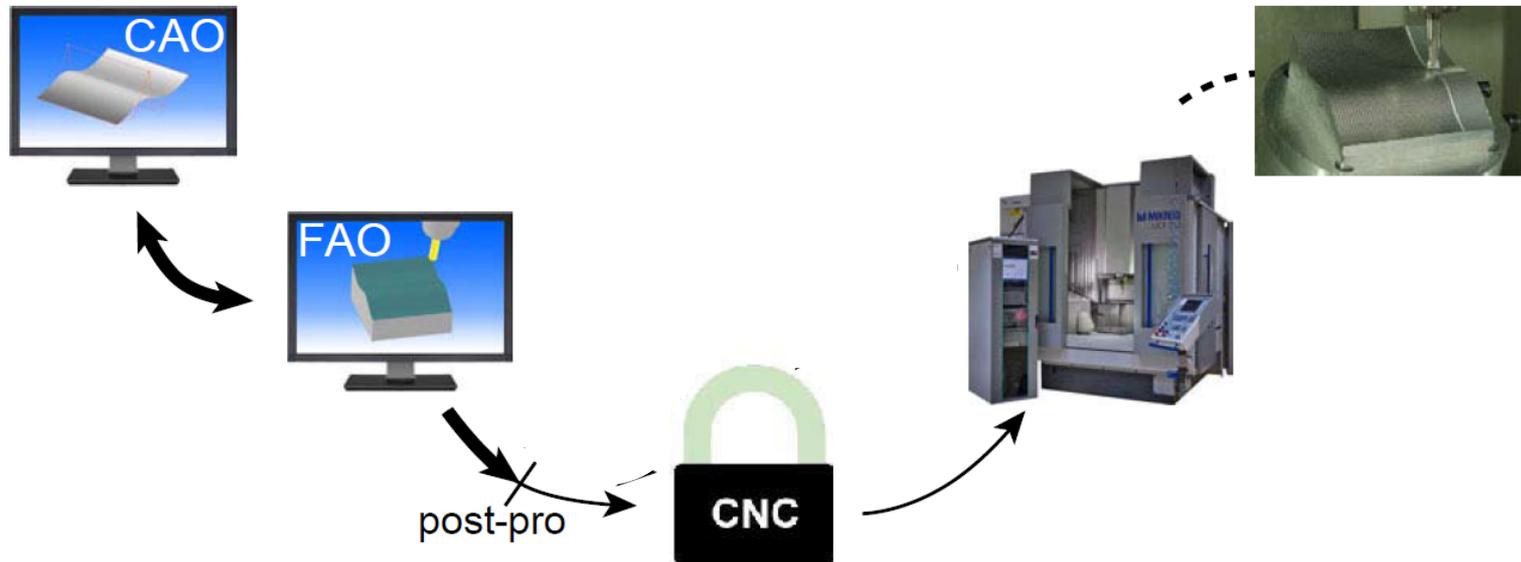


Dernière étape !

- **Postprocesseur :**
**Transformation des données du logiciel de FAO (cycles, trajets...)
en code interprétables par les machines (code G, ISO, APT)**
- **Tout n'est pas géré :**
 - Aucun aspect dynamique : pas de prise en compte des accélérations, efforts
 - Pas de déformation des pièces
 - Pas de vérification des capacités machines (hors course des axes)

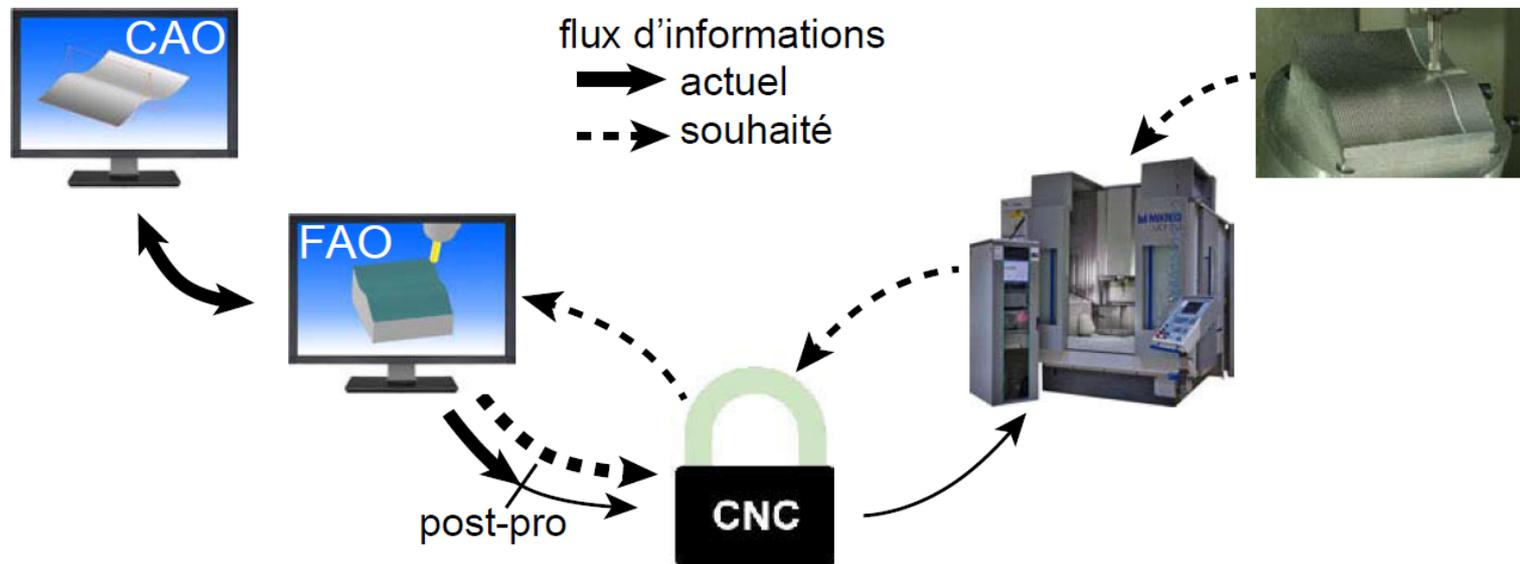
Conclusion

- Logiciels de FAO → pas I.A. ! Présence humaine nécessaire
 - Multiples étapes dans la chaîne numérique
- ⇒ Multiples sources d'erreurs et de pertes d'information possibles
- ⇒ Pièce usinée ≠ CAO



Conclusion

- Logiciels de FAO → pas I.A. ! Présence humaine nécessaire
 - Multiples étapes dans la chaîne numérique
- ⇒ Multiples sources d'erreurs et de pertes d'information possibles
- ⇒ Pièce usinée ≠ CAO



Quelques sources bibliographiques

- **Courbes et Surfaces de Bézier :**

<http://nonifier.ovh.org/wordpress/?p=20>, consulté en mars 2015

- **aluminium.matter.org.uk**

- **Techniques de l'ingénieur :**

Machines-Outils – Présentation, Principaux organes, Systèmes de Fabrication et Exemples

Fabrication assistée par ordinateur (FAO)

Vibrations d'usinage

Courbes et surfaces pour la CFAO

Commande numérique des machines-outils

Usinage à grande vitesse

- **Quelques thèses :**

Company, O. (2000). *Machines-outils rapides à structure parallèle. Méthodologie de conception, applications et nouveaux concepts*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.

Lavernhe, S. (2006). *Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoires 5 axes UGV*. Thèse de doctorat, École Normal Supérieure de Cachan.

Pechard, P.-Y. (2009). *Génération de trajectoires d'usinage grande vitesse 5 axes par flanc d'outil : intégration d'un critère de fluidité*. Thèse de doctorat, École Normal Supérieure de Cachan.

Beudaert, X. (2013). *Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes*, École Normal Supérieure de Cachan.